

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

LIGAÇÕES ESTRUTURAIS DE
MADEIRA POR ADESIVOS

Eng^o EDGAR V. MANTILLA CARRASCO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Cesar Hellmeister - Orientador (EESC-USP)
Prof. Dr. Pericles Brasiliense Fusco (POLI-USP)
Prof. Dr. Carlitos Calil Júnior (EESC-USP)



SÃO CARLOS, 1984

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

LIGAÇÕES ESTRUTURAIS DE
MADEIRA POR ADESIVOS

Engº EDGAR V. MANTILLA CARRASCO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

SÃO CARLOS, 1984

Aos meus pais
Froilán Mantilla Zeballos
Blanca Carrasco de Mantilla

aos meus filhos
Edgar Rodo Mantilla
Gina Rodo Mantilla

e em especial à minha esposa
Judy Norka Rodo de Mantilla

pela paciência,
compreensão e incentivo

AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Cesar Hellmeister pela valiosa orientação em todas as etapas deste trabalho.

Aos funcionários do LaMEM pelo apoio na elaboração dos corpos de prova e na realização dos ensaios.

A todos os professores da Escola de Engenharia de São Carlos - USP pelos ensinamentos recebidos.

Aos meus pais, familiares e à minha esposa pela motivação, força, paciência e dedicação.

A todos os colegas da EESC-USP e da Escola de Engenharia da UFMG que incentivaram o meu trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e à Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que financiaram meus estudos de Pós-graduação.

RESUMO

As características essenciais para a formação de uma ligação adesiva, considerando, a adesão específica e química iniciam este trabalho. Os tipos de adesivos; as suas características e a compatibilidade com os aderentes são analisadas.

São apresentadas análises teóricas sobre ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão, na tração, na flexão e na torção, considerando teorias clássicas da resistência dos materiais e teorias levando em consideração a compatibilização das deformações.

A escolha dos modelos de ensaio foi realizada através de um estudo dos vários modelos apresentados em especificações nacionais e internacionais.

Através da realização de várias séries de ensaios de ligações adesivas e de caracterização da madeira, foram verificadas: as hipóteses teóricas adotadas, a influência da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada nas diversas características mecânicas da ligação adesiva, a influência da tração normal à linha adesiva, a influência da variação da temperatura e da umidade relativa do ar na ligação adesiva e a influência da direção das fibras em relação à aplicação da carga. Uma análise estatística adequada permitiu eliminar algumas destas influências e determinar as várias resistências características da ligação adesiva.

Finalmente é proposto um método de dimensionamento de ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão, na tração, na flexão e na torção, considerando a direção das fibras.

ABSTRACT

This paper begins with the study of the essential characteristics of an adhesive joining, taking into account the specific and chemical bonds. The different types of adhesives, its properties and the compatibility with the material to be glued are considered.

Theoretical analyses concerning adhesive joinings under shear arising from compression, tension, bending and torsion, and according to the classical theories of the Strength of Materials and to the compatibility of deformations are considered.

National and international Standards were studied to choose the testing specimens.

A great number of tests of adhesive joinings were made. Specimens of the timber used were tested to characterize its properties. The theoretical hypotheses adopted were verified. The influence of the humidity, of the density, of the percentage of the glued area in the mechanical characteristics of the adhesive joining were taken into account. The effects arising from tension normal to the adhesive line, from the variation of temperature, from the relative humidity in the adhesive joining and from the angle between the fibers and the line of loading are considered. A careful statistical analysis eliminated some of the influences above, and the various characteristic strengths of the adhesive joinings were determined.

A method of designing adhesive joinings under shear arising from compression, tension, bending and torsion is proposed, taking into account the direction of the fibers.

INDICE

SIMBOLOGIA	1
I - GENERALIDADES	6
1 - Introdução	6
2 - Resenha histórica	21
3 - Características dos materiais utilizados em uma ligação adesiva	23
3.1 - A madeira	24
3.2 - O adesivo	28
3.3 - Classificação dos adesivos	34
3.3.1 - De acordo com a sua aplicação e cura	34
3.3.2 - De acordo com a sua composição química	36
3.3.3 - De acordo com o custo	36
3.4 - Tipos de adesivos	38
4 - Características para a formação de uma boa ligação adesiva.	41
4.1 - Características essenciais	41
4.2 - Princípios gerais de uma ligação adesiva	43
4.2.1 - Quanto à adesão	43
4.2.2 - Quanto à superfície dos aderentes	43
4.2.3 - Quanto à condição física e aplicação do adesivo	44
5 - Seleção dos adesivos em função dos aderentes	44
6 - Influência das intempéries nas ligações adesivas	46
7 - Vantagens das ligações adesivas	46
8 - Tipos de ensaios e especificações	49
II - BASE TEÓRICA PARA ESCOLHA DE MODELOS E MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA	51
1 - Introdução	
2 - Estudo da resistência das ligações adesivas	51
2.1 - Ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão	55
2.1.1 - Análise teórica	55
2.1.2 - Teoria da ruptura mecânica linear	62
2.2 - Ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na tração	65

2.2.1 - Análise teórica das tensões	65
2.3 - Ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na flexão e na torção	67
2.3.1 - Análise dos esforços na flexão	68
2.3.1.1 - Análise básica	68
2.3.1.2 - Analogia com viga composta	71
2.3.2 - Análise dos esforços na torção	75
2.3.2.1 - Análise básica	75
2.3.2.2 - Teoria de Segerlind na torção	79
3 - Introdução ao processo de verificação experimental	84
3.1 - Materiais	84
3.2 - Aparelhos para montagem e ensaios dos modelos	86
3.3 - Modelos de ensaio de corpos de prova para adesivos	90
3.3.1 - Modelos adotados	95
3.3.2 - As séries	100
 III - CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO - ESCALA NATURAL	 102
1 - Introdução	
2 - Escolha das dimensões do modelo	102
3 - Ensaio de afinidade do adesivo	107
4 - Ensaio para determinação da distribuição de tensão e deformação transversal à linha adesiva	111
4.1 - Método de ensaio	111
5 - Ensaio de cisalhamento na compressão em modelos em escala natural	117
5.1 - Método de ensaio	117
5.2 - Ensaios de caracterização da madeira	119
5.3 - Obtenção e tratamento de dados	122
5.4 - Tratamento estatístico	125
5.4.1 - Módulo de deformação da ligação	128
5.4.1.1 - Adesivo à base de resorcinol	128
- Influência da umidade e da densidade na porcentagem de área colada	137
- Correção do módulo de defor- mação	139
- Módulo característico de de- formação e correlações	140

5.4.1.2 - Adesivo à base de epoxi	142
- Influência da umidade e da densidade na porcentagem de área colada	146
- Correção do módulo de deformação da ligação	149
- Módulo característico de deformação e correlações	149
5.4.2 - Tensão de cisalhamento da ligação adesiva	151
5.4.2.1 - Adesivo à base de resorcinol	151
- Correção da tensão de cisalhamento	155
- Resistência característica	156
5.4.2.2 - Adesivo à base de epoxi	157
- Correção da tensão de cisalhamento	161
- Resistência característica	162
5.4.3 - Tensão de tração e compressão normal à linha adesiva	163
5.4.3.1 - Adesivo à base de resorcinol	163
5.4.3.2 - Adesivo à base de epoxi	169
6 - Porcentagem característica de área colada	175
IV - DURABILIDADE DA LIGAÇÃO ADESIVA	177
1 - Introdução	
2 - O ensaio	177
2.1 - Coleção e tratamento de dados	179
2.2 - Tratamento estatístico	181
2.2.1 - Variabilidade das características mecânicas da ligação	181
2.2.2 - Variabilidade das tensões de cisalhamento e compressão paralela da madeira	190
V - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DAS FIBRAS NO CISALHAMENTO	193
1 - Introdução	
2 - Cisalhamento da linha adesiva na compressão inclinada	

às fibras	193
2.1 - Determinação da carga de ruptura no modelo	193
2.2 - O ensaio	195
2.3 - Método de ensaio	196
2.4 - Coleção e tratamento de dados	197
2.5 - Tratamento estatístico	198
3 - Ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na tração	205
3.1 - Método de ensaio	207
3.2 - Coleção e tratamento de dados	209
3.3 - Tratamento estatístico	210
4 - Ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na flexão	216
4.1 - Método de ensaio	218
4.2 - Determinação das tensões	220
4.3 - Coleção e tratamento de dados	221
4.4 - Tratamento estatístico	224
5 - Ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na torção	229
5.1 - Método de ensaio	231
5.2 - Determinação das tensões	233
5.3 - Coleção e tratamento de dados	235
5.4 - Tratamento estatístico	235
6 - Análise de experimentação fatorial e de regressão	242
VI - INFLUÊNCIA DA TRAÇÃO NORMAL NO CISALHAMENTO	249
1 - Introdução	
2 - O ensaio	249
2.1 - Coleção e tratamento de dados	252
2.2 - Tratamento estatístico	255
VII - ENSAIOS COMPLEMENTARES	259
1 - Introdução	
2 - Ensaio de tração normal da ligação adesiva e da madeira	259
3 - Ensaio de fendilhamento da ligação adesiva e da madeira	261
4 - Cisalhamento e compressão da madeira	263

4.1 - Influência da umidade e da densidade na tensão de cisalhamento e compressão da madeira	263
4.2 - Influência da inclinação das fibras da madeira na tensão de cisalhamento e compressão	273
VIII - CONCLUSÕES - SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO - PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS	280
1 - Introdução	
2 - Conclusões	280
3 - Sugestões para a continuação do trabalho	284
4 - Proposta de um método de dimensionamento das ligações adesivas	285
4.1 - Dimensionamento de ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão	286
4.2 - Dimensionamento de ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na tração	289
4.3 - Dimensionamento de ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na flexão	290
4.4 - Dimensionamento de ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na torção	292
4.5 - Dimensionamento de ligações adesivas solicitadas à tração normal às fibras	294
APÊNDICE A - TIPOS DE ADESIVOS	296
1 - Adesivos inorgânicos	296
2 - Colas animais	298
2.1 - Composição química	299
2.2 - Tipos	300
2.2.1 - Colas de pele	300
2.2.2 - Cola de cartilagem	301
3 - Colas de peixe	303
4 - Adesivos de caseína	305
5 - Adesivos de soja	310
6 - Adesivos de sangue	313
7 - Adesivos de amido	315
8 - Adesivos celulósicos	316
9 - Adesivos de borracha	317
10 - Adesivos de resina fenólica	321

11 - Adesivos de resorcinol e fenol-resorcinol-formaldeído	325
12 - Adesivos de urea-formaldeído	330
13 - Adesivos de melamina-formaldeído	334
14 - Adesivos de resina epoxi	337
15 - Adesivos de acetato de polivinila	339
APÊNDICE B - CARACTERÍSTICAS DOS ADESIVOS E DOS ADERENTES	342
1 - Parâmetros de solubilidade	342
2 - Extensão	345
3 - Rugosidade	346
4 - Porosidade	347
5 - Difusão	349
6 - Deformação e fluxo - reologia	349
7 - Espessura	351
8 - Pressão	351
APÊNDICE C - DEFINIÇÃO DOS FATORES K_A E K_B	353
APÊNDICE D - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES À LINHA ADESIVA	355
APÊNDICE E - ANÁLISE ESTATÍSTICA	357
1 - Elementos estatísticos	357
2 - Comparação de séries de dados	361
2.1 - Comparação de pares de indivíduos	361
2.2 - Comparação de grupos de indivíduos	363
3 - Regressão linear múltipla	365
3.1 - Montagem do modelo	365
3.2 - Análise de variância	368
3.3 - Teste para existência da regressão teste F	369
3.4 - Teste das variáveis envolvidas teste t	370
3.5 - Análise de resíduos	371
3.6 - Intervalo de confiança	374
3.7 - Teste de Durbin-Watson	375
4 - Análise de experimentação fatorial	380
APÊNDICE F - CORREÇÕES DOS VALORES OBSERVADOS	384
ANEXO - QUADROS 1 até 34	388
BIBLIOGRAFIA	431

SIMBOLOGIA

- γ_a → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva, função do tipo de adesivo e espécie de madeira.
- γ_{aa} → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva à base de resina epoxi.
- γ_{ac} → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva à base de resina resorcinol.
- γ_{ea} → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva à base de resina epoxi, devido a: defeitos de execução, defeitos na preparação do adesivo, tempos indevidos de espera e de penetração, defeitos de preparação das superfícies, umidade excessiva, etc.
- γ_{ec} → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva à base de resina resorcinol, com as mesmas considerações expostas acima.
- γ_{paa} → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva à base de resina epoxi, devido à porcentagem de área colada efetiva.
- γ_{pac} → coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva à base de resina resorcinol, devido à porcentagem de área colada efetiva.
- γ_f → coeficiente de segurança das solicitações.
- τ → tensão de cisalhamento
- τ_w → tensão de cisalhamento da madeira
- τ_{ac} → tensão de cisalhamento na linha adesiva na compressão
- τ_{at} → tensão de cisalhamento na linha adesiva na tração
- τ_{ab} → tensão de cisalhamento na linha adesiva na flexão
- τ_{ato} → tensão de cisalhamento na linha adesiva na torção
- τ_o → tensão de cisalhamento na linha adesiva na solicitação o blíqua.
- τ_{acp} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras paralelas.
- τ_{acn} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras normais.
- τ_{ace} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras inclinadas.

- τ_{atp} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras paralelas.
 τ_{atn} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras normais.
 τ_{ate} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras inclinadas.
 τ_{abp} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras paralelas.
 τ_{abn} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras normais.
 τ_{abe} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras inclinadas.
 τ_{atop} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras paralelas.
 τ_{aton} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras normais.
 τ_{atoe} → tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras inclinadas
 σ → tensão de compressão ou de tração.
 σ_{wc} → tensão de compressão da madeira.
 σ_{wt} → tensão de tração da madeira.
 σ_{wtn} → tensão de tração normal da madeira
 σ_{wcn} → tensão de compressão normal da madeira.
 σ_{wf} → tensão de fendilhamento da madeira.
 σ_{tn} → tensão de tração normal à linha adesiva.
 σ_{cn} → tensão de compressão normal à linha adesiva.
 σ_{af} → tensão de fendilhamento da ligação adesiva.
 σ_{atn} → tensão de tração normal às fibras na ligação adesiva.
 f_{wc} → resistência da madeira à compressão paralela às fibras.
 f_{ws} → resistência da madeira ao cisalhamento.
 f_{wcn} → resistência da madeira à compressão normal às fibras.
 f_{wtn} → resistência da madeira à tração normal às fibras.
 f_{atnk} → resistência característica da ligação adesiva à tração normal às fibras.
 f_{afk} → resistência característica da ligação adesiva ao fendilhamento.
 f_{wck} → resistência característica da madeira à compressão paralela.
 f_{wsk} → resistência característica da madeira ao cisalhamento.

- f_{wcpk} → resistência característica da madeira à compressão paralela às fibras.
- f_{wcnk} → resistência característica da madeira à compressão normal às fibras.
- f_{wcek} → resistência característica da madeira à compressão inclinada às fibras.
- f_{wspk} → resistência característica da madeira ao cisalhamento com as fibras paralelas.
- f_{wsnk} → resistência característica da madeira ao cisalhamento com as fibras normais.
- $f_{wsøk$ → resistência característica da madeira ao cisalhamento com as fibras inclinadas.
- f_{sck} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão.
- f_{scpk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão paralela às fibras.
- f_{scnk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão normal às fibras.
- f_{scek} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão inclinada às fibras.
- f_{stpk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração paralela às fibras.
- f_{stnk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração normal às fibras.
- $f_{støk$ → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração inclinada às fibras.
- f_{sbpk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras paralelas.
- f_{sbnk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras normais.
- $f_{sbøk$ → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras inclinadas.
- f_{stopk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras paralelas.
- f_{stonk} → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras normais.
- $f_{stoøk$ → resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras inclinadas.
- f_{cnk} → resistência característica da linha adesiva à compressão

normal.

- f_{tnk} → resistência característica da linha adesiva à tração normal.
- f_{wtnd} → resistência de cálculo da madeira à tração normal às fibras.
- f_{wcnd} → resistência de cálculo da madeira à compressão normal às fibras.
- f_{atnd} → resistência de cálculo da ligação adesiva à tração normal às fibras.
- f_{scpd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na compressão paralela às fibras.
- f_{scnd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na compressão normal às fibras.
- f_{sced} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na compressão inclinada às fibras.
- f_{stpd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na tração paralela às fibras.
- f_{stnd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na tração normal às fibras.
- f_{sted} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na tração inclinada às fibras.
- f_{sbpd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras paralelas.
- f_{sbnd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras normais.
- f_{sbed} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras inclinadas.
- f_{stopd} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras paralelas.
- f_{stond} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras normais.
- f_{stoed} → resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras inclinadas.
- f_{tnd} → resistência de cálculo da linha adesiva à tração normal.
- S → solicitação.
- S_k → solicitação característica.
- S_d → solicitação de cálculo
- S_{gk} → solicitação característica da carga permanente
- S_{qk} → solicitação característica da carga acidental

- S_{ek} → solicitação característica da deformação específica.
- A_c → área colada.
- A_s → área de cisalhamento.
- D → densidade.
- E → módulo de elasticidade.
- E_{wcn} → módulo de elasticidade da madeira na compressão normal às fibras.
- E_{wtn} → módulo de elasticidade da madeira na tração normal às fibras.
- L_c → comprimento da linha adesiva.
- MD → módulo de deformação (coeficiente de rigidez da ligação).
- MD_k → módulo característico de deformação.
- P_{ac} → porcentagem de área colada.
- P_{acck} → porcentagem característica de área colada na ligação à base de resina resorcinol.
- P_{acak} → porcentagem característica de área colada na ligação à base de resina epoxi.
- U → umidade.

CAP 01 - GENERALIDADES

1 - INTRODUÇÃO

A madeira vem sendo utilizada desde os primórdios da história do homem, desde os primeiros passos de qualquer conquista técnica: a primeira arma, como elemento de ataque e defesa, a primeira moradia coberta de galhos e folhagens, a primeira coluna, a primeira roda, o primeiro veículo, o primeiro barco, o primeiro avião... Com o aparecimento do aço, do concreto armado e protendido, a aplicação de peças simples de madeira submetidas a compressão e tração ou flexão vem sendo parcialmente preterida por engenheiros e arquitetos.

Entretanto a união de peças serradas de madeira através de elementos de ligação formando peças múltiplas, peças compostas e peças laminadas tem aumentado a aplicabilidade estrutural da madeira.

O adesivo aplicado como material ligante, com a propriedade de passar do estado líquido para o sólido, e às vezes de reagir com a celulose da madeira, formando um elemento sólido, tem e acredita-se terá grandes aplicações na composição de peças múltiplas, peças compostas, peças de madeira laminada, chapas de madeira e madeira aglomerada aplicáveis em estruturas funcionais bonitas e de elevada resistência.

No âmbito internacional a aplicação do adesivo é indispensável para a concepção deste tipo de estruturas e se encontra em grande desenvolvimento. Os exemplos apresentados a seguir colocam a madeira em destaque na aplicação estrutural.

Arcos e Pórticos de Madeira Laminada

As estruturas de madeira laminada mais comuns são os arcos de madeira, devido à facilidade de preparação das lâminas de madeira de pequena espessura e de montagem de peças estruturais de grandes dimensões e nas mais variadas formas, figuras 1, 2, 3, 4 e 5.



Figura 1 - Arco de 90 metros de corda fabricado pela Timber Structures; Inc. (1)



Figura 2 - Pórtico utilizado na construção da British Railways Diesel Electrical Depot, Longsight, Manchester, fabricado pela Kingston Ltda.(2).

(1) OBERG, Fred R. - Heavy Timber Construction, American Technical Society, 1963.

(2) CHUGG, W.A. - Glulam: The Theory and Practice of the Manufacture of Glued Laminated Timber Structures, London, Ernest Benn, 1964.

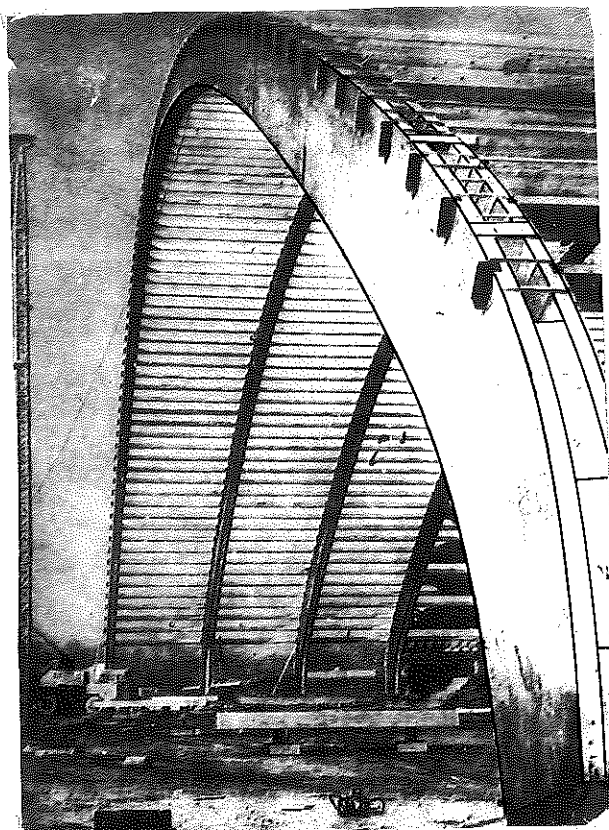


Figura 3 - Palácio dos Esportes de Joinville-França vista durante a construção (3).

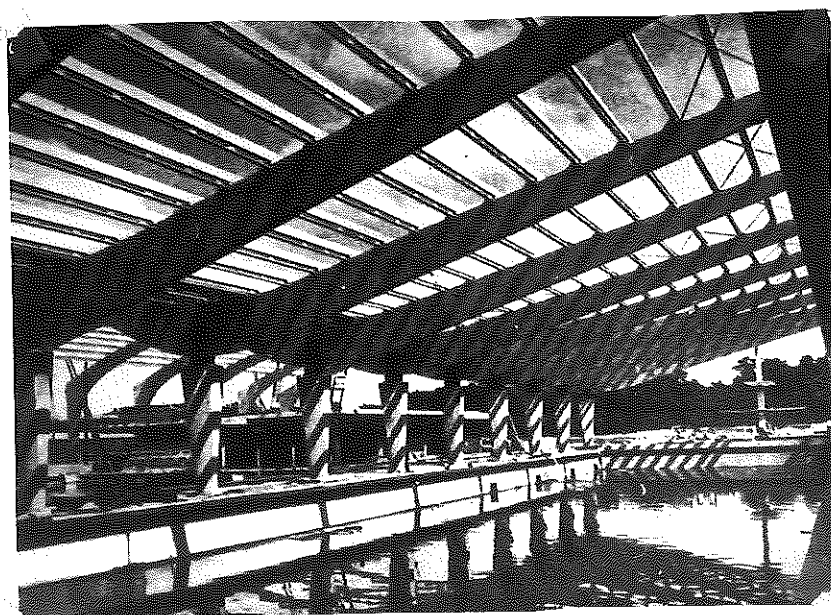


Figura 4 - Piscina coberta Bovet França (4).

(3)- CASSINELLO, F. - Construcción : Carpinteria. Madrid, Rueda, 1973.

(4) Op. cit.

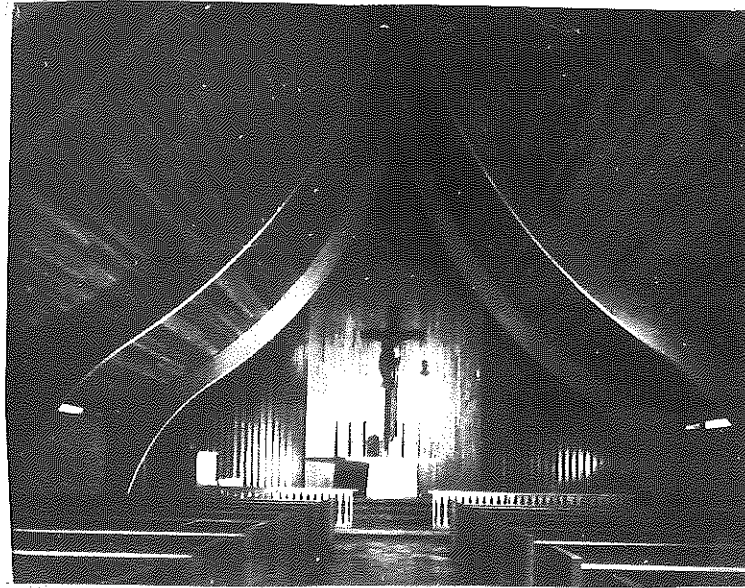


Figura 5 - Igreja de Santo Agostinho Indiana (USA) (5).

Cúpulas de madeira laminada

As cúpulas podem ser cônicas, esféricas, elípticas, parabólicas, etc... São geralmente formadas por arcos de madeira laminada (meridianos) e por anéis de borda superior e inferior (madeira laminada).

Quando as cúpulas são de grandes dimensões, são colocados anéis (paralelos) entre os anéis de borda. Figuras 6, 7, 8 e 9.

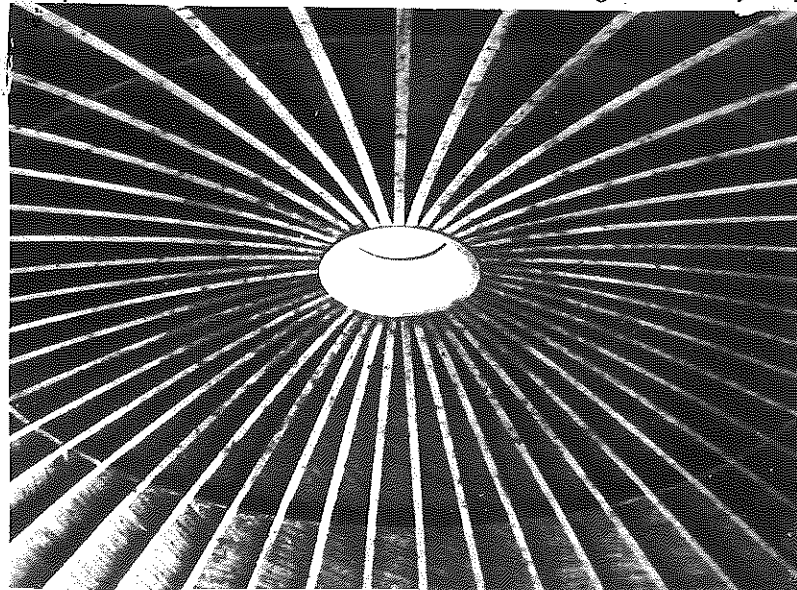


Figura 6 - Mercado coberto de Reinhardtshansen Alemanha (6).

(5) Op. cit.

(6) Op. cit.



Figura 7 - Sala de Espetáculo Munich - Alemanha (7)

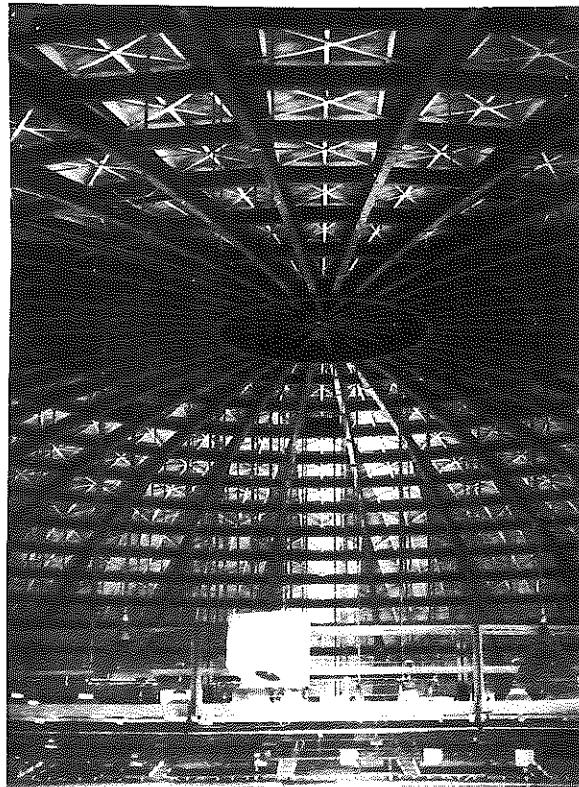


Figura 8 - Cúpula esférica de arcos e meridianos-Ginásio de Esportes Bozeman, Montana-USA (8).

(7) *Op. cit.*

(8) *Op. cit.*



Figura 9 - Cúpula esférica (Domo Lamelar) construído pela Rilco Laminated Products, Inc. (9)



Figura 10 - Cúpula cônica com balanço (10)

(9) OBERG, Fred R. - Op. cit.

(10) CASSINELO, F. - Op. cit.

Pontes de Madeira Laminada

A madeira laminada vem sendo utilizada em estruturas de pontes, em viga, em arco, etc... figuras 11, 12 e 13.

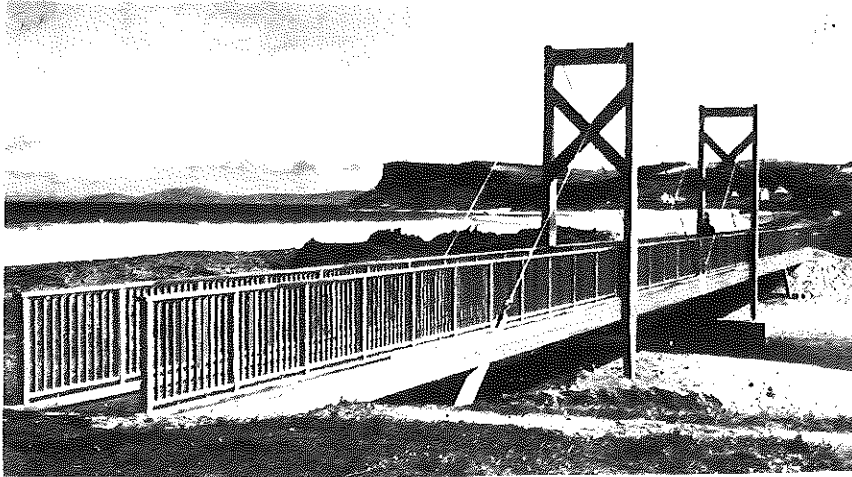


Figura 11 - Ponte em viga laminada (11).



Figura 12 - Ponte em arco fabricado pela West Coast Lumbermen's Association (12).

(11) SIEBENTE NEUBEARBEITETE AUFLAGE - Holzbau - Taschenbuch.
Berlin, Verlag Von Wilhelm Ernst & Sohn, 1974.

(12) Op. cit.

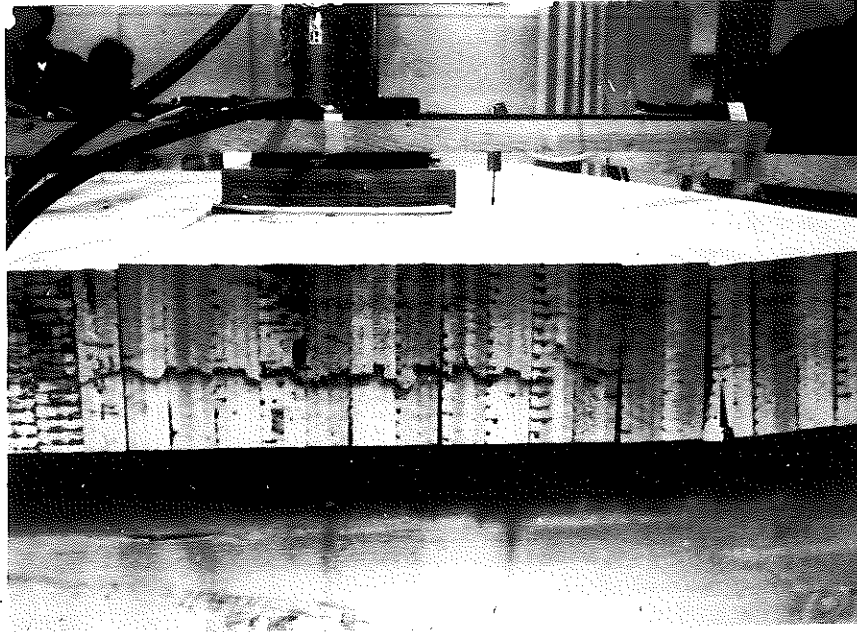


Figura 13 - Ponte em laje "Composite Deck" ensaio Forest Product Laboratory (13).

Outras estruturas de madeira colada

A madeira colada tem sido utilizada nas mais variadas formas, figuras 14, 15, 16, 17 e 18.

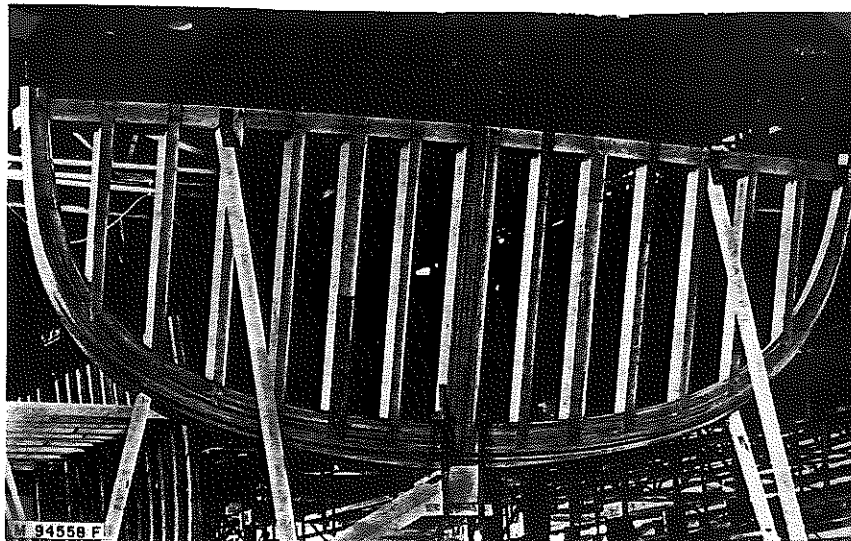


Figura 14 - Estrutura da seção principal de um "caça-minas" - madeira laminada (14).

(13) YOUNGQUIST, J. A., et alii - *Design, Fabrication, Testing and Instalation of a Press-Lam. Bridge.* Usda-Fs-Fpl, Mad, Wis, 1979. (Paper Fpl 332)

(14) BUREAU OF SHIPS DEPARTMENT OF NAVY - Boat and Ship Construction Technique: A Manual for its use as a ShipBuilding Material - Washington, 1962, v. 4 (Navships 250-336).

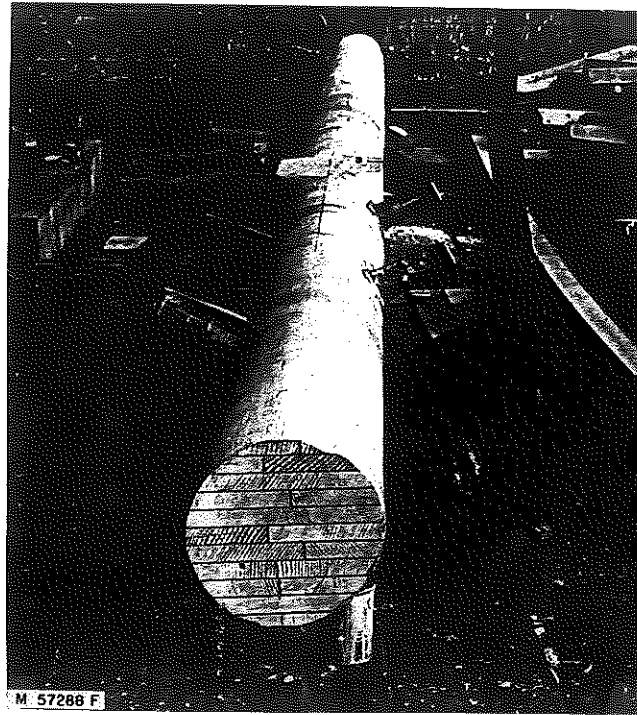


Figura 15 - Mastro de madeira laminada e colada (15).



Figura 16 - Poste de madeira laminada, fabricado pela Rilco Laminated Products, Inc. (16).

(15) *Op. cit.*

(16) OBERG, Fred R. - *Op. cit.*

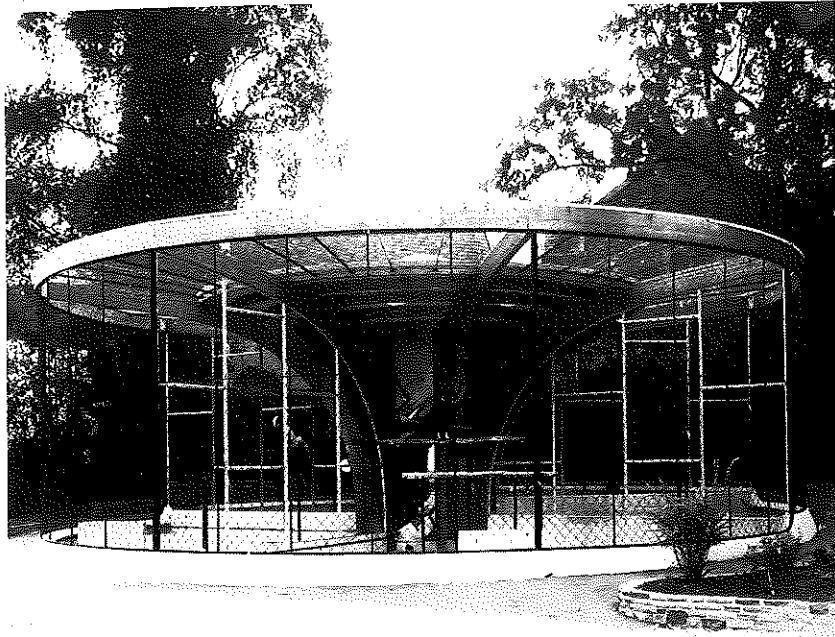


Figura 17 - Aviário de Águias, Clifton West of England Zoology Society, Bristol. Fabricado por Pochin's Manchester Ltda. (17).



Figura 18 - Parabolóide Hiperbólico formado por tábuas sobrepostas em direções perpendiculares (18).

(17) CHUGG, W.A. - Op. cit.

(18) CASSINELLO, F. - Op. cit.

Madeira aglomerada

A madeira picada e colada vem sendo utilizada na fabricação de chapas.

Aglomerado especial de madeira é utilizado estruturalmente, encontrando boa aceitação, figuras 19, 20 e 21.

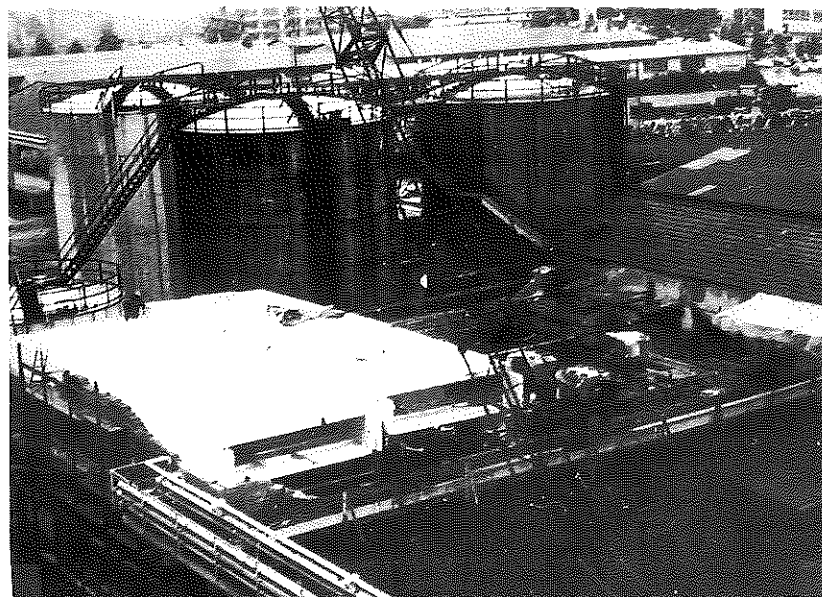


Figura 19 - Laje pré-fabricada de madeira aglomerada, em forma de viga caixão, com 16m de vão, Suíça (19) .

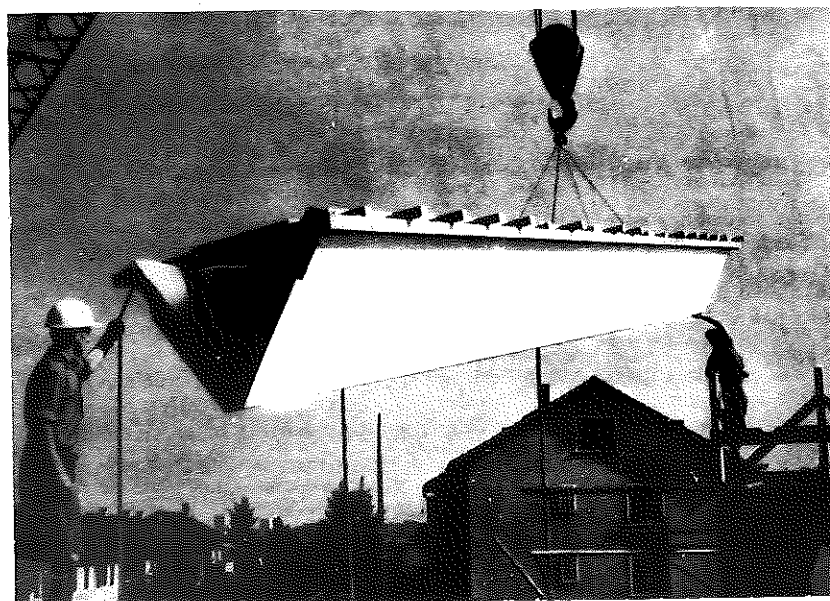


Figura 20 - Montagem de um elemento de uma cobertura auto portante de madeira aglomerada 14m de comprimento (20).

(19) Op. cit.

(20) Op. cit.

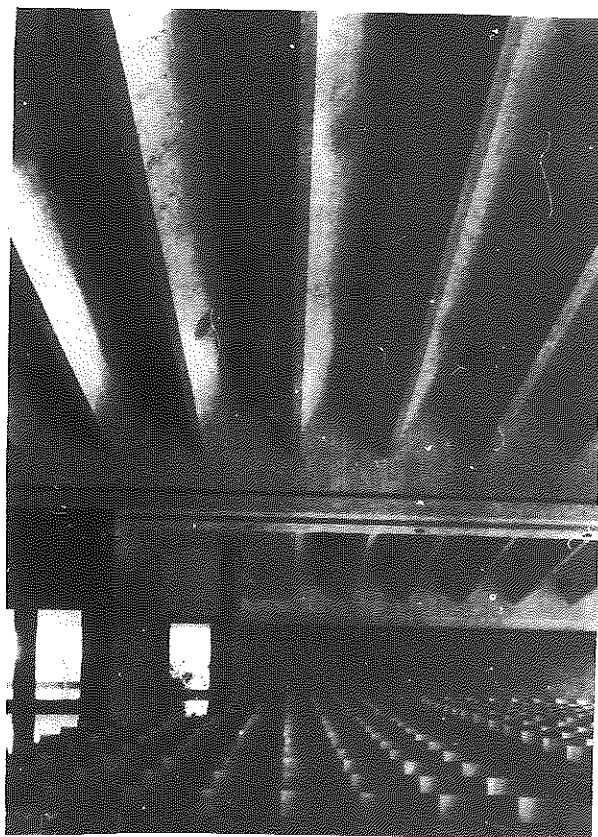


Figura 21 - Cobertura auto-portante de madeira aglomerada, seção em V, de 14 e 8m de vão. Suíça (21).

A concepção das estruturas apresentadas anteriormente seria impossível sem o conhecimento das propriedades e características dos adesivos, em função das madeiras utilizadas.

No âmbito nacional e mais especificamente no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), tornou-se necessário o estudo minucioso dos adesivos, para se poder estudar, projetar e construir as estruturas de madeira laminada e colada.

As primeiras estruturas laminadas e coladas estudadas no LaMEM, figuras 22, 23, 24, 25, 26 e 27, permitiram sentir-se nitidamente a importância de um estudo anterior da adesão e dos adesivos.

É indiscutível a importância de analisar as propriedades dos adesivos e dos aderentes.

O objetivo deste trabalho é inicialmente analisar as características e as influências das diferentes propriedades do ade-

sivo nos aderentes (madeira). Analisar as características e propriedades dos adesivos compatíveis com a madeira, com base na literatura internacional existente. Escolher o adesivo mais compatível, de maior resistência mecânica e de fácil trabalhabilidade. Finalmente, com base no ensaio de modelos diversificados, em diferentes condições de ensaio e com adequada análise estatística de resultado, determinar a resistência ao cisalhamento na compressão, na tração, na flexão e na torção em função dos diferentes parâmetros da madeira.



Figura 22 - Pórtico de madeira laminada, cavilhada e colada. Modelo reduzido-ensaio (22).

- (22) CORDOVIL, F. A. B. - Projeto e Experimentação de Pórticos Planos de Madeira. Orientação do Prof. João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP. 1977. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).



Figura 23 - Ponte pênsil, com vigas principais em madeira laminada, modelo reduzido-ensaio (23).

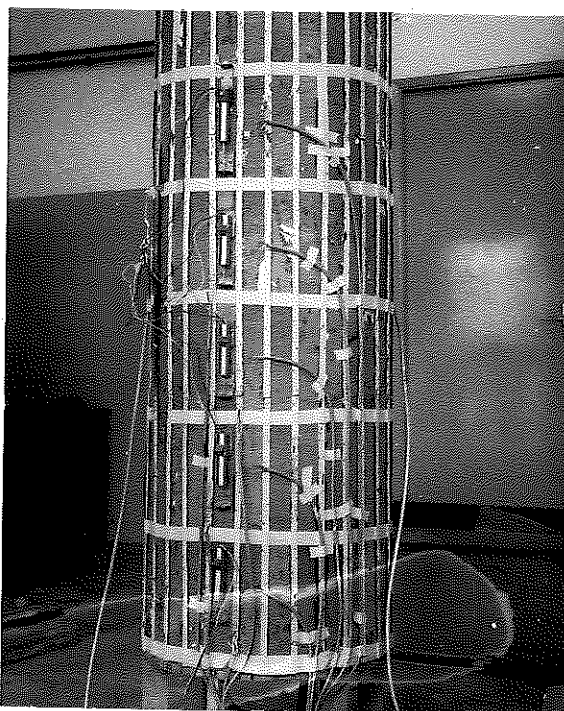


Figura 24 - Silo de madeira, modelo reduzido-ensaio (24).

(23) HORTEGAL, I. R. - Contribuição ao Estudo das Pontes Pênséis de Madeira. Orientação do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1979. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).

(24) CALIL JUNIOR, Carlito - Silos de Madeira. Orientação do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1978. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).

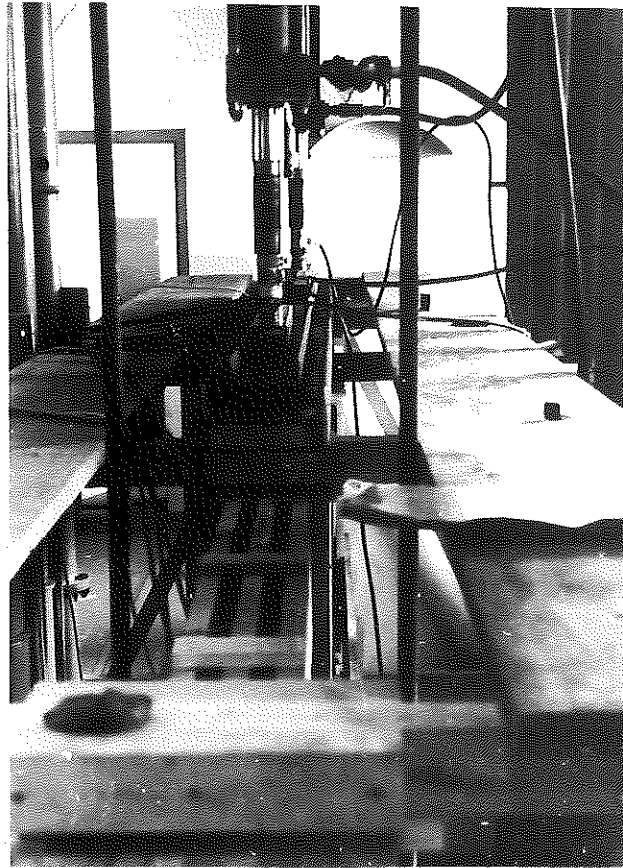


Figura 25 - Viga de madeira protendida-ensaio (25).



Figura 26 - Esquema de montagem da viga de madeira protendida (26).

(25) BARBOSA, S. M. - Viga de Madeira Protendida. Orientação do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1982, Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).

(26) Op. cit.

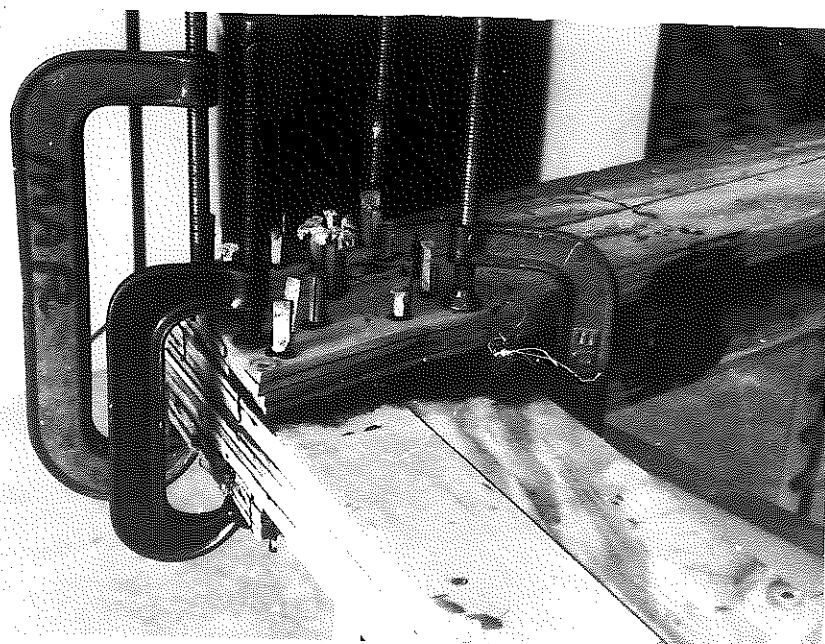


Figura 27 - Viga vierendeel de madeira, filme de cola submetido a torção, modelo reduzido-ensaio(27)

2 - RESENHA HISTÓRICA

Hã notícias da aplicação de adesivos desde 3.300 anos antes de Cristo. Tem-se informações a respeito da utilização de peças laminadas de madeira nas esculturas realizadas em Tebas.

Os egípcios utilizavam a goma arábica retirada de árvores da acácia, de resinas de outras árvores, do ôvo e da borracha.

Os primeiros papiros, sem textura, eram fabricados com lâminas finas de madeira justapostas em ângulos apropriados e colados com uma pasta de farinha (28).

Segundo Plínio, os romanos calafetavam suas embarcações de madeira de pinho, com cera de abelha e se anteciparam no emprego da madeira laminada (29).

Nos tempos de Teófilo, conheciam-se colas de peixe, de

(27) PAULA, E. V. C. M. - Viga Vierendeel de Madeira. Orientação do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1982. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).

(28) LAURIE, A.C. - Materials of the Painters Craft - London, Poulig, 1910.

(29) AOUWINK & SALOMON - Adhesion and Adesives. Amesterdam, Elsevier, 1966. v. 1.

chifre de veado e de leite coalhado, utilizados para unir objetos de madeira (30).

A tecnologia dos adesivos avançou muito pouco até o século XX mas, nestas últimas décadas os adesivos naturais foram amplamente melhorados e iniciou-se a produção de muitos adesivos sintéticos.

Até 1903 os carpinteiros em trabalho artesanal preparavam a cola animal, pois ainda não havia sido alcançada a tecnologia da produção em massa.

Durante e pouco depois da primeira guerra mundial o adesivo à base de proteína animal manteve a liderança como adesivo para madeira. Posteriormente foram desenvolvidos adesivos de caseína, os quais podiam ser utilizados à temperatura ambiente, apresentando alguma resistência à água. Atualmente nos Estados Unidos a caseína continua sendo o adesivo preferido em madeira estrutural para interiores. No U.S. Forest Product Laboratory - Madison Wis-USA, desenvolveu-se adesivo de albumina sanguínea, adequado para ligações de elevada resistência à água, mas a madeira deveria ser prensada a quente. A seguir descobriu-se o adesivo à base de farinha de soja.

Há uns 65 anos, Baekeland descobriu a aplicação do fenol-formaldeído, a primeira resina sintética a ser empregada como adesivo, embora a sua aplicação em escala industrial na madeira tenha se desenvolvido apenas em 1930 (31).

Ainda nos anos 30, a I.G. Farben-Industrie, apresentou um adesivo à base de urea-formaldeído para madeiras, sem a resistência à água das resinas fenólicas, mas curado a temperatura mais baixa e de menor custo. Sua principal aplicação ocorreu na fabricação de móveis e de madeira compensada para uso em interior.

Os adesivos de resorcinol-formaldeído apareceram durante a II guerra mundial. Embora mais custosos, estes adesivos curam a temperatura ambiente e são resistentes à água. As misturas de resinas resorcinol e fenólicas permitiram aperfeiçoar a produção de compensados de madeira para uso exterior e de madeiras laminadas estruturais.

(30) SKEIST, I. - Handbook of Adesives. New York, Reinhold Publ., 1962.

(31) Op. cit.

Após a II guerra mundial, as emulsões de acetato de polivinila começaram a substituir os adesivos animais em muitas aplicações da madeira. As resinas de acetato de polivinila são aplicadas a frio e se solidificam por perda d'água, produzindo uma linha adesiva incolor.

Devido ao desenvolvimento rápido da química das macromoléculas, sintetizaram-se nas duas últimas décadas, uma variedade de polímeros com características adesivas melhoradas e deu-se a consequente expansão da indústria dos adesivos de resinas vinílicas, de poliésteres, poliuretanas, etc, e da aplicação de processos de colagem aos mais diversos fins.

3 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NUMA LIGAÇÃO ADESIVA

Na formação das ligações adesivas em estruturas de madeira, a natureza da madeira determina a seleção do adesivo e a forma da sua execução.

A penetração do adesivo devido à porosidade da madeira aumentará a força da união, acarretando maior área para umidificação e adesão específica.

A adesão específica e a adesão química são as principais características do adesivo a considerar para se obter uma ligação eficiente.

A característica higroscópica da madeira, o aumento ou a diminuição de umidade relativa, provocam respectivamente o inchaço ou a retração da madeira. As forças de distorção induzidas por estas características, são altas e provocam vários defeitos nas ligações prejudicando sua resistência.

A madeira com umidade excessiva absorve muito adesivo, por outro lado uma madeira excessivamente seca pode causar umidificação insuficiente da superfície e baixa penetração, dando como resultado uma ligação mais fraca.

A madeira é uma mistura complexa. Não se pode considerá-la simplesmente composta de celulose, embora esta ocorra em percentagem maior. Os compostos subsidiários, exceto a lignina como: o conteúdo de resinas, o conteúdo de ceras e de produtos de oxidação das superfícies, interferem na resistência da ligação adesiva.

A anisotropia da madeira, as características mencionadas e algumas outras além do adesivo são de relevância para o estudo das ligações adesivas.

3.1 - A MADEIRA

As características da madeira já são bastante conhecidas nos campos tecnológicos. É importante para este estudo esclarecer seu comportamento físico-mecânico relacionado com os adesivos.

3.1.1 - ANISOTROPIA, RETRATILIDADE E INCHAMENTO DA MADEIRA

A madeira devido à orientação das fibras é um material anisotrópico, apresentando três direções principais: longitudinal, radial e tangencial, figura 27.1.

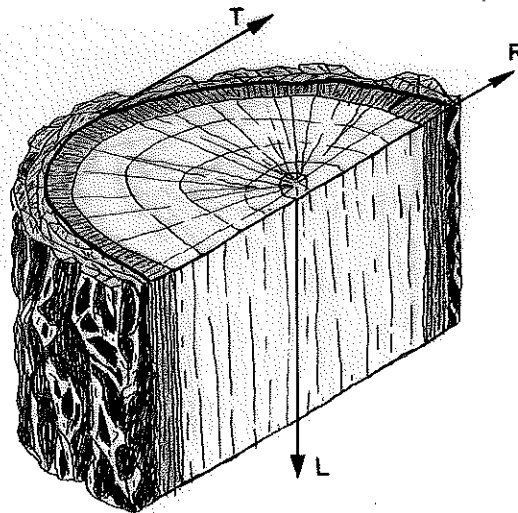


FIG. 27.1 - ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA

A perda d'água da madeira provoca redução nas dimensões (retração), mudança da forma da peça e frequentemente fissuração. Inversamente, a absorção d'água provoca o inchamento. A variação no sentido das fibras, é pequena (0,5%), mas no sentido transversal (tangencial e radial) é notável, variando de 6% a 20% e 3% a 10% respectivamente, dependendo da espécie da madeira, figura 27.2.

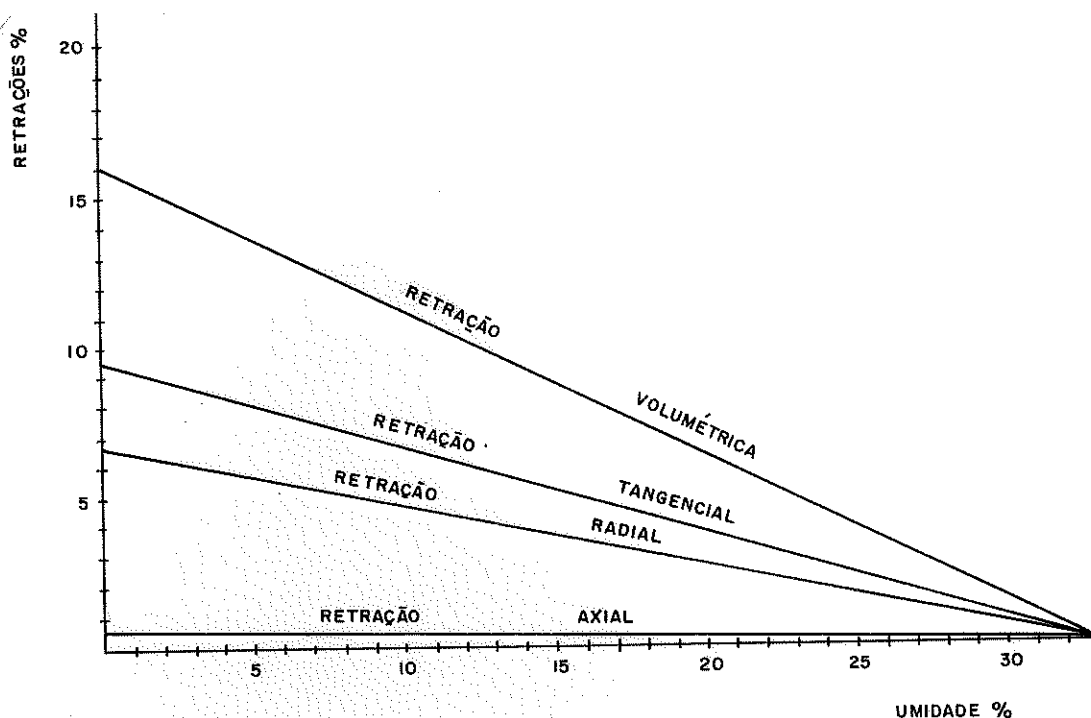


FIG.27.2-RETRATILIDADE EM FUNÇÃO DA UMIDADE - EUCALIPTO CITRIODORA (32)

As forças induzidas devido a retratilidade ou inchamento são relativamente altas.

Quando a retratilidade ou o inchamento ocorrem durante a cura a linha adesiva pode fissurar e permanecer fissurada dando como resultado uma ligação fraca. Pode ocorrer também torção ou curvamento devido a mudança de forma da peça de madeira, exceto quando se usam pressões altas na união das peças. Estes movimentos causam a diminuição da área colada e a introdução de tensões internas e ou ligações fracas.

3.1.2 - HIGROSCOPIDADE

A madeira é bastante higroscópica. Quando se encontra em ambiente úmido absorve água e inversamente em ambiente seco perde água.

A água contida nos vazios dos elementos anatômicos básicos é chamada água livre. A evaporação desta água pode ser rápida e não altera as dimensões da peça de madeira.

A água de impregnação está ligada a cadeias de celulose a través de pontes de hidrogênio e é de difícil evaporação e causa vari

(32) HELLEMEISTER, J.C. - Sobre a Determinação das Características Físicas da Madeira, São Carlos, EESC-USP, 1982.

ação nas dimensões das peças de madeira. O ponto de saturação define o limite da existência dos dois tipos de água, variando de 20% a 33% dependendo da espécie da madeira.

A quantidade de água das madeiras verdes ou recém-cortadas varia muito com a espécie e com a estação do ano, podendo variar de 40% a 140%.

A umidade de equilíbrio é o teor de umidade da madeira após algum tempo em contato com o ar atmosférico e varia entre 12% e 15% em ambiente abrigado

A madeira com umidade elevada no momento da colagem pode causar uma excessiva absorção de adesivo durante a aplicação e montagem da ligação. Inversamente, uma madeira excessivamente seca pode causar uma umidificação insuficiente, baixa penetração do adesivo, dando como resultado uma junta mais fraca.

A umidade da madeira influi grandemente nas demais propriedades da madeira.

3.1.3 - DENSIDADE E ÍNDICE DE VAZIOS

Como as demais características da madeira, a densidade depende da espécie em estudo. É comum no estudo da madeira haver referência à densidade real e à densidade aparente.

A densidade aparente é a razão entre a massa e o volume aparente (volume da madeira e dos vazios contidos na madeira) e varia com a espécie de madeira e até com a configuração do corpo de prova.

A densidade real é a razão entre a massa real (sem umidade) e o volume real (sem vazios) da madeira. É constante para todas as espécies e pode ser considerada ao nível de $15.3 \pm 0.3 \text{ KN/m}^3$

A porcentagem de vazios é determinada a partir da densidade real, da densidade aparente e da umidade da madeira.

$$P_{\text{vaz},n} = 1 - \frac{100 D_n}{15.3 (100+U)} \quad 100\% \quad (33).$$

$$P_{\text{vaz},0} = 1 - \frac{D_0}{1.53} \cdot 100\%$$

onde:

$P_{\text{vaz},n}$ = percentagem de vazios à umidade n%

$P_{\text{vaz},0}$ = percentagem de vazios à umidade 0%

D_n = densidade à umidade n%

D_0 = densidade à umidade 0%

Geralmente não há diferença entre a aplicação dos adesivos nas madeiras de maior ou de menor densidade, mas, nas madeiras de baixa densidade as pressões de colagem podem ser ligeiramente menores.

A baixa densidade ou o alto índice de vazios podem prejudicar a ligação devido a uma excessiva penetração do adesivo na madeira, produzindo linhas adesivas enfraquecidas. Inversamente a densidade elevada requer menor quantidade de adesivo e tempo de espera maior, para evitar linhas adesivas excessivamente grossas.

O conteúdo de cera, resinas, ácidos e outros materiais em algumas espécies de madeira exige um certo cuidado na escolha do adesivo compatível com a existência destas substâncias na madeira a utilizar.

3.1.4 - RESISTÊNCIA MECÂNICA

As características mecânicas da madeira constituem um assunto já bastante estudado.

A característica mecânica de maior influência na ligação adesiva é a resistência ao cisalhamento da madeira, pois a transmissão de carga na maioria das ligações por adesivos se dá por cisalhamento do adesivo ou da interface entre a madeira e o adesivo ou da madeira.

A direção na qual a carga está sendo aplicada influi significativamente na resistência da ligação.

3.2 - O ADESIVO

Existem diversos fatores a considerar para a avaliação de um adesivo como, por exemplo, o comportamento do adesivo desde a sua elaboração até a conclusão da sua cura e obtenção da ligação adesiva. Os fatores mais importantes são: adesão, tempo de armazenamento, vida útil após sua preparação, adesividade, tempo de cura ou velocidade de desenvolvimento da resistência e penetração. Conhecer as propriedades dos adesivos é muito importante para sua preparação e principalmente para sua aplicação.

3.2.1 - ADESÃO

O problema da adesão está hoje satisfatoriamente esclarecido com base nas forças de ligação ao nível molecular entre as macromoléculas superficiais dos adesivos e dos aderentes. Basta uma aproximação intermolecular suficiente, da ordem de alguns Angstroms (Å), para induzir estas forças naturais a atuar, ligando as superfícies com certa diminuição de energia livre do sistema. Não há ainda um método adequado para medir a força de adesão.

A força de adesão tem sua origem nas ligações químicas primárias (interatômicas) e nas ligações atrativas secundárias (intermoleculares). As forças produzidas pelas ligações primárias são de natureza essencialmente eletrônica (ligações entre átomos ou íons), podendo ser: ligações metálicas, ligações tetravalentes, ligações covalentes e ligações coordenadas covalentes. As ligações atrativas secundárias são de natureza eletrostática ou magnética, associam as moléculas entre si, de maneira razoavelmente forte, mas não são suficientemente potentes para formarem uma nova individualidade química. Estas forças comandam os fenômenos de adesão, coesão, absorção, coagulação, etc. Existe alguma confusão nos nomes e até na natureza de algumas destas forças secundárias, de difícil distinção em casos práticos. Na literatura técnica são designados por uma diversidade de nome tais como: forças de associação ou coordenação, forças de valências secundárias, forças de Van der Waals (forças eletrostáticas ou magnéticas entre moléculas dipolares) forças de London (forças entre moléculas não polares).

A energia transferida nas ligações pode ser expressa como uma diferença de potencial em função das distâncias entre partículas. Experimentalmente é expressa em Kcal/mol.

Nos fenômenos de coesão e adesão é muito importante o conhecimento da variação da energia com as distâncias atuantes, da ordem de três Angstroms. Não se conhece o efeito da distância de atuação das forças secundárias entre as moléculas das superfícies dos aderentes. De fato, superfícies metálicas, mais ou menos espolhadas, exercem forças atrativas elevadas sobre qualquer partícula próxima delas e daí a dificuldade, em mantê-las limpas.

As forças atrativas podem começar a sua atração a distâncias intermediárias de 100 Å. Estas forças são conhecidas por forças residuais a longa distância. As interações adesivo/aderentes, por ação destas forças podem começar a distâncias relativamente grandes em comparação com as dimensões interatômicas. O enfraquecimento da resistência das ligações, devido aos vazios e outras desigualdades entre as superfícies, é limitado por efeito destas forças de dispersão a longa distância (34).

3.2.1.1 - ADESÃO ESPECÍFICA

As forças básicas da adesão específica entre as macromoléculas são devidas às ligações secundárias de atração. As forças atuantes a longa distância têm pouco significado para a energia da ligação e, conseqüentemente, para a resistência adesiva, mas são muito importantes para certas características reológicas e de aplicação dos adesivos. As ligações secundárias mais significantes para a resistência da ligação são: em especial as forças de polarização (dipolo-dipolo; íão-dipolo; dipolo-metal; etc.) e as pontes de hidrogênio, sem menosprezar o valor das forças de dispersão (London) responsáveis pela formação dos cristalitos dos adesivos.

Na maior parte das ligações usuais por adesivos as forças atrativas secundárias são a base da adesão específica. Para que suas forças, possam agir adequadamente, tendo em vista alcançar o melhor resultado na ligação, é necessário levar em consideração todos os fatores, quer da superfície dos aderentes quer das características

(34) AOUWINK & SALOMON - Op. cit.

e da técnica de aplicação dos adesivos. Entre estes fatores os principais são:

- Igual natureza polar ou não polar da substância adesiva e da superfície dos aderentes (compatibilidade adesivo/aderente)
- Fácil umidificação, penetração e difusão do adesivo líquido na camada superficial dos aderentes (viscosidade conveniente)
- Acabamento, limpeza e ativação da superfície dos aderentes, sem esquecer a contaminação fácil e prejudicial pela água, poeira e outras impurezas.
- Técnica adequada na aplicação do adesivo, especialmente considerando-se espessura da película, tempo de espera, tempo de secagem, pressão e temperatura.

Entre estes fatores principais a considerar é conveniente ressaltar, por ser da maior importância, os referentes à compatibilidade e interpenetração do adesivo não aderente.

As forças atrativas secundárias de polarização ou de dispersão devem ser consideradas sob o aspecto de reciprocidade do conjunto adesivo/aderente. Assim, os adesivos do tipo polar terão fraca adesão específica às superfícies não polares e vice-versa. De um modo geral pode-se dizer (35): os adesivos preparados com polímeros naturais de origem animal e vegetal (amido, soja, goma-resina, caseína, celulose e derivados, alguns polímeros sintéticos, etc) são fortemente polares. No outro extremo situam-se os produtos não polares: borracha, elastômeros e certos adesivos sintéticos. No ramo dos adesivos industriais modernos, há grupos de resina e polímeros possuindo uma diversidade de polaridades intermediárias. Pode-se mencionar, de maneira especial, os adesivos baseados em resinas de Urea e Melamina, Fenol e Resorcinol, polímeros Vinílicos, polímeros Acrílicos, etc. Quanto aos materiais aderentes, os mais polares são as madeiras e seus derivados, papel, papelão e a maior parte dos tecidos, principalmente devido à estrutura da celulose. A borracha e a maior parte dos plásticos apresentam superfícies praticamente apolares. Os metais, vidros, cerâmicas e outros materiais silicosos são considerados fracos ou medianamente polares.

As distâncias mínimas entre as moléculas dos adesivos e das superfícies dos materiais aderentes para a ocorrência das forças de adesão, são normalmente atingidas com: suficiente fluidez

(35) LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL- LNEC. - Introdução ao Estudo e Ensaio de Colas Orgânicas, Lisboa, 1973.
(Circular de Informação Técnica).

no adesivo (para conseguir boa penetração), conveniente preparação das superfícies a ligar, condições adequadas de secagem e cura do adesivo.

Além da polaridade do adesivo e dos aderentes, é do maior interesse considerar outras propriedades físicas responsáveis pela penetração do adesivo nos poros dos aderentes, tais como a viscosidade e o poder de umidificação do adesivo, a tensão superficial, o ângulo de contato entre o adesivo líquido e o aderente sólido, o estado de pureza da superfície, a forma e dimensão dos poros da madeira nos quais o adesivo líquido deve penetrar.

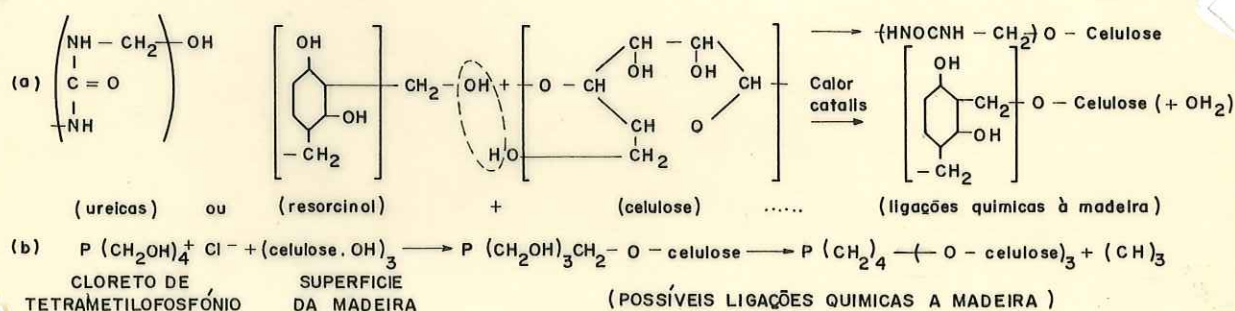
Mesmo cuidando de todos estes fatores, é praticamente impossível aproveitar toda a potencialidade das ligações secundárias disponíveis, mas esta redução de eficiência não chega a prejudicar a ligação.

3.2.1.2 - ADESÃO QUÍMICA

As forças básicas da adesão química são devidas às ligações primárias. Não se examina rigorosamente a ação destas forças (especificamente químicas) como fontes promotoras de adesão, pois as forças secundárias podem responder pela resistência e versatilidade da maior parte dos adesivos industriais. Mas a última palavra na resistência e duração da ligação adesiva pode ser conseguida pelo uso judicioso das ligações químicas entre o adesivo e o aderente.

A utilização dos adesivos químicos reativos promotores de adesão é apenas justificável quando os adesivos convencionais não produzam adesão suficiente, pois, o seu alto custo, fraca estabilidade no armazenamento, vida breve e grande seletividade relativa ao tipo do aderente, os tornam inviáveis. De qualquer maneira, a adesão química, ainda, em sua infância, já deu incontestavelmente um grande avanço na possibilidade de expansão da utilização de adesivos em estruturas. A pesquisa neste campo deve-se orientar no sentido de achar um promotor de adesão química de atuação generalizada. A seguir exemplifica-se um caso de uma possível reação química do adesivo com o aderente. Esta reação química reforça significativamente a força de adesão promovendo uma ligação muito mais resistente e durável.

As colas ureicas, fenólicas, resorcinol, etc, têm vários grupos metilol, ou metilol-fenol disponíveis ($-\text{CH}_2\text{OH}$; $\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{OH}$), e pode-se esperar uma reação com grupos oxidrídicos da celulose, na superfície das madeiras, à semelhança do comportamento dos retardantes ao fogo do tipo fosfônico (R.(a), (b)) (36).



3.2.2 - TEMPO DE ARMAZENAMENTO

Quando, após sua fabricação, um adesivo é guardado por muito tempo em condições desfavoráveis de temperatura, podem ocorrer alterações físicas e químicas do adesivo. Por isto o armazenamento dos adesivos deve ser feito sob condições controladas. Enquanto não houver alteração das propriedades, o adesivo permanece em condições de uso. Esta permanência é designada como tempo de armazenamento. O método de ensaio ASTM D-1337 permite a determinação deste tempo.

3.2.3 - VIDA ÚTIL

A vida útil de um adesivo é a designação dada ao período de tempo decorrente entre a preparação ou mistura final do adesivo até a sua aplicação definitiva sem diminuição de sua resistência. O método ASTM D-1338 permite determinar a vida útil do adesivo.

3.2.4 - RENDIMENTO

Rendimento é a relação entre a quantidade de adesivo em pregado e a área das superfícies de aplicação, em peso de adesivo por unidade de área dos aderentes. O método de ensaio ASTM D-898 descreve o procedimento para a determinação da quantidade de adesivo empregado numa superfície.

3.2.5 - ADESIVIDADE

Adesividade é a característica do adesivo de promover a união resistente dos aderentes. Os adesivos podem apresentar adesividade rápida ou lenta. A adesividade é uma das propriedades mais importantes para determinar a adequação do adesivo à ligação desejada.

3.2.6 - TEMPO DE CURA

É o tempo no qual o adesivo recém preparado começa a desenvolver sua resistência. O tempo de cura poderá ser alterado em função do tipo e da quantidade do catalisador, ou da variação de calor e pressão.

O método de ensaio ASTM D-1144, permite determinar a velocidade de cura das ligações adesivas.

3.2.7 - CONSISTÊNCIA

Os adesivos mais comuns têm comportamento visco-elástico, pois geralmente são polímeros com adição de solvente líquido e de outros materiais de comportamento químico e físico diversificados (para maiores detalhes ver o apêndice B). O método de ensaio ASTM D-1084, permite a determinação da viscosidade do adesivo.

3.2.8 - PENETRAÇÃO

A penetração se dá por diferença de temperatura, por difusão e por ação capilar. Depende basicamente da porosidade do aderente e da viscosidade do adesivo (ver apêndice B). O adesivo penetrando excessivamente no aderente não contribui para a resistência da ligação, podendo inclusive produzir uma linha adesiva insuficiente, reduzindo a resistência. O método de ensaio ASTM D-1916 permite a determinação do grau de penetração do adesivo.

3.2.9 - TENSÕES TÉRMICAS E DE RETRAÇÃO

Os coeficientes de dilatação dos adesivos e dos aderentes diferem freqüentemente. Por isso quando uma junta se aquece ou esfria, podem-se desenvolver tensões nas interfaces do adesivo.

Quando o adesivo de uma ligação se contrai em relação aos aderentes devido à variação da temperatura, criam-se forças de cisalhamento nas interfaces e forças de tração no adesivo, acarretando a diminuição da resistência da ligação.

3.3. - CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS

Os adesivos são classificados: pela maneira de aplicação e secagem (cura), pela composição química e pelo custo.

3.3.1 - DE ACORDO COM A SUA APLICAÇÃO E CURA

Os adesivos devem ser aplicados ao aderente na forma líquida para molhar a sua superfície e sem deixar vazios, mesmo sendo a superfície muito rugosa, isto é, o adesivo deve ter uma viscosidade baixa no instante da sua aplicação. No entanto, para o adesivo desenvolver sua força de coesão deve secar ou curar. A transição do estado líquido ao sólido pode ocorrer de várias maneiras.

3.3.1.1 - SOLIDIFICAÇÃO POR ESFRIAMENTO DE UM ADESIVO FUNDIDO A QUENTE

Os adesivos sólidos aplicados por dissolução são usualmente constituídos por vários componentes como: polímeros termoplásticos, resinas naturais ou sintéticas que proporcionam fluidez e adesividade e um elastômero sintético para aumentar a elasticidade, ou ceras permitindo abaixar os custos e controlar as características de viscosidade e penetração. Estes componentes podem ser dosados para o adesivo secar quase instantaneamente ou, pelo contrário, tenha o seu tempo de vida aumentado. Nos quadros 1 e 2, anexo, estão indicados os polímeros adesivos termoplásticos mais usados na tecnologia corrente, e os termo polímeros-etileno, resina fenoxi e outros polímeros ainda em estudo entre os mais promissores, para futura tecnologia.

3.3.1.2 - SOLIDIFICAÇÃO POR LIBERAÇÃO DO SOLVENTE

A maior parte dos adesivos industriais é preparada no estado mais ou menos fluido. No caso dos adesivos líquidos, solúveis em água ou em solvente orgânico, a ligação dos aderentes pode ser efetuada sem eliminação do solvente quando o aderente for poroso, de maneira a permitir a difusão e a evaporação do solvente. No entanto, se as partes a ligar não forem porosas (como no caso de metais, plásticos, vidros, etc). é necessário proceder-se a eliminação prévia de grande parte da água, ou do solvente orgânico, antes de unir e prensar os aderentes. Nestas condições, o umedecimento das superfícies e a formação da ligação pode ocorrer mediante reativação da película adesiva, por aquecimento e subsequente prensagem.

Entre os adesivos líquidos e pastosos deve-se distinguir três sub-grupos principais:

a) Adesivos Aquosos-Emulsionados

São preparados com a emulsão, ou com dispersão dos polímeros orgânicos na água e são correntemente designados, como adesivos latex. As principais espécies de adesivos latex são: Estireno-butadieno, butadieno-metiloacrilato, policloropreno ou neopreno, acetato de vinil, acrílicos, borracha natural, resinas alcalinas e fenólicas, etc. Quadro 5, anexo.

b) Adesivos a Solvente Orgânico

São soluções de polímeros adesivos, naturais ou sintéticos -

cos, modificados com diversas resinas e plastificantes.

Podem ser preparados também adesivos a solventes orgânicos (colas-laca) com uma variedade de elastômeros sintéticos, polímeros e co-polímeros, termo-plásticos e termo-endurecíveis, solúveis em água ou em solventes orgânicos. São geralmente adesivos com boa resistência à água e com ampla variação de tempo de secagem e de endurecimento, quadros 6 e 7, anexo.

3.3.1.3 - SOLIDIFICAÇÃO POR POLIMERIZAÇÃO

Os adesivos que apresentam solidificação por polimerização têm tido o maior desenvolvimento tecnológico na atualidade. Encontram-se nesta categoria as resinas termoestáveis, algumas resinas termoplásticas do tipo vinila e os elastômeros, vulcanizados para desenvolver maior força coesiva.

Pode-se ainda subdividir em dois grupos:

- Os adesivos formados por condensação, tendo usualmente como sub-produto a água. Neste grupo encontram-se os adesivos à base de resinas fenólicas e amina-sintéticas, as quais precisam de pressão para perfeita adesão.

- Os adesivos formados por polimerização sem ter nenhuma formação de sub-produto. Neste grupo estão vários adesivos novos incluindo os poliésteres, os epoxis, os uretanos, os cianocrilatos, os quais podem ser curados com pressão de contato.

Alguns adesivos para serem curados requerem calor, outros reagem à temperatura ambiente com ajuda de um catalisador. Entre os adesivos processados desta maneira estão: o resorcinol-formaldeído, os poliésteres não saturados, os metacrilatos de metil, os ésteres de cianocrilato, os epoxis e os uretanos.

3.3.2 - DE ACORDO COM SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os adesivos podem ser orgânicos e inorgânicos. Os adesivos orgânicos podem ser classificados de acordo com a natureza química dos polímeros, destacando-se os seguintes grupos:

a) Adesivos de origem animal: grudes, gelatinas, caseína,

albumina, peixe, pele, osso, etc.

b) Adesivos de origem vegetal: gomas, amidos, soja, etc.

c) Adesivos de resinas naturais ou modificadas: celulósicos, goma laca, betuminosos, etc.

d) Adesivos de polímeros sintéticos termo-endurecíveis ou catalisados a frio: urea, melamina, fenol, resorcinol, poliuretano, poliesteres insaturados, etc.

e) Adesivos de polímeros sintéticos termo-plásticos: vinílicos e acrílicos, poliamidos, polietileno, etc.

f) Adesivos de borracha e elastômeros: borracha natural, e clorada, borrachas sintéticas e polisulfuretas, etc.

g) Adesivos mistos de duplo polímero, termo-plástico + termo-endurecível: fenol/acetato de vinila, fenol/nitrilo ou neopreno, fenol/epoxi, epoxi/polissulfureto, borracha silicone, urea, acetato de vinila, etc.

h) Adesivos reativos ou adesivos químicos de pré-polímeros bloqueados: isocianatos, cianocrilatos, etc.

i) Adesivos baseados em polímeros especiais para utilização mais específica : vinilocianatos, etc.

j) Produtos adesivos diversos: fitas adesivas, papéis adesivos, filmes colantes, etc.

A classificação química dos adesivos industriais é complexa e susceptível a certa controvérsia. No quadro 24 (anexo); optou-se pela classificação proposta pelo LNEC (37), extraído do "HANDBOOK OF ADESIVES" (38).

3.3.3 - DE ACORDO COM O CUSTO

O custo dos adesivos varia de alguns centavos de dólar o kilo, (asfalto, silicato de sódio, etc.) a vários dólares por grama (cianocrilatos).

(37) LNEC - Op. cit

(38) SKEIST, I. - Op. cit.

Os preços de alguns componentes dos adesivos, quadro 8, anexo, foram transcritos da CHEMICAL & ENGINEERING NEWS, Índice de preços trimestral, de dezembro de 1970, nesta tabela pode-se notar a variação dos preços em função da qualidade. Observe também o quadro 23 do anexo.

Os adesivos diferem bastante em seu rendimento (área colada, corretamente, por kg de adesivo). Neste sentido um adesivo que contenha água ou solvente pode requerer muito tempo de secagem.

3.4 - TIPOS DE ADESIVOS

Pode-se dividir os adesivos para madeira basicamente em dois grupos: os adesivos inorgânicos e os adesivos orgânicos.

3.4.1 - ADESIVOS INORGÂNICOS

Neste primeiro grupo às vezes é difícil diferenciar o adesivo do cimento. Em geral, na formação dos cimentos as reações são químicas e nos adesivos a ligação se forma pela desidratação dos solventes dos adesivos. Os adesivos inorgânicos mais comuns são à base de silicatos. As ligações produzidas por estes adesivos conseguem resistência mecânica elevada. Já se estudou a utilização dos silicatos na fabricação de madeira compensada, obtendo resultados satisfatórios, notando aumento da resistência à água e ao fogo (ver apêndice A, item 1).

3.4.2 - ADESIVOS ORGÂNICOS

Entre os adesivos orgânicos pode-se distinguir dois tipos: adesivos naturais e adesivos sintéticos.

3.4.2.1 - ADESIVOS NATURAIS

Existe uma infinidade de adesivos naturais. Entre os prin

cipais, tem-se:

a) Adesivos animais: são derivados de proteínas da pele, cartilagem e ossos de animais. A aplicação principal destes adesivos ocorre na carpintaria de móveis e outras aplicações destinadas a ambientes internos e não agressivos.

b) Adesivos de peixe: são derivados da pele do mesmo. Este adesivo é utilizado na manufatura de fitas adesivas. Misturado com outros adesivos adquire capacidade de aderir superfícies de madeira.

c) Adesivos de caseína: são obtidos da caseína, principal proteína do leite. São utilizados em estruturas, móveis e madeira compensada para interiores não agressivos.

d) Adesivos de soja: são obtidos a partir da farinha de soja. A utilização destes adesivos na indústria da madeira é ampla. São utilizados na fabricação de compensado de madeira para interior e exterior, de aglomerado de madeira e madeira laminada.

e) Adesivos de sangue: são obtidos a partir da albumina do sangue. A aplicação principal destes adesivos é nos compensados de madeira, com moderada resistência à água, e na madeira laminada.

f) Adesivos de amido: na maior parte os adesivos de amido são derivados da mandioca, milho ou soja. São utilizados na indústria de compensados.

g) Adesivos celulósicos: são obtidos a partir da celulose, proteína natural. São utilizados na laminação de madeira para interiores, com moderada resistência à água, na construção de portas e na carpintaria.

3.4.2.2 - ADESIVOS SINTÉTICOS

Com a formulação destes adesivos conseguiu-se aperfeiçoar a indústria dos compensados de madeira para interiores e a madeira laminada estrutural. Entre os principais adesivos sintéticos pode-se citar:

a) Adesivos de Borracha: formados a partir da borracha e da mistura de resinas. Dependendo da mistura obtém-se uma infinidade

de de adesivos com maior gama de propriedades. Sua aplicação é bastante diversificada. Na indústria automotriz, na indústria da construção, nas estruturas de aeroplanos, nas estruturas de madeiras, etc.

b) Adesivos de Fenol-Formaldeído: são formados a partir de resinas fenólicas sintéticas. As suas principais aplicações, em ordem de importância, são: na manufatura de compensados de madeira para uso exterior, alguns compensados resistentes ao fogo, madeira aglomerada, chapas de fibra de vidro para isolamento, etc.

c) Adesivos de Resorcinol e Fenol-Resorcinol-Formaldeído : são formados a partir das resinas de Resorcinol e Fenol-Resorcinol-Formaldeído. As principais características que determinam a sua liderança na utilização de estruturas de madeira são: cura à temperatura ambiente, alta durabilidade da união, resistência à água e à adesão química desenvolvida pela resina resorcinol. São utilizados na manufatura de compensado de madeira de fino acabamento para uso exterior, em compensado naval, nas ligações de compensados de madeira para obter elementos mais longos, nas estruturas de madeira de um modo geral (tesouras, vigas, arcos, etc.), na laminação de madeira (vigas, arcos, quilhas de barcos), na ligação de madeira com plástico, na ligação metal-madeira com ajuda de um recobridor, etc.

d) Adesivos à base de Resina Amina: os mais usados são : adesivos de Urea-Formaldeído e adesivos de Melamina-Formaldeído. A maior aplicação dos adesivos de Urea-Formaldeído está na fabricação de compensados de madeira para interiores, móveis, laminados decorativos para interiores, etc. Os adesivos de Melamina Formaldeído são usados quando a resistência à água é de maior importância, como no compensado naval, nos barcos, nos fortificadores de adesivos de urea, etc.

e) Adesivos de Resina Epoxi: até o momento tiveram pouca influência na indústria da madeira, devido ao seu alto custo e pouca afinidade. A aplicação deste adesivo na engenharia é grande. É utilizado na união de estruturas de concreto, colagem de concreto velho e novo, união de concreto-madeira e também na indústria de aeroplanos.

f) Adesivos de Acetato de Polivinila: são aplicados nos vidros de segurança, em recobrimentos de superfícies, em seladores de madeira, etc.

No apêndice A, encontra-se uma descrição pormenorizada dos adesivos. Nos quadros 9 até 22, do anexo, são resumidas as propriedades principais de cada adesivo.

4 - CARACTERÍSTICAS PARA A FORMAÇÃO DE UMA BOA LIGAÇÃO ADESIVA

Para se formar uma ligação durável o adesivo e o aderente devem ser compatíveis.

Quando se ligam dois materiais, o composto resultante tem pelo menos 5 elementos: aderente nº 1, interface, adesivo, interface e aderente nº 2, figura 28.

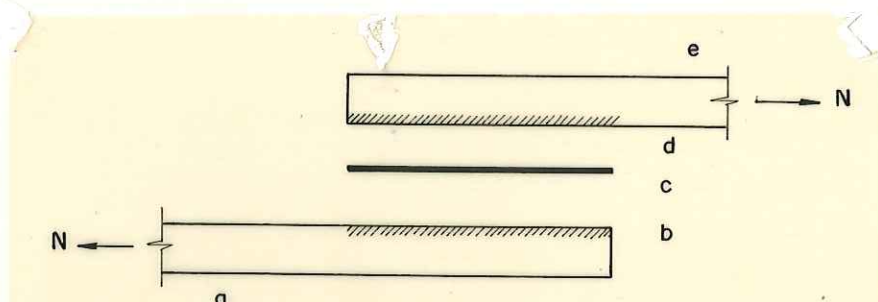


FIG. 28 - ELEMENTOS DE UMA LIGAÇÃO:

a) ADERENTE Nº 1, b) INTERFACE, c) ADESIVO
d) INTERFACE, e) ADERENTE Nº 2 .

A resistência da ligação será a menor dos cinco elementos mencionados anteriormente. A ocorrência de falha na interface pode ser reduzida com a preparação adequada do aderente e escolha apropriada do adesivo. Geralmente a adesão adesivo - aderente (interface) deve ser maior que a coesão do adesivo.

4.1 - CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS

Para que o adesivo produza uma ligação resistente, deve-se analisar seu comportamento juntamente com o do aderente.

Uma das características influentes na compatibilidade do adesivo com o aderente é o parâmetro de solubilidade. Quanto mais próximo o parâmetro de solubilidade do adesivo ao do aderente, maior será a sua afinidade e mais eficiente a ligação.

A característica determinante do grau de molhagem do aderente é a extensão. Quanto maior este grau de molhagem mais íntimo será o contato do aderente com o adesivo, produzindo uma ligação resistente.

A rugosidade do aderente, dependendo do tipo de solicitação, proporciona maior eficiência na ligação. Por exemplo: numa ligação solicitada por tensões de cisalhamento, são convenientes superfícies relativamente rugosas, pois existe maior área de contato além de existir atrito entre as saliências das superfícies.

Uma das características mais importantes é a penetração. A profundidade de penetração do adesivo nos poros do aderente dependerá da forma e dimensão dos poros, da tensão de adesão, da viscosidade ou consistência do adesivo e do tempo de cura ou secagem do adesivo.

Há necessidade de uma certa fluidez do adesivo para se obter a sua penetração nos poros do aderente, deslocamento do ar e contato íntimo com a superfície do aderente.

Quando o aderente é poroso, o adesivo não deve fluir através dos poros a tal ponto da junta ficar empobrecida. A consistência do adesivo deve ser adequada para ser esparramada no aderente com a espessura desejada. A consistência é determinada pela viscosidade, pela elasticidade e pela plasticidade do adesivo.

A espessura da linha adesiva e a pressão determinam a máxima resistência e rigidez na junta adesiva. A linha adesiva deve ser a mais fina possível, sem chegar a faltar adesivo na ligação. A aplicação de pressão, antes da cura, produzirá enchimento dos poros e deslocamento do ar da interface do aderente (penetração). Esta pressão também é necessária para se obter uma linha adesiva fina.

Com estas características a ligação terá grandes possibilidades de ter alta resistência mecânica.

No apêndice B, estas características são apreciadas mais detalhadamente.

4.2 - PRINCÍPIOS GERAIS DE UMA LIGAÇÃO ADESIVA

4.2.1 - QUANTO À ADESÃO

Os fatores a serem considerados para se obter boa adesão e coesão intermolecular do adesivo são apresentados a seguir: (39)

a) Escolher substâncias adesivas com dimensão macromolecular e estrutura química apropriada. Como por exemplo, termoplásticos, termoendurecíveis, autopolimerizantes, etc.

b) Promover um contato íntimo entre o adesivo e as superfícies dos aderentes, a fim de por em ação as forças secundárias, das quais dependerão as forças de adesão. Isto implica no ajustamento de certas propriedades físicas e químicas dos adesivos e em uma textura conveniente dos aderentes.

c) Escolher adesivos de elevada coesão na linha adesiva solidificada, a qual deve ser, pelo menos, igual à coesão do material dos aderentes. Assim sendo a ruptura da ligação ocorre na interface ou no aderente e não no adesivo.

d) Promover a adesão e a auto-adesividade nos adesivos sensíveis à pressão.

4.2.2 - QUANTO À SUPERFÍCIE DOS ADERENTES

A eficiência da ligação está diretamente relacionada com a preparação dos aderentes antes da aplicação do adesivo:

a) Remover o pó, óleo, óxido ou qualquer outro material capaz de reter o ar ou de impedir o contato do adesivo com o aderente, prejudicando a ligação.

b) Aplainar as superfícies muito rugosas, promovendo um contato íntimo e melhor fluxo do adesivo.

c) Tratar a superfície quimicamente para aumentar a energia superficial e, portanto, aumentar a adesão.

(39) DEBRUYNE, N.A. - *The Physics of Adhesion. Trans. of the Plastics Institute, 27, 141, Oct. 1959.*

d) Eliminar da superfície qualquer composto orgânico desprovido de afinidade atrativa com o adesivo.

e) Após tratamento químico, enxaguar a superfície para remover os materiais corrosivos ou outros produtos prejudiciais à ligação.

4.2.3 - QUANTO À CONDIÇÃO FÍSICA E APLICAÇÃO DO ADESIVO

Inúmeros fatores interferem nas condições físicas e aplicação dos adesivos:

a) O adesivo deve ser líquido ou um sólido mole facilmente deformável, pois por intermédio do fluxo ou da deformação, o adesivo se amolda intimamente à rugosidade dos aderentes. Na prática, todas as superfícies se apresentam como rugosas, dada a diminuta dimensão das moléculas do adesivo.

b) Com algumas exceções (fitas adesivas), durante a cura o adesivo se transforma num material sólido e resistente.

c) O adesivo deve ter certa atração mútua com as áreas das superfícies dos aderentes.

d) O adesivo deve ter resistência nas condições previstas para a ligação.

e) Durante a secagem ou cura os adesivos não devem sofrer retrações exageradas, responsáveis por tensões excessivas na ligação.

f) Os adesivos devem apresentar resistência ao inchamento ou aumento de volume causados por líquidos ou gases do meio ambiente.

g) O projeto da ligação deve ser apropriado para suportar as cargas em serviço.

5. - SELEÇÃO DOS ADESIVOS EM FUNÇÃO DOS ADERENTES

Uma das principais condições para conseguir uma ligação adequada está na escolha de polímeros adesivos com características a

trativas, tanto quanto possível, semelhantes ao aderente a ligar (polaridades afins). Os aderentes polares ligam-se mais convenientemente com adesivos polares, inversamente os aderentes de natureza não polares se ligam melhor com adesivos apolares ou de polaridade muito baixa. No caso de ser necessário ligar um material de polaridade elevada a outro não polar a opção, em geral, é pela mistura de polímeros adesivos com as polaridades apropriadas (geralmente um com polaridade alta e outro com polaridade média ou relativamente baixa).

Além da polaridade, para ajudar a selecionar os polímeros adesivos é necessário considerar as outras características dos adesivos (ver item 4 - Cap. I e apêndice B), tais como o parâmetro de solubilidade, o módulo de rigidez, o ângulo de contato do adesivo com o aderente, independentemente do estado e preparação das superfícies a ligar, das condições de aplicação do adesivo, do tempo de espera e das características de secagem e endurecimento (ver item 3.2 - Cap. I).

A seguir são mencionadas algumas regras como primeira orientação na escolha de adesivos:

a) Semelhança de polaridade ou parâmetros de solubilidade próximos.

b) Polímeros adesivos com cristalinidades (teor de Cristallitos) não muito altas e com módulos de rigidez não superiores aos dos aderentes.

c) Baixo ângulo de contato do adesivo com os aderentes, isto é, alto poder de molhagem da superfície dos aderentes, pelo adesivo líquido. O adesivo deve apresentar tensão superficial relativamente baixa e os aderentes devem apresentar as superfícies de contato limpas e ativas.

d) Formulação do adesivo com dois ou três polímeros (adesivos mistos ou compostos) com polaridades adequadas e balanceadas, quando os materiais a ligar forem de natureza e ou de polaridades diferentes ou até contrárias.

A formulação dos adesivos industriais é normalmente apresentada pelos fabricantes e fornecedores das matérias primas e das resinas adesivas. Por outro lado o estudo de novas fórmulas ou a modificação e a adaptação dos receituários usuais depende da experimentação em laboratório adequadamente equipado, mesmo quando a tec-

nologia da elaboração do adesivo seja indicada em publicações da especialidade (40) e (41), ou seja sugerida pelos fornecedores das matérias-primas adesivas. Estas formulações não constituem finalidade de deste trabalho.

Quanto à escolha do tipo de adesivo mais conveniente para a ligação de dois aderentes diferentes na tabela B.2, apêndice B, foi indicada uma primeira orientação para esta seleção. No quadro 23, anexo, são indicados os principais adesivos para madeira, as propriedades mais importantes e suas aplicações.

6 - INFLUÊNCIA DAS INTEMPÉRIES NAS LIGAÇÕES

A madeira sofre mudanças dimensionais com a variação do conteúdo de umidade e este depende das condições atmosféricas. O método ASTM D-1183 contém vários grupos de ensaios para avaliar a resistência do adesivo em condições de laboratório com simulação de intempérie. A deterioração da linha adesiva é determinada pela porcentagem de perda de resistência.

7 - VANTAGENS DAS LIGAÇÕES ADESIVAS

A resistência, estabilidade e vida de uma estrutura dependem em grande parte da resistência, rigidez e durabilidade das ligações.

De maneira geral pode-se classificar as ligações em dois grandes grupos, a saber: ligações por aderência e ligações por penetração.

As ligações por penetração se caracterizam pela utilização de encaixes previamente executados, ou pelo emprego de peças de ligação. As forças transmitidas de uma peça para outra convergem geralmente para uma pequena área (parafusos, anéis, etc), figura 29-a, ou para pontos isolados (cavilhas, pregos, etc), figura 29-b. Ocorrendo concentração de tensões nestes pontos, pode ocorrer com portamento elasto-plástico da madeira.

(40) SKEIST, I. - Op. cit.

(41) DEL MONTE - The Technology of Adhesives. - Hafner Publ. 1962.

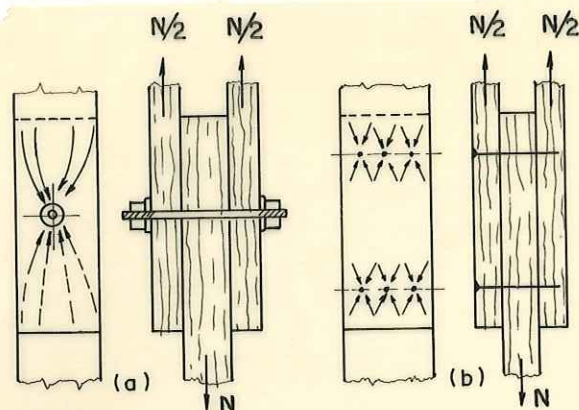


FIG.29-LIGAÇÃO POR PENETRAÇÃO

As ligações por aderência são estabelecidas através de uma fina película de adesivo. Os esforços são absorvidos por superfícies relativamente grandes formadas pelas áreas ligadas pelo adesivo, figura 30.

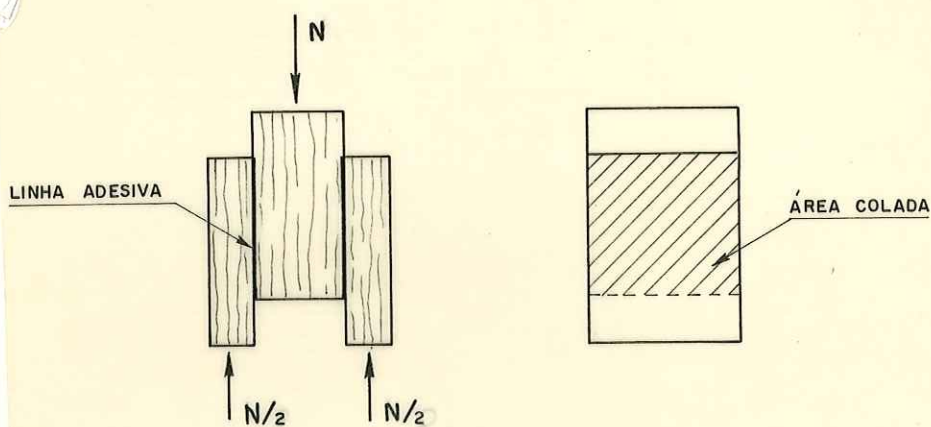


FIG.30-LIGAÇÃO POR ADERÊNCIA

Entre todos os tipos de ligação conhecidos na atualidade as ligações por aderência apresentam maior rigidez e melhor distribuição dos esforços.

A figura 31 mostra o comportamento comparativo dos vários tipos de ligações.

As principais vantagens dos adesivos sobre outros tipos de ligações são as seguintes:

a) a distribuição dos esforços em áreas mais amplas torna possível a obtenção de ligações mais leves;

b) há possibilidade de melhorar a relação força/pêso e a estabilidade dimensional dos materiais anisotrôpicos através de peças cruzadas, como na madeira compensada e nas tábua cruzadas para formação de cascas;

c) a linha adesiva pode ser barreira contra a umidade, impermeabilizando paredes de vedação, laminados, etc.;

d) os adesivos permitem unir materiais diferentes, como: alumínio-madeira, ferro-madeira, etc.;

f) a execução das ligações por adesivos, pode ser mais rápida e econômica.

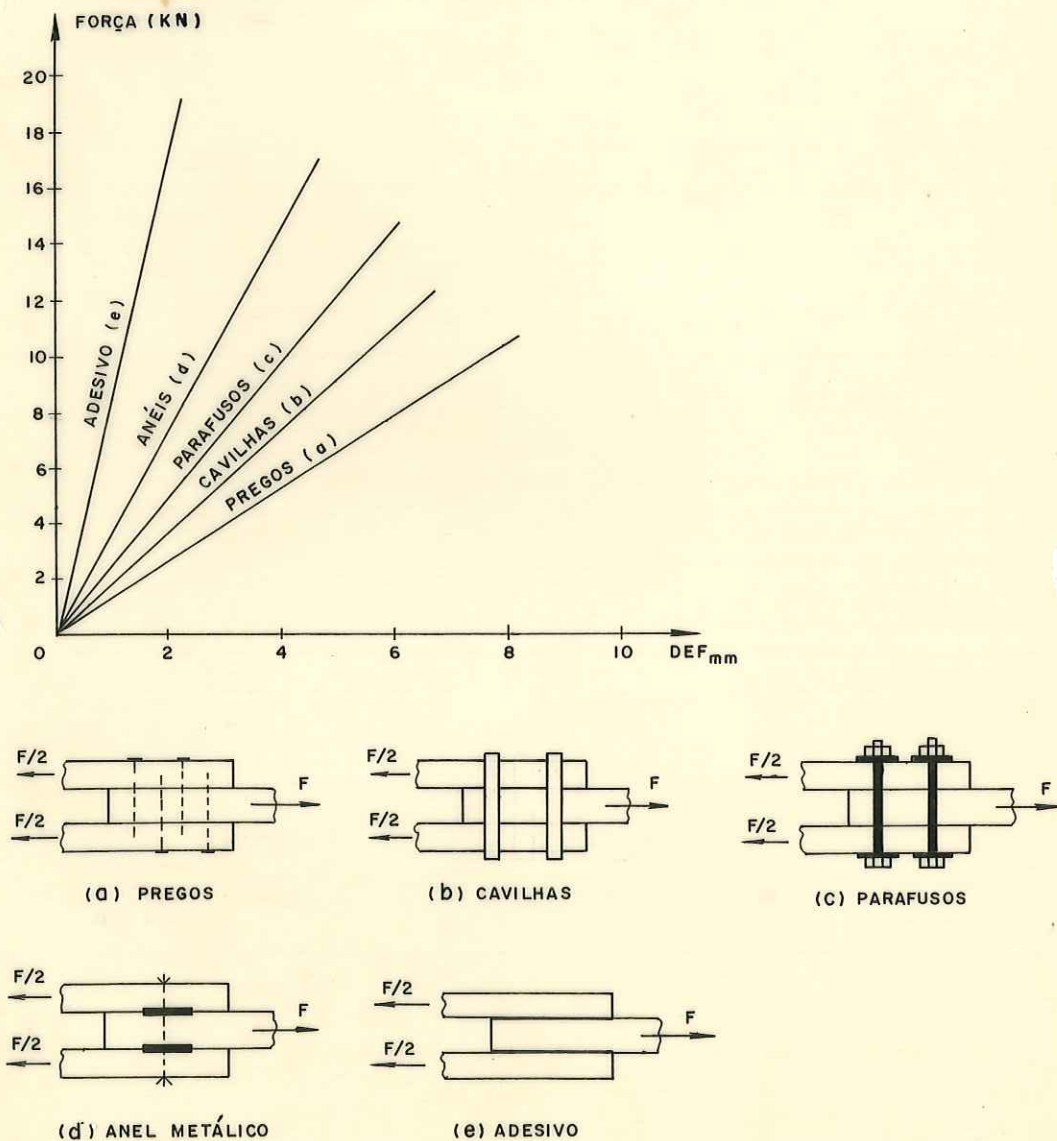


FIG. 31 - TIPOS DE LIGAÇÕES

8 - TIPOS DE ENSAIOS E ESPECIFICAÇÕES

A avaliação das características químicas, físicas e mecânicas de um adesivo serve para prever o comportamento e confiabilidade de uma ligação adesiva. Os ensaios fornecem dados para controle de qualidade do material adesivo e devem satisfazer às especificações e critérios de importância econômica.

Os adesivos encontram-se entre os materiais para os quais é necessária uma avaliação especializada de propriedades através de ensaios. Nos ensaios não se avalia o material adesivo como também a técnica de aplicação, ligação e cura do adesivo.

A exatidão e reprodutibilidade dos resultados dos ensaios dependerá das condições de preparação dos corpos de prova e, antes de qualquer avaliação, deve-se ter informações completas de cada uma das seguintes variáveis: (42)

a) preparação das superfícies e adequação do conteúdo de umidade da madeira, antes da aplicação do adesivo;

b) indicação completa da mistura do adesivo;

c) condições de aplicação do adesivo, incluindo velocidade de aplicação, espessura da película e condições de secagem ou cura;

d) condições de cura incluindo pressão aplicada, tempo de aplicação da pressão e temperatura;

e) condições da ligação antes da aplicação de pressão, incluindo a temperatura ambiente e a umidade relativa;

f) procedimento de condicionamento antes do ensaio, incluindo o período de tempo, temperatura e umidade relativa.

São conhecidos numerosos ensaios para o controle de qualidade dos adesivos. Quase todas as instituições internacionais de normas técnicas, como a American Society for Testing and Materials (ASTM), a British Standard Institution (BSI), a Deutsche Industrie Normen (DIN), etc., apresentam especificações, métodos de ensaios e normas para a utilização dos adesivos.

Os ensaios podem ser:

- ensaios químicos e físicos
- ensaios de resistência mecânica nas ligações
- ensaios de comportamento e durabilidade das ligações

No quadro 25, anexo, são apresentados os métodos de ensaios mais importantes para a avaliação da resistência mecânica dos adesivos.

CAP 02 - BASE TEÓRICA PARA ESCOLHA DE MODELOS E MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA

1 - INTRODUÇÃO

Uma peça de madeira mesmo tendo grandes dimensões, dificilmente será do tamanho necessário para vencer um vão relativamente grande. Estando a estrutura definida, dificilmente a junção dos seus elementos será feita com uma ligação capaz de transmitir todos os esforços solicitantes: momento fletor, momento torçor, força normal e força cortante de uma peça para outra, sem produzir deformações excessivas tornando a ligação um ponto susceptível de ruína e até de colapso total da estrutura.

O estudo teórico da transmissão de esforços solicitantes, da capacidade de carga e da tensão admissível da ligação é de grande importância para o posterior relacionamento com ensaios experimentais. Anéis metálicos, cavilhas de madeira, parafusos e pregos vêm sendo estudados no LaMEM como elementos de ligação.

Neste capítulo serão abordadas as bases teóricas do comportamento das ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão, na tração, na flexão e na torção. Serão analisadas as distribuições de tensões internas e o efeito das mesmas atuando isoladamente. Para este estudo serão adotados corpos de prova para cada tipo de solicitação, visando uma experimentação semelhante às especificações em métodos convencionais de ensaio. A descrição da montagem dos corpos de prova adequados e dos esquemas experimentais específicos para os ensaios também fazem parte deste capítulo.

2 - ESTUDO DA RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES ADESIVAS

O conhecimento da distribuição dos esforços para tipos diferentes de solicitações é muito importante para a determinação da capacidade de carga da ligação e para a transmissão da carga através da linha adesiva.

Neste estudo pretende-se abordar a maior parte dos tipos

de ligações possíveis com adesivos. Para alcançar este objetivo se rão propostas duas estruturas convencionais de madeira, nas quais a junção dos elementos será feita com adesivos, figuras 32 e 33 . A partir destas ligações padronizadas será feita uma análise minuciosa do comportamento das ligações adesivas.

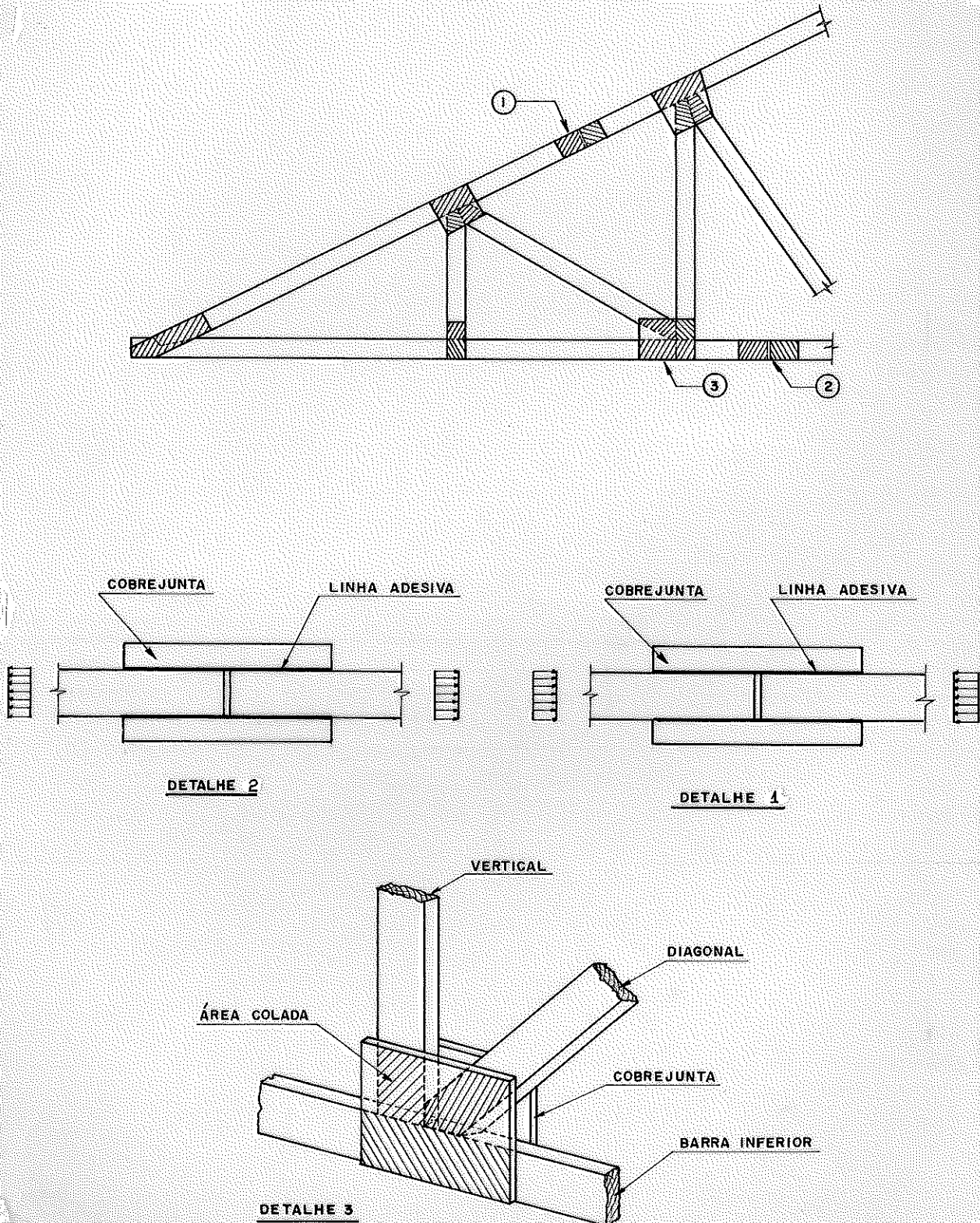


FIG. 32 - ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO DE UMA COBERTURA

Pode-se observar no detalhe 1 da figura 32, a emenda da barra superior solicitada à compressão paralela às fibras, com a linha adesiva trabalhando ao cisalhamento. Este tipo de ligação será designado como cisalhamento na compressão paralela às fibras. No detalhe 2, a emenda da barra inferior é solicitada à tração paralela às fibras com o adesivo trabalhando ao cisalhamento. Esta ligação será designada como cisalhamento na tração paralela às fibras. Finalmente, no detalhe 3, observa-se a ligação da barra inferior com a barra vertical e com a barra inclinada formando uma ligação solicitada ao cisalhamento na tração ou compressão normal às fibras. Ainda, no detalhe 3, a ligação da diagonal com a cobrejunta forma uma ligação solicitada ao cisalhamento na tração ou na compressão inclinada às fibras.

Conhecendo o comportamento destas ligações, as restantes existentes na estrutura da figura 32 ficam conhecidas.

Como exemplo de uma ligação adesiva solicitada ao cisalhamento na torção têm-se os detalhes 1 e 2 referentes à estrutura de um pórtico de madeira, figura 33.

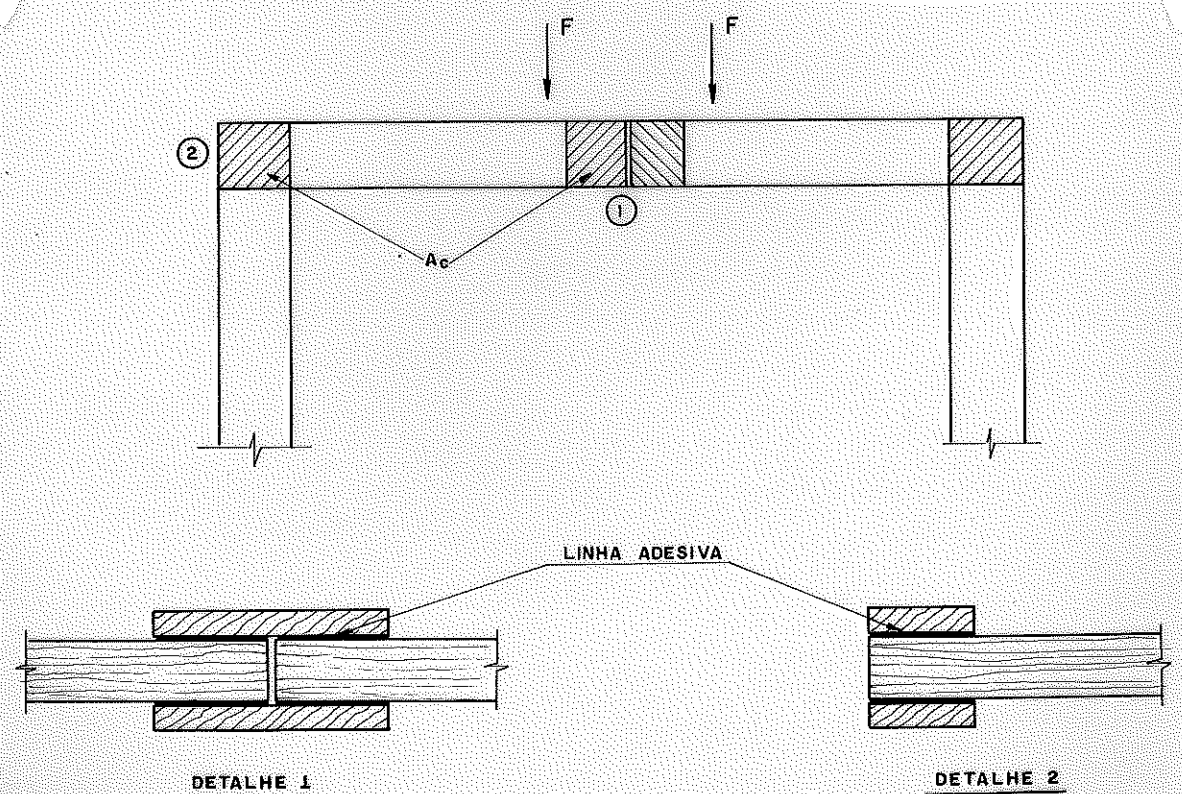


FIG. 33 - PÓRTICO DE MADEIRA

A ligação adesiva solicitada ao cisalhamento na flexão, geralmente pode ser encontrada nas emendas de vigas fletidas, figura 34.

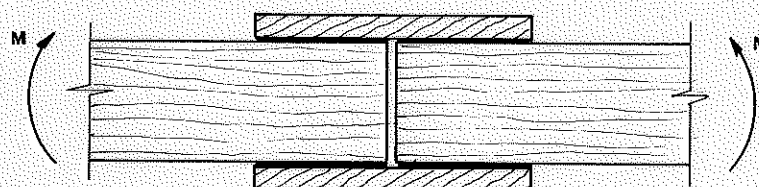


FIG.34-EMENDA DE UMA VIGA FLETIDA

A ligação adesiva entrará em ruína, quando, por efeito da tensão de cisalhamento, na linha adesiva ou na madeira na interface atinge a ruptura ou deformação excessiva. O adesivo tem resistência ao cisalhamento constante. O valor da capacidade de carga da ligação depende da resistência da interface, madeira-adesivo e da resistência da madeira ao cisalhamento.

A análise teórica das tensões nas ligações depende exclusivamente da tensão de cisalhamento da madeira.

Os estudos desenvolvidos até a atualidade têm se concentrado mais nas ligações sujeitas à carga de tração e compressão, com o adesivo trabalhando ao cisalhamento. Isto pode ser verificado em referências bibliográficas (43). Um estudo recente sobre a transmissão de carga de uma ligação fletida, com a película adesiva trabalhando ao cisalhamento, provocado por um momento torçor, foi desenvolvido na tese de doutoramento de Segerlind (44). As ligações solicitadas à flexão, com as linhas adesivas trabalhando parte a

(43) WALSH, P.F.; LEICESTER, R.H; RYAN, A. - *The Strength of Glued Lap Joints in Timber*, Forest Products Journal, 23(5), May, 1973.

(44) SEGERLIND, L.J. - Shear Stresses in Adhesive of Joints Subjected to Bending, Purdue University, June 1966. (Unpublished Ph. D. Thesis)

tração e parte a compressão no cisalhamento, têm sido pouco exploradas; pode ser feita uma analogia com as vigas compostas. Neste caso um estudo promissor foi feito por Möhler (45). Neste estudo a análise de esforços e a análise de deformações são feitas através de equações diferenciais complicadas, com a aplicação de métodos numéricos. Em alguns destes estudos é aplicado o método dos elementos finitos.

O objetivo deste trabalho é essencialmente experimental, mas, será feita análise de tensões nos diferentes modelos de corpos de prova. Como informação complementar serão descritas algumas teorias nas quais são consideradas as deformações.

2.1 - LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO

Neste tipo de ligação a transmissão de carga se dá mediante as tensões de cisalhamento da linha adesiva.

2.1.1 - ANÁLISE TEÓRICA

A análise teórica da distribuição de cargas através da linha adesiva será feita considerando-se a teoria clássica da resistência dos materiais.

2.1.1.1 - TENSÕES ATUANTES

A análise partirá da ligação indicada na figura 32, detalhe 1, e a figura 35 representa a metade desta ligação.

(45) MÖHLER, KARL. - Capacidade de carga de vigas y puntales de sección transversal compuesta y medios de unión flexibles.
T. U. Karlsruhe, 1956.

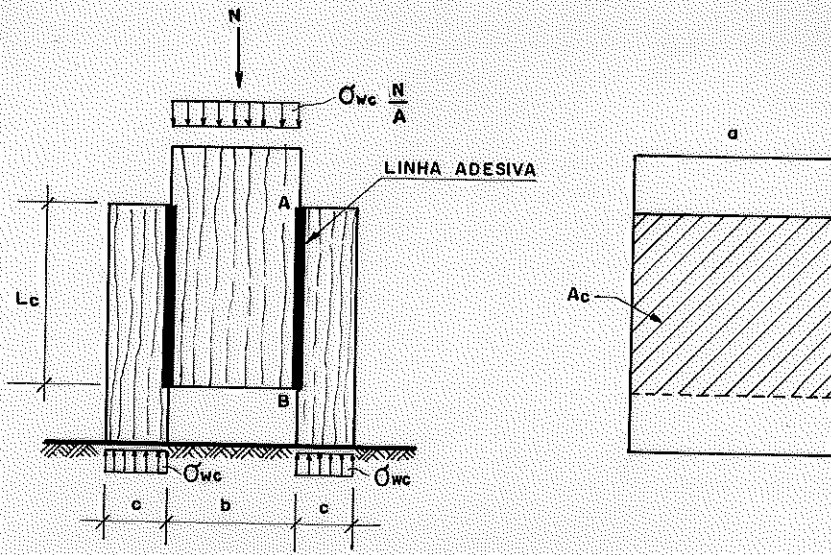


FIG.35-LIGAÇÃO TÍPICA SOLICITADA À COMPRESSÃO

Sendo:

σ_{wc} = tensão de compressão da madeira

L_c = comprimento da linha adesiva

N = força normal solicitante

$A_c = a.L_c$; área colada

A linha adesiva esta representada na figura 36.

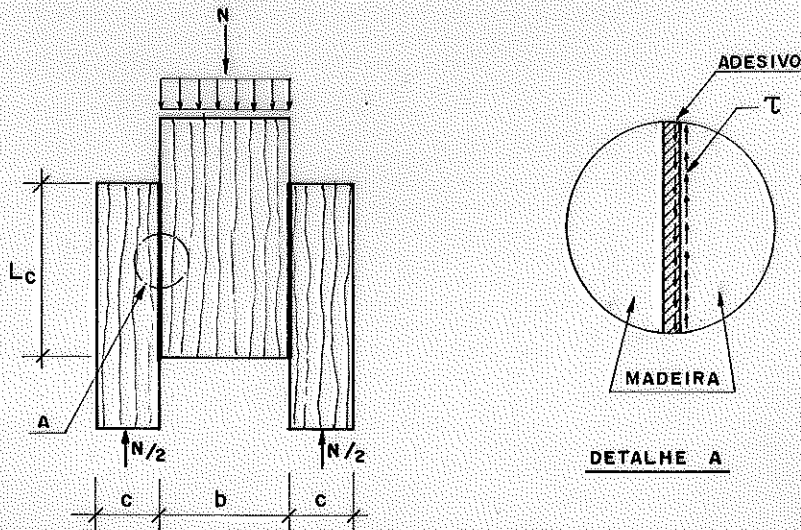


FIG.36-ESFORÇOS NA LINHA ADESIVA

A força $N/2$, aplicada no centro de gravidade da metade da peça central, deve ser transmitida para a cobrejunta por intermédio da linha adesiva de comprimento L_c . Esta transmissão se dá através das tensões de cisalhamento no adesivo e na interface da madeira, figura 36, detalhe A.

Segundo Leicester (46), a distribuição das tensões de cisalhamento ao longo da linha adesiva, na fase elástica, não é linear, caracterizando-se pela concentração de tensões no início e no final da linha adesiva. Na fase plástica é uniforme ao longo da linha adesiva, figura 37.

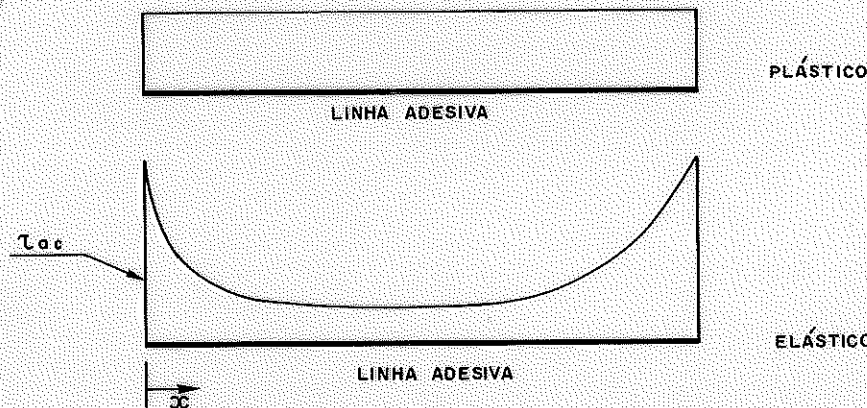


FIG 37-DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DE CISALHAMENTO NA LINHA ADESIVA

Para definir a transmissão do esforço da peça central à cobrejunta será considerado o elemento apresentado na figura 38.

Fazendo equilíbrio de forças tem-se:

$$A \cdot (\sigma - d\sigma) + 2 \cdot \tau(x) \cdot a \cdot dx = A \cdot \sigma$$

$$d\sigma = \frac{2 \cdot \tau(x) \cdot a \cdot dx}{A}$$

integrando;

$$\int d\sigma = \frac{a}{A} \cdot \int_0^{L_c} 2 \cdot \tau(x) \cdot dx$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot a}{A} \cdot \int_0^{L_c} \tau(x) \cdot dx$$

Impondo a distribuição de tensão de cisalhamento uniforme e com:

$$A = a \cdot b \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{N}{a \cdot b}$$

obtem-se

$$\sigma = \frac{2 \cdot a}{a \cdot b} \cdot \int_0^{L_c} \tau_{ac} \cdot dx$$

$$\frac{N}{a \cdot b} = \frac{2 \cdot a}{a \cdot b} \cdot \tau_{ac} \cdot L_c$$

$$\frac{N}{2} = a \cdot L_c \cdot \tau_{ac} \quad \dots \dots \dots (1)$$

sendo:

τ_{ac} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na compressão

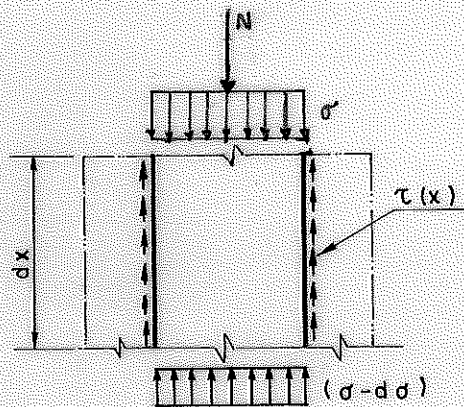


FIG.38- EQUILÍBRIO DE FORÇAS NO ELEMENTO dx .

De acordo com a equação 1, a transmissão de força de uma peça para outra, com largura constante, varia linearmente com o comprimento da linha adesiva, figura 39.

A tensão de cisalhamento máxima no adesivo ou na interface madeira-adesivo será:

$$\tau_{ac} = \frac{N}{2 \cdot a \cdot L_c} = \frac{N}{2 \cdot A_c} \quad \dots \dots \dots (2)$$

τ_{ac} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na compressão

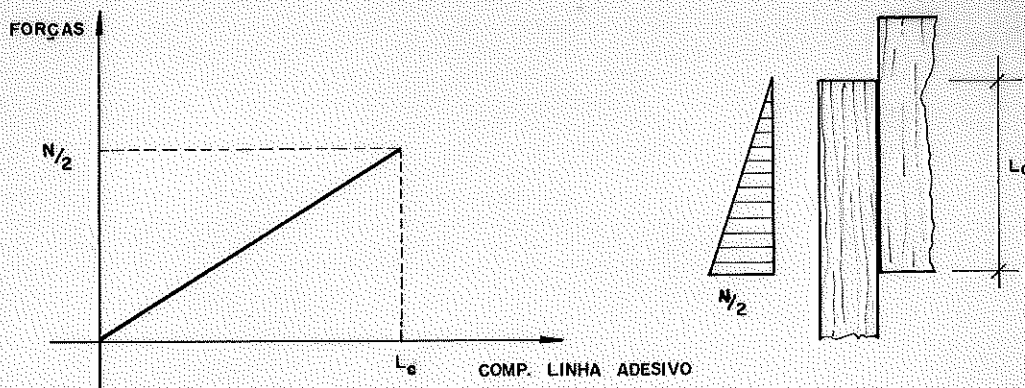


FIG.39-TRANSMISSÃO DE FORÇA DA PEÇA CENTRAL PARA A COBREJUNTA NA FASE PLÁSTICA.

A tensão definida na equação 2 pode ser considerada como sendo a tensão última, pois, foi obtida a partir da plastificação do elemento.

Na fase elástica, a transmissão da carga não varia linearmente com o comprimento, mas é cumulativa e a área definida pela curva de transmissão de forças, pode ser considerada linear, figura 40.

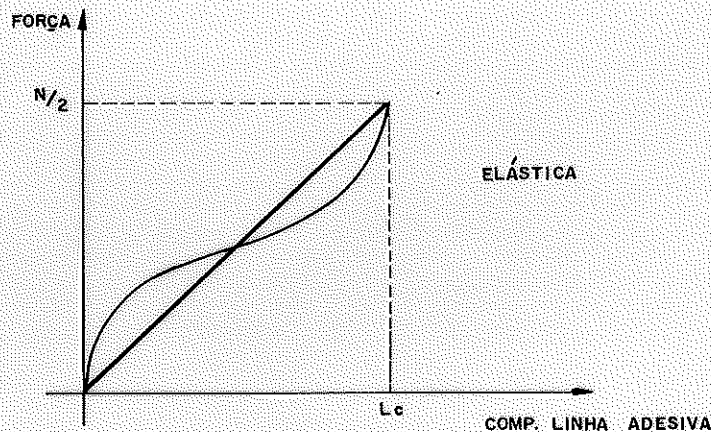


FIG. 40-TRANSMISSÃO DE FORÇA DA PEÇA CENTRAL PARA A COBREJUNTA NA FASE ELÁSTICA

Para Leicester, as tensões de cisalhamento no início e no fim da linha adesiva são mais elevadas, mas não podem ultrapassar as tensões de plastificação.

Assim sendo, a ruptura da ligação adesiva ocorrerá quando a tensão solicitante de cisalhamento, em todos os pontos da li-

na adesiva, atingir o valor da tensão de plastificação do adesivo ou da interface adesivo-madeira.

Outra tensão aparentemente sem importância é a tensão de tração normal devida à excentricidade da carga solicitante. Na figura 41, encontra-se representado o momento (M) e o binário (F), aplicado perpendicularmente ao plano da película adesiva. A distribuição de tensões adotada como hipótese é apresentada, também, na figura 41.

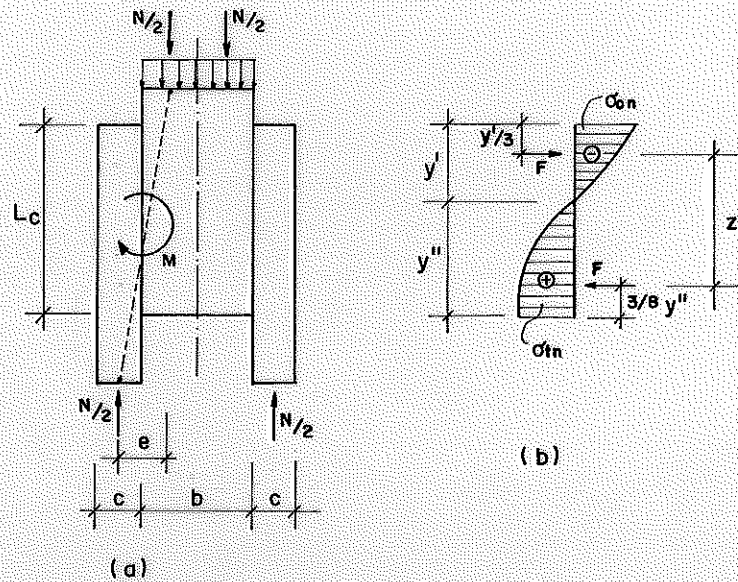


FIG. 41- a) EQUILÍBRIO ESTÁTICO DE ESFORÇOS
b) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO

No apêndice D encontra-se um desenvolvimento teórico da análise destas tensões. As tensões normais são determinadas a partir do momento fletor, assim;

$$M = \frac{N \cdot c}{2} = \frac{N \cdot c}{2} \quad ; \quad \text{com } b = \frac{c}{2} \quad \text{e} \quad M = F \cdot z \quad \rightarrow \quad F = \frac{M}{z}$$

tem-se:

$$\begin{aligned} \sigma_{en} &= \frac{2 \cdot F}{y' \cdot a} = \frac{2 \cdot M}{y' \cdot a \cdot z} = \frac{N \cdot c}{y' \cdot a \cdot z} \dots\dots\dots (3) \\ \sigma_{tn} &= \frac{3 \cdot F}{2 \cdot y'' \cdot a} = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot y'' \cdot a \cdot z} = \frac{3 \cdot N \cdot c}{4 \cdot y'' \cdot a \cdot z} \end{aligned}$$

sendo:

- z = braço de alavanca do binário F
- y' = distância da face superior da peça à linha neutra
- y'' = distância da face inferior da peça à linha neutra

σ_{cn} = tensão de compressão normal à linha adesiva

σ_{tn} = tensão de tração normal à linha adesiva

Estas equações representam a tensão de tração e a tensão de compressão normal às fibras. A ruptura da ligação ocorrerá por cisalhamento ou por tração normal às fibras.

Um fator determinante para o colapso da ligação é a deformação excessiva traduzida pela deformação da linha adesiva e a interface madeira-adesivo. Esta deformação será determinada a partir do diagrama tensão de cisalhamento x deformação específica relativa entre a peça central e a cobrejunta, figura 42.

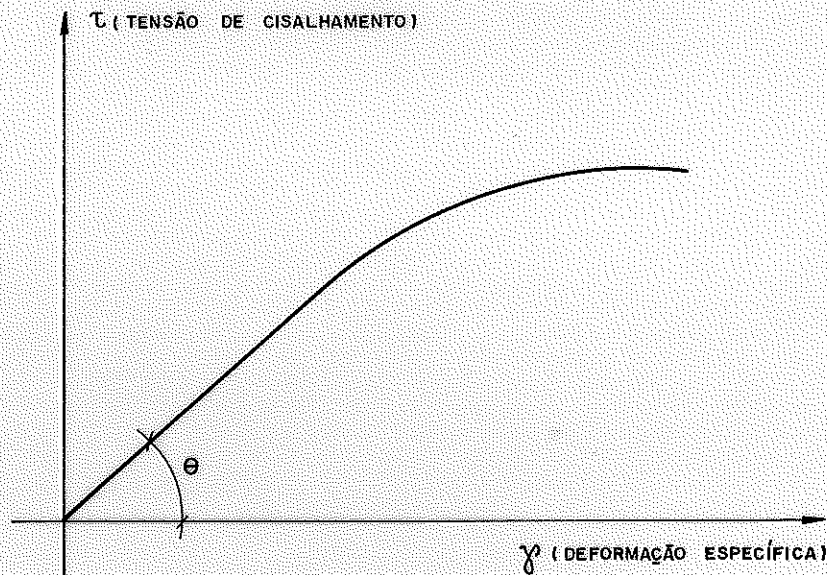


FIG. 42-DIAGRAMA TENSÃO DE CISALHAMENTO-DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

sendo:

$$\gamma = \frac{\Delta l}{l} \quad , \quad \tau = \frac{N}{2 \cdot A_c} \quad e;$$

$$MD = \text{tg}(\theta) = \frac{\tau}{\gamma} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

onde:

MD = módulo de deformação da ligação

γ = deformação específica relativa

τ = tensão de cisalhamento

O módulo de deformação da ligação é também conhecido por alguns pesquisadores como rigidez da ligação.

2.1.2 - TEORIA DA RUPTURA MECÂNICA LINEAR

Esta teoria é baseada na análise das tensões de uma ligação típica com uma nítida rachadura no início da linha adesiva, figura 43.

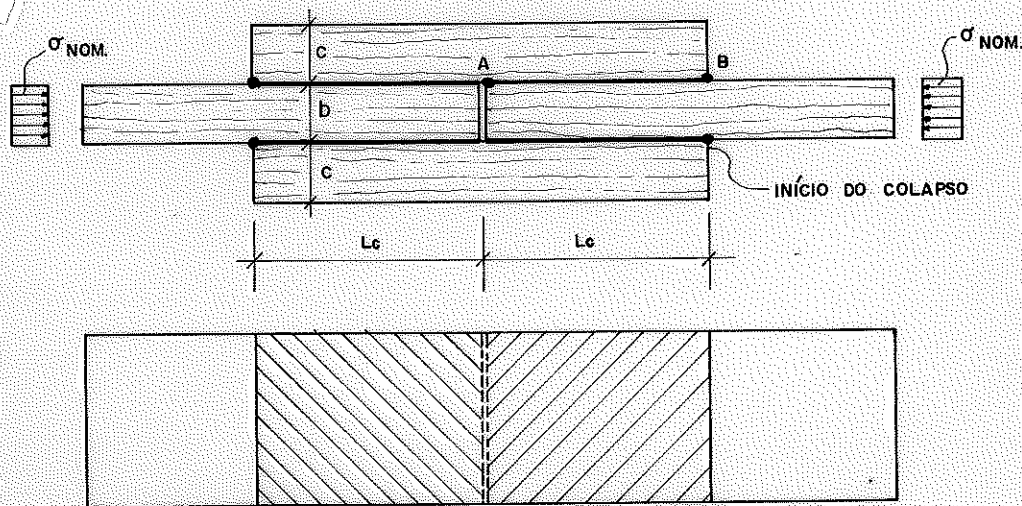


FIG.43-LIGAÇÃO TÍPICA SOLICITADA À COMPRESSÃO

A aplicação desta teoria, para madeira estrutural, foi apresentada por Leicester (47) e Walsh (48). Suscintamente esta teoria se preocupa com a tensão máxima que aparece na ligação típica, mediante a análise elástica de um corpo de prova. A tensão máxima pertence ao domínio do campo de tensões limitadas pelas condições de contorno. De acordo com Leicester (49), geralmente,

(47) LEICESTER, R.H. - The Size Effect of Notches. *Proceedings Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 2., 1969.

(48) WALSH, P.F. - Cleavage Frature in Timber. *CSIRO, Australia*, (65), 1971. (Technology Paper Div. Forest Products).

(49) LEICESTER, R.H. - Some Aspects of Stress Fields at Sharp Notches in Orthotropic Material: I Plane Stress. *CSIRO, Australia*, (57), 1971. (Technology Paper Div. Forest Prod.).

medições das ligações existem dois tipos de campos de tensões máximas. A proporção destes campos é definida pelos fatores de intensidade de tensão (K_A e K_B), que consideram a geometria da ligação e as propriedades elásticas da madeira (ver apêndice C).

A tensão σ , numa região próxima da ligação típica pode ser representada pela equação:

$$\sigma = K_B \cdot (2 \cdot \pi \cdot r)^{-0.4502} \cdot f_A(\theta) + K_B \cdot (2 \cdot \pi \cdot r)^{-0.1028} \cdot f_B(\theta) \dots\dots\dots (4)$$

Sendo r e θ as coordenadas polares referidas à ligação típica. Os termos $f_A(\theta)$ e $f_B(\theta)$ são funções exclusivamente de θ . Somente os fatores de intensidade de tensão (K_A e K_B) influenciam na carga e dependem da estrutura.

A ligação pode ser visualizada como se fosse rodeada por um contorno no qual a tensão estará em concordância com equações semelhantes à equação 4, tendo o mesmo formato da distribuição de tensões para todas as ligações similares em peças estruturais. Assim, a resistência do material dentro deste contorno, pode ser expresso, como função de K_A e K_B . Desta forma, o colapso crítico ocorrerá quando:

$$f\left(\frac{K_A}{K_{AC}}, \frac{K_B}{K_{BC}}\right) = 1 \dots\dots\dots (5)$$

sendo K_{AC} e K_{BC} as características das propriedades da resistência do material, análogas ao módulo de ruptura ou à resistência ao cisalhamento num corpo de prova. K_{AC} é o valor de ruptura de K_A quando K_B é zero e K_{BC} é definido análogamente.

Os valores de K_A e K_B , mostrados no apêndice C, foram obtidos a partir de uma análise elástica bi-dimensional das tensões, usando a técnica dos elementos finitos (50). Estes valores, válidos para a ligação mostrada na figura 43, são adimensionais. Os valores de K_B são inferiores aos valores de K_A e, quando r decrece, a tensão associada com K_A , equação 4, aumenta mais rapidamente em relação a K_B . Conseqüentemente, o colapso crítico para ligações adesivas, de acordo com a teoria da ruptura mecânica linear, pode

(50) WALSH, P.F. - Stress intensity factors by a calibrated finite element method. Eng. Mech. J., Dec. 1972

ser razoavelmente aproximada por:

$$K_A = K_B \dots\dots\dots (6)$$

Em outras palavras, considerada a plastificação completa do material, o colapso crítico terá a forma da equação abaixo:

$$\tau_{ac} = \sigma \cdot \frac{b}{2 \cdot L_c} \dots\dots\dots (7)$$

com $\sigma = \frac{N}{a \cdot b}$ tem-se:

$$\tau_{ac} = \frac{N}{2 \cdot a \cdot L_c} \dots\dots\dots (8)$$

A equação 8 é semelhante à equação 2, obtida na análise das tensões, no item 2.1.1, confirmando a validade da sua aplicação.

Em 1973, Leicester e Walsh (51) verificaram experimentalmente o colapso crítico na teoria da ruptura mecânica linear, usando corpos de prova de 4 espécies de madeira, seca ao ar (12% de umidade) e ligadas com adesivo de caseína.

Os resultados obtidos demonstraram bastante aproximação da predição da equação 6. Baseados nos resultados teóricos e experimentais, propuseram a equação para a determinação da resistência da ligação, do tipo mostrado na figura 36, apresentada a seguir.

$$\frac{\sigma_{nom}^*}{\tau_y^*} = b^{-0,5} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{8} \cdot \frac{(2 \cdot L_c)}{b} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

válidas para:

$$\frac{2 \cdot L_c}{b} = 2 \text{ a } 8$$

$$\frac{2 \cdot c}{b} = 0.5 \text{ a } 2$$

Sendo σ_{nom}^* e τ_y^* a tensão de compressão admissível e a tensão de cisalhamento de projeto, respectivamente. Na figura 44 é apresentada a representação gráfica desta equação.

(51) WALSH, P.F., LEICESTER, R.H., RYAN, A. - Op. cit.

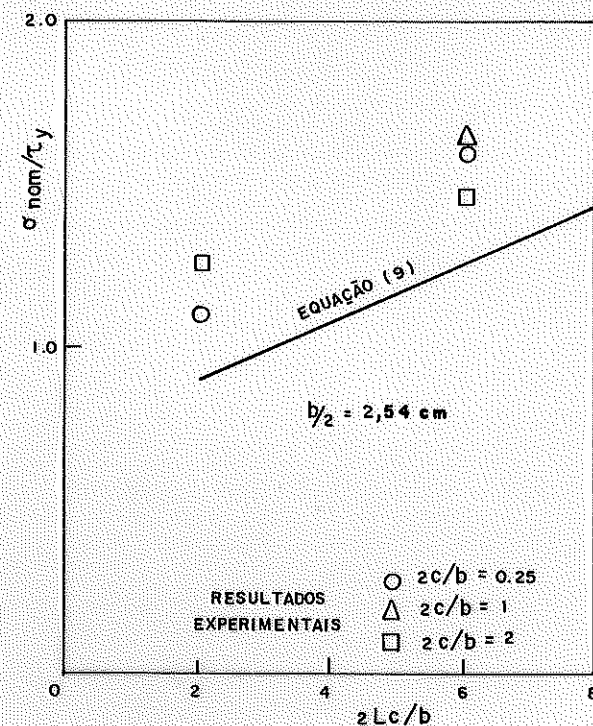


FIG. 44-REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA EQUAÇÃO 9

Esta equação foi incluída na norma australiana, AS-CA65, 1972 (52).

2.2 - LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISCALHAMENTO NA TRAÇÃO

Todas as considerações feitas para as ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão são válidas para tração.

2.2.1 - ANÁLISE TEÓRICA DAS TENSÕES

Seja o detalhe 2 mostrado na figura 32, figura 45.

Todas as considerações e formulações estudadas, nas ligações solicitadas à compressão, são análogas para o caso das liga-

(52) AUSTRALIAN STANDARD CODE OF PRACTICE FOR THE USE OF TIMBER IN STRUCTURES. - ANON AS-CA65., Sydney Australia, 1972 (clause 4.10.3.2).

ções solicitadas à tração

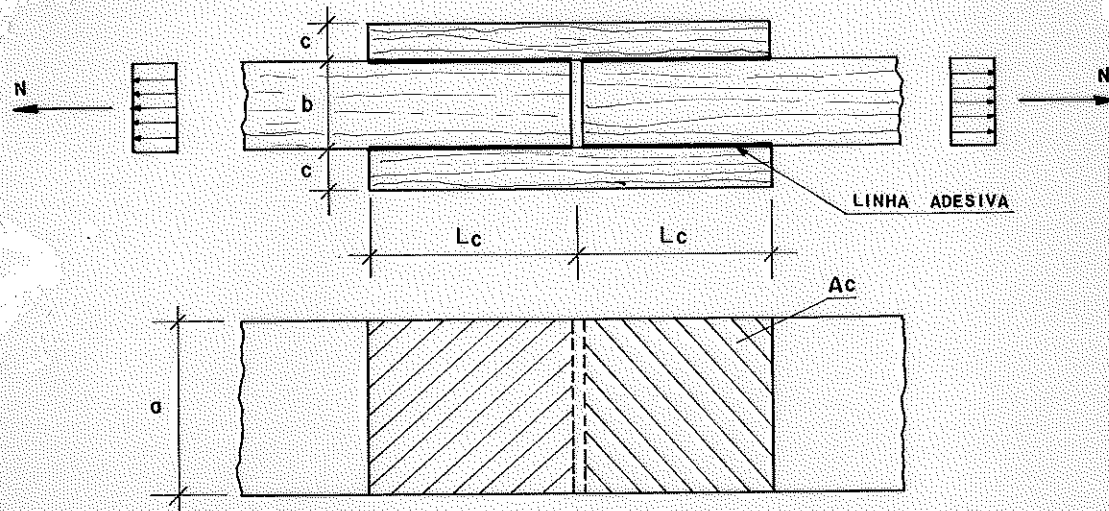


FIG. 45-LIGAÇÃO TÍPICA SOLICITADA À TRAÇÃO

Assim as equações:

$$\tau_{at} = \frac{N}{2 \cdot a \cdot L_c} \dots \dots \dots (10)$$

$$\sigma_{cn} = \frac{N \cdot c}{y' \cdot a \cdot z} \quad e \quad \sigma_{tn} = \frac{3 \cdot N \cdot c}{4 \cdot y'' \cdot a \cdot z} \dots \dots \dots (11)$$

sendo:

- τ_{at} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na tração
- σ_{cn} = tensão de compressão normal à linha adesiva
- σ_{tn} = tensão de tração normal à linha adesiva

representam respectivamente a tensão de cisalhamento máxima da ligação adesiva na tração e a tensão máxima de tração e compressão normal à linha adesiva, figura 46.

Analogamente ao exposto no item 2.1.2. Pode-se afirmar : A tensão σ numa região próxima da linha adesiva tem a seguinte expressão:

$$\sigma = K_A \cdot (2 \cdot \pi \cdot r)^{-0,4502} \cdot f_A(\theta) + K_B \cdot (2 \cdot \pi \cdot r)^{-0,1028} \cdot f_B(\theta) \dots (12)$$

e a resistência da ligação adesiva do tipo da figura 45 tem a forma:

$$\frac{\sigma_{nom}^*}{\tau_y^*} = b^{-0.5} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{8} \cdot \frac{(2 \cdot L_c)}{b} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

válidas para:

$$\frac{2 \cdot L_c}{b} = 2 \text{ a } 8 \quad \text{e} \quad \frac{2 \cdot c}{b} = 0.5 \text{ a } 2$$

sendo:

σ_{nom}^* = tensão de tração admissível
 τ_y^* = tensão de cisalhamento de projeto

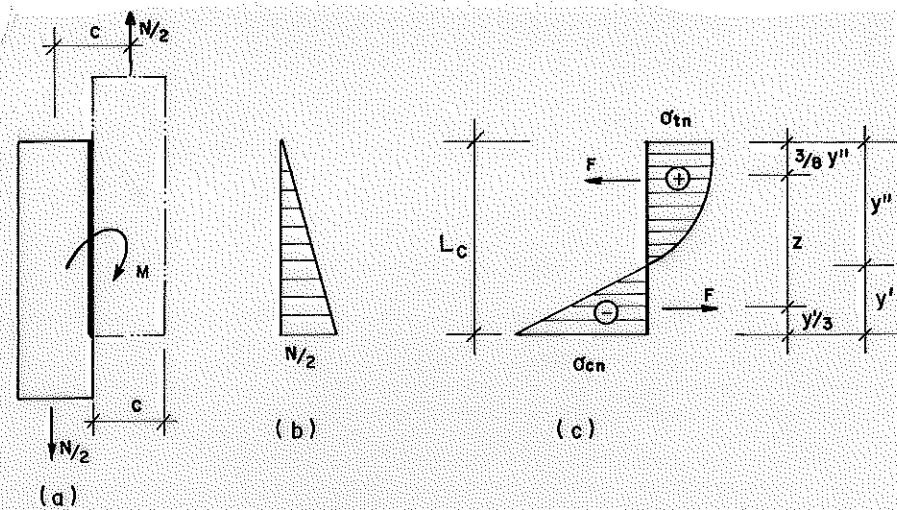


FIG. 46- a) EQUILÍBRIO ESTÁTICO DE FORÇAS
 b) TRANSMISSÃO DE CARGA
 c) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

2.3 - LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA FLEXÃO E NA TORÇÃO

A literatura nacional e internacional a respeito das ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na flexão é escassa. Uma analogia com a análise teórica das vigas compostas é uma alternativa.

As ligações sujeitas a momento fletor com a película adesiva trabalhando à torção tem recebido pouca atenção dos pesquisadores. Segerlind (53), desenvolveu equações de distribuição de tensões em duas direções, considerando o efeito da força cortante.

Por ser este trabalho basicamente experimental, não será analisada a profundidade destas teorias. Mas, serão mencionadas e discutidas as principais hipóteses.

2.3.1 - ANÁLISE DOS ESFORÇOS NA FLEXÃO

2.3.1.1 - ANÁLISE BÁSICA

A partir do modelo de ensaio da figura 47, obtem-se o esquema estático:

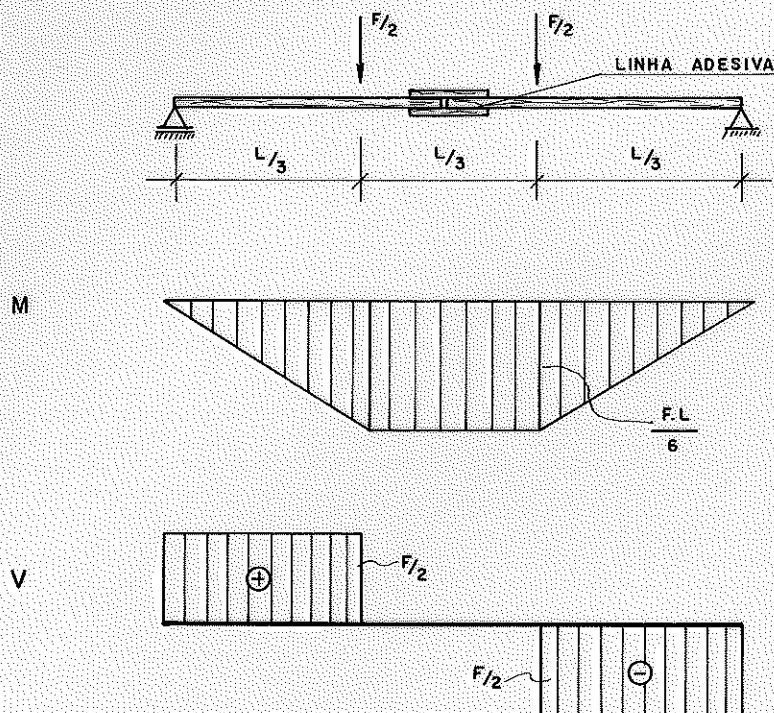


FIG. 47- ESQUEMA ESTÁTICO E ESFORÇOS SOLICITANTES NO MODELO DE FLEXÃO

A ligação adesiva, no meio do vão está sendo solicitada apenas por momento fletor, figura 48.

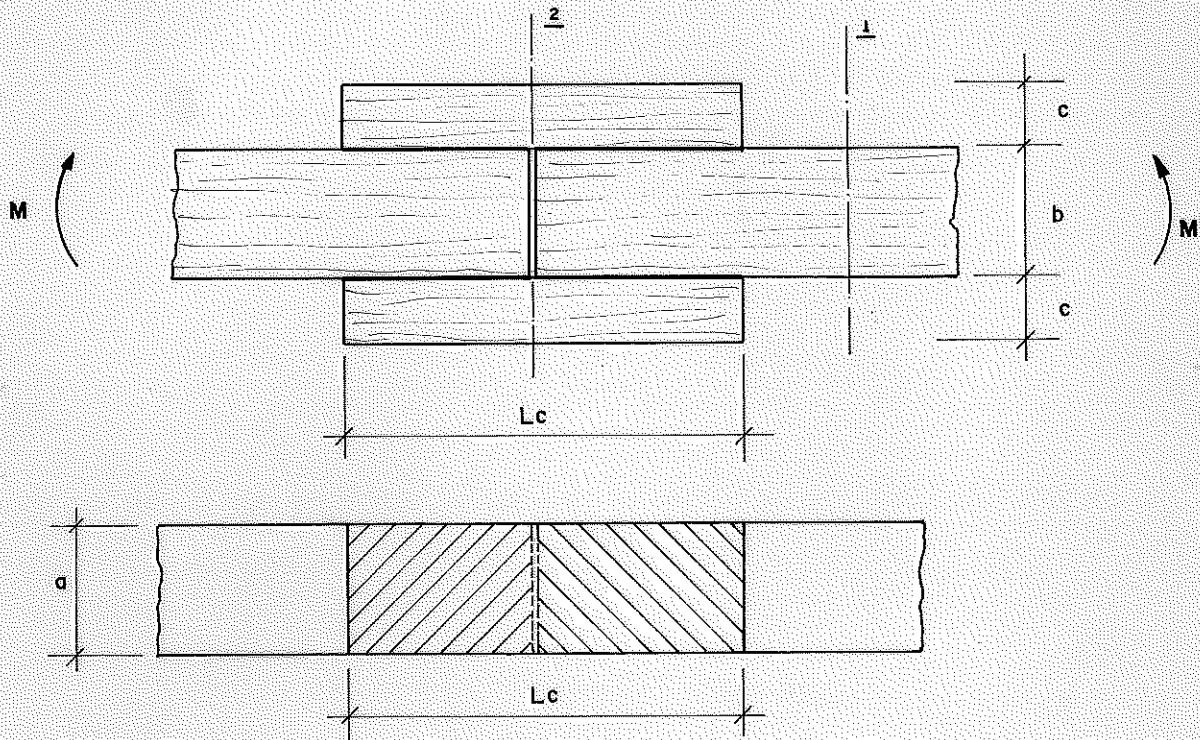


FIG. 48- LIGAÇÃO TÍPICA NA FLEXÃO PURA

No trecho compreendido entre os eixos 1 e 2, figura 49, ocorre a distribuição de tensões normais devido à flexão, figura 49.

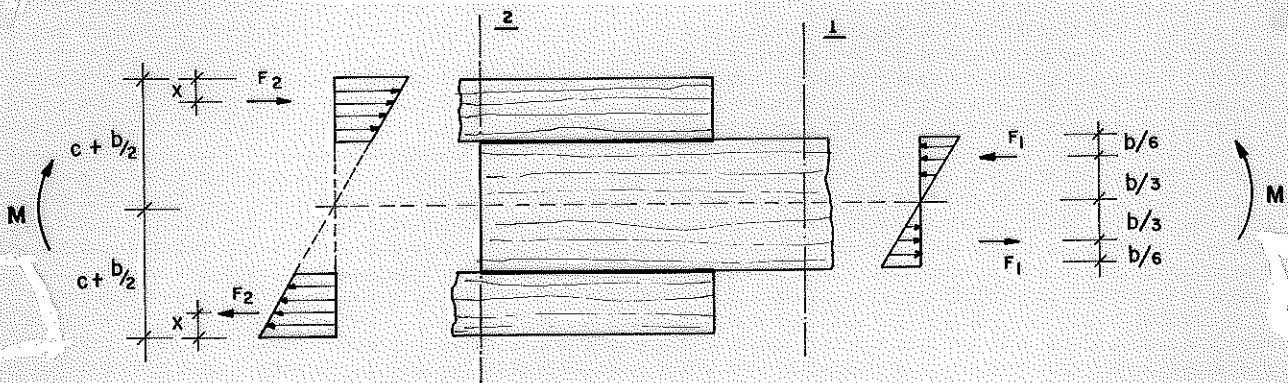


FIG. 49- DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DEVIDA À FLEXÃO

As forças F_2 , aplicadas nas cobrejuntas, foram transmitidas através da linha adesiva. A distribuição de tensões de cisalhamento na linha adesiva, no instante da ruptura, encontra-se na fase plástica do material, figura 50.

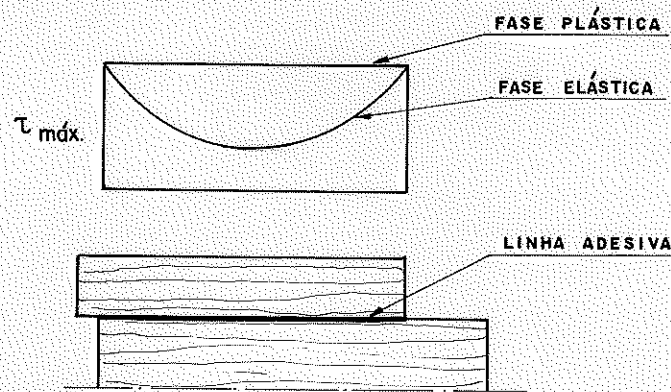


FIG. 50-DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA LINHA ADESIVA

Desta maneira:

$$F_2 = \tau_{\max} \cdot \frac{L_c \cdot a}{2}$$

com
tem-se

$$\tau_{ab} = \tau_{\max}$$

$$\tau_{ab} = \frac{2 \cdot F_2}{L_c \cdot a} \dots\dots\dots (14)$$

sendo:

τ_{ab} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na flexão

Assim, para conhecer, τ_{ab} basta determinar o valor da força F_2 a partir da distribuição de tensões normais, na seção 2-2, devido ao momento fletor. Admitindo como hipótese uma distribuição linear, figura 51, e a partir da equação:

$$\sigma = \frac{M}{J_{2-2}} \cdot y$$

com

$$J_{2-2} = 2 \cdot \left\{ \frac{a \cdot c^3}{12} + a \cdot c \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{c}{2} \right)^2 \right\} \quad e$$

$$y_1 = \frac{b}{2} + c = \frac{b + 2 \cdot c}{2}$$

$$y_1' = \frac{b}{2}$$

tem-se

$$\sigma_1 \equiv \sigma_2 = \frac{N.L.}{6} \cdot \frac{b+2.c}{2.J_{2-2}} = \frac{N.L.(b+2.c)}{12.J_{2-2}} \dots\dots\dots (15)$$

$$\sigma'_1 \equiv \sigma'_2 = \frac{N.L.}{6} \cdot \frac{b}{2.J_{2-2}} = \frac{N.L.b}{12.J_{2-2}} \dots\dots\dots (16)$$

assim:

$$F_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma'_1)}{2} \cdot c \cdot a$$

$$\tau_{ab} = \frac{c}{L_c} \cdot (\sigma_1 + \sigma'_1) \dots\dots\dots (17)$$

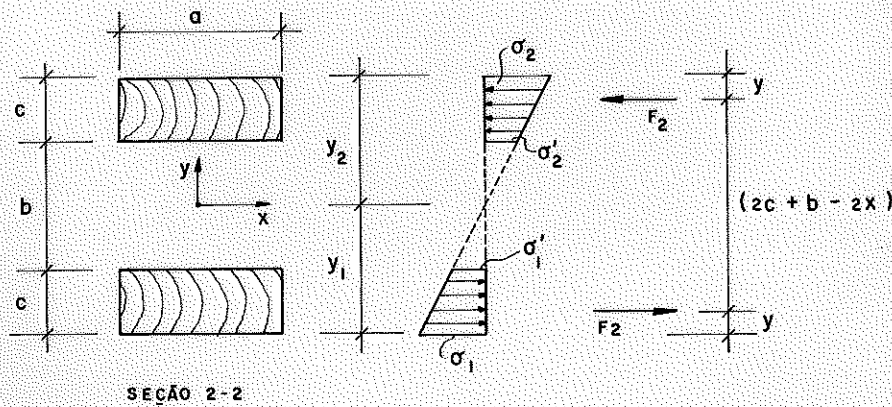


FIG.51- DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NORMAIS NA SEÇÃO 2-2

Ainda na linha adesiva, devido à excentricidade da força F_2 em relação ao centro de gravidade da cobrejunta, existirão tensões de tração, porém bastante inferiores às de ruptura.

2.3.1.2 - ANALOGIA COM VIGA COMPOSTA (54)

Para compreender melhor a análise feita a seguir, é necessário definir uma ligação elástica entre peças. Considerando-se três peças maciças e tanto quanto possível idênticas, uma delas partida ao meio e as metades sobrepostas e outra partida ao meio e as metades coladas. Quando fletidas, a peça maciça comporta-se segundo a teoria clássica de vigas fletidas sem nenhum deslocamento relativo entre fibras centrais. Na peça bipartida sobreposta, cada elemento trabalhará individualmente aparecendo um deslocamen-

(54) MÖHLER, K. - Op. cit.

to relativo entre as peças. Já a peça bipartida e colada terá também deslocamentos relativos porém muito pequenos, situando-se intermediariamente aos extremos indicados na figura 52.

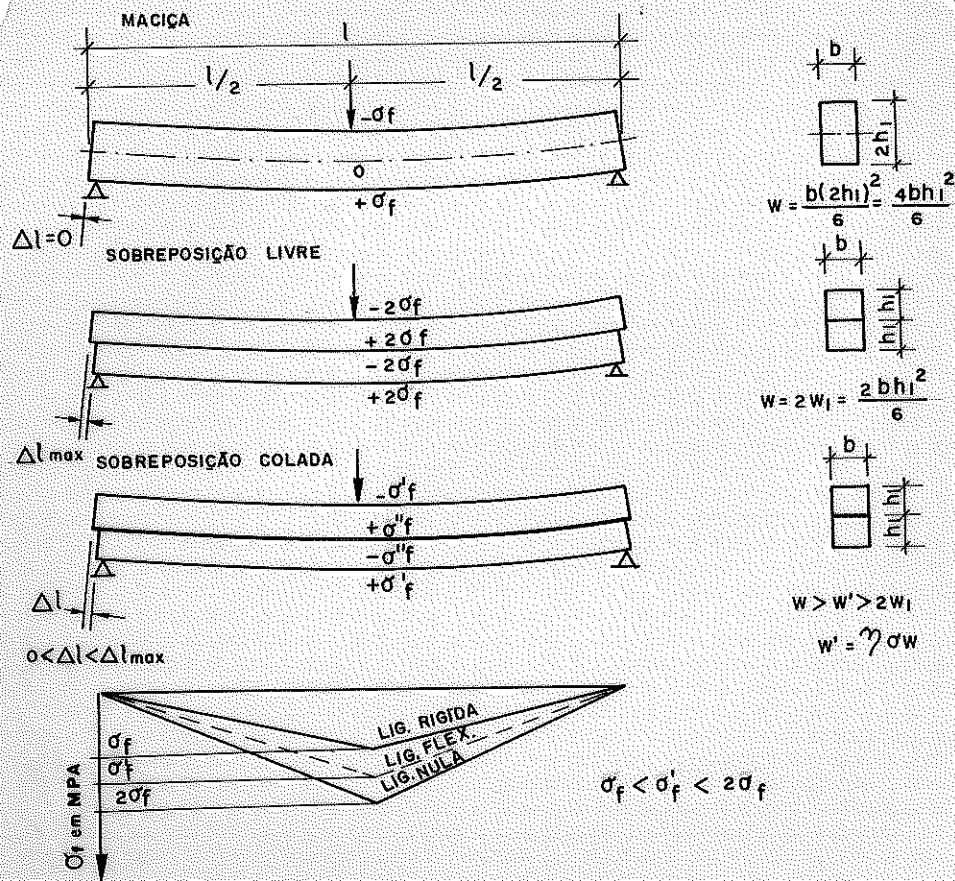


FIG.52-TIPOS DE LIGAÇÃO EM VIGAS DE MADEIRA DE SEÇÃO TRANSVERSAL COMPOSTA

A hipótese fundamental para o cálculo de vigas compostas fletidas, leva em consideração a ligação entre as superfícies de contacto.

O deslocamento relativo entre os elementos é governado pela rigidez específica da ligação ou como apresentado no item 2.1.1, pelo módulo de deformação da ligação (MD). Desta maneira, o deslocamento relativo em um ponto qualquer, no qual atua o fluxo de cisalhamento $T(x)$ (N/cm), é definido através da expressão:

$$\delta(x) = \frac{T(x)}{MD} \quad (\text{cm})$$

Assim, o deslocamento relativo $\delta(x)$ é uma medida direta da solicitação da linha adesiva.

Considerando um elemento diferencial da ligação e o sis-

tema estático da figura 53 (55). O deslocamento relativo $\delta(x)$ entre dois pontos coincidentes pode ser imaginado composto por uma parcela devida à flexão $\delta_f(x)$ e outra devida aos esforços normais $\delta_n(x)$, figura 53-c.

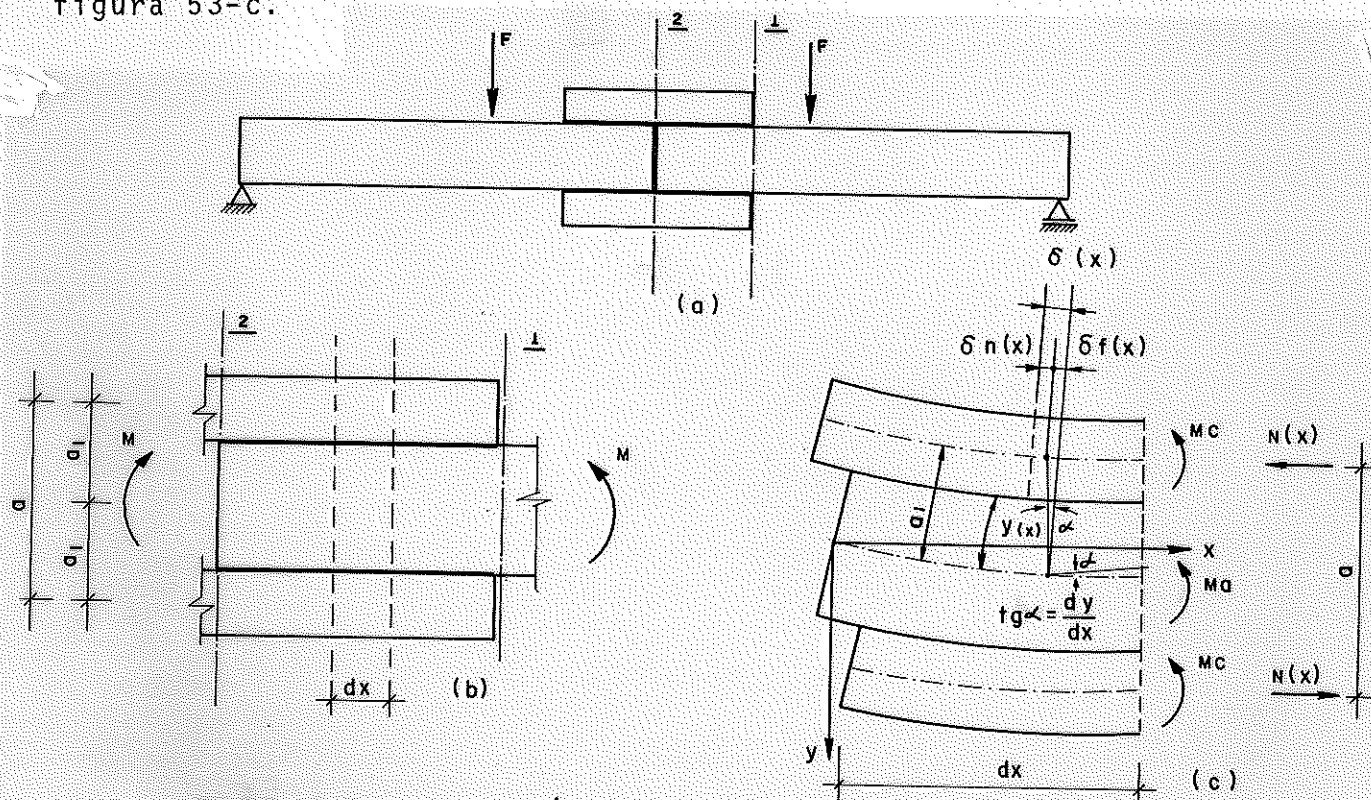


FIG.53- a) ESQUEMA ESTÁTICO
 b) TRECHO DOS EIXOS 1e2
 c) DESLOCAMENTOS RELATIVOS E DE FLEXÕES

Desta maneira:

$$\delta(x) = \delta_f(x) + \delta_n(x) \dots\dots\dots (18)$$

Considerando-se separadamente estes efeitos, figura 54, tem-se:

$$\delta_f(x) = a_1 \cdot \frac{dy(x)}{dx} \quad \text{e}$$

$$d\{\delta_n(x)\} = \frac{\sigma_c^n(x)}{E_c} \quad \sigma_c^n(x) = E_c \cdot \frac{d\{\delta_n(x)\}}{dx}$$

resultando:

(55) WAGNER, M.M. - El fundamento de las especificaciones de la norma alemana DIN-1052....., Santiago, Universidade do Chile, seção de construção, 1975. (informe nº 45)

$$N(x) = \sigma_c^n(x) \cdot A = E_c \cdot A \cdot \frac{d\{\delta_n(x)\}}{dx} \dots\dots\dots (19)$$

sendo:

- $\sigma_c^n(x)$ = tensão axial correspondente a $N(x)$
- A = seção transversal da cobrejunta
- E_c = módulo de elasticidade da cobrejunta

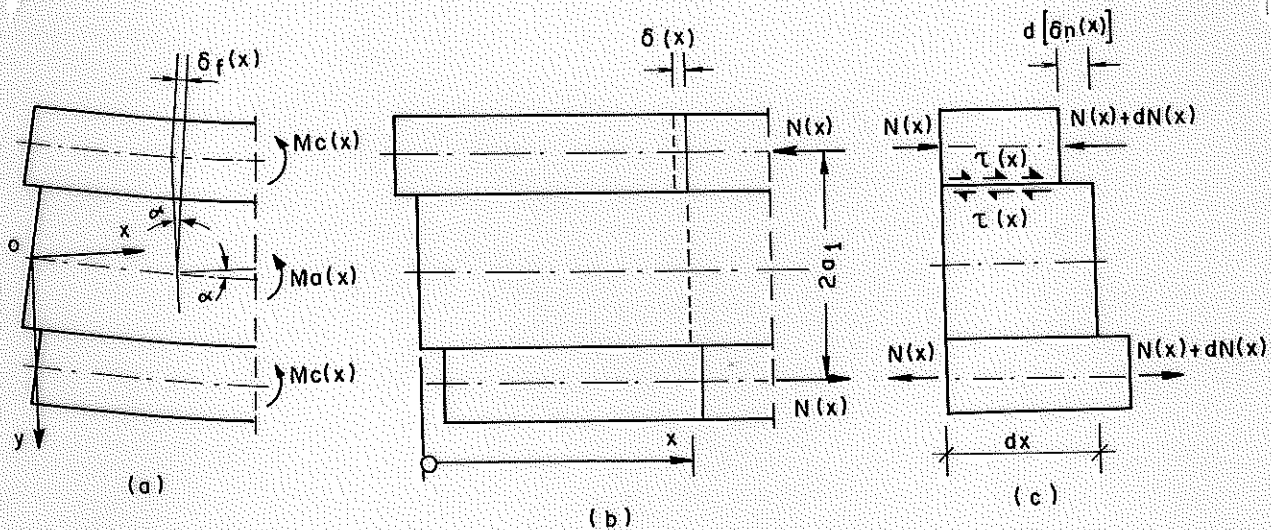


FIG. 54 - a) COMPONENTE DO DESLOCAMENTO RELATIVO DEVIDO A FLEXÃO
 b) COMPONENTE DO DESLOCAMENTO RELATIVO DEVIDO A FORÇA NORMAL
 c) ANÁLISE DIFERENCIAL DO EFEITO DA FORÇA NORMAL

Fazendo equilíbrio de forças normais figura 54-b, a partir das expressões (18) e (19) obtém-se a equação (20).

Decompondo o momento externo nos momentos resistentes das peças $M_c(x)$, $M_a(x)$ e o momento devido a força normal $M_3 = N_c \cdot a$ obtém-se:

$$M(x) = 2 \cdot M_c(x) + M_a(x) + N_c \cdot a$$

Com algumas substituições matemáticas determina-se a equação (21).

$$\frac{d^2\{\delta(x)\}}{dx^2} - \frac{MD \cdot \delta(x)}{E_c \cdot A} = a_1 \cdot \frac{d^3y}{dx^3} \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} - \frac{2 \cdot A \cdot a^2 \cdot 1}{I \cdot a_1} \cdot \frac{d\{\delta(x)\}}{dx} = - \frac{M(x)}{E_c \cdot I} \dots\dots\dots (21)$$

sendo:

$$I = I'' + 2.A.a_1^2$$

$$I'' = 2.I_c + I_a$$

I_c = momento de inércia da cobrejunta

I_a = momento de inércia da peça central

fazendo:

$$\omega^2 = \frac{MD}{E_c \cdot A} \quad \text{e} \quad \alpha^2 = \frac{2.A.a_1^2}{I}$$

as equações poderão ser escritas:

$$\delta'' - \omega^2 \cdot \delta = a_1 \cdot y'''' \quad \dots \quad (a)$$

$$y'' - \frac{\alpha^2}{a_1} \cdot \delta' = - \frac{M}{E_c \cdot I} \quad \dots \quad (b)$$

Com a finalidade de estabelecer equações diferenciais se paradas para o deslocamento relativo e para as flechas, foram feitas várias substituições chegando-se a:

$$\delta'' - \left(\frac{\omega}{\beta}\right)^2 \delta = - \frac{a_1 \cdot V(x)}{\beta^2 \cdot E \cdot I} \quad \dots \quad (22)$$

$$y'''' - \left(\frac{\omega}{\beta}\right)^2 \cdot y'' = \frac{1}{\beta^2 \cdot E \cdot I} \cdot (\omega^2 \cdot M(x) + q(x)) \quad \dots \quad (23)$$

com $\beta = 1 - \alpha^2$

A solução da equação 22 possibilita determinar o deslocamento relativo $\delta(x)$ e, portanto, a força atuante na linha adesiva $T(x) = MD \cdot \delta(x)$, e as forças normais

$$N(x) = \int_0^x T(x) \cdot dx$$

A equação 23 permite avaliar as deflexões para cada tipo de solicitação, como também a eficiência da ligação.

2.3.2 - ANÁLISE DOS ESFORÇOS NA TORÇÃO

A análise experimental de tensões numa ligação na qual o adesivo esteja sendo solicitado ao cisalhamento na torção é relati

vamente complicada. Por isto e por insuficiência de condições de instrumentação apropriada para a verificação experimental, optou-se por uma análise simplificada de tensões, sem deixar de expor uma das teorias mais atualizadas sobre o assunto.

2.3.2.1 - ANÁLISE BÁSICA

Adotando o mesmo esquema estático definido no item 2.3.1, com as cobrejuntas em posição vertical, figura 55.

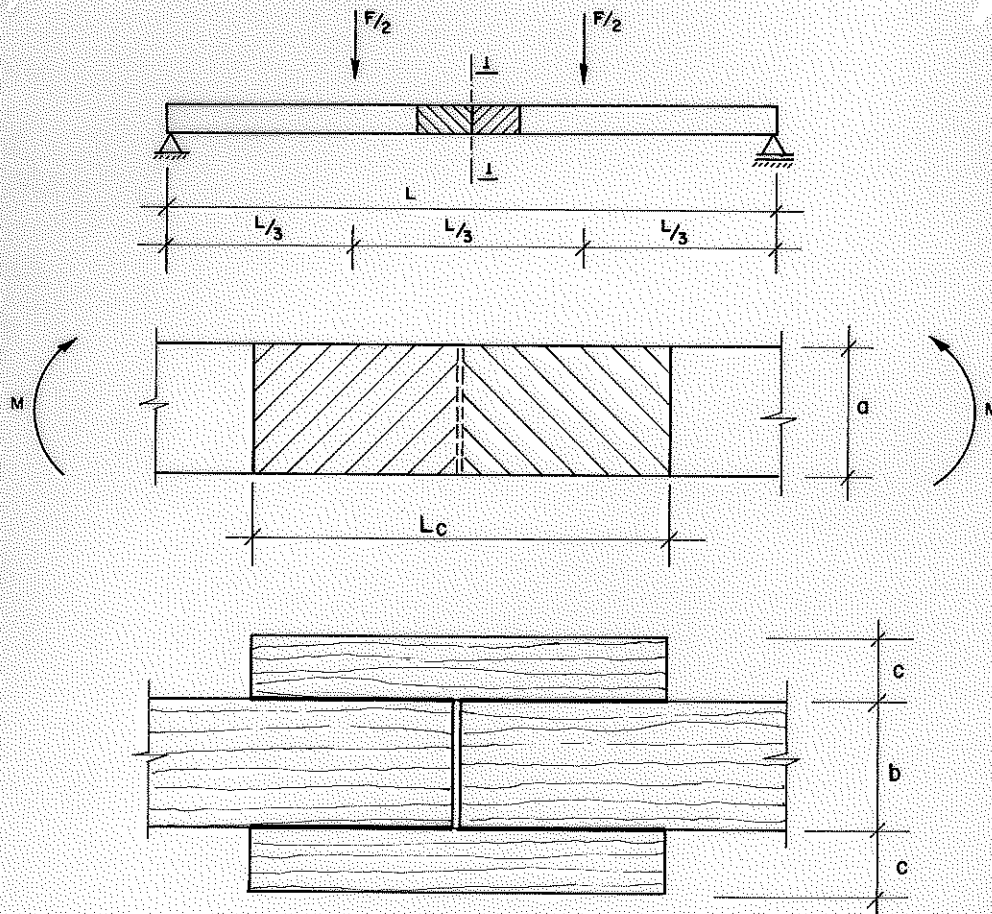


FIG. 55 - LIGAÇÃO TÍPICA NA TORÇÃO

Assim, o momento fletor atuante na peça central, deverá ser transmitido à cobrejunta por intermédio da linha adesiva, figura 56.

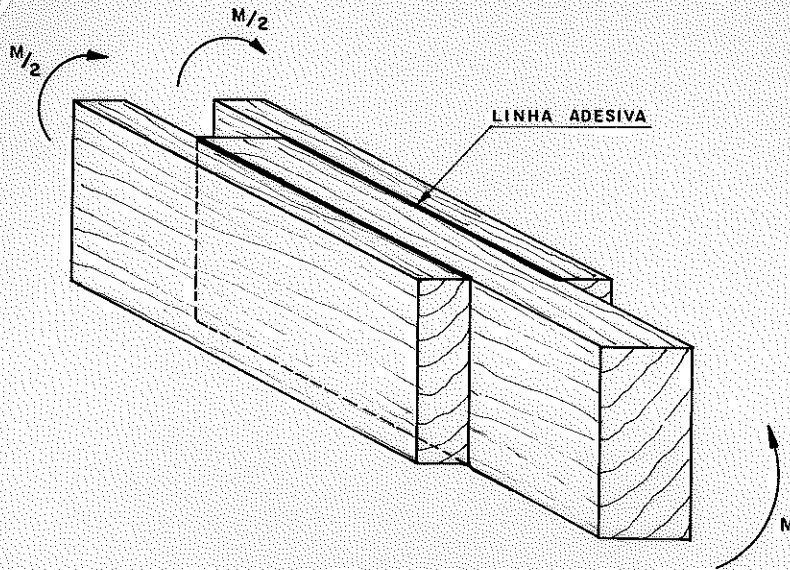


FIG. 56- TRANSMISSÃO DO MOMENTO FLETOR

A película adesiva estará sendo solicitada por um momento torçor, equivalente ao momento fletor transmitido à cobrejunta, figura 57.

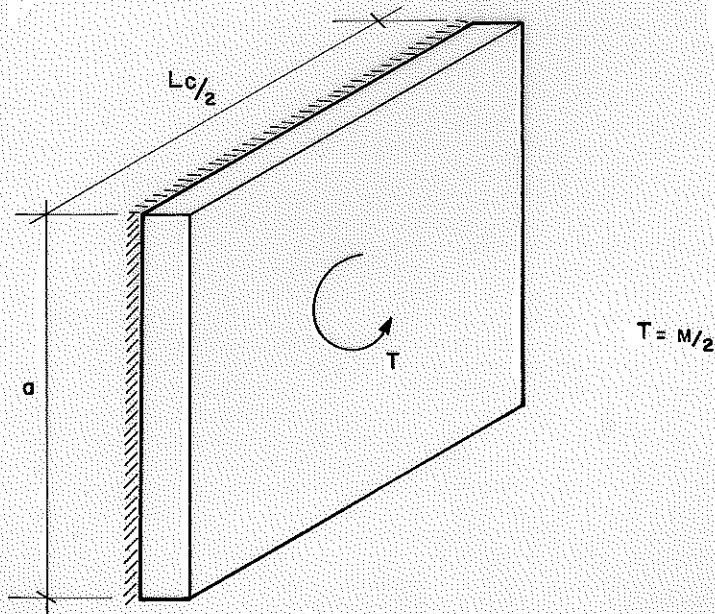


FIG. 57- SOLICITAÇÃO DA PELÍCULA DE ADESIVO

Esta sollicitação da película adesiva se traduz em um problema de torção simples, com seção retangular. Este assunto foi bastante estudado por Timoshenko (56), Torroja (57) e outros.

A distribuição das tensões de cisalhamento devido ao momento torçor no plano da película adesiva tem a forma da figura 58, onde a tensão máxima de cisalhamento se dá no ponto (A).

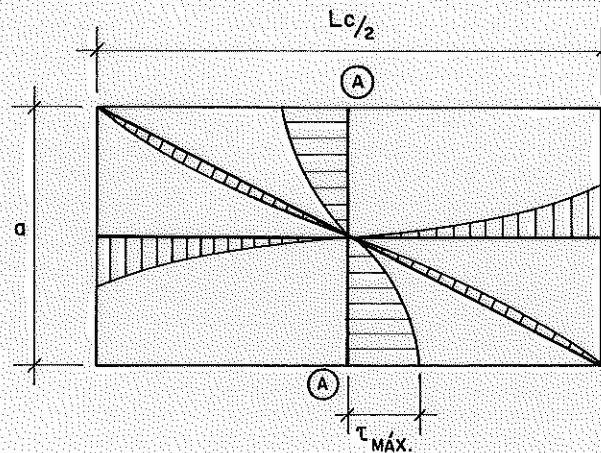


FIG. 58 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO NA TRAÇÃO NUMA SEÇÃO RETANGULAR

A equação da tensão máxima é (58):

$$\tau_{ato} = \tau_{max}$$

$$\tau_{ato} = \frac{T}{\{0.33 - 0.22 \cdot a/b + 0.10 \cdot (a/b)^2\} a^2 \cdot b} \dots \dots \dots (24)$$

sendo:

$$b > a \quad , \quad b = \frac{L_c}{2}$$

τ_{ato} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na torção

(56) TIMOSHENKO, S. - Teoria de la elasticidad., Ed. Ateneo , Buenos Aires, Argentina, 1954.

(57) TORROJA, E. - Lecciones elementares de elasticidad con aplicacion en la tecnica de la construccion., Ed. Dossat. S.A. , Madrid, 1945.

(58) Op. cit.

Ainda na seção 1-1, aparecem tensões normais de flexão ,
figura 59.

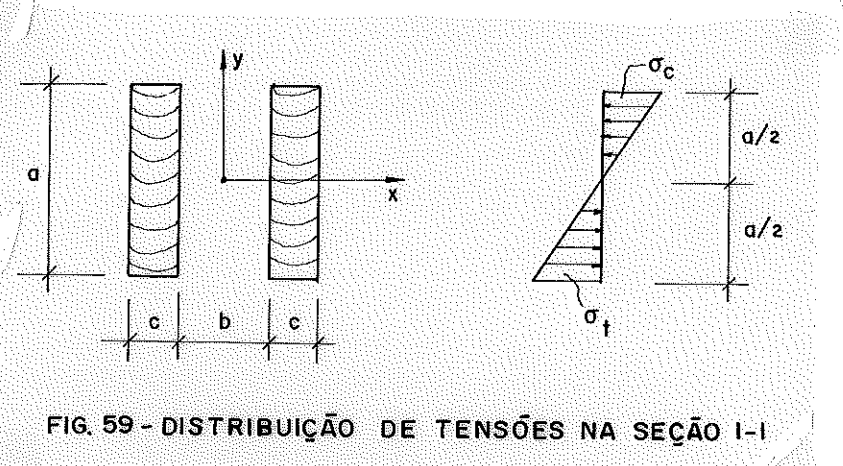


FIG. 59 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA SEÇÃO 1-1

O momento de inércia é:

$$J_{1-1} = \frac{2 \cdot c \cdot a^3}{12}$$

adotando-se distribuição linear de tensões, obtêm-se as tensões nor-
mais de flexão, equação (25).

$$\sigma_t \equiv \sigma_c = \frac{M}{J_{1-1}} \cdot \frac{a}{2} \dots\dots\dots (25)$$

2.3.2.2 - TEORIA DE SEGERLIND NA TORÇÃO (59)

Um esquema da ligação adesiva sujeita a momento fletor é
mostrado na figura 60.

A figura 61, mostra as duas tensões de cisalhamento que
aparecem na linha adesiva devido à solicitação do momento fletor.

A notação utilizada para representar o desenvolvimento da
teoria foi a mesma adotada por Segerlind, apresentada a seguir:

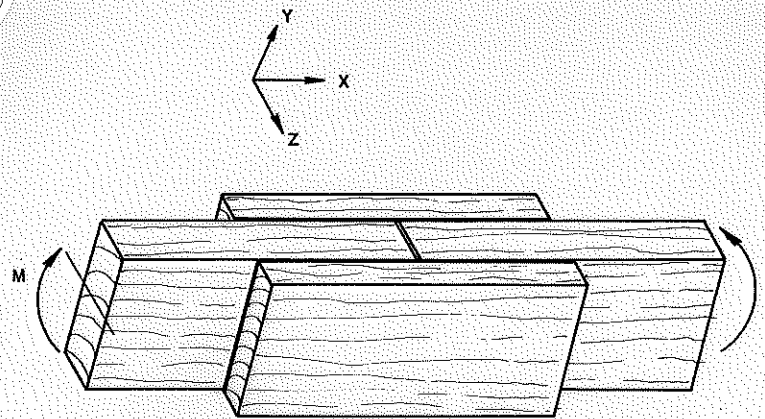


FIG.60-LIGAÇÃO ADESIVA SOLICITADA POR MOMENTO FLETOR

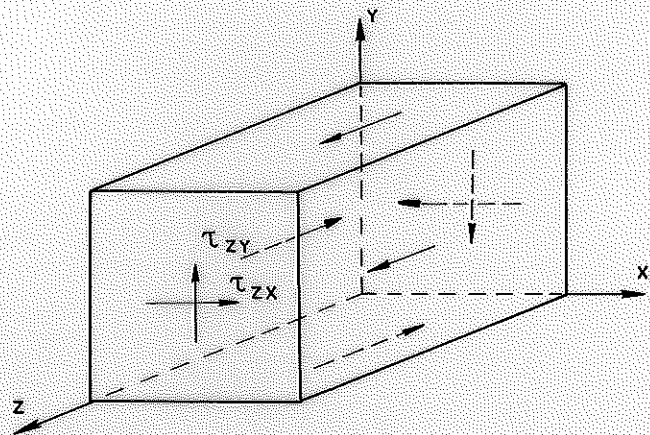


FIG.61-ELEMENTO COM AS TENSÕES DE CISALHAMENTO τ_{zx} e τ_{zy}

- τ_{zx}, τ_{zy} = tensões de cisalhamento
- L = comprimento da linha adesiva
- w = altura da linha adesiva
- S_1, S_2 = espessura dos aderentes
- t_c = espessura da película adesiva
- U_{1m}, U_{2m} = deslocamentos devidos ao momento na direção x
- U_{1s}, U_{2s} = deslocamentos devidos ao esforço cortante na direção x
- V_{1m}, V_{2m} = deslocamentos devidos ao momento na direção y
- V_{1s}, V_{2s} = deslocamentos devidos ao esforço cortante na direção y
- M_{20} = momento nas cobrejuntas em $x=0$
- M_{10} = momento na peça principal em $x=0$
- M_ℓ = momento na peça principal em $x=\ell$

V_ℓ = esforço cortante na peça principal em $x=\ell$

$$P = \frac{\omega^2 \cdot \tau_{zx}}{3 \cdot M_\ell} \quad , \quad Q = \frac{\omega^2 \cdot \tau_{zy}}{3 \cdot M_\ell}$$

ϵ_1, ϵ_2 = deformações específicas nos aderentes em $y = \frac{\omega}{2}$

E_1, E_2 = módulo de elasticidade dos aderentes

G_1, G_2, G_c = módulo de elasticidade transversal dos aderentes e do adesivo

I_1, I_2 = momento de inércia dos aderentes

$$K = (S_1/4 \cdot G_1) + (t_c/G_c) + (S_2/G_2)$$

$$A_1 = (\omega^3/12 \cdot K) \cdot ((2/E_1 \cdot I_1) + 1/E_2 \cdot I_2) ; \text{ constante da ligação}$$

$$A_2 = (12/\omega^2) \cdot A_1$$

$$N = 2 \cdot E_2 \cdot I_2 / E_1 \cdot I_1 ; \text{ quociente de rigidez}$$

Os índices 1 e 2 se referem à peça principal e à cobre-junta, respectivamente.

Quando este tipo de ligações é solicitado por um esforço, as seções planas não permanecem planas. A linha adesiva permitirá a ocorrência de um deslocamento relativo. Devido a estes deslocamentos relativos aparecem, na linha adesiva, tensões normais e tensões de cisalhamento. São duas estas tensões de cisalhamento: a tensão de cisalhamento (τ_{zx}) devida à diferença de alongamento ou encurtamento nos aderentes na direção x e a tensão de cisalhamento (τ_{zy}) devida à diferença da deflexão vertical em cada aderente. Intuitivamente poder-se-ia pensar na existência de τ_{xy} na linha adesiva, mas, para Segerlind esta tensão não existe.

As hipóteses principais são:

- A distribuição de tensões de cisalhamento τ_{zy} é constante na direção de y .

- Os deslocamentos transversais devidos ao efeito de Poisson foram desprezados.

- A linha adesiva tem comportamento elástico e a tensão de cisalhamento não varia com a espessura.

- O momento encontra-se uniformemente distribuído ao longo da espessura da peça, com as cobrejuntas transferindo partes iguais.

A compatibilidade dos deslocamentos foi obtida a partir das figuras 62 e 63.

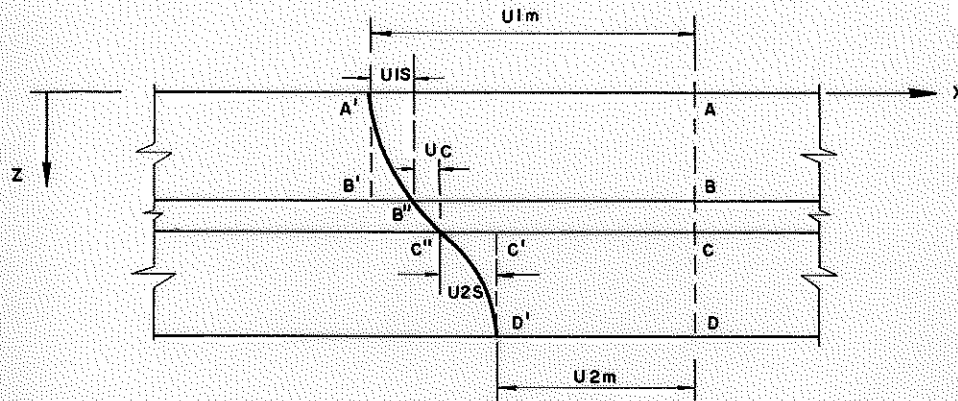


FIG. 62 - DESLOCAMENTOS DEVIDO À TENSÃO DE CISALHAMENTO τ_{zx}

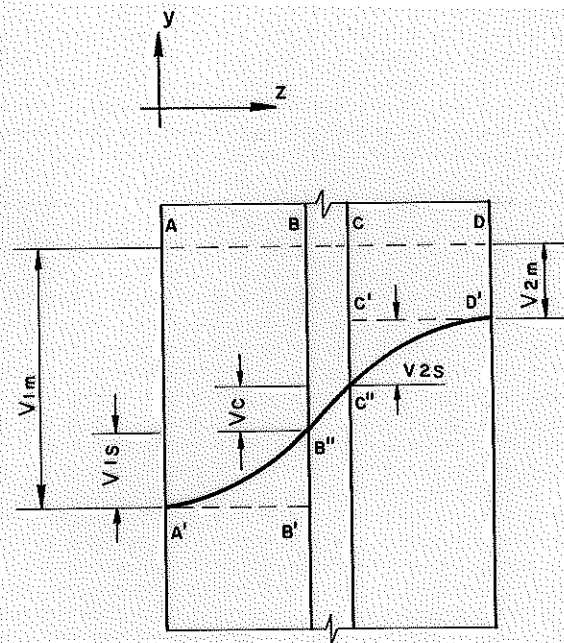


FIG. 63 - DESLOCAMENTOS DEVIDO À TENSÃO DE CISALHAMENTO τ_{zy}

A linha ABCD, figura 62, na face $y = w/2$, transforma-se na linha A'B''C'D' devido ao esforço solicitante (momento fletor). A equação do deslocamento resultante é:

$$U_c = (U_{2m} + U_{2s}) - (U_{1m} + U_{1s}) \dots\dots\dots (26)$$

Analogamente para o deslocamento vertical tem-se:

$$V_c = (V_{2m} + V_{2s}) - (V_{1m} + V_{1s}) \dots\dots\dots (27)$$

Na figura 64, é mostrado um elemento diferencial retirado da peça central. O momento M_a , é devido à tensão de cisalhamento τ_{zx} e o esforço cortante V_a é devido a τ_{zy} . O valor destas grandezas, considerando as duas linhas adesivas é:

$$M_a = \omega^2/3 \cdot \tau_{zx} \cdot dx \quad \text{e} \quad V_a = 2 \cdot \omega \cdot \tau_{zy} \cdot dx$$

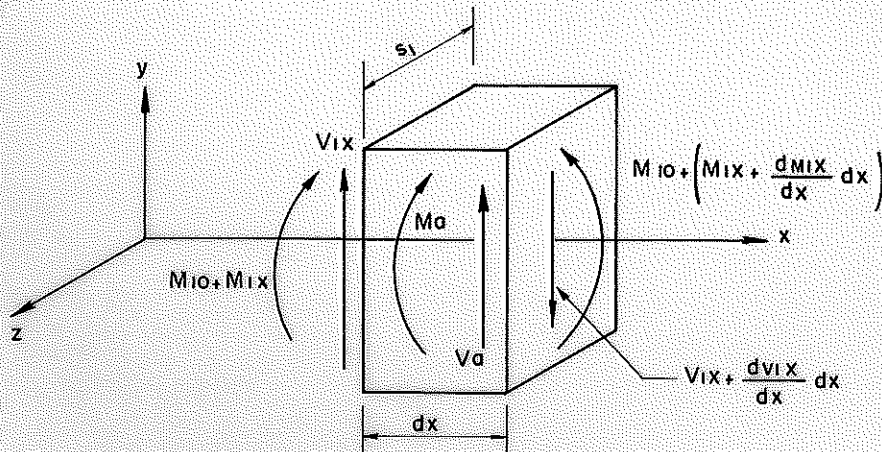


FIG. 64 - ELEMENTO DIFERENCIAL DA PEÇA PRINCIPAL

Fazendo equilíbrio de forças, isto é, somatória de forças verticais e somatória de momentos, e substituindo-os nos deslocamentos devidos ao momento e ao esforço cortante, relacionando as tensões de cisalhamento com o deslocamento da linha adesiva, diferenciando as equações de maneira conveniente e relacionando-as e introduzindo relações entre parâmetros livres, obtêm-se as equações diferenciais finais.

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{2}{\omega} \cdot p = 0 \dots\dots\dots (28)$$

$$\frac{d^3p}{dx^3} - A_1 \cdot \frac{dp}{dx} - A_2 \cdot Q = 0$$

Com as condições de contorno ($x = 0$, $x = \ell$), tem-se:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{A_1}{N+1} - \frac{N \cdot M_{10}}{M_\ell} - \frac{M_{20}}{M_\ell} + (N+1) \cdot \frac{M_x}{M_\ell} \dots \dots \dots (29)$$

$$\frac{d^2P}{dx^2} - A_1 \cdot P = \frac{A_1 \cdot V_x}{M_\ell}$$

As soluções das equações 28 e 29 darão os valores das tensões τ_{zx} e τ_{zy} . Estas tensões dependem basicamente de quatro parâmetros da ligação: da combinação das propriedades dos materiais e dimensões da ligação (A), do quociente de rigidez das peças (N), da altura da ligação (ω) e do comprimento da ligação (ℓ).

3 - INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

O planejamento e a programação dos ensaios foi realizado com o intuito de abranger a maior quantidade de tipos de ligações adesivas. Embora não tenha sido possível realizar todos os tipos de ensaios de ligações adesivas desejados, conseguiu-se dividi-los em várias séries. Assim, com uma simples superposição de efeitos, será possível determinar a capacidade de carga de outros tipos de ligações não ensaiadas.

A determinação da capacidade de carga de uma ligação adesiva, como já foi visto no item 2, depende basicamente da área colada e da tensão de cisalhamento da linha adesiva. Assim, determinada a tensão última de cisalhamento na linha adesiva, será possível determinar a capacidade de carga da ligação. Neste item serão descritos os materiais utilizados (madeira e adesivo) as suas características e propriedades essenciais, como também a aparelhagem utilizada, os modelos e as séries de ensaios.

3.1 - MATERIAIS

Para se conseguir uma amostragem representativa, as vigas de madeira foram escolhidas ao acaso, em pequenos lotes, em ser rarias e em épocas diferentes.

A escolha dos adesivos foi baseada nos princípios expostos no primeiro capítulo. A madeira, sendo um material altamente polar, terá uma boa afinidade com um adesivo polar ou de polaridade intermediária. Os mais indicados, conforme quadro 2, apêndice B, são: acetato de polivinila, formaldeído-fenol, resorcinol-formaldeído, formaldeído-urea, melamina e melamina-urea-formaldeído. Para a realização dos ensaios optou-se pela utilização de um adesivo à base de resina resorcinol, polar, e de um adesivo à base de resina epoxi, baixa polaridade.

3.1.1 - A MADEIRA

As madeiras utilizadas para montagem dos corpos de prova foram a Peroba Rosa (*Aspidosperma peroba*), o Pinho do Paraná (*Araucária brasiliiana*) e o Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*). Comercialmente estas madeiras são encontradas em vigas de dimensões 6x16 cm e 6x12 cm.

A umidade da madeira para montagem dos corpos de prova das ligações adesivas, variou de 10.7% até 16.2%, e para os corpos de prova de cisalhamento da madeira de 10,7% até 23.0%.

A densidade aparente nas ligações adesivas variou de 6.1 KN/m³ até 9.2 KN/m³ e para cisalhamento da madeira de 6.1 KN/m³ até 11.0 KN/m³.

3.1.2 - O ADESIVO

Os adesivos utilizados foram: Um adesivo à base de resina resorcinol fabricado pela Alba SA. e outro adesivo à base de resina epoxi fabricado pela Ciba SA., o adesivo à base de resorcinol, é uma resina líquida, utilizada em conjunto com um catalisador em pó. As proporções utilizadas dos ingredientes foram as recomendadas pela fábrica.

<u>Material</u>	<u>Partes em peso</u>
resina resorcinol	100
catalisador	20

Tanto a resina como o catalisador foram pesados em uma ba-

lança elétrica com precisão de centésimo de grama e misturados até a homogeneização completa. A temperatura, durante a preparação e no instante da aplicação, variou no intervalo de 20°C até 30°C, ver apêndice A, item 11.

O adesivo à base de resina epoxi, é uma resina líquida, utilizada juntamente com o endurecedor também líquido. A proporção da mistura dos ingredientes para a preparação do adesivo é:

<u>Material</u>	<u>Partes em peso</u>
resina epoxi	100
endurecedor	60 - 100

A temperatura durante a preparação e no instante da aplicação variou no intervalo de 20°C até 30°C, ver apêndice A, item 13

3.2 - APARELHOS PARA MONTAGEM E ENSAIOS DOS MODELOS

3.2.1 - MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para o corte das peças e preparação das superfícies dos corpos de prova foram utilizadas as máquinas da oficina do LaMEM: Serra circular, Serra de fita, Desempenadeira, Tupia e Lixadeira. Na figura 65 é apresentada uma vista parcial da referida oficina.

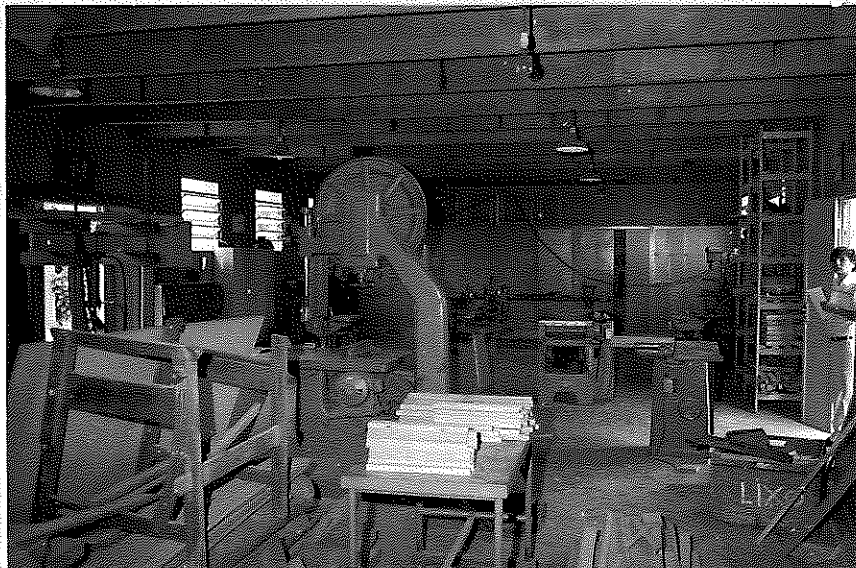


Fig. -65- Vista parcial da oficina do LaMEM

Após a preparação do adesivo, conforme item 3.1.2, com a ajuda de um pincel, esparramou-se o adesivo nas superfícies a serem unidas seguindo os princípios de colagem já expostos, montou-se os corpos de prova, figuras 66 e 67.

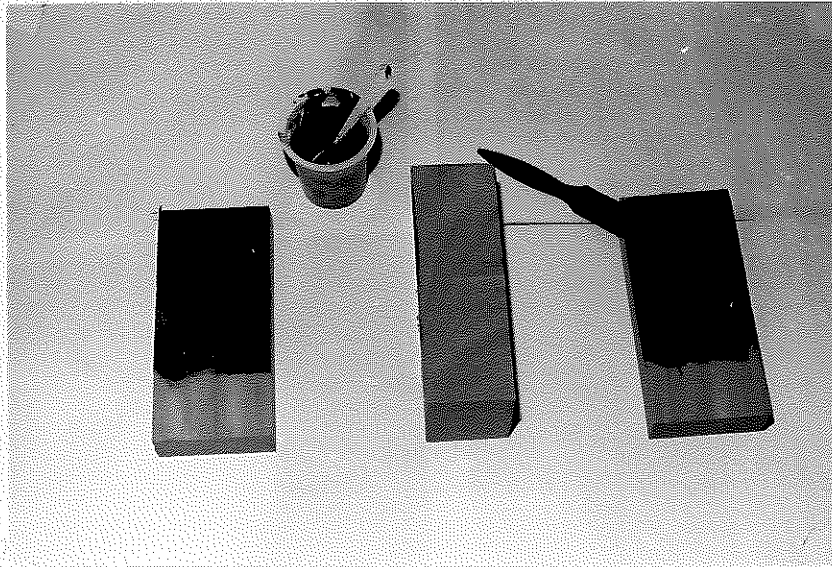


Fig 66 - Penetração do adesivo nos aderentes

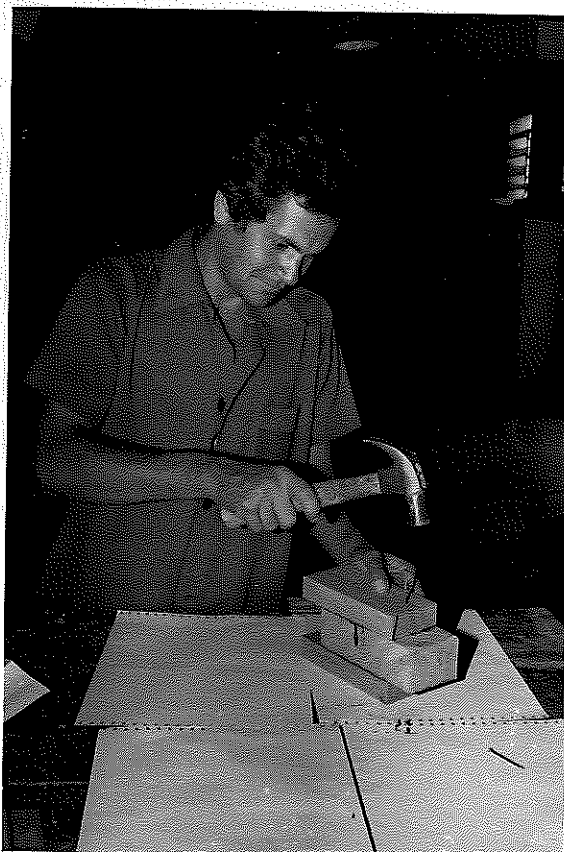


Fig. 67 - Montagem dos elementos da ligação

3.2.2 - MEDIDAS DOS CORPOS DE PROVA

Para a determinação das dimensões dos corpos de prova foram utilizados paquímetros de dois centésimos de centímetros ou dois décimos de milímetros, figura 68.

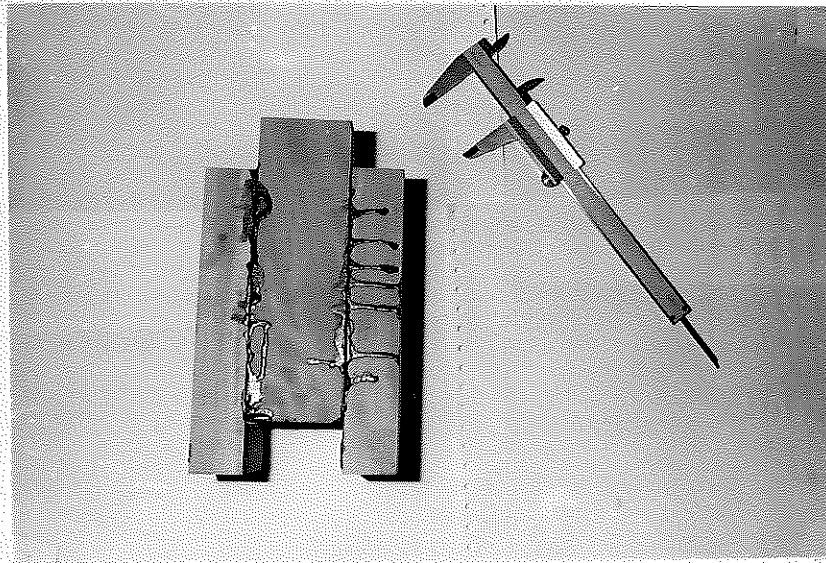


Fig. 68 - Paquímetro e corpo de prova de uma ligação

Para a determinação das deformações entre a peça central e as cobrejuntas foram utilizados relógios comparadores com precisão de milésimos de milímetros, figura 69.

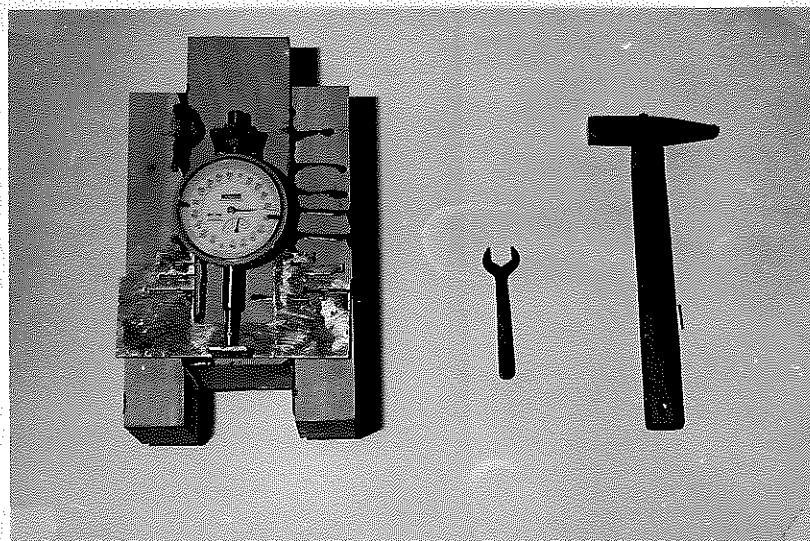


Fig 69 - Relógios comparadores instalados no C.P.

3.2.3 - ENSAIO DOS MODELOS

Grande parte dos ensaios foi realizado em um conjunto de reação montado no LaMEM, figura 70, com capacidade de carga suficiente para romper os corpos de prova, e rigidez indispensável para os ensaios.

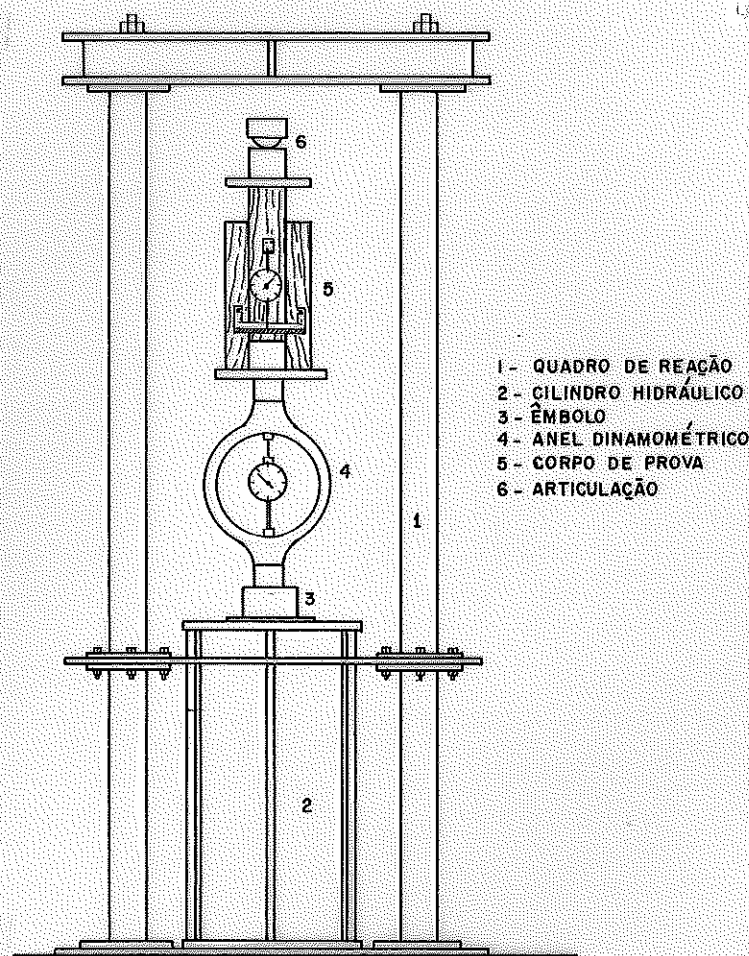


FIG. 70 - ESQUEMA DO CONJUNTO DE REAÇÃO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO DO LaMEM (CAPACIDADE 400 KN)

O carregamento é feito por um cilindro hidráulico conectado a um painel de controle, no qual um conjunto de válvulas permite alteração da vazão e da pressão de óleo, possibilitando a regulação da velocidade de carregamento. O carregamento do corpo de prova é medido através das deformações de um anel dinamométrico de constante elástica conhecida.

Alguns ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios Amsler, figura 71, com capacidade de 250 KN.

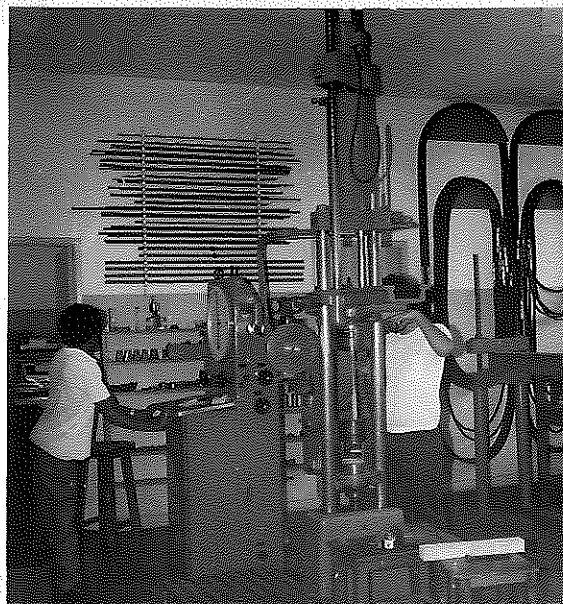


Fig. 71 - Máquina universal Amsler - 250 KN

3.3 - MODELOS DE ENSAIO DE CORPOS DE PROVA PARA ADESIVOS

São vários os tipos de corpos de prova especificados pelas normas estrangeiras para os ensaios.

Os corpos de prova para a determinação da tensão de cisalhamento na tração são mostrados na figura 72.

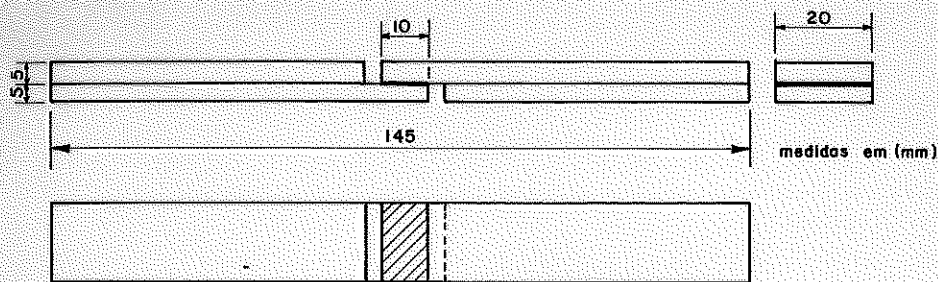
Os corpos de prova para a determinação da tensão de cisalhamento na compressão são apresentados na figura 73.

O corpo de prova para a determinação da tensão de cisalhamento numa junta chanfrada, figura 74, é dado pela DIN 53253 (60).

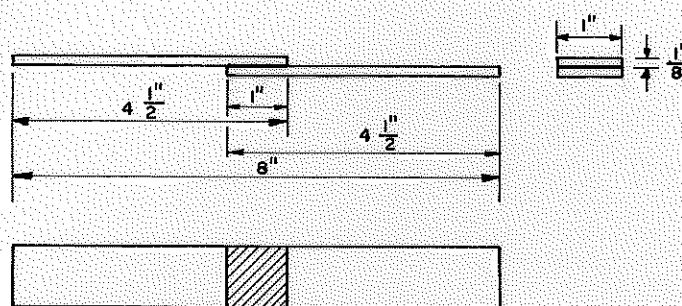
Os corpos de prova para a determinação da tensão de fendilhamento e da tensão de tração normal às fibras são apresentados na figura 75.

Nas figuras 76 e 77, encontram-se os modelos de ensaio para a determinação da tensão de cisalhamento na flexão, da tensão de impacto e da tensão de tração no adesivo.

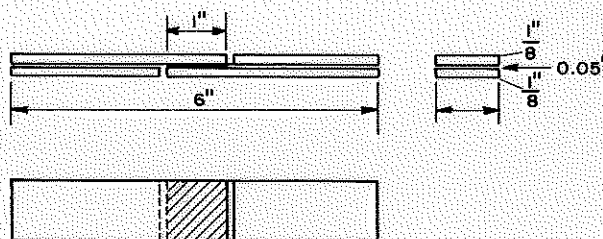
(60) DEUTSCHE NORMEN DIN 53253 - Bestimmung der Bänderfestigkeit von Schichtverkleimungen im Zugversuch. Berlin, 1959.



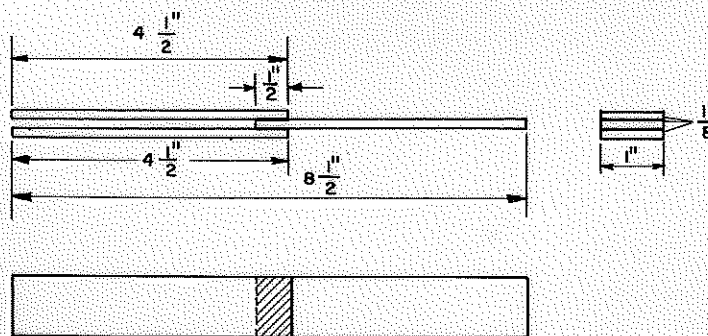
CORPO DE PROVA ALEMÃO - DIN



CORPO DE PROVA INGLÊS (CLOSE CONTACT JOINT) - B.S.



CORPO DE PROVA INGLÊS (GAP JOINT) - B.S.



CORPO DE PROVA INGLÊS (CREEP TEST) - B.S.

FIG. 72 - CORPOS DE PROVA DE CISLHAMENTO NA TRAÇÃO (61)

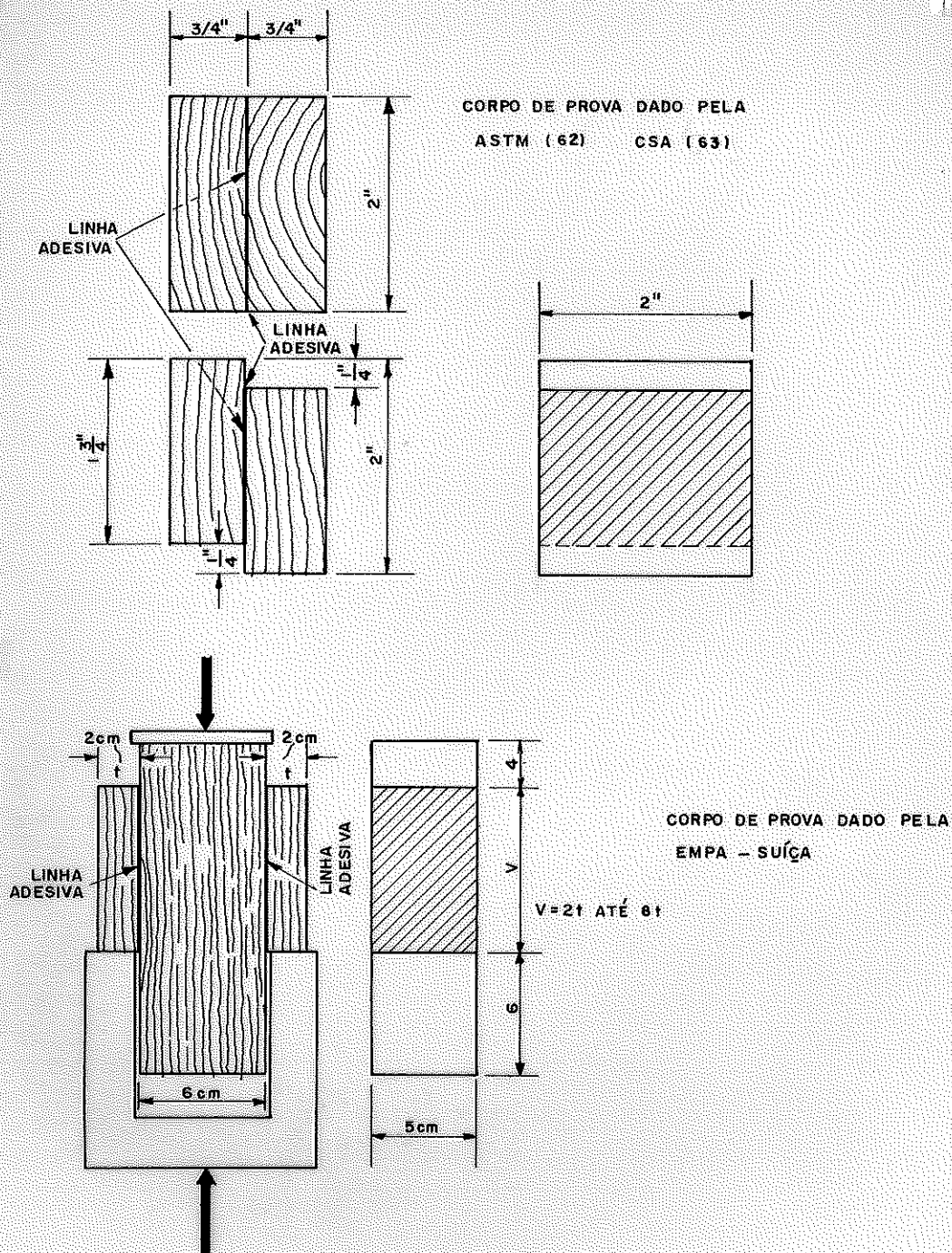


FIG. 73 - CORPOS DE PROVA DE CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO

(62) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Strength properties of adhesives in shear by compression loading., Philadelphia, PA, 1947. (ASTM D-905-49).

(63) CANADIAN STANDARD ASSOCIATION - Definitions and standard test methods of wood adhesives., Ottawa, Canada, 1960 [CSA 011.0-60].

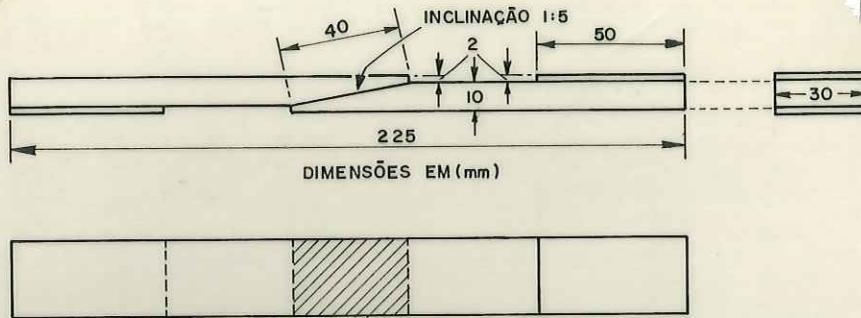
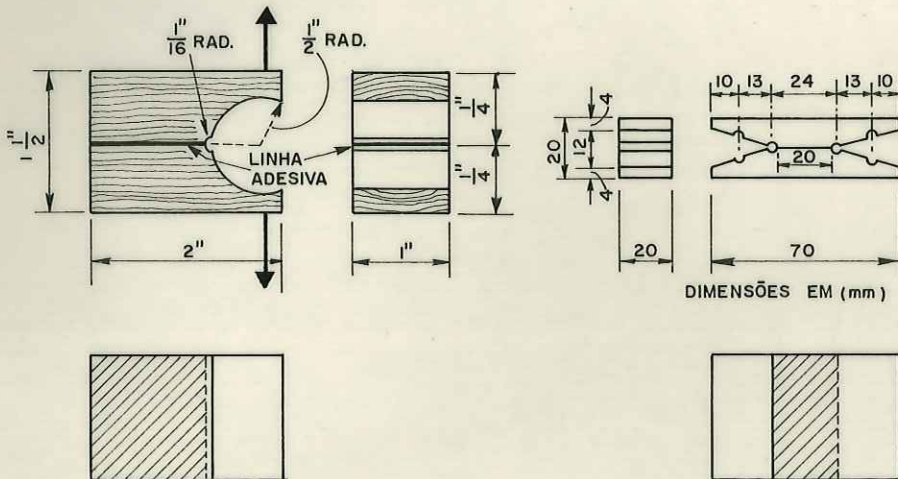


FIG. 74 - CORPO DE PROVA - CISCALHAMENTO NUMA JUNTA CHANFRADA. DIN 53253



CORPO DE PROVA DE FENDILHAMENTO DADO PELA NORMA (T.D.A.)

CORPO DE PROVA DE TRACAO NORMAL DADO PELA NORMA FRANCESA AFNOR .

FIG. 75 - CORPOS DE PROVA DE FENDILHAMENTO E TRACAO NORMAL ÀS FIBRAS

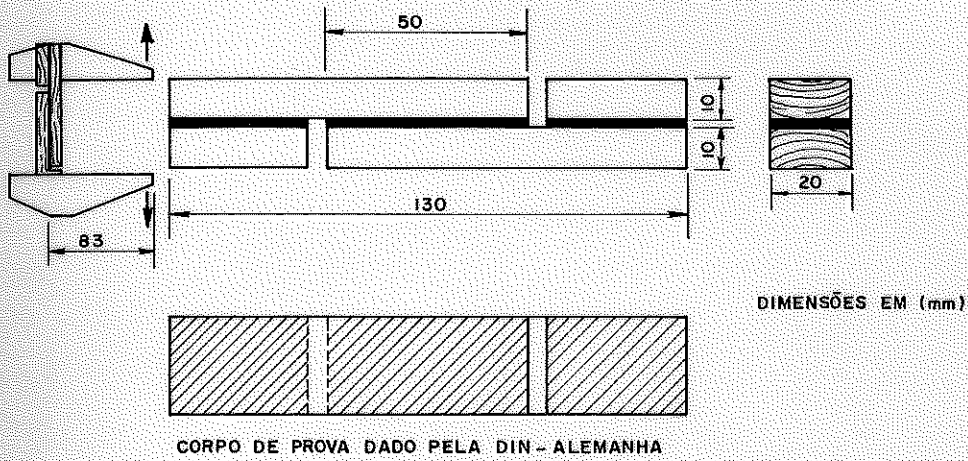
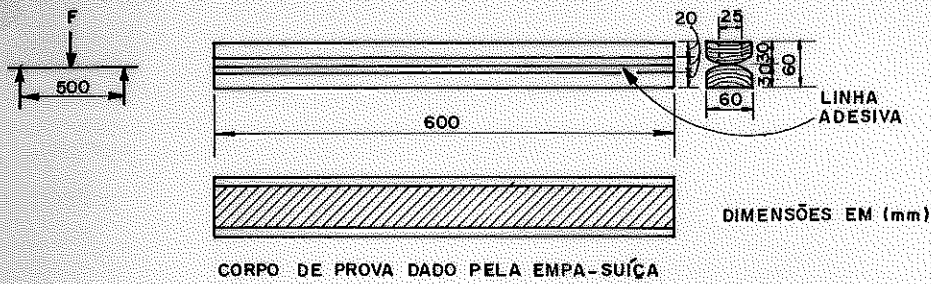


FIG. 76 - CORPOS DE PROVA - TENSÃO DE CISLHAMENTO NA FLEXÃO

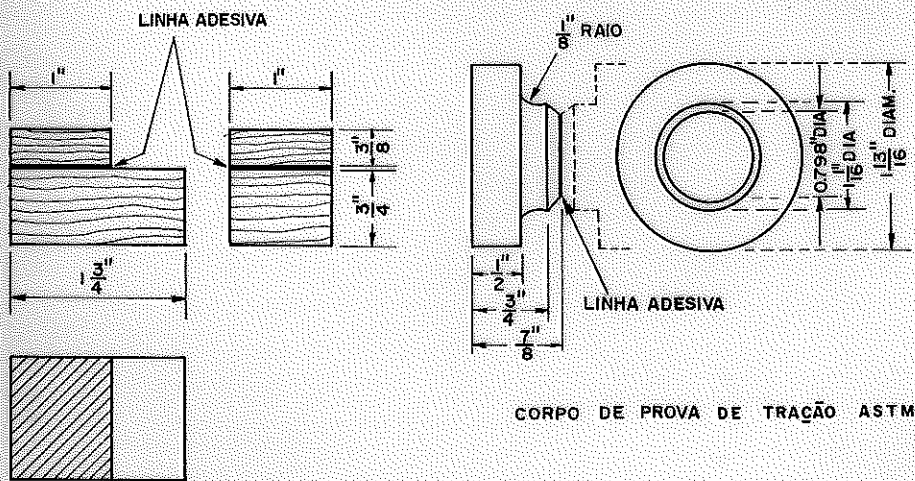


FIG. 77 - CORPOS DE PROVA - TENSÃO DE IMPACTO E TENSÃO DE TRAÇÃO

3.3.1 - MODELOS ADOTADOS

Os diferentes modelos necessários para os ensaios foram idealizados e escolhidos segundo a finalidade, disponibilidade de equipamento e facilidade de execução. A seguir são apresentados os esquemas dos mesmos. Na figura 78 é apresentado um modelo em tamanho real para a determinação das tensões de cisalhamento e do módulo de deformação através de ensaio de compressão paralela.

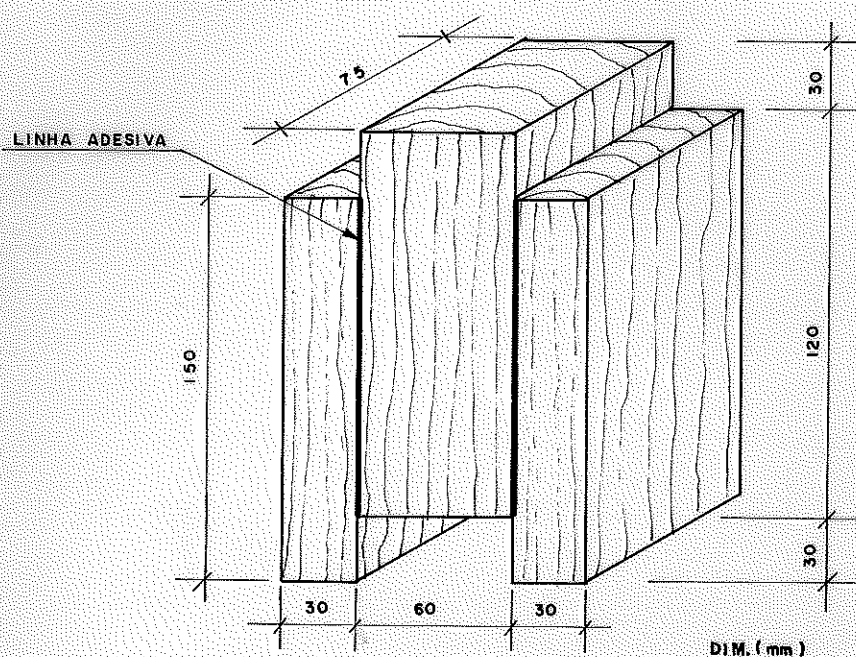


FIG. 78 - MODELO DE ENSAIO EM ESCALA NATURAL DO LdMEM

Na figura 79, é apresentado um modelo, em escala reduzida, para a determinação da tensão de cisalhamento na compressão.

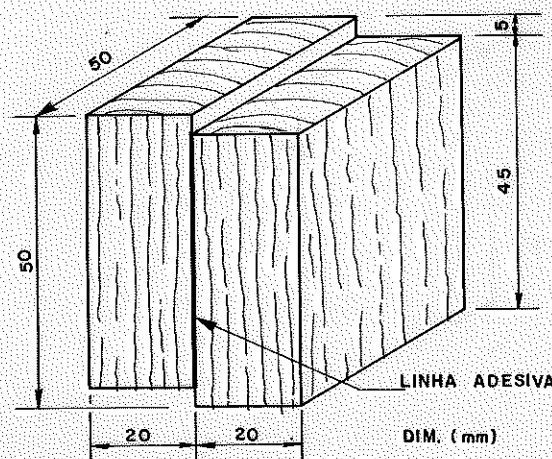


FIG. 79 - MODELO DE ENSAIO EM ESCALA REDUZIDA PARA DETERMINAÇÃO DO CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO

Na figura 80, encontra-se o modelo de cisalhamento oblíquo para a determinação da tensão de cisalhamento paralelo às fibras com influência da tensão de compressão.

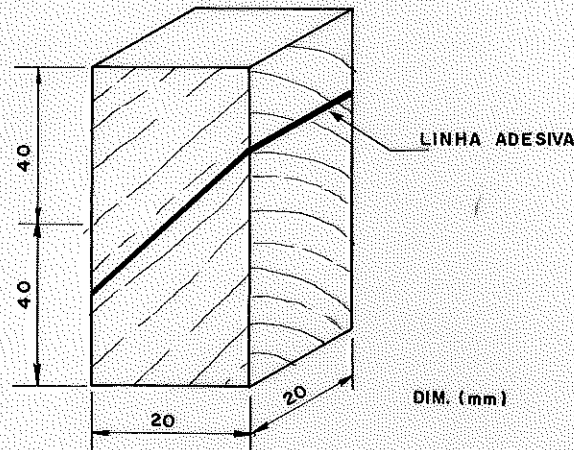


FIG. 80 - MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO CISALHAMENTO OBLÍQUO

Nas figuras 81 e 82, são apresentados os modelos de tração normal do adesivo e da madeira.

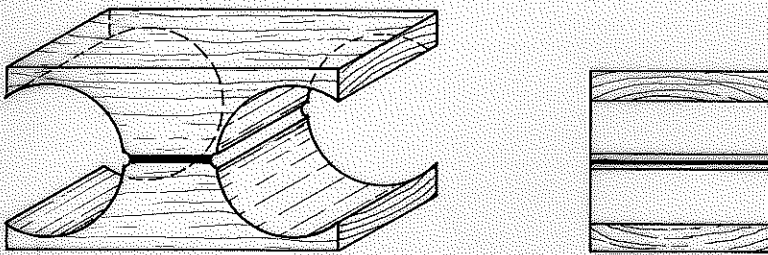


FIG. 81 - MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA TRACÃO NORMAL DA LIGAÇÃO ADESIVA

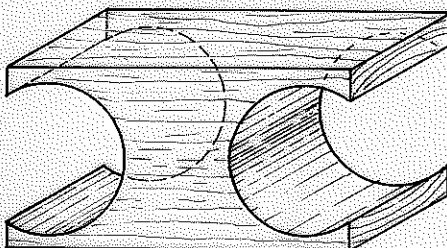


FIG. 82 - MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA TRACÃO NORMAL DA MADEIRA

Nas figuras 83 e 84, encontra-se os modelos de ensaio para a determinação da tensão de cisalhamento na tração e na flexão, respectivamente.

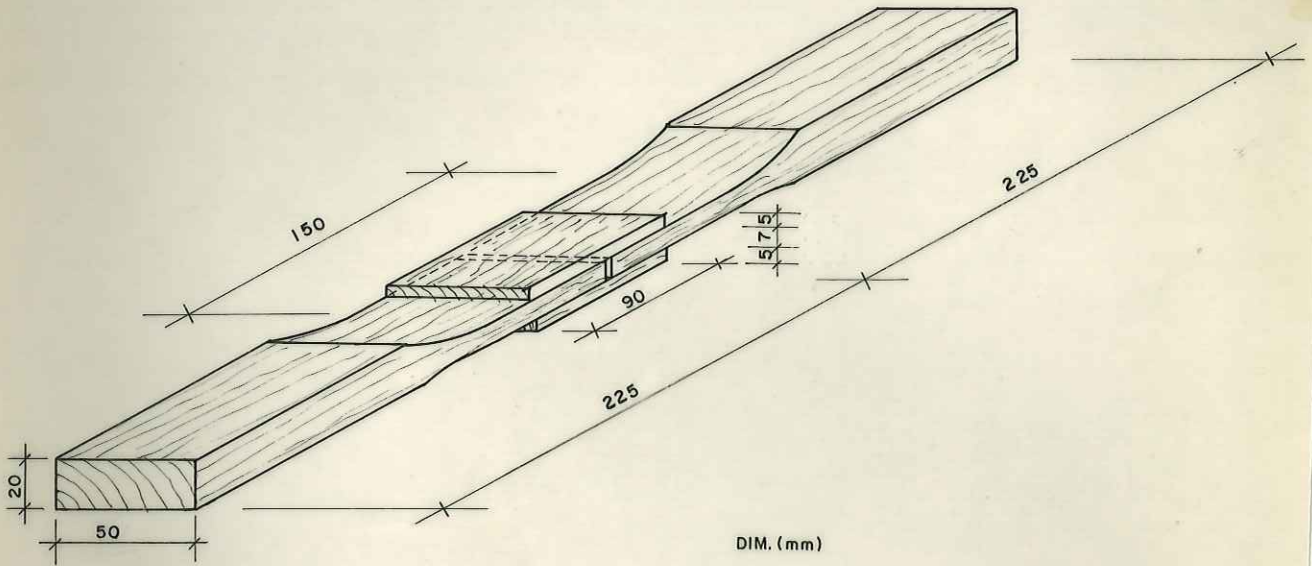


FIG. 83 - MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO CISALHAMENTO NA TRAÇÃO

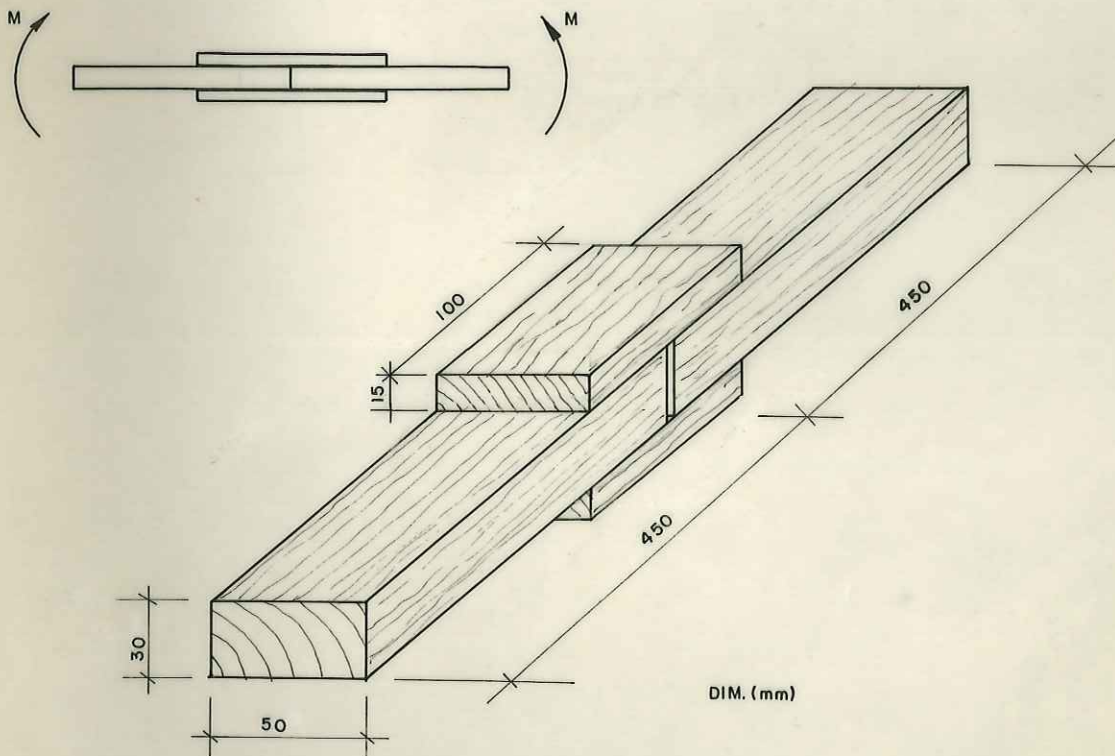


FIG. 84 - MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO CISALHAMENTO NA FLEXÃO

Na figura 85, é apresentado o modelo de ensaio para a de terminação da tensão de cisalhamento na torção.

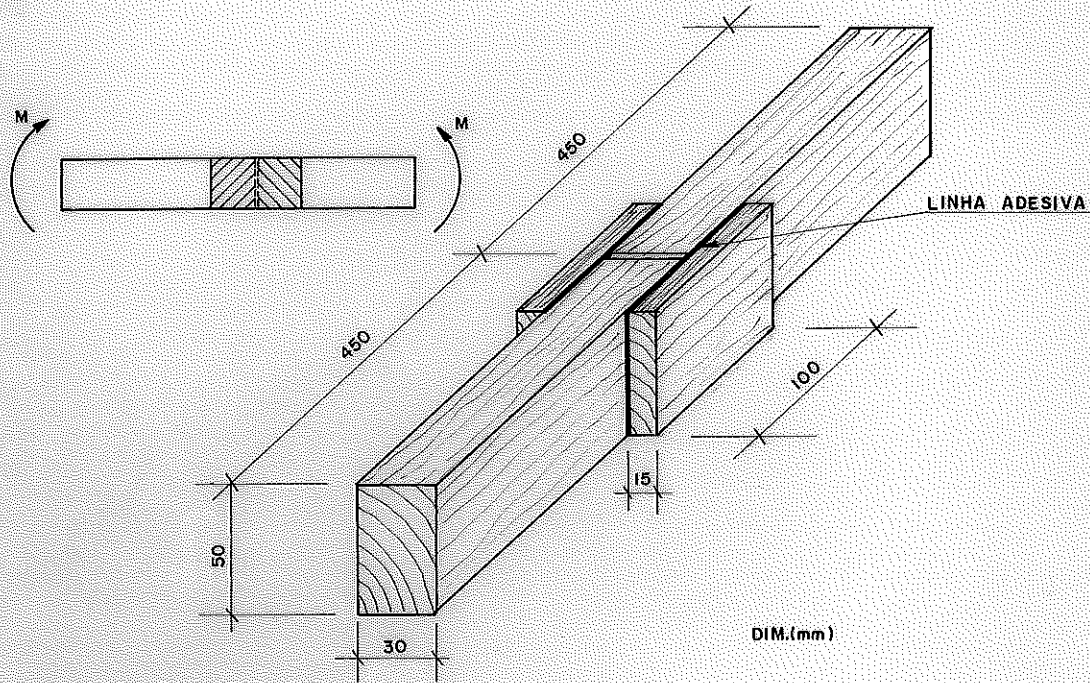


FIG. 85 - MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO CISCALHAMENTO NA TORÇÃO

Na figura 86, encontra-se os corpos de prova de cisalha- mento, compressão paralela, umidade e densidade da madeira.

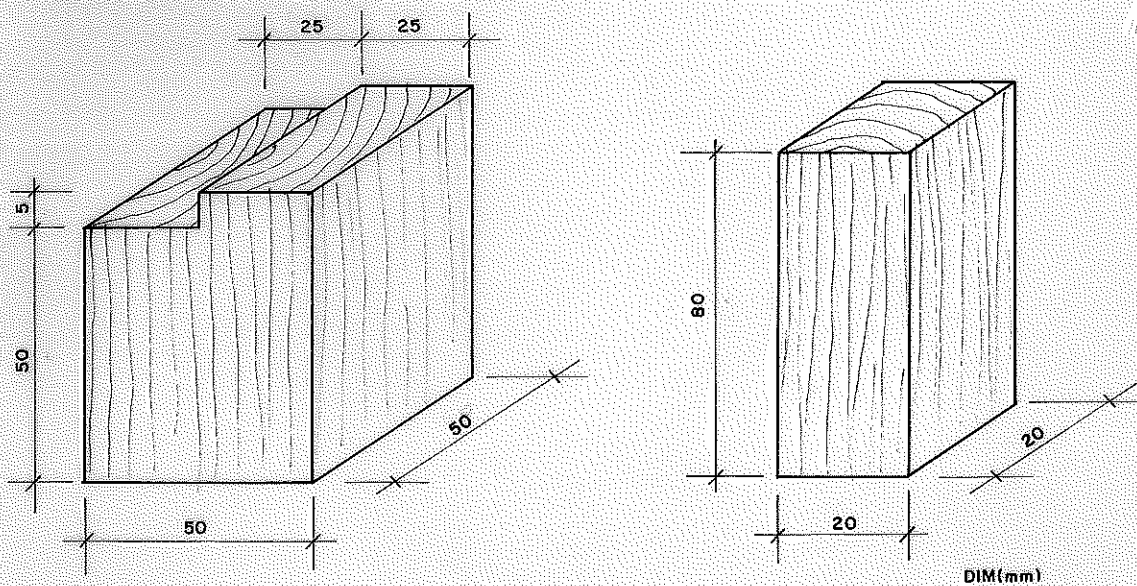


FIG. 86 - CORPOS DE PROVA DE CISCALHAMENTO, COMPRESSÃO, UMIDADE E DENSIDADE DA MADEIRA

Na figura 87, é apresentado o modelo em escala real duplo, para a determinação da tensão de cisalhamento na compressão paralela.

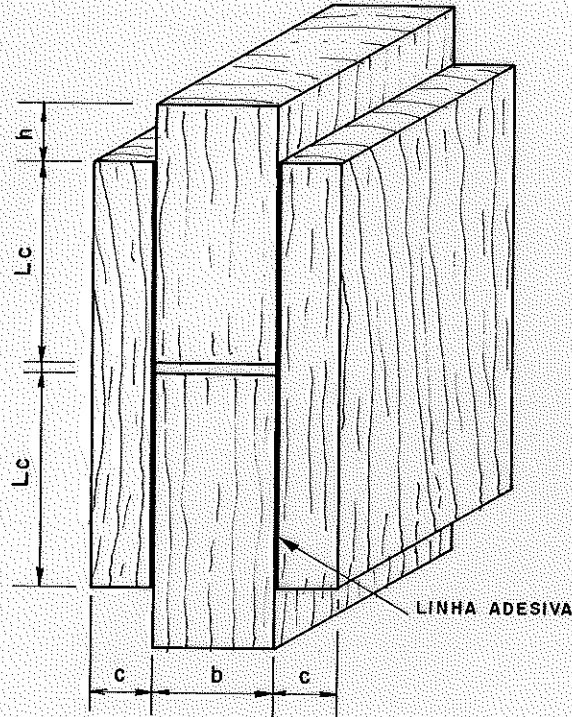


FIG. 87 - MODELO DE ENSAIO EM ESCALA NATURAL, DUPLO, PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO

Nas figuras 88 e 89, são mostrados os modelos de fendilhamento do adesivo e da madeira respectivamente.

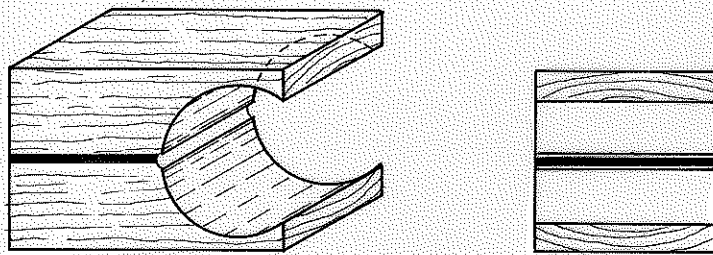


FIG. 88 - MODELO DE ENSAIO DE FENDILHAMENTO DA LIGAÇÃO ADESIVA

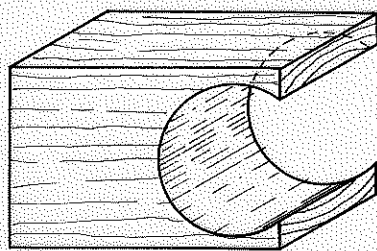


FIG. 89 - MODELO DE ENSAIO DE FENDILHAMENTO DA MADEIRA

3.3.2 - AS SÉRIES

Foram montadas, no total 7 séries de ensaios definidos como segue:

1^a série de ensaios. Ensaio de afinidade dos adesivos, com três espécies de madeira, 39 corpos de prova em escala natural.

2^a série de ensaios. Ensaio de cisalhamento e de módulo de deformação, na compressão, com modelo em escala natural, 122 corpos de prova.

3^a série de ensaios. Ensaio de cisalhamento na compressão, tração, flexão e torção. Consta de 350 ensaios, sendo 70 na compressão, 70 na tração, 70 na flexão, 70 na torção e 70 de cisalhamento da madeira. Cada grupo foi dividido em 10 ensaios com inclinação às fibras de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°.

4^a série de ensaios. Ensaio de verificação da influência da tração normal às fibras no cisalhamento na compressão. Consta de 100 corpos de prova, sendo 10 para a determinação do cisalhamento oblíquo, 10 para a determinação da tração normal no adesivo, 10 para a determinação do cisalhamento na compressão, 10 modelos em escala natural, 10 modelos em escala natural duplo, 10 corpos de prova de fendilhamento do adesivo, 10 corpos de prova de fendilhamento da madeira, 10 corpos de prova de cisalhamento da madeira, 10 corpos de prova de tração normal na madeira e 10 corpos de prova de compressão paralela, figura 90.

5^a série de ensaios. Ensaio de durabilidade da ligação, consta de 44 corpos de prova em escala natural.

6^a série de ensaios. Ensaio de influência da umidade e da densidade no cisalhamento da madeira. Consta de 191 corpos de prova.

7^a série de ensaios. Ensaio para a determinação da distribuição de tensões e deformações transversais à linha adesiva.

Para cada ensaio das séries 2^a, 3^a, 4^a e 5^a, foram realizados ensaios de cisalhamento, compressão, umidade e densidade da madeira. Foram realizados no total aproximadamente 2000 corpos de prova, incluindo a caracterização da madeira.

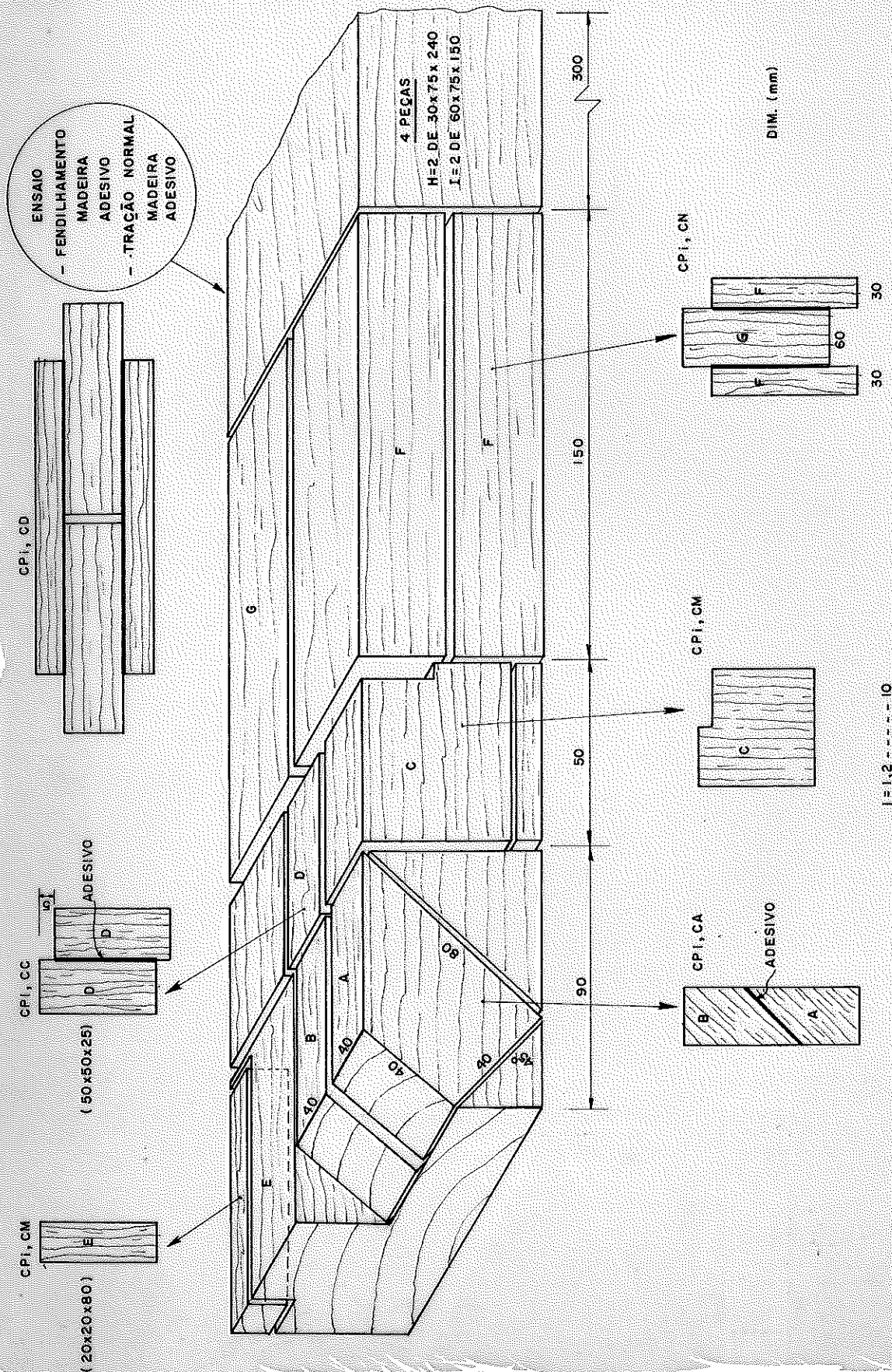


Fig. 90 - Corpos de prova da 4ª série de ensaios

CAP 03 - CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO - ESCALA NATURAL

1 - INTRODUÇÃO

Os corpos de prova foram montados por pessoal técnico com experiência anterior na colagem.

Nos modelos em escala natural, com a finalidade de se representar as situações na obra cada elemento lateral foi colado e pregado ao principal, utilizando-se 2 pregos de 17x21, tendo em vista desenvolver a pressão necessária para a perfeita adesão das peças. Uma primeira impressão leva a pensar na influência dos pregos na resistência da ligação mas, com uma simples análise de deslocamentos e considerando a rigidez dos elementos, devido aos pequenos deslocamentos na linha adesiva, antes de ser requerida a contribuição da resistência dos pregos, a linha adesiva entra na ruptura.

A pressão aplicada nos corpos de prova em escala reduzida foi efetuada mediante grampos.

Neste capítulo será estudada a resistência dos modelos em escala natural solicitados à compressão paralela às fibras, os métodos de ensaio, o tratamento estatístico, e as correlações das características mecânicas do adesivo e da madeira.

2 - ESCOLHA DAS DIMENSÕES DO MODELO EM ESCALA NATURAL

O objetivo principal deste modelo é simular, com melhor aproximação, uma ligação adesiva como se apresenta na prática. A determinação das deformações na linha adesiva e a capacidade máxima de carga estão incluídas nestes objetivos. As dimensões destes modelos foram adotadas a partir de uma ligação típica, como a da figura 65 e do cálculo de tensões, desenvolvido no item 2.1.1 do capítulo II. A metade desta ligação típica está representada na figura 91.

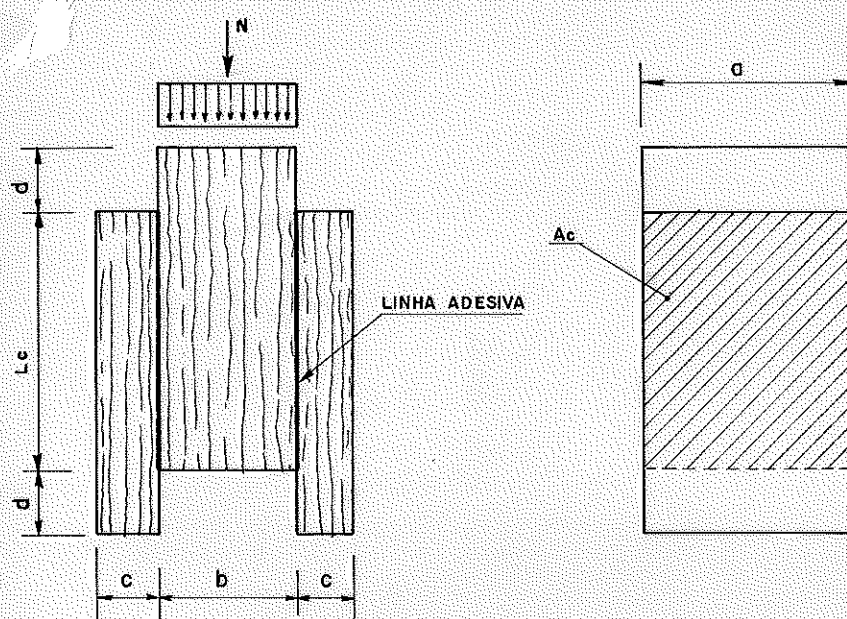


FIG. 91-MODELO DE ENSAIO

Para a montagem dos corpos de prova dispunha-se de vigas de 6x16 cm. Com o intuito de economizar madeira foram fixadas algumas dimensões, a partir das quais foram determinadas as restantes, sendo:

- b = 6.00 cm - espessura da peça principal
- c = $b/2 = 3.00$ cm - espessura da peça cobrejunta
- a = 7.50 cm - largura do modelo

As tensões máximas, determinadas a partir das equações 2 e 3, devem ser inferiores ou iguais às tensões de ruptura da madeira, tabela 2.

TABELA 2 - TENSÕES DE RUPTURA DADOS NO BOLETIM Nº 31 DO IPT.

tipo de madeira	tensão de cisalhamento (MPa)	tens. tração normal (MPa)	tens. compr. normal (*) (MPa)	tens. compr. paralela (MPa)
Eucalipto Citriodora	16.60	10.30	20.00	64.00
Peroba Rosa	13.00	8.30	13.00	44.00
Pinho do Paraná	7.30	4.00	8.00	30.45

(*) HELLMEISTER, J.C., - Tese de Doutorado, 1973.

Assim:

$$f_{ws} \geq \frac{N}{2.a.L_c} ; \quad f_{wnc} \geq \frac{N.c}{y'.a.z} \quad \text{e} \quad f_{wnt} \geq \frac{3.N.c}{4.y''.a.z}$$

Ainda, a tensão de compressão paralela às fibras, para evitar o esmagamento da cabeça do modelo, deve obedecer à inequação:

$$f_{wc} \geq \frac{N}{a.b}$$

sendo:

- f_{ws} = resistência da madeira ao cisalhamento
 f_{wcn} = resistência da madeira à compressão normal às fibras
 f_{wtn} = resistência da madeira à tração normal às fibras
 f_{wc} = resistência da madeira à compressão paralela às fibras

Substituindo os valores conhecidos, obtêm-se equações em função de N e L_c . Em gráficos, figuras 91, 92 e 93, pode-se observar a existência de um ponto de interseção entre as duas inequações.

Para valores pequenos do comprimento da linha adesiva, isto é, valores abaixo do ponto de interseção, ter-se-á ruptura por tração normal e para valores maiores a ruptura ocorrerá por cisalhamento.

Outro limite, a ser considerado, é o esmagamento da cabeça, pois não adianta aumentar o comprimento da linha adesiva se a madeira não resistir à compressão. Na tabela 3, são apresentadas as cargas críticas de cisalhamento e de tração normal às fibras, o comprimento crítico da linha adesiva e a carga de esmagamento da cabeça.

TABELA 3 - CARGAS CRÍTICAS (KN)			
MADEIRA	L_c crítico cm	Carga crítica de compre. e traç.	Carga crítica de esmagamento
Eucalipto Citriodora	18.09	470.52	288.00
Peroba Rosa	20.25	394.87	198.00
Pinho do Paraná	21.32	233.48	137.25

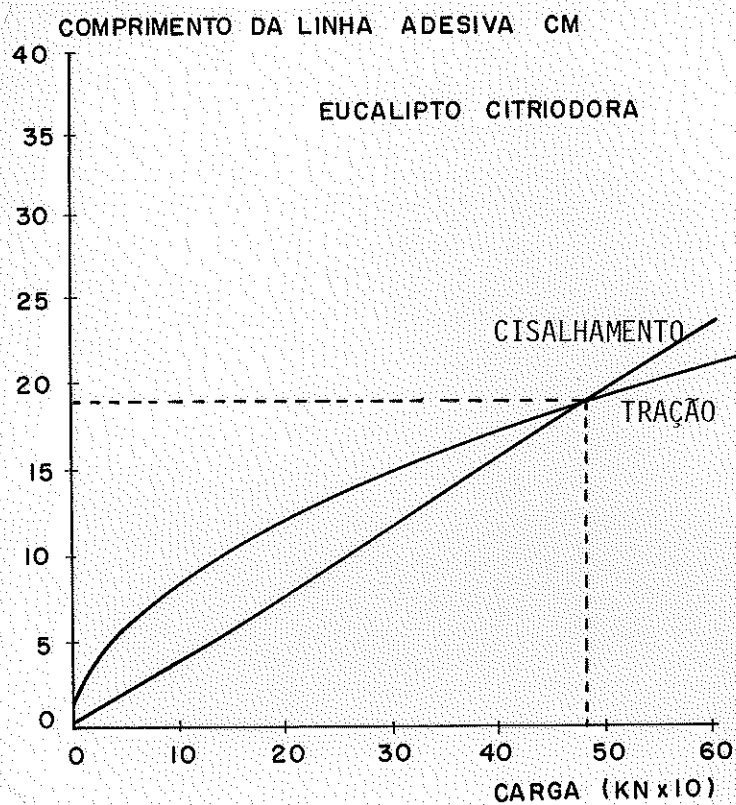


Fig. 92 - gráfico carga x comprimento linha adesiva - Eucalypto Citr.

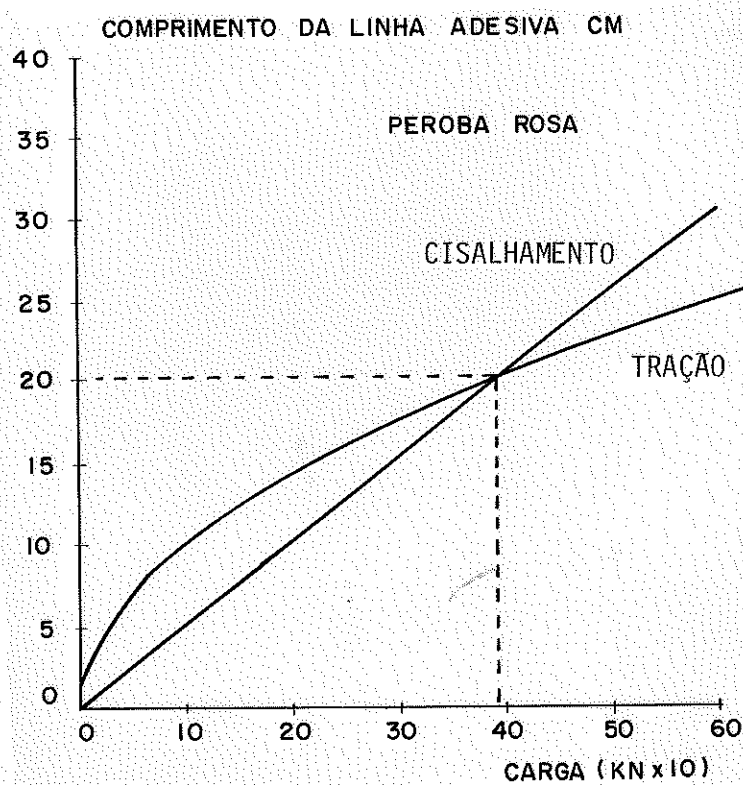


Fig. 93 - gráfico carga x comprimento linha adesiva - Peroba Rosa

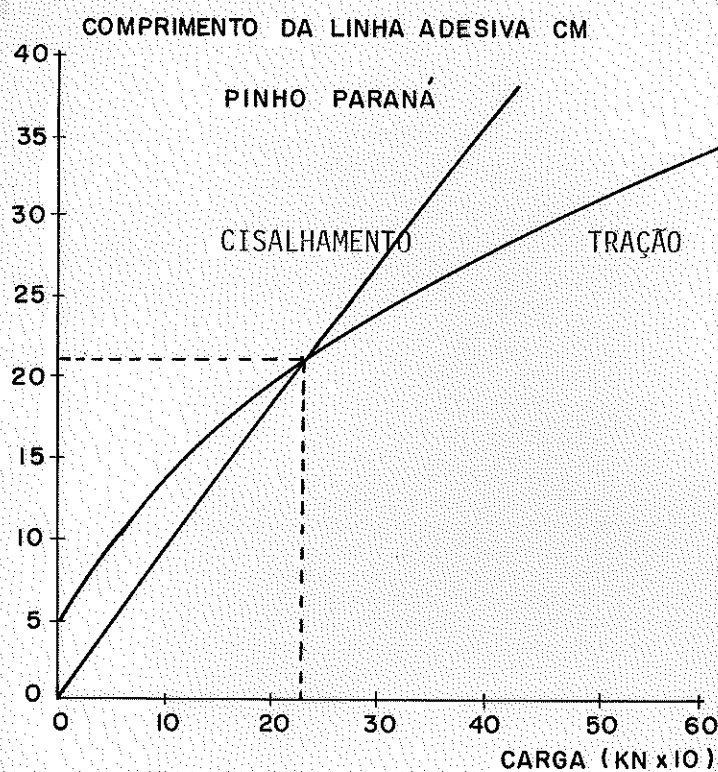


Fig. 94 - gráfico carga x comprimento linha adesiva - Pinho do Paraná

Desta maneira, para elaboração dos modelos foi adotado o comprimento da linha adesiva no intervalo de 12 e 13 cm, figura 95.

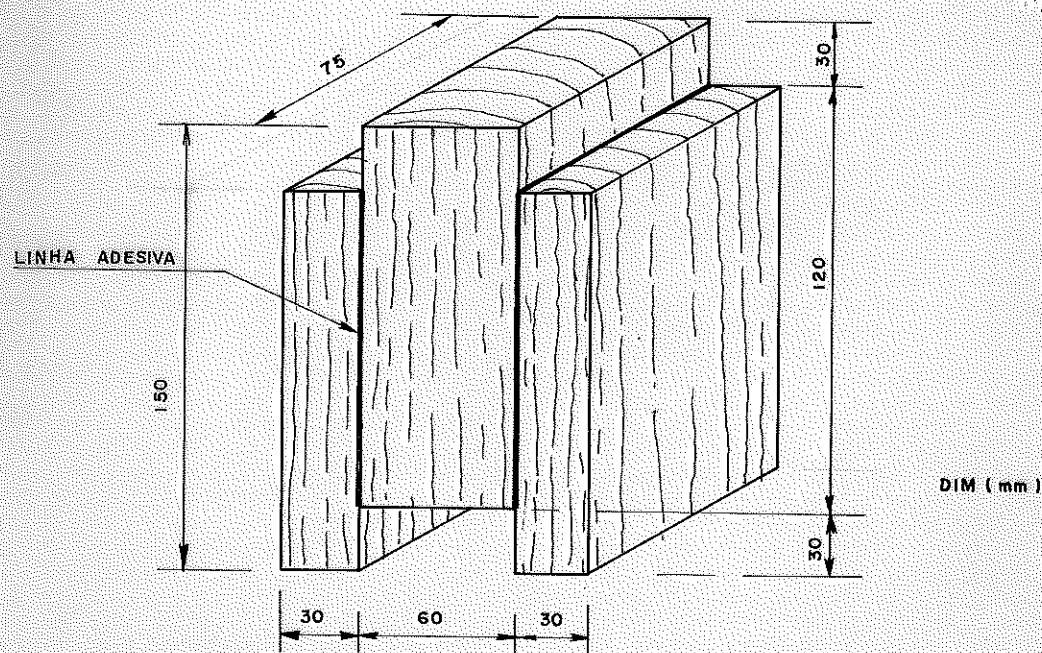


FIG. 95-DIMENSÕES DO MODELO DE ENSAIO EM ESCALA NATURAL

Na tabela 4, encontram-se as cargas máximas para o comprimento da linha adesiva igual a 12 cm.

TABELA 4 - CARGAS MÁXIMAS PARA $L_c = 12$ cm.			
madeiras	carga máxima de tração (KN)	carga máxima de cisalhamento (KN)	carga máxima de compressão (KN)
Eucalipto Citriodora	192.09	298.80	288.00
Peroba Rosa	138.63	234.00	198.00
Pinho do Paraná	67.50	122.64	137.25

3 - ENSAIO DE AFINIDADE DO ADESIVO

Com a finalidade de definir a afinidade do adesivo com as madeiras Eucalipto Citriodora, Peroba Rosa e Pinho do Paraná, foi montada uma primeira série de ensaios, composta por 38 corpos de prova em escala natural distribuídos como segue: 10 corpos de prova com madeira densa (Eucalipto), 10 corpos de prova com madeira medianamente densa (Peroba) e 8 corpos de prova com madeira pouco densa (Pinho). Todos estes corpos de prova foram montados com adesivo à base de resina resorcinol.

Após a montagem, instrumentação e medição dos corpos de prova, foram realizados os ensaios, conforme será exposto no item 5.1, deste capítulo.

Aplicando as equações 2 e 3, foram obtidos os valores da tensão de cisalhamento e a tensão de tração normal, tabela 5.

Pelo tipo de ruptura do corpo de prova no fim da realização dos ensaios, e pelas tensões máximas encontradas, a ruptura ocorre por tração normal à linha adesiva.

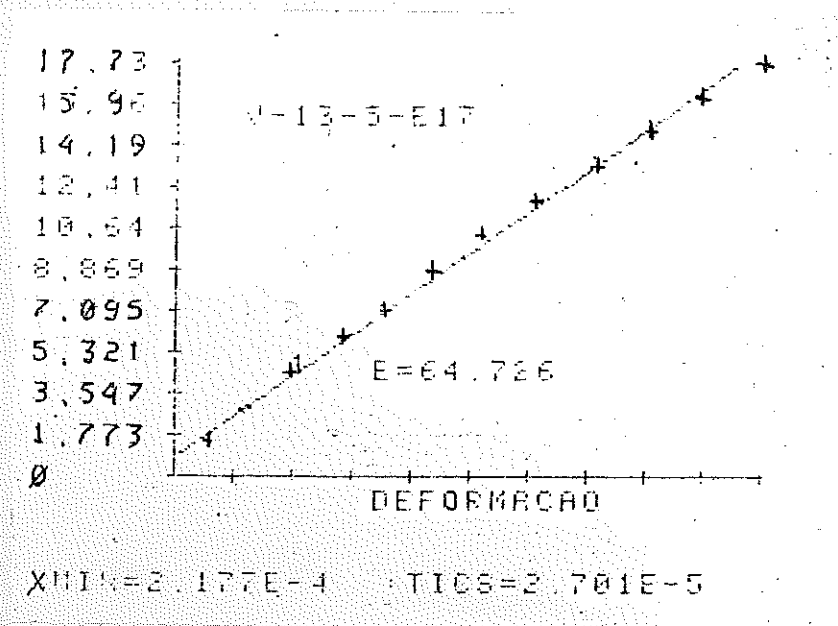
Para definir melhor a adaptabilidade do adesivo, determinou-se o módulo de deformação da ligação, mediante uma regressão linear utilizando o micro-computador HP-85 e mediante a aplicação da equação 3.1. A listagem da folha de saída é apresentada a continuação da tabela 5.

TABELA 5 - VALORES MÁXIMOS DAS TENSÕES (N/cm²)

TIPO DE MADEIRA	corpo prova	tensão de cisalhamen.	tensão de tracão nor.	módulo de deformação	% area colada
EUCALIPTO CITRIODORA	1	173.50	416.30	96920	90
	2	304.70	731.30	219090	95
	3	250.00	600.00	211300	95
	4	340.70	817.60	471330	100
	5	257.80	618.70	183150	60
	6	218.30	675.00	540720	95
	7	331.30	795.00	226730	70
	8	320.20	768.40	265910	95
	9	223.50	536.30	147490	100
	10	320.30	768.70	223030	90
PEROBA ROSA	1	390.60	937.40	410470	100
	2	303.10	727.40	321260	95
	3	507.80	1218.70	278250	100
	4	332.80	798.70	336720	70
	5	529.70	1271.20	425410	100
	6	581.30	1395.00	702160	100
	7	451.60	1083.70	599360	95
	8	454.70	1091.20	394880	95
	9	454.40	1090.40	349660	70
	10	550.00	1320.00	424820	100
PINHO DO PARANÁ	1	497.90	1195.00	229440	100
	2	485.40	1165.00	294740	100
	3	343.80	825.00	212160	80
	4	479.20	1150.00	294120	100
	5	547.90	1315.00	238460	100
	6	664.60	1595.00	341180	100
	7	513.40	1232.00	488620	90
	8	291.70	700.00	313420	100

ADV. REG LINEAR: CODIGO 1
 FONTE/GL SQ SM F
 TOTAL 12 397.7
 REG 1 395.8 395.8 999.9
 RESID 11 1.8 0.2
 R QUADRADO = 0.995

$$Y = -13.295 + 64726.271 X$$



Na tabela 6, encontra-se as tensões médias de ruptura dos corpos de prova ensaiados e as tensões médias de ruptura das madeiras. Nos corpos de prova de Eucalipto Citriodora, a tensão de ruptura na linha adesiva é muito inferior à tensão de ruptura da madeira. A madeira do Eucalipto Citriodora é muito densa. Para melhorar estes resultados deve-se tomar precauções para garantir penetração adequada do adesivo. As tensões de ruptura por cisalhamento da ligação encontradas nos ensaios com as madeiras Peroba Rosa e Pinho do Paraná, são muito mais próximas das tensões de ruptura da madeira, evidenciando maior compatibilidade do Pinho e da Peroba com o adesivo à base de resorcinol. Isto acontece por causa da penetração do adesivo na madeira. A penetração maior aumenta a área de colagem, intensificando a adesão do adesivo com a madeira. A figura 96 indica a possível penetração do adesivo na madeira.

Como a Peroba Rosa é uma madeira muito utilizada em estruturas e por causa da linha adesiva ser mais rígida, a maioria das ligações necessárias para elaboração de estruturas coladas serão ensaiadas utilizando a Peroba.

Outra resina com boas possibilidades de utilização na madeira é a epoxi. Para verificar a sua afinidade, com a madeira Peroba Rosa, foram confeccionados 11 corpos de prova, obtendo-se, nos ensaios, resultados aproximadamente iguais aos resultados obtidos com os ensaios realizados com adesivo à base de resorcinol, tabela 7.

TABELA 6 - TENSÕES MÉDIAS MÁXIMAS NA LINHA ADESIVA E TENSÕES DE RUPTURA DA MADEIRA (N/cm²)

MADEIRAS	TIPO	cisalhamento	tração normal	módulos
Pinho do Paraná	ligação madeira	480.00	1140.00	301510
		730.00	400.00	1950000
Peroba Rosa	ligação madeira	460.00	1100.00	427300
		1300.00	830.00	1200000
Eucalipto Citriodora	ligação madeira	280.00	670.00	258570
		1660.00	1030.00	1850000

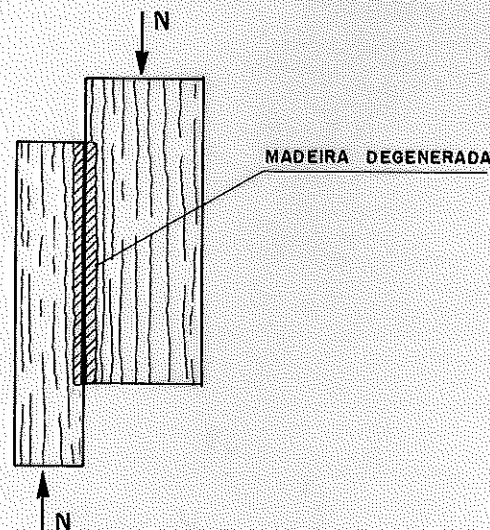


FIG. 96 - PENETRAÇÃO DO ADESIVO NA MADEIRA

TABELA 7 - RESULTADO DOS ENSAIOS - EPOXI (N/CM²)

TIPO DE MADEIRA	corpo prova	tensão de cisalhamen.	tensão de tração nor.	módulo de deformação	% área colada
PEROBA ROSA	1	354.80	851.50	335400	90
	2	434.30	1042.20	395730	95
	3	409.70	983.20	204180	95
	4	342.40	821.80	250300	80
	5	421.80	1012.30	201350	95
	6	619.10	1480.58	503100	100
	7	347.40	833.60	268390	80
	8	287.80	690.70	503570	70
	9	304.00	729.50	242760	70
	10	590.60	1417.30	143420	100
	11	402.20	964.80	298530	95

4 - ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL À LINHA ADESIVA

O objetivo deste ensaio é verificar a hipótese da distribuição de tensão normal à linha adesiva, utilizada na análise de tensões.

Para este fim, foi montada a sétima série de ensaios. Trata-se de uma série de 4 (quatro) corpos de prova sendo um de cisalhamento em escala natural, um de cisalhamento em escala reduzida, um de compressão normal às fibras e um de tração normal às fibras. Estes dois últimos foram retirados do corpo de prova em escala natural.

4.1 - MÉTODO DE ENSAIO

No corpo de prova em escala natural foram instalados, na linha adesiva, cinco extensômetros elétricos conforme esquema da figura 97.

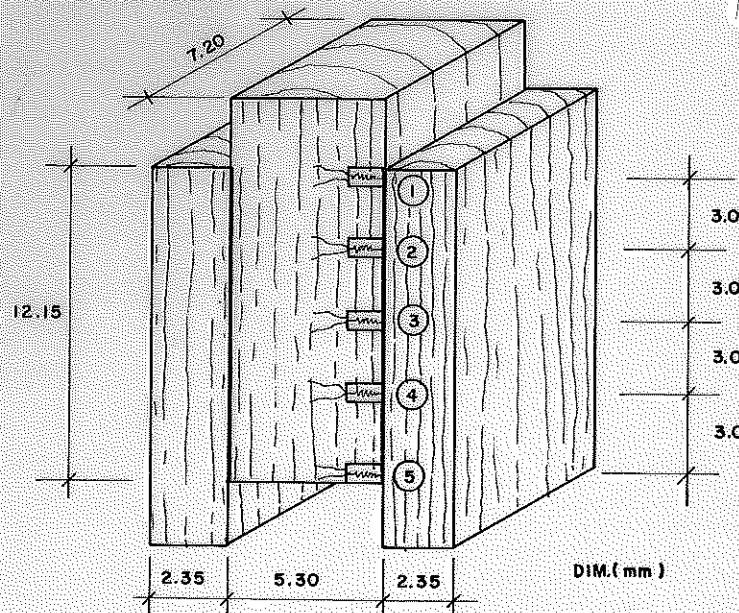


FIG. 97- POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios Amsler, figura 98.

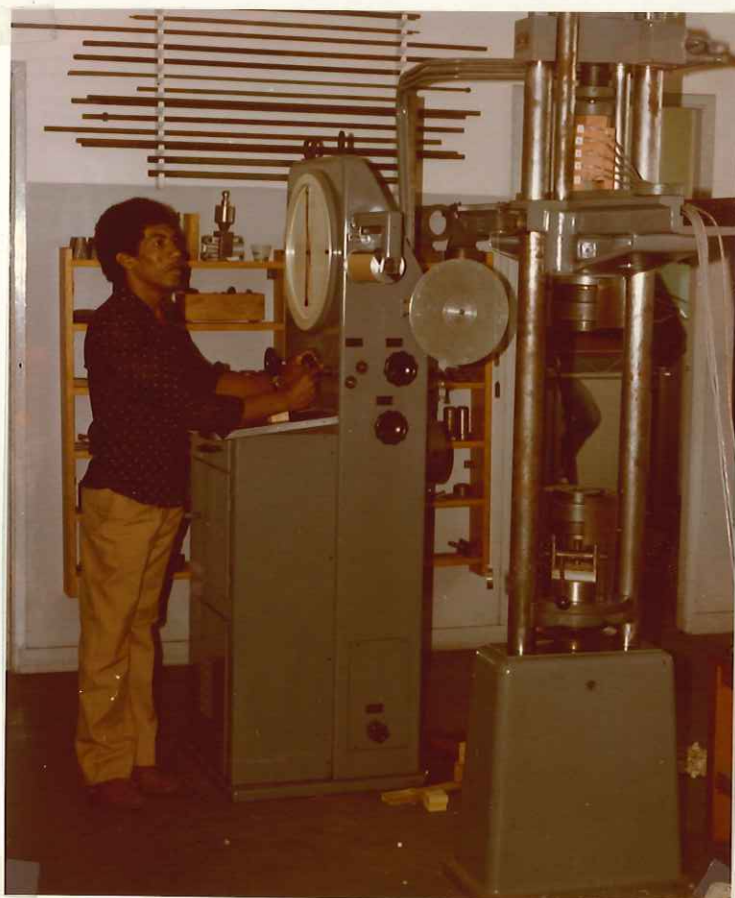


Fig. 98 - Ensaio do CP, com os extensômetros instalados

Foram feitas leituras dos extensômetros para cada 5 KN até alcançar a ruptura com uma carga de 144 KN. Na figura 99 são apresentadas as cinco últimas leituras das deformações transversais.

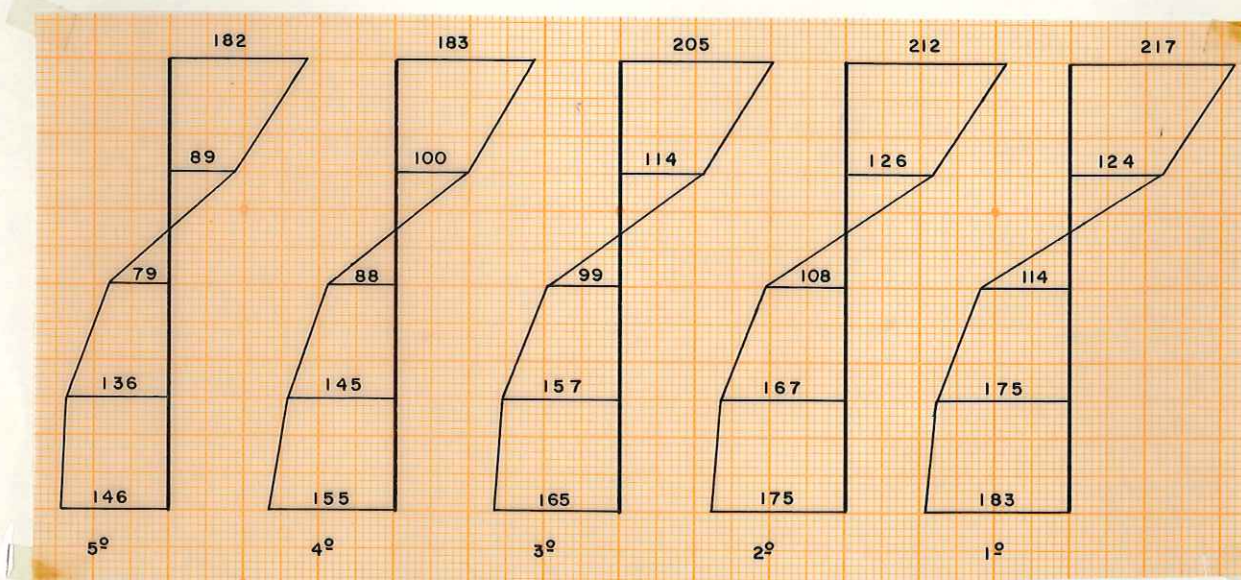


Fig. 99 - Deformações transversais- 5 últimas leituras - ($\times 10^{-4}$)

Para determinar as tensões correspondentes a estas deformações foi necessário determinar o módulo de elasticidade normal às fibras na tração e na compressão. Os corpos de prova, para a determinação dos referidos módulos, foram retirados do corpo de prova em escala natural, figura 100.

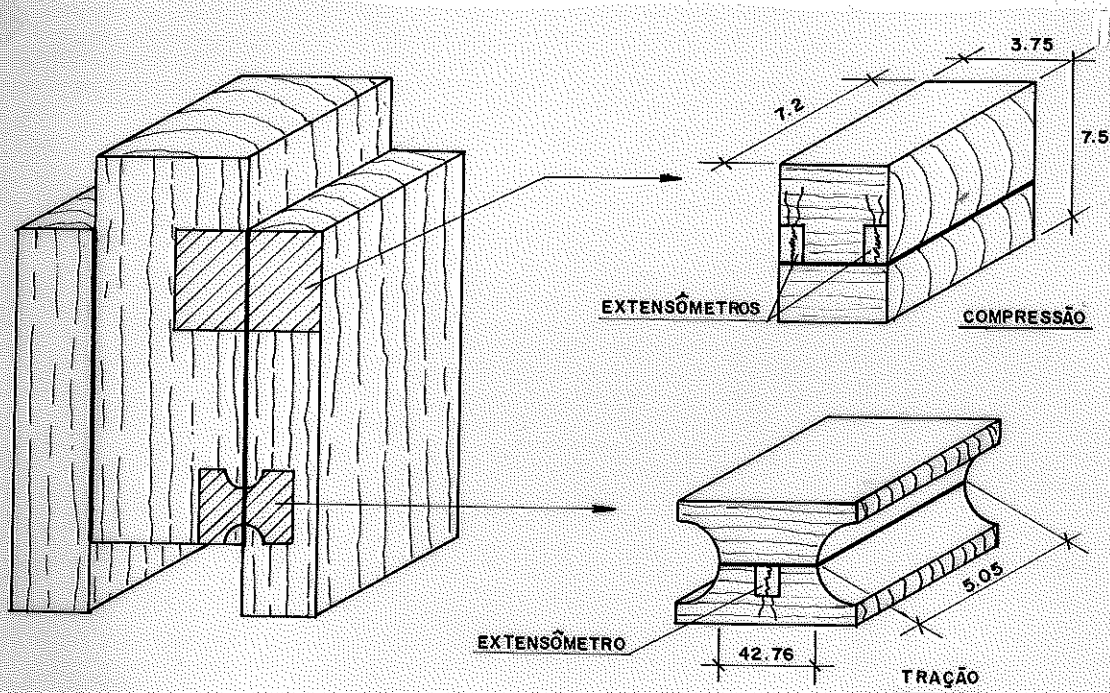


FIG.100-CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Nos ensaios de compressão e tração normal às fibras foram lidas as deformações para cada 2 KN, obtendo-se os gráficos tensão x deformação específica apresentados nas figuras 101 e 102.

Os módulos de elasticidade calculados, a partir dos ensaios, para a compressão e a tração normal às fibras são:

$$E_{wcn} = 79.000 \text{ N/cm}^2$$

$$E_{wtn} = 60.000 \text{ N/cm}^2$$

sendo:

E_{wcn} = módulo de elasticidade da madeira na compressão normal às fibras

E_{wtn} = módulo de elasticidade da madeira na tração normal às fibras

Aplicando a lei de Hooke e desprezando a influência das deformações nas outras direções, pode-se obter a distribuição das tensões transversais, figura 103.

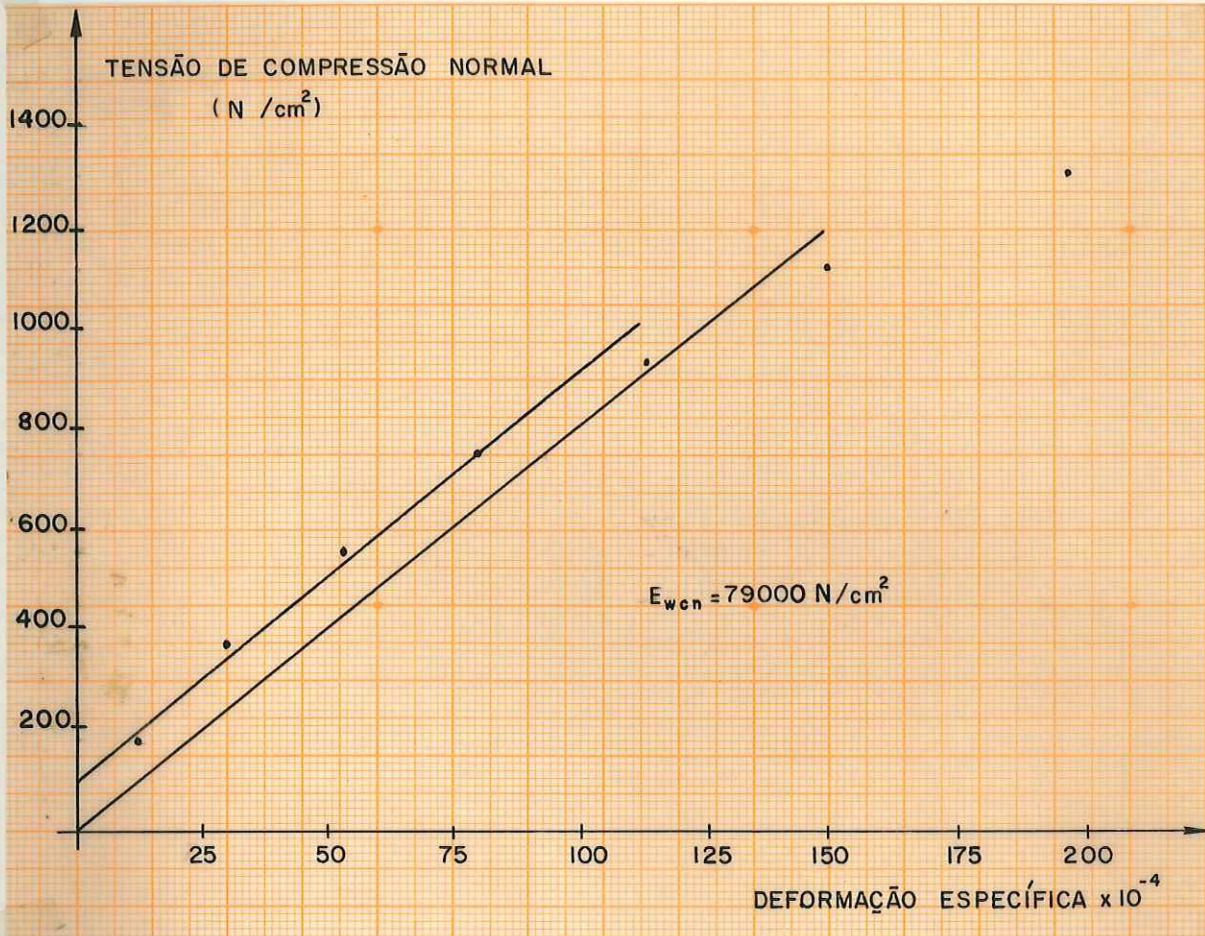


Fig. 101 - diagrama tensão x deformação - compressão normal

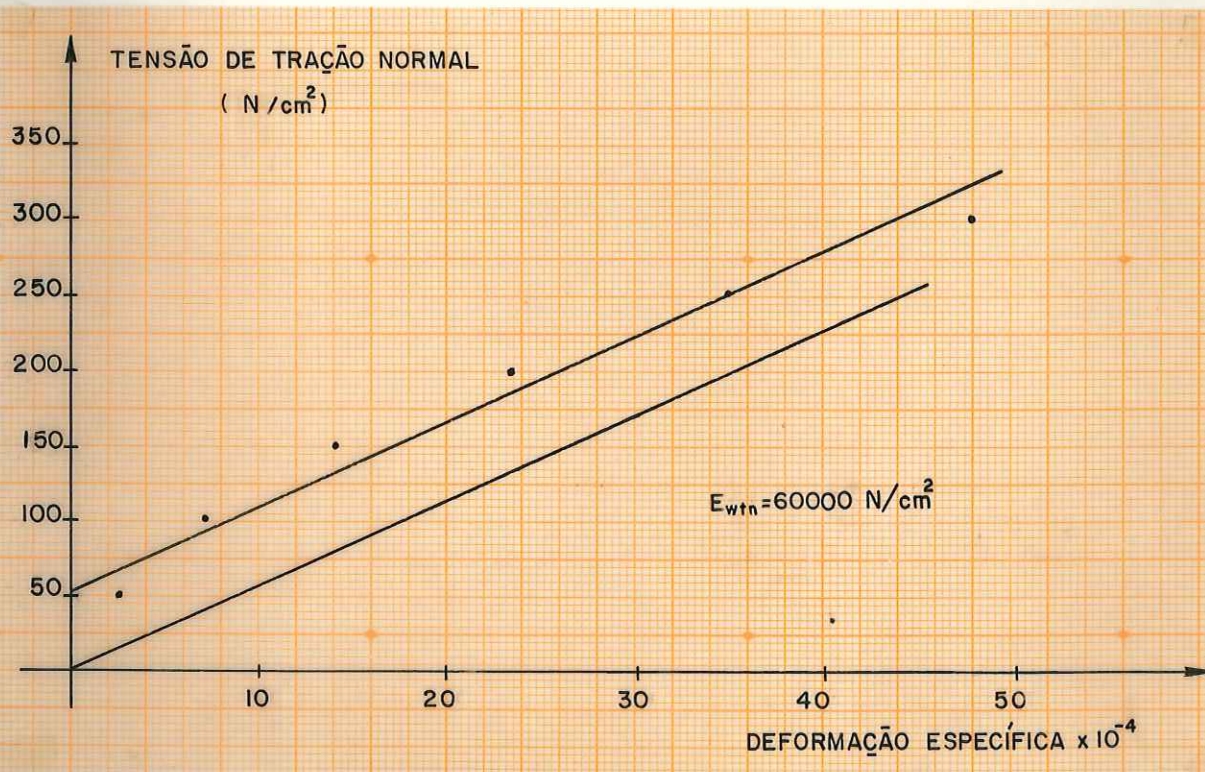


Fig. 102 - diagrama tensão x deformação - tração normal

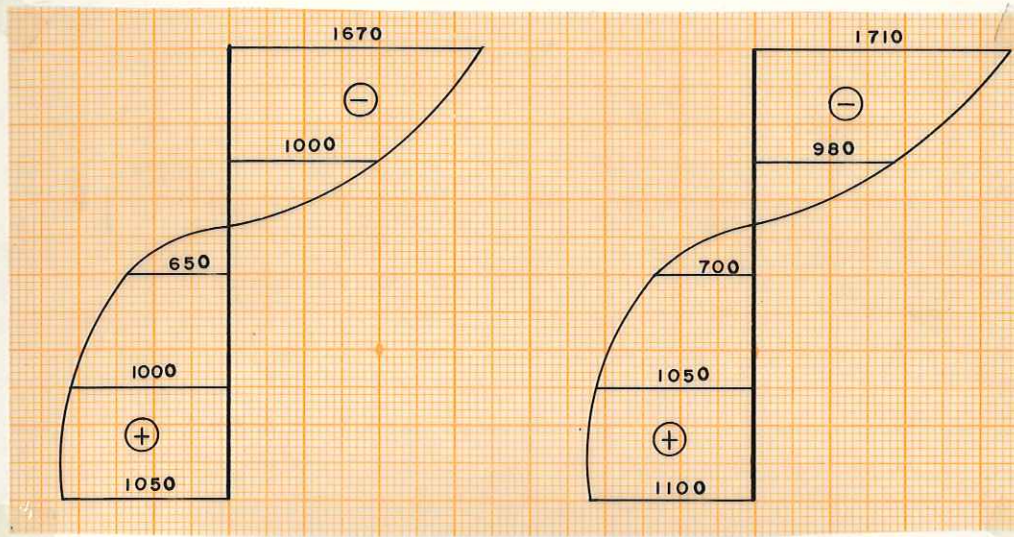


Fig. 103 - distribuição de tensões das 2 últimas leituras (N/cm²)

Observando a figura 103, verifica-se integralmente a hipótese relativa à distribuição de tensões transversais adotada.

No corpo de prova em escala reduzida foram instalados na linha adesiva, três extensômetros conforme esquematizado na figura 104.

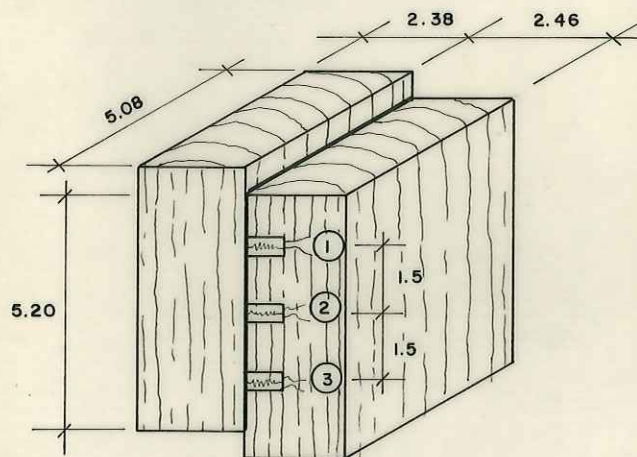


FIG.104-POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS-CORPO DE PROVA DE CISLHAMENTO

No ensaio deste corpo de prova foram medidas as deformações transversais à linha adesiva, para intervalos de carga de 2 KN. Na figura 105, é mostrada a distribuição de deformações para as três últimas leituras.

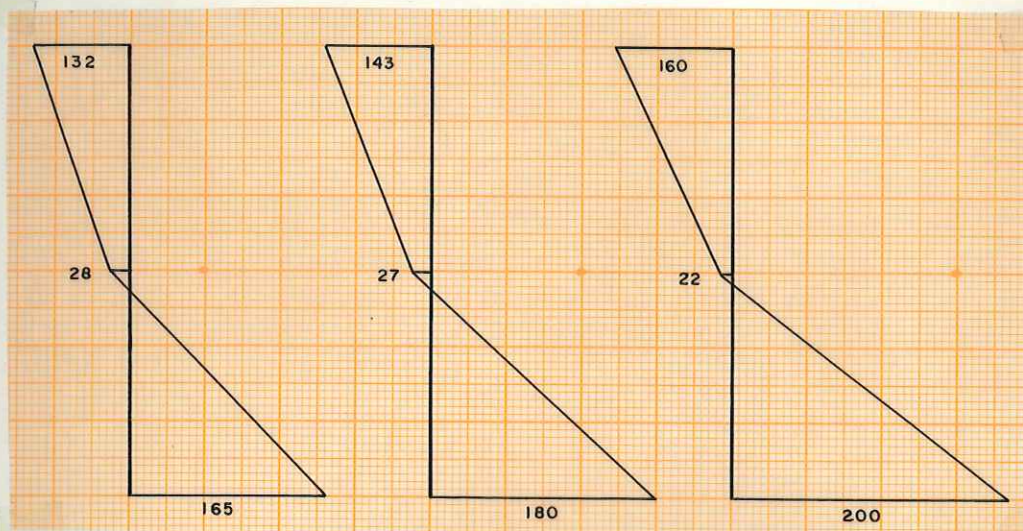


Fig. 105 - distribuição de deformações em três leituras finais ($\times 10^{-4}$)

Com os módulos de elasticidade de compressão e tração normal, determinados anteriormente, e mediante a aplicação da lei de Hooke, desprezando a influência das deformações nas outras direções, obtêm-se a distribuição de tensões transversais, figura 106.

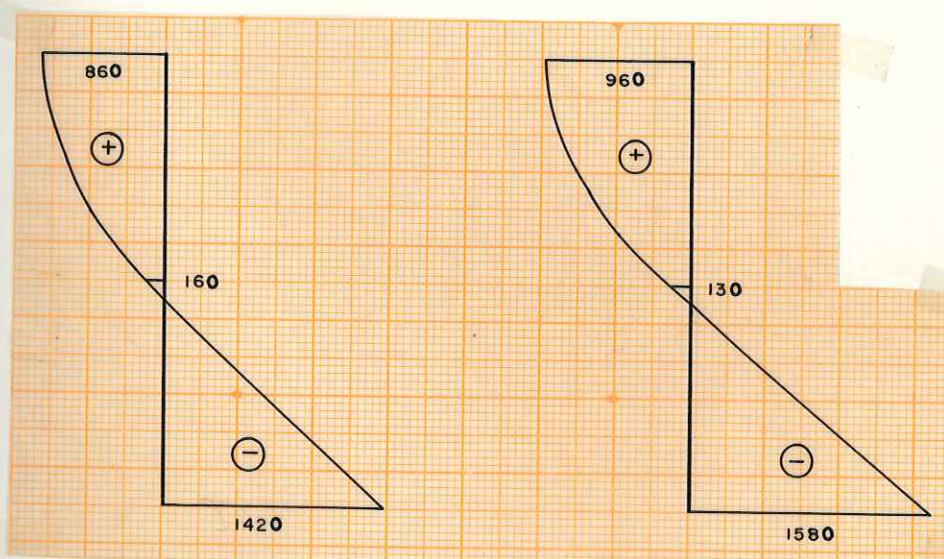


Fig. 106 - distribuição de tensões das duas últimas leituras

Desta maneira, verifica-se integralmente a hipótese relativa à distribuição de tensões transversais, adotada para o modelo em escala reduzida.

5 - ENSAIO DE CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO EM MODELOS EM ESCALA NATURAL

A finalidade deste ensaio é a determinação do módulo de deformação da ligação, da capacidade de carga e das correlações com as características mecânicas da madeira. Para atingir este objetivo foi montada a segunda série de ensaios com corpos de prova em escala natural e carregamento paralelo às fibras. Esta série consta de 68 corpos de prova de Peroba Rosa, com adesivo à base de resorcinol e 54 corpos de prova de Peroba Rosa com adesivo à base de resina epoxi.

Após a escolha aleatória das vigas de madeira, a preparação e a instrumentação dos corpos de prova, fez-se a sua numeração como segue:

CP-n-m-X

sendo:

CP = corpo de prova

n-m = pedaço n da viga m

X = tipo de adesivo, sendo resorcinol (C) e epoxi (A)

A seguir foram determinadas todas as dimensões dos corpos de prova.

5.1 - MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios realizados foram esquematizados, de maneira a simular no laboratório as condições de uso.

As deformações relativas entre as peças dos corpos de prova foram medidas através de relógios comparadores convencionais, com precisão de 0.001 mm. Os dispositivos de fixação, dos relógios, foram pregados no corpo de prova em posições predeterminadas, figura 107. A distância, L, entre os pregos, define o comprimento no qual estão sendo medidos os deslocamentos relativos.

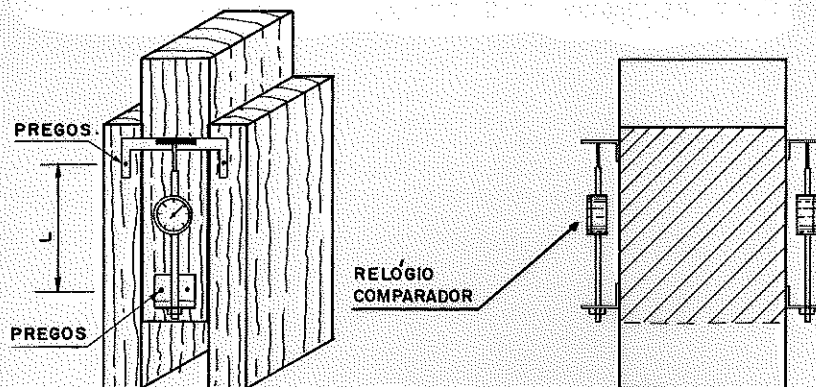


FIG.107- POSIÇÃO DOS RELÓGIOS COMPARADORES NO MODELO EM ESCALA NATURAL

O carregamento aplicado nos modelos foi lento e contínuo com velocidade controlada em torno de 30 MPa por minuto. Durante o carregamento dos corpos de prova foram medidos, para cada acréscimo de carga, o seu respectivo deslocamento relativo. Estas leituras foram feitas até ultrapassar o limite de proporcionalidade. Em seguida foram retirados os relógios comparadores, para evitar possíveis danos durante a ruptura, e o corpo de prova foi levado até a ruptura, figura 108, geralmente em 15 minutos de carregamento.



Fig. 108 - ensaio do corpo de prova em escala natural

Imediatamente após a conclusão dos ensaios, determinou-se a porcentagem de área colada e fez-se uma análise visual e quantitativa da ruptura do corpo de prova. Na maioria dos corpos de prova constatou-se nitidamente uma ruptura por tração no início da linha adesiva ou na madeira, figura 109

Fig. do trabalho de EBRAMATI

Fig. 109 - ruptura do corpo de prova em escala natural

Para determinar as correlações entre as tensões na linha adesiva e as características físicas e mecânicas da madeira, foram retirados dos corpos de prova em escala natural, imediatamente após a conclusão do ensaio, os corpos de prova de cisalhamento, com pressão paralela, umidade e densidade, figura 110.

5.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

A determinação da umidade e da densidade da madeira foi feita a partir do corpo de prova de compressão e em conjunto com o ensaio de compressão.

Com a utilização de um paquímetro foram determinadas as dimensões do corpo de prova e utilizando uma balança obteve-se a massa úmida (M_u).

O corpo de prova de compressão paralela foi ensaiado com velocidade de carga à razão de 10 MPa por minuto, até alcançar a ruptura do corpo de prova (N_{rup}), figura 111.

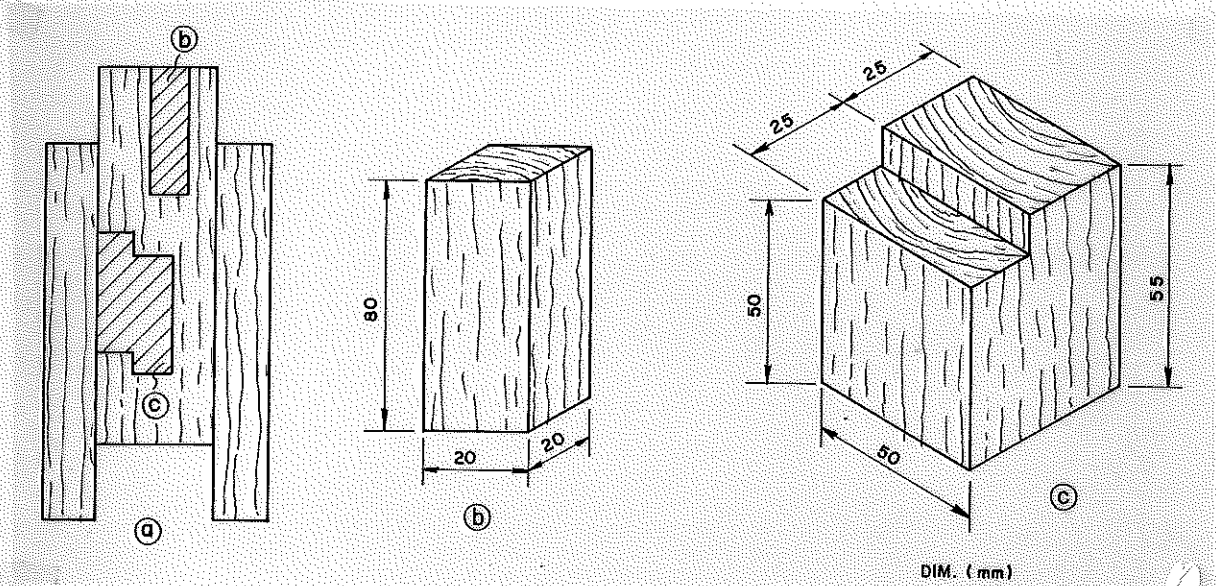


Fig. 110 - a) posição dos corpos de prova
b) corpo de prova de compressão paralela
c) corpo de prova de cisalhamento, MB-26

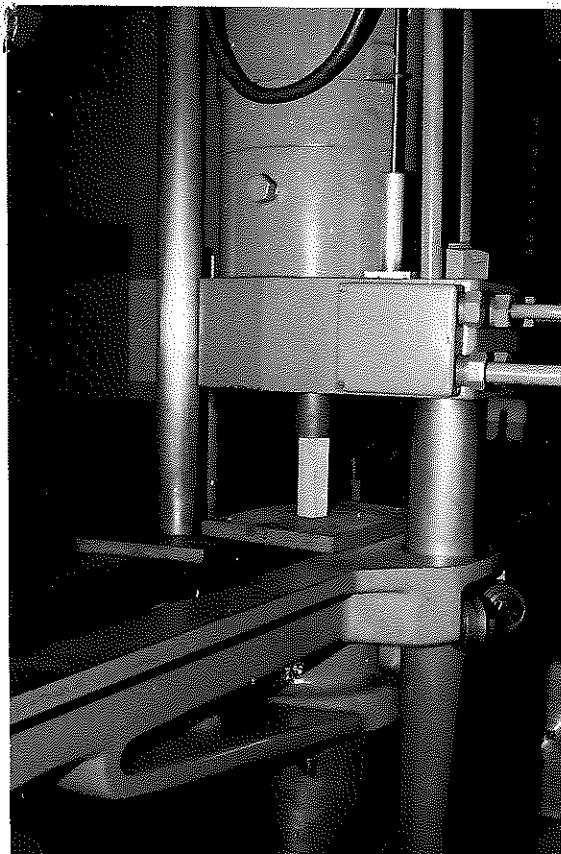


Fig. 111 - ensaio de compressão paralela às fibras

Após a ruptura do corpo de prova, a compressão paralela, obteve-se, a massa seca (M_s).

A determinação da tensão de compressão é imediata.

$$\sigma_{wc} = \frac{N_{rup}}{a.b} \quad (N/cm^2)$$

sendo:

$a.b$ = área da seção do corpo de prova

N_{rup} = carga de ruptura na compressão paralela às fibras

σ_{wc} = tensão de compressão da madeira

A umidade e densidade aparente será:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\%)$$

$$D_{ap} = \frac{M_u}{a.b.c} \quad (KN/m^3)$$

sendo:

U = umidade em porcentagem

M_u = massa da madeira úmida

M_s = massa da madeira seca em estufa

$a.b.c$ = volume

D_{ap} = densidade aparente

Para a realização do ensaio do corpo de prova de cisalhamento foram determinadas as dimensões da área de cisalhamento (A_s) com a utilização de um paquímetro. A velocidade de aplicação da carga foi fixada em 2.5 MPa por minuto, até alcançar a ruptura do corpo de prova, figuras 112 e 113.

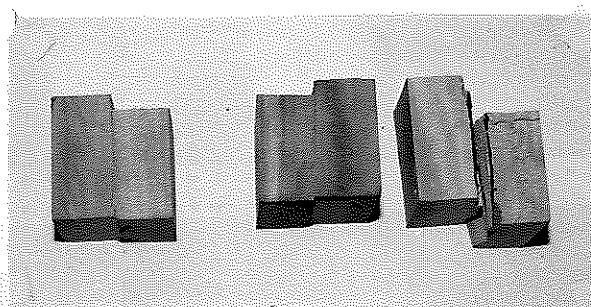


Fig. 112 - ruptura CP. cisalhamento da madeira

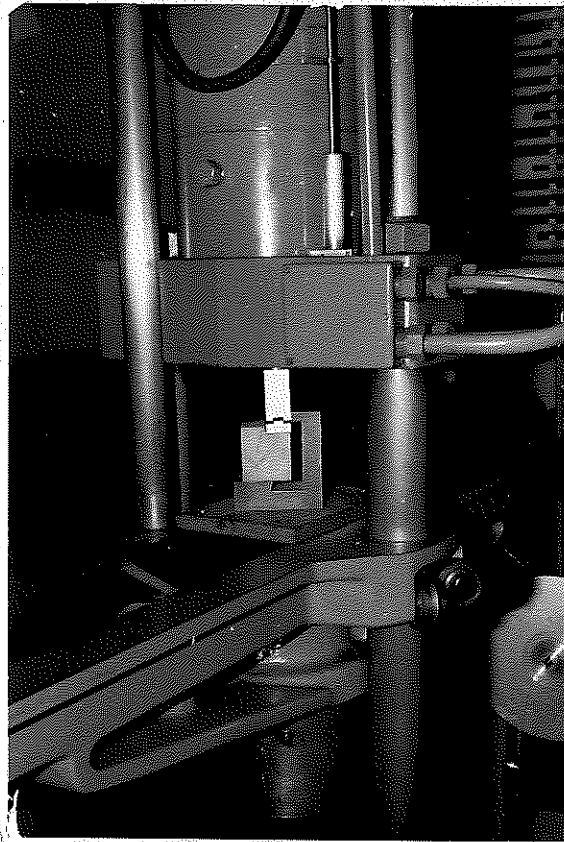


Fig. 113 - ensaio de cisalhamento da madeira

A determinação da tensão de cisalhamento é imediata.

$$\tau_w = \frac{N_{rup}}{A_s} \quad (N/cm^2)$$

sendo:

- τ_w = tensão de cisalhamento da madeira
- N_{rup} = carga de ruptura de cisalhamento
- A_s = área de cisalhamento

5.3 - OBTENÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

De cada um dos 122 corpos de prova foram obtidos os seguintes dados: as dimensões da área colada, as dimensões de todo o corpo de prova, a distância entre os elementos de fixação dos relógios, as leituras dos deslocamentos relativos dos dois relógios para cada acréscimo de carga, a carga máxima de ruptura do corpo de

prova, a porcentagem de área colada e as características físico-mecânicas da madeira, isto é, a tensão de compressão paralela, a tensão de cisalhamento, a umidade e a densidade.

Para a determinação do módulo de deformação da ligação procedeu-se da seguinte maneira: a partir das leituras dos relógios comparadores determinou-se a diferença das leituras com as leituras imediatamente anteriores. A partir destas diferenças foram obtidas as diferenças médias e as diferenças médias cumuladas. A deformação específica e a tensão de cisalhamento na linha adesiva foram determinadas utilizando as equações apresentadas no item 2.1 do capítulo II.

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{e} \quad \tau = \frac{\Delta N}{2 \cdot a \cdot L_c}$$

sendo:

ΔL = diferença média cumulada

L = distância entre os elementos de fixação dos relógios

ΔN = carga aplicada no corpo de prova

τ = tensão de cisalhamento na linha adesiva

γ = deformação específica relativa

Com os pares de valores γ_i e τ_i , traçou-se o gráfico tensão x deformação específica relativa dos corpos de prova. Pode-se observar, nestes gráficos, a existência de um trecho linear e de um trecho curvo, e entre eles o limite de proporcionalidade. O módulo de deformação (MD) da ligação será o coeficiente angular da reta no trecho linear do gráfico tensão x deformação.

$$MD = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{N/cm}^2)$$

A seguir foram determinadas a tensão de cisalhamento e a tensão normal, na ruptura da linha adesiva, utilizando as equações 2 e 3.

$$\tau_{ac} = \frac{N_{rup}}{2 \cdot A_c} \quad ; \quad \sigma_{tn} = \frac{3 \cdot N_{rup} \cdot c}{4 \cdot y'' \cdot a \cdot z}$$

sendo:

τ_{ac} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na compressão.

- c = espessura da peça cobrejunta
 y'' = distância da face inferior da peça à linha neutra
 a = espessura da peça principal
 z = braço de alavanca do binário F
 σ_{tn} = tensão de tração normal à linha adesiva
 N_{rup} = carga de ruptura do corpo de prova
 A_c = área colada

Todo este cálculo mecânico, os diagramas tensão x deformação e a regressão linear no trecho linear da reta, para a determinação do módulo de deformação, foram feitos mediante programas desenvolvidos especificamente para o computador IBM-1130 e para o micro-computador HP-85. Na tabela 8 é apresentada uma listagem dos cálculos e na figura 114 o seu gráfico tensão x deformação, feito pelo computador.

TABELA 8 - LISTAGEM E CALCULOS DAS LEITURAS DE UM ENSAIO EM ESCALA NATURAL.

NUMERO DE ENSAIO = 23 CORPO DE PROVA 13-11-C-27 AREA (CM ²)= 97.20 CONSTANTE= 10.49500 COMPRIMENTO L(CM)=13.500 AREA COLADA= 40%									
CARGA DIVISAO	EXTENSOM. A		EXTENSOM. B		DIF. MED. 0,001 (MM)	DIF. MED. ACUMULADA	DEFORMACAO ESPECIFICA	TENSÃO DE CISALHAM. (N/cm ² x 10)	
	LEITU.	DIFER.	LEITU.	DIFER.					
0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0000000	0.0	
50	1	1	5	5	3.0	3.0	0.0000222	2.6	
100	3	2	10	5	3.5	6.5	0.0000481	5.3	
150	5	2	18	8	5.0	11.5	0.0000851	8.0	
200	8	3	25	7	5.0	16.5	0.0001222	10.7	
250	10	2	33	8	5.0	21.5	0.0001592	13.4	
300	13	3	40	7	5.0	26.5	0.0001962	16.1	
350	15	2	50	10	6.0	32.5	0.0002407	18.8	
400	18	3	60	10	6.5	39.0	0.0002888	21.5	
450	20	2	66	6	4.0	43.0	0.0003185	24.2	
500	23	3	71	5	4.0	47.0	0.0003481	26.9	
550	25	2	83	12	7.0	54.0	0.0003999	29.6	
600	28	3	90	7	5.0	59.0	0.0004370	32.3	
650	32	4	105	15	9.5	68.5	0.0005074	35.0	
700	37	5	120	15	10.0	78.5	0.0005814	37.7	
750	43	6	140	20	13.0	91.5	0.0006777	40.4	
800	48	5	153	13	9.0	100.5	0.0007444	43.1	
850	54	6	170	17	11.5	112.0	0.0008296	45.8	
900	60	6	182	12	9.0	121.0	0.0008962	48.5	
950	66	6	197	15	10.5	131.5	0.0009740	51.2	
1000	73	7	220	23	15.0	146.5	0.0010851	53.9	

CARGA DE RUPTURA = 1007 KN TENSÃO DE RUPTURA = 550 N/cm²

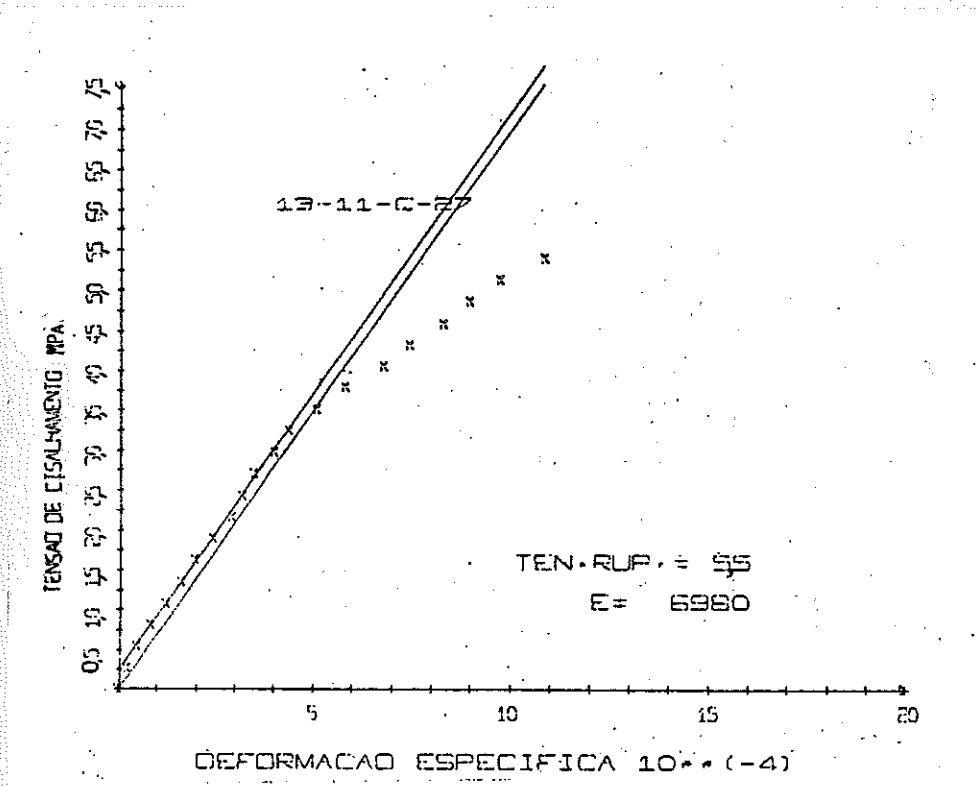


Fig. 114 - diagrama tensão x deformação

Os resultados dos cálculos efetuados para a determinação das tensões, do módulo de deformação, da umidade e da densidade da madeira, estão apresentados na tabela 9.

5.4 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Com o intuito de visualizar as várias influências das características físicas e mecânicas da madeira, nas características mecânicas da ligação adesiva, foram traçados vários gráficos no micro-computador HP-9825B do LaMEM.

Para poder correlacionar as diferentes características mecânicas das ligações adesivas foi necessário eliminar a influência das características físicas da madeira, isto é, a influência da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada. Para isto foi feita separadamente para cada característica mecânica da ligação adesiva a respectiva correção da influência das características da madeira.

TABELA 9 - RESULTADO DOS ENSAIOS DOS MODELOS EM ESCALA NATURAL - RESORCINOL

Nº CP	τ_{ac} (N/cm ²)	σ_{tn} (N/cm ²)	σ_{cn} (N/cm ²)	τ_{ws} (N/cm ²)	σ_{wc} (N/cm ²)	MD (N/cm ²)	D _{ap} KN/m ³	U %	% $\bar{a}re$ cola.
1	809.40	844.10	1322.2	2186.0	5112.0	462330	9.10	12.80	70
2	726.30	757.50	1186.4	1942.0	4432.0	557930	6.70	12.78	75
3	826.60	848.40	1328.8	2309.5	5442.0	353840	7.70	12.40	80
4	849.80	879.20	1377.0	2215.0	4459.0	473410	7.50	11.83	90
5	553.70	586.90	919.3	1754.0	5633.0	236240	7.90	13.01	80
6	546.20	569.60	892.2	2124.0	4590.0	727370	9.30	13.63	80
7	779.10	757.40	1186.3	2452.5	5554.0	656880	8.50	12.75	70
8	565.00	575.30	901.1	1660.0	4463.0	483100	7.10	12.88	90
9	441.70	442.10	739.4	2210.0	6261.0	283500	7.80	11.77	80
10	899.30	898.80	1407.7	2036.6	5801.6	538400	7.50	12.27	70
11	584.80	613.80	961.5	1959.0	5265.6	434060	7.70	11.19	45
12	400.90	405.00	634.4	1682.2	5316.7	399670	8.30	11.95	65
13	776.80	810.10	1268.9	1939.2	6250.2	260790	8.00	11.08	85
14	901.55	955.70	1496.8	1931.9	5856.5	500840	8.40	12.51	100
15	753.15	785.50	1230.3	1735.4	4551.8	446290	7.60	12.42	40
16	758.20	790.70	1238.5	2581.8	4926.7	461680	6.50	12.76	90
17	572.20	587.30	919.8	1861.7	3745.7	588740	7.40	11.39	90
18	769.30	801.70	1255.6	1641.8	6125.0	516330	7.40	11.78	60
19	837.20	894.80	1401.5	2194.7	6566.6	645870	8,40	12.23	70
20	672.50	701.30	1098.5	1627.2	6009.9	380490	8.30	13.03	40
21	951.80	1000.70	1567.4	1979.9	5357.1	534020	7.70	13.12	90
22	540.70	563.90	883.2	1605.7	4708.0	399100	7.80	12.90	90
23	550.60	527.40	826.1	1698.2	4651.2	698040	7.60	12.25	95
24	903.50	942.30	1475.9	2430.6	6313.1	559670	8.00	11.87	80
25	659.90	699.50	1095.6	2082.8	6534.4	433420	7.90	12.17	90
26	847.40	913.20	1430.4	2101.5	6368.7	488110	8.20	12.55	90
27	620.20	646.80	1013.1	1711.0	5582.1	517250	7.50	12.30	60
28	671.20	694.40	1087.6	1674.7	5575.0	450930	8.40	11.27	70
29	760.80	793.40	1242.8	1674.3	4690.0	427040	7.70	12.17	70
30	452.60	472.80	740.5	1437.8	3850.0	404850	6.60	13.17	60
31	626.00	658.20	1030.9	1471.6	5277.0	426850	7.50	12.61	80
32	688.90	730.20	1143.8	1722.2	4531.0	495630	8.30	12.97	80
33	457.20	484.60	759.1	1628.0	5372.0	563650	7.70	12.74	80
34	577.50	602.30	943.3	1663.9	4591.0	408460	8.00	12.97	80
35	576.50	544.20	852.3	1256.0	5569.3	539090	9.30	12,77	70
36	710.80	797.10	1107.5	1967.5	4777.0	535800	7.70	12.78	80
37	613.70	601.20	941.7	1821.6	5300.0	757920	8.60	11.78	95
38	444,90	475,50	744.7	1323.9	4834.1	509630	7.70	13.56	90
39	426.30	457.50	716.6	1639.6	4503.5	491420	7.70	13.86	85
40	632.20	678.50	1062.7	1623.4	5400.0	605990	7.40	12.97	50
41	510.80	548.20	858.6	1803.4	4368.9	502230	7,20	13.63	70
42	598.40	639.50	1001.7	2480.3	5715.8	508430	8,50	13.41	30
43	800.90	859.50	1346.3	1718.9	5913.6	498640	8.90	13.32	60
44	724.50	774.30	1212.8	1864.4	5197.3	423860	8.50	13.31	60
45	624.30	664.50	1040.8	1915.7	6024.5	569550	8.80	13.49	100
46	539.90	579.40	907.5	2137.2	4971.2	442780	8.40	13.61	60
47	797.40	848.70	1329.4	1877.4	5235.5	689330	7.40	13.86	80
48	746.00	797.30	1248.8	1766.8	5679.1	624250	8.00	13.61	40
49	645.90	687.50	1076.8	1786.3	4496.0	603500	9.20	15.13	70
50	224,20	238.60	373.7	1896.6	5968.0	268320	8.90	14.74	70

TABELA 9 - Cont. - RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS MODELOS - RESORCINOL

Nº CP	τ_{ac} (N/cm ²)	σ_{tn} (N/cm ²)	σ_{cn} (N/cm ²)	τ_{ws} (N/cm ²)	σ_{wc} (N/cm ²)	MD (N/cm ²)	D _{ap} (KN/m ³)	U %	% área cola.
51	656.50	704.50	1103.5	1797.7	4691.0	576320	8.30	14.78	80
52	197.90	210.60	329.9	2135.1	4507.0	280460	9.60	14.39	90
53	498.40	529.60	829.5	1471.6	3782.0	600860	7.30	14.73	60
54	708.30	763.30	1195.6	1983.1	4481.0	655820	8.50	14.78	70
55	748.80	787.40	1233.5	1722.2	3863.0	480770	8.20	15.84	40
56	540.20	579.70	908.0	1983.1	3454.0	453010	6.40	14.79	40
57	791.60	853.10	1336.2	1819.6	4950.0	617700	8.90	14.31	60
58	360.20	384.90	603.0	1703.3	3966.4	268630	7.90	16.29	80
59	375.65	399.80	626.2	1938.9	4350.0	362500	8.50	15.36	90
60	330.80	356.50	558.3	1481.5	3334.2	729570	6.30	14.78	70
61	298.35	318.80	499.4	1693.1	5680.8	368640	8.30	14.79	80
62	409.15	440.90	690.6	1610.1	4650.7	343910	7.80	14.80	70
63	488.00	521.50	816.9	1419.1	4521.0	495420	8.20	14.95	80
64	501.00	533.20	835.2	1713.5	4744.6	456000	8.00	14.65	80
65	325.65	350.90	549.7	1563.5	4851.6	332500	8.10	15.03	50
66	315.75	337.40	528.5	1621.6	5201.8	253000	8.30	16.15	40

RESULTADO DOS ENSAIOS DOS MODELOS EM ESCALA NATURAL - EPOXI

1	351.00	365.10	568.7	1680.4	5000.0	391810	8.30	13.30	75
2	441.50	456.80	715.5	1574.0	4809.0	154520	7.80	13.00	80
3	243.80	252.30	395.2	1730.6	4575.0	419840	7.80	12.70	70
4	495.10	512.20	802.3	1886.7	5094.0	642240	7.80	15.35	60
5	236.50	244.60	383.2	1699.3	4397.0	340100	6.90	12.96	50
6	504.30	528.80	817.3	1466.4	4349.0	402820	7.30	12.77	70
7	408.30	497.00	778.4	1755.8	5069.0	438620	8.00	12.04	90
8	485.80	502.60	787.3	1229.0	4299.0	370730	6.60	13.29	90
9	310.30	321.10	502.9	1649.6	5754.0	376120	8.40	12.98	100
10	613.30	634.60	993.9	1759.9	4599.0	486540	8.30	12.80	75
11	426.70	441.50	691.5	1579.0	5332.0	389120	8.70	14.15	90
12	199.50	206.40	323.2	1530.3	5263.0	565630	8.40	13.01	70
13	452.60	468.20	733.4	1684.8	3972.3	393990	8.10	13.33	70
14	378.70	391.80	613.7	1780.5	5361.0	412000	7.90	12.71	90
15	692.80	716.70	1122.7	2217.5	4611.7	507150	9.20	12.99	80
16	478.50	495.00	775.4	2059.4	4531.5	504820	8.50	12.67	40
17	236.50	244.60	383.2	1666.7	4351.0	647260	7.80	13.55	80
18	811.00	839.10	1314.3	1746.9	5214.3	425090	8.40	13.06	90
19	264.10	273.30	428.1	1504.8	4698.0	523620	8.20	11.88	40
20	548.60	567.60	889.1	1993.8	5244.2	447680	8.00	12.68	50
21	561.60	581.00	910.1	1605.1	5333.4	312080	8.20	13.41	90
22	890.50	921.30	1443.0	1790.3	4624.1	616280	8.10	12.42	80
23	517.30	535.20	838.3	1833.3	3916.0	458750	8.50	11.73	50
24	264.10	273.30	428.1	1765.5	4098.0	428860	7.40	10.94	70
25	334.30	345.90	541.8	1917.4	3916.0	610180	7.40	11.65	60
26	570.80	590.60	925.1	1662.4	3923.0	439620	7.50	12.65	80
27	253.10	261.80	410.1	1874.0	4258.0	344070	8.90	12.39	60
28	424.90	439.60	688.6	1719.9	3664.0	361120	7.60	11.91	90

TABELA 9 - Cont. RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS MODELOS - EPOXI									
Nº CP	τ_{ac} (N/cm ²)	σ_{tn} (N/cm ²)	σ_{cn} (N/cm ²)	τ_{ws} (N/cm ²)	σ_{wc} (N/cm ²)	MD (N/cm ²)	D _{ap} KN/m ³	U %	% área cola.
29	273.40	282.90	443.1	1689.0	4012.0	407660	7.40	12.10	90
30	491.40	508.40	796.3	1712.7	4875.0	317100	8.30	11.16	50
31	430.40	445.30	697.5	1533.3	2581.0	379790	6.40	11.36	90
32	535.70	554.20	858.1	1921.6	3866.0	334320	8.00	11.00	60
33	437.80	453.00	709.5	1931.0	4206.0	479260	8.80	11.95	90
34	598.50	619.20	969.9	1902.6	3931.0	421990	9.00	12.40	40
35	273.40	282.90	443.1	1945.2	4601.0	771640	8.30	11.80	90
36	766.60	793.20	1242.4	1924.7	4406.0	349160	7.20	12.07	40
37	624.40	646.00	1011.8	1688.2	4929.0	492770	9.50	13.23	50
38	230.90	238.90	374.2	1884.5	4920.0	617190	9.30	12.57	80
39	384.20	397.50	622.6	1478.5	3707.0	516700	7.60	12.94	40
40	247.50	256.10	401.1	1546.0	2239.0	288580	7.80	11.77	80
41	790.70	818.10	1281.4	1504.3	4179.7	313140	7.80	11.96	50
42	696.50	720.60	1128.6	1496.7	4409.0	391950	7.60	12.58	50
43	587.50	607.80	952.0	1538.2	4252.0	399600	8.20	13.24	90
44	385.80	399.10	625.2	1692.3	4001.0	384800	8.00	16.30	95
45	395.30	408.90	640.6	1851.6	4250.0	256000	8.40	15.60	85
46	387.30	400.70	627.7	1533.5	3431.6	283000	6.30	14.80	40
47	804.20	832.00	1303.2	1703.8	5502.0	506400	8.30	14.90	90
48	446.40	461.80	723.4	1631.6	4681.8	310260	7.70	14.60	50
49	921.00	952.80	1492.4	1501.6	4494.6	454780	8.30	14.90	70
50	435.10	450.20	705.2	1653.6	4801.6	401320	7.90	15.10	90
51	250.70	259.40	406.3	1604.8	4831.8	467000	8.00	16.02	90
52	257.30	266.20	416.9	1591.6	5182.0	352000	8.40	16.20	90

5.4.1 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DA LIGAÇÃO

A influência da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada, no módulo de deformação da ligação varia com o tipo de adesivo.

5.4.1.1 - ADESIVO À BASE DE RESORCINOL

Nos gráficos mostrados nas figuras 115, 116 e 117 - módulo de deformação x umidade, x densidade e x porcentagem de área colada, respectivamente, pode-se observar a existência da influência das características físicas e mecânicas da madeira. Porém não se pode concluir a respeito da influência simultânea das variáveis.

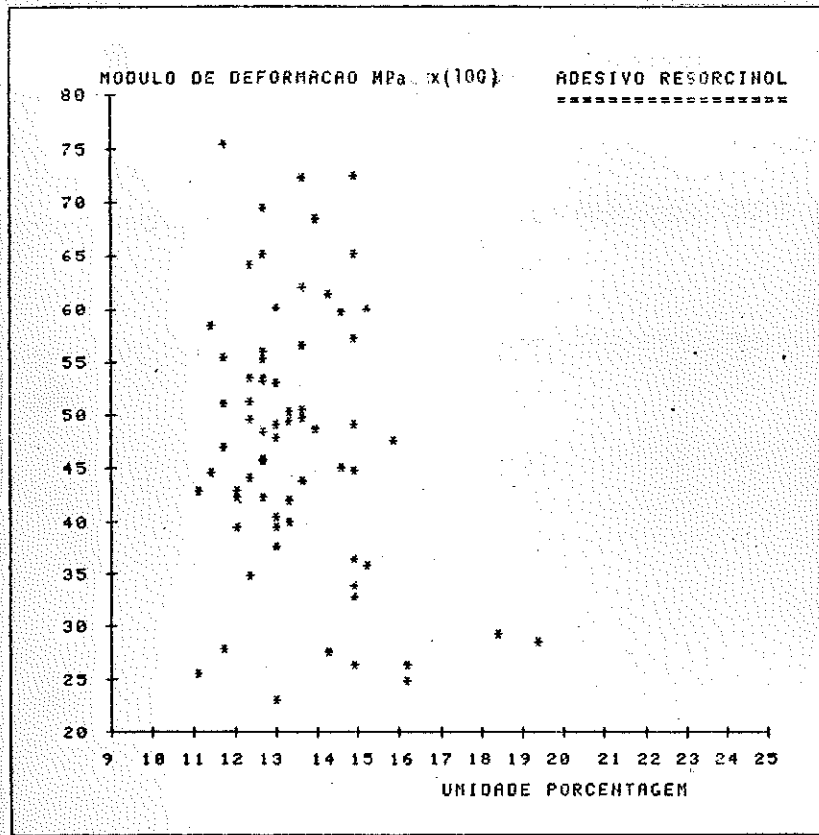


Fig. 115 - Mõdulo de deformação x unidade

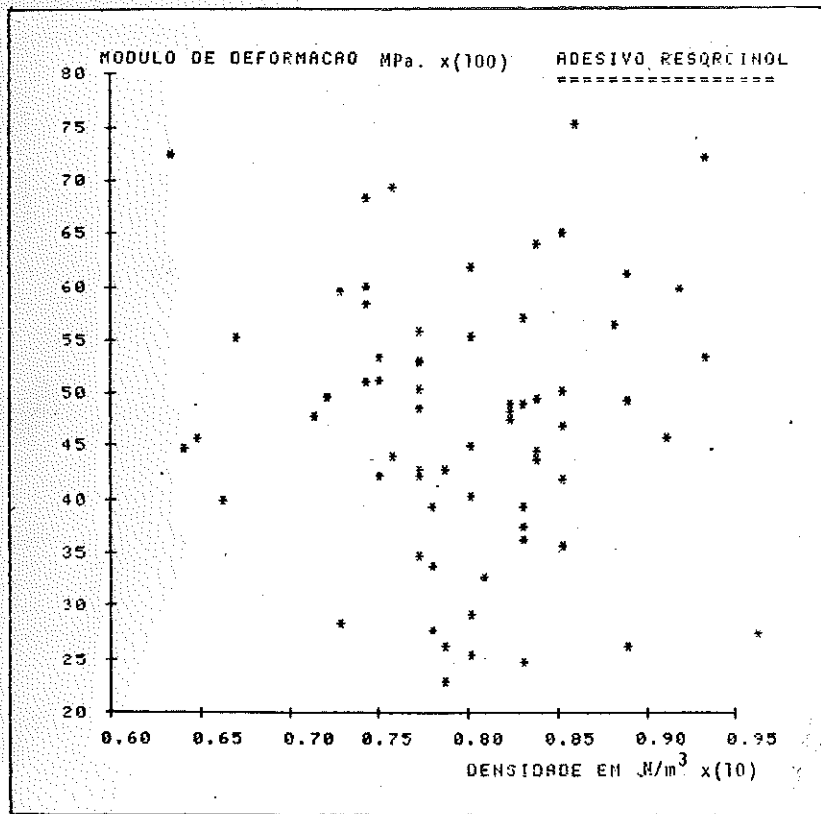


Fig. 116 - Mõdulo de deformação x densidade

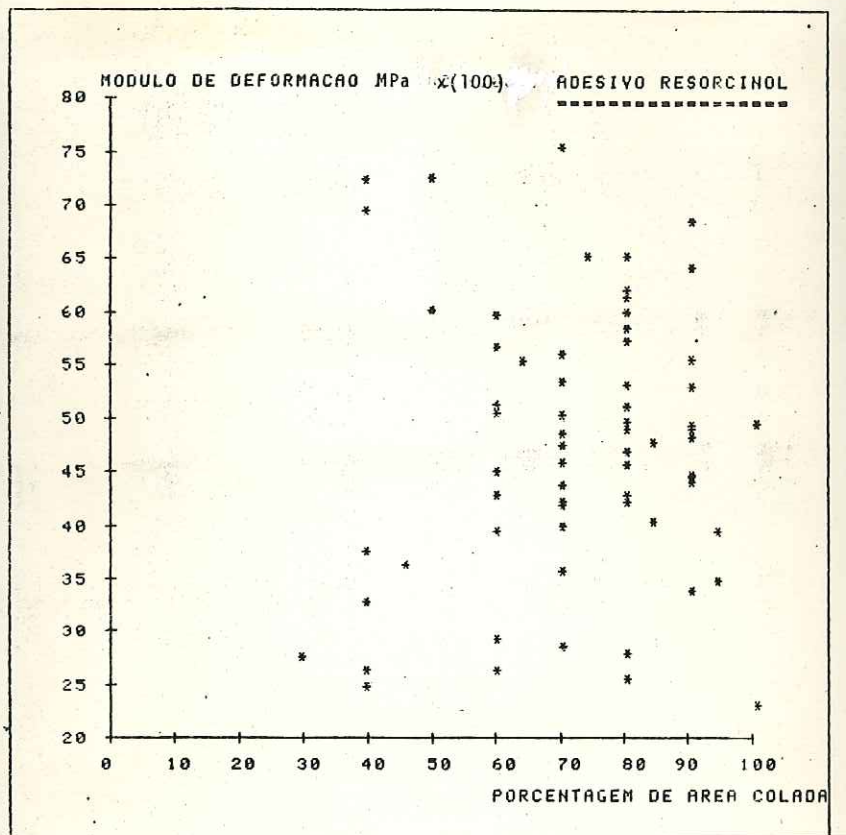


Fig. 17 - M6dulo de deforma76o x porcentagem de 6rea colada

A influ6ncia conjunta destas vari6veis pode ser determinada mediante uma an6lise de regress6o linear m6ltipla.

Utilizando o programa, Minitab, e os princ6pios da an6lise de regress6o descritos no ap6ndice E, desenvolveram-se v6rios modelos matem6ticos. Com uma sele76o cuidadosa destes modelos determinou-se a melhor estimativa da vari6vel dependente em fun76o das vari6veis independentes, isto 6, o melhor modelo matem6tico.

A seguir 6 apresentada a listagem desta regress6o e sua respectiva an6lise de varian7a e an6lise de res6duos, como tamb6m os respectivos testes.

THE REGRESSION EQUATION IS				
Y = -15344. + 3234. X1 - 43.7 X2				
- 131. X3 -0.0334 X4				
	COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
X1	C6	-15344	11806	-1.30
X2	C8	3234	1758	1.84
X3	C10	-43.7	121.1	-0.36
X4	C11	-130.71	64.62	-2.02
		-0.03340	0.05297	-0.63
THE ST. DEV. OF Y ABOUT REGRESSION LINE IS				
S = 911.1				
WITH (66- 5) = 61 DEGREES OF FREEDOM				

R-SQUARED = 23.0 PERCENT
 R-SQUARED = 17.9 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF	F
REGRESSION	4	15121088	3780272	4.55
RESIDUAL	61	50634889	830080	
TOTAL	65	65755901		

FURTHER ANALYSIS OF VARIANCE
 SS EXPLAINED BY EACH VARIABLE WHEN ENTERED IN THE ORDER GIVEN

DUE TO	DF	SS
REGRESSION	4	15121088
C6	1	11510934
C8	1	69936
C10	1	3210125
C11	1	330098

ROW	X1 C6	Y C1	PRED. Y VALUE	ST. DEV. PRED. Y	RESIDUAL
5	13.0	1816	3820	261	-2004
11	11.2	3879	3978	368	-99
13	11.1	2354	3838	374	-1484
37	11.8	6434	4004	237	2430
52	14.4	1949	3489	361	-1540
56	14.8	3063	3207	379	-144
58	16.3	1649	1965	476	-316
60	14.8	4936	3407	397	1529
66	16.1	1567	2149	436	-583

R DENOTES AN OBS. WITH A LARGE ST. RES.
 X DENOTES AN OBS. WHOSE X VALUE GIVES IT LARGE INFLUENCE.

DURBIN-WATSON STATISTIC = 2.21

Modelo matemático utilizado:

$$Y = \alpha + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4$$

ou

$$\frac{MD}{U} = -15344 + 3234 \cdot U - 43.7 \cdot U \cdot D - 131 \cdot U^2 - 0.0334 \cdot P_{ac}^2$$

sendo:

MD = módulo de deformação da ligação

D = densidade

U = umidade

P_{ac} = porcentagem de área colada

A porcentagem de área colada não faz parte do modelo matemático. Embora intuitivamente seja necessária no modelo, a contribuição na soma dos quadrados para a determinação do coeficiente de determinação múltipla (R^2) é insignificante (0.5%). Porém, a porcentagem de área colada ao quadrado é relativamente significativa, contribuindo na soma dos quadrados com uma porcentagem equivalente a 2%.

O coeficiente de explicação da regressão múltipla é $R^2 = 23\%$. Este valor indica a variação da variável dependente explicada pela regressão (modelo matemático). O pequeno valor de R^2 pode ser explicado pela possibilidade da existência de variáveis aleatórias não consideradas no modelo.

Teste F

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$$

nível de significância $\alpha = 0.05$

valor crítico para $F(4,61) = 2.53$

$$F_{cal} = 4.55$$

Como $F_{cal} > F_{crit}$, conclui-se pela hipótese alternativa H_1 , isto é, pela significância da regressão.

Teste t

$$H_0: \beta_i = 0 \quad ; \quad H_1: \beta_i \neq 0$$

nível de significância = 0.05

valor crítico de t: $t_0(61) = 2.000$

os valores de t para cada variável são dadas pela expressão:

$$t_i = \frac{b_i}{s(b_i)}$$

- para β_1

$$t_1 = 1.84$$

$|t_1| < t_0$, portanto, conclui-se pela baixa significância da variável U no modelo matemático.

- para β_2

$$t_2 = -0.36$$

Como $|t_2| < t_0$, conclui-se pela baixa significância da variável U.D no modelo matemático.

- para β_3

$$t_3 = -2.02$$

Como $|t_3| < t_0$, conclui-se pela significância da variável U^2 no modelo matemático.

- para β_4

$$t_4 = -0.63$$

Como $|t_4| < t_0$, conclui-se pela baixa significância da variável P_{ac}^2 no modelo.

Intervalo de confiança para a média real da população $E(y)$

Para a série de valores U , $U.D$, U^2 e P_{ac}^2 , pertencentes ou não à amostra, com $\alpha = 0.05$ e valor crítico de t igual a $t_0(61) = 2.000$, sendo a estimativa do desvio padrão da média da população, $s = 911.1$, tem-se:

$$MD - t_0 \cdot (\text{St.Dev.Pred}) < \bar{MD} < MD + t_0 \cdot (\text{St.Dev.Pred.})$$

Com 95% de confiança a média real de Y , $E(Y)$, para a série de valores (U , $U.D$, U^2 e P_{ac}^2) se encontra no intervalo calculado. Os valores de Y variam em torno de sua verdadeira média.

Intervalo de confiança para um valor individual y

Com nível de significância $\alpha = 0.05$, $t_0 = 2.000$ e o desvio padrão de um valor individual em torno da média, $s = 911.1$ tem-se:

$$MD - t_0 \cdot \sqrt{(\text{St.Dev.Pred.})^2 + s^2} < \bar{MD} < MD + t_0 \cdot \sqrt{(\text{St.Dev.Pred.})^2 + s^2}$$

$$MD - 2.000 \cdot \sqrt{(\text{St.Dev.Pred.})^2 + (911.1)^2} < \bar{MD} < MD + 2.000 \cdot \sqrt{(\text{St.Dev.Pred.})^2 + (911.1)^2}$$

O valor estimado de y para uma observação qualquer de (U , $U.D$, U^2 e P_{ac}^2), está contido no intervalo calculado com 95% de confiança.

Teste de Durbin-Watson

$H_0: \rho = 0$ contra $H_1: \rho > 0$
nível de significância $\alpha = 0.05$
valores do intervalo $d_L = 1.47$ e $d_U = 1.73$
 $d_{cal} = 2.21$

Como $d_{cal} > d_U$, não se rejeita a hipótese H_0 , conclui-se pela validade da aplicação dos mínimos quadrados na regressão linear múltipla.

Análise de resíduos

A distribuição dos resíduos em relação a todas as variáveis, se encontra uniformemente espaçada em relação ao resíduo nulo. Assim, toda a contribuição das variáveis foi considerada no modelo. A seguir são apresentados os gráficos de resíduos para cada variável, figuras 119,120,121,122 e 123.

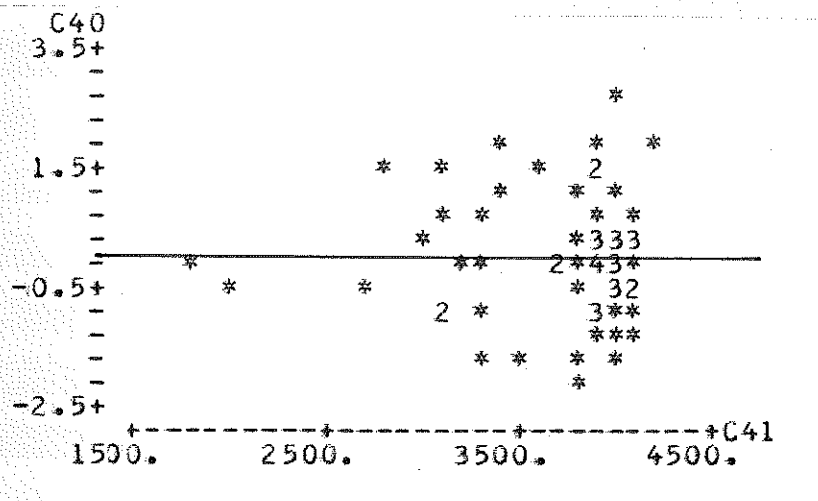


Fig. 119 - Gráfico - resíduo x valor predito

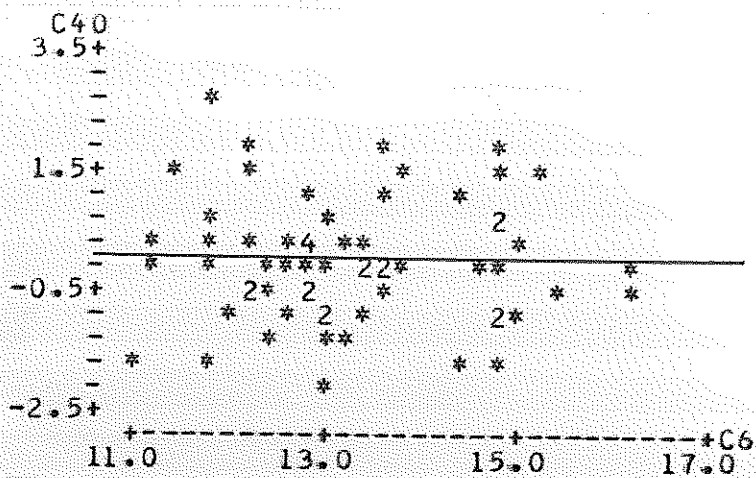


Fig. 120 - Gráfico - resíduo x umidade

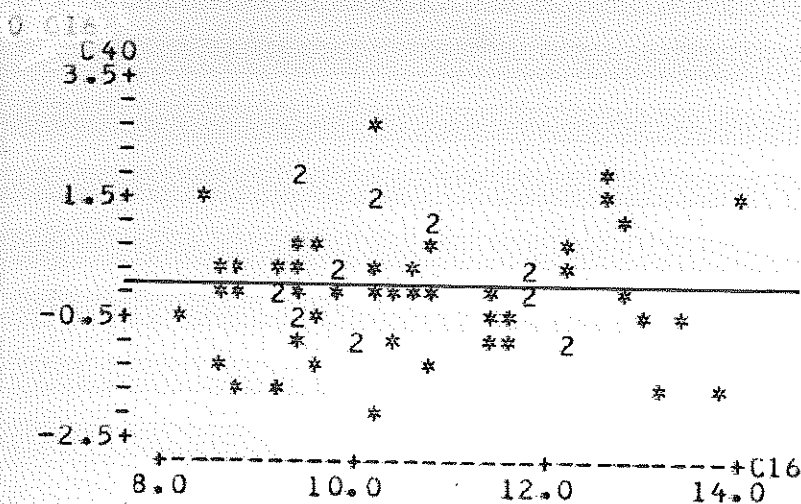


Fig. 121 - Gráfico - resíduo x umidade, densidade

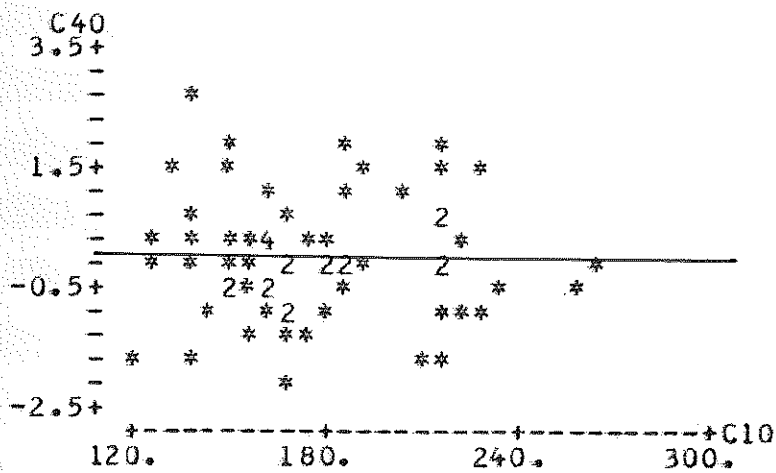


Fig. 122 - Gráfico - resíduo x umidade ao quadrado

5.4.1.1.1 - Influência da umidade e da densidade na porcentagem de área colada

Para este fim foram traçados os gráficos: porcentagem de área colada x umidade e porcentagem de área colada x densidade, figuras 125 e 126, respectivamente. Com estes gráficos não é possível definir a dependência simultânea das variáveis, mas, com uma regressão múltipla será possível definir esta dependência.

Para evitar repetições de vários conceitos na análise de regressão, todas as regressões feitas na continuação serão apresentadas em forma de tabelas. As considerações feitas anteriormente e as enunciadas no apêndice E são de grande importância.

Na tabela 10 está apresentada a regressão múltipla linear da porcentagem de área colada em função da umidade e da densidade.

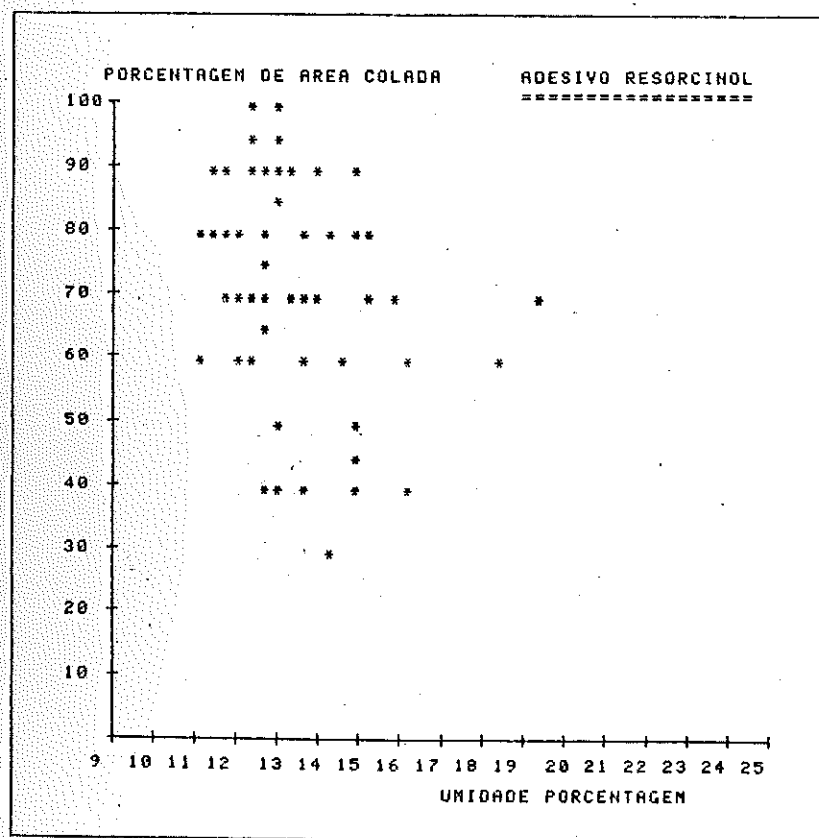


Fig. 125 - Porcentagem de área colada x umidade

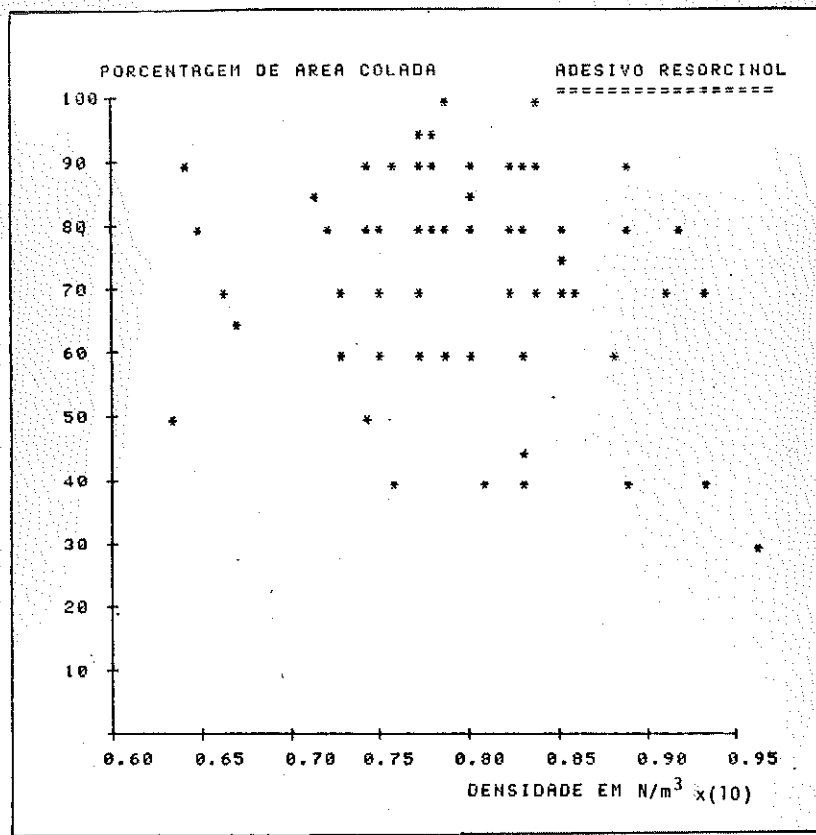


Fig. 126 - Porcentagem de área colada x densidade

TABELA 10 - REGRESSÃO: PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA x UMIDADE x DENSIDADE		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	P_{ac}/U = variável depend. D = variável independ. U = variável independ. $U.D$ = variável independ.	percent. Área col./umidade densidade umidade umidade x densidade
MODELO MATEMÁTICO	$P_{ac}/U = -6.42 + 26.5.D + 0.99.U - 2.1.U.D$	
COEFICIENTE	$R^2 = 38.3 \%$	pouco significante
TESTE F	$F_{cal} = 12,8 > F_{cr} = 2.76$	a regressão é significante

TABELA 10 Cont. - REGRESSÃO: PORCENTAGEM			
DISCRIMINAÇÃO			OBSERVAÇÕES
TESTE t	β_1$	|t_1| = 0.91 < t_0 = 2.00$	não significativa
	β_2$	|t_2| = 0.58 < t_0 = 2.00$	não significativa
	β_3$	|t_3| = 0.91 < t_0 = 2.00$	não significativa
TESTE DE DURBIN WATSON		$d = 2.26 > d_U = 1.70$	conclui-se pela validade da aplicação dos m̄n. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS		D = 9.76 % U = 87.71 % U.D = 2.53 %	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS		<p>a) - O modelo matemático representa razoavelmente os resultados experimentais.</p> <p>b) - Os resíduos encontram-se uniformemente distribuídos em torno do resíduo nulo, isto é, toda a contribuição das variáveis foi considerada no modelo.</p> <p>c) - A distribuição dos resíduos é normal.</p>	

5.4.1.1.2 - Correção do módulo de deformação

Para melhor interpretação deste item é conveniente a leitura do apêndice F.

A correção do módulo de deformação será feita a partir do modelo matemático do módulo de deformação, do modelo matemático da porcentagem de área colada e das equações F.2 e F.3 do apêndice F, transcritos a seguir:

$$Y_{12} = Y_n - f(U_n, D_n, P_{acn}) + f(U_{12}, D_{12}, P_{ac12}) \dots \quad (F.3)$$

$$P_{ac12} = P_{acn} - z(U_n, D_n) + z(U_{12}, D_{12}) \dots \quad (F.2)$$

$$MD/U = -15344 + 3234.U - 43.7.U.D - 131.U^2 - 0.334.P_{ac}^2$$

$$P_{ac}/U = -6.42 + 26.5.D + 0.99.U - 2.1.U.D$$

transformando as duas últimas equações, obtêm-se:

$$MD = -15344.U + 3234.U^2 - 43.7.U^2.D + 131.U^3 - 0.0334.P_{ac}^2.U$$

$$P_{ac} = -6.42.U + 26.5.U.D + 0.99.U^2 - 2.1.U^2.D$$

ou

$$MD = f(U_n, D_n, P_{acn})$$

$$P_{ac} = z(U_n, D_n)$$

finalmente, as equações de correção para umidade padrão de 12% serão:

$$MD_{12i} = MD_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}, P_{acni}) + f(U_{12i}, D_{12i}, P_{ac12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$P_{ac12i} = P_{acni} - z(U_{ni}, D_{ni}) + z(U_{12i}, D_{12i})$$

$$U_{12i} = 12 \%$$

sendo:

$$i = 1 \text{ até } 66 \quad \text{e} \quad v = 0.563 \text{ (64) e (65)}$$

Para a resolução destas equações foi elaborado um programa para o computador IBM-370. Os valores corrigidos se encontram no quadro 29, anexo.

5.4.1.1.3 - Módulo característico de deformação e correlações

Na figura 127 é apresentado o histograma do módulo de deformação da ligação corrigido e os parâmetros estatísticos. Neste diagrama pode-se notar claramente a existência de uma distribuição normal.

[64] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Métodos de ensaios adotados no IPT para o estudo de madeiras nacionais - São Paulo, IPT, 1956. (boletim 31).

[65] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaios físicos e mecânicos de madeiras, MB-26 - Rio de Janeiro, ABNT, 1940.

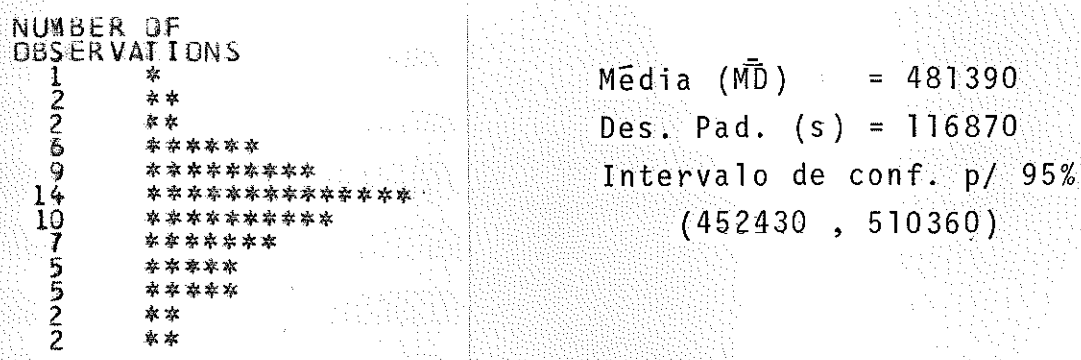


Fig. 127 - Histograma e parâmetros estatísticos

Segundo Fusco (66), a resistência característica dos materiais é definida como sendo o quantil de 5% inferior das respectivas distribuições de probabilidade, admitindo que as populações sejam homogêneas e normalmente distribuídas.

Desta maneira, o módulo característico de deformação admitindo; $\mu \equiv \bar{M}$ e $\sigma \equiv s$, será:

$$MD_k = 289140 \text{ N/cm}^2$$

Para determinar as correlações do módulo de deformação da ligação com as características mecânicas da madeira e da ligação adesiva, fez-se análise de regressão. Com seleção cuidadosa foram determinados os modelos matemáticos apresentados na tabela II.

TABELA II - CORRELAÇÕES DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DA LIGAÇÃO COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA E DA LIGAÇÃO			
variável depen. variável independ.	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DA LIGAÇÃO (MD)		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_w		0.1%	não foi possível correlação
σ_{wc}	$\text{Log}(\text{MD}) = 5.41 - 0.0026 \cdot \sigma_{wc} + 1.35 \times 10^{-7} \cdot \sigma_{wc}^3$	25.0%	baixa signific.
τ_{ac}	$\text{Log}(\text{MD}) = 4.51 + 0.0022 \cdot \tau_{ac}$	16.0%	baixa signific.

(66) FUSCO, P.B. - Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas - São Paulo, EDUSP, McGraw-Hill, 1976.

5.4.1.2 - ADESIVO À BASE DE RESINA EPOXI

Nas figuras 128, 129 e 130, são apresentados os gráficos do módulo de deformação da ligação em função da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada, respectivamente. Na tabela 12, encontra-se um resumo da melhor regressão múltipla encontrada.

TABELA 12 - REGRESSÃO: MÓDULO DE DEFORMAÇÃO x UMIDADE x DENSIDADE x PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	MD/U = variável dependente U = variável independen. D = variável independen. P _{ac} = variável independen. P _{ac} ² = variável independen.	Módulo de deform./umidade Umidade Densidade Porcentagem de área colada Porc. área col. ao quadrado
MODELO MATEMÁTICO	$MD/U = 7697 - 290.U + 3145.D - 87.P_{ac} + 0.577.P_{ac}^2$	
COEFICIENTE	$R^2 = 29.7 \%$	pouco significativa
TESTE F	$F_{ca} = 4.96 > F_{cr} = 2.53$	a regressão é significativa
TESTE t	β_1$ |t_1| = 3.32 < t_0 = 2.00$ β_2$ |t_2| = 1.87 < t_0 = 2.00$ β_3$ |t_3| = 1.48 < t_0 = 2.00$ β_4$ |t_4| = 1.33 < t_0 = 2.00$	significativa pouco significativa pouco significativa não significativa
TESTE DE DURBIM WATSON	$d = 2.30 > d_U = 1.72$	conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	U = 58.35 % D = 21.12 % P _{ac} = 11.64 % P _{ac} ² = 8.89 %	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa razoavelmente os resultados experimentais.	

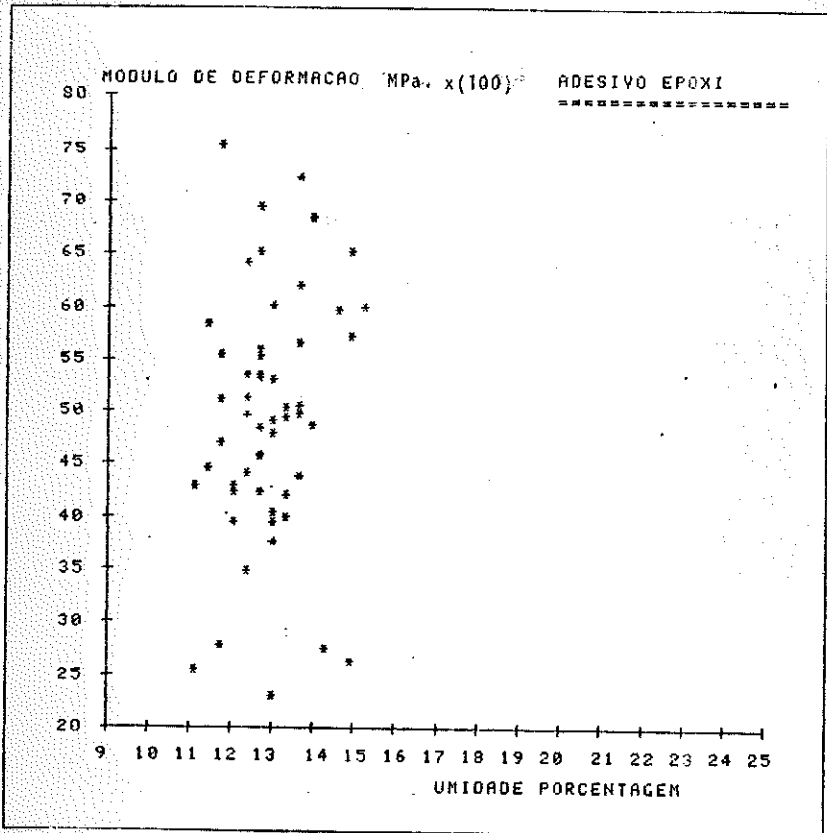


Fig. 128 - M6dulo de deforma76o x umidade

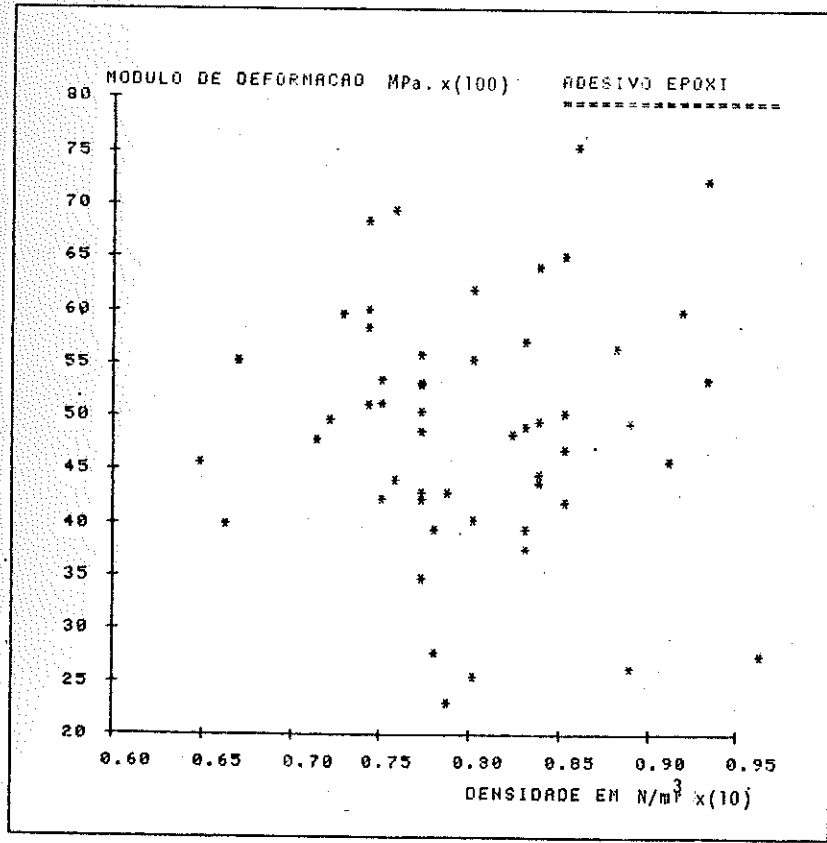


Fig. 129 - M6dulo de deforma76o x densidade

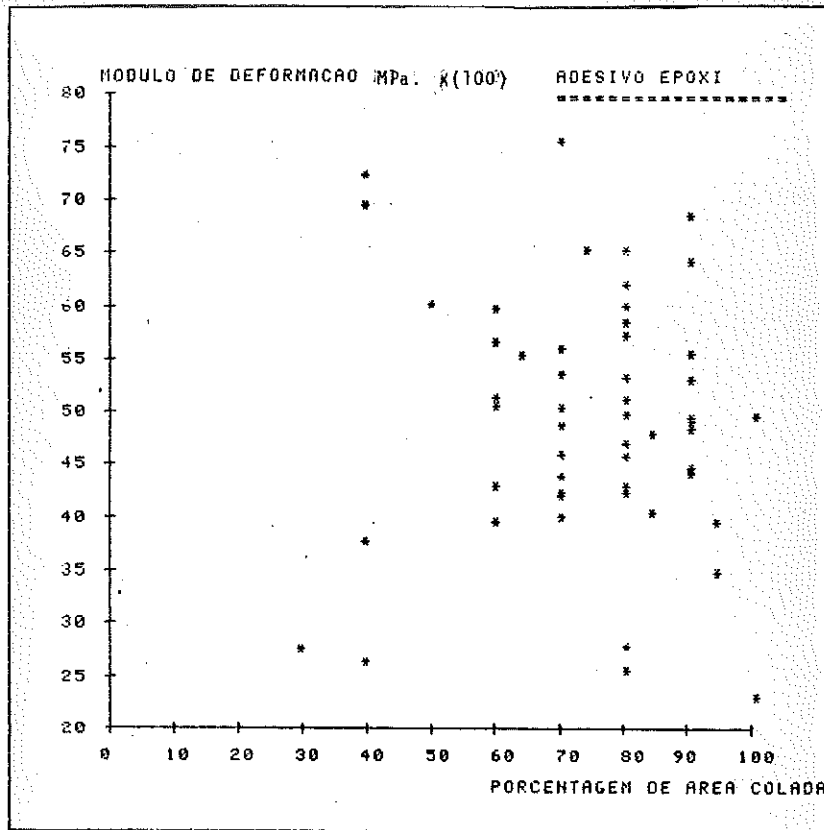


Fig. 130 - Módulo de deformação x porcentagem de área colada

Análise de resíduos

Os resíduos encontram-se uniformemente espaçados em relação ao resíduo nulo. Isto significa ter sido considerada toda a contribuição das variáveis no modelo matemático, figuras 131, 132, 133, 134 e 135.

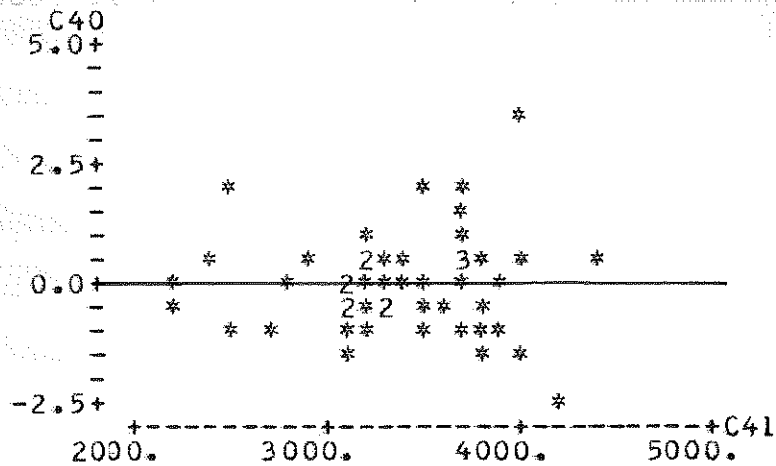


Fig. 131 - Gráfico - resíduo x valor predito

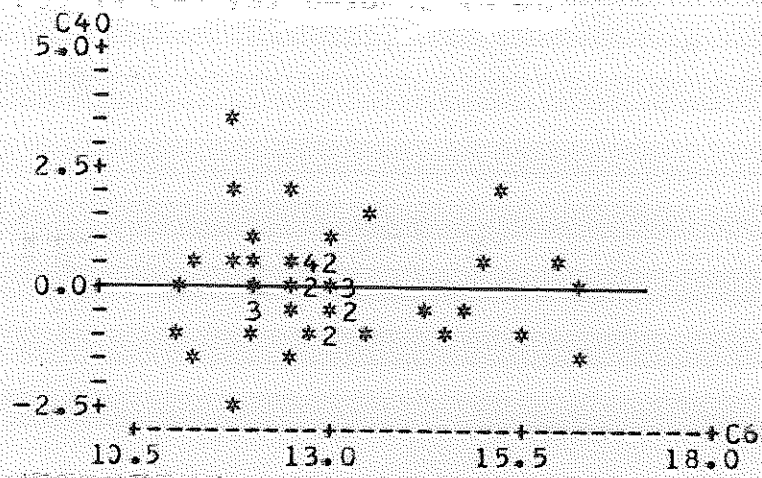


Fig. 132 - Gráfico - resíduo x umidade

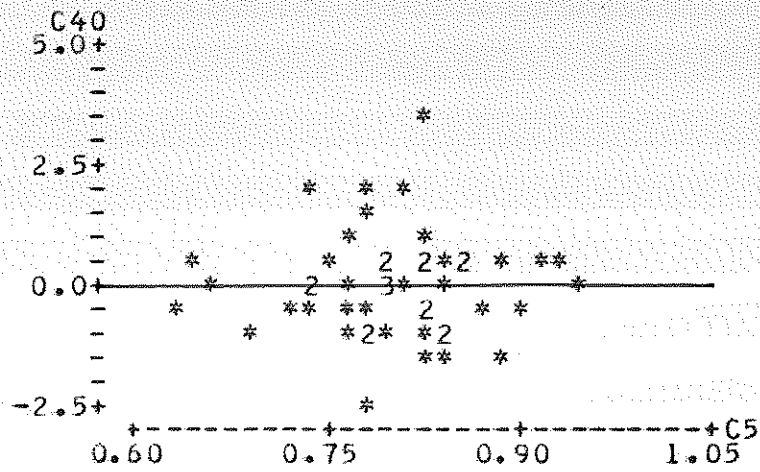


Fig. 133 - Gráfico - resíduo x densidade

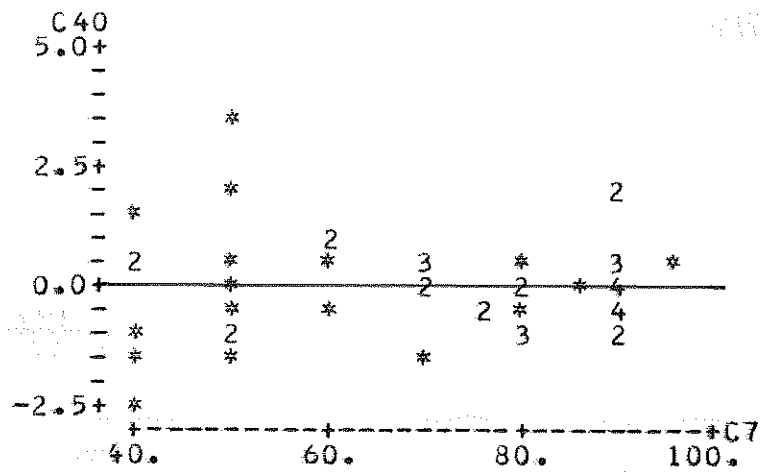


Fig. 134 - Gráfico - resíduo x porcentagem de área colada

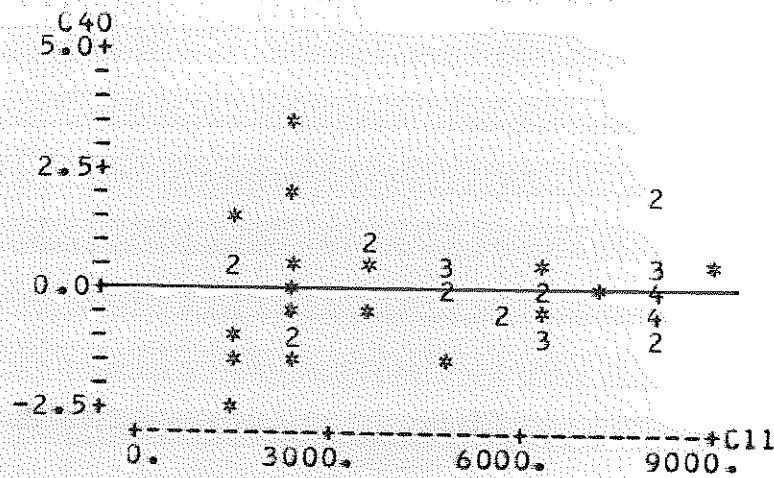


Fig. 135 - Gráfico - resíduo x porcent. de área col. ao quadrado

Verificação da distribuição normal dos resíduos

O gráfico probabilístico aproxima-se de uma reta com inclinação de 45° . Desta maneira, a distribuição dos resíduos pode ser considerada normal, figura 136.

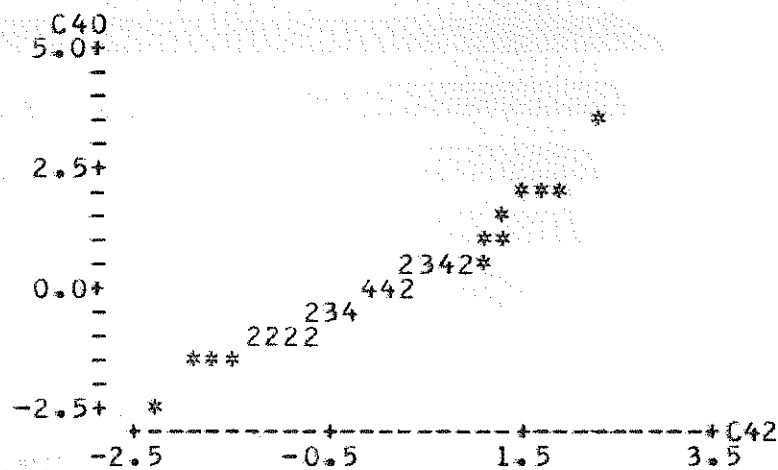


Fig. 136 - Gráfico probabilístico

5.4.1.2.1- Influência da umidade e da densidade na porcentagem de área colada

Nas figuras 137 e 138, são apresentados os gráficos da porcentagem de área colada x umidade e da porcentagem de área cola

da x densidade, respectivamente. Nestes gráficos pode-se notar a influência da umidade e da densidade na porcentagem de área colada, porém nada se pode concluir sobre a influência simultânea das duas variáveis. Para a determinação desta influência, várias regressões lineares múltiplas foram avaliadas. Na tabela 13 é apresentada a melhor destas regressões.

TABELA 13 - REGRESSÃO: PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA x UMIDADE x DENSIDADE		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	P_{ac}/D = variável depend. D = variável independ. U = variável independ. U^2 = variável independ. $U.D$ = variável independ.	Porc. área col./densidade densidade umidade umidade ao quadrado umidade x densidade
MODELO MATEMÁTICO	$P_{ac}/D = -583 + 359.D + 85.U - 1.83.U^2 - 39.U.D$	
COEFICIENTE	$R^2 = 21.7 \%$	pouco significante
TESTE F	$F_{cal} = 3.25 > F_{cr} = 2.53$	a regressão é significante
TESTE t	β_1$ |t_1| = 0.59 < t_0 = 2.00$ β_2$ |t_2| = 1.70 < t_0 = 2.00$ β_3$ |t_3| = 1.11 < t_0 = 2.00$ β_4$ |t_4| = 0.84 < t_0 = 2.00$	não significante pouco significante pouco significante não significante
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 1.93 > d_U = 1.72$	conclui-se pela validade da aplicação dos min. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$D = 56.80 \%$ $U = 22.95 \%$ $U^2 = 14.85 \%$ $U.D = 5.40 \%$	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa razoavelmente os resultados experimentais. b) - Os resíduos encontram-se uniformemente distribuídos em torno do resíduo nulo, isto é, toda a contribuição das variáveis foi considerada no modelo. Distr. normal.	

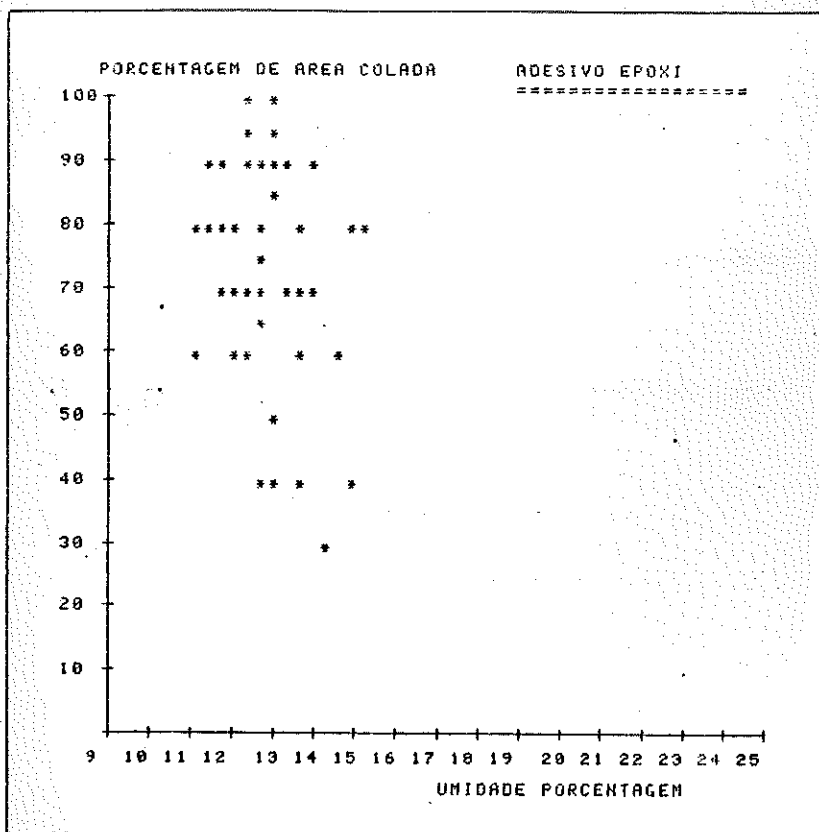


Fig. 137 - Porcentagem de área colada x unidade

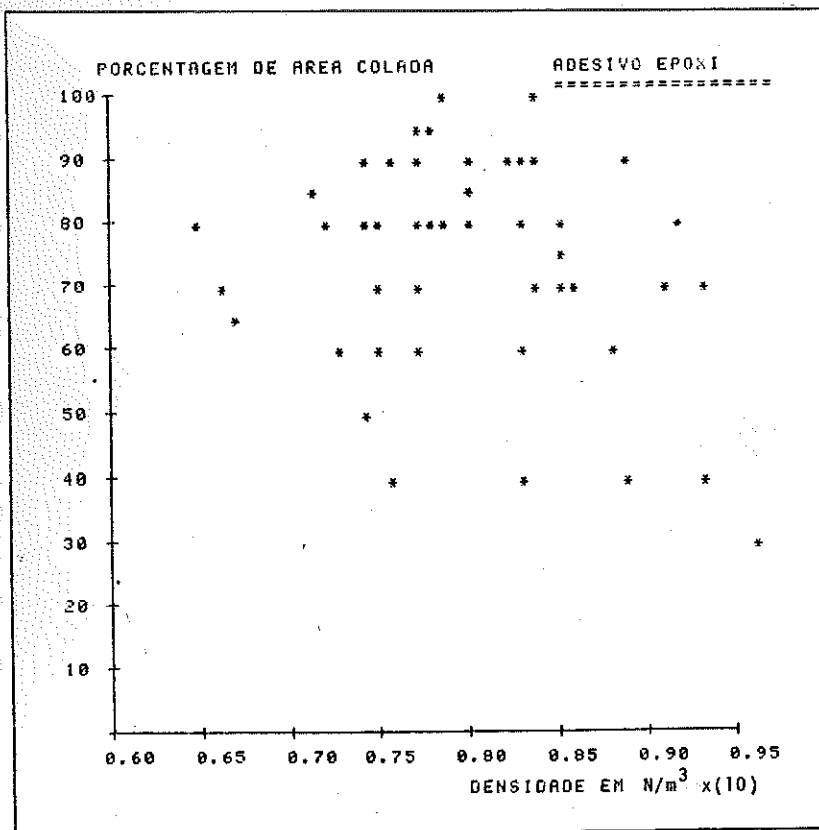


Fig. 138 - Porcentagem de área colada x densidade

5.4.1.2.2 - Correção do módulo de deformação da ligação

A correção pode ser feita a partir do modelo matemático adotado para o módulo de deformação, do modelo matemático da porcentagem de área colada e das equações F.2 e F.3 do apêndice F.

$$MD/U = 7697 - 290.U + 3145.D - 87.P_{ac} + 0.577.P_{ac}^2$$

$$P_{ac}/D = -583 + 359.D + 85.U - 1.83.U^2 - 39.U.D$$

transformando obtem-se:

$$MD = 7697.U - 290.U^2 + 3145.D.U - 87.P_{ac}.U + 0.577.P_{ac}.U$$

$$P_{ac} = -583.D + 359.D^2 + 85.U.D - 1.83.U^2.D - 39.U.D^2$$

ou

$$MD = f(U_n, D_n, P_{ac})$$

$$P_{ac} = z(U_n, D_n)$$

finalmente, as equações de correção para a umidade padrão de 12% serão:

$$MD_{12i} = MD_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}, P_{acni}) + f(U_{12i}, D_{12i}, P_{ac12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$P_{ac12i} = P_{acni} - z(U_{ni}, D_{ni}) + z(U_{12i}, D_{12i})$$

$$U_{12i} = 12 \%$$

sendo: $i = 1$ até 54 e $v = 0.563$

Utilizando um programa para o computador IBM-370 obteve-se estas correções. Os valores corrigidos encontram-se no quadro 29 do anexo.

5.4.1.2.3 - Módulo característico de deformação e correlações

O histograma do módulo de deformação com os valores corrigidos e os parâmetros estatísticos são mostrados na figura 139.

Neste diagrama pode-se observar a existência de uma distribuição normal.

```

1      2. 8
11     3* 0011113344
19     3. 56677799
(12)  4* 000001122233
19     4. 55778
14     5* 000122
8      5. 56
6      6* 001
3      6. 59
    
```

Média (MD) = 440220
 Des.Pad. (s) = 108010
 Intervalo de conf. P/ 95%
 (409510 , 470920)

Fig. 139 - Histograma e parâmetros estatísticos

Desta maneira, o módulo característico de deformação, admitindo: $\mu \cong MD$ e $\sigma \cong s$, será:

$$MD_k = 262540 \text{ N/cm}^2$$

A correlação do módulo de deformação com as características da madeira e da ligação adesiva foram determinadas a partir de uma seleção cuidadosa de várias análises de regressão. Na tabela 14 são apresentadas estas correlações.

TABELA 14 - CORRELAÇÕES DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DA LIGAÇÃO COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA E DA LIGAÇÃO

variável depen. variável independ.	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DA LIGAÇÃO (MD)		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_w	$\text{Log}(\text{MD}) = 4.31 + 0.0018 \cdot \tau_w$	11.5%	baixa signific.
σ_{wc}	$\text{Log}(\text{MD}) = 4.51 - 0.0003 \cdot \sigma_{wc} + 1.2 \times 10^{-7} \sigma_{wc}^3$	26.0%	baixa signific.
τ_{ac}	$\text{Log}(\text{MD}) = 4.82 - 0.008 \cdot \tau_{ac} + 0.0001 \tau_{ac}^2$	9.0%	baixa signific.

5.4.2 - TENSÃO DE CISALHAMENTO DA LIGAÇÃO ADESIVA

5.4.2.1 - ADESIVO À BASE DE RESINA RESORCINOL

Nos gráficos das figuras 140, 141 e 142, tensão de cisalhamento x umidade, cisalhamento x densidade e cisalhamento x porcentagem de área colada, respectivamente, pode-se observar claramente a dependência da tensão de cisalhamento em função da umidade, densidade e porcentagem de área colada. Porém não se pode concluir a respeito da influência simultânea destas variáveis.

Através da aplicação de análise de regressão múltipla, após seleção cuidadosa dos modelos matemáticos, determinou-se a melhor estimativa da variável dependente.

Na tabela 15, encontra-se a análise deste modelo matemático.

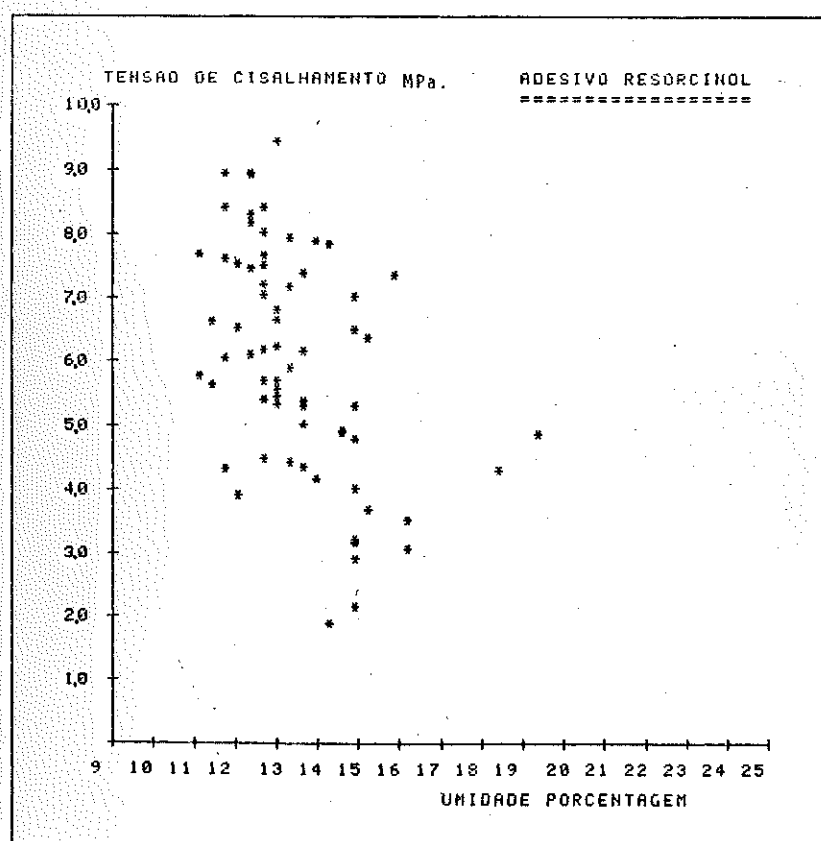


Fig. 140 - Tensão de cisalhamento x umidade

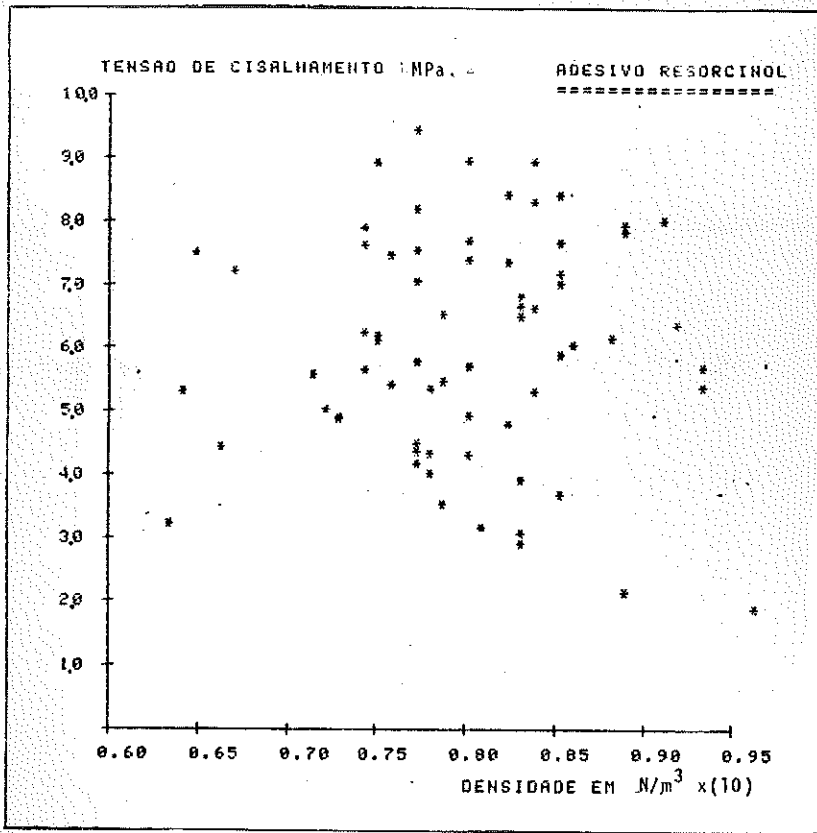


Fig. 141 - Tensão de cisalhamento x densidade

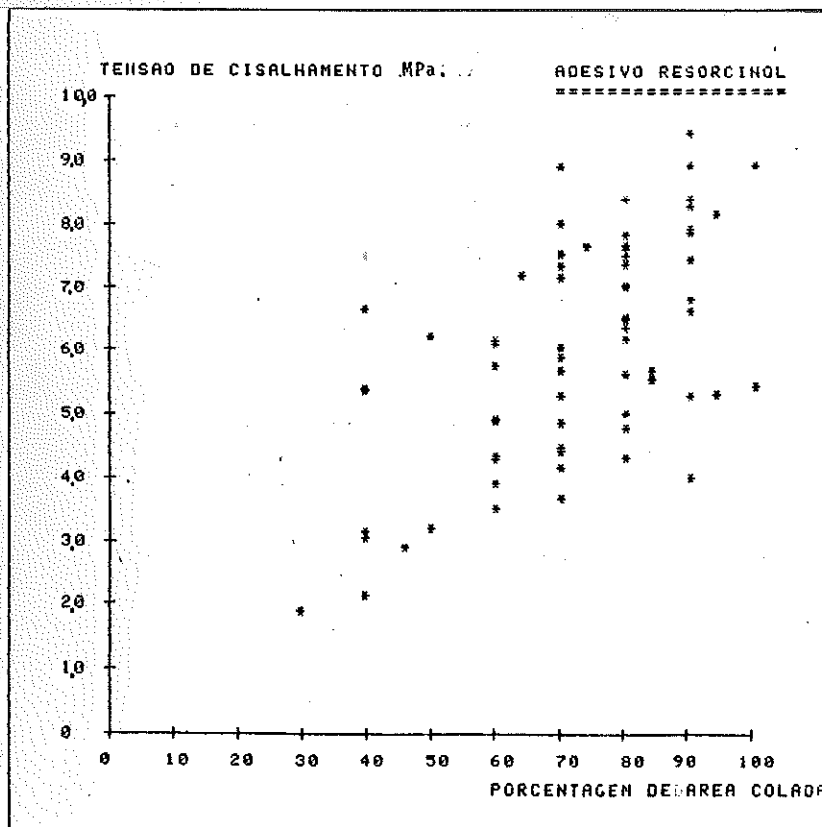


Fig. 142 - Tensão de cisalhamento x porcentagem de área colada

TABELA 15 - REGRESSÃO: TENSÃO DE CISALHAMENTO x UMIDADE x DENSIDADE x PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\tau_{ac})/D = \text{var. depend.}$ $U = \text{var. indep.}$ $1/D = \text{var. indep.}$ $P_{ac} = \text{var. indep.}$	Log.da ten. cis./densidade umidade inverso da densidade porc. de área colada
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\tau_{ac})/D = 0.496 - 0.053.U + 1.62/D + 0.0054.P_{ac}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 79.0 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{cal} = 77.69 > F_{cr} = 2.76$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	$\beta_1 \quad |t_1| = 3.94 > t_0 = 2.00$ $\beta_2 \quad |t_2| = 11.48 > t_0 = 2.00$ $\beta_3 \quad |t_3| = 5.41 > t_0 = 2.00$	altamente significativa altamente significativa altamente significativa
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 2.09 \geq d_U = 1.70$	conclui-se pela validade da aplicação dos min. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$U = 23.98 \%$ $1/D = 63.49 \%$ $P_{ac} = 12.53 \%$	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais.	

análise dos resíduos

Toda a contribuição das variáveis foi considerada no modelo matemático, pois os resíduos encontram-se uniformemente espaçados em relação ao resíduo nulo. Nas figuras 143, 144, 145 e 146, são apresentados os gráficos dos resíduos em função das variáveis independentes.

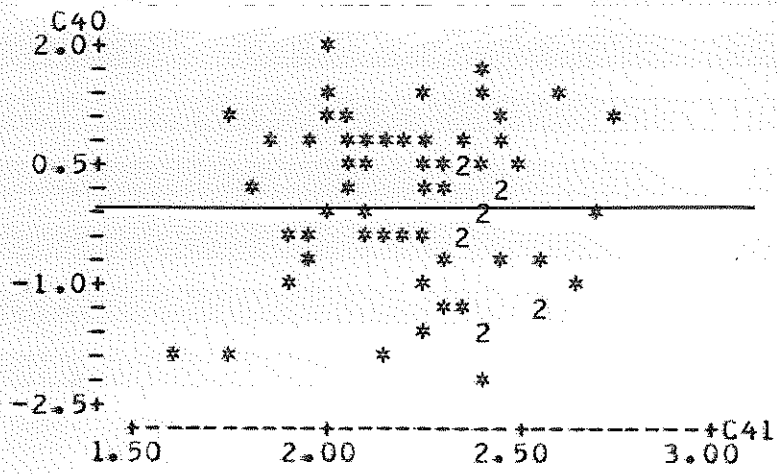


Fig. 143 - Gráfico - resíduo x valor predito

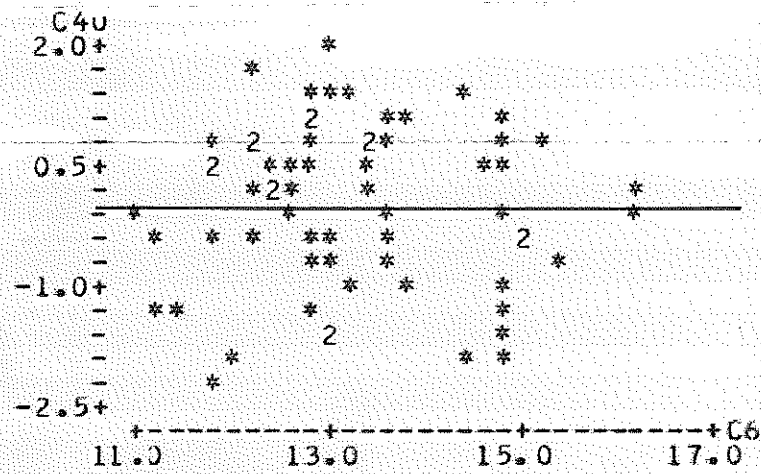


Fig. 144 - Gráfico - resíduo x umidade

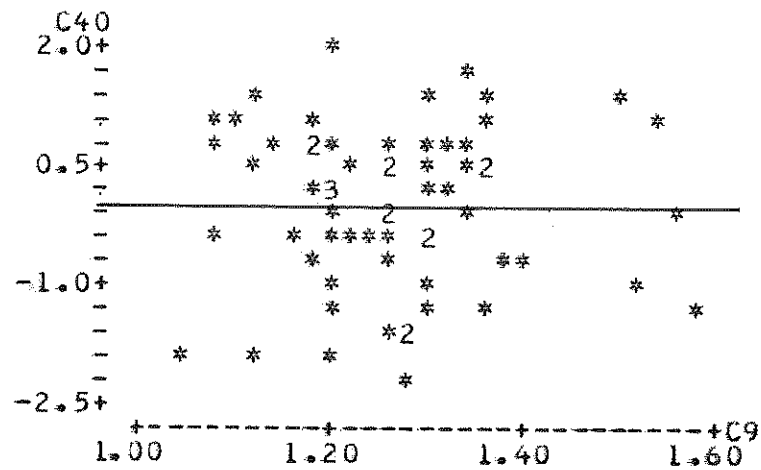


Fig. 145 - Gráfico - resíduo x inverso da umidade

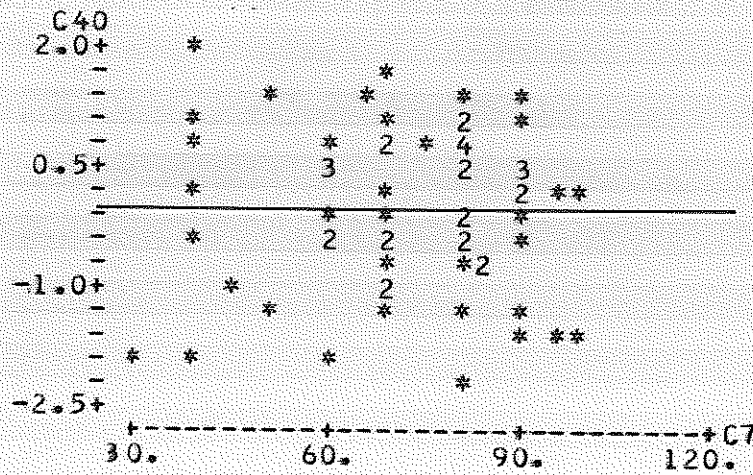


Fig. 146 - Gráfico - resíduo x porcentagem de área colada

Verificação da distribuição normal dos resíduos

A distribuição de resíduos é normal, pois o gráfico probabilístico se aproxima de uma reta com inclinação de 45°, figura 147.

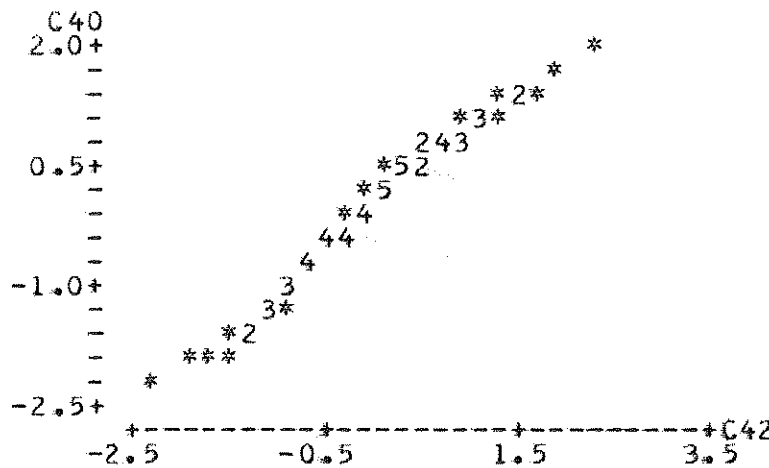


Fig. 147 - Gráfico probabilístico

5.4.2.1.1 - Correção da tensão de cisalhamento

Os modelos matemáticos da tensão de cisalhamento e da porcentagem de área colada são:

$$\text{Log}(\tau_{ac})/D = 0.496 - 0.053.U + 1.62.D^{-1} + 0.0054.P_{ac}$$

$$P_{ac}/U = - 6.42 + 26.5.D + 0.99.U - 2.1.U.D$$

transformando, obtêm-se:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\tau_{ac}) &= 1.62 + 0.496.D - 0.053.U.D + 0.0054.P_{ac}.D \\ P_{ac} &= - 6.42.U + 26.5.D.U + 0.99.U^2 - 2.1.U^2.D \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{Log}(\tau_{ac}) &= f(U_n, D_n, P_{acn}) \\ P_{ac} &= f(U_n, D_n) \end{aligned}$$

finalmente, as equações de correção serão:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\tau_{ac})_{12i} &= \text{Log}(\tau_{ac})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}, P_{acni}) + f(U_{12i}, D_{12i}, P_{ac12i}) \\ D_{12i} &= D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - \nu) \cdot (12 - U_{ni}) \\ P_{ac12i} &= P_{acni} - z(U_{ni}, D_{ni}) + z(U_{12i}, D_{12i}) \\ U_{12i} &= 12 \% \end{aligned}$$

sendo: $i = 1$ até 66 e $\nu = 0.563$

Os resultados da aplicação destas equações encontram-se no quadro 29, anexo.

5.4.2.1.2 - Resistência característica

Na figura 148, estão apresentados o histograma da tensão de cisalhamento corrigido e os parâmetros estatísticos. Este diagrama tem distribuição normal.

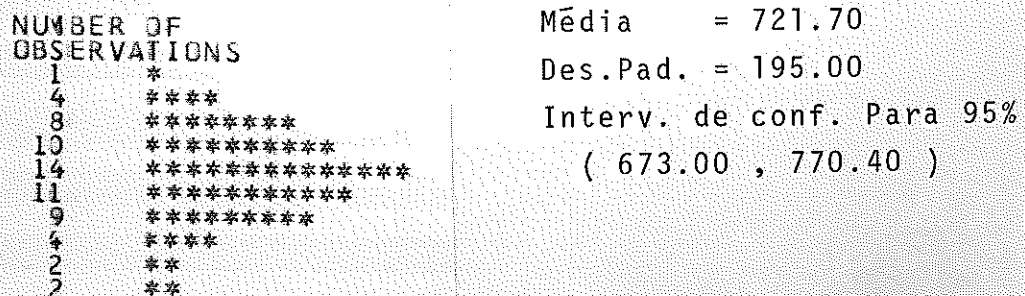


Fig. 148 - Histograma e parâmetros estatísticos

Desta maneira, admitindo $\mu \equiv \tau_{ac}$ e $\sigma \equiv s$, têm-se:

$$f_{sck} = 400.90 \text{ N/cm}^2$$

sendo:

f_{sck} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão.

Na tabela 16, são apresentadas as correlações da tensão de cisalhamento da ligação com as características mecânicas da madeira. Estas correlações foram determinadas a partir de uma seleção cuidadosa dos modelos matemáticos avaliados.

TABELA 16 - CORRELAÇÕES DA TENSÃO DE CISALHAMENTO COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA			
variável dep. variável indepen.	TENSÃO DE CISALHAMENTO DO ADESIVO (τ_{ac})		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_w σ_{wc}	$\text{Log}(\tau_{ac}) = 1.07 + 0.0068 \cdot \tau_w - 1.4 \times 10^{-5} \tau_w^2$ $\text{Log}(\tau_{ac}) = 0.507 + 0.0048 \cdot \sigma_{wc} - 4.2 \times 10^{-6} \sigma_{wc}^2$	10.5% 10.0%	baixa signific. baixa signific.

5.4.2.2 - ADESIVO À BASE DE RESINA EPOXI

A dependência da tensão de cisalhamento da ligação adesiva em função da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada é mostrada nos gráficos das figuras 149, 150 e 151. A dependência simultânea foi determinada a partir de uma série de regressões lineares múltiplas. Na tabela 17 é mostrado o modelo matemático selecionado com sua respectiva análise de variância.

Análise de resíduos

Os resíduos se encontram uniformemente distribuídos em torno do resíduo nulo. Isto significa que toda a contribuição das variáveis foi considerada no modelo, figuras 152, 153 e 154.

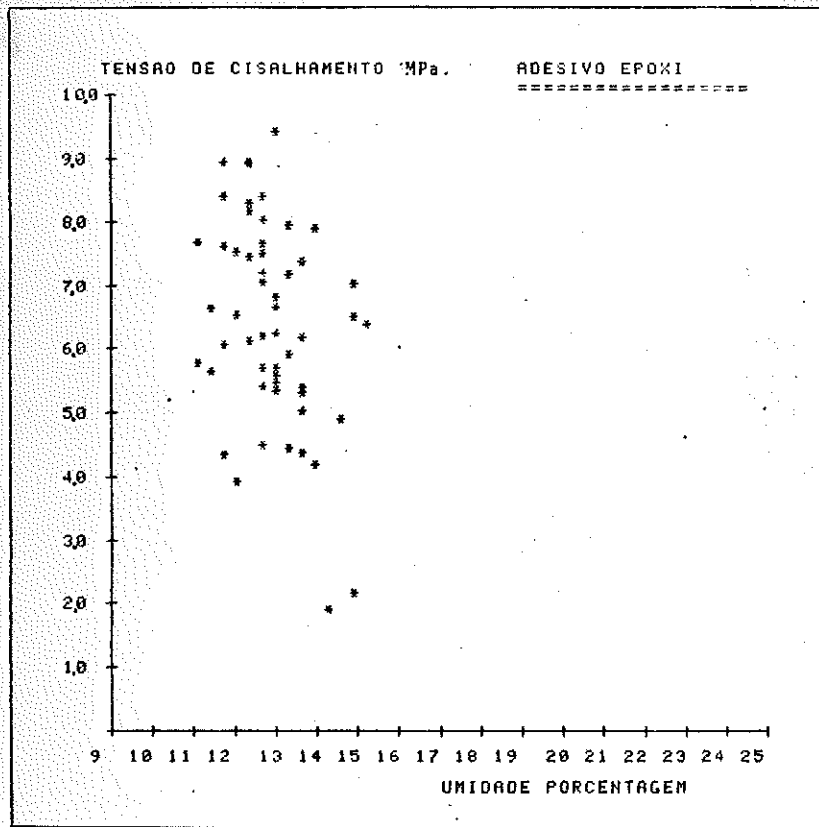


Fig. 149 - Tensão de cisalhamento x umidade

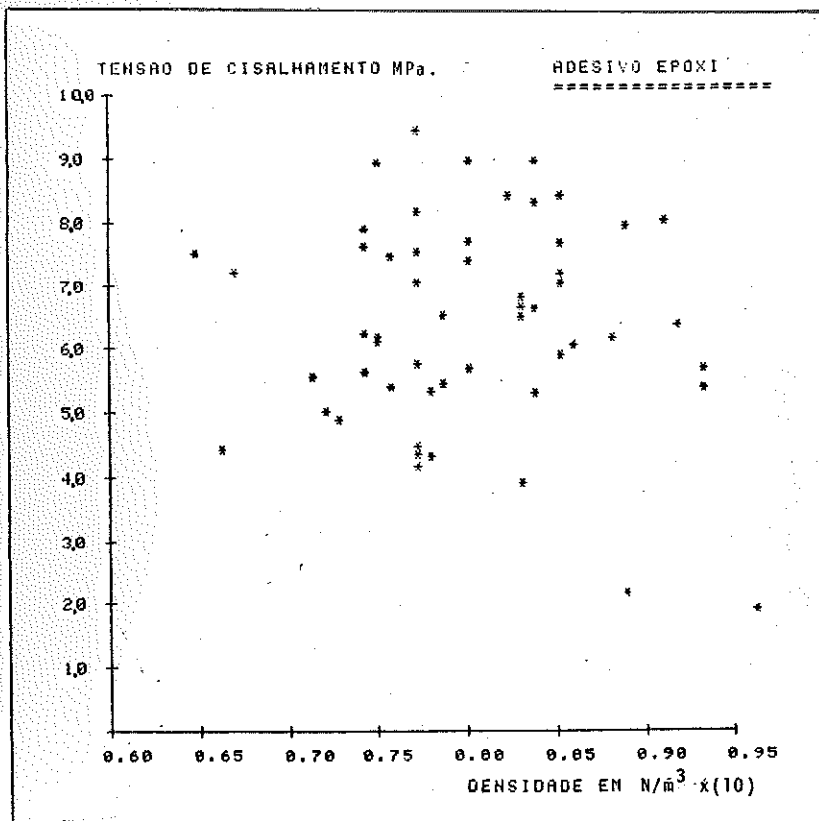


Fig. 150 - Tensão de cisalhamento x densidade

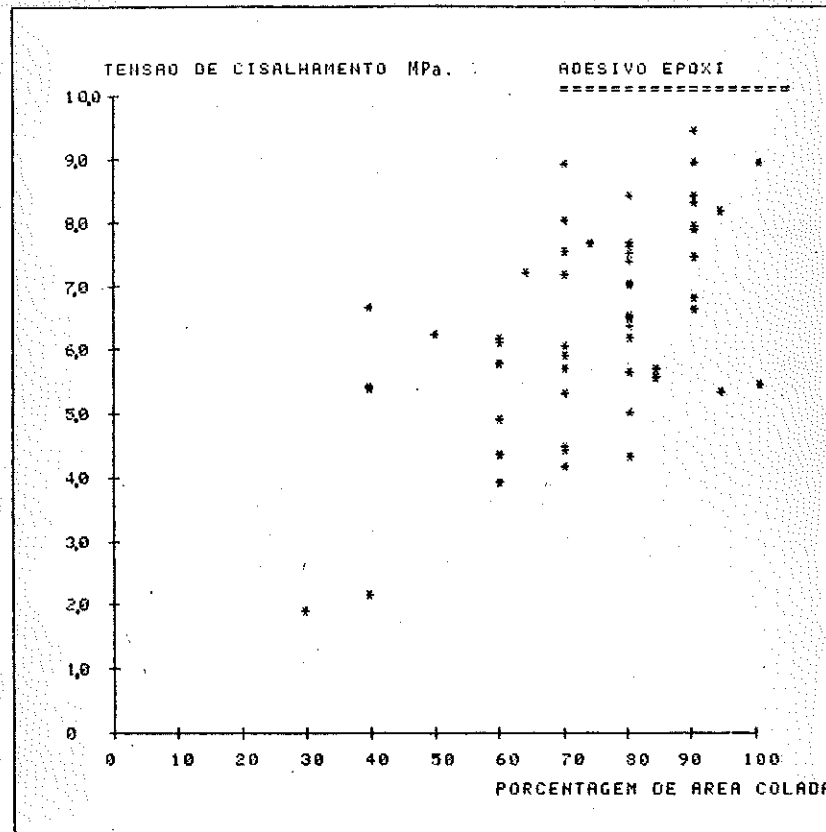


Fig. 151 - Tensão de cisalhamento x porcentagem de área colada

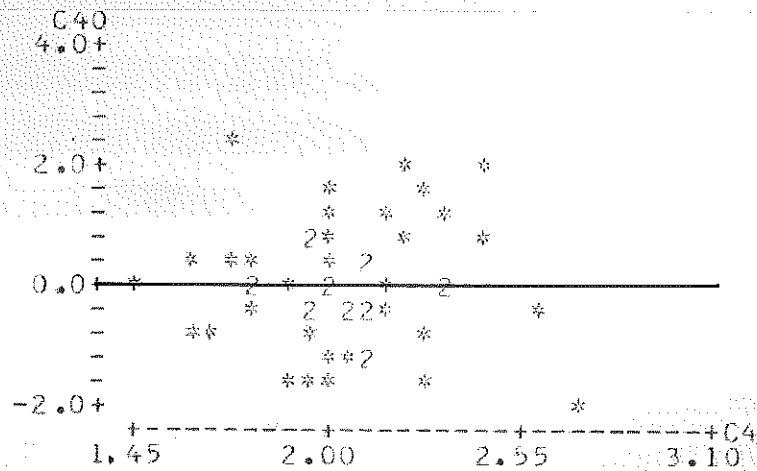


Fig. 152 - Gráfico - resíduo x valor predito

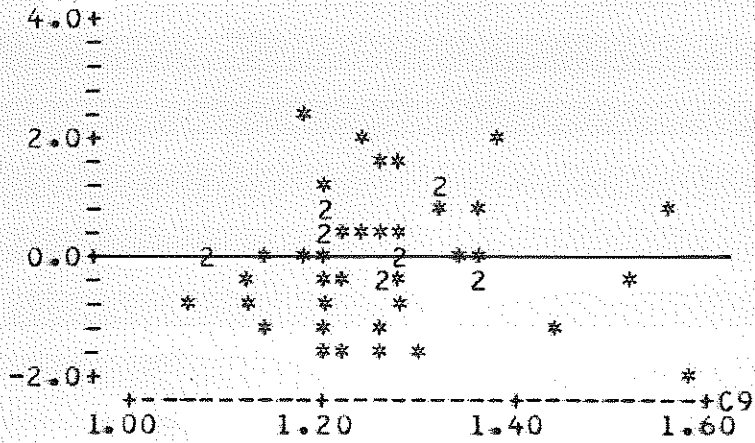


Fig. 153 - Gráfico - resíduo x inverso da unidade

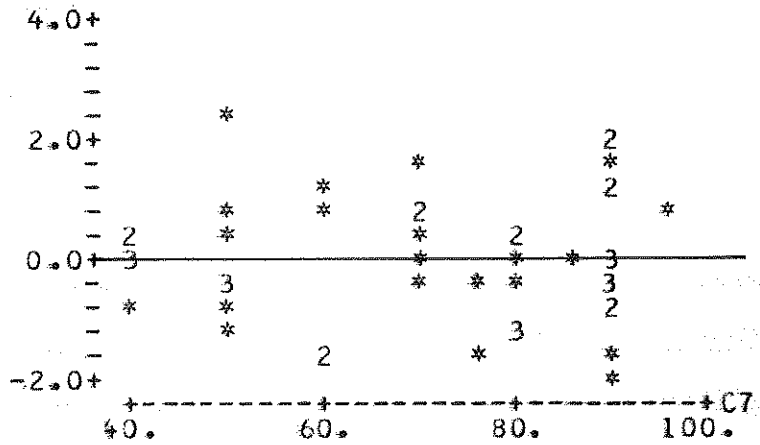


Fig. 154 - Gráfico - resíduo x porcentagem de área colada

Verificação da distribuição normal dos resíduos

A distribuição de resíduos pode ser considerada normal, pois o gráfico probabilístico se aproxima de uma reta com inclinação de 45° , figura 155.

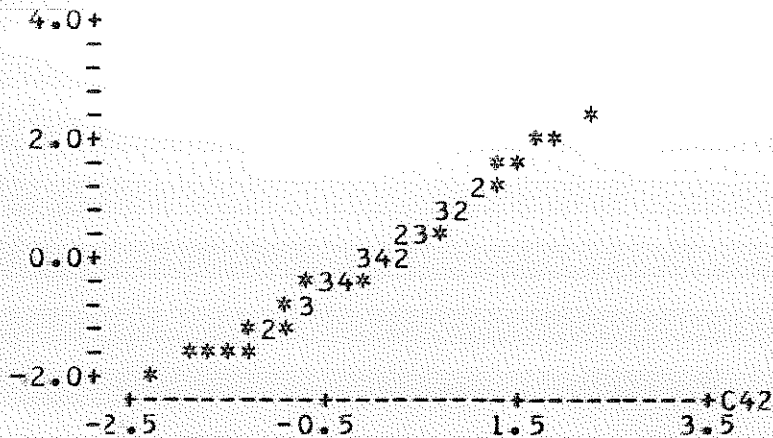


Fig. 155 - Gráfico probabilístico

TABELA 17 - REGRESSÃO: TENSÃO DE CISALHAMENTO x UMIDADE x DENSIDADE x PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\tau_{ac})/D = \text{var. depend.}$ $1/D = \text{var. indep.}$ $P_{ac} = \text{var. indep.}$	Log. da ten. cis./densidade inverso da densidade porc. de área colada
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\tau_{ac})/D = -0.43 + 1.30.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 84.2 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{ca1} = 130.8 > F_{cr} = 3.23$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	β_1$ |t_1| = 9.51 > t_0 = 2.00$ β_2$ |t_2| = 12.68 > t_0 = 2.00$	altamente significativa altamente significativa
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 1.95 > d_U = 1.64$	conclui-se pela validade da aplicação dos min. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$1/D = 38.56 \%$ $P_{ac} = 61.44 \%$	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais. b) - O modelo independe da variável umidade.	

5.4.2.2.1 - Correção da tensão de cisalhamento

Os modelos matemáticos da tensão de cisalhamento da ligação adesiva e da porcentagem de área colada são:

$$\text{Log}(\tau_{ac})/D = -0.43 + 1.30.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$$

$$P_{ac}/D = -583 + 359.D + 85.U - 1.83.U^2 - 39.U.D$$

transformando, obtêm-se:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\tau_{ac}) &= 1.30 - 0.43.D + 0.01.P_{ac}.D \\ P_{ac} &= -583.D + 359.D^2 + 85.U.D - 1.83.U^2.D - 39.U.D^2 \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{Log}(\tau_{ac}) &= f(D_n, P_{acn}) \\ P_{ac} &= z(U_n, D_n) \end{aligned}$$

finalmente, as equações de correção para unidade padrão de 12% serão:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\tau_{ac})_{12i} &= \text{Log}(\tau_{ac})_{ni} - f(D_{ni}, P_{acni}) + f(D_{12i}, P_{ac12i}) \\ D_{12i} &= D_{ni} - D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni}) \\ P_{ac12i} &= P_{acni} - z(U_{ni}, D_{ni}) + z(U_{12i}, D_{12i}) \\ U_{12i} &= 12\% \end{aligned}$$

sendo: $i = 1$ até 54 e $v = 0.563$

Os resultados obtidos a partir destas equações encontram-se no quadro 29 do anexo.

5.4.2.2.2 - Resistência característica

O histograma e os parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento da ligação adesiva são apresentados na figura 156. A variável tensão de cisalhamento tem aproximadamente distribuição normal

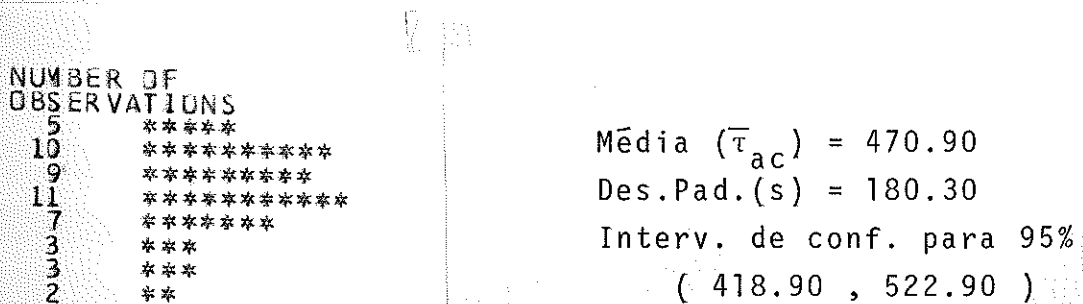


Fig. 156 - Histograma e parâmetros estatísticos

A resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão será:

$$f_{sck} = 170.00 \text{ N/cm}^2$$

Para a determinação da correlação da tensão de cisalhamento da ligação adesiva com as características mecânicas da madeira, foram feitas várias regressões. Com uma seleção apropriada foram determinados os modelos apresentados na tabela 18.

TABELA 18 - CORRELAÇÕES DA TENSÃO DE CISALHAMENTO COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA			
variável dep. varia. independ.	TENSÃO DE CISALHAMENTO DA LIGAÇÃO (τ_{ac})		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_w	$\text{Log}(\tau_{ac}) = 2.94 - 0.0166 \cdot \tau_w + 0.0001 \cdot \tau_w^2$	6%	baixa signific.
σ_{wc}	$\text{Log}(\tau_{ac}) = 4.15 + 0.0019 \cdot \sigma_{wc} - 1.8 \cdot \sigma_{wc}^2$	9%	baixa signific.

5.4.3 - TENSÃO DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO NORMAL À LINHA ADESIVA

5.4.3.1 - ADESIVO À BASE DE RESINA RESORCINOL

Nas tabelas 19 e 20, é apresentada a análise dos modelos matemáticos selecionados a partir de uma série de regressões.

Análise de resíduos

A distribuição dos resíduos, em relação a todas as variáveis, se encontram uniformemente espaçados em relação ao resíduo nulo. Assim, toda a contribuição das variáveis foi considerada no modelo matemático.

Nas figuras 157 e 158 são apresentados os gráficos dos resíduos x o valor predito das tensões de tração e compressão normal à linha adesiva, respectivamente.

TABELA 19 - REGRESSÃO: TENSÃO DE TRAÇÃO NORMAL x UMIDADE x DENSIDADE x PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\sigma_{tn})/D$ = var. depend. $1/D$ = var. indepen. U = var. indepen. P_{ac} = var. indepen.	Log. da ten.trac.nor./densid. inverso da densidade umidade porc. de área colada
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\sigma_{tn})/D = 0.378 - 0.046.U + 1.65.D^{-1} + 0.0056.P_{ac}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 79.3 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{ca1} = 79.4 > F_{cr} = 2.76$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	β_1$ |t_1| = 3.45 > t_0 = 2.00$ β_2$ |t_2| = 11.79 > t_0 = 2.00$ β_3$ |t_3| = 5.64 > t_0 = 2.00$	altamente significativa altamente significativa altamente significativa
TESTE DE DURBIM WATSON	$d = 2.04 > d_U = 1.70$	conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$U = 21.02 \%$ $1/D = 65.64 \%$ $P_{ac} = 13.34 \%$	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais.	

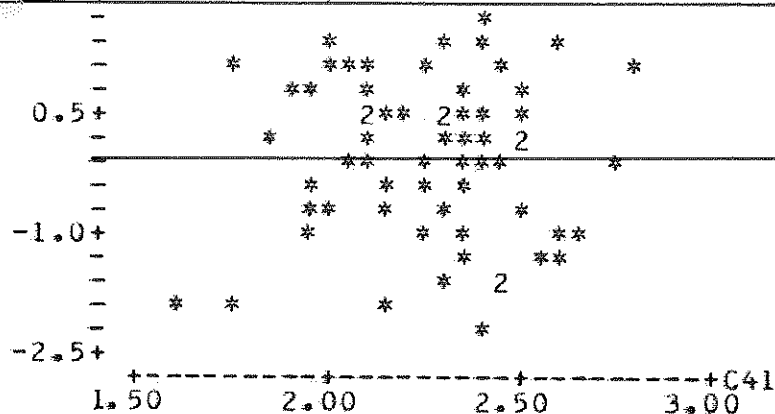


Fig. 157 - Gráfico resíduo x valor predito (tração normal)

TABELA 20 - REGRESSÃO: TENSÃO DE COMPRESSÃO NORMAL x UMIDADE x DENSIDADE X PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\tau_{cn})/D = \text{var. depend.}$ $U = \text{var. independ.}$ $1/D = \text{var. independ.}$ $P_{ac} = \text{var. independ.}$	Log.ten.Compres.nor/densidade umidade inverso da densidade porc. de área colada
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\tau_{cn})/D = 0.378 - 0.046.U + 1.85.D^{-1} + 0.0056.P_{ac}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 81.8 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{cal} = 92.58 > F_{cr} = 2.76$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	β$ |t_1| = 3.45 > t_0 = 2.00$ β$ |t_2| = 13.19 > t_0 = 2.00$ β$ |t_3| = 5.64 > t_0 = 2.00$	altamente significativa altamente significativa altamente significativa
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 2.04 > d_U = 1.70$	conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$U = 18.93 \%$ $1/D = 69.63 \%$ $P_{ac} = 11.44 \%$	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais.	

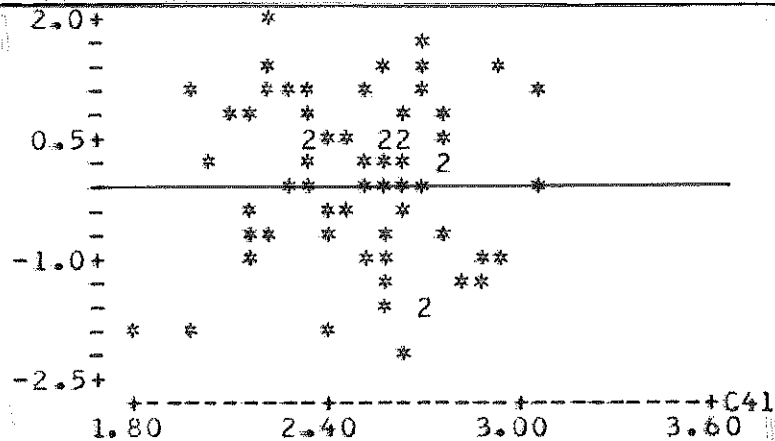


Fig. 158 - Gráfico - resíduo x valor predito (compres.normal)

Verificação da distribuição normal de resíduos

A distribuição dos resíduos pode ser considerada normal, pois os gráficos probabilísticos aproximam-se de uma reta com inclinação de 45° . Nas figuras 159 e 160, são mostrados os gráficos probabilísticos da tensão de tração normal e compressão normal à linha adesiva, respectivamente.

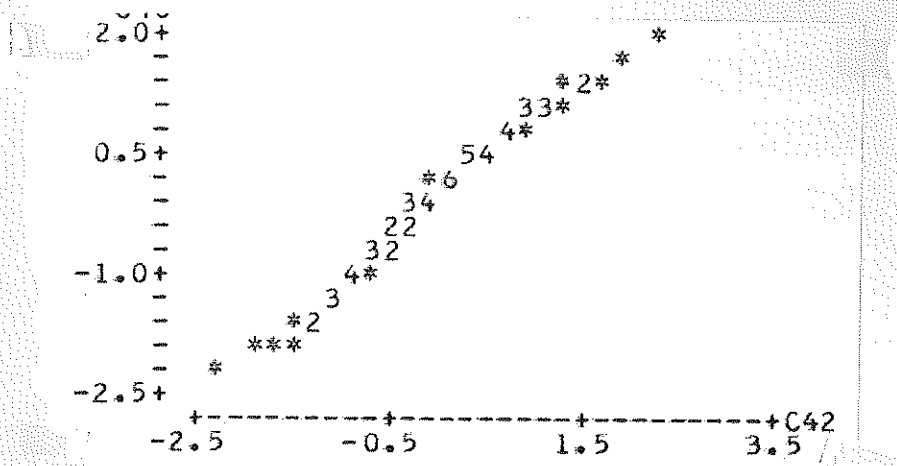


Fig. 159 - Gráfico probabilístico (tração normal)

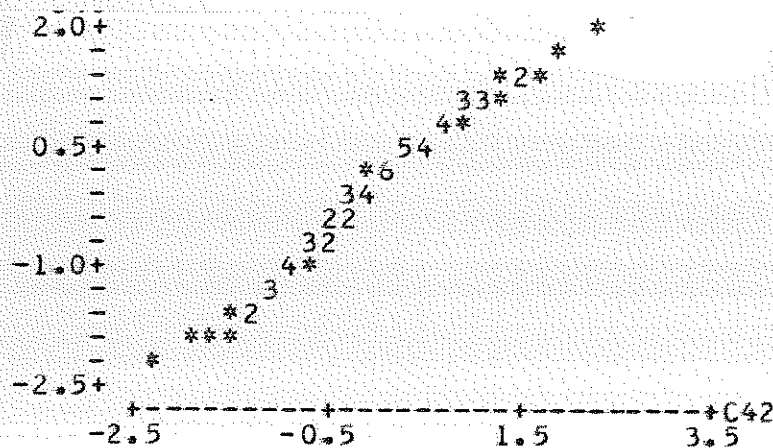


Fig. 160 - Gráfico probabilístico (compressão normal)

5.4.3.1.1 - Correção das tensões

A partir dos modelos matemáticos das tensões e da porcentagem de área colada, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn})/D &= 0.378 - 0.046.U + 1.65.D^{-1} + 0.0056.P_{ac} \\ \text{Log}(\sigma_{cn})/D &= 0.378 - 0.046.U + 1.85.D^{-1} + 0.0056.P_{ac} \\ P_{ac}/U &= -6.42 + 26.5.D + 0.99.U - 2.1.U.D \end{aligned}$$

transformando, obtêm-se:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn}) &= 1.65 + 0.378.D - 0.046.U.D + 0.0056.P_{ac}.D \\ \text{Log}(\sigma_{cn}) &= 1.85 + 0.378.D - 0.046.U.D + 0.0056.P_{ac}.D \\ P_{ac} &= -6.42.U + 26.5.D.U + 0.99.U^2 - 2.1.U^2.D \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn}) &= f(U_n, D_n, P_{acn}) \\ \text{Log}(\sigma_{cn}) &= f(U_n, D_n, P_{acn}) \\ P_{ac} &= z(U_n, D_n) \end{aligned}$$

finalmente, as equações de correção serão:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn})_{12i} &= \text{Log}(\sigma_{tn})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}, P_{acni}) + f(U_{12i}, D_{12i}, P_{ac12i}) \\ \text{Log}(\sigma_{cn})_{12i} &= \text{Log}(\sigma_{cn})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}, P_{acni}) + f(U_{12i}, D_{12i}, P_{ac12i}) \\ D_{12i} &= D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - \nu) \cdot (12 - U_{ni}) \\ P_{ac12i} &= P_{acni} - z(U_{ni}, D_{ni}) + z(U_{12i}, D_{12i}) \end{aligned}$$

sendo:

$$i = 1 \text{ até } 66 \quad \text{e} \quad \nu = 0.563$$

Os resultados das correções encontram-se no quadro 29 do anexo.

5.4.3.1.2 - Resistências características

Os histogramas da tensão de tração normal e da tensão de compressão normal à linha adesiva, juntamente com os parâmetros estatísticos estão apresentados nas figuras 161 e 162, respectivamente.

As resistências características de tração e compressão normal à linha adesiva são:

$$f_{tnk} = 406.10 \text{ N/cm}^2$$

$$f_{cnk} = 637.00 \text{ N/cm}^2$$

sendo:

f_{cnk} = resistência característica da linha adesiva \tilde{a} com
pressão normal

f_{tnk} = resistência característica da linha adesiva \tilde{a} tra
ção normal.

NUMBER OF
OBSERVATIONS

1	*
3	***
5	*****
12	*****
13	*****
13	*****
6	*****
5	*****
2	**
1	*
2	**

$$\text{Média } (\bar{\sigma}_{tn}) = 746.80 \text{ N/cm}^2$$

$$\text{Des.Pad. (s)} = 206.00 \text{ N/cm}^2$$

Interv. de conf. para 95%

$$(695.70 , 797.80)$$

Fig. 161 - Histograma e parâmetros estatísticos da tensão de tração normal \tilde{a} linha adesiva

NUMBER OF
OBSERVATIONS

4	****
10	*****
16	*****
16	*****
8	*****
7	*****
2	**
2	**

$$\text{Média } (\bar{\sigma}_{cn}) = 1169.60 \text{ N/cm}^2$$

$$\text{Des.Pad. (s)} = 322.00 \text{ N/cm}^2$$

Interv. de conf. para 95%

$$(1089.70 , 1249.50)$$

Fig. 162 - Histograma e parâmetros estatísticos de tensão de compressão normal \tilde{a} linha adesiva

A determinação da correlação das tensões de tração e de compressão normal \tilde{a} linha adesiva com as características mecânicas da madeira e da ligação adesiva foi feita, a partir de uma seleção cuidadosa das regressões estudadas. Nas tabelas 21 e 22 são apresentados estes modelos.

TABELA 21 - CORRELAÇÃO DA TENSÃO DE TRAÇÃO NORMAL À LINHA ADESIVA COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA E DA LIGAÇÃO			
variável dep. variável indepen.	TENSÃO DE TRAÇÃO NORMAL À LINHA ADESIVA (σ_{tn})		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_{ac}	$\sigma_{tn} = - 0.653 + 1.04.\tau_{ac}$	99.3%	alta signific.
τ_w	$\text{Log}(\sigma_{tn}) = 1.60 + 0.0013.\tau_w$	10.0%	baixa signific.

TABELA 22 - CORRELAÇÃO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO NORMAL À LINHA ADESIVA COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA E DA LIGAÇÃO			
variável dep. variável indepen.	TENSÃO DE COMPRESSÃO NORMAL À LINHA ADESIVA (σ_{cn})		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_{ac}	$\sigma_{cn} = -1.02 + 1.63.\tau_{ac}$	99.3%	alta signific.
τ_w	$\text{Log}(\sigma_{cn}) = 1.80 + 0.0013.\tau_w$	10.0%	baixa signific.

5.4.3.2 - ADESIVO À BASE DE RESINA EPOXI

A partir da seleção cuidadosa de várias regressões múltiplas, foram determinados os modelos matemáticos mais adequados aos resultados experimentais. Nas tabelas 23 e 24 estão apresentados estes modelos.

Análise de resíduos

Os resíduos, em relação a todas as variáveis, encontram-se uniformemente espaçados em relação ao resíduo nulo. Portanto, toda a contribuição das variáveis foi considerada nos modelos. Nas figuras 163 e 164, estão apresentadas a distribuição dos resíduos x os valores preditos das tensões de tração e compressão normal à linha adesiva, respectivamente.

TABELA 23 - REGRESSÃO: TENSÃO DE TRAÇÃO NORMAL x UMIDADE x DENSIDADE x PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\sigma_{tn})/D = \text{var. depend.}$ $1/D = \text{var. indepen.}$ $P_{ac} = \text{var. indepen.}$	Log. da ten.trac.nor./densid. inverso da densidade porc. de área colada
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\sigma_{tn})/D = -0.43 + 1.41.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 85.0 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{cal} = 139.37 > F_{cr} = 3.23$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	β_1 $t_1 = 10.33 > t_0 = 2.00$ β_2 $t_2 = 12.68 > t_0 = 2.00$	altamente significativa altamente significativa
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 1.95 > d_U = 1.64$	conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$1/D = 42.34 \%$ $P_{ac} = 57.66 \%$	a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais. b) - A tensão de tração normal neste modelo independe da umidade.	

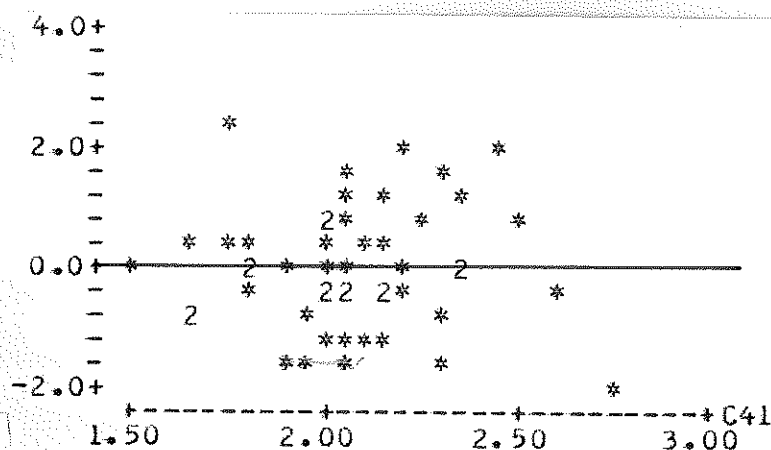


Fig. 163 - Gráfico - resíduo x valor predito (tração normal)

TABELA 24 - REGRESSÃO: TENSÃO DE COMPRESSÃO NORMAL x UMIDADE x DENSIDADE x PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS		Log(σ_{cn})/D = var. dependen. 1/D = var. independ. P_{ac} = var. independ.
MODELO MATEMÁTICO		$Log(\sigma_{cn})/D = - 0.43 + 1.50.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$
COEFICIENTE		$R^2 = 86.4 \%$ altamente significante
TESTE F		$F_{ca1} = 155.92 > F_{cr} = 3.23$ a regressão é altamente significante
TESTE t	β_1	$t_1 = 11.76 > t_0 = 2.00$ altamente significante
	β_2	$t_2 = 12.68 > t_0 = 2.00$ altamente significante
TESTE DE DURBIN WATSON		$d = 1.95 > d_U = 1.64$ conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS		1/D = 48.47 % $P_{ac} = 51.53 \%$ a contribuição das variáveis é satisfatória
COMENTÁRIOS		a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais. b) - A tensão de compressão normal neste modelo independe da umidade.

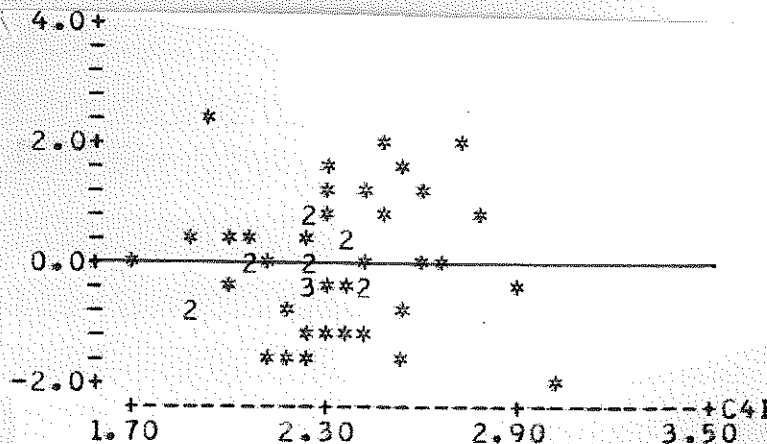


Fig. 164 - Gráfico - resíduo x valor predito (compressão normal)

Verificação da distribuição normal dos resíduos

Os gráficos probabilísticos aproximam-se de uma reta com inclinação de 45°. Assim a distribuição de resíduos pode ser admitida como normal. Nas figuras 166 e 167, são mostrados os gráficos probabilísticos da tensão de tração e compressão normal à linha adesiva, respectivamente.

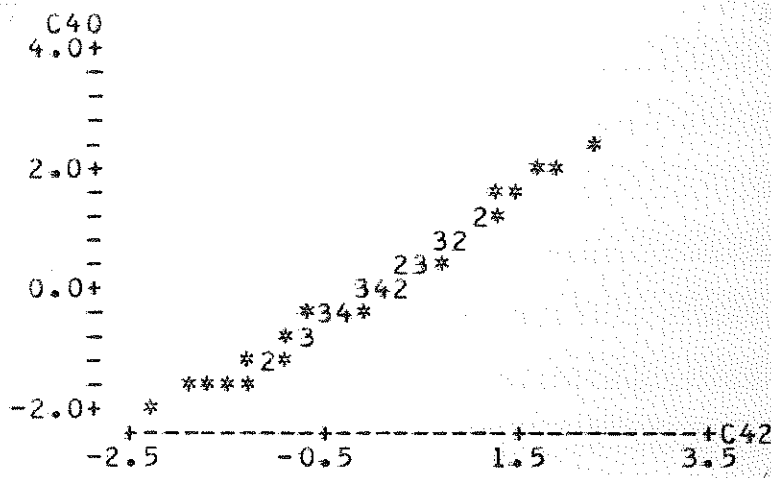


Fig. 166 - Gráfico probabilístico (compressão normal)

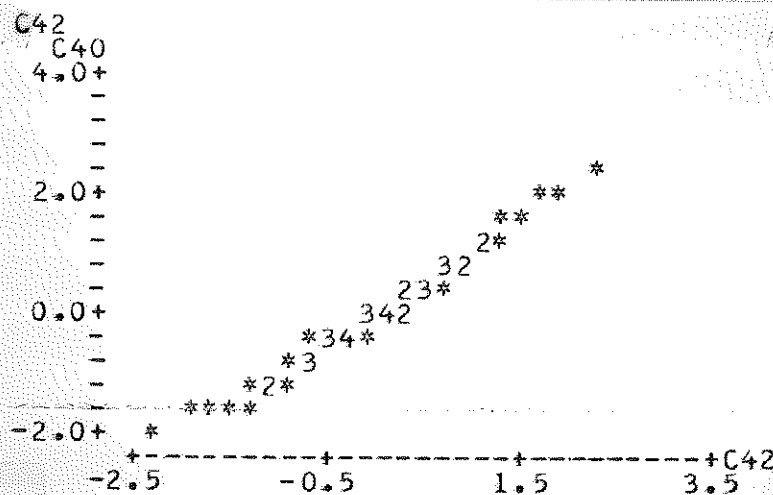


Fig. 167 - Gráfico probabilístico (tração normal)

5.4.3.2.1- Correção das tensões

Os modelos matemáticos das tensões e da porcentagem de \bar{a} rea colada são:

$$\text{Log}(\sigma_{tn})/D = -0.43 + 1.41.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{cn})/D &= -0.43 + 1.50.D^{-1} + 0.01.P_{ac} \\ P_{ac}/D &= -583 + 539.D + 85.U - 1.83.U^2 - 39.U.D \end{aligned}$$

transformando, obtêm-se:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn}) &= 1.41 - 0.43.D + 0.01.P_{ac}.D \\ \text{Log}(\sigma_{cn}) &= 1.50 - 0.43.D + 0.01.P_{ac}.D \\ P_{ac} &= -583.D + 539.D^2 + 85.U.D - 1.83.U^2.D - 39.U.D^2 \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn}) &= f(D_n, P_{acn}) \\ \text{Log}(\sigma_{cn}) &= f(D_n, P_{acn}) \\ P_{ac} &= z(U_n, D_n) \end{aligned}$$

finalmente, as equações de correção serão:

$$\begin{aligned} \text{Log}(\sigma_{tn})_{12i} &= \text{Log}(\sigma_{tn})_{ni} - f(D_{ni}, P_{acni}) + f(D_{12i}, P_{ac12i}) \\ \text{Log}(\sigma_{cn})_{12i} &= \text{Log}(\sigma_{cn})_{ni} - f(D_{ni}, P_{acni}) + f(D_{12i}, P_{ac12i}) \\ D_{12i} &= D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni}) \\ P_{ac12i} &= P_{acni} - z(U_{ni}, D_{ni}) + z(U_{12i}, D_{12i}) \\ U_{12i} &= 12 \% \end{aligned}$$

sendo $i = 1$ até 54 e $v = 0.563$

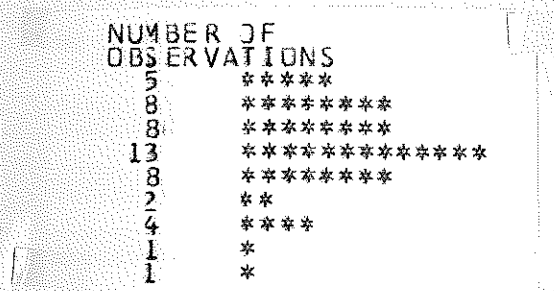
Os resultados obtidos com estas equações de correção encontram-se no quadro 29 do anexo.

5.4.3.2.2 - resistências características

Nas figuras 168 e 169, são apresentados os histogramas e as características estatísticas das tensões de tração e compressão normal à linha adesiva, respectivamente.

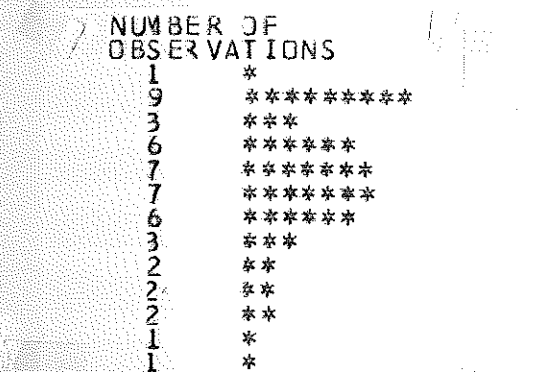
As resistências características de tração e compressão normal à linha adesiva são:

$$f_{tnk} = 174.60 \text{ N/cm}^2 \quad \text{e} \quad f_{cnk} = 271.90 \text{ N/cm}^2$$



Média ($\bar{\sigma}_{tn}$) = 487.2 N/cm²
 Des.Pad.(s) = 189.0 N/cm²
 interv. de conf. para 95%
 (433.4 , 541.0)

Fig. 168 - Histograma e parâmetros estatísticos (tração normal)



Média ($\bar{\sigma}_{cn}$) = 763.1 N/cm²
 Des.Pad.(s) = 297.0 N/cm²
 Interv. de conf. para 95%
 (678.8 , 847.4)

Fig.169 - Histograma e parâmetros estatísticos (compressão normal)

Para determinar a correlação da tensão de tração e compressão normal à linha adesiva com as características mecânicas da madeira e da ligação adesiva, foram feitas várias regressões. Através de uma seleção adequada foram determinados os modelos apresentados nas tabelas 25 e 26.

TABELA 25 - CORRELAÇÃO DA TENSÃO DE TRAÇÃO NORMAL À LINHA ADESIVA COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA E DA LIGAÇÃO ADESIVA			
variável depen. varial. independ.	TENSÃO DE TRAÇÃO NORMAL À LINHA ADESIVA (σ_{tn})		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_{ac}	$\sigma_{cn} = 0.0008 + 1.03 \cdot \tau_{ac}$	100%	alta signific.
τ_w	$\text{Log}(\sigma_{tn}) = 1.35 + 0.0017 \cdot \tau_w$	4%	baixa signific.

TABELA 26 - CORRELAÇÃO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO NORMAL À LINHA ADESIVA COM AS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA MADEIRA E DA LIGAÇÃO ADESIVA			
variável depen. variável indepen.	TENSÃO DE COMPRESSÃO NORMAL À LINHA ADESIVA (σ_{cn})		
	MODELO MATEMÁTICO	R ²	OBSERVAÇÕES
τ_{ac}	$\sigma_{cn} = 0.0012 + 1.62 \cdot \tau_{ac}$	100%	alta signific.
τ_w	$\text{Log}(\sigma_{cn}) = 1.55 + 0.0017 \cdot \tau_w$	4%	baixa signific.

6 - PORCENTAGEM CARACTERÍSTICA DE ÁREA COLADA

A porcentagem de área colada é um fator muito importante na resistência das ligações adesivas. A determinação da porcentagem característica de área colada serve como um parâmetro para definir o coeficiente de segurança das ligações adesivas.

A partir dos resultados experimentais dos ensaios da segunda série, dos modelos matemáticos e das equações de correção em função da umidade e da densidade, determinados anteriormente, foi possível determinar a porcentagem característica de área colada das ligações adesivas.

No quadro 29 do anexo, encontram-se estas porcentagens de área colada corrigidas.

Nas figuras 170 e 171, encontram-se os histogramas e os parâmetros estatísticos das porcentagens de área colada corrigidas, dos adesivos à base de resina resorcinol e epoxi, respectivamente. Nestes gráficos pode-se observar, que, a variável considerada tem uma distribuição normal.

2	4*	03
4	4.	69
7	5*	002
11	5.	7899
16	6*	03344
20	6.	7899
26	7*	001444
(11)	7.	55678899999
28	8*	00114
23	8.	577899
17	9*	0012223334
7	9.	5668
3	10*	124

Média (\bar{P}_{ac}) = 77.13 %

Des.Pad.(s) = 15.70 %

Interv. de conf. para 95%
(73.24 , 81.02)

Fig. 170 - Histograma e parâmetros estatísticos (resorcinol)

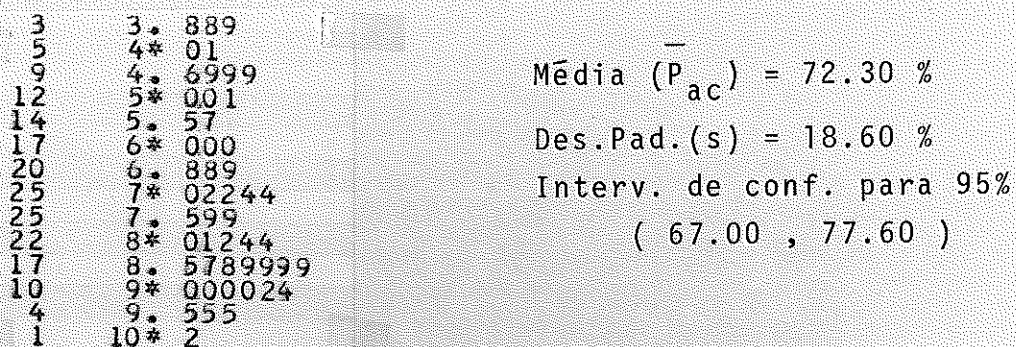


Fig. 171 - Histograma e parâmetros estatísticos (epoxi)

Admitindo que a média e o desvio padrão da população possam ser representados pelas suas estimativas, as porcentagens características de área colada serão:

$$P_{acck} = 51.30 \%$$

$$P_{acak} = 41.70 \%$$

sendo:

P_{acck} = porcentagem característica de área colada do adesivo à base de resina resorcinol

P_{acak} = porcentagem característica de área colada do adesivo à base de resina epoxi

Desta maneira um coeficiente de segurança, além de outros a serem adotados, é o referente à porcentagem de área colada. Estes coeficientes de minoração serão:

$$\gamma_{pac} = 1.513$$

$$\gamma_{paa} = 1.417$$

sendo:

γ_{pac} = coeficiente de segurança referente à porcentagem efetiva de área colada do adesivo à base de resina resorcinol

γ_{paa} = coeficiente de segurança referente à porcentagem efetiva de área colada do adesivo à base de resina epoxi.

CAP 04 - DURABILIDADE DA LIGAÇÃO ADESIVA

1 - INTRODUÇÃO

Para a análise da durabilidade de uma ligação adesiva preparou-se a 5ª série de corpos de prova em escala natural, de maneira a se obter pares de corpos de prova semelhantes.

Imediatamente após a preparação dos corpos de prova fez-se ensaio de um elemento de cada par. O elemento seguinte foi guardado em local acima do forro do LaMEM, sob a cobertura de telhas cerâmicas. Ambiente deste tipo em São Carlos está sujeito às variações de umidade relativa, presumivelmente de 40 até 90% e média de 65% e às variações de temperatura, presumivelmente de 0 até 40°C e média de 20°C. Os corpos de prova permaneceram neste ambiente altamente variável, mas até certo ponto normal para as estruturas de telhados, durante cinco anos e meio, sendo então ensaiados.

Com análise estatística apropriada determinou-se a variação da tensão de cisalhamento na linha adesiva, do módulo de deformação, da porcentagem de área colada, da tensão de cisalhamento da madeira e da tensão de compressão paralela da madeira.

2 - O ENSAIO

Os corpos de prova da 5ª série de ensaios, totalizaram 44 modelos de ligações adesivas em escala natural, solicitadas ao cisalhamento na compressão, sendo 22 corpos de prova com adesivo à base de resina resorcinol e 22 com adesivo à base de resina epoxi. Os corpos de prova foram retirados de 11 vigas de Peroba Rosa, 4 de cada viga, sendo 2 corpos de prova confeccionados com adesivo à base de resorcinol e 2 com adesivo à base de epoxi. Na figura 172, encontra-se um esquema da retirada dos corpos de prova da viga de madeira.

Concluída a montagem dos corpos de prova numerou-se conforme a figura 173.

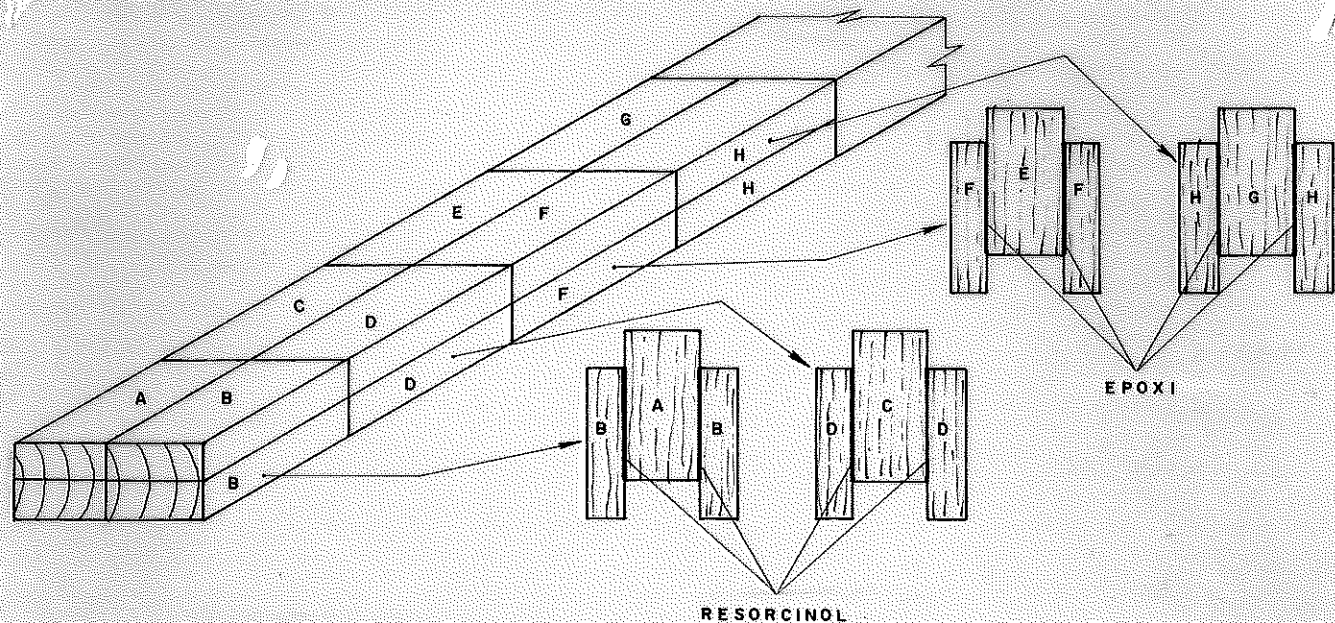


FIG. 172 - RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA

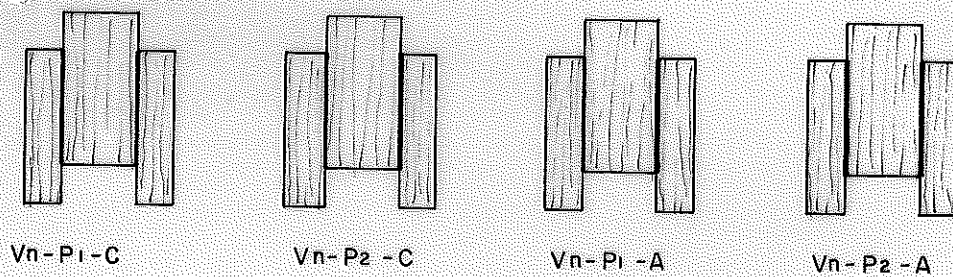


FIG. 173 - NUMERAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

sendo:

- V_n = viga número n
- P_1 = pedaço 1 da viga
- P_2 = pedaço 2 da viga
- C = adesivo à base de resina resorcinol
- A = adesivo à base de resina epoxi

Concluída a cura da linha adesiva, os corpos de prova marcados com P_2 , foram colocados sobre o forro e junto à estrutura do LaMEM e os corpos de prova marcados com P_1 foram imediatamente ensaiados. Os ensaios foram realizados segundo o método de ensaio descrito no item 5.1 do capítulo III.

Concluídos estes ensaios, foram retirados os corpos de prova de caracterização da madeira (tensão de cisalhamento, tensão de compressão paralela, umidade e densidade) e ensaiados conforme o método de ensaio descrito no item 5.2 do capítulo III.

Após aproximadamente 5 anos e meio de permanência dos corpos de prova sobre o forro do LaMEM, expostos às mudanças de temperatura e umidade relativa do ar, foram retirados e ensaiados. Concluídos os ensaios foram retirados os corpos de prova de caracterização da madeira e ensaiados.

2.1 - COLEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

De cada um dos 44 corpos de prova foram determinadas: as dimensões da área colada, as dimensões do corpo de prova, a distância entre os elementos de fixação dos relógios comparadores, a leitura dos deslocamentos relativos nos dois relógios comparadores para cada acréscimo de carga, a carga de ruptura e, através de um exame visual, a porcentagem de área colada.

A partir dos ensaios de caracterização da madeira foram determinadas: a tensão de cisalhamento, a tensão de compressão paralela, umidade e densidade.

A partir das equações apresentadas anteriormente foram determinados os pares de valores (τ_i, γ_i) e utilizando um programa para o computador IBM 1130 da EESC foi feito o traçado do gráfico tensão de cisalhamento x deformação específica relativa e o gráfico correspondente a análise da regressão linear, figura 174 e 175.

O módulo de deformação (MD) será o coeficiente angular de finido pela reta da regressão linear.

A tensão de cisalhamento e a tensão de tração normal à linha adesiva foram determinadas utilizando as equações 2 e 3.

$$\tau_{ac} = \frac{N_{rup}}{2.A_c} \quad e \quad \sigma_{tn} = \frac{3.N_{rup}.c}{4.y".a.z}$$

Na tabela 27, encontra-se os resultados destes ensaios. Os números superiores, em cada linha, referem-se aos corpos de prova ensaiados imediatamente após a cura do adesivo e os números inferiores referem-se aos corpos de prova ensaiados após 5 anos e meio de exposição às mudanças de temperatura e umidade relativa do ar.

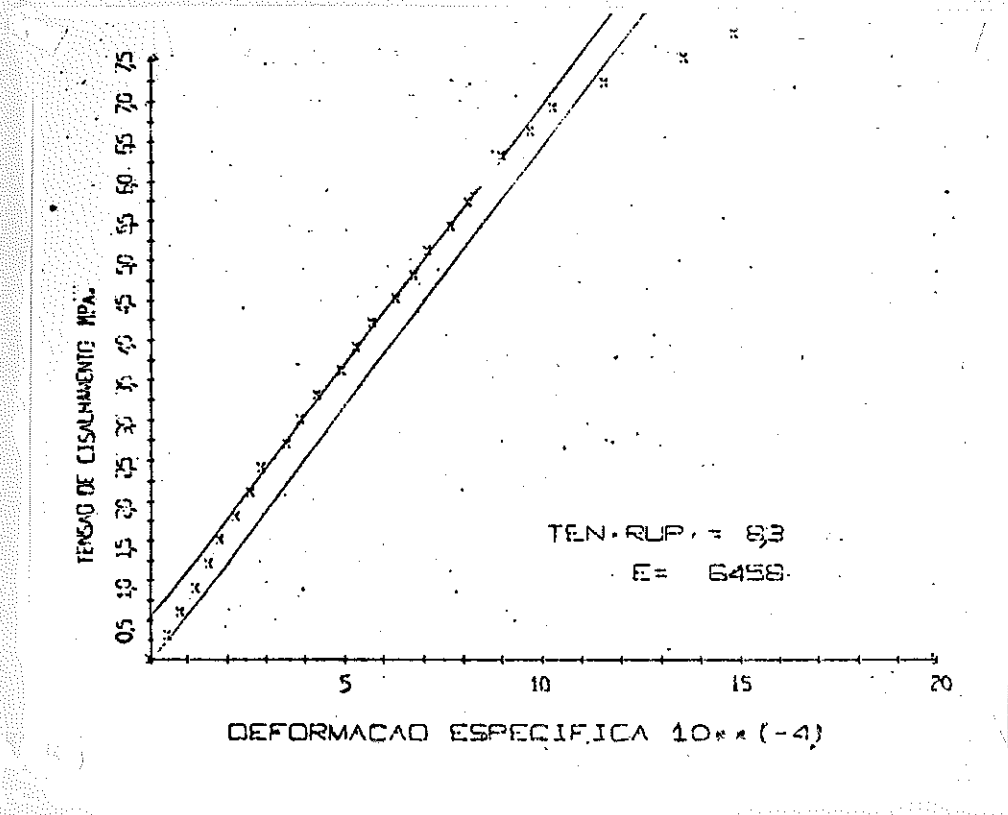


Fig. 174 - Gráfico - tensão de cisalhamento x deformação (CP. P₁)

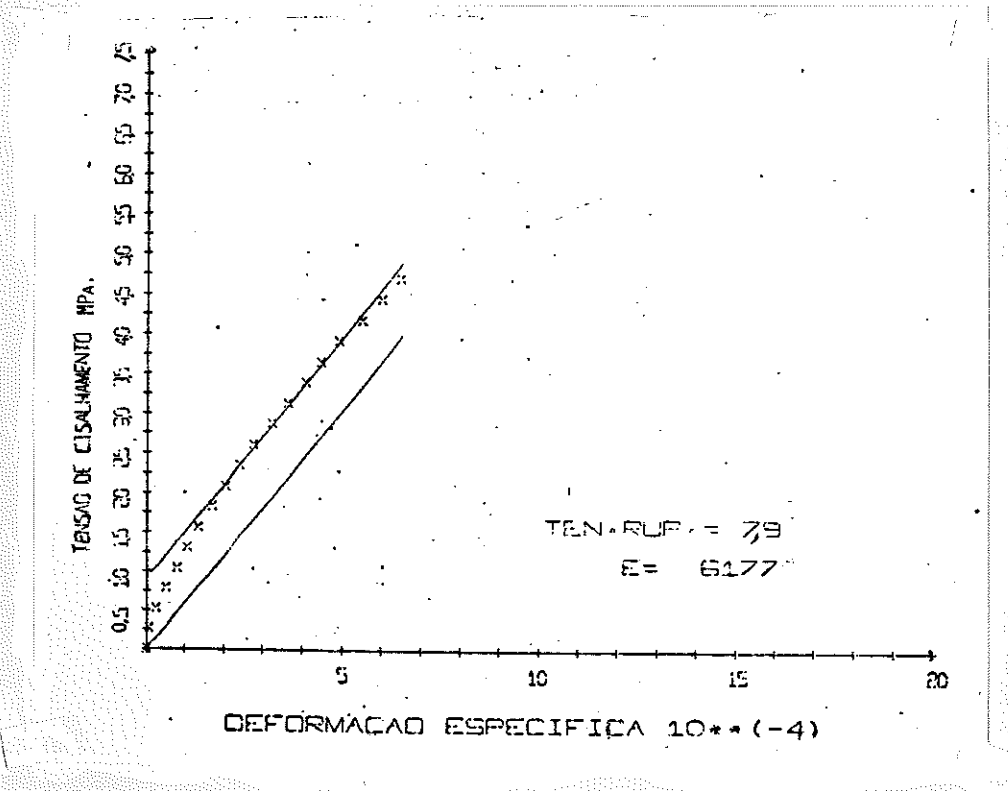


Fig. 175 - Gráfico - tensão de cisalhamento x deformação (CP. P₂)

2.2 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A partir dos resultados experimentais e através de hipóteses de diferença nula, foi possível verificar a variabilidade das características mecânicas da ligação adesiva e da madeira.

Para evitar conclusões mascaradas por outras variáveis, como a umidade, a densidade e a porcentagem de área colada, foi feita a correção dos resultados experimentais para a umidade padrão de 12%, através das equações determinadas no capítulo III.

Na tabela 28, encontram-se os valores corrigidos.

2.2.1 - VARIABILIDADE DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA LIGAÇÃO

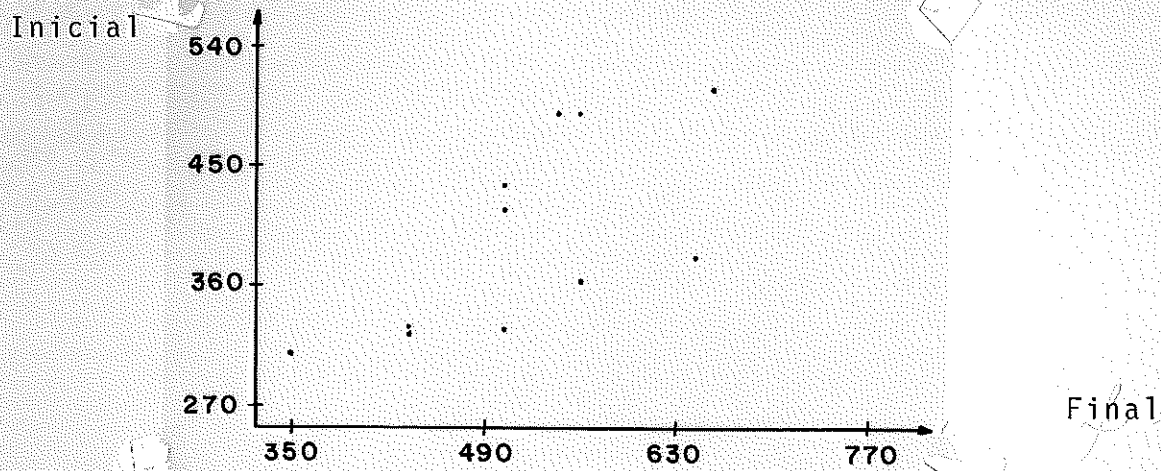
A avaliação da variabilidade das características mecânicas da ligação foi feita através do quociente entre a característica inicial e final, e através da diferença da característica inicial e final.

Na figura 176, encontram-se os gráficos das características mecânicas, inicial e final, da ligação adesiva à base de resina resorcinol.

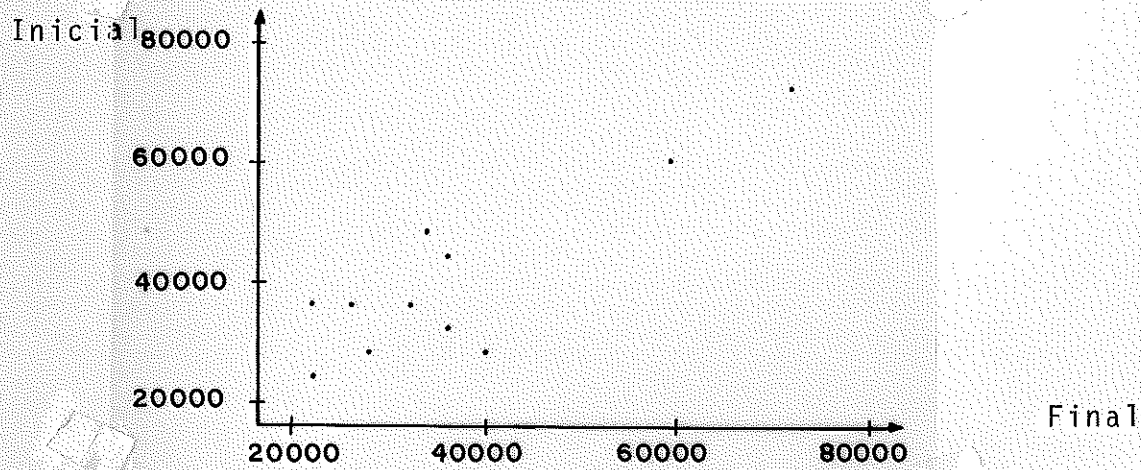
A figura 176-a, refere-se ao gráfico tensão de cisalhamento inicial x final. Na figura 176-b, encontra-se o gráfico do módulo de deformação inicial x final e na figura 176-c, o gráfico da porcentagem de área colada inicial x final. Este último gráfico é apenas figurativo, pois a determinação da porcentagem de área colada foi feita por estimativa visual e não existe correspondência entre os elementos de cada par de corpos de prova (P_1 e P_2). Nos dois primeiros gráficos pode-se notar, a existência de uma proporcionalidade, definida através de uma reta representativa dos pontos, com inclinação de 45° . Isto indica, inicialmente sem nenhuma verificação estatística, que as características mecânicas da ligação adesiva não sofrem influência devido a variação da umidade relativa do ar e da temperatura.

Na figura 177, também são apresentados os gráficos das características mecânicas da ligação adesiva, porém com adesivo à base de resina epoxi. Nos gráficos 177-a, 177-b, nota-se a existência de proporcionalidade entre a característica mecânica inicial e final, mas, a reta que define essa proporcionalidade tem inclinação diferente de 45° . Isto indica a existência de variação nas ca-

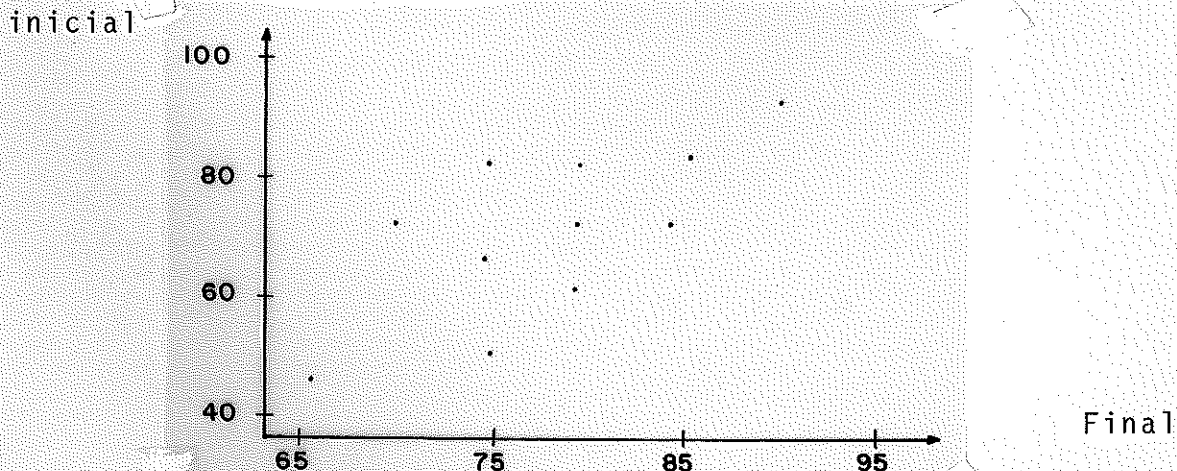
racterísticas mecânicas da ligação adesiva devido a mudanças de umi-
dade relativa do ar e temperatura.



a - Gráfico tensão de cisalhamento inicial x final



b - Gráfico módulo de deformação inicial x final



c - Gráfico porcentagem de área colada inicial x final

Fig. 176 - Características da ligação adesiva inicial x final (resorcinol)

TABELA 27 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE - INICIAL E FINAL

Nº	corpo de prova	τ_{ac2} N/cm ²	τ_{w2} N/cm ²	σ_{w2} N/cm ²	MD N/cm ²	D_{ap3} KN/m ³	U %	% área colada
ADESIVO À BASE DE RESINA RESORCINOL								
01	V ₁ -P ₁ -C	438 500	1350 1230	4520 5940	297080 280430	8.00 7.80	18.47 11.46	60 65
02	V ₂ -P ₁ -C	360 565	1700 1670	3970 4490	268630 744130	7.90 6.50	16.29 11.05	60 90
03	V ₃ -P ₁ -C	375 644	1940 2000	4350 5090	362500 316510	8.50 7.90	15.36 11.34	70 70
04	V ₄ -P ₁ -C	330 509	1480 1540	3330 3840	729570 725000	6.30 6.10	14.76 10.87	50 90
05	V ₅ -P ₁ -C	298 355	1690 1690	5680 5660	168640 250340	8.30 7.70	14.78 11.28	45 90
06	V ₆ -P ₁ -C	409 502	1610 1560	4650 4490	343910 222620	7.80 7.00	14.80 11.29	90 90
07	V ₇ -P ₁ -C	495 555	1680 1690	3030 5290	290260 406950	7.30 6.69	19.30 10.76	70 95
08	V ₈ -P ₁ -C	488 542	1420 1840	4520 5710	495420 331720	8.20 7.10	14.95 10.81	80 95
09	V ₉ -P ₁ -C	501 663	1710 1770	4740 4830	456000 369620	8.00 6.60	14.65 11.12	60 95
10	V ₁₀ -P ₁ -C	326 441	1560 1510	4850 5120	332500 363360	8.10 7.60	15.03 10.97	40 90
11	V ₁₁ -P ₁ -C	316 498	1620 1630	5200 6080	253000 228800	8.30 7.20	16.15 11.00	40 90
ADESIVO À BASE DE RESINA EPOXI								
01	V ₁ -P ₁ -A	215 109	1360 1580	4540 5660	197570 106650	8.10 7.60	18.46 11.18	60 85
02	V ₂ -P ₁ -A	309 277	1690 1420	4000 4360	384800 156650	8.00 6.40	16.30 10.76	80 80
03	V ₃ -P ₁ -A	316 228	1850 1830	4250 4950	256000 127590	8.40 8.00	15.60 11.25	80 60
04	V ₄ -P ₁ -A	310 188	1530 1350	3430 4300	283000 135730	6.30 7.00	14.80 10.92	90 70

TABELA 27 - Continuação - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ----- EPOXI

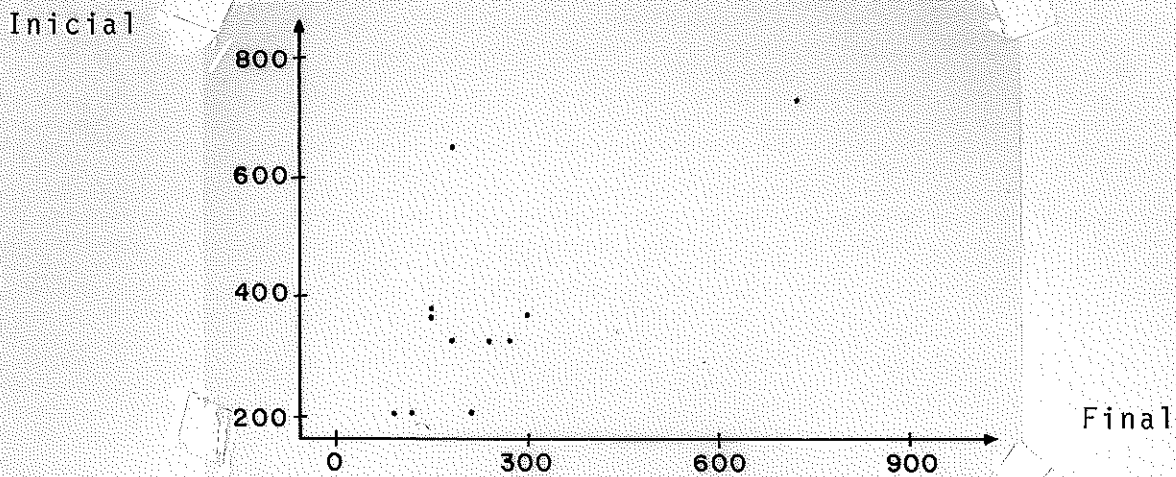
05	V ₅ -P ₁ -A	643 175	1700 1920	5500 5380	506400 62870	8.30 8.10	14.90 11.28	95 80
06	V ₆ -P ₁ -A	357 162	1630 1450	4680 6730	310260 191350	7.70 7.10	14.60 11.08	90 60
07	V ₇ -P ₁ -A	342 288	1700 1680	3100 3910	304680 142950	7.50 7.10	19.40 10.58	80 80
08	V ₈ -P ₁ -A	737 723	1500 1390	4490 5150	454780 496900	8.30 6.70	14.90 10.49	100 90
09	V ₉ -P ₁ -A	348 153	1650 1660	4800 4760	401320 94140	7.90 6.90	15.10 11.19	90 90
10	V ₁₀ -P ₁ -A	201 202	1600 1650	4830 4850	567000 128950	8.00 7.40	16.02 11.18	60 60
11	V ₁₁ -P ₁ -A	206 90	1590 1600	5180 6080	352000 231750	8.40 7.00	16.15 11.03	40 40

TABELA 28 - RESULTADOS CORRIGIDOS DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE DA LIGAÇÃO

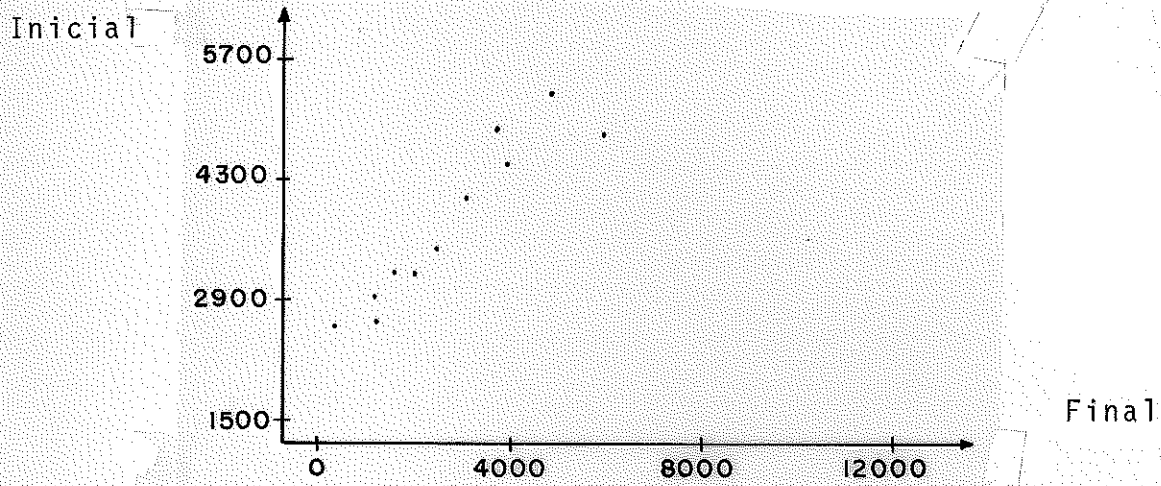
Nº	corpo de prova	τ_{ac} N/cm ²	τ_w N/cm ²	σ_w N/cm ²	MD N/cm ²	D _{ap} KN/m ³	U %	% área colada
ADESIVO À BASE DE RESINA RESORCINOL								
01	V ₁ -P ₂ -C	846 500	1349 3411	4515 5940	934790 476010	8.00 7.80	12.00 12.00	101 64
02	V ₂ -P ₂ -C	551 566	1703 2654	3966 4492	419150 1093190	7.90 6.50	12.00 12.00	79 92
03	V ₃ -P ₂ -C	539 644	1939 2359	4350 5099	392520 556420	8.50 7.90	12.00 12.00	89 69
04	V ₄ -P ₂ -C	411 509	1481 2184	3334 3843	727510 1143050	6.30 6.10	12.00 12.00	46 93
05	V ₅ -P ₂ -C	398 355	1693 2184	5681 5660	169580 512010	8.30 7.70	12.00 12.00	58 90
06	V ₆ -P ₂ -C	540 502	1610 2190	4651 4489	317640 481000	7.80 7.00	12.00 12.00	99 91
07	V ₇ -P ₂ -C	974 555	1680 3725	3027 5293	1209210 866120	7.30 6.90	12.00 12.00	100 97

TABELA 28 - Continuação - RESULTADOS CORRIGIDOS ----- RESORCINOL

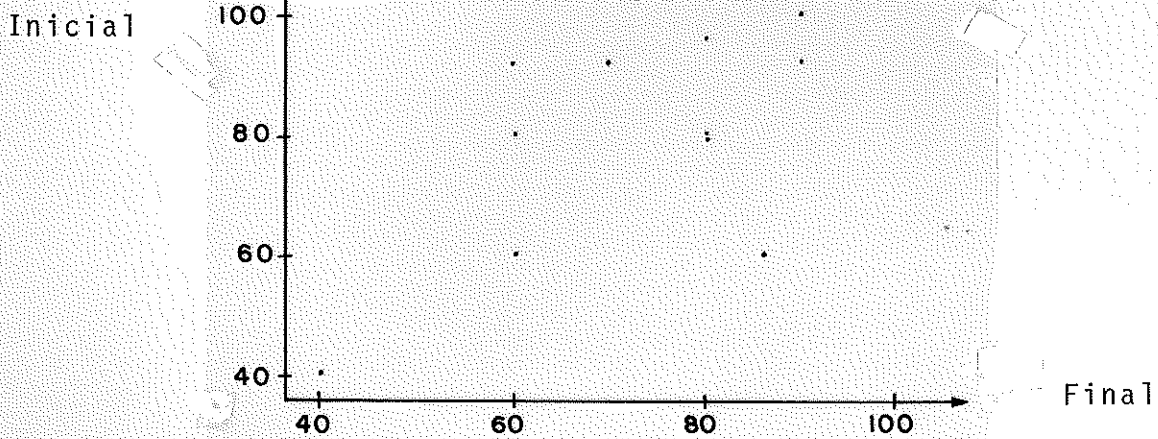
Nº	corpo de prova	τ_{ac} N/cm ²	τ_w N/cm ²	σ_w N/cm ²	MD N/cm ²	D _{ap} KN/m ³	U %	% área colada
08	V ₈ -P ₂ -C	663	1419	4521	486120	8.20	12.00	93
		542	2235	5711	771480	7.10	12.00	96
09	V ₉ -P ₂ -C	653	1713	4745	440750	8.00	12.00	70
		663	2146	4830	691830	6.60	12.00	97
10	V ₁₀ -P ₂ -C	441	1563	4852	352410	8.10	12.00	53
		441	2259	5118	741890	7.60	12.00	90
11	V ₁₁ -P ₂ -C	485	1622	5202	394370	8.30	12.00	64
		439	2608	6078	596260	7.20	12.00	91
ADESIVO À BASE DE RESINA EPOXI								
01	V ₁ -P ₂ -A	225	1362	4536	1425900	8.10	12.00	106
		109	3407	5660	614930	7.60	12.00	89
02	V ₂ -P ₂ -A	316	1692	4001	1248450	8.00	12.00	95
		277	2657	4362	649630	6.40	12.00	89
03	V ₃ -P ₂ -A	322	1852	4250	1041030	8.40	12.00	94
		228	2434	4950	385100	8.00	12.00	63
04	V ₄ -P ₂ -A	313	1535	3432	856770	6.30	12.00	82
		188	2190	4307	506910	7.00	12.00	77
05	V ₅ -P ₂ -A	655	1704	5502	1373690	8.30	12.00	102
		175	2220	5382	506900	8.10	12.00	83
06	V ₆ -P ₂ -A	361	1632	4682	973360	7.70	12.00	90
		162	2132	5735	464910	7.10	12.00	66
07	V ₇ -P ₂ -A	364	1700	3102	2100550	7.50	12.00	125
		287	3763	3907	633020	7.10	12.00	90
08	V ₈ -P ₂ -A	751	1502	4495	1409210	8.30	12.00	107
		723	2220	5147	1721000	6.70	12.00	101
09	V ₉ -P ₂ -A	354	1654	4802	1166640	7.90	12.00	95
		153	2280	4759	677240	6.90	12.00	95
10	V ₁₀ -P ₂ -A	203	1605	4832	963400	8.00	12.00	73
		202	2566	4853	395710	7.40	12.00	64
11	V ₁₁ -P ₂ -A	207	1592	5182	683670	8.40	12.00	60
		90	2624	6078	369800	7.00	12.00	46



a - Gráfico tensão de cisalhamento inicial x final



b - Gráfico módulo de deformação inicial x final



c - Gráfico porcentagem de área colada inicial x final

Fig. 177 - Características da ligação adesiva inicial x final (epoxi)

Análise do quociente

Na tabela 29, encontram-se as hipóteses da análise do quociente das características da ligação adesiva à base de resorcinol ser igual a 1. A partir da análise desta tabela, conclui-se es

tatisticamente, com risco de 5%, o seguinte:

- A tensão de cisalhamento na linha adesiva não varia com a mudança da umidade relativa do ar e da temperatura.
- O módulo de deformação não varia com as mudanças da temperatura e da umidade relativa do ar.
- A porcentagem de área colada permanece constante com a variação da temperatura e da umidade relativa do ar.

TABELA 29 - ANÁLISE DA HIPÓTESE DO QUOCIENTE DAS CARACTERÍSTICAS DA LIGAÇÃO ADESIVA ----- ADESIVO RESORCINOL					
CP inicial	média	Des.Pad	t_{cal}	interv. conf. 95% de signif.	OBSERVAÇÕES
CP final	TENSÃO DE CISALHAMENTO				$t_{cr} = 2.228$
tensão de cisalhamento	1.143	0.311	1.528	0.934, 1.352	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ o quociente pode ser considerado igual a 1
	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO				$t_{cr} = 2.228$
módulo de deformação	0.806	0.461	1.393	0.497, 1.116	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ o quociente pode ser considerado igual a 1
	PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA				$t_{cr} = 2.228$
porcentagem área colada	0.894	0.339	1.036	0.666, 1.122	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ o quociente pode ser considerado igual a 1

Na tabela 30. encontram-se a análise das hipóteses das características da ligação adesiva à base de resina epoxi, ser igual a 1. Através da análise desta tabela conclui-se estatisticamente, com risco de 5%, o seguinte:

- A tensão de cisalhamento da linha adesiva diminui consideravelmente com a mudança da temperatura e da umidade relativa do ar, podendo variar entre 28% e 138%.
- O módulo de deformação também diminui com a mudança da temperatura e da umidade relativa do ar, podendo variar entre 69% e 159%.

- A porcentagem de área colada, diminui com a mudança da umidade relativa do ar, podendo variar entre 1% e 32%.

TABELA 30 - ANÁLISE DA HIPÓTESE DO QUOCIENTE DAS CARACTERÍSTICAS DA LIGAÇÃO ADESIVA ----- ADESIVO EPOXI					
CP.inicial	média	Des.Pad	t_{cal}	interv. conf. 95% de signif.	OBSERVAÇÕES
CP.final	TENSÃO DE CISALHAMENTO				$t_{cr} = 2.228$
TENSÃO DE CISALHAMENTO	1.834	0.815	3.395	1.287, 2.382	$t_{cal} > t_{cr} \rightarrow$ o quociente não pode ser considerado igual a 1
	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO				$t_{cr} = 2.228$
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	2.144	0.664	5.715	1.698, 2.590	$t_{cal} > t_{cr} \rightarrow$ o quociente não pode ser considerado igual a 1
	PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA				$t_{cr} = 2.228$
PORCENTAGEM ÁREA COLADA	1.211	0.166	4.199	1.094, 1.320	$t_{cal} > t_{cr} \rightarrow$ o quociente não pode ser considerado igual a 1

Análise da diferença

Na tabela 31, encontram-se as hipóteses da diferença das características da ligação adesiva, à base de resorcinol, ser nula. Através da análise desta tabela se confirmam as conclusões mencionadas na análise do quociente.

Na tabela 32, encontram-se as hipóteses da diferença das características da ligação adesiva, à base de epoxi, ser nula. A partir da análise desta tabela se confirmam as conclusões mencionadas na análise do quociente.

TABELA 31 - ANÁLISE DA HIPÓTESE DA DIFERENÇA DAS CARACTERÍSTICAS DA LIGAÇÃO ADESIVA ----- ADESIVO RESORCINOL

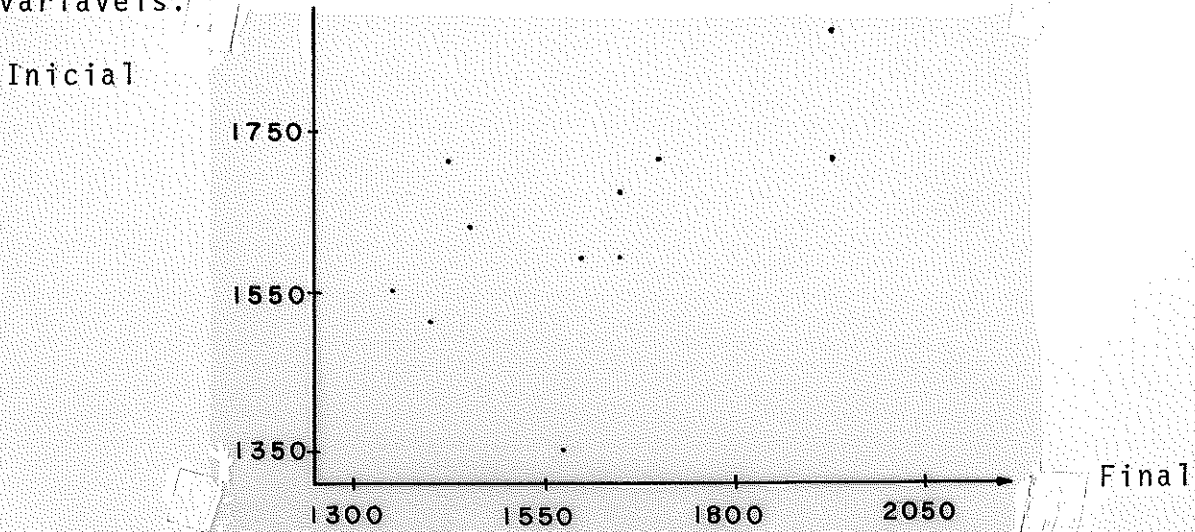
CP.inicial	média	Des.Pad	t_{cal}	interv. conf. 95% de signif.	OBSERVAÇÕES
CP.final	TENSÃO DE CISALHAMENTO				$t_{cr} = 2.228$
TENSÃO DE CISALHAMENTO	-71.50	167.0	1.420	-183.9 , 40.9	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ a diferença pode ser considerada nula.
	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO				$t_{cr} = 2.228$
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	17138	32293	1.760	-45622 , 388389	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ a diferença pode ser considerada nula.
	PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA				$t_{cr} = 2.228$
PORCENTAGEM ÁREA COLADA	13.08	29.80	1.460	-6.91 , 33.07	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ a diferença pode ser considerada nula.

TABELA 32 - ANÁLISE DA HIPÓTESE DA DIFERENÇA DAS CARACTERÍSTICAS DA LIGAÇÃO ADESIVA ----- ADESIVO EPOXI

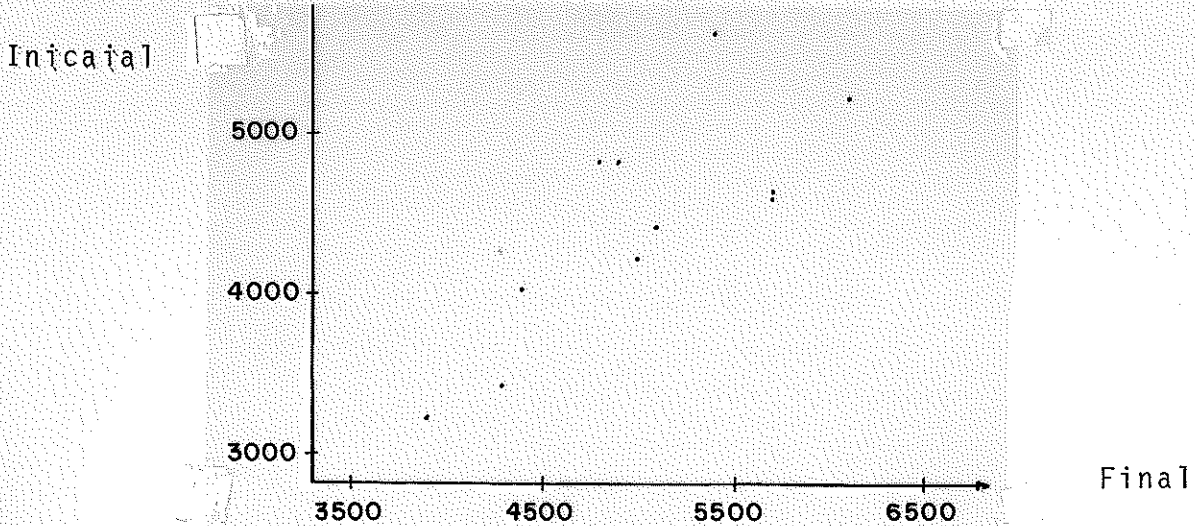
CP.inicial	média	Des.Pad	t_{cal}	interv. conf. 95% de signif.	OBSERVAÇÕES
CP.final	TENSÃO DE CISALHAMENTO				$t_{cr} = 2.228$
TENSÃO DE CISALHAMENTO	-134.1	131.0	3.390	-222.4 , -45.9	$t_{cal} > t_{cr} \rightarrow$ a diferença não pode ser considerada nula.
	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO				$t_{cr} = 2.228$
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	-574320	431460	4.415	-864250 , -28438	$t_{cal} > t_{cr} \rightarrow$ a diferença não pode ser considerada nula.
	PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA				$t_{cr} = 2.228$
PORCENTAGEM ÁREA COLADA	-15.16	11.80	4.276	-23.06 , -7.25	$t_{cal} > t_{cr} \rightarrow$ a diferença não pode ser considerada nula.

2.2.2 - VARIABILIDADE DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO
E COMPRESSÃO PARALELA DA MADEIRA

Nas figuras 178-a e 178-b, encontram-se os gráficos da tensão de cisalhamento, inicial x final e da tensão de compressão paralela inicial x final, respectivamente. Nota-se, nestes gráficos, a existência de uma proporcionalidade definida por uma reta inclinada a 45° , indicando que não existe diferença entre as duas variáveis.



a - Tensão de cisalhamento inicial x final



b - Tensão de compressão paralela inicial x final

Fig. 178 - Gráficos das características mecânicas da madeira

A verificação estatística da afirmação anterior, também foi feita segundo as análises indicadas no item anterior.

Análise do quociente

Na tabela 33, encontram-se as hipóteses do quociente, das tensões de cisalhamento e das tensões de compressão paralela da madeira, ser igual a 1. A partir da análise desta tabela, conclui-se estatisticamente, com risco de 5%, o seguinte:

- A tensão de cisalhamento e a tensão de compressão paralela da madeira não variam com as mudanças da temperatura e da umidade relativa do ar.

TABELA 33 - HIPÓTESE DO QUOCIENTE DAS TENSÕES DA MADEIRA					
CP.inicial	média	Des.Pad	t_{cal}	interv. conf. 95% de signif.	OBSERVAÇÕES
CP.final	TENSÃO DE CISALHAMENTO				$t_{cr} = 2.080$
TENSÃO DE CISALHAMENTO	0.956	0.250	0.600	0.788, 1.124	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ o quociente pode ser considerado igual a 1
	TENSÃO DE COMPRESSÃO PARALELA				$t_{cr} = 2.080$
TENSÃO DE COMPRESSÃO	0.935	0.230	0.930	0.781, 1.089	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ o quociente pode ser considerado igual a 1

Análise da diferença

Na tabela 34, encontram-se as hipóteses da diferença das tensões de cisalhamento e de compressão paralela inicial e final ser nula. Através da análise desta tabela, confirma-se a conclusão mencionada na análise do quociente.

TABELA 34 - HIPÓTESE DA DIFERENÇA DAS TENSÕES DA MADEIRA					
CP.inicial	média	Des.Pad	t_{cal}	interv. conf. 95% de signif.	OBSERVAÇÕES
CP.final	TENSÃO DE CISALHAMENTO				$t_{cr} = 2.080$
TENSÃO DE CISALHAMENTO	21.50	78.00	0.910	-30.89 , 73.90	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ a diferen- ça pode ser considera- da nula.
	TENSÃO DE COMPRESSÃO PARALELA				$t_{cr} = 2.080$
TENSÃO DE COMPRESSÃO	20.10	74.00	0.900	-2.961 , 69.81	$t_{cal} < t_{cr} \rightarrow$ a diferen- ça pode ser considera- da nula.

CAP 05 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DAS FIBRAS NO CISALHAMENTO

1 - INTRODUÇÃO

As tensões de cisalhamento na compressão, na tração, na flexão e na torção, em função da inclinação das fibras, foi avaliada através de ensaios em modelos reduzidos.

Na montagem dos corpos de prova, foi aplicada uma pequena pressão para desenvolver a adesão.

Através de cuidadosa análise estatística foi possível determinar os parâmetros de variabilidade das tensões com a inclinação das fibras da madeira, as tensões características corrigidas para umidade padrão de 12% e finalmente, com análise de experimentação fatorial e análise de regressão, do conjunto de dados, foi possível definir correlações importantes entre os diferentes tipos de solicitações e as tensões de cisalhamento na linha adesiva.

2 - CISALHAMENTO DA LINHA ADESIVA NA COMPRESSÃO INCLINADA ÀS FIBRAS

2.1 - DETERMINAÇÃO DA CARGA DE RUPTURA NO MODELO

A determinação da carga de ruptura do modelo, em escala reduzida, foi feita a partir das dimensões adotadas no capítulo II e de análise de tensões. Na figura 179 é apresentado o modelo do corpo de prova utilizado e suas dimensões.

Na figura 180 é apresentada a distribuição de tensões normais à linha adesiva. Analogamente às equações desenvolvidas no item 2.1.1 do capítulo II, estas tensões serão:

$$\sigma_{cn} = \frac{N \cdot c}{2 \cdot y' \cdot a \cdot z} \quad , \quad \sigma_{tn} = \frac{3 \cdot N \cdot c}{2 \cdot y'' \cdot a \cdot z} \quad , \quad \tau_{ac} = \frac{N}{a \cdot L_c}$$

sendo:

σ_{cn} = tensão de compressão normal à linha adesiva
 σ_{tn} = tensão de tração normal à linha adesiva

τ_{ac} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na compressão

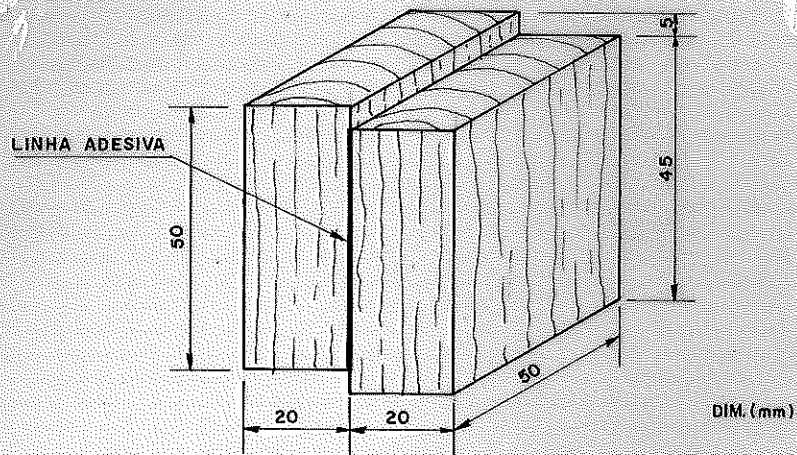


FIG. 179- MODELO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO CISCALHAMENTO NA COMPRESSÃO

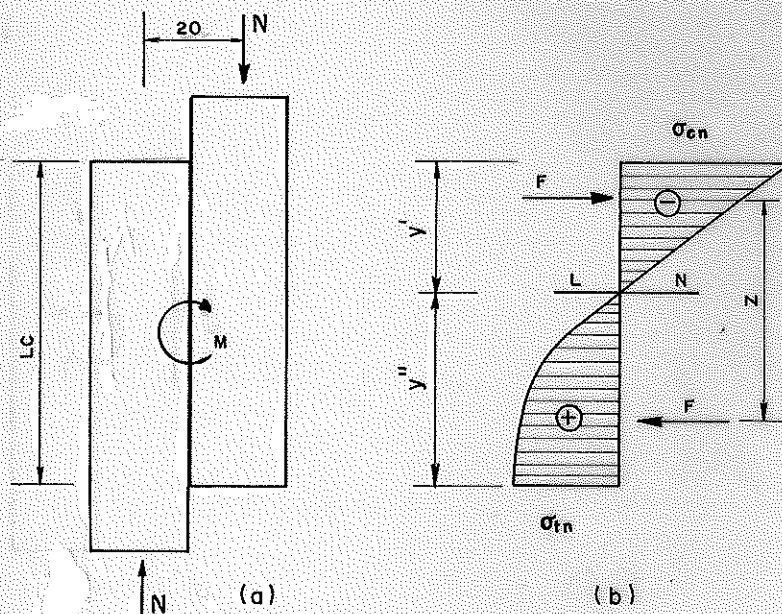


FIG. 180- a) EQUILÍBRIO ESTÁTICO
b) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

Considerando-se as expressões de y' , y'' e z , apresentadas no apêndice D, e substituindo os valores conhecidos, obtêm-se:

$$y' = \frac{L_c}{\left(\frac{3 \cdot f_{wcn}}{4 \cdot f_{wtn}} + 1\right)} = 2.069 \text{ cm}$$

$$y'' = \frac{L_c}{\left(\frac{4 \cdot f_{wtn}}{3 \cdot f_{wcn}} + 1\right)} = 2.899 \text{ cm}$$

$$z = 2/3 \cdot y' + 5/8 \cdot y'' = 2.899 \text{ cm}$$

sendo:

f_{wcn} = resistência da madeira à compressão normal às fibras

f_{wtn} = resistência da madeira à tração normal às fibras

Desta maneira, as cargas de ruptura serão:

$N = 39500 \text{ N}$ → correspondente à compressão normal

$N = 39500 \text{ N}$ → correspondente à tração normal

$N = 29250 \text{ N}$ → correspondente ao cisalhamento

Assim, a ruptura do modelo ocorrerá por cisalhamento da Tinha adesiva, com carga aproximadamente de 30 KN.

2.2 - O ENSAIO

Os objetivos deste ensaio são a determinação da tensão de cisalhamento na compressão em função da inclinação das fibras da madeira e a determinação da correlação desta com as características mecânicas da madeira. Para o estudo da variação da tensão de cisalhamento da ligação adesiva em função da direção das fibras foi realizada a terceira série de ensaios. Os corpos de prova foram retirados de 10 vigas distintas de Peroba Rosa, escolhidas ao acaso. De cada viga foram montados 7 corpos de prova com adesivos à base de resorcinol, mudando a direção das fibras, conforme figura 181.

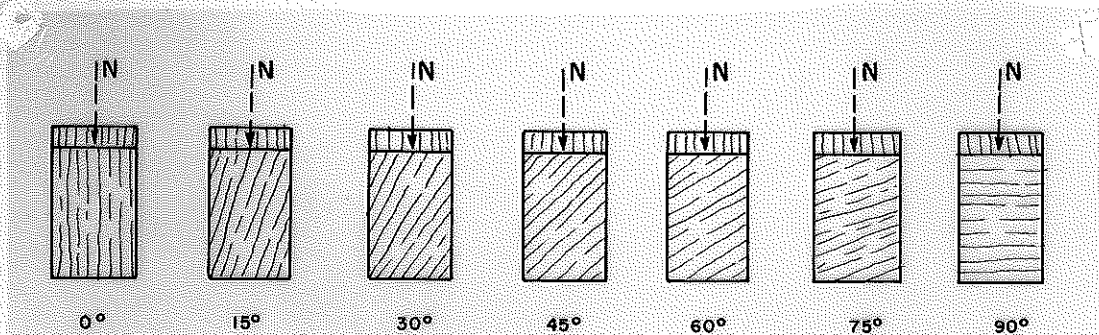


FIG.181- VARIACÃO DA INCLINAÇÃO DAS FIBRAS EM RELAÇÃO À CARGA APLICADA

Um dos elementos dos corpos de prova tem as fibras inclinadas em relação à aplicação da carga.

Concluída a execução dos corpos de prova numerou-se como segue:

CP-C- θ

sendo:

CP = corpo de prova

C = compressão

θ = inclinação θ das fibras

Com a utilização de um paquímetro foram medidos os corpos de prova.

2.3 - MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados na máquina universal Amsler.

A velocidade de aplicação da carga variou à razão de 2.5 MPa por minuto, até alcançar a ruptura do corpo de prova, figura 182. Na figura 183, é mostrado a ruptura de alguns corpos de prova.

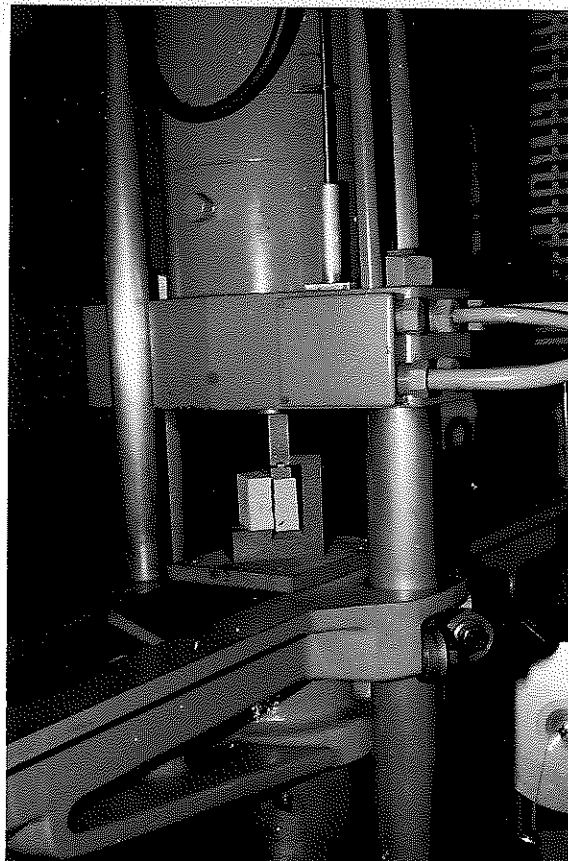


Fig. 182 - Ensaio de cisalhamento da ligação na compressão



Fig. 183 - Ruptura dos corpos de prova de cisalhamento na compressão

Estes corpos de prova foram retirados conjuntamente com os corpos de prova de cisalhamento da linha adesiva na tração, na flexão, na torção e cisalhamento, compressão paralela, umidade e densidade da madeira, constituindo a terceira série de ensaios.

Os ensaios de caracterização da madeira foram realizados de acordo com o método de ensaio apresentado anteriormente.

Durante a execução dos ensaios observou-se normalmente o corrência de ruptura instantânea dos corpos de prova, configurando-se a ruptura frágil.

2.4 - COLEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Dos 70 corpos de prova ensaiados foram obtidos para cada um: a área colada (A_c) e a carga de ruptura.

A tensão de cisalhamento inclinada às fibras é obtida imediatamente.

$$\tau_{ace} = \frac{N_{rup}}{A_c}$$

sendo:

$$A_c = \text{área colada}$$

τ_{ace} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras inclinadas

N_{rup} = carga de ruptura de cisalhamento na compressão inclinada às fibras

Os resultados destes ensaios são apresentados na tabela 35.

2.5 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Foi traçado, no micro-computador HP-9825B, o gráfico da tensão de cisalhamento da ligação adesiva x inclinação das fibras (resultados obtidos nos ensaios) e o valor médio para cada inclinação, indicado no gráfico com a letra M. Como primeira orientação, foi admitida a equação de Hankinson com expoente 2, como sendo representativa dos valores médios dos ensaios. Na determinação da curva de Hankinson, foi admitida a tensão de cisalhamento paralela e normal às fibras como sendo igual à média dos valores obtidos nos ensaios. Na figura 184 encontra-se esta curva determinada a partir da equação apresentada a seguir:

$$\tau_{ace} = \frac{\tau_{acp} \cdot \tau_{acn}}{\tau_{acp} \cdot \text{Sen}^2(\theta) + \tau_{acn} \cdot \text{Cos}^2(\theta)}$$

sendo:

τ_{ace} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras inclinadas

τ_{acp} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras paralelas

τ_{acn} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na compressão, com as fibras normais

θ = ângulo formado entre a direção da força aplicada e o sentido das fibras da madeira.

TABELA 35 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO INCLINADA

VIGA	INCLINAÇ.	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	D _{ap} KN/m ³	U %
	N/cm ²									
1	τ_{ac}	1110	1070	1060	790	670	420	370	7.80	12.99
	τ_{TW}	1520	1250	1190	1290	980	880	820		
	σ_w	5050	3720	3330	3400	2040	1890	1650		
2	τ_{ac}	1420	1180	1090	950	950	830	710	7.10	11.88
	τ_{TW}	1720	1550	1440	1140	1300	1020	980		
	σ_w	4820	3810	3430	1880	1450	1320	1290		
3	τ_{ac}	910	850	720	620	570	320	210	8.50	12.70
	τ_{TW}	2110	1660	1390	1160	1140	1150	1230		
	σ_w	4740	3770	2910	2100	2110	1630	1530		
4	τ_{ac}	1560	1590	1050	900	700	670	440	8.60	11.44
	τ_{TW}	2030	1990	1500	1290	1330	1370	1150		
	σ_w	6200	5120	3630	2310	1710	1700	1500		
5	τ_{ac}	1450	1390	800	670	930	790	650	7.10	13.95
	τ_{TW}	1830	900	930	1160	1130	1080	750		
	σ_w	4140	3520	2490	1650	1220	870	710		
6	τ_{ac}	1100	990	760	800	760	740	430	6.90	16.21
	τ_{TW}	1250	1260	1350	1030	1150	800	730		
	σ_w	4070	3070	1390	1320	1000	660	540		
7	τ_{ac}	910	730	590	560	460	470	390	7.20	18.79
	τ_{TW}	1050	1000	910	800	700	610	540		
	σ_w	2620	2650	650	400	340	220			
8	τ_{ac}	1000	1390	1020	620	770	600	600	7.40	22.52
	τ_{TW}	1100	910	760	730	740	510	530		
	σ_w	2840	2110	1130	530	350	260	190		
9	τ_{ac}	1050	990	750	670	880	550	500	7.60	22.02
	τ_{TW}	1220	1180	1030	1180	710	840	730		
	σ_w	5090	3280	2320	1740	1500	1200	1080		
10	τ_{ac}	1120	970	960	950	780	750	530	7.30	25.33
	τ_{TW}	1270	1150	880	960	850	790	820		
	σ_w	3340	3510	1800	1500	1230	970	920		
MÉDIAS	τ_{ac}	1160	1030	880	750	750	610	480	7.60	16.78
	τ_{TW}	1510	1280	1140	1070	1000	910	830		
	σ_w	4260	3460	2460	1610	1300	1080	980		

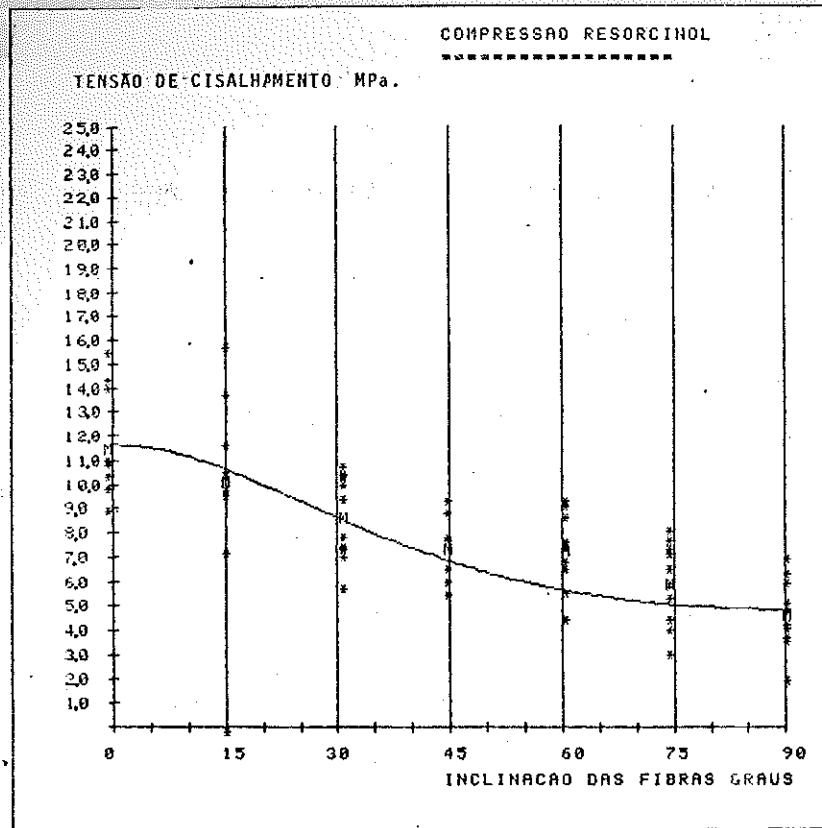


Fig. 184 - Tensão de cisalhamento na compressão x inclinação das fibras

Utilizando um programa no micro-computador HP-85 e os princípios descritos no apêndice E, para comparação de pares de indivíduos e grupos de indivíduos (teste de diferença nula), foram comparados os valores experimentais com os equivalentes calculados pela fórmula de Hankinson. A seguir é mostrada a listagem dos resultados obtidos com a aplicação deste programa e a sua análise.

Diferença de pares de valores

```

CARACTERISTICAS INDIVIDUAIS
MEDIA      =      19.21
VARIA.    =      641.69
D.PAD.    =      29.01
E.PAD.    =      10.97

INTERVALOS DE CONFIANCA
-12.2<=pd(MED.DAS DIF.)<= 1.81

O INTERVALO CONTEM O ZERO A HIPO
TESE DE NULIDADE E SIGNIFICANTE
t=          1.7515<t05= 2.4469
    
```

Diferença de grupos de indivíduos

CARACTERISTICAS INDIVIDUAIS			
MEDIA	1=	53.75	MEDIA 2= 34.54
VARIA.	1=	1499.94	VARIA. 2=1221.95
D.PAD.	1=	38.73	D.PAD. 2= 34.96
E.PAD.	1=	14.64	E.PAD. 2= 13.21
CARACTERISTICAS DAS DIFERENCIAS			
VARIANCA	=	388.84	
DES.PADR.	=	19.72	
ERR.PADR.	=	7.45	
ERR.PADR.CONJ.	=	10.54	
INTERVALO DE CONFIANCA			
		-6.58	<=μ1-μ2=< 45.00
O INTERVALO CONTEM O ZERO A HIPO TESE DE NULIDADE E SIGNIFICANTE			
t=		1.8222	<t05 2.4469

Desta maneira, sendo significativa a hipótese nula da diferença, a fórmula de Hankinson pode ser considerada, estatisticamente, válida para a determinação da tensão de cisalhamento da ligação adesiva na compressão inclinada às fibras. Mas, não implica ser a melhor equação para representar os resultados experimentais.

Para verificar a melhor adequação da equação de Hankinson modificada, isto é, com expoente genérico,

$$\tau_{ace} = \frac{\tau_{acp} \cdot \tau_{acn}}{\tau_{acp} \cdot \text{Sen}^n(\theta) + \tau_{acn} \cdot \text{Cos}^n(\theta)}$$

foram realizados vários testes de diferença nula, variando o expoente n na equação de Hankinson. Na tabela 36 são apresentados estes testes.

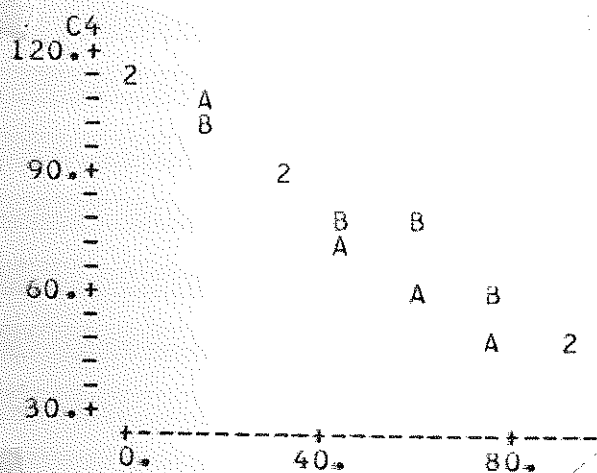
A maior significância da diferença nula e a melhor adaptabilidade das curvas foi obtida com o expoente $n = 2.15$. Assim, a equação de Hankinson que obteve maior adequação aos valores experimentais foi:

$$\tau_{ace} = \frac{\tau_{acp} \cdot \tau_{acn}}{\tau_{acp} \cdot \text{Sen}^{2.15}(\theta) + \tau_{acn} \cdot \text{Cos}^{2.15}(\theta)}$$

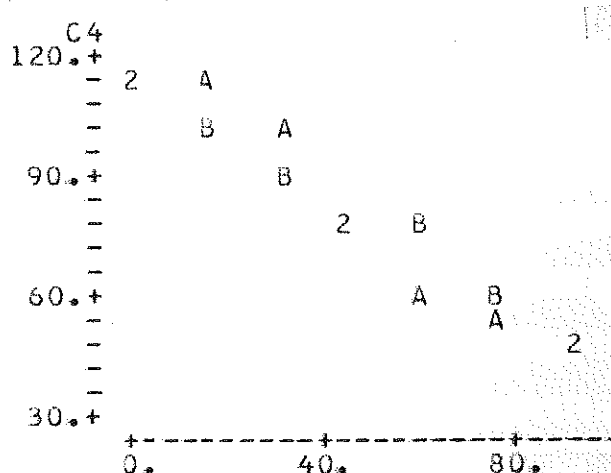
TABELA 36 - RESULTADOS DOS TESTES DE DIFERENÇA NULA, PARA VALORES DA EQUAÇÃO DE HANKINSON VARIANDO O EXPOENTE n - NÍVEL DE SIGNIF. 95%

DIFERENÇA DOS VALORES CALCULADOS E OS EXPERIMENTAIS	RESULTADOS EXPERIMENTAIS				OBSERVAÇÕES
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	t_{ca1}	INTERVALO DE CONFIANÇA	
Expoen. 1.70	-93.5	81.1	3.052	-168.6, -18.3	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 1.85	-72.6	76.5	2.510	-143.4, - 1.8	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 2.00	-51.8	76.4	1.752	-122.5, 18.1	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.15	-31.2	80.7	1.022	-105.8, 43.5	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.30	-10.6	89.1	0.316	-93.0, 71.8	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas
Expoen. 2.45	9.9	101.0	0.260	-83.2, 103.1	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas
Expoen. 2.60	30.5	115.0	0.701	-75.9, 136.8	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas

A representação gráfica da equação anterior, encontra-se na figura 185. Os pontos marcados com a letra B referem-se aos resultados experimentais, os marcados com a letra A referem-se aos resultados calculados com a equação de Hankinson e o número 2 significa que o resultado experimental e calculado coincidiram.



n = 2.15



n = 2.45

Fig. 185 - Representação gráfica da fórmula de Hankinson e os resultados experimentais

2.5.1 - CORREÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NAS TENSÕES τ_{acp} E τ_{acn}

Admitindo que os resultados experimentais da tensão de cisalhamento paralelo e normal às fibras possam ser representados por modelos matemáticos semelhantes aos propostos para os resultados experimentais das tensões de cisalhamento em escala natural, foram pesquisadas várias regressões lineares múltiplas, para τ_{acp} e τ_{acn} , obtendo-se os modelos a seguir:

$$\text{Log}(\tau_{acp})/D = 0.514 - 0.117.U + 0.0028.U^2 + 2.50.D^{-1}$$

$$\text{Log}(\tau_{acn})/D = 1.220 - 0.452.U + 0.0135.U^2 + 3.57.D^{-1}$$

transformando, obtêm-se:

$$\text{Log}(\tau_{acp}) = 2.50 + 0.514.D - 0.117.U.D + 0.0028.U^2.D$$

$$\text{Log}(\tau_{acn}) = 3.57 + 1.220.D - 0.452.U.D + 0.0135.U^2.D$$

Os coeficientes de regressão múltipla foram: $R^2 = 94.2\%$ e $R^2 = 89.6\%$ para τ_{acp} e τ_{acn} , respectivamente.

A partir destes modelos foram feitas as correções da influência da umidade e da densidade. A seguir são apresentadas as equações de correção:

$$\text{Log}(\tau_{acp})_{12i} = \text{Log}(\tau_{acp})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$\text{Log}(\tau_{acn})_{12i} = \text{Log}(\tau_{acn})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$U_{12i} = 12\%$$

Os resultados destas correções encontram-se na tabela 37.

2.5.2 - RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS

Na tabela 37, encontram-se os parâmetros estatísticos das tensões de cisalhamento na compressão paralela e normal às fibras.

TABELA 37 - CORREÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

DISCRIMI. TENSÕES N/cm ²	VALORES EXPERIMENTAIS CORRIGID.					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CONFIANÇA
	1	3	5	7	9			
	2	4	6	8	10			
τ_{acp}	1213 1400	969 1490	1632 1457	1259 1280	1172 1171	1304	192	1166.8 , 1442.2
τ_{acn}	428 693	249 379	848 625	526 594	714 394	548	187	414.4 , 681.4

As resistências características serão:

$$f_{scpk} = 989.0 \text{ N/cm}^2 \quad \text{e} \quad f_{scnk} = 241.0 \text{ N/cm}^2$$

A equação mais adequada de Hankinson, considerando as resistências características \bar{e} :

$$f_{sc\theta k} = \frac{f_{scpk} \cdot f_{scnk}}{f_{scpk} \cdot \text{Sen}^{2 \cdot 15}(\theta) + f_{scnk} \cdot \text{Cos}^{2 \cdot 15}(\theta)}$$

sendo:

f_{scpk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão paralela às fibras

f_{scnk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão normal às fibras

$f_{sc\theta k}$ = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão inclinada às fibras

A representação gráfica desta equação encontra-se na figura 186.

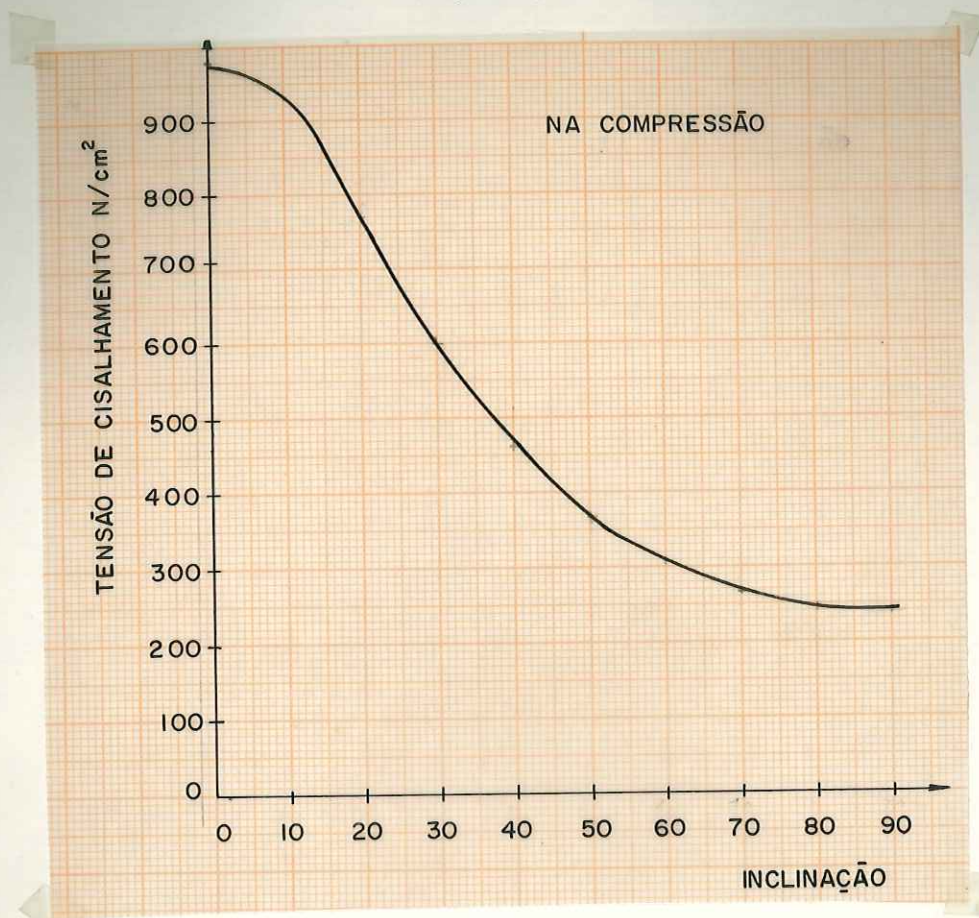


Fig. 186 - Representação gráfica da equação de Hankinson com as rest. características e expoente $n = 2.15$

3 - LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA TRAÇÃO

A finalidade deste ensaio é a determinação da tensão de cisalhamento na tração em função da inclinação das fibras da madeira. O modelo de ensaio apresentado no capítulo II, item 3.3.1, foi idealizado a partir do corpo de prova proposto por Hellmeister (67)

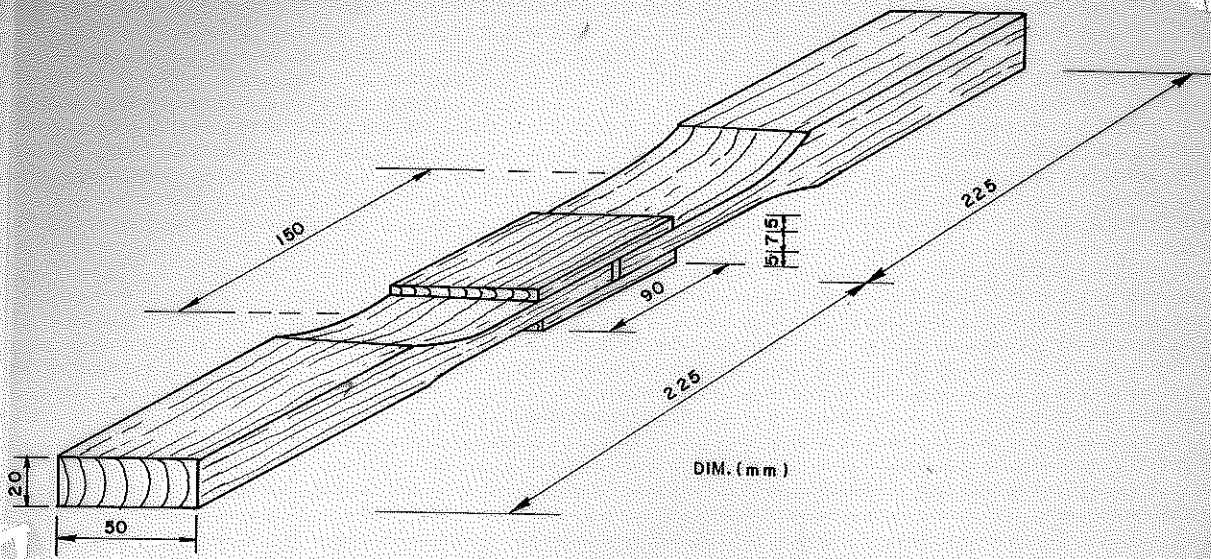
Os corpos de prova foram montados na terceira série de ensaios num total de 70 corpos de prova.

Para determinar as tensões de cisalhamento em função da inclinação das fibras, foram confeccionadas as cobrejuntas dos corpos de prova, variando a inclinação das fibras em relação à carga aplicada, figura 187.

Concluída a montagem dos corpos de prova, numerou-se e determinou-se as dimensões dos corpos de prova, conforme esquema

(67) HELLMEISTER, J.H. - Op. cit.

definido na figura 188.



COBREJUNTAS

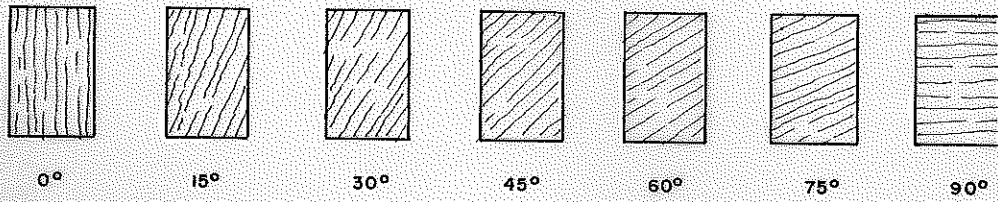


FIG.187-CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO NA TRACÇÃO - COBREJUNTAS INCLINADAS

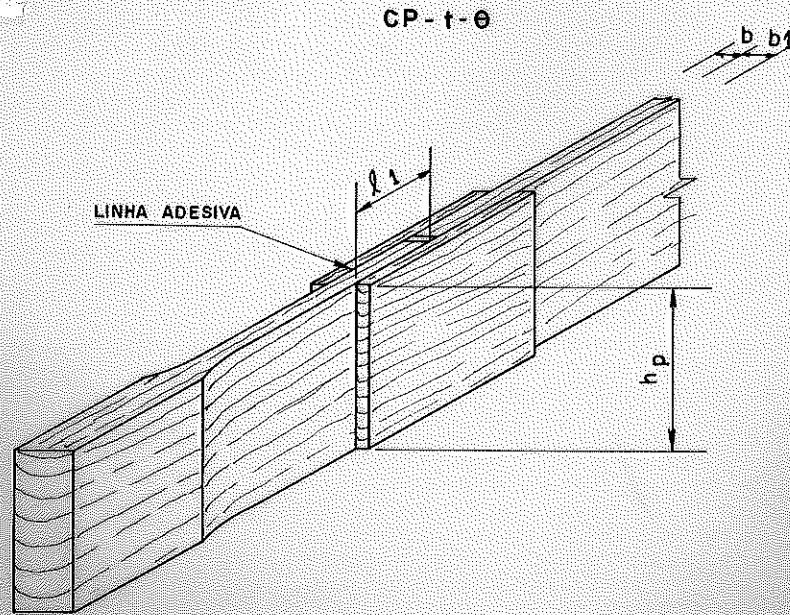


FIG.188-ESQUEMA DA TOMADA DE MEDIDAS

sendo:

CP = corpo de prova

t = tração

θ = inclinação das fibras em relação à aplicação da carga

b = espessura da peça principal

b_1 = espessura da peça cobrejunta

h_p = menor largura da área colada

l_1 = menor comprimento da área colada

3.1 - MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios Amsler (figura 189), com velocidade de aplicação de carga à razão de 10 MPa por minuto, até alcançar a ruptura, figura 190.

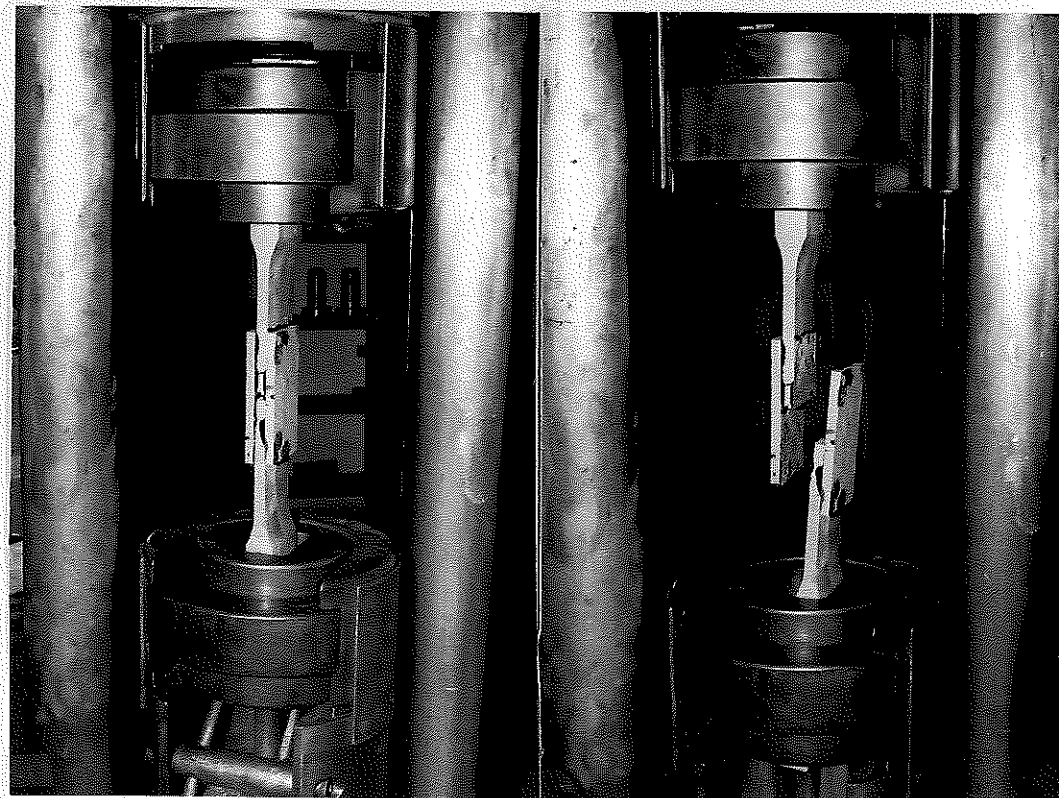


Fig. 189 - Ensaio de cisalhamento na tração

Após a realização dos ensaios, a partir de avaliação visual, estimou-se a porcentagem de área de ruptura e o tipo de ruptura de cada corpo de prova. Foram obtidos os dados apresentados na tabela 38.

Observando-se a tabela 38 e a figura 191, tem-se; a partir de uma inclinação das fibras de 75° o colapso dos corpos de prova ocorrerá devido à tensão de tração nas cobrejuntas. Para uma inclinação das fibras de 45° o colapso do corpo de prova pode ocorrer por ruptura da linha adesiva devido à tensão de cisalhamento ou por ruptura da cobrejunta devido à tensão de tração. Para uma inclinação menor ou igual a 30° o colapso do corpo de prova ocorre por ruptura da linha adesiva, devido à tensão de cisalhamento.

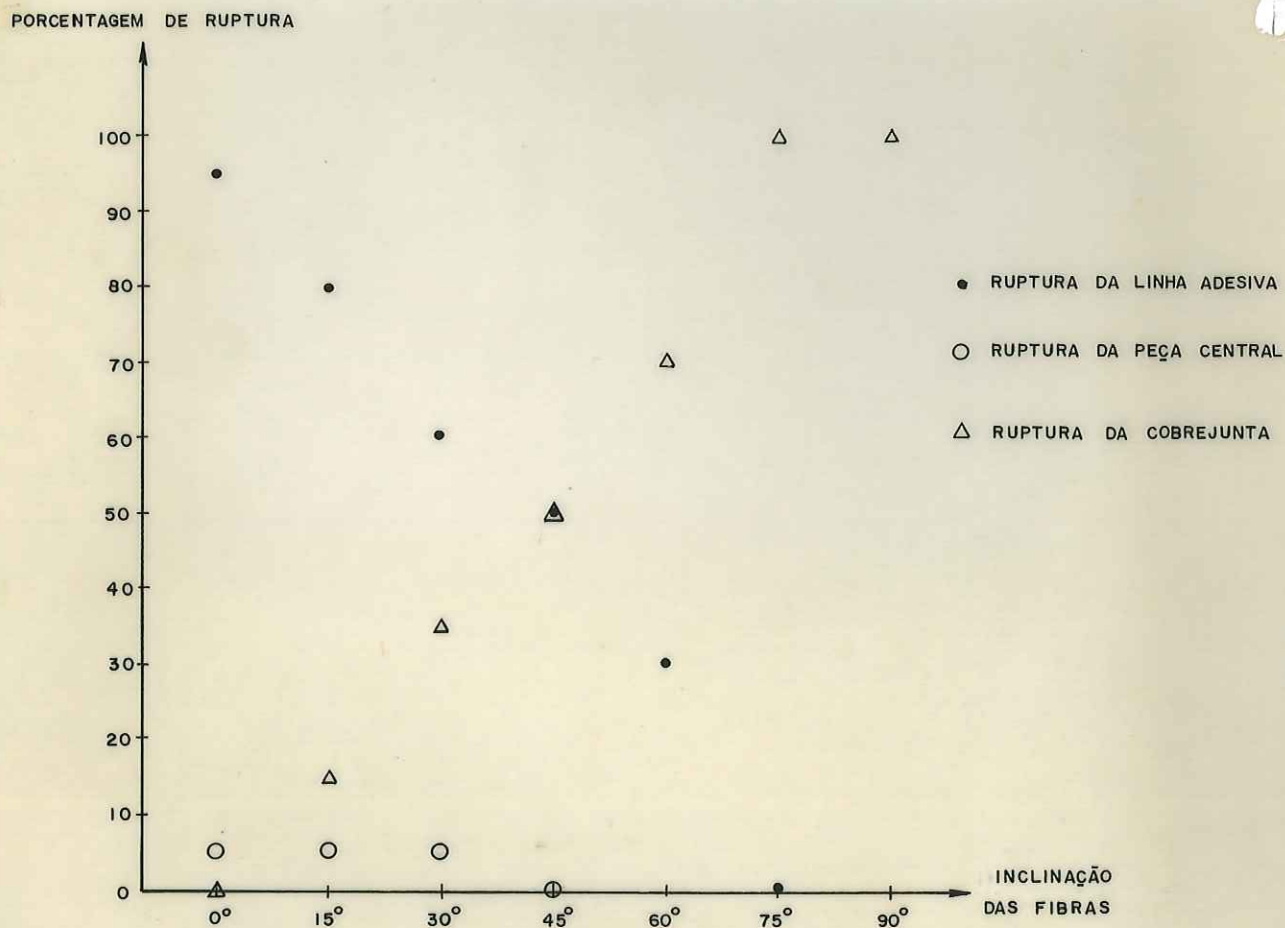


FIG. 191- TIPO DE RUPTURA X INCLINAÇÃO DAS FIBRAS

3.2 - COLEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Para cada um dos 70 corpos de prova ensaiados, foi determinada a menor área colada ($A_c = h_p \cdot l_1$) e a carga de ruptura.

A tensão de cisalhamento na tração inclinada às fibras é determinada imediatamente através da equação a seguir:

$$\tau_{ate} = \frac{N_{rup}}{A_c}$$

sendo:

τ_{ate} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras inclinadas

N_{rup} = carga de ruptura de cisalhamento na tração

A_c = área colada

Na tabela 39, são apresentados os resultados destes ensaios.

3.3 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Na figura 192, encontra-se o gráfico tensão de cisalhamento na tração x inclinação das fibras, mostrando os resultados experimentais, o valor médio destes resultados para cada inclinação das fibras (M) e a curva de Hankinson com expoente 2, determinada a partir das tensões médias normal e paralela às fibras obtidos nos ensaios. A seguir encontra-se a equação de Hankinson com expoente 2.

$$\tau_{ate} = \frac{\tau_{atp} \cdot \tau_{atn}}{\tau_{atp} \cdot \text{Sen}^2(\theta) + \tau_{atn} \cdot \text{Cos}^2(\theta)}$$

sendo:

τ_{ate} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras inclinadas

τ_{atp} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras paralelas

τ_{atn} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na tração, com as fibras normais

Através da análise da hipótese de diferença nula entre os valores experimentais e os determinados pela equação de Hankinson, obtêm-se:

Para a diferença de pares de indivíduos

Intervalo de confiança: (-680.5 , -286.3)

$t_{cal} = 6.345 > t_{cr} = 2.447$

Para a diferença de grupos de indivíduos

Intervalo de confiança: (-623.3 , -238.6)

$$t_{\text{cal}} = 6.237 > t_{\text{cr}} = 2.447$$

Assim, pode-se concluir estatisticamente pela hipótese alternativa, isto é, a fórmula de Hankinson com expoente 2 não é válida para a determinação das tensões de cisalhamento na tração inclinada às fibras.

Para verificar a adequação da fórmula de Hankinson modificada, isto é, com expoente genérico.

$$\tau_{\text{ate}} = \frac{\tau_{\text{atp}} \cdot \tau_{\text{atn}}}{\tau_{\text{atp}} \cdot \text{Sen}^n(\theta) + \tau_{\text{atn}} \cdot \text{Cos}^n(\theta)}$$

foram realizados vários testes de hipóteses de diferença nula variando o valor do expoente n na fórmula de Hankinson. Na tabela 40 estão apresentados estes testes.

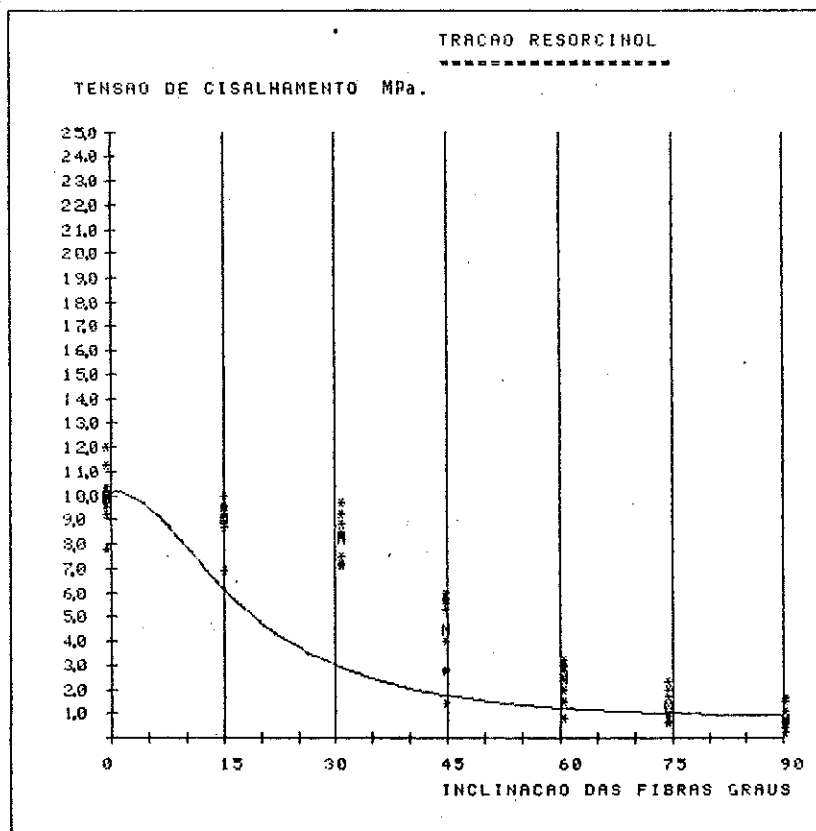


Fig. 192 - Tensão de cisalhamento x inclinação fibras

TABELA 39 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO NA TRAÇÃO INCLINADA										
VIGA	INCLINAÇ.	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	D _{ap} KN/m ³	U %
	N/cm ²									
1	τ_{at}	990	900	870	300	290	190	170	7.80	12.99
	τ_{W}	1520	1250	1190	1290	980	880	820		
	τ_{OW}	5050	3720	3330	3400	2040	1890	1850		
2	τ_{at}	800	710	740	160	100	80	40	7.10	11.88
	τ_{W}	1720	1550	1440	1140	1300	1020	980		
	τ_{OW}	4820	3810	3430	1880	1450	1320	1290		
3	τ_{at}	940	940	850	580	320	220	80	8.50	12.70
	τ_{W}	2110	1660	1390	1160	1140	1150	1230		
	τ_{OW}	4740	3770	2910	2100	2110	1630	1530		
4	τ_{at}	1220	1020	770	590	290	190	130	8.60	11.44
	τ_{W}	2030	1990	1500	1290	1330	1370	1150		
	τ_{OW}	6200	5120	3630	2310	1710	1700	1500		
5	τ_{at}	1050	960	870	620	340	260	180	7.10	13.95
	τ_{W}	1830	900	930	1160	1130	1080	750		
	τ_{OW}	4140	3520	2490	1650	1220	870	710		
6	τ_{at}	1030	890	730	600	260	130	40	6.70	16.21
	τ_{W}	1250	1260	1350	1030	1150	800	730		
	τ_{OW}	4070	3070	1390	1320	1000	660	540		
7	τ_{at}	1150	970	990	420	220	130	90	7.20	18.79
	τ_{W}	1050	1000	910	800	700	610	540		
	τ_{OW}	2620	2650	2160	650	400	340	220		
8	τ_{at}	1010	900	900	290	170	110	90	7.40	22.52
	τ_{W}	1100	910	760	730	740	510	530		
	τ_{OW}	2480	2110	1130	530	350	260	190		
9	τ_{at}	970	960	770	590	310	90	80	7.60	22.02
	τ_{W}	1220	1180	1030	1180	710	840	730		
	τ_{OW}	5090	3280	2320	1740	1600	1200	1080		
10	τ_{at}	1030	980	940	550	320	130	60	7.30	25.33
	τ_{W}	1270	1150	880	960	850	790	820		
	τ_{OW}	3340	3510	1800	1500	1230	970	920		
MÉDIAS	τ_{at}	1020	920	840	470	260	150	95	7.60	16.78
	τ_{W}	1510	1280	1140	1070	1000	910	830		
	τ_{OW}	4260	3460	2460	1610	1300	1080	980		

TABELA 40 - RESULTADOS DOS TESTES DE DIFERENÇA NULA. PARA VALORES DA EQUAÇÃO DE HANKINSON VARIANDO O EXPOENTE n - NÍVEL DE SIGNIF. 95%

DIFERENÇA DOS VALORES CALCULADOS E OS EXPERIMENTAIS	RESULTADOS EXPERIMENTAIS				OBSERVAÇÕES
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	t_{cal}	INTERVALO DE CONFIANÇA	
					$t_{cr} = 2.447$
Expoen. 2.90	-205	221.0	2.451	-409.3 , -0.3	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 3.05	-192	213.0	2.382	-389.5 , 5.3	Hipótese nula aceita
Expoen. 3.35	-167	199.0	2.224	-351.2 , 16.8	Hipótese nula aceita
Expoen. 3.50	-155	192.0	2.137	-332.4 , 22.5	Hipótese nula aceita
Expoen. 3.65	-143	185.0	2.045	-313.7 , 28.1	Hipótese nula aceita
Expoen. 3.80	-131	178.0	1.947	-294.9 , 33.6	Hipótese nula aceita
Expoen. 4.00	-118	171.0	1.838	-276.3 , 39.2	Hipótese nula aceita
Expoen. 4.10	-106	164.0	1.718	-257.9 , 45.2	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas

A maior significância da hipótese de diferença nula e a melhor adaptabilidade das curvas, obteve-se com o expoente $n = 4$. Desta maneira a melhor representação dos resultados experimentais e dada pela equação de Hankinson apresentada a seguir:

$$\tau_{at\theta} = \frac{\tau_{atp} \cdot \tau_{atn}}{\tau_{atp} \cdot \text{Sen}^4(\theta) + \tau_{atn} \cdot \text{Cos}^4(\theta)}$$

Na figura 193, encontra-se a representação gráfica desta equação.

3.3.1 - CORREÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NAS TENSÕES τ_{atp} E τ_{atn}

Admitindo que os resultados experimentais das tensões τ_{atp} e τ_{atn} , possam ser representados por modelos matemáticos semelhantes àquele determinados para representar os resultados experimentais das tensões nos ensaios em escala natural, fez-se a análise de regressão múltipla para as tensões τ_{atp} e τ_{atn} em função da

umidade e da densidade, obtendo-se os modelos matemáticos a seguir:

$$\text{Log}(\tau_{atp})/D = -0.293 + 0.044.U - 0.0011.U^2 + 1.930.D^{-1}$$

$$\text{Log}(\tau_{atn})/D = -0.367 + 0.336.U - 0.0100.U^2 - 0.818.D^{-1}$$

transformando, obtêm-se:

$$\text{Log}(\tau_{atp}) = 1.930 - 0.293.D + 0.044.U.D - 0.0011.U^2.D$$

$$\text{Log}(\tau_{atn}) = -0.818 - 0.367.D + 0.336.U.D - 0.010.U^2.D$$

Os coeficientes de regressão múltipla são: $R^2 = 92.3\%$ e $R^2 = 83.5\%$ para τ_{atp} e τ_{atn} , respectivamente.

A partir destes modelos matemáticos e das equações do apêndice F, apresentados a seguir, foram realizadas as correções da umidade e da densidade, para umidade padrão, 12%.

$$\text{Log}(\tau_{atp})_{12i} = \text{Log}(\tau_{atp})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$\text{Log}(\tau_{atn})_{12i} = \text{Log}(\tau_{atn})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$U_{12i} = 12\%$$

Os resultados destas correções encontram-se na tabela 41.

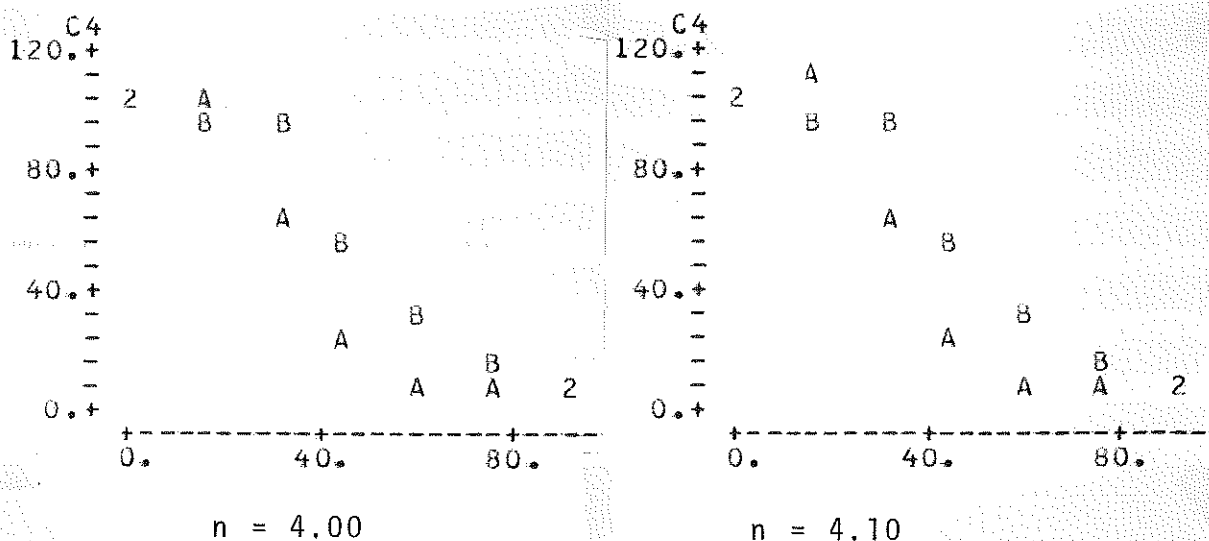


Fig. 193 - Representação gráfica da fórmula de Hankinson e os resultados experimentais

3.3.2 - RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS

Na tabela 41, encontram-se os parâmetros estatísticos das tensões de cisalhamento τ_{atp} e τ_{atn} .

TABELA 41 - CORREÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS								
DISCRIMI. TENSÕES N/cm ²	VALORES EXPERIMENTAIS CORRIGID.					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CONFIANÇA
	1	3	5	7	9			
	2	4	6	8	10			
τ_{atp}	958 804	919 1243	1000 933	1031 950	866 1051	976	120	890.6 , 1061.8
τ_{atn}	175 75	85 120	195 95	180 185	190 183	148	48	110.8 , 185.5

As resistências características serão:

$$f_{stpk} = 779.0 \text{ N/cm}^2 \quad f_{stnk} = 68.5 \text{ N/cm}^2$$

A equação mais adequada de Hankinson, considerando as resistências características é:

$$f_{st\theta k} = \frac{f_{stpk} \cdot f_{stnk}}{f_{stpk} \cdot \text{Sen}^4(\theta) + f_{stnk} \cdot \text{Cos}^4(\theta)}$$

sendo:

f_{stpk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração paralela às fibras

f_{stnk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração normal às fibras

$f_{st\theta k}$ = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração inclinada às fibras

A representação gráfica desta equação encontra-se na figura 194.1.

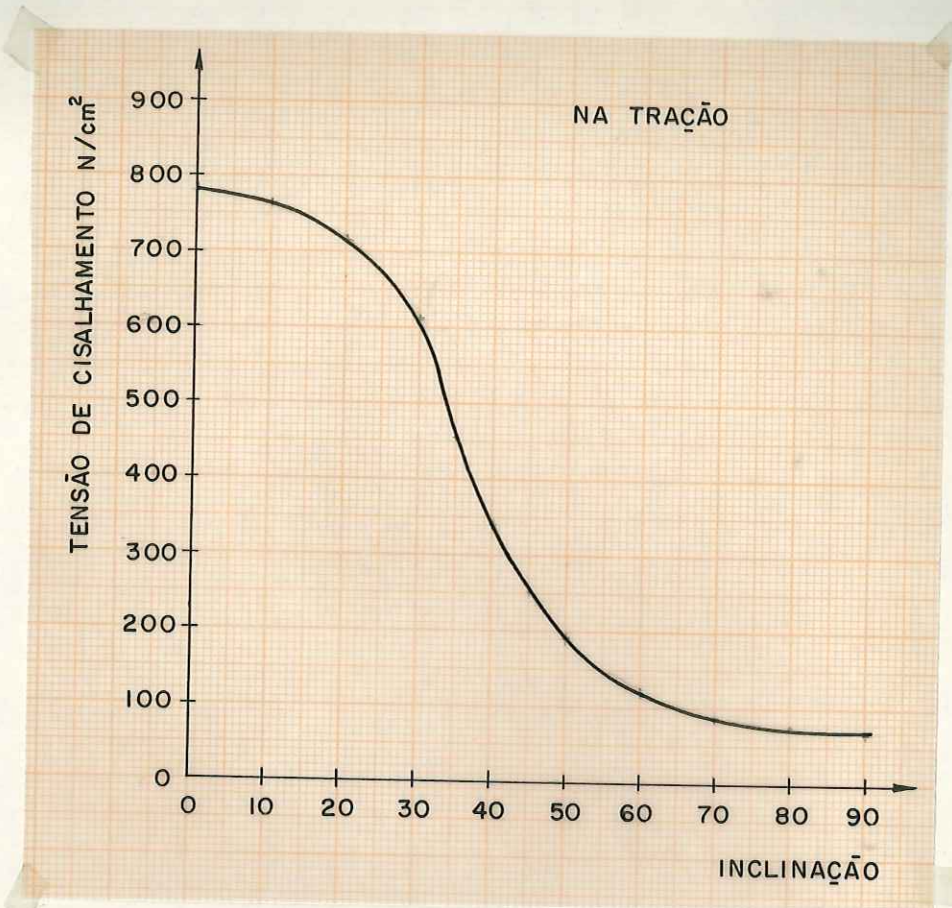


Fig. 194.1 - Representação gráfica da equação de Hankinson com as rest. características e expoente $n = 4.00$

4 - LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISCALHAMENTO NA FLEXÃO

Na terceira série de ensaios foram realizados ensaios com a finalidade de verificar a transmissão do momento fletor de uma peça à outra, através de tensões de cisalhamento na linha adesiva, como também de determinar a influência da direção das fibras na tensão de cisalhamento.

Para isto foram montados 70 corpos de prova, conforme o modelo proposto no capítulo II.

Para a determinação da tensão de cisalhamento na linha adesiva em função da inclinação das fibras, as cobrejuntas foram confeccionadas variando a inclinação das fibras em relação à aplicação da carga, figura 194.

Concluída a montagem dos corpos de prova, fez-se a numeração e a determinação das dimensões dos corpos de prova, conforme o esquema da figura 195.

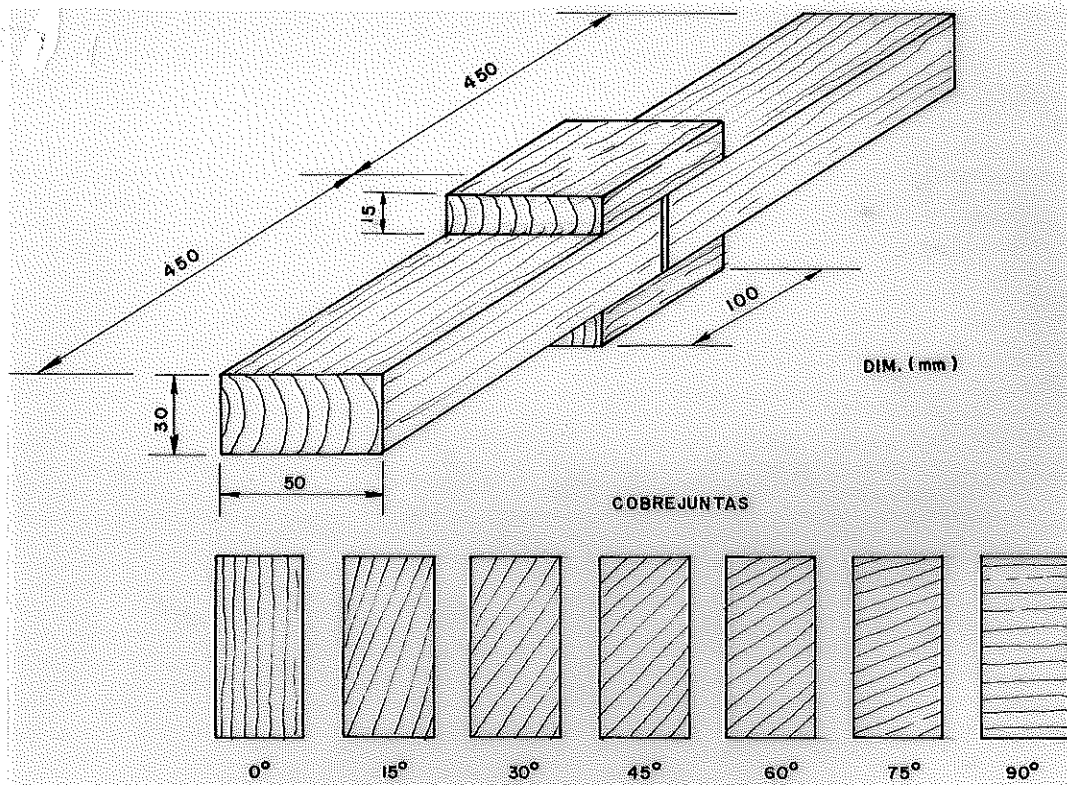


FIG.194 - CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO NA FLEXÃO - COBREJUNTAS INCLINADAS

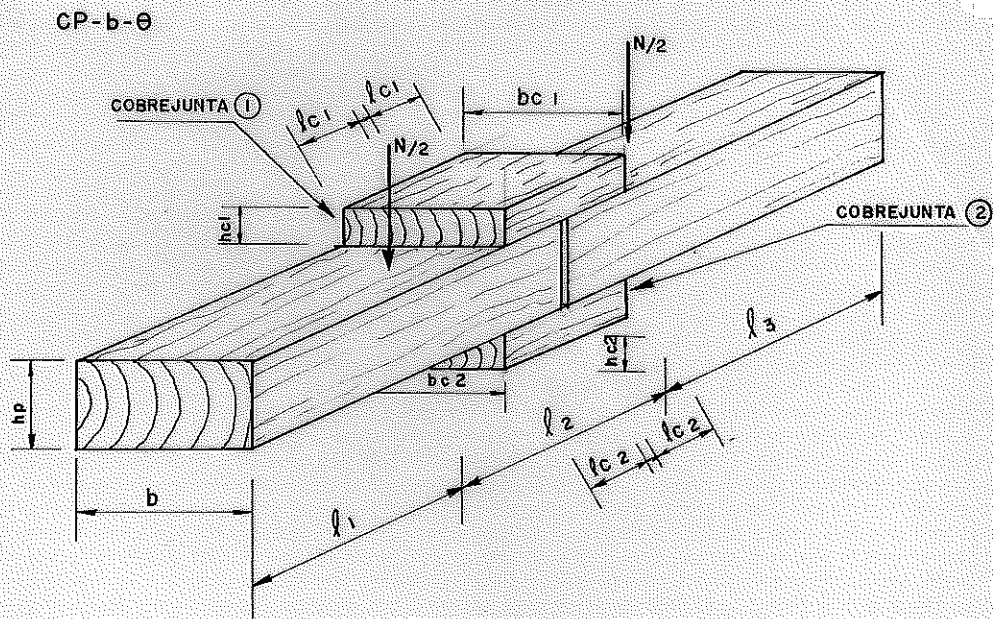


FIG.195-ESQUEMA DA TOMADA DE MEDIDAS

sendo:

- CP = corpo de prova
- b = flexão

- θ = inclinação das fibras em relação à carga aplicada
 b = espessura da peça principal
 h_p = altura da peça principal
 b_{c_1}, b_{c_2} = espessuras das cobrejuntas 1 e 2
 l_1, l_2, l_3 = distância entre os pontos de aplicação das cargas

4.1 - MÉTODO DE ENSAIO

O ensaio foi realizado na máquina universal Amsler, com velocidade constante à razão de 10 MPa por minuto, até a ruptura, figuras 196 e 197.

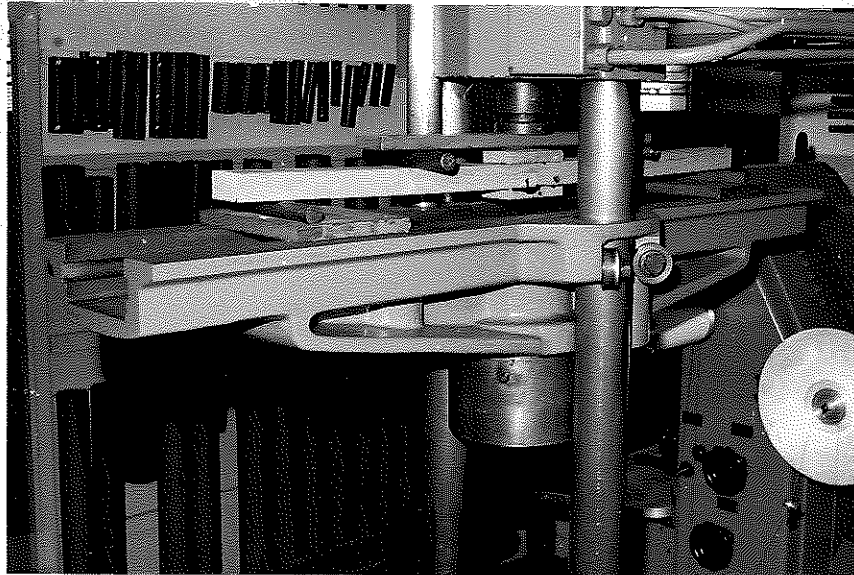


Fig. 196 - Ensaio de cisalhamento na flexão

Após a realização dos ensaios determinou-se, através de análise visual, a porcentagem de área de ruptura e o tipo de ruptura do corpo de prova. Na tabela 42 e na figura 198, encontram-se as porcentagens e os diferentes tipos de ruptura dos corpos de prova. Analisando esta tabela e o gráfico da figura 198; a partir de uma inclinação das fibras de 75° tem-se o colapso dos corpos de prova por ruptura da cobrejunta, devido à tensão de tração; para uma inclinação das fibras de 45° tem-se o colapso do corpo de prova por ruptura da linha adesiva devido à tensão de cisalhamento na parte tracionada ou por ruptura da cobrejunta devido à tensão de tração; para uma inclinação inferior a 45° tem-se o colapso do corpo de pro

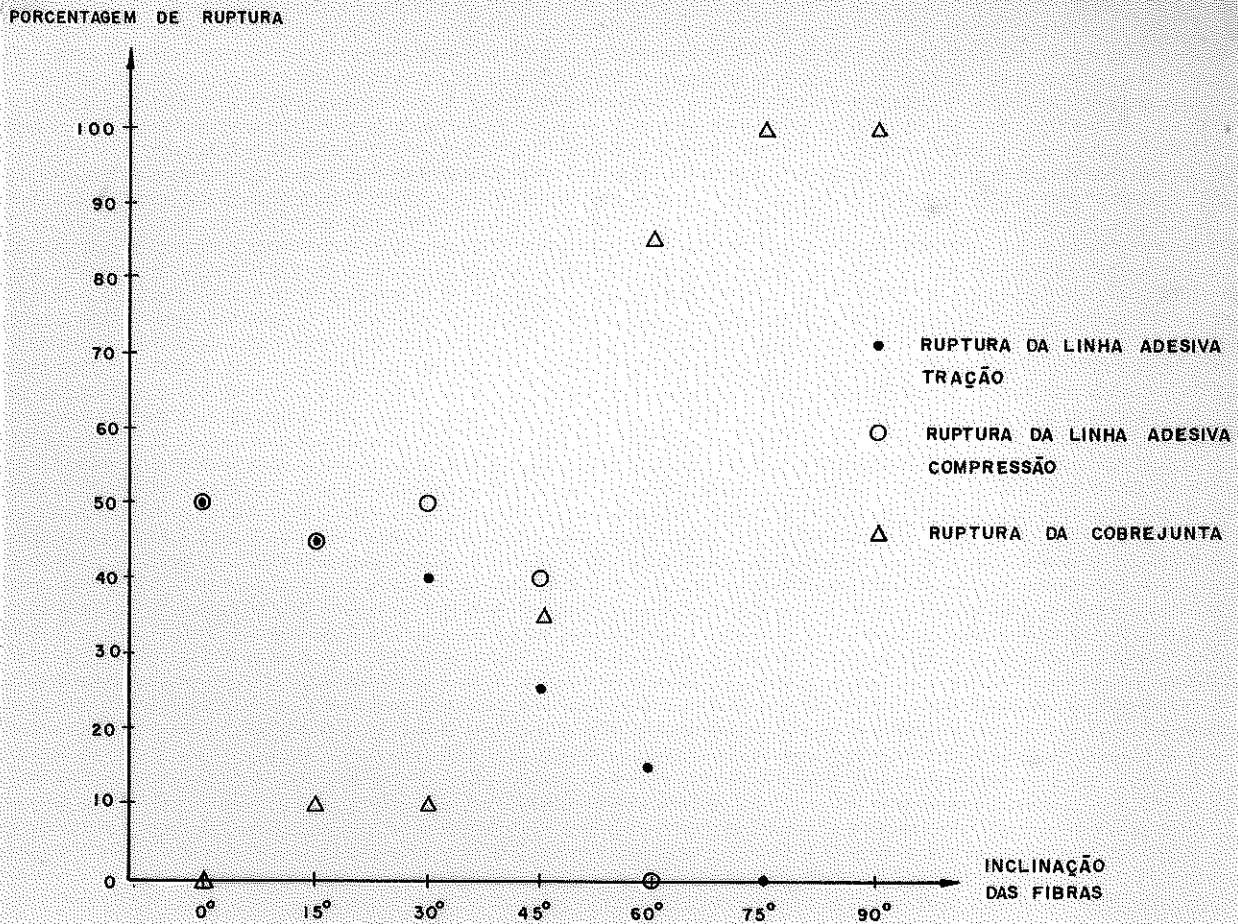


FIG.198 - TIPO DE RUPTURA X INCLINAÇÃO DAS FIBRAS

4.2 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES

Para o cálculo das tensões, utilizou-se o esquema estático e esforços solicitantes apresentados no item 2.3.1 do capítulo II e na figura 199.

A posição do centro de gravidade na seção 2-2, figura 199, é:

$$y_2 = \frac{(h_{c1} \cdot b_{c1} \cdot (h_{c1}/2 + h_{c2} + b)) + (b_{c2} \cdot h_{c2}^2)/2}{h_{c1} \cdot b_{c1} + h_{c2} \cdot b_{c2}}$$

$$y_1 = h_{c1} + b + h_{c2} - y_2$$

O momento de inércia será:

$$J_{2-2} = \left(\frac{b_{c1} \cdot h_{c1}^3}{12} + b_{c1} \cdot h_{c1} \cdot \left(y_1 - \frac{h_{c1}}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{b_{c2} \cdot h_{c2}^3}{12} + b_{c2} \cdot h_{c2} \cdot \left(y_2 - \frac{h_{c2}}{2} \right)^2 \right)$$

e as tensões normais são:

$$\sigma_1 = \frac{M}{J_{2-2}} \cdot (y_1 - h_{c1})$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{J_{2-2}} \cdot (y_2 - h_{c2})$$

$$\sigma_c = \frac{M}{J_{2-2}} \cdot y_1$$

$$\sigma_t = \frac{M}{J_{2-2}} \cdot y_2$$

Assim:

$$F_2 = \frac{(\sigma_c + \sigma_1)}{2} \cdot h_{c1} \cdot b_{c1} \quad \text{ou} \quad F_2 = \frac{(\sigma_t + \sigma_2)}{2} \cdot h_{c2} \cdot b_{c2}$$

e, finalmente, a tensão de cisalhamento será:

$$\tau_{abe} = \frac{F_2}{A_c}$$

sendo:

τ_{abe} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras inclinadas

A_c = área mínima colada

4.3 - COLEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Para cada um dos 70 corpos de prova ensaiados, foram determinadas as dimensões indicadas na figura 195 e a carga de ruptura.

Com as equações apresentadas no item anterior, foi elaborado um programa para a minicalculadora HP-41CV, anexo quadro 31, para a determinação da força F_2 , da tensão normal e da tensão máxima de cisalhamento. Estes resultados encontram-se no quadro 32 do anexo.

Na tabela 43, encontram-se os resultados das tensões de cisalhamento na flexão, obtidos a partir dos ensaios.

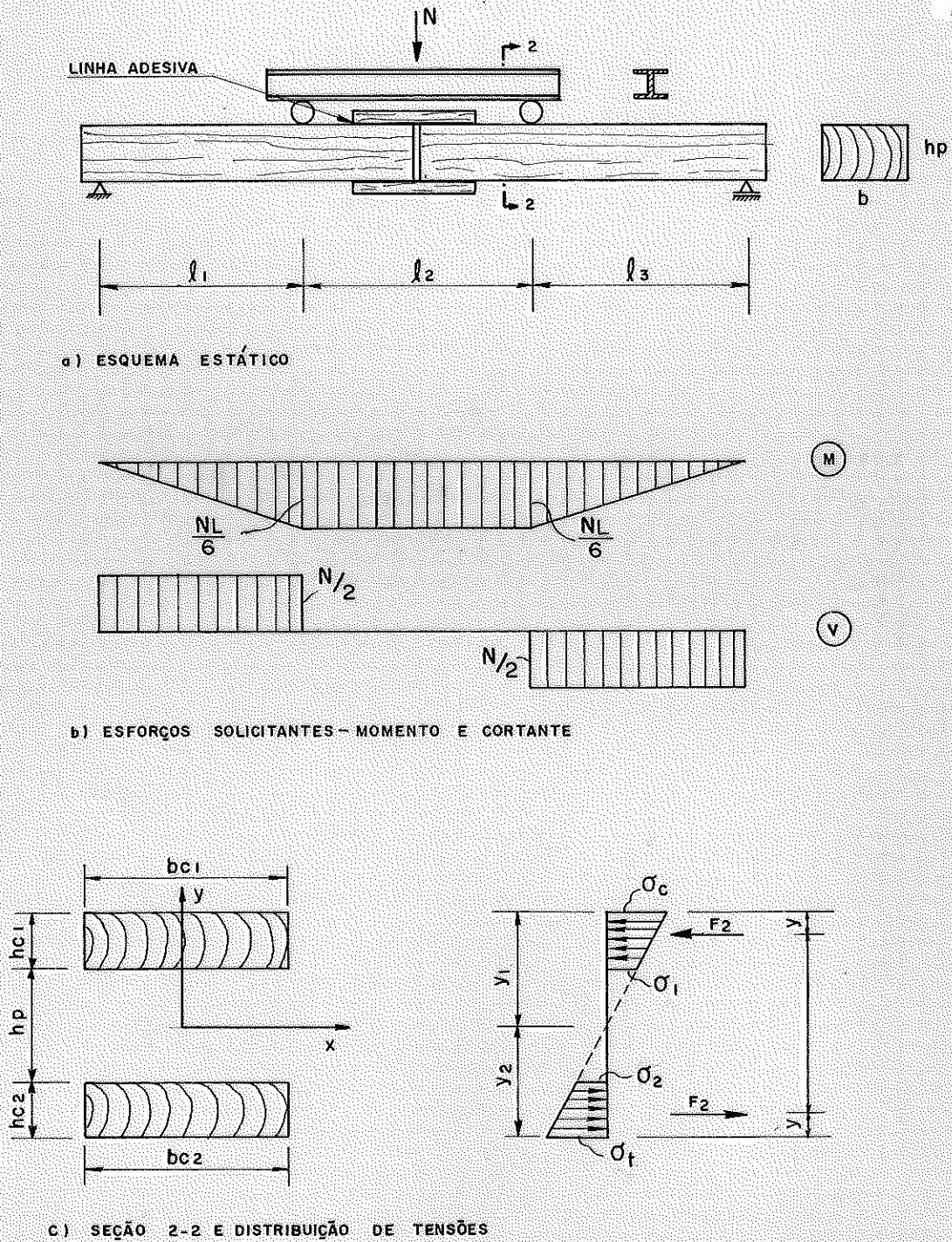


FIG.199- ESQUEMA ESTÁTICO, ESFORÇOS SOLICITANTES, SEÇÃO CRÍTICA E DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

TABELA 43 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO NA FLEXÃO-INCLINADA										
VIGA	INCLINAC.	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	D _{ap} KN/cm ³	U %
	N/cm ²									
1	τ_{ab}	980	930	850	760	720	620	590	7.80	12.99
	τ_w	1520	1250	1190	1290	1290	980	820		
	σ_w	5050	3720	3330	3400	2040	1890	1850		
2	τ_{ab}	1010	950	680	360	220	130	140	7.10	11.88
	τ_w	1720	1550	1440	1140	1300	1020	980		
	σ_w	4820	3810	3430	1880	1450	1320	1290		
3	τ_{ab}	1030	1020	880	770	750	790	330	8.50	12.70
	τ_w	2110	1660	1390	1160	1140	1150	1230		
	σ_w	4740	3770	2910	2100	2110	1630	1530		
4	τ_{ab}	990	980	870	880	770	640	630	8.60	11.40
	τ_w	2030	1990	1500	1290	1330	1370	1150		
	σ_w	6200	5120	3630	2310	1710	1700	1500		
5	τ_{ab}	680	610	720	610	580	490	420	7.10	13.95
	τ_w	1830	900	930	1160	1130	1080	750		
	σ_w	4140	3520	2490	1650	1220	870	710		
6	τ_{ab}	950	810	720	680	550	360	330	6.90	16.21
	τ_w	1250	1260	1350	1030	1150	800	730		
	σ_w	4070	3070	1390	1320	1000	660	540		
7	τ_{ab}	950	870	770	660	460	370	280	7.20	18.79
	τ_w	1050	1000	910	800	700	610	540		
	σ_w	2620	2650	2160	650	400	340	220		
8	τ_{ab}	840	760	860	540	500	340	270	7.40	22.54
	τ_w	1100	910	760	730	740	510	530		
	σ_w	2480	2110	1130	530	350	260	190		
9	τ_{ab}	770	680	660	620	530	270	200	7.60	22.02
	τ_w	1220	1180	1030	1180	710	840	730		
	σ_w	5090	3280	2320	1740	1600	1200	1080		
10	τ_{ab}	780	750	730	740	380	230	220	7.30	25.33
	τ_w	1270	1150	880	960	850	790	820		
	σ_w	3340	3510	1800	1500	1230	970	920		
MÉDIAS	τ_{ab}	900	840	770	660	550	420	340	7.60	16.78
	τ_w	1150	1280	1140	1070	1000	910	830		
	σ_w	4260	3460	2460	1610	1300	1080	980		

4.4 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Na figura 200, encontra-se o gráfico tensão de cisalhamento na flexão x inclinação das fibras. Neste gráfico estão incluídos os resultados experimentais, o valor médio destes resultados para cada inclinação das fibras (M) e a curva de Hankinson com expoente 2, determinada a partir da média das tensões de cisalhamento normal e paralelo às fibras obtidos no ensaio. A seguir encontra-se a referida equação.

$$\tau_{abo} = \frac{\tau_{abp} \cdot \tau_{abn}}{\tau_{abp} \cdot \text{Sen}^2(\theta) + \tau_{abn} \cdot \text{Cos}^2(\theta)}$$

sendo:

τ_{abo} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras inclinadas

τ_{abp} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras paralelas

τ_{abn} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras normais

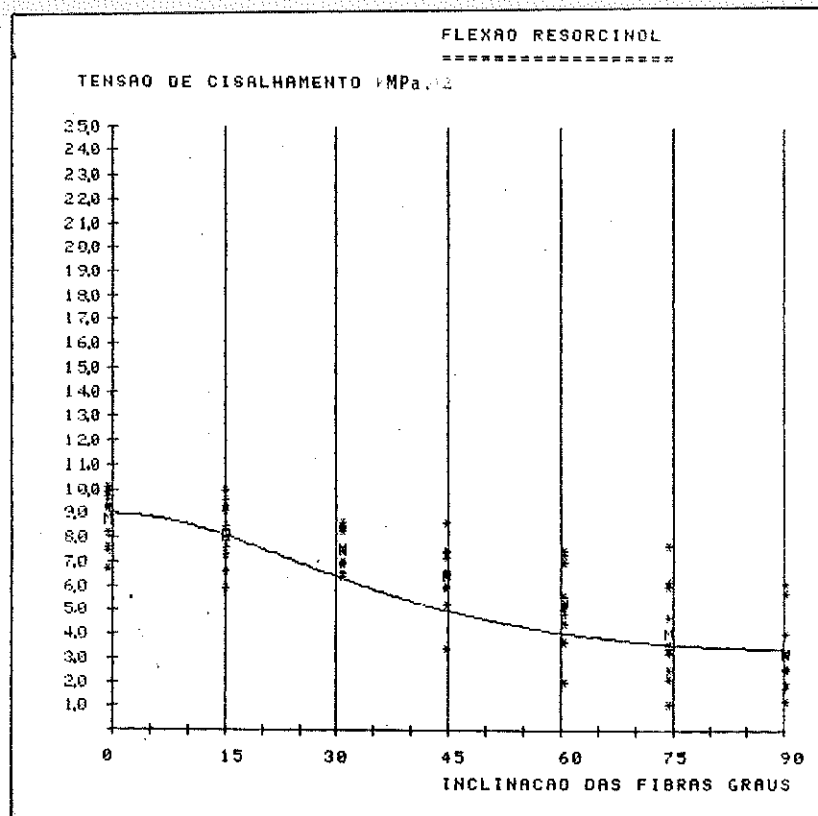


Fig. 200 - Tensão de cisalhamento x inclinação das fibras

A análise da hipótese de diferença nula entre os resultados experimentais e os determinados pela equação de Hankinson, com expoente 2, é apresentado a seguir:

Para a diferença de indivíduos:

Intervalo de confiança: (-143.0 , -11.3)

$$t_{cal} = 2.878 > t_{cr} = 2.447$$

Para a diferença de grupos de indivíduos:

Intervalo de confiança: (-135.3, -10.6)

$$t_{cal} = 2.725 > t_{cr} = 2.447$$

Assim, pode-se concluir estatisticamente, pela rejeição da hipótese nula das diferenças dos dois tratamentos, isto é, a fórmula de Hankinson, com expoente 2, não representa os resultados experimentais da tensão de cisalhamento na flexão inclinada às fibras.

Para a verificação da melhor adequação da equação de Hankinson modificada, isto é, com expoente genérico n,

$$\tau_{ab\theta} = \frac{\tau_{abp} \cdot \tau_{abn}}{\tau_{abp} \cdot \text{Sen}^n(\theta) + \tau_{abn} \cdot \text{Cos}^n(\theta)}$$

foram realizadas várias análises de hipótese nula, variando o valor do expoente n na equação de Hankinson. Na tabela 44, encontram-se estas análises.

A maior significância, na hipótese de diferença nula, e a melhor adequação das curvas, foram obtidos com expoente n= 2.6 . Assim, a melhor representação dos resultados experimentais pode ser obtido mediante a equação de Hankinson apresentada a seguir:

$$\tau_{ab\theta} = \frac{\tau_{abp} \cdot \tau_{abn}}{\tau_{abp} \cdot \text{Sen}^{2.6}(\theta) + \tau_{abn} \cdot \text{Cos}^{2.6}(\theta)}$$

Na figura 201, encontra-se a representação gráfica desta

equação.

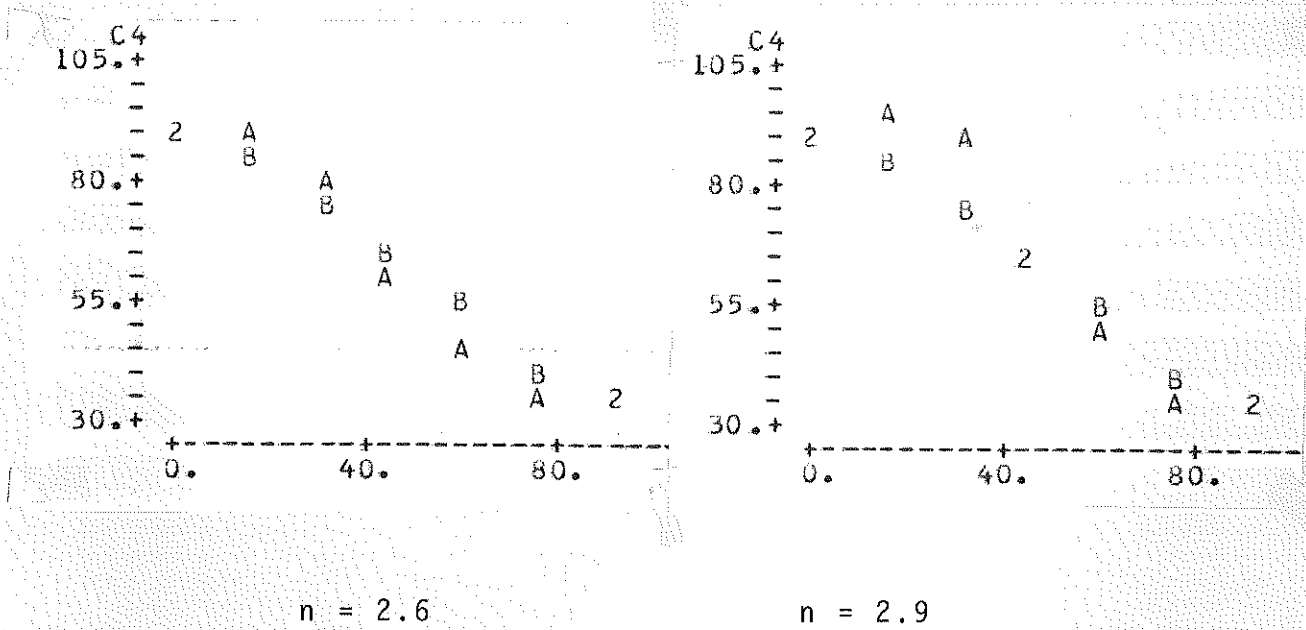


Fig. 201 - Representação gráfica da equação de Hankinson e os resultados experimentais

TABELA 44 - RESULTADOS DOS TESTES DE DIFERENÇA NULA. PARA VALORES DA EQUAÇÃO DE HANKINSON VARIANDO O EXPOENTE n - NÍVEL DE SIGNIF. 95%

DIFERENÇA DOS VALORES CALCULADOS E OS EXPERIMENTAIS	RESULTADOS EXPERIMENTAIS				OBSERVAÇÕES
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	t_{cal}	INTERVALO DE CONFIANÇA	
Expoen. 2.00	-77.3	71.10	2.878	-143.0, -11.5	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 2.15	-61.6	63.60	2.589	-119.9, -3.3	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 2.30	-46.0	57.10	2.133	-98.9, 6.8	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.45	-30.5	54.50	1.482	-80.9, 19.0	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.60	-14.9	55.80	0.709	-66.5, 36.6	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.75	0.6	61.20	0.029	-55.9, 57.3	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas
Expoen. 2.90	16.4	70.20	0.618	-48.5, 81.3	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas

4.4.1 - CORREÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NAS TENSÕES τ_{abp} E τ_{abn}

Admitindo que os resultados experimentais das tensões τ_{abp} e τ_{abn} , possam ser representados por um modelo matemático semelhante àquele determinado para representar os resultados experimentais das tensões nos ensaios em escala natural, fez-se análise de regressão múltipla para as tensões τ_{abp} e τ_{abn} , em função da umidade e da densidade, obtendo-se os modelos matemáticos apresentados a seguir:

$$\text{Log}(\tau_{abp})/D = 0.3040 + 0.0272.U - 0.0009.U^2 + 1.58.D^{-1}$$

$$\text{Log}(\tau_{abn})/D = -0.0574 + 0.2880.U - 0.0088.U^2 - 1.15.D^{-1}$$

transformando-os, obtêm-se:

$$\text{Log}(\tau_{abp}) = 1.58 + 0.3040.D + 0.0272.U.D - 0.0009.U^2.D$$

$$\text{Log}(\tau_{abn}) = -0.15 - 0.0574.D + 0.2880.U.D - 0.0088.U^2.D$$

Os coeficientes de regressão múltipla encontrados foram: $R^2 = 91.5\%$ e $R^2 = 82.5\%$, para τ_{abp} e τ_{abn} , respectivamente.

A correção da umidade e da densidade, para umidade padrão 12%, foi feita a partir dos modelos matemáticos e as equações do apêndice F, transcritos a seguir:

$$\text{Log}(\tau_{abp})_{12i} = \text{Log}(\tau_{abp})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$\text{Log}(\tau_{abn})_{12i} = \text{Log}(\tau_{abn})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$U_{12i} = 12\%$$

Os resultados destas correções encontram-se na tabela 45.

4.4.2 - RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS

Na tabela 45 encontram-se os parâmetros estatísticos das tensões de cisalhamento τ_{abp} e τ_{abn} .

TABELA 45 - CORREÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

DISCRIMI. TENSÕES N/cm ²	VALORES EXPERIMENTAIS CORRIGIDOS					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CONFIANÇA
	1	3	5	7	9			
	2	4	6	8	10			
τ_{abp}	966 1011	1037 993	688 963	1019 1082	1065 1088	990	115	907.9 , 1072.6
τ_{abn}	590 440	390 580	510 520	550 580	570 610	534	71	479.3 , 588.7

As resistências características serão:

$$f_{sbpk} = 801.0 \text{ N/cm}^2 \quad f_{sbnk} = 417.7 \text{ N/cm}^2$$

A equação mais adequada de Hankinson, considerando as resistências características é:

$$f_{sbek} = \frac{f_{sbpk} \cdot f_{sbnk}}{f_{sbpk} \cdot \text{Sen}^{2 \cdot 6}(\theta) + f_{sbnk} \cdot \text{Cos}^{2 \cdot 6}(\theta)}$$

sendo:

- f_{sbek} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras inclinadas
- f_{sbpk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras paralelas
- f_{sbnk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras normais

A representação gráfica desta equação encontra-se na figura 202.

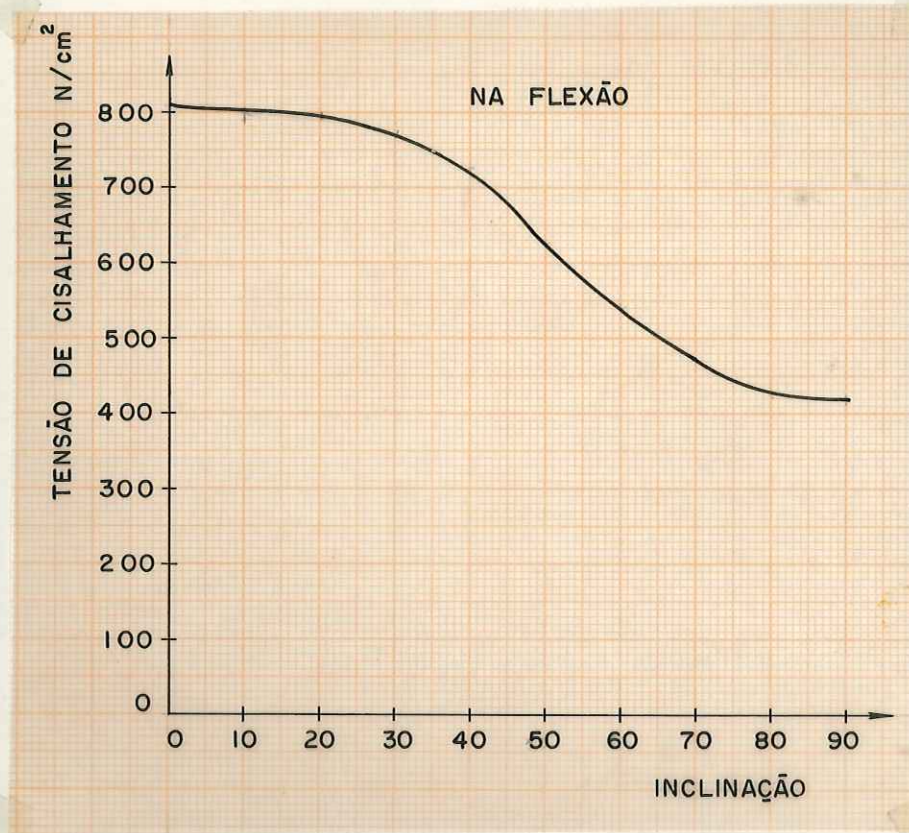


Fig. 202 - Representação da equação de Hankinson, com as resist. características e expoente $n = 2.60$

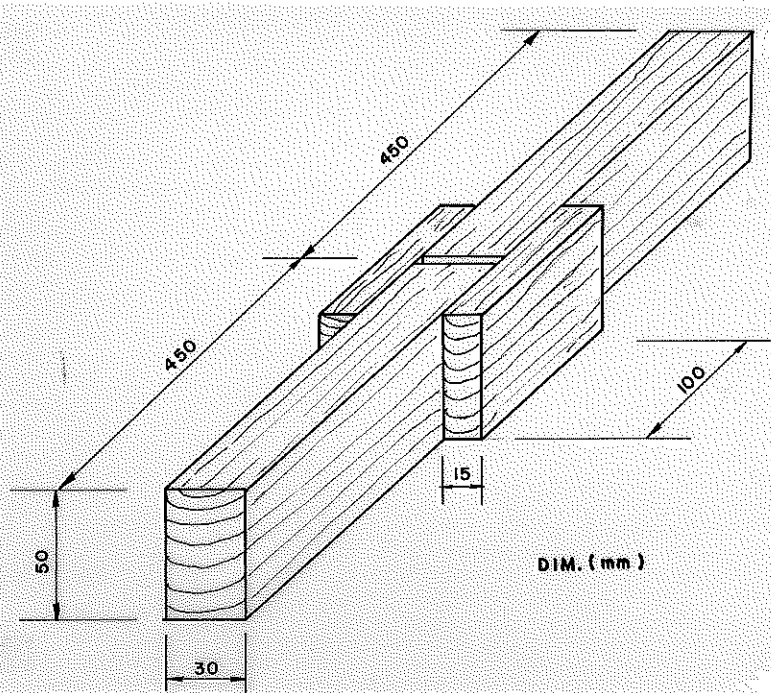
5 - LIGAÇÃO ADESIVA SOLICITADA AO CISALHAMENTO NA TORÇÃO

O objetivo deste ensaio é a determinação da resistência da linha adesiva solicitada por momento torçor.

Foram montados 70 corpos de prova, de acordo com o modelo proposto no capítulo II.

Para a determinação da tensão de cisalhamento na linha adesiva, em função da inclinação das fibras da madeira, as cobrejuntas foram confeccionadas variando-se a inclinação das fibras em relação à aplicação da carga, figura 203.

Concluída a montagem dos corpos de prova, foram numeradas e determinadas as dimensões esquematizadas na figura 204.



COBREJUNTAS

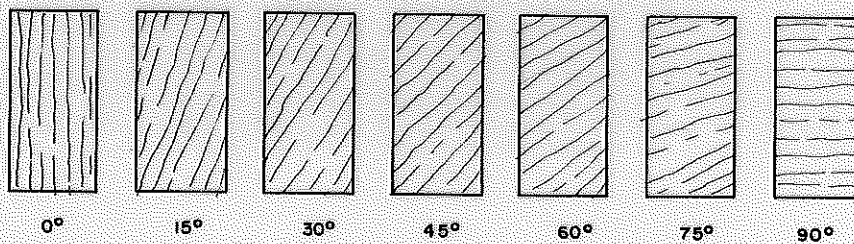


FIG. 203-CORPO DE PROVA DE CISCALHAMENTO NA TORÇÃO COBREJUNTAS INCLINADAS.

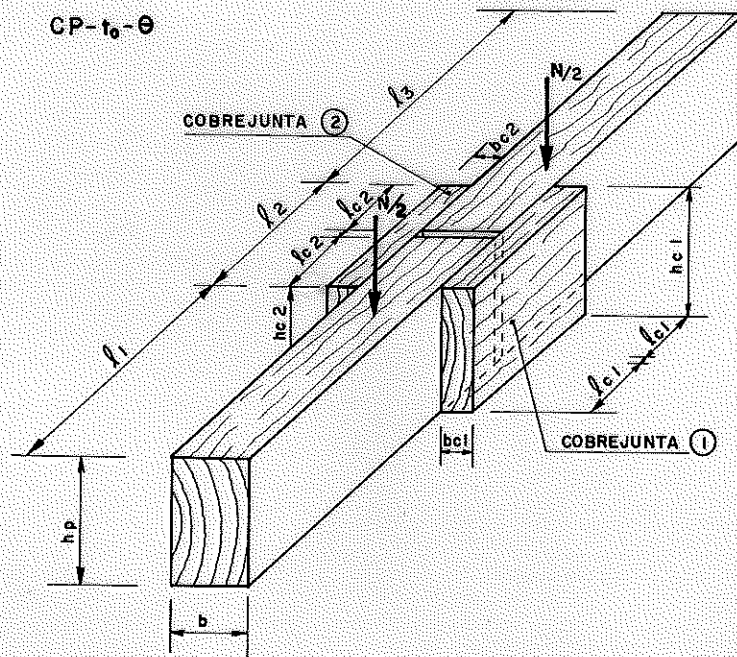


FIG. 204-ESQUEMA DA TOMADA DE MEDIDAS

sendo:

CP = corpo de prova
to = torção
 θ = inclinação das fibras em relação à carga aplicada
b = espessura da peça principal
 h_p = altura da peça principal
 b_{c1}, b_{c2} = espessura das cobrejuntas 1 e 2
 l_{c1}, l_{c2} = comprimento da linha adesiva do lado 1 e 2
 l_1, l_2, l_3 = distância entre os pontos de aplicação de carga

5.1 - MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados na máquina universal Amsler, com velocidade constante à razão de 10 MPa por minuto, até alcançar a ruptura.

Na figura 205 é mostrado o ensaio. Na figura 206, a ruptura dos corpos de prova.

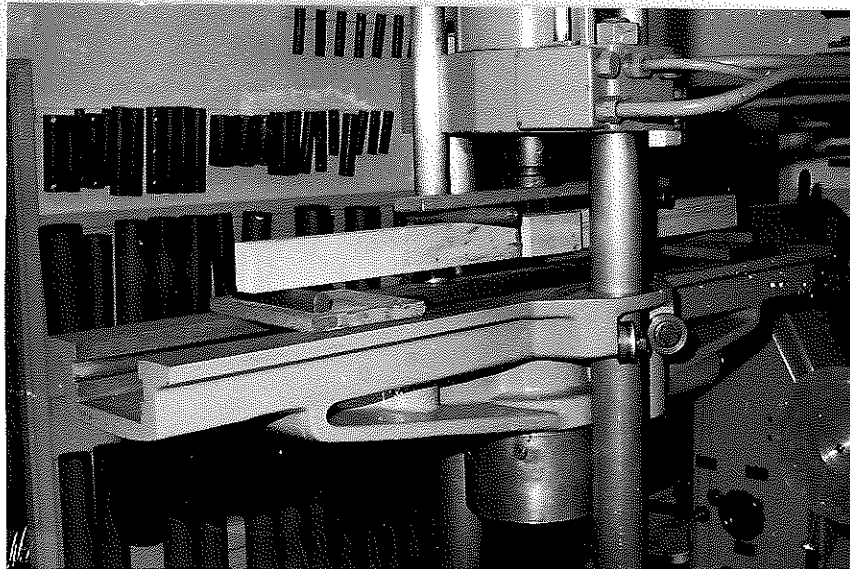


Fig. 205 - Ensaio de cisalhamento na torção

Após a realização dos ensaios observou-se, através de uma análise visual, a porcentagem de ruptura na madeira e o tipo de ruptura dos corpos de prova. Na tabela 46 e na figura 207, estão apresentadas estas porcentagens e a ocorrência de cada tipo de ruptura dos corpos de prova.

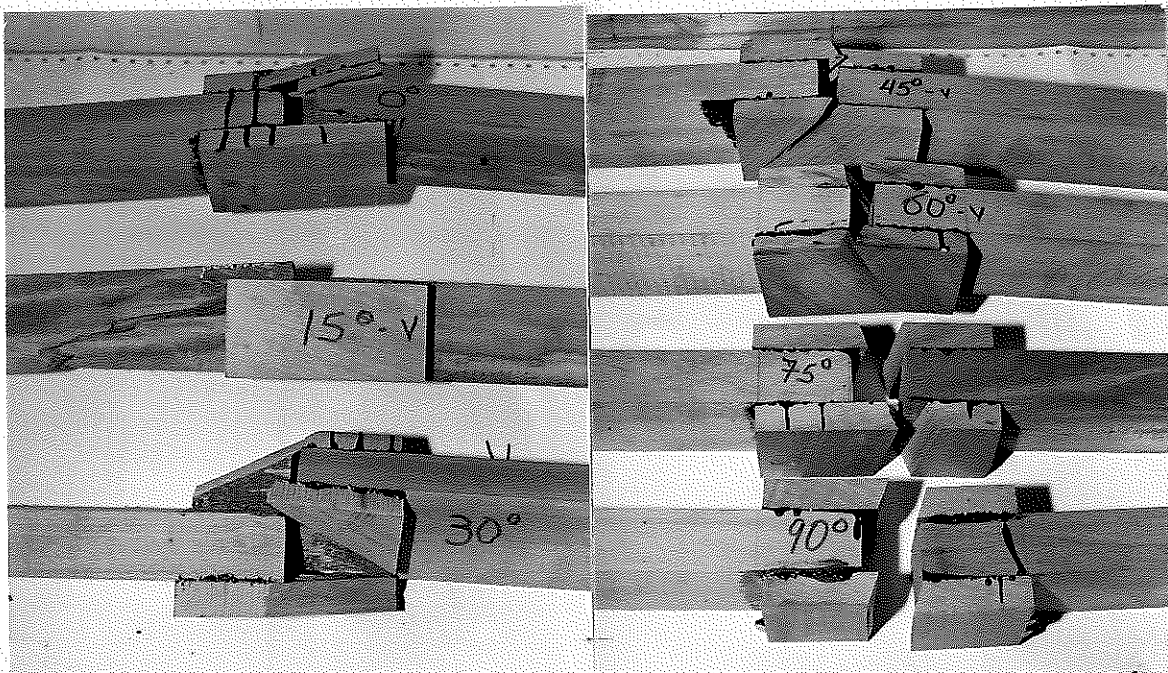


Fig. 206 - Ruptura dos corpos de prova de cislh. -torção

PORCENTAGEM DE RUPTURA

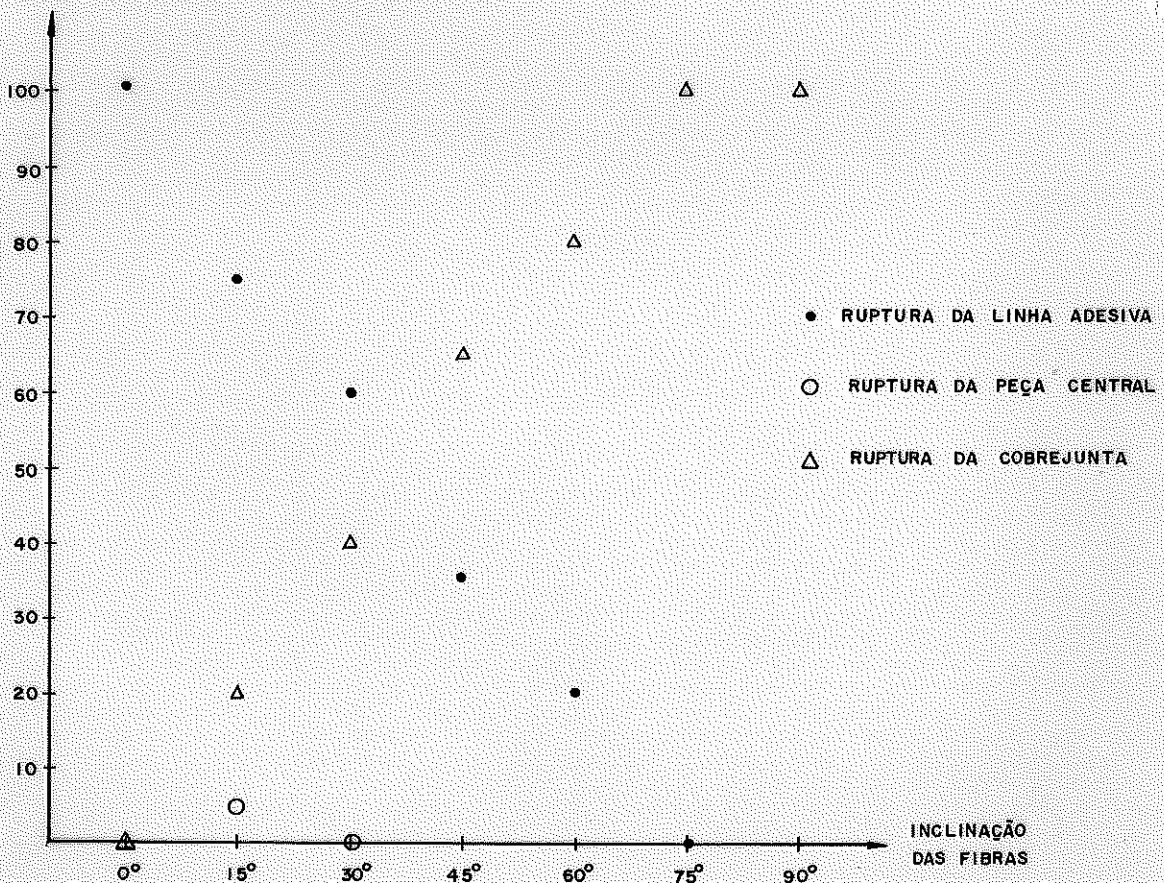


FIG. 207-TIPO DE RUPTURA x INCLINAÇÃO DAS FIBRAS

TABELA 46 - OBSERVAÇÕES DO TIPO DE RUPTURA DOS CPs. - CISALHAMENTO TORÇÃO							
TIPO DE RUPTURA \ INCLINAÇÃO DAS FIBRAS	RUPTURA EM PORCENTAGEM						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
LINHA ADESIVA	100	75	60	35	20	---	---
PEÇA CENTRAL	---	5	---	---	---	---	---
COBREJUNTA	---	20	40	65	80	100	100
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100

Analisando a tabela 46 e a figura 207; a partir de uma inclinação das fibras de 75° tem-se o colapso dos corpos de prova por ruptura das cobrejuntas, devido à tensão de tração; para uma inclinação de 45° tem-se o colapso do corpo de prova por ruptura da linha adesiva devido à tensão de cisalhamento ou por ruptura da cobrejunta devido à tensão de tração; para uma inclinação inferior a 30° tem-se o colapso do corpo de prova por ruptura da linha adesiva devido à tensão de cisalhamento.

5.2 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES

Para o cálculo das tensões, utilizou-se o esquema estático e a distribuição de tensões apresentados no item 2.3.2 do capítulo II e nas figuras 208 e 209.

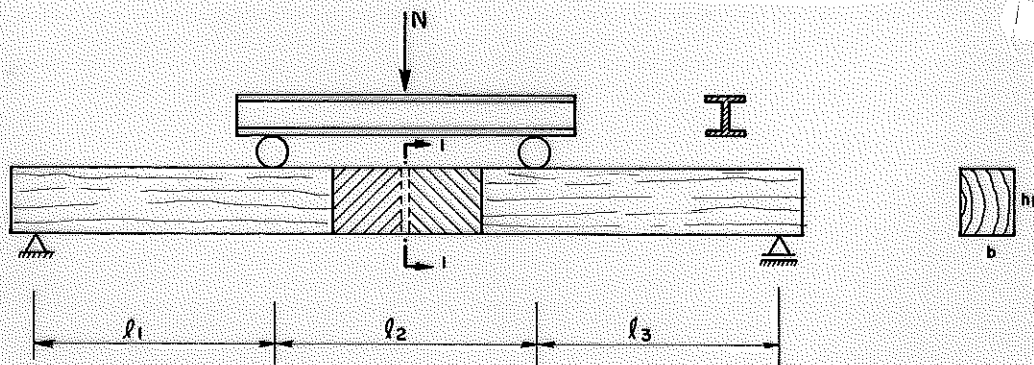


FIG. 208 - ESQUEMA ESTÁTICO

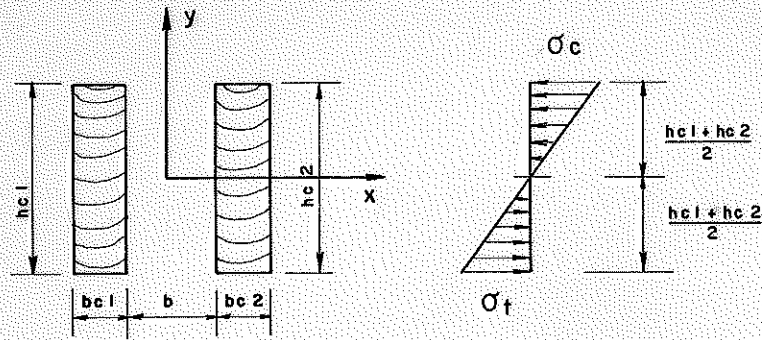


FIG. 209 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA SEÇÃO 1-1

Com a equação 18, obtêm-se a tensão máxima de cisalhamento.

$$\tau_{atoo} = \frac{T}{(0.33 - 0.22 \cdot a/b + 0.10 \cdot (a/b)^2) \cdot a^2 \cdot b} \quad ; \text{ com } b > a$$

sendo:

$T = M/2 =$ momento torçor

$M =$ momento fletor

$\tau_{atoo} =$ tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras inclinadas

$b =$ menor valor entre l_{c1} e l_{c2}

$a =$ menor valor entre h_{c1} , h_{c2} e h_p

$a \cdot b =$ menor área colada

As tensões máximas de tração e compressão, mostradas na figura 209, são dadas pela equação:

$$\sigma_{wc} \equiv \sigma_{wt} = \frac{M}{J_{1-1}} \cdot \left(\frac{h_{c1} + h_{c2}}{2} \right)$$

sendo:

$\sigma_{wc} =$ tensão de compressão da madeira

$\sigma_{wt} =$ tensão de tração da madeira

$J_{1-1} =$ momento de inercia em relação ao eixo x, na seção 1-1, dado por:

$$J_{1-1} = \frac{b_{c1} + b_{c2}}{2} \cdot \left(\frac{h_{c1} + h_{c2}}{2} \right)^3 / 12$$

5.3 - COLEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Para cada um dos 70 corpos de prova foram determinadas as dimensões indicadas na figura 204 e a carga de ruptura.

O cálculo através das equações das tensões máximas de cisalhamento, considerando as tensões de tração e compressão, foi feito utilizando-se um programa para a minicalculadora HP-41CV, apresentado no quadro 33 do anexo. Este programa fornece: o momento torçor, a tensão máxima de tração e a tensão máxima de cisalhamento inclinada às fibras; estes valores estão apresentados no quadro 34 do anexo.

Na tabela 47, encontram-se os resultados das tensões de cisalhamento na torção, obtidas a partir dos ensaios.

5.4 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Na figura 210, encontra-se o gráfico tensão de cisalhamento na torção x inclinação das fibras da madeira. Neste gráfico estão incluídos os resultados experimentais, o valor médio destes resultados para cada inclinação das fibras (M) e a curva de Hankinson com expoente 2, determinada a partir das tensões médias de cisalhamento normal e paralelo às fibras. A seguir é mostrada esta equação:

$$\tau_{at\theta} = \frac{\tau_{atop} \cdot \tau_{aton}}{\tau_{atop} \cdot \text{Sen}^2(\theta) + \tau_{aton} \cdot \text{Cos}^2(\theta)}$$

sendo:

$\tau_{at\theta}$ = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras inclinadas

τ_{atop} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras paralelas

τ_{aton} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na torção, com as fibras normais

Através da análise da hipótese de diferença nula entre os valores experimentais e os determinados pela equação de Hankinson, tem-se para:

Para a diferença entre indivíduos

Intervalo de confiança: (-176.8 , -6.20)

$$t_{\text{cal}} = 2.624 > t_{\text{cr}} = 2.447$$

Para a diferença entre grupos de indivíduos

Intervalo de confiança: (-168.3 , -5.5)

$$t_{\text{cal}} = 2.535 > t_{\text{cr}} = 2.447$$

Assim, pode-se concluir estatisticamente, pela rejeição da hipótese nula da diferença, isto é, a fórmula de Hankinson com expoente 2, não representa os resultados experimentais da tensão de cisalhamento na torção inclinada às fibras.

Para determinar a melhor adequação da equação de Hankinson modificada, isto é, com expoente genérico n,

$$\tau_{\text{ato}\theta} = \frac{\tau_{\text{atop}} \cdot \tau_{\text{aton}}}{\tau_{\text{atop}} \cdot \text{Sen}^n(\theta) + \tau_{\text{aton}} \cdot \text{Cos}^n(\theta)}$$

foram realizadas análise de hipótese de diferença nula, variando o valor do expoente n na equação de Hankinson. Na tabela 48, encontram-se estas análises.

A maior significância da hipótese da diferença nula e a melhor adaptação das curvas, foram obtidas com o valor do expoente n= 2.6. Assim, a melhor representação dos resultados experimentais pode ser obtida mediante a equação de Hankinson, apresentada a seguir:

$$\tau_{\text{ato}\theta} = \frac{\tau_{\text{atop}} \cdot \tau_{\text{aton}}}{\tau_{\text{atop}} \cdot \text{Sen}^{2.6}(\theta) + \tau_{\text{aton}} \cdot \text{Cos}^{2.6}(\theta)}$$

Na figura 211, encontram-se as representações gráficas desta equação e dos resultados experimentais.

TABELA 46 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO NA TORÇÃO INCLINADA

VIGA	INCLINAC.	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	D _{ap} KN/cm ³	U %
	N/cm ²									
1	T _{ato}	1200	1100	980	720	540	430	390	7.80	12.99
	T _W	1520	1250	1190	1290	980	880	820		
	σ _w	5050	3720	3330	3400	2040	1890	1850		
2	T _{ato}	1140	920	760	570	500	430	270	7.10	11.88
	T _W	1720	1550	1440	1140	1300	1020	980		
	σ _w	4820	3810	3430	1880	1450	1320	1290		
3	T _{ato}	1060	890	760	620	380	300	170	8.50	12.70
	T _W	2110	1660	1390	1160	1140	1150	1230		
	σ _w	4740	3770	2910	2100	2110	1630	1530		
4	T _{ato}	1340	960	1070	760	420	400	380	8.60	11.44
	T _W	2030	1990	1500	1290	1330	1370	1150		
	σ _w	6200	5120	3630	2310	1710	1700	1500		
5	T _{ato}	840	710	850	740	620	490	340	7.10	13.95
	T _W	1830	900	930	1160	1130	1080	750		
	σ _w	4140	3520	2490	1650	1220	870	710		
6	T _{ato}	1220	1190	820	540	380	300	170	6.90	16.21
	T _W	1250	1260	1350	1030	1150	800	730		
	σ _w	4070	3070	1390	1320	1000	660	540		
7	T _{ato}	1160	770	620	340	300	240	290	7.20	18.79
	T _W	1050	1000	910	800	700	610	540		
	σ _w	2620	2650	2160	650	400	340	220		
8	T _{ato}	950	980	820	570	300	300	250	7.40	22.52
	T _W	1100	910	760	730	740	510	530		
	σ _w	2480	2110	1130	530	350	260	190		
9	T _{ato}	850	770	720	770	620	320	240	7.60	22.02
	T _W	1220	1180	1030	1180	710	840	730		
	σ _w	5090	3280	2320	1740	1600	1200	1080		
10	T _{ato}	1070	900	820	640	320	260	140	7.30	25.33
	T _W	1270	1150	880	960	850	790	820		
	σ _w	3340	3510	1800	1500	1230	970	920		
MÉDIAS	T _{ato}	1080	920	830	630	430	350	260	7.60	16.78
	T _W	1150	1280	1140	1070	1000	910	830		
	σ _w	4260	3460	2460	1610	1300	1080	980		

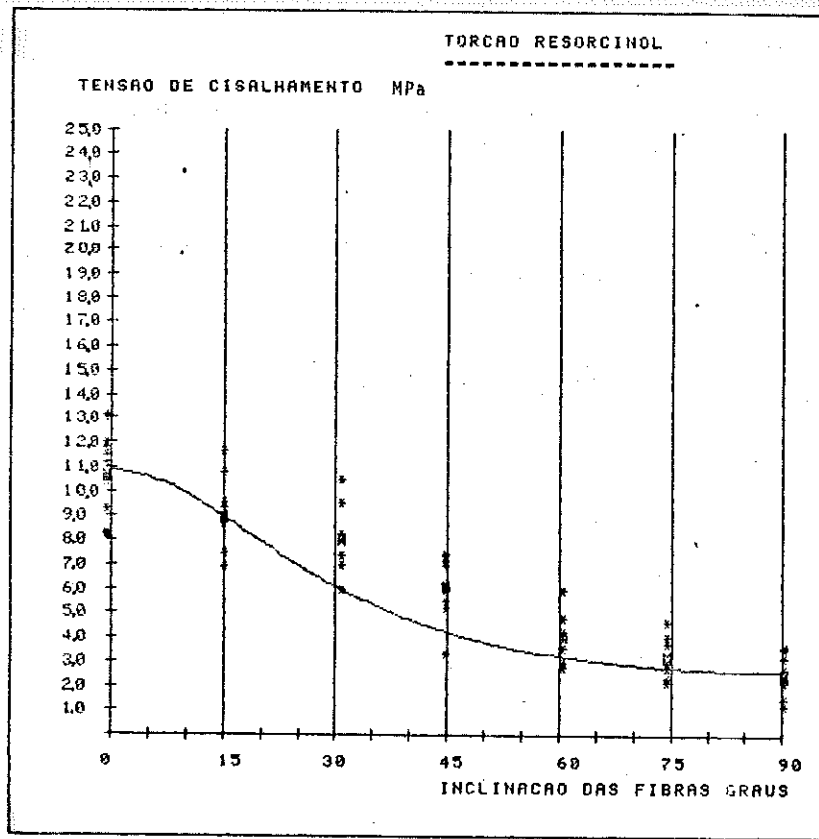


Fig. 210 - Tensão de cisalhamento na torção x inclinação das fibras

TABELA 48 - RESULTADOS DOS TESTES DE DIFERENÇA NULA. PARA VALORES DA EQUAÇÃO DE HANKINSON VARIANDO O EXPOENTE n - NÍVEL DE SIGNIF. 95%

DIFERENÇA DOS VALORES CALCULADOS E OS EXPERIMENTAIS	RESULTADOS EXPERIMENTAIS				OBSERVAÇÕES
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	t_{cal}	INTERVALO DE CONFIANÇA	
Expoen. 2.00	-91.5	92.30	2.624	-176.8 , -6.2	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 2.15	-74.4	84.10	2.340	-152.3 , 3.4	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.30	-57.4	78.50	1.937	-130.1 , 15.1	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.45	-40.6	75.70	1.420	-110.6 , 29.4	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.60	-23.8	76.00	0.830	-94.1 , 46.4	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.75	-7.1	79.50	0.236	-80.7 , 66.5	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas
Expoen. 2.90	9.7	86.40	0.296	-70.2 , 89.6	Hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas
Expoen. 3.05	26.5	96.00	0.731	-62.2 , 115	hipótese nula aceita, pouca adap. das curvas

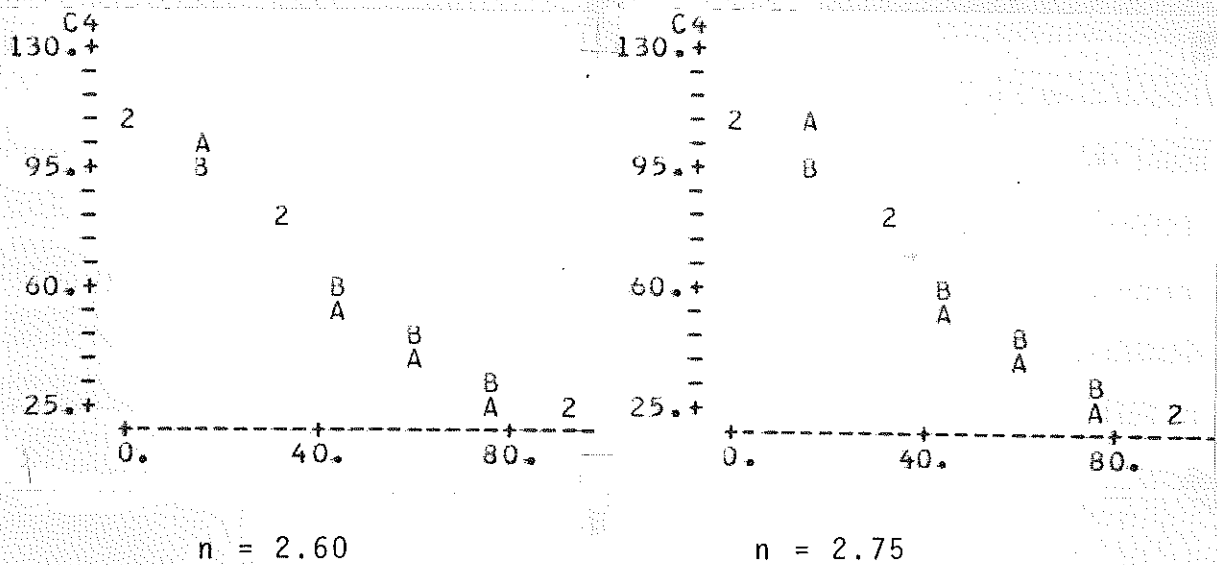


Fig. 211 - Representação gráfica da equação de Hankinson e os resultados experimentais

5.4.1 - CORREÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NAS TENSÕES τ_{atop} E τ_{aton}

Admitindo que os resultados experimentais das tensões τ_{atop} e τ_{aton} , possam ser representados por um modelo matemático semelhante àquele determinado para representar os resultados experimentais das tensões nos ensaios em escala natural, fez-se a análise de regressão múltipla para as tensões τ_{atop} e τ_{aton} em função da umidade e da densidade. Obtendo-se os modelos matemáticos a seguir:

$$\text{Log}(\tau_{atop})/D = 0.1670 + 0.0173.U - 0.0006.U^2 + 1.83.D^{-1}$$

$$\text{Log}(\tau_{aton})/D = 0.0514 + 0.0737.U - 0.0029.U^2 + 1.05.D^{-1}$$

transformando-os, tem-se:

$$\text{Log}(\tau_{atop}) = 1.83 + 0.167.D + 0.0173.U.D - 0.0006.U^2.D$$

$$\text{Log}(\tau_{aton}) = 1.05 + 0.0514.D + 0.0737.U.D - 0.0029.U^2.D$$

Os coeficientes de regressão múltipla são: $R^2 = 88.4\%$ e $R^2 = 85.3\%$ para τ_{atop} e τ_{aton} , respectivamente.

A correção da umidade e da densidade, para a umidade padrão 12% foi feita a partir dos modelos matemáticos e as equa-

ções do apêndice F, transcritos a seguir:

$$\text{Log}(\tau_{atop})_{12i} = \text{Log}(\tau_{atop})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$\text{Log}(\tau_{aton})_{12i} = \text{Log}(\tau_{aton})_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$U_{12i} = 12\%$$

Na tabela 49, encontram-se os resultados destas correções.

5.4.2 - RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS

Na tabela 49, encontram-se os parâmetros estatísticos das tensões de cisalhamento τ_{atop} e τ_{aton} .

TABELA 49 - CORREÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS								
DISCRIMI: TENSÕES N/cm ²	VALORES EXPERIMENTAIS CORRIGIDOS					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CONFIANÇA
	1	3	5	7	9			
	2	4	6	8	10			
τ_{atop}	1194 1141	1056 1345	835 1218	1204 1087	1017 1289	1139	147	1025 , 1253
τ_{aton}	410 312	280 353	400 313	395 408	396 386	365	47	328.2 , 401.8

As resistências características serão:

$$f_{stopk} = 897.2 \text{ N/cm}^2 \quad f_{stonk} = 287.2 \text{ N/cm}^2$$

A equação mais adequada de Hankinson, considerando as resistências características \bar{e} :

$$f_{\text{stoek}} = \frac{f_{\text{atopk}} \cdot f_{\text{atonk}}}{f_{\text{stopk}} \cdot \text{Sen}^{2,6}(\theta) + f_{\text{stonk}} \cdot \text{Cos}^{2,6}(\theta)}$$

sendo:

f_{stoek} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras inclinadas

f_{stopk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras paralelas

f_{stonk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras normais.

A representação gráfica desta equação encontra-se na figura 212.

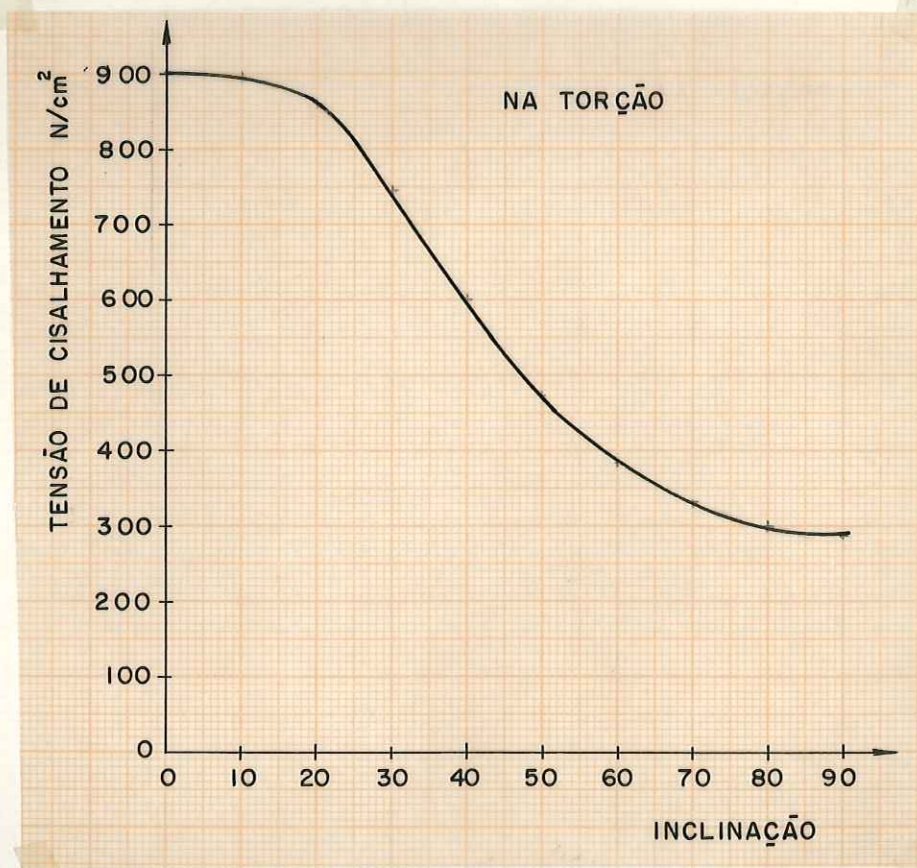


Fig. 212 - Representação da equação de Hankinson, com as resist. características e expoente $n = 2.60$

6 - ANÁLISE DE EXPERIMENTAÇÃO FATORIAL E DE REGRESSÃO

Para a determinação da influência da inclinação das fibras da madeira e do tipo de sollicitação em uma ligação adesiva, foram feitas, análise de experimentação fatorial e análise de regressão múltipla de todo o conjunto de dados da 3ª série, isto é, 350 corpos de prova.

6.1 - EXPERIMENTAÇÃO FATORIAL

A partir do estudo feito no apêndice F, item 4, foi montado um programa para o micro-computador HP-85. Através do mesmo foi possível realizar a análise fatorial variando o número de níveis.

A inclinação das fibras foi considerada como fator X e o tipo de sollicitação como fator Y. As repetições dos ensaios foram considerados como blocos. Na tabela 50, encontram-se os resultados dos ensaios, esquematizados apropriadamente, para a aplicação da experimentação fatorial.

Na tabela 51, encontram-se os resultados da aplicação da análise fatorial, determinados através da análise de variância, para todas as combinações possíveis dos tipos de sollicitações.

Na tabela 52 e 53, encontram-se as análises de variância do conjunto dos tipos de sollicitações da ligação adesiva e do conjunto dos tipos de sollicitações da ligação adesiva mais o cisalhamento da madeira, respectivamente.

Através de esta análise de experimentação fatorial pode-se afirmar estatisticamente:

- A inclinação da aplicação da carga em relação à direção das fibras, influência consideravelmente na tensão de cisalhamento da linha adesiva, devida a todos os tipos de sollicitações estudados.

- As tensões de cisalhamento na flexão e na torção podem ser consideradas iguais. O mesmo não pode ser afirmado para as tensões de cisalhamento, devido a tração, compressão, flexão e torção (combinações).

TABELA 50 - DADOS PARA ANÁLISE DE EXPERIMENTAÇÃO

		FATOR - INCLINAÇÃO DAS FIBRAS (X) - GRAUS							
		BLO- COS	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
FATOR - TIPO DE SOLICITAÇÃO (Y - TENSÕES DE CISALHAMENTO) (N/cm ²)	CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO	1	1114.0	1072.5	1062.8	791.8	668.5	424.1	369.3
		2	1415.5	1178.3	1086.3	950.8	950.7	832.5	705.1
		3	906.3	849.1	723.3	624.6	567.8	322.3	211.8
		4	1567.4	1588.3	1047.0	900.8	699.4	669.6	440.8
		5	1454.9	1392.5	797.0	668.9	927.7	1394.2	649.8
		6	1103.8	992.3	757.0	800.9	759.3	737.1	432.3
		7	909.2	726.7	592.9	558.5	458.4	465.2	391.4
		8	998.7	1392.6	1020.4	615.6	769.7	600.8	605.3
		9	1052.0	988.0	749.0	668.0	883.0	554.0	502.0
		10	1118.0	970.6	962.6	947.5	780.1	754.6	532.9
	CISALHAMENTO NA TRAÇÃO	1	992.3	895.6	872.1	303.5	285.9	191.8	168.0
		2	800.3	712.6	739.2	157.4	100.0	75.6	40.2
		3	935.3	936.1	846.4	577.8	319.7	223.0	78.1
		4	1220.0	1015.9	772.1	591.7	290.2	100.4	130.7
		5	1052.0	958.0	865.8	621.9	337.4	255.0	183.6
		6	1029.8	894.1	734.4	598.7	255.3	132.9	35.8
		7	1153.5	973.1	988.2	421.4	219.4	127.5	92.3
		8	1008.7	900.0	895.6	286.6	165.7	111.8	78.9
		9	973.1	962.7	765.2	587.1	305.5	94.8	75.4
		10	1033.1	983.8	944.9	547.5	318.9	134.4	58.3
	CISALHAMENTO NA FLEXÃO	1	975.0	926.0	851.6	761.9	722.7	621.6	593.8
		2	1011.3	951.2	679.1	358.9	222.2	133.4	142.6
		3	1033.1	1022.3	880.0	773.9	748.5	792.6	326.4
		4	993.1	976.1	874.4	884.5	772.8	643.6	634.2
		5	685.7	611.6	715.1	609.7	580.3	489.0	418.1
		6	948.7	813.2	722.4	675.3	458.4	361.9	334.9
		7	950.1	868.6	774.3	655.6	459.4	336.0	278.5
		8	839.6	775.9	856.1	535.8	499.6	265.9	270.2
		9	771.6	677.3	663.8	624.5	532.5	226.1	202.8
		10	783.4	746.3	724.9	735.3	385.2	36.61	224.0
	CISALHAMENTO NA TORÇÃO	1	1201.8	1101.6	975.6	721.6	451.6	428.0	301.6
		2	1142.5	915.9	755.6	566.8	503.8	431.6	256.1
		3	1057.0	890.7	760.8	619.2	375.7	298.4	172.2
		4	1339.5	955.8	1071.6	760.8	418.5	401.5	376.9
		5	836.3	708.0	854.8	744.8	619.7	493.5	337.4
		6	1218.6	1187.1	820.0	544.3	377.3	297.3	172.3
		7	1165.3	765.9	619.9	336.4	301.6	243.5	287.6
		8	954.5	981.7	819.7	566.8	300.4	298.3	252.7
		9	846.4	774.4	715.9	767.3	615.4	321.6	237.8
		10	1069.6	899.8	817.3	638.5	318.6	261.3	138.1
CISALHAM. NA MADEIRA	1	1523.2	1251.0	1192.2	1294.1	982.0	883.5	817.6	
	2	1715.7	1553.7	1443.5	1135.4	1300.1	1018.3	983.6	
	3	2113.2	1661.4	1391.1	1157.8	1141.0	1145.2	1229.4	
	4	2030.0	1993.2	1503.3	1293.3	1334.5	1372.6	1153.0	
	5	1828.7	903.3	928.8	1162.9	1131.2	1080.7	752.8	
	6	1258.7	1259.6	1353.7	1031.3	1154.0	805.8	732.4	

TABELA 50 - Continuação . DADOS PARA

		FATOR - INCLINAÇÃO DAS FIBRAS (X) - GRAUS							
FATOR Y	CISALHAM. MADEIRA	BLO- COS	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		7	1053.1	1004.3	907.8	802.3	697.1	611.7	537.8
8	1100.4	913.8	761.6	731.0	741.5	507.3	529.8		
9	1219.0	1179.0	1025.0	1176.0	713.0	835.0	729.0		
10	1269.6	1153.6	876.4	961.5	847.8	785.8	821.0		

TABELA 51 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIANÇA

		FATOR Y - INCLINAÇÃO DAS FIBRAS			
FATOR X - TIPO DE SOLICITAÇÃO	TENSÃO DE CISALHAMENT. DEVIDO A:	F DE CADA FATOR	SINAL	F CRÍTIC.	OBSERVAÇÕES
	FATOR X - TIPO DE SOLICITAÇÃO	COMPRESSÃO TRAÇÃO	$F_x = 81.44$ $F_y = 134.33$ $F_{xy} = 7.34$	> > >	2.17 3.92 2.17	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação
COMPRESSÃO TRAÇÃO FLEXÃO		$F_x = 95.90$ $F_y = 68.05$ $F_{xy} = 5.21$	> > >	2.10 3.00 1.75	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação
COMPRESSÃO TRAÇÃO FLEXÃO TORÇÃO		$F_x = 133.31$ $F_y = 45.97$ $F_{xy} = 3.80$	> > >	2.10 2.60 1.60	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação
COMPRESSÃO FLEXÃO		$F_x = 32.44$ $F_y = 44.95$ $F_{xy} = 0.97$	> > <	2.17 3.92 2.17	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. não existe influência da interação
COMPRESSÃO FLEXÃO TORÇÃO		$F_x = 64.71$ $F_y = 30.62$ $F_{xy} = 1.75$	> > =	2.10 3.00 1.75	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. não existe influência da interação
COMPRESSÃO TORÇÃO		$F_x = 48.44$ $F_y = 41.97$ $F_{xy} = 2.33$	> > >	2.17 3.92 2.17	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação

TABELA 51 - Continuação - RESULTADOS DA ANÁLISE

		FATOR Y - INCLINAÇÃO DAS FIBRAS				
FATOR X	TIPO DE SOLICITAÇÃO	TENSÃO DE CISALHAMENT DEVIDO A:	F DE CADA FATOR	SINAL	F CRÍT:	OBSERVAÇÕES
		TRAÇÃO FLEXÃO	$F_x = 160.08$ $F_y = 32.15$ $F_{xy} = 14.67$	> > >	2.17 3.92 2.17		existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação
TRAÇÃO FLEXÃO TORÇÃO	$F_x = 164.02$ $F_y = 16.77$ $F_{xy} = 5.54$	> > >	2.10 3.00 1.75	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação		
FLEXÃO TORÇÃO	$F_x = 65.22$ $F_y = 0.26$ $F_{xy} = 2.65$	> < >	2.17 3.92 2.17	existe influência da inclinação não existe influência da solicit. existe influência da interação		
COMPRESSÃO TRAÇÃO FLEXÃO TORÇÃO CIS.MADEIR.	$F_x = 119.07$ $F_y = 116.49$ $F_{xy} = 2.67$	> > >	2.10 2.37 1.52	existe influência da inclinação existe influência do tipo solicit. existe influência da interação		

TABELA 52 - ANÁLISE DE VARIANÇAS DO CONJUNTO DE SOLICITAÇÕES DA LIGAÇÃO ADESIVA

```

ANALISE: EXPERIMENTACAO FATORIAL
TIPOS DE SOLICITACAO = 4
SOLICITACAO 1 COMPRESSÃO
SOLICITACAO 2 TRACÃO
SOLICITACAO 3 FLEXÃO
SOLICITACAO 4 TORÇÃO
ANALISE DE VARIANCA
*****
FONTE DE SOMA DOS GRAU VARIANCA
VARIACAO QUADRADO LIB.
-----
EFEITO PRINC. X 187469 4 6 31244.91
EFEITO PRINC. Y 32320 3 3 10773.62
INTER. XY 16032 5 18 890.69
ENTRE TRATAMENT. 235822.6 27
ENTRE BLOCOS 9254 5 9 1028.33
RESTO 56954 6 243 234.28
TOTAL 392031.8 279
O EFEITO DA INCLINACAO DAS FIBRA
S E SIGNIFICATIVO, POIS:
132.31 > 2.18
O EFEITO DO TIPO DE SOLICITACAO
E SIGNIFICATIVO, POIS:
45.97 > 2.68
O EFEITO DA INTERACAO E SIGNIFIC
ATIVO, POIS:
3.88 > 1.66
    
```

TABELA 53 - ANÁLISE DE VARIANÇAS DO CONJUNTO DE SOLIC. E DA TENSÃO DE CISALHAM. DA MADEIRA

```

ANALISE: EXPERIMENTACAO FATORIAL
TIPOS DE SOLICITACAO = 5
SOLICITACAO 1 COMPRESSÃO
SOLICITACAO 2 TRACÃO
SOLICITACAO 3 FLEXÃO
SOLICITACAO 4 TORÇÃO
SOLICITACAO 5 CISALHAMENTO MAD
ANALISE DE VARIANCA
*****
FONTE DE SOMA DOS GRAU VARIANCA
VARIACAO QUADRADO LIB.
-----
EFEITO PRINC. X 216709.1 6 35118.18
EFEITO PRINC. Y 141350.9 4 35337.73
INTER. XY 19449.1 24 810.38
ENTRE TRATAMENT. 377509.1 34
ENTRE BLOCOS 24101.4 9 2677.93
RESTO 92823.2 306 303.24
TOTAL 494433.7 349
O EFEITO DA INCLINACAO DAS FIBRA
S E SIGNIFICATIVO, POIS:
119.07 > 2.18
O EFEITO DO TIPO DE SOLICITACAO
E SIGNIFICATIVO, POIS:
116.49 > 2.37
O EFEITO DA INTERACAO E SIGNIFIC
ATIVO, POIS:
2.67 > 1.52
    
```

6.2 - REGRESSÃO MÚLTIPLA CONJUNTA

Com a finalidade de determinar a correlação conjunta dos tipos de solicitações e a inclinação, da aplicação das cargas em relação à direção das fibras, foi realizada análises estatísticas através de regressões múltiplas.

A análise foi feita considerando um experimento com 2 fatores (tipo de solicitação e ângulo de inclinação das fibras), tendo 5 e 7 níveis respectivamente.

Inicialmente foi ajustado um modelo do tipo regressão:

$$Y_{ijk} = u + B_i + E_j + A_k + E.A_{jk} + e_{ijk}$$

sendo:

Y_{ijk} = resposta tensão

u = média geral

B_i = efeito do bloco

i = 1, 2, 3, 10

E_j = efeito do fator tipo de solicitação

$j = 1$ - linha adesiva solicitada ao cisalhamento na tração

$j = 2$ - linha adesiva solicitada ao cisalhamento na compressão

$j = 3$ - linha adesiva solicitada ao cisalhamento na flexão

$j = 4$ - linha adesiva solicitada ao cisalhamento na torção

$j = 5$ - cisalhamento na madeira

A_k = efeito do fator inclinação das fibras

$k = 1$ para 0° , 2 para 15° , 3 para 30° , 4 para 45° , 5 para 75° e 7 para 90°

EA_{jk} = efeito da interação tipo de solicitação x inclinação das fibras

As variáveis independentes serão os fatores e as suas interações, totalizando 43 regressores.

No quadro a seguir, é apresentado a análise de variância para o modelo ajustado.

FONTE DE VARIAÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F
Modelo	43	4156.018	96.652	32.70
Resíduo	306	916.367	2.995	-----
Total	349	5072.388	-----	-----

Coeficiente de explicação do modelo $R^2 = 81.90\%$

F é significativo ao nível de 0.1% indicando que o modelo é adequado.

Na análise dos resíduos não foi detectada nenhuma distribuição anormal, indicando ter sido considerada toda a contribuição das variáveis no modelo.

A seguir foi ajustado um modelo sem os efeitos interativos. O modelo ajustado foi:

$$Y_{ijk} = u + B_i + E_j + A_k + e_{ijk}$$

O coeficiente de explicação do modelo foi $R^2 = 78.2\%$. Comparando com o coeficiente de explicação do modelo anterior, pode-se concluir que o efeito interativo não altera consideravelmente o comportamento do modelo.

Para a verificação da importância do efeito da inclinação das fibras, foi considerado o modelo a seguir:

$$Y_{ij} = u + B_i + E_j + e_{ij}$$

Pela análise de variância, foi verificada que a soma dos resíduos aumenta consideravelmente e o coeficiente de explicação ($R^2 = 60.7\%$) diminui, indicando que o efeito da inclinação das fibras, no modelo, é importante.

Assim, os efeitos dos fatores principais são muito importantes, o mesmo não pode ser afirmado para o fator de interação.

O melhor modelo ajustado foi, aquele que não considera o efeito interativo.

CAP 06 - INFLUÊNCIA DA TRAÇÃO NORMAL NO CISALHAMENTO

1 - INTRODUÇÃO

A distribuição de tensões de tração e compressão normal às fibras da madeira, no modelo em escala natural, determinada experimentalmente no capítulo II, evidenciou o elevado valor destas tensões.

Neste capítulo foi verificada experimentalmente a influência das tensões de tração no modelo em escala natural simples e duplo. Também foram feitas comparações entre os resultados obtidos e as tensões de tração determinadas no ensaio de tração da ligação.

Com os resultados dos ensaios de cisalhamento oblíquo, foi possível definir a influência da tensão de tração normal à linha adesiva no modelo em escala reduzida.

Através de hipótese de diferença nula foi possível definir estas influências.

2 - O ENSAIO

A finalidade destes ensaios é constatar a influência da tração normal à película adesiva nos ensaios de cisalhamento na compressão em corpos de prova em escala natural e reduzida. Para isto foi esquematizada a 4ª série de ensaios, figura 90 do capítulo II, com 100 corpos de prova distribuídos conforme indicados no item 3.3.2 do capítulo II.

Na figura 213, são apresentados os corpos de prova.

Concluída a montagem dos corpos de prova foram determinadas todas as dimensões necessárias.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios Amsler, com velocidade de carregamento apropriado para cada modelo, até atingir a ruptura, figura 214.

Durante a realização dos ensaios observou-se:

- A ruptura dos corpos de prova de cisalhamento oblíquo

ocorreu, na maioria dos corpos de prova, na madeira.

- A ruptura dos corpos de prova de tração normal da ligação ocorreu na interface adesivo-aderente.

- Nos corpos de prova de cisalhamento na compressão em escala natural simples e duplo, a ruptura ocorreu por tração normal à linha adesiva no início da película adesiva.



Fig. 213 - Corpos de prova

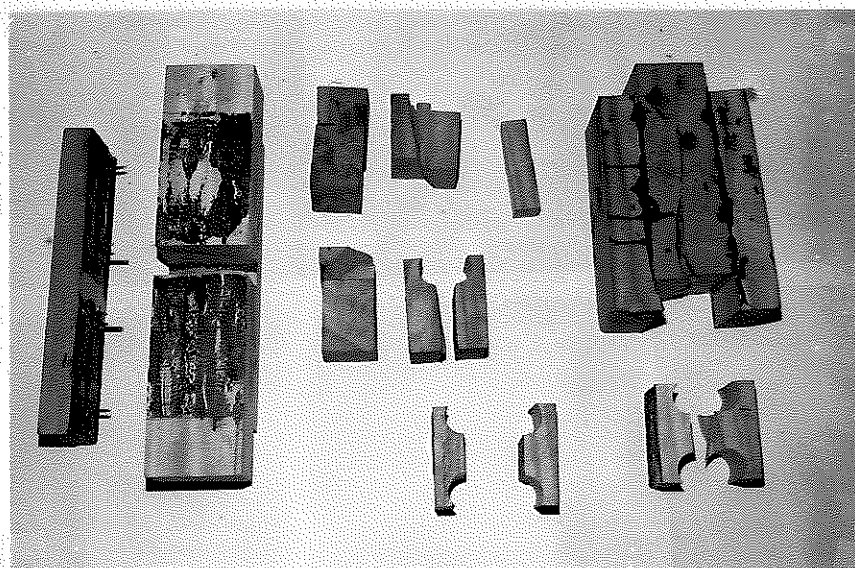


Fig. 214 - Ruptura dos corpos de prova

A ruptura por tração normal, dos corpos de prova em escala natural, diminui a capacidade da ligação. Por isto, imaginou-se uma maneira de eliminar este tipo de ruptura. A primeira idéia foi

colocar um grampo na parte inferior do corpo de prova, figura 215-b. Desta maneira a tensão de tração, na parte inferior da linha adesiva, seria combatida pela reação dos grampos. Lamentavelmente a ruptura continuou a ocorrer por tração normal, mas desta vez, na parte superior da linha adesiva, isto é, ocorreu inversão de tensões. A segunda idéia foi colocar mais um grampo na parte superior do corpo de prova, figura 215-c. Com este sistema a ruptura ocorreu por cisalhamento com, aproximadamente, um acréscimo de 40% da carga a mais. Na tabela 54, encontram-se estes resultados.

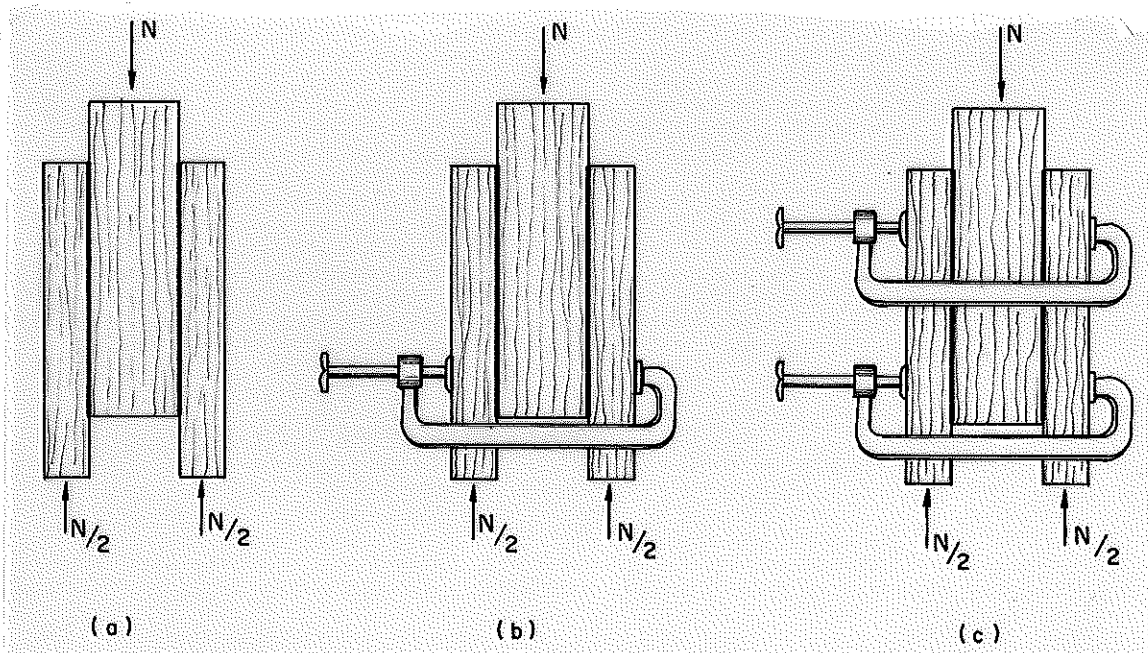


FIG. 215 - a) SISTEMA CONVENCIONAL DE ENSAIO DO CORPO DE PROVA
b) CORPO DE PROVA COM UM GRAMPO
c) CORPO DE PROVA COM DOIS GRAMPOS

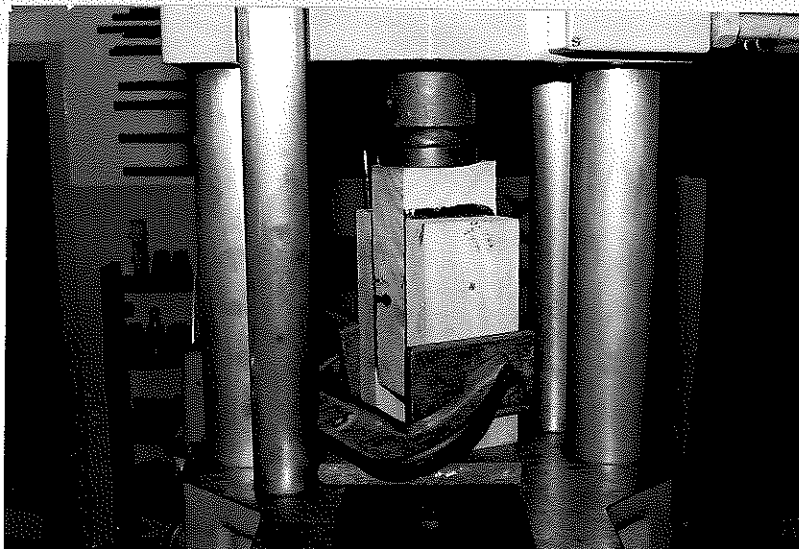


Fig 216 - Ensaio do corpo de prova com um grampo

TABELA 54 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPARATIVOS

VIGA \ TIPO	SEM GRAMPO	COM UM GRAMPO	COM DOIS GRAMPOS
	τ_{ac} (N/cm ²)	τ_{ac} (N/cm ²)	τ_{ac} (N/cm ²)
1	381	460	686
2	527	426	691
3	415	498	632
4	605	554	751
5	411	558	642
6	627	611	731
MÉDIAS	493	518	689

2.1 - COLEÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

No ensaio de cisalhamento oblíquo, figura 217, a tensão de cisalhamento será:

$$\tau_{ao} = \frac{N}{2.A}$$

sendo:

N = carga de ruptura do corpo de prova

A = área da seção transversal

τ_{ao} = tensão de cisalhamento oblíquo na linha adesiva

No ensaio de tração normal da ligação a tensão pode ser determinada pela relação:

$$\sigma_{atn} = \frac{N}{A}$$

sendo:

σ_{atn} = tensão de tração normal da ligação

N = carga de ruptura de tração normal da ligação

A = área

Dos modelos em escala natural simples e duplo foram obtidos, a partir das cargas de ruptura e das dimensões dos modelos,

as tensões de cisalhamento e de tração normal à linha adesiva, através das equações:

$$\tau_{ac} = \frac{N_{rup}}{2.A_c} \quad \text{e} \quad \sigma_{tn} = \frac{3.N_{rup}.c}{4.y".a.z}$$

sendo:

τ_{ac} = tensão de cisalhamento na linha adesiva na compressão

N_{rup} = carga de ruptura do corpo de prova

σ_{nt} = tensão de tração normal à linha adesiva

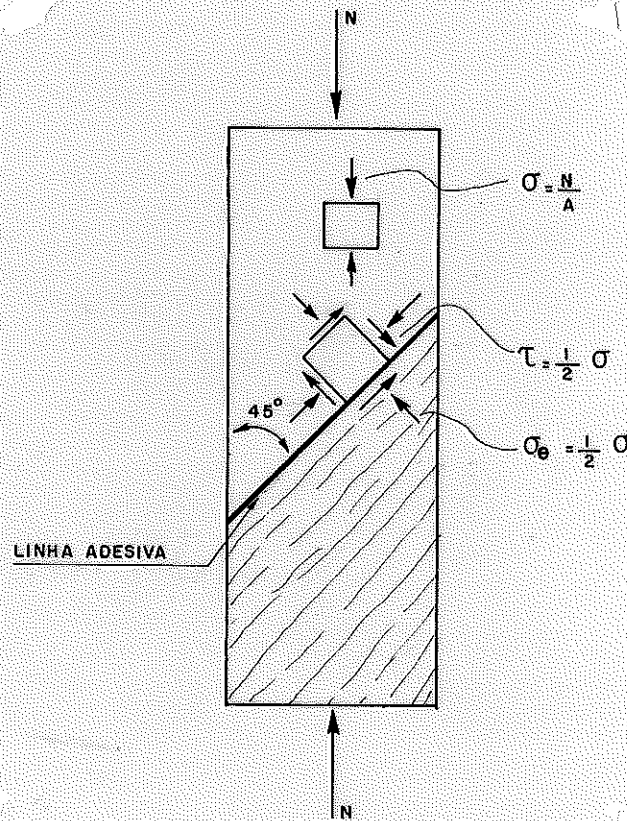


FIG. 217 - TENSÃO DE CISALHAMENTO - ENSAIO DE CISALHAMENTO OBLÍQUO

Na figura 218, são apresentadas as dimensões do modelo em escala natural, duplo.

Os resultados obtidos nestes ensaios encontram-se na tabela 55.

TABELA 55 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DA 4ª SÉRIE DE ENSAIOS

VIGA	NATURAL DUPLO		NATURAL SIMP.		τ_{ac} N/cm ²	$\tau_{obli.}$ N/cm ²	σ_{af} N/cm ²	σ_{atn} N/cm ²	τ_w N/cm ²	σ_{wf} N/cm ²	σ_{wtn} N/cm ²	σ_w N/cm ²	D_{ap} KN/m ³	U %
	τ_{ac}	σ_{tn}	τ_{ac}	σ_{tn}										
1	330	300	410	410	1410	1430	113	470	1830	105	430	5440	8.10	13.91
2	230	210	520	520	1720	1720	102	430	1860	113	550	6010	9.90	13.45
3	300	270	520	520	1710	1480	91	520	1810	105	460	5100	7.50	13.31
4	380	340	430	430	1300	1270	78	550	1550	96	500	4530	6.90	14.13
5	370	340	610	610	2000	1870	87	580	2200	87	940	5440	9.10	13.46
6	360	330	630	630	1500	1150	75	590	1730	82	690	5710	7.30	14.31
7	630	620	510	510	1580	1730	112	460	2020	105	490	5850	8.20	14.81
8	140	130	380	380	1290	1460	81	500	1870	81	650	6580	8.60	14.61
9	280	250	420	420	1230	1110	78	520	1740	80	540	5650	7.80	14.56
10	440	400	450	450	1200	1260	122	590	1800	113	560	5490	7.60	17.78
Médias	351	318	488	488	1494	1448	94	521	1841	97	581	5580	8.10	14.43
Des. Pad.	143	130	85	85	259	259	17	57	174	13	15	545	0.90	1.29

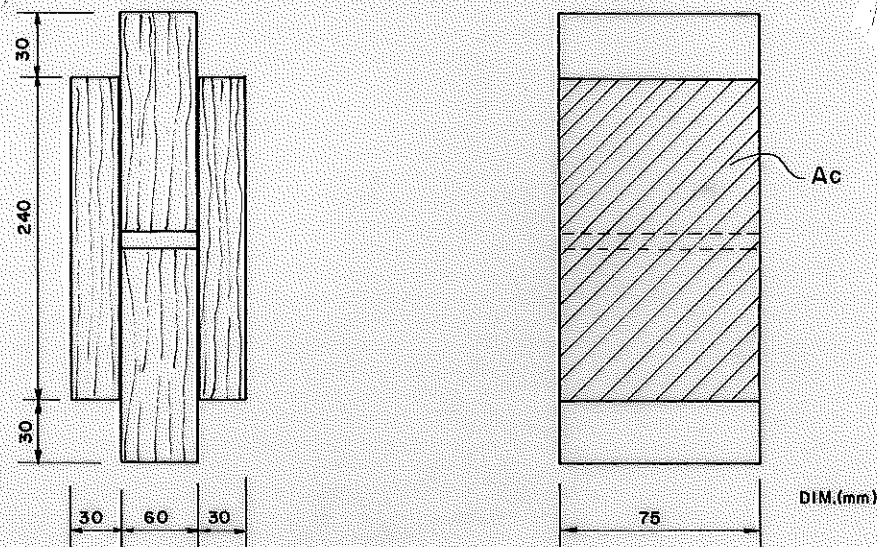


FIG. 218 - MODELO EM ESCALA NATURAL DUPLO

2.2 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A partir da análise de hipótese de diferença nula entre os resultados obtidos nos ensaios, determinou-se:

Quanto à tensão de tração normal

Adotada a hipótese de diferença nula entre as tensões de terminadas no modelo em escala natural, simples, com as determinadas no modelo em escala natural, duplo, e com as determinadas no modelo de tração normal da ligação, tabela 56, pode-se concluir, estatisticamente com 95% de significância:

- A ruptura dos corpos de prova em escala natural ocorre por tração normal à linha adesiva. Pois a hipótese de diferença nula entre as tensões de tração normal, à linha adesiva, no modelo em escala natural, e no modelo de tração normal da ligação é significante, isto é, a diferença pode ser considerada nula. Portanto, a tensão de tração normal no modelo em escala natural pode ser considerada igual à tensão de tração normal no modelo de tração normal da ligação.

- A hipótese de diferença nula das tensões de tração normal, à linha adesiva, no modelo em escala natural, simples, e em escala natural, duplo, foi rejeitada, com o valor da média das tensões de tração normal no modelo em escala natural simples maior do que a média das tensões no modelo em escala natural duplo. Esta

diferença ocorre devido à adoção de esquemas estáticos de ensaios diferentes, figura 219. No esquema estático no modelo em escala natural, simples, figura 219-b, existe uma certa influência do atrito entre a base do corpo de prova e o prato da máquina de ensaio. Isto não ocorre no esquema estático do corpo de prova em escala natural, duplo, figura 219-a.

- A ruptura por tração da linha adesiva poderá ocorrer na interface adesivo-madeira ou na madeira. Pois a hipótese de diferença nula entre as tensões de tração normal na ligação e da madeira é significativa, isto é, as tensões podem ser consideradas iguais.

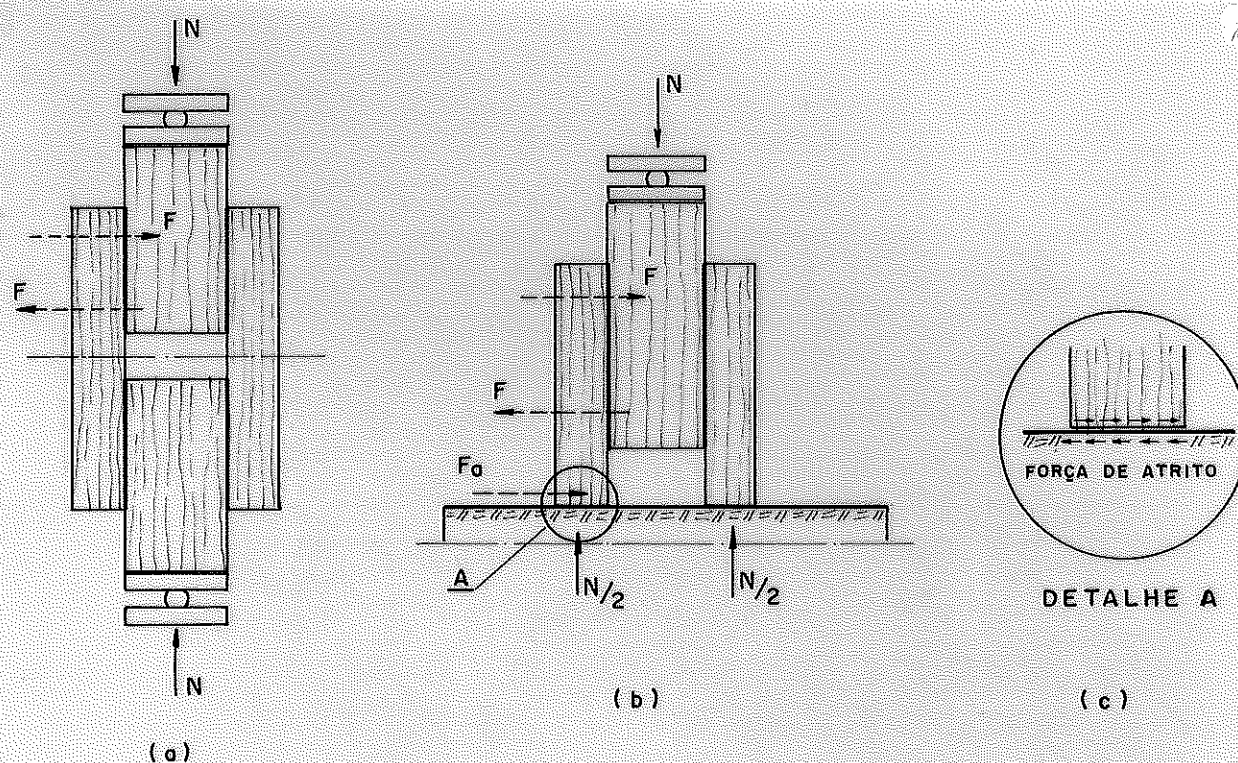


FIG. 219 - a) ESQUEMA ESTÁTICO NO MODELO DUPLO
 b) ESQUEMA ESTÁTICO NO MODELO SIMPLES
 c) DETALHE FORÇA DE ATRITO

Quanto à tensão de cisalhamento

Adotando a hipótese da diferença nula, tabela 57, pode-se afirmar, estatisticamente, com 95% de significância:

- A ruptura do corpo de prova em escala reduzida ocorre por cisalhamento com influência insignificante da tensão de tração

normal à linha adesiva. Pois a hipótese de diferença nula entre as tensões de cisalhamento no modelo de ensaio de cisalhamento oblíquo e no modelo em escala reduzida é insignificante, isto é, a diferença pode ser considerada nula ou as tensões iguais.

- A ruptura nos corpos de prova em escala reduzida ocorre na linha adesiva e não na madeira. Pois a hipótese de diferença nula entre as tensões de cisalhamento no modelo em escala reduzida e no modelo de cisalhamento da madeira foi rejeitada com valor da média das tensões de cisalhamento da madeira maior do que as tensões de cisalhamento no modelo em escala reduzida.

- As tensões de cisalhamento no modelo em escala natural não podem ser consideradas iguais às tensões de cisalhamento no modelo em escala reduzida. Pois a hipótese de diferença nula foi rejeitada com valor da média das tensões de cisalhamento no modelo em escala reduzida 3 vezes maior do que as tensões de cisalhamento no modelo em escala natural. Esta afirmação estava implícita nas conclusões anteriores, pois a tensão de cisalhamento no modelo em escala natural sofre a influência da tensão de tração normal à linha adesiva. Isto não ocorre com a tensão de cisalhamento no modelo em escala reduzida.

TABELA 56 - HIPÓTESES DE DIFERENÇA NULA - TRAÇÃO NORMAL

VARIÁVEL 1 TENSÃO		TRAÇÃO - ESCALA NATURAL SIMPLES $t_{cr} = 2.262$				OBSERVAÇÕES
		MÉDIA	DESVI PADR.	t_{caI}	INTERVALO DE CONFIANÇA	
TRAÇÃO LIGAÇÃO		-34	84	1.274	-94.3, 26.4	A hipótese é aceita, não existe diferença
TRAÇÃO, ESC. NATURAL DUPLO		169	134	3.980	73.0, 265	A hipótese é rejeitada, existe diferença
		TRAÇÃO - MODELO TRAÇÃO DA LIGAÇÃO $t_{cr} = 2.262$				
TRAÇÃO MADEIRA		60	129	1.468	-32.5, 152	A hipótese é aceita, não existe diferença

TABELA 57 - HIPÓTESES DE DIFERENÇA NULA - CISALHAMENTO

VARIÁVEL 1 TENSÃO		CISALHAMENTO - MODELO ESC. REDUZIDA $t_{cr} = 2.262$			
VARIÁVEL 2 TENSÃO	MÉDIA	DESV. PADR.	t_{ca1}	INTERVALO DE CONFIANÇA	OBSERVAÇÕES
CISALHAMENTO OBLÍQUO	-46	164	0.887	-163 , 71.3	A hipótese é aceita, não existe diferença
CISALHAMENTO ESC. NATURAL	1006	204	15.62	860.3 , 1151	A hipótese é rejeitada, existe diferença
CISALHAMENTO MADEIRA	347	185	5.937	414.8 , 479	A hipótese é rejeitada, existe diferença

CAP 07 - ENSAIOS COMPLEMENTARES

1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão analisados os ensaios adicionais realizados conjuntamente com as séries de ensaios mencionadas anteriormente.

Foram realizados ensaios de tração normal e de fendilhamento da linha adesiva e da madeira. Foram realizados ensaios de cisalhamento e de compressão paralela da madeira. Também foram determinadas a umidade e a densidade dos corpos de prova.

Com os resultados dos ensaios de fendilhamento e de tração normal da ligação e da madeira foram feitas análises estatísticas e determinadas as tensões características.

Nos ensaios de cisalhamento e compressão da madeira foi analisada a influência da umidade, da densidade e da inclinação das fibras nas tensões de cisalhamento e compressão.

2 - ENSAIO DE TRAÇÃO NORMAL DA LIGAÇÃO ADESIVA E DA MADEIRA

A preparação dos corpos de prova de tração normal da ligação adesiva foi feita com madeira da 4ª série de ensaios.

Concluída a preparação dos corpos de prova foram determinadas as dimensões da área colada.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios Amsler, com carregamento à razão de 2.5 MPa por minuto, até atingir a ruptura. A obtenção da tensão de tração normal da ligação adesiva é imediata.

$$\sigma_{atn} = \frac{N_{rup}}{A_c}$$

sendo:

σ_{atn} = tensão de tração normal da ligação adesiva
 N_{rup} = carga de ruptura de tração normal da ligação

A_c = área colada

Para comparação com as tensões da madeira, foram confeccionados, também com madeira da 4ª série de ensaios, os corpos de prova de tração normal da madeira. Após a determinação das dimensões foi realizado o ensaio com velocidade de carga à razão de 2.5 MPa por minuto até alcançar a ruptura. A obtenção da tensão de tração normal da madeira é imediata.

$$\sigma_{\text{wtm}} = \frac{N_{\text{rup}}}{A}$$

sendo:

σ_{wtm} = tensão de tração normal da madeira

N_{rup} = carga de ruptura de tração normal da madeira

A = área de ruptura

Na tabela 55, capítulo VI, encontram-se os resultados destes ensaios.

Na figura 219, é mostrado o esquema de ensaio (68).

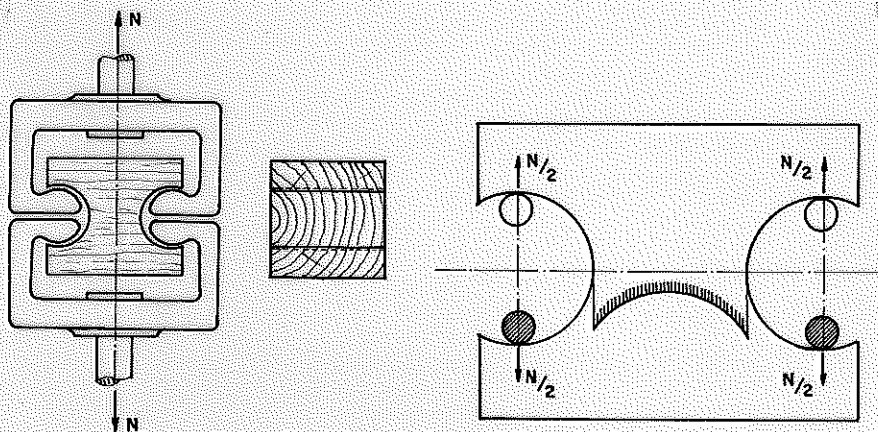


FIG.219- ESQUEMA DE ENSAIO DE TRAÇÃO NORMAL

2.1 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Através da hipótese de diferença nula entre as tensões de tração normal da ligação e da madeira, apresentada a seguir:

$$\begin{array}{ll} \text{média da diferença} = 60 \text{ N/cm}^2 & \text{desv. Pad. da difer.} = 129 \text{ N/cm}^2 \\ t_{\text{cal}} = 1.486 < t_{\text{cr}} = 2.262 & \text{interv. confianc.} (-32.5, 152.5) \end{array}$$

conclui-se, estatisticamente com 95% de significância, pela aceitação da hipótese de diferença nula entre a tensão normal da ligação adesiva e da madeira.

A resistência característica da ligação adesiva à tração normal às fibras, foi determinada a partir dos parâmetros estatísticos, média = 521 N/cm^2 , desvio padrão = 56.7 N/cm^2 e intervalo de confiança ($480.4, 561.5$), e admitindo que a média e o desvio padrão da população possa ser representada pelas estimativas, a resistência característica será:

$$f_{\text{atnk}} = 428.0 \text{ N/cm}^2$$

sendo:

f_{atnk} = resistência característica da ligação adesiva à tração normal às fibras

3 - ENSAIO DE FENDILHAMENTO DA LIGAÇÃO ADESIVA E DA MADEIRA

A preparação dos corpos de prova de fendilhamento da ligação e da madeira foi feita na 4ª série de ensaios. Concluída a preparação dos corpos de prova foram determinadas as dimensões necessárias.

Os ensaios foram realizados na máquina universal Amsler, com carregamento contínuo, a razão de 1.0 MPa por minuto, até atingir a ruptura.

A tensão de fendilhamento obtida tem apenas significado comparativo, pois depende da forma e dimensões dos corpos de prova.

Na figura 220, é mostrada a distribuição de tensões no

corpo de prova de fendilhamento e as isostáticas das tensões de tração (69).

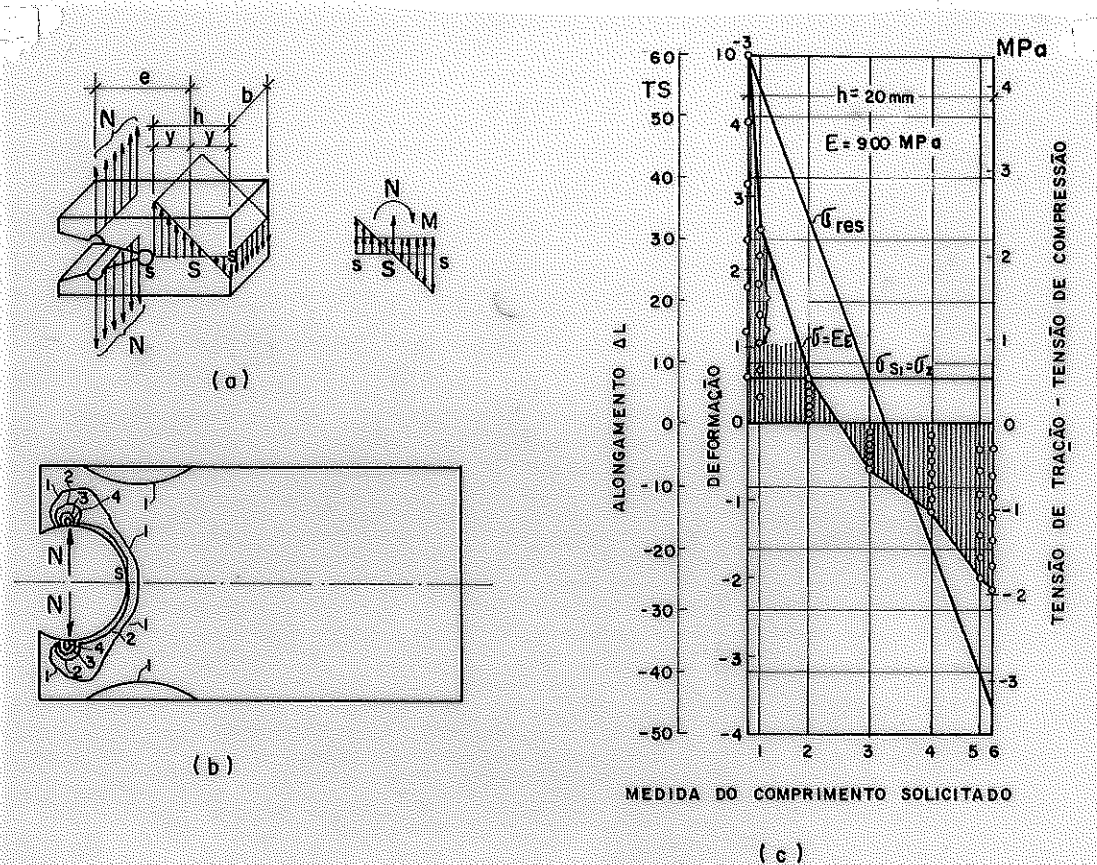


FIG. 220 a) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES
 b) ISOSTÁTICAS DE TRACÇÃO
 c) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES (VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL)

As tensões de fendilhamento serão:

$$\sigma_{af} = \frac{N_{rup}}{A_c} \qquad \sigma_{wf} = \frac{N_{rup}}{A}$$

sendo:

- σ_{af} = tensão de fendilhamento da ligação adesiva
- σ_{wf} = tensão de fendilhamento da madeira
- A_c = área colada de fendilhamento
- A = área de fendilhamento

3.1 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Através de hipótese de diferença nula pode-se concluir, estatisticamente com 95% de significância, pela aceitação da hipótese nula, isto é, a tensão de fendilhamento do adesivo pode ser considerada igual à tensão de fendilhamento da madeira. A seguir encontra-se esta análise.

Média da diferença = 9.34 N/cm^2 , Desv. Padr. da difer. = 9.5 N/cm^2
 $t_{\text{cal}} = 0.934 < t_{\text{cr}} = 2.262$ altamente significativa
 Intervalo de confiança: (3.987, 9.587)

A resistência característica da ligação adesiva ao fendilhamento, foi determinada através da estimativa da média e do desvio padrão (média = 93.9 N/cm^2 , desvio padrão = 17.1 N/cm^2 e intervalo de confiança: 81.66, 106.1). Assim esta resistência característica será:

$$f_{\text{afk}} = 65.6 \text{ N/cm}^2$$

sendo:

f_{afk} = resistência característica da ligação adesiva ao fendilhamento

4 - CISALHAMENTO E COMPRESSÃO DA MADEIRA

4.1 - INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NA TENSÃO DE CISALHAMENTO E COMPRESSÃO DA MADEIRA

Com os ensaios de caracterização da madeira, nas distintas séries de ensaios e com os resultados da 6ª série de ensaios, confeccionada para este fim, tabela 58, foi feita análise de regressão múltipla para a determinação da influência da umidade e da densidade na tensão de cisalhamento e de compressão da madeira. Nas tabelas 59 e 60, encontram-se os modelos matemáticos e a análise de variância da tensão de cisalhamento e de compressão da madeira, respectivamente. Este último modelo foi utilizado por Pigozzo (70).

(70) PIGOZZO, J., C. - Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira. São Carlos, EESC-USP, 1982.

TABELA 58 - RESULTADOS ENSAIOS - CISALHAMENTO, COMPRESSÃO, UMI., DENSID.

τ_w N/cm ²	σ_{wc} N/cm ²	D KN/m ³	U %	τ_w N/cm ²	σ_{wc} N/cm ²	D KN/m ³	U %
2186	5112	9.10	12.80	1574	4809	7.80	13.00
1942	4432	6.70	12.75	1731	4575	7.80	12.70
2310	5442	7.70	12.40	1887	5094	7.80	15.35
2215	4459	7.50	11.83	1693	4397	6.90	12.96
1754	5633	7.90	13.01	1466	4349	7.30	12.77
2124	4590	9.30	13.63	1756	5069	8.00	12.04
2452	5554	8.50	12.75	1229	4299	6.60	13.29
2210	6261	7.80	11.77	1649	5754	8.40	12.98
1660	4462	7.10	12.88	1760	4560	8.30	12.80
2036	5802	7.50	12.27	1579	5332	8.70	14.15
1959	5266	7.70	11.10	1530	5263	8.40	13.01
1682	5317	8.30	11.95	1685	3972	8.10	13.33
1939	6250	8.00	11.08	1780	5361	7.90	12.71
1932	5856	8.40	12.51	2217	2612	9.20	12.99
1735	4552	7.60	12.42	2059	4531	8.50	12.67
2582	4927	6.50	12.76	1657	4351	7.80	13.55
1862	3746	7.40	11.39	1747	5214	8.40	13.06
1642	6125	7.40	11.78	1505	4698	8.20	11.88
2195	6567	8.40	12.23	1994	5244	8.00	12.68
1627	6010	8.30	13.03	1605	5333	8.20	13.41
1979	5357	7.70	13.12	1790	4624	8.10	12.42
1606	4708	7.80	12.90	1833	3916	8.50	11.73
1698	4651	7.60	12.25	1765	4098	7.40	10.94
2431	6313	8.00	11.87	1917	3916	7.40	11.65
2083	6534	7.90	12.17	1662	3923	7.50	12.65
2101	6369	8.20	12.55	1874	4258	8.90	12.39
1711	5582	7.50	12.30	1720	3664	7.60	11.91
1675	5575	8.40	11.27	1689	4012	7.40	12.10
1674	4690	7.70	12.17	1713	4875	8.30	11.16
1438	3850	6.60	12.17	1533	2581	6.40	11.36
1472	5277	7.50	12.61	1922	3866	8.00	11.00
1722	4531	8.30	12.97	1931	4206	8.80	11.95
1628	5372	7.70	12.74	1903	3931	9.00	12.40
1664	4591	8.00	12.97	1945	4601	8.30	11.80
1256	5569	9.30	12.77	1925	4406	7.20	12.07
1967	4777	7.70	12.78	1688	4929	9.50	13.23
1822	5300	8.60	11.78	1884	4920	9.30	12.57
1324	4834	7.70	13.56	1478	3707	7.60	12.94
1640	4503	7.70	13.86	1546	2239	7.80	11.77
1623	5400	7.40	12.97	1504	4171	7.80	11.96
1803	4370	7.20	13.63	1497	4410	7.60	12.58
2489	5716	8.50	13.41	1538	4252	8.20	13.24
1719	5914	8.90	13.32	1362	4536	8.10	18.46
1864	5197	8.50	13.31	1692	4001	8.00	16.30
1916	6024	8.80	13.49	1852	4250	8.40	15.60
2137	4971	8.40	13.61	1533	3432	6.30	14.80
1877	5235	7.40	13.86	1704	5502	8.30	14.90
1767	5679	8.00	13.61	1632	4682	7.70	14.60
1786	4496	9.20	15.13	1700	3102	7.50	19.40
1897	5968	8.90	14.74	1502	4495	8.30	14.90
1798	4691	8.30	14.78	1654	4802	7.90	15.10

TABELA 58 - continuação - RESULTADOS EN -----

T_w N/cm ²	σ_{wc} N/cm ²	D KN/m ³	U %	T_w N/cm ²	σ_{wc} N/cm ²	D KN/m ³	U %
2135	4507	9.60	14.39	1605	4832	8.80	16.02
1472	3782	7.30	14.73	1592	5182	8.40	16.20
1983	4481	8.50	14.78	1228	5941	7.80	11.46
1722	3863	8.20	15.84	1671	4492	6.50	11.05
1983	3454	6.40	14.79	1996	5099	7.90	11.34
1820	4950	8.90	14.31	1543	3843	6.10	10.87
1349	4515	8.00	18.47	1694	5660	7.70	11.28
1703	3966	7.90	16.29	1564	4489	7.00	11.29
1939	4350	8.50	15.36	1686	5294	6.90	10.76
1481	3334	6.30	14.78	1833	5711	7.10	10.81
1693	5681	8.30	14.79	1771	4830	6.60	11.12
1610	4651	7.80	14.80	1514	5118	7.60	17.97
1680	3027	7.30	19.30	1626	6078	7.20	11.00
1419	4521	8.20	14.95	1580	5660	7.60	11.18
1713	4745	8.00	14.65	1421	4362	6.40	10.76
1503	4852	8.10	15.03	1932	4950	8.00	11.25
1622	5202	8.30	16.15	1847	4307	7.00	10.92
1680	5000	8.30	13.30	1919	5382	8.10	11.28
1450	5735	7.10	11.08	1670	6250	7.50	10.80
1689	3907	7.10	10.58	1580	5370	8.30	15.78
1394	5147	6.70	10.49	1740	5020	8.10	17.57
1657	4759	6.90	11.19	1720	4700	8.40	18.57
1654	4853	7.40	11.18	1678	4710	7.50	19.88
1597	6078	7.00	11.03	1560	5090	7.90	15.10
1640	4970	8.40	18.90	1340	5000	7.50	18.40
1590	5300	7.70	13.70	1660	4600	8.70	20.80
1840	5200	7.60	13.10	1600	5870	8.20	15.10
1950	6820	7.70	13.70	1860	5100	7.80	14.30
1980	5120	7.90	13.50	1900	5430	8.20	13.90
2010	7350	8.80	13.10	1320	5050	7.90	15.60
1490	5200	7.70	14.10	1590	4230	8.00	13.60
1640	4880	7.40	13.20	2660	5780	9.30	13.60
2050	5810	9.60	12.90	2090	5900	8.60	13.70
1780	6940	9.10	12.90	1290	4090	7.10	16.60
1850	4860	8.80	21.70	1490	4260	8.60	18.60
1420	4130	9.20	22.40	1480	4320	7.70	14.20
1400	4170	8.40	20.00	1170	4510	7.90	22.60
1470	4660	9.20	22.70	1523	5046	7.80	13.13
1330	5130	8.50	23.00	1716	4821	7.30	11.82
1260	4290	8.10	20.11	2113	4740	8.60	12.71
1220	4610	7.90	18.21	2030	6203	8.50	11.45
1490	5980	7.40	11.60	1829	4135	6.80	13.81
1620	6230	7.70	10.70	1254	4071	7.50	16.89
1720	6150	7.80	11.20	1053	2623	7.10	20.65
1740	5870	7.50	11.10				

TABELA 59 - REGRESSÃO: TENSÃO DE CISALHAMENTO DA MADEIRA x UMIDADE x DENSIDADE		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\tau_w)/D$ = variável depen. U = variável indep. U^2 = variável indep. D^{-1} = variável indep.	Log. tens.cis.mad./densidade umidade umidade ao quadrado inverso da densidade
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\tau_w)/D = 0.356 + 0.0085.U - 0.0007.U^2 + 1.97.D^{-1}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 91.5 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{\text{cal}} = 667 > F_{\text{cr}} = 2.60$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	β_1$ |t_1| = 0.46 < t_{\text{cr}} = 1.96$ β_2$ |t_2| = 1.22 < t_{\text{cr}} = 1.96$ β_3$ |t_3| = 40.77 > t_{\text{cr}} = 1.96$	não significativa pouco significativa altamente significativa
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 1.95 > d_U = 1.74$	conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$U_2 = 15.66 \%$ $U^2 = 1.33 \%$ $D^{-1} = 83.01 \%$	contribuição satisfatória baixa contribuição ótima contribuição
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os dados experimentais	

TABELA 60 - REGRESSÃO: TENSÃO DE COMPRESSÃO DA MADEIRA x UMIDADE x DENSIDADE		
DISCRIMINAÇÃO		OBSERVAÇÕES
PARÂMETROS	$\text{Log}(\sigma_{wc})/D$ = variável depen. U = variável indep. U^2 = variável indep. D^{-1} = variável indep.	Log. Tens.Cis.Mad./densidade umidade umidade ao quadrado inverso da densidade
MODELO MATEMÁTICO	$\text{Log}(\sigma_{wc})/D = 0.962 - 0.0512.U + 0.0011.U^2 + 2.31.D^{-1}$	
COEFICIENTE	$R^2 = 92.8 \%$	altamente significativa
TESTE F	$F_{ca1} = 788 > F_{cr} = 2.60$	a regressão é altamente significativa
TESTE t	β_1$ |t_1| = 2.61 > t_{cr} = 1.96$ β_2$ |t_2| = 44.1 > t_{cr} = 1.96$ β_3$ |t_3| = 1.86 < t_{cr} = 1.96$	significativa altamente significativa pouco significativa
TESTE DE DURBIN WATSON	$d = 1.81 > d_U = 1.74$	conclui-se pela validade da aplicação dos mín. quadrados
SOMA DOS QUADRADOS	$U_2 = 14.72 \%$ $U^2 = 85.13 \%$ $D^{-1} = 0.15 \%$	contribuição satisfatória ótima contribuição pouca contribuição
COMENTÁRIOS	a) - O modelo matemático representa satisfatoriamente os resultados experimentais. b) - a variável D^{-1} pode ser eliminada do modelo, pois a contribuição na soma dos quadrados é mínima.	

Análise de resíduos

A distribuição dos resíduos, em relação a todas as variáveis encontra-se uniformemente espaçada em relação ao resíduo nulo. Assim, toda a contribuição das variáveis foi considerada nos modelos. As figuras 221, 222, 223 e 224, referem-se à tensão de cisalhamento e as figuras 225, 226, 227 e 228 referem-se à compressão paralela às fibras da madeira.

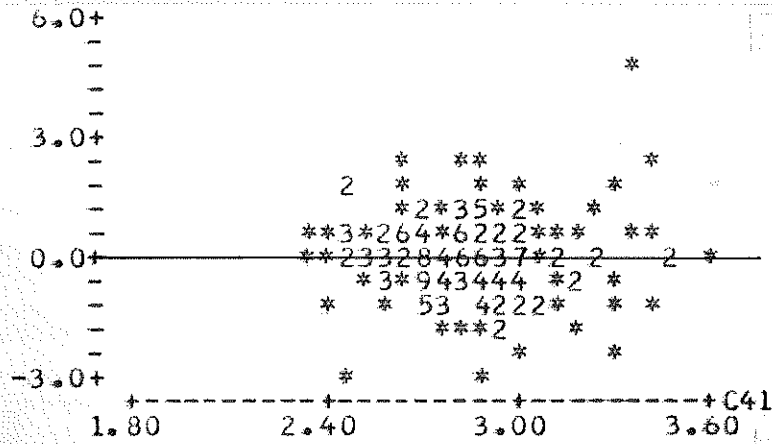


Fig. 221 - Gráfico - resíduo x valor predito

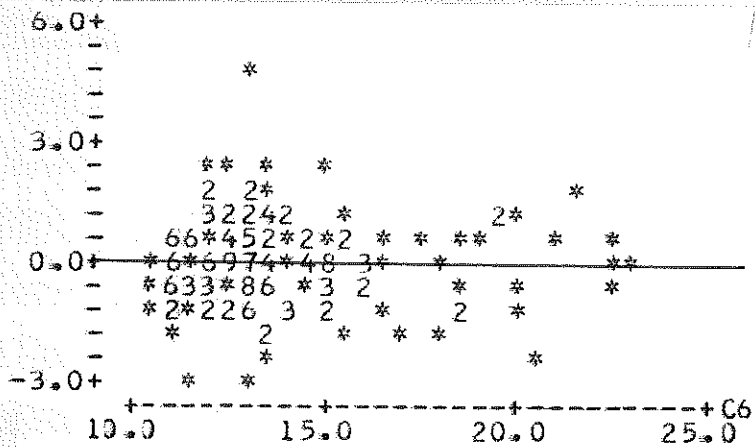


Fig. 222 - Gráfico - resíduo x unidade

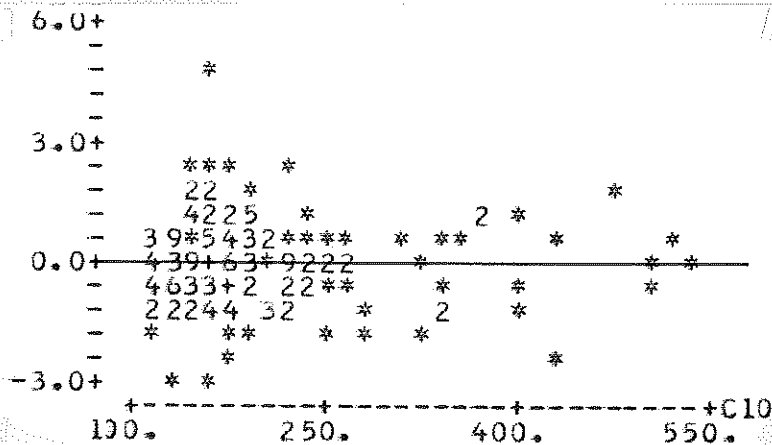


Fig. 223 - Gráfico - resíduo x unidade ao quadrado

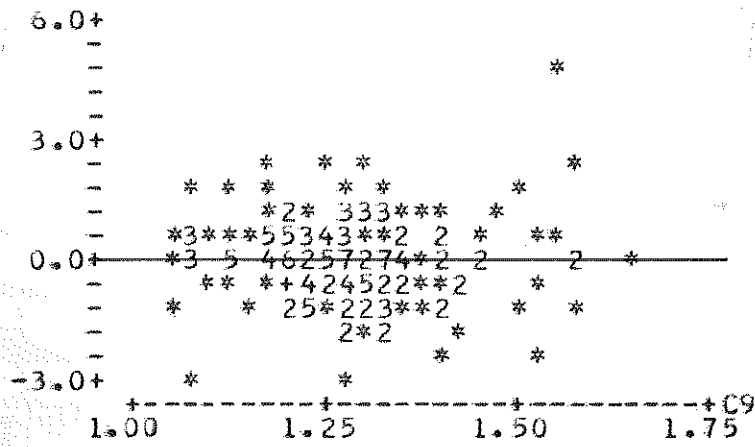


Fig. 224 - Gráfico - resíduo x inverso da densidade

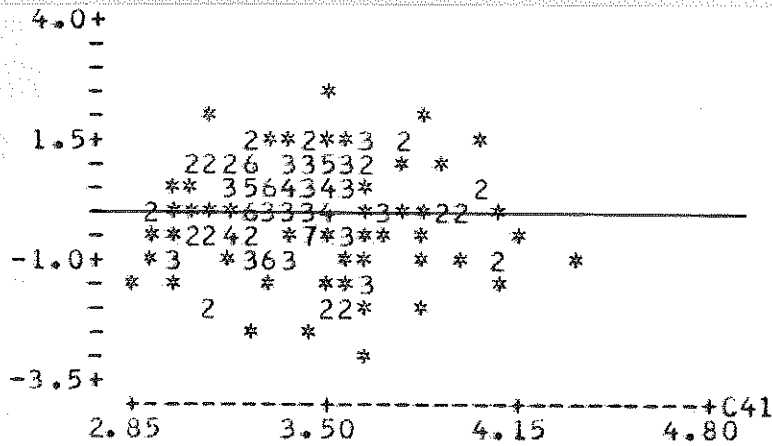


Fig. 225 - Gráfico - resíduo x valor predito

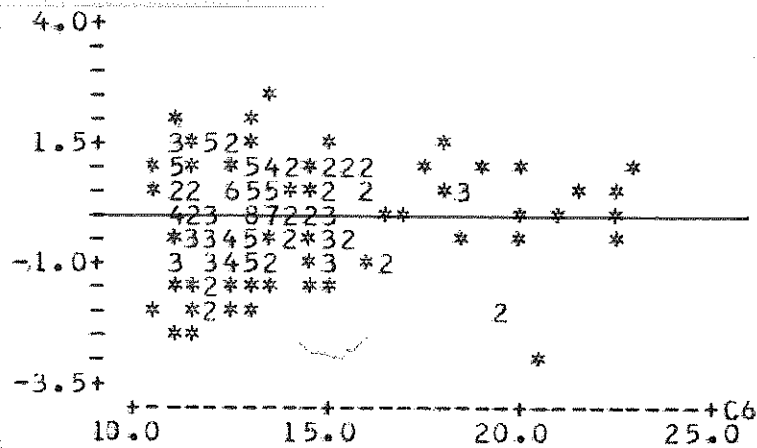


Fig. 226 - Gráfico - resíduo x umidade

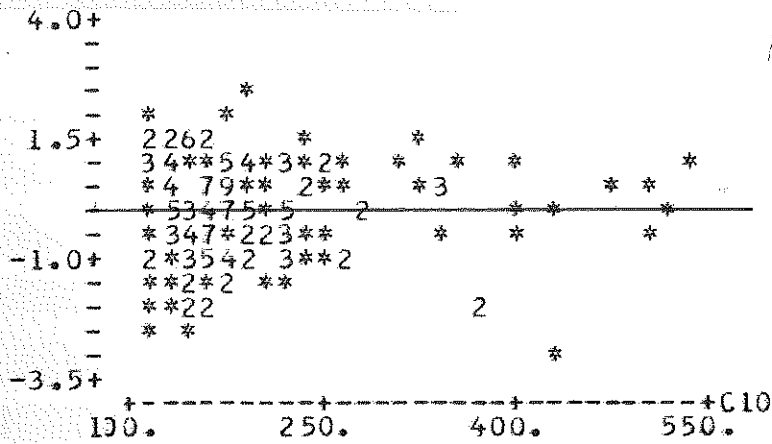


Fig. 227 - Gráfico - resíduo x unidade ao quadrado

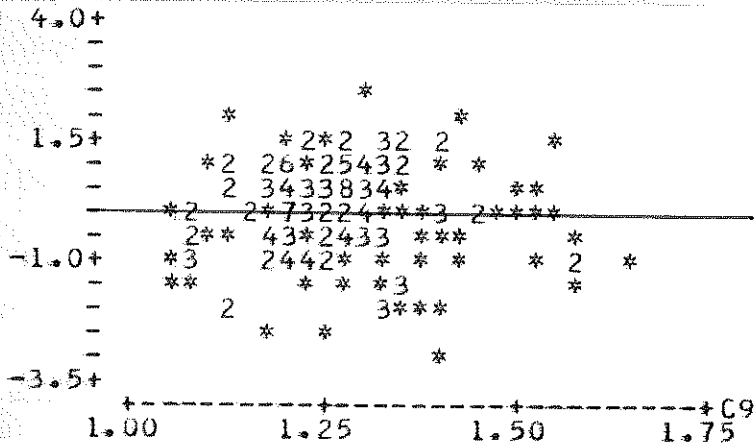


Fig. 228 - Gráfico - resíduo x inverso da densidade

Verificação da distribuição normal dos resíduos

Os gráficos probabilísticos se aproximam de uma reta com inclinação aproximada de 45° . Desta maneira, a distribuição dos resíduos pode ser considerada normal.

Nas figuras 229 e 230, encontram-se os gráficos probabilísticos da tensão de cisalhamento e tensão de compressão paralela da madeira, respectivamente.

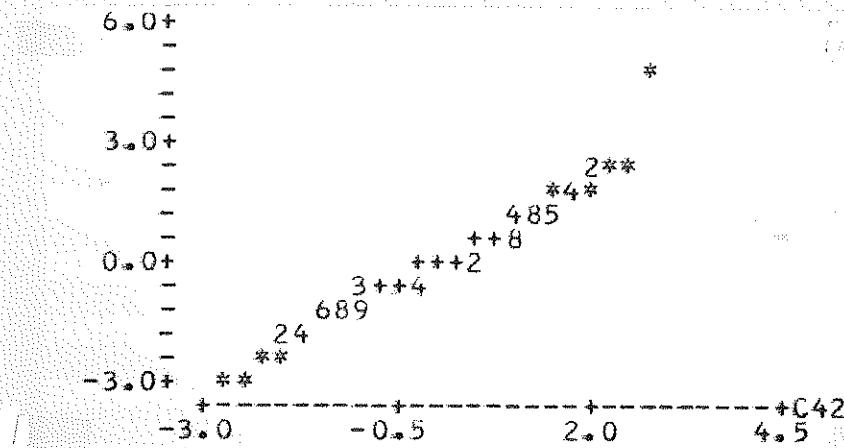


Fig. 229 - Gráfico probabilístico - tensão de cisalhamento

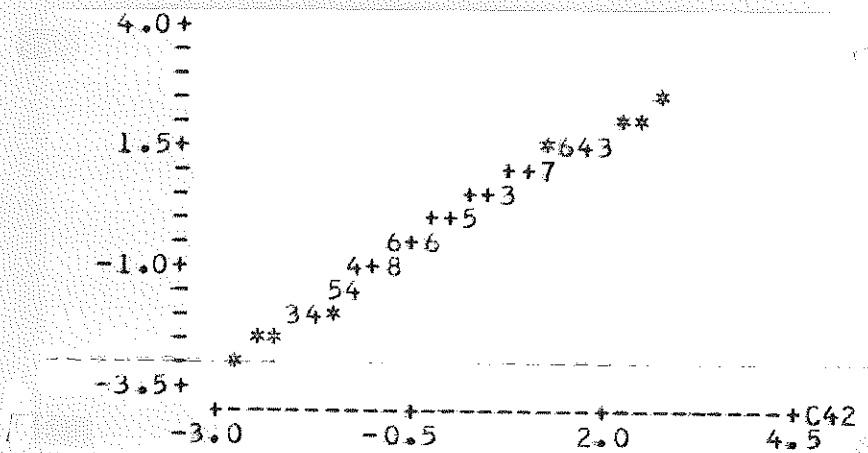


Fig. 230 - Gráfico probabilístico - tensão de compressão

Correção das tensões

Os modelos matemáticos das tensões são:

$$\text{Log}(\tau_w)/D = 0.356 + 0.0085.U - 0.0007.U^2 + 1.97.D^{-1}$$

$$\text{Log}(\sigma_{wc})/D = 0.962 - 0.0512.U + 0.0011.U^2 + 2.31.D^{-1}$$

transformando, obtêm-se:

$$\text{Log}(\tau_w) = 1.97 + 0.356.D + 0.0085.U.D - 0.0007.U^2.D$$

$$\text{Log}(\sigma_{wc}) = 2.31 + 0.962.D - 0.0512.U.D + 0.0011.U^2.D$$

ou

$$\text{Log}(\tau_w) = f(U_n, D_n)$$

$$\text{Log}(\sigma_{wc}) = f(U_n, D_n)$$

As equações de correção serão:

$$\text{Log}(\tau_w)_{12i} = \text{Log}(\tau_w)_{ni} - f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$\text{Log}(\sigma_{wc})_{12i} = \text{Log}(\sigma_{wc})_{ni} = f(U_{ni}, D_{ni}) + f(U_{12i}, D_{12i})$$

$$D_{12i} = D_{ni} + D_{ni} \cdot (0.01 - v) \cdot (12 - U_{ni})$$

$$U_{12i} = 12\%$$

sendo: $i = 1$ até 191 e $v = 0.563$

Os resultados obtidos com estas correções encontram-se no quadro 30 do anexo.

Resistências características

Nas figuras 231 e 232, encontram-se os histogramas e os parâmetros estatísticos das tensões de cisalhamento e compressão, respectivamente.

```

12 157
13 226679
14 022336788
15 00012244555556778
16 0000012333334444555555667777888
17 0011112222223333445556677788889
18 000011112224578888899
19 000011222334455567889
20 001122223344677888899
21 012479
22 000111267
23 2
24 2
    
```

Média ($\bar{\tau}_w$) = 180.7 N/cm²
 Des.Pad.(s) = 26.7 N/cm²
 Interv. de conf. para 95%
 (176.85 , 184.55)

Fig. 231 - Histograma e parâmetros estatísticos - ten.cisalh.

Admitindo que a média e o desvio padrão da população possa ser representada por suas estimativas, as resistências características serão:

$$f_{wsk} = 1367.8 \text{ N/cm}^2$$

$$f_{wck} = 3895.0 \text{ N/cm}^2$$

sendo:

f_{wsk} = resistência característica da madeira ao cisalhamento

f_{wck} = resistência característica da madeira a compressão paralela.

3T	3
3F	
3S	6666667
3*	8888889
4*	0000111
4T	22333
4F	4445555555555
4S	6666666667777777777
4.	8888899999
5*	0000000011111111
5T	222233333333333
5F	4444444555555555
5S	666666677777777
5.	88888888888899999
6*	0000011111
6T	2222333333
6F	444555
6S	6677
6.	8
7*	1
7T	23

Média ($\bar{\sigma}_{wc}$) = 5283 N/cm²

Des. Pad. (s) = 844 N/cm²

Interv. de conf. para 95%
(5162 , 5405)

Fig. 232 - Histograma e parâmetros estatísticos - ten. compres.

4.2 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA NA TENSÃO DE CISALHAMENTO E COMPRESSÃO DA MADEIRA

A influência da inclinação das fibras na tensão de compressão já é um fato constatado (71), como também a influência na tensão de cisalhamento da madeira (72) e (73).

Através de hipóteses de diferença nula, entre os resultados experimentais, tabela 61, e os encontrados com a equação de Hankinson modificada, pode-se definir o valor do expoente n, tabela 62.

Para os valores de n= 1.85, na tensão de cisalhamento e n= 2.3, na tensão de compressão, foi obtida a diferença nula mais significativa. Nas figuras 233 e 234, encontram-se as representações gráficas destas equações e os resultados experimentais.

[71] KOLLMANN, F. - Op. cit.

[72] - Op. cit.

[73] CHUGG, W., A. - Op. cit.

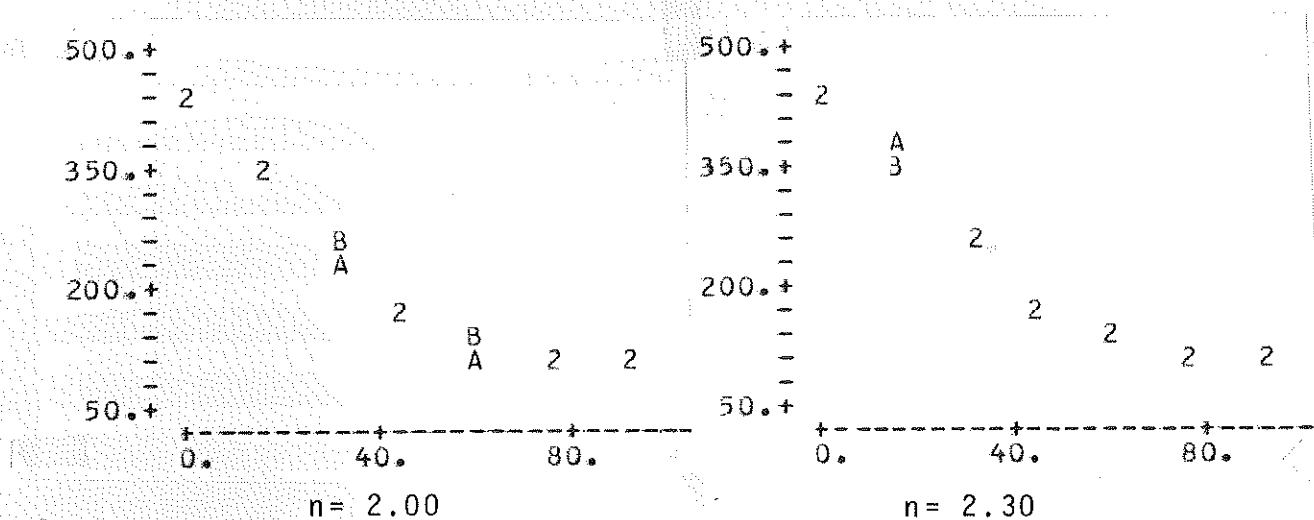


Fig. 233 - Representação gráfica da equação de Hankinson e os resultados experimentais - tensão de compressão

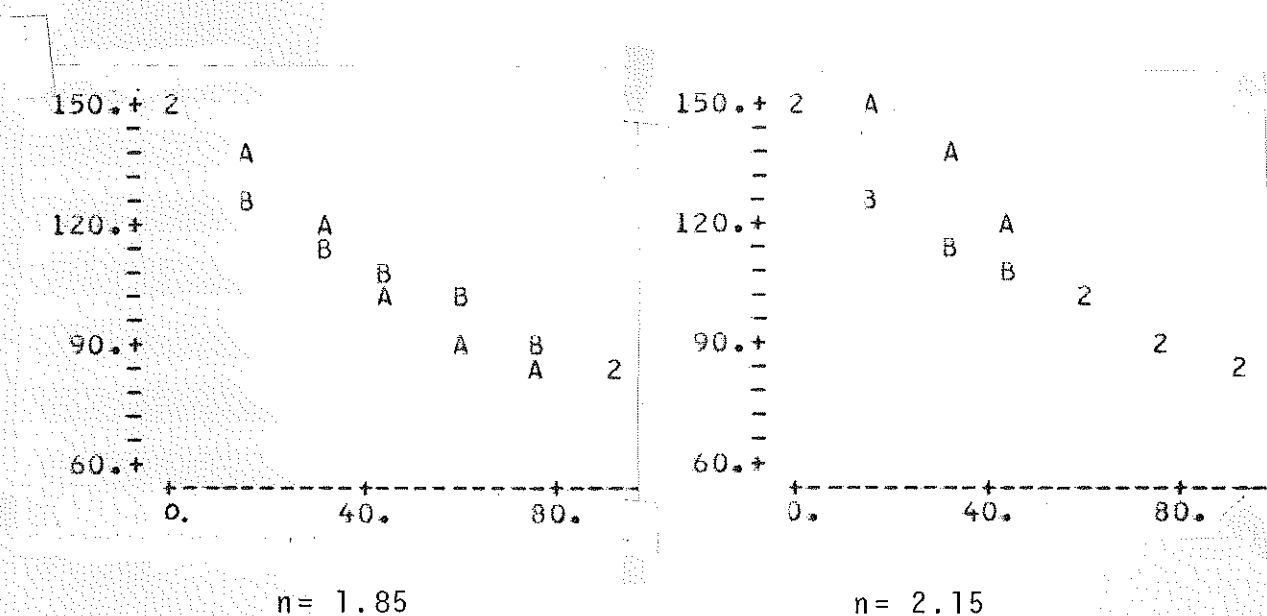


Fig. 234 - Representação gráfica da equação de Hankinson e os resultados experimentais - tensão de cisalhamento

A influência da umidade e da densidade nas tensões de cisalhamento e de compressão paralela e normal às fibras da madeira, foi determinada através de regressões múltiplas. Os resultados experimentais foram corrigidos para umidade padrão 12%. Na tabela 63, encontram-se estas correções e os parâmetros estatísticos da tensão de cisalhamento e da tensão de compressão.

TABELA 61 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO E COMPRESSÃO DA MADEIRA

VIGA	INCLINAÇ.	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	D _{ap} KN/m ³	U %
	N/cm ²									
1	τ_{W}	1520	1250	1190	1290	980	880	820	7.80	12.99
	σ_{W}	5050	3720	3330	3400	2040	1890	1850		
2	τ_{W}	1720	1550	1440	1140	1300	1020	980	7.10	11.88
	σ_{W}	4820	3810	3430	1880	1450	1320	1290		
3	τ_{W}	2110	1660	1390	1160	1140	1150	1230	8.50	12.70
	σ_{W}	4740	3770	2910	2100	2110	1630	1530		
4	τ_{W}	2030	1990	1500	1290	1330	1370	1150	8.60	11.44
	σ_{W}	6200	5120	3630	2310	1710	1700	1500		
5	τ_{W}	1830	900	930	1160	1080	750	750	7.10	13.95
	σ_{W}	4140	3520	2490	1650	1220	870	710		
6	τ_{W}	1250	1260	1350	1030	1150	800	730	6.90	16.21
	σ_{W}	4070	3070	1390	1320	1000	660	540		
7	τ_{W}	1050	1000	910	800	700	610	540	7.20	18.79
	σ_{W}	2620	2650	2160	650	400	340	220		
8	τ_{W}	1100	910	760	730	740	510	530	7.40	22.52
	σ_{W}	2480	2110	1130	530	350	260	190		
9	τ_{W}	1220	1180	1030	1180	710	840	730	7.60	22.02
	σ_{W}	5090	3280	2320	1740	1500	1200	1080		
10	τ_{W}	1270	1150	880	960	850	790	820	7.30	25.33
	σ_{W}	3340	3510	1800	1500	1230	970	920		
MÉDIAS	τ_{W}	1150	1280	1140	1070	1000	910	830	7.60	16.78
	σ_{W}	4260	3460	2460	1610	1300	1080	980		

TABELA 62 - RESULTADOS DOS TESTES DE DIFERENÇA NULA; PARA VALORES DA EQUAÇÃO DE HANKINSON VARIANDO O EXPOENTE n - NÍVEL DE SIGNIF. 95%

DIFERENÇA DOS VALORES CÁLCULADOS E OS EXPERIMENTAIS	RESULTADOS EXPERIMENTAIS - COMPRESSÃO $t_{cr} = 2.447$				
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	t_{cal}	INTERVALO DE CONFIANÇA	OBSERVAÇÕES
Expoen. 1.55	-244	260.0	2.484	-484.8 , -3.5	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 1.70	-176	181.0	2.574	-344.2 , -8.6	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 1.85	-108	108.0	2.670	-208.5 , -9.1	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 2.00	-41	54.0	2.024	-91.6 , 8.7	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.15	25	77.0	0.874	-45.6 , 96.3	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.30	92	140.0	1.729	-38.1 , 221.4	Hipótese nula aceita , melhor adequação curvas
Expoen. 2.45	157	209.0	1.991	-36.1 , 351.3	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.60	223	280.0	2.110	-35.7 , 281.0	Hipótese nula aceita

RESULTADOS EXPERIMENTAIS - CISALHAMENTO $t_{cr} = 2.447$					
Expoen. 1.55	-68	73.0	2.473	-134.9 , -0.6	Hipótese nula rejeitada
Expoen. 1.70	-38	68.0	1.481	-100.6 , 24.7	Hipótese nula aceita
Expoen. 1.85	-8	71.0	0.311	-73.0 , 57.3	Hipótese nula aceita, melhor adequação curvas
Expoen. 2.00	21	81.0	0.683	-54.3 , 96.4	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.15	50	98.0	1.363	-39.9 , 140.3	Hipótese nula aceita
Expoen. 2.30	79	117.0	1.791	-29.1 , 187.8	Hipótese nula aceita

TABELA 63 - CORREÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

DISCRIMI. TENSÕES N/cm^2	VALORES EXPERIMENTAIS CORRIGIDOS TENSÕES DE CISALHAMENTO					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CONFIANÇA
	1	3	5	7	9			
	2	4	6	8	10			
τ_{wp}	1713 1687	2295 1895	2150 1873	1781 2045	2031 1947	1942	193	1803.8 , 2080.6
τ_{wn}	918 963	1405 1031	934 1040	869 844	1135 1220	1036	175	911.3 , 116.1

TABELA 63 - contin. CORREÇÃO DOS.....

DISCRIM. TENSÕES N/cm ²	VALORES EXPERIMENTAIS CORREGUIDOS TENSÕES DE COMPRESSÃO					MÉDIA	DESVIO PADRÃO	INTERVALO DE CONFIANÇA
	1	3	5	7	9			
	2	4	6	8	10			
σ_{wp}	5790 4716	5220 5730	4974 6405	4648 4575	5079 4816	5495	1090	4718.1 , 6273.0
σ_{wn}	1860 1300	1540 1400	1100 1250	980 975	1650 1530	1358	293	1131.3 , 1584.7

Admitindo que a média e o desvio padrão da população possa ser representada pelas suas estimativas, as resistências características serão:

$$\begin{aligned}
 f_{wspk} &= 1367.8 \text{ N/cm}^2 & f_{wsnk} &= 778.3 \text{ N/cm}^2 \\
 f_{wcpk} &= 3895.0 \text{ N/cm}^2 & f_{wcnk} &= 876.0 \text{ N/cm}^2
 \end{aligned}$$

As equações de Hankinson, com as resistências características, mais adequadas são:

$$f_{wcek} = \frac{f_{wcpk} \cdot f_{wcnk}}{f_{wcpk} \cdot \text{Sen}^{2.3}(\theta) + f_{wcnk} \cdot \text{Cos}^{2.3}(\theta)}$$

$$f_{wsek} = \frac{f_{wspk} \cdot f_{wsnk}}{f_{wspk} \cdot \text{Sen}^{1.85}(\theta) + f_{wsnk} \cdot \text{Cos}^{1.85}(\theta)}$$

sendo:

- f_{wcek} = resistência característica da madeira a compressão inclinada às fibras
- f_{wcpk} = resistência característica da madeira a compressão paralela às fibras
- f_{wcnk} = resistência característica da madeira a compressão normal às fibras.

$f_{ws\theta k}$ = resistência característica da madeira ao cisalhamento com as fibras inclinadas

f_{wspk} = resistência característica da madeira ao cisalhamento com as fibras paralelas

f_{wsnk} = resistência característica da madeira ao cisalhamento com as fibras normais.

A representação gráfica destas equações encontram-se nas figuras 235 e 236.

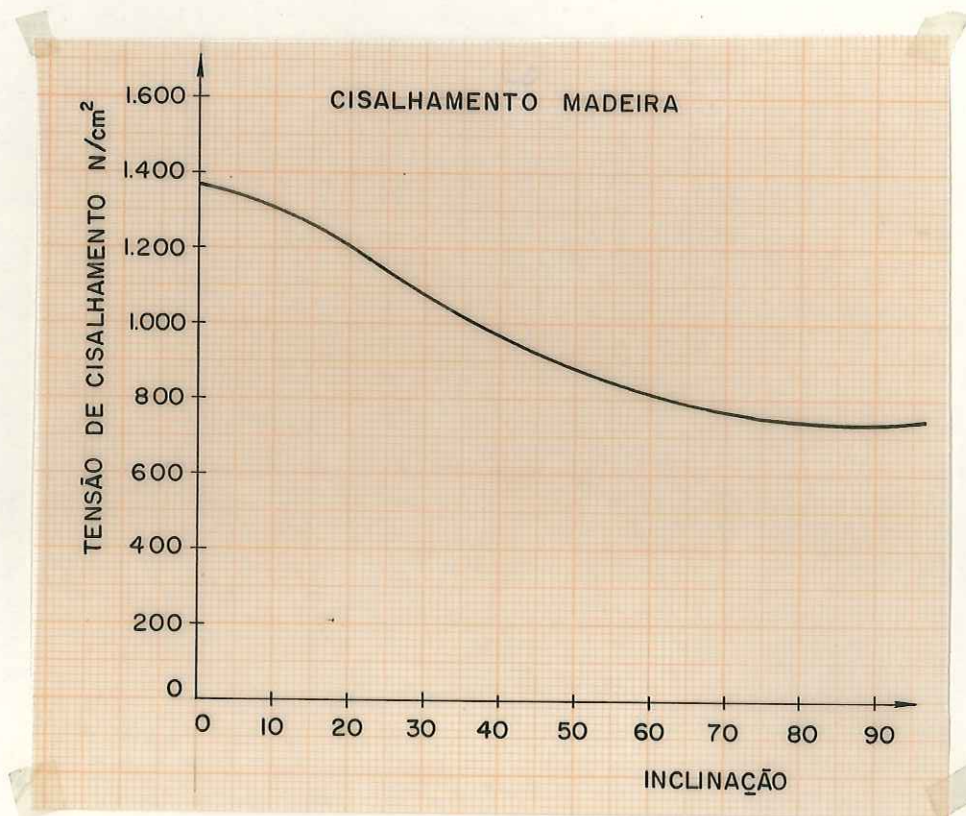


Fig. 235 - Representação gráfica da equação de Hankinson com as resistências características de cisalhamento e expoente $n = 1,85$

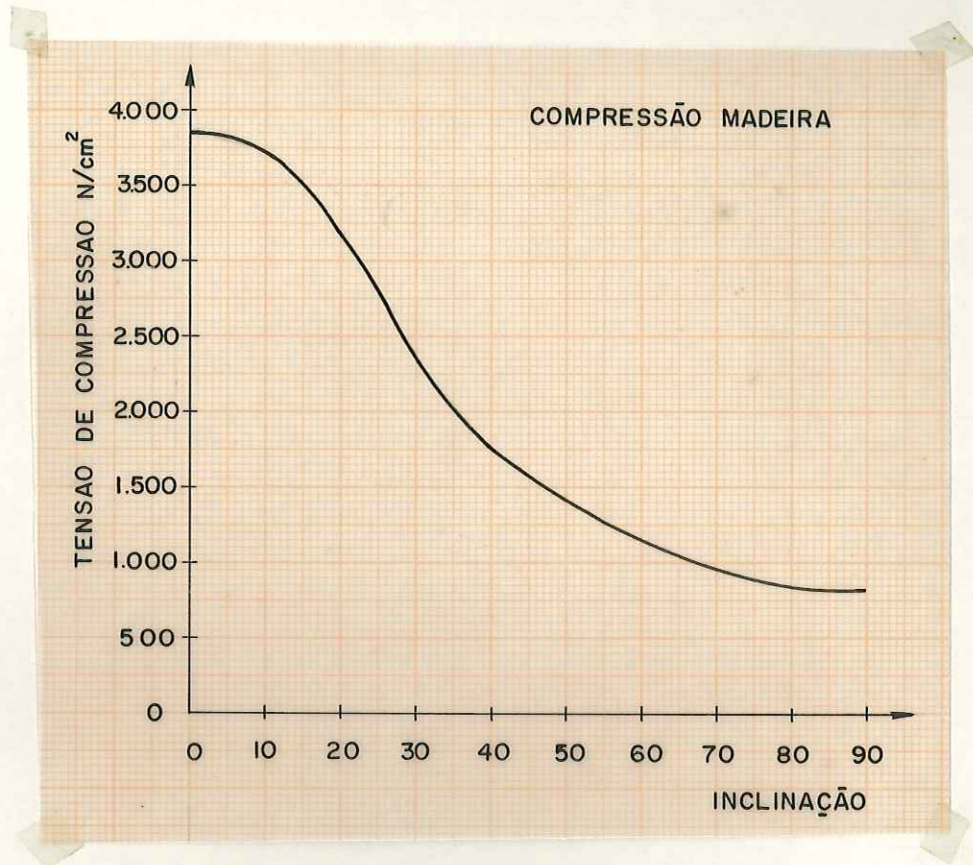


Fig. 236 - Representação gráfica da equação de Hankinson com as resistências características de compressão e expoente $n = 2.3$

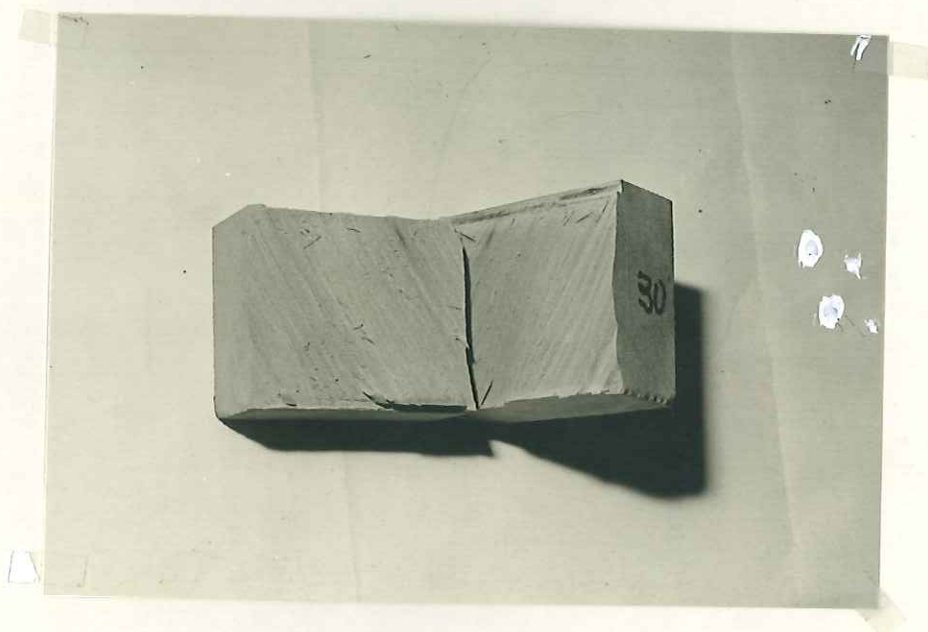


Fig. 237 - Ruptura do corpo de prova de cisalhamento com as fibras inclinadas

CAP 08 - CONCLUSÕES - SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO - PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS

1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são condensadas algumas das conclusões resultantes do desenvolvimento do trabalho.

As sugestões para continuação deste trabalho também fazem parte deste capítulo.

As propostas de métodos de cálculo das ligações adesivas, encerram o trabalho.

2 - CONCLUSÕES

2.1 - A variação das características mecânicas, de uma ligação adesiva em escala natural, em função da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada, encontram-se representadas, pelos modelos matemáticos, na tabela 64.

TABELA 64 - MODELOS MATEMÁTICOS - ADESIVOS À BASE DE RESORCINOL E EPOXI	
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	
RESORCINOL	$MD/U = -15344 + 3234.U - 43.7.U.D - 131.U^2 - 0.0334.P_{ac}^2$
EPOXI	$MD/U = 7697 - 290.U + 3145.D - 87.P_{ac} + 0.577.P_{ac}^2$
CISALHAMENTO	
RESORCINOL	$\text{Log}(\tau_{ac})/D = 0.496 - 0.053.U + 1.62.D^{-1} + 0.0054.P_{ac}$
EPOXI	$\text{Log}(\tau_{ac})/D = -0.43 + 1.30.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$
COMPRESSÃO NORMAL À LINHA ADESIVA	
RESORCINOL	$\text{Log}(\sigma_{cn})/D = 0.378 - 0.046.D + 1.85.D^{-1} + 0.0056.P_{ac}$
EPOXI	$\text{Log}(\sigma_{cn})/D = -0.43 + 1.50.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$

TABELA 64 - Continuação - MODELOS MATEMÁTICOS	
TRAÇÃO NORMAL À LINHA ADESIVA	
RESORCINOL	$\text{Log}(\sigma_{tn})/D = 0.378 - 0.046.U + 1.65.D^{-1} + 0.0056.P_{ac}$
EPOXI	$\text{Log}(\sigma_{tn})/D = -0.43 + 1.41.D^{-1} + 0.01.P_{ac}$
PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA	
RESORCINOL	$P_{ac}/U = -6.42 + 26.5.D + 0.99.U - 2.1.U.D$
EPOXI	$P_{ac}/D = -583 + 359.D + 85.U - 1.83.U^2 - 39.U.D$

2.2 - O módulo característico de deformação e as resistências características das ligações adesivas em escala natural, podem ser adotadas iguais às apresentadas na tabela 65.

TABELA 65 - RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS - LIG. ESCALA NATURAL			
CARACTERÍSTICA (N/cm ²)	SIMBOL.	RESORCINOL	EPOXI
Resistência ao cisalhamento	f_{sck}	400.0	170.0
Res. tração normal à linha adesiva	f_{tnk}	406.0	174.6
Res. compressão normal à linha adesiva	f_{cnk}	637.0	271.9
Módulo de deformação	MD_k	289140.0	262540.0

2.3 - A porcentagem característica de área colada é:

Resorcinol: $P_{acck} = 51.3\%$, Epoxi : $P_{acak} = 41.7\%$

ou transformando-se em um coeficiente de minoração:

$$\gamma_{ac} = 1.513 \quad \text{e} \quad \gamma_{aa} = 1.417$$

2.4 - A distribuição de tensões transversais à linha adesiva, tem o formato da figura 238, isto é, distribuição linear na parte comprimida e parabólica na parte tracionada.

2.5 - As tensões de cisalhamento na linha adesiva, nas ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na compressão, na tração, na flexão e na torção, variam com a direção das fibras con

forme as equações de Hankinson apresentadas na tabela 66; nesta tabela também encontram-se as resistências características ao cisalhamento na linha adesiva.

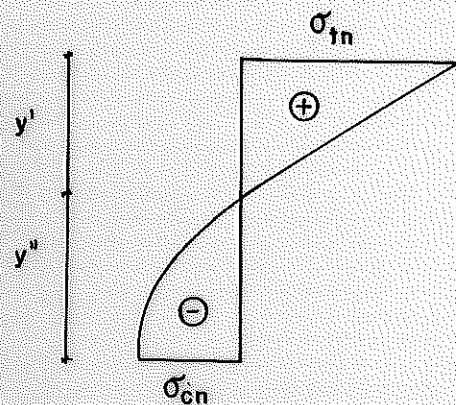


FIG. 238 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES TRANSVERSAIS À LINHA ADESIVA.

SOLICITAÇÃO	EQUAÇÃO DE HANKINSON	RES. CARACTERÍSTICA	
		PARALELA	NORMAL
COMPRESSÃO	$\tau_{ace} = \frac{\tau_{acp} \cdot \tau_{acn}}{\tau_{acp} \cdot \text{Sen}^{2.15}(\theta) + \tau_{acn} \cdot \text{Cos}^{2.15}(\theta)}$	989.0	241.0
TRAÇÃO	$\tau_{ate} = \frac{\tau_{atp} \cdot \tau_{atn}}{\tau_{atp} \cdot \text{Sen}^4(\theta) + \tau_{atn} \cdot \text{Cos}^4(\theta)}$	779.0	68.5
FLEXÃO	$\tau_{abe} = \frac{\tau_{abp} \cdot \tau_{abn}}{\tau_{abp} \cdot \text{Sen}^{2.6}(\theta) + \tau_{abn} \cdot \text{Cos}^{2.6}(\theta)}$	801.0	417.7
TORÇÃO	$\tau_{atoe} = \frac{\tau_{atop} \cdot \tau_{aton}}{\tau_{atop} \cdot \text{Sen}^{2.6}(\theta) + \tau_{aton} \cdot \text{Cos}^{2.6}(\theta)}$	897.0	287.0

2.6 - As tensões de cisalhamento na flexão e na torção podem ser consideradas iguais.

2.7 - As tensões de cisalhamento, o módulo de deformação e a porcentagem de área colada de uma ligação adesiva, à base de resina resorcinol, não variam com as condições ambientais de servi

ço, isto é, variação da temperatura e a umidade relativa do ar. O mesmo não ocorre com as ligações adesivas à base de resina epoxi.

2.8 - A ruptura dos modelos em escala natural ocorre por tração normal à linha adesiva.

2.9 - A ruptura por tração normal à linha adesiva ocorre na madeira ou na interface adesivo-madeira, indistintamente. Assim, a tensão última de tração normal à linha adesiva poderá ser considerada igual a tensão de tração normal da madeira.

2.10 - A ruptura dos modelos em escala reduzida ocorre por cisalhamento. A influência da tração normal à linha adesiva é desprezível.

2.11 - A ruptura dos modelos em escala reduzida ocorre por cisalhamento da linha adesiva.

2.12 - As tensões de cisalhamento de ruptura, nos modelos em escala natural e reduzida, não podem ser consideradas iguais. Esta tensão é 3 vezes maior no modelo em escala reduzida.

2.13 - A ruptura de uma ligação adesiva solicitada à tração normal às fibras poderá ocorrer, indistintamente, na linha adesiva ou na madeira. Assim, a resistência característica da ligação adesiva solicitada à tração normal às fibras, poderá ser considerada igual à resistência característica da madeira solicitada à tração normal às fibras; $f_{atnk} = 428.0 \text{ N/cm}^2$.

2.14 - A resistência ao fendilhamento da ligação adesiva pode ser considerada igual a resistência ao fendilhamento da madeira.

2.15 - A variação da tensão de cisalhamento e de compressão paralela da madeira, com a umidade e a densidade, pode ser representada pelos modelos matemáticos apresentados a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Tens. cisalhamento} \quad \text{Log}(\tau_w)/D &= 0.356 + 0.0085.U - 0.0007.U^2 + 1.97.D^{-1} \\ \text{Tens. compressão} \quad \text{Log}(\sigma_{wc})/D &= 0.962 - 0.0512.U + 0.0011.U^2 + 2.31.D^{-1} \end{aligned}$$

2.16 - A influência, na tensão de cisalhamento da madeira, da direção da aplicação da carga em relação às fibras, pode ser representada pela equação de Hankinson apresentada a seguir:

$$\tau_{w\theta} = \frac{\tau_{wp} \cdot \tau_{wn}}{\tau_{wp} \cdot \text{Sen}^{1.85}(\theta) + \tau_{wn} \cdot \text{Cos}^{1.85}(\theta)}$$

2.17 - As resistências características da madeira ao cisalhamento com as fibras paralelas e normais são:

$$f_{wspk} = 1367.8 \text{ N/cm}^2 \quad \text{e} \quad f_{wsnk} = 748.3 \text{ N/cm}^2$$

2.18 - As tensões de cisalhamento e de compressão da madeira não variam com as condições ambientais de serviço.

3 - SUGESTÕES PARA A CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

A seguir são apresentadas as sugestões para prosseguimento deste trabalho.

3.1 - Análise experimental da influência do comprimento da linha adesiva, da espessura da linha adesiva e da espessura das peças ligadas, na resistência mecânica da ligação adesiva.

3.2 - Análise quantitativa de um coeficiente de segurança, das características mecânicas de uma ligação adesiva.

3.3 - Estudo da resistência das ligações adesivas com outras espécies de madeira e outros tipos de adesivos.

3.4 - Estudo das ligações adesivas solicitadas a esforços combinados de tração, compressão, flexão e torção.

4 - PROPOSTA DE UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES ADESIVAS

Inicialmente deve ser adotado um coeficiente de minoração para a resistência do material e um coeficiente de segurança para as solicitações.

Coeficiente de segurança das solicitações

O coeficiente de segurança γ_f , das solicitações, está incluída na expressão a seguir:

$$S_d = 1.4.S_{gk} + 1.4.S_{qk} + 1.2.S_{ek}$$

sendo:

- S_d = solicitação de cálculo
- S_{gk} = solicitação característica da carga permanente
- S_{ek} = solicitação característica da deformação específica
- S_{qk} = solicitação característica da carga acidental.

Coeficiente de minoração dos materiais

Os coeficientes de minoração serão:

$$\gamma_{ac} = \gamma_{ec} \cdot \gamma_{pac} = \gamma_{ec} \cdot 1.513$$

$$\gamma_{aa} = \gamma_{ea} \cdot \gamma_{paa} = \gamma_{ea} \cdot 1.417$$

podendo se adotar:

$$\gamma_{ec} = \gamma_{ea} = 1.60 \quad \text{para as resistências de cálculo da linha adesiva à tração normal}$$

$$\gamma_{ec} = \gamma_{ea} = 1.50 \quad \text{para as resistências de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento}$$

sendo:

$$\gamma_{pac} = \text{coeficiente de minoração devido à porcentagem de área colada efetiva, na ligação à base de resina resorcinol}$$

$$\gamma_{paa} = \text{coeficiente de minoração devido a porcentagem de}$$

área colada efetiva, na ligação à base de resina epoxi

γ_{ac} = coeficiente de minoração da ligação adesiva à base de resina resorcinol.

γ_{aa} = coeficiente de minoração da ligação adesiva a base de resina epoxi

γ_{ec} = coeficiente de minoração da ligação à base de resorcinol devido a: defeitos de execução, defeitos de preparação do adesivo, tempos indevidos de espera e de penetração, defeitos de preparação das superfícies, umidade excessiva, etc.

γ_{ea} = mesmas considerações que γ_{ec} , para ligações à base de resina epoxi.

A resistência de cálculo na linha adesiva nunca deve ser considerada maior do que a resistência de cálculo da madeira para o mesmo tipo de solicitação.

4.1 - DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA COMPRESSÃO

4.1.1 - SOLICITAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

As tensões atuantes devem ser determinadas a partir das equações:

$$\tau_{acp} = \frac{S_d}{A_c} \quad ; \quad \sigma_{tn} = k \cdot \frac{S_d(b+c)}{y'' \cdot a \cdot z}$$

sendo:

τ_{acp} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na compressão, com as fibras paralelas

S_d = solicitação de cálculo

σ_{tn} = tensão de tração normal à linha adesiva

c = menor espessura das peças a serem ligadas

b = maior espessura das peças a serem ligadas

$k = 3/4$ → para 1 área de colagem

$k = 3/8$ → para 2 áreas de colagem

L_c = comprimento da linha adesiva

$$y'' = \frac{L_c}{\left(\frac{4}{3} \cdot \frac{f_{wtnd}}{f_{wcnd}} + 1\right)} \quad y' = \frac{L_c}{\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{f_{wcnd}}{f_{wtnd}} + 1\right)}$$

$$z = 2/3 \cdot y' + 5/8 \cdot y''$$

f_{wtnd} = resistência de cálculo da madeira à tração normal às fibras

f_{wcnd} = resistência de cálculo da madeira à compressão normal às fibras

As resistências de cálculo serão:

$$f_{scpd} = f_{scpk} / \gamma_a \quad ; \quad f_{tnd} = f_{tnk} / \gamma_a$$

sendo:

f_{scpk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão paralela

f_{tnk} = resistência característica da linha adesiva à compressão normal

γ_a = coeficiente de minoração da resistência da linha adesiva, função do tipo de adesivo e espécie de madeira

f_{scpd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na compressão

f_{tnd} = resistência de cálculo da linha adesiva à tração normal

As tensões atuantes não devem ultrapassar às resistências de cálculo, isto é:

$$f_{scpd} \geq \tau_{acp} \quad f_{tnd} \geq \sigma_{tn}$$

4.1.2 - SOLICITAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

A tensão atuante de cisalhamento pode ser determinada a partir da equação:

.288.

$$\tau_{acn} = \frac{S_d}{A_c}$$

e a tensão de tração normal à linha adesiva, da mesma maneira aquela apresentada no item 4.1.1.

sendo:

τ_{acn} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na compressão, com as fibras normais

A resistência de cálculo será:

$$f_{scnd} = f_{scnk} / \gamma_a$$

sendo:

f_{scnk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão normal

f_{scnd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na compressão normal

As tensões atuantes não devem ultrapassar às resistências de cálculo, isto é:

$$f_{scnd} \geq \tau_{acn} \quad ; \quad f_{tnd} \geq \sigma_{nt}$$

4.1.3 - SOLICITAÇÃO INCLINADA ÀS FIBRAS

As tensões atuantes devem ser determinadas da mesma maneira aquela apresentada no item 4.1.1.

As resistências de cálculo devem ser determinadas a partir da equação de Hankinson, com as resistências características da linha adesiva ao cisalhamento na compressão normal e paralela as fibras.

$$f_{scek} = \frac{f_{scpk} \cdot f_{scnk}}{f_{scpk} \cdot \text{Sen}^{2,15}(\theta) + f_{scnk} \cdot \text{Cos}^{2,15}(\theta)}$$

Assim, a resistência de cálculo será:

$$f_{scod} = f_{scek} / \gamma_a$$

sendo:

f_{scek} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na compressão inclinada às fibras

f_{scod} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na compressão inclinada às fibras

As tensões atuantes não devem ultrapassar as resistências de cálculo, isto é:

$$f_{scod} \geq \tau_{ace} \quad ; \quad f_{tnd} \geq \sigma_{nt}$$

4.2 - DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA TRAÇÃO

O processo de dimensionamento das ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na tração, é similar ao dimensionamento das ligações solicitadas ao cisalhamento na compressão. As resistências características e de cálculo da linha adesiva, devem ser aquelas referentes às ligações adesivas solicitadas ao cisalhamento na tração, isto é:

f_{stpk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração paralela

f_{stnk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração normal

f_{stek} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na tração inclinada às fibras

f_{stpd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na tração paralela

f_{stnd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na tração normal

f_{sted} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na tração inclinada às fibras

4.3 - DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA FLEXÃO

4.3.1 - SOLICITAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

A tensão atuante deve ser determinada a partir das equações:

$$\tau_{abp} = \frac{F_2}{A_c}$$

com

$$F_2 = \frac{(\sigma_c + \sigma_l)}{2} \cdot h \cdot a$$

sendo:

τ_{abp} = tensão de cisalhamento na linha adesiva, na flexão, com as fibras paralelas

σ_c = tensões normais, figura 239

σ_l = tensões normais, figura 239

h = espessura da cobrejunta

a = largura d'área colada

A_c = área colada

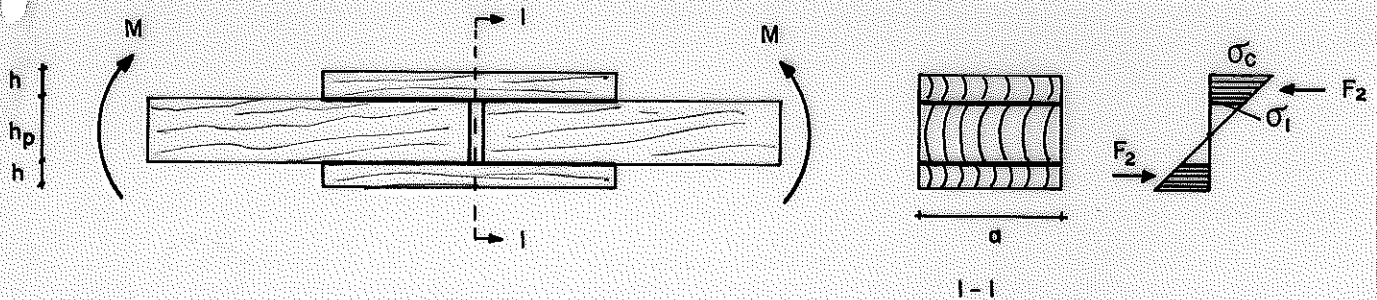


FIG. 239 - ESQUEMA E DIMENSÕES - LIGAÇÃO FLETIDA.

A resistência de cálculo será:

$$f_{sbpd} = f_{sbpk} / \gamma_a$$

sendo:

f_{sbpk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras paralelas

f_{sbpd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras paralelas

A tensão atuante não deve ultrapassar a resistência de cálculo, isto é:

$$f_{sbpd} \geq \tau_{abp}$$

4.3.2 - SOLICITAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

A determinação da tensão atuante, τ_{abn} , é similar à da tensão τ_{abp} .

A resistência de cálculo é:

$$f_{sbnd} = f_{sbnk} / \gamma_a$$

sendo:

f_{sbnk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras normais

f_{sbnd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras normais

τ_{abn} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na flexão, com as fibras normais

A tensão atuante não deve ultrapassar a resistência de cálculo, assim:

$$f_{sbnd} \geq \tau_{abn}$$

4.3.3 - SOLICITAÇÃO INCLINADA ÀS FIBRAS

A determinação da tensão atuante, τ_{abe} , é similar à da tensão τ_{abp} .

A resistência de cálculo deve ser determinada a partir da equação de Hankinson, utilizando as resistências características da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras paralelas e normais. A seguir é apresentada esta equação:

$$f_{sbek} = \frac{f_{sbpk} \cdot f_{sbnk}}{f_{sbpk} \cdot \text{Sen}^2 \cdot 6(\theta) + f_{sbnk} \cdot \text{Cos}^2 \cdot 6(\theta)}$$

assim, a resistência de cálculo será:

$$f_{sbod} = f_{sbek} / \gamma_a$$

sendo:

- τ_{abe} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na flexão, com as fibras inclinadas
- f_{sbek} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras inclinadas
- f_{sbod} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na flexão com as fibras inclinadas

A tensão atuante não deve ultrapassar a resistência de cálculo, assim:

$$f_{sbod} \geq \tau_{abe}$$

4.4 - DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS AO CISALHAMENTO NA TORÇÃO

4.4.1 - SOLICITAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

A tensão atuante pode ser determinada a partir da equação:

$$\tau_{atop} = \frac{T}{\{0.33 - 0.22 \cdot a/b + 0.10 \cdot (a/b)^2\} a^2 b} \quad \text{com } b > a$$

sendo:

- τ_{atop} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na torção, com as fibras paralelas
- $b = L_c / 2$ = maior dimensão da área colada
- a = menor dimensão da área colada
- $a \cdot b$ = área colada
- T = momento torçor

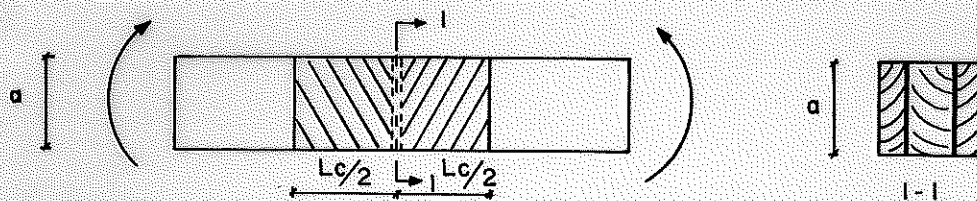


FIG. 240 - ESQUEMA E DIMENSÕES - LIGAÇÃO SOLICITADA À TORÇÃO

A resistência de cálculo será:

$$f_{\text{stopd}} = f_{\text{stopk}}/\gamma_a$$

sendo:

f_{stopk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras paralelas

f_{stopd} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras paralelas

As tensões atuantes não devem ultrapassar a resistência de cálculo, assim:

$$f_{\text{stopd}} \geq \tau_{\text{atop}}$$

4.4.2 - SOLICITAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

A determinação da tensão atuante, τ_{aton} , é similar à da tensão τ_{atop} .

A resistência de cálculo é:

$$f_{\text{stond}} = f_{\text{stonk}}/\gamma_a$$

sendo:

f_{stonk} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras normais

f_{stond} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras normais

τ_{aton} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na torção, com as fibras normais

As tensões atuantes não devem ultrapassar a resistência

de cálculo, assim:

$$f_{stond} = \tau_{aton}$$

4.4.3 - SOLICITAÇÃO INCLINADA ÀS FIBRAS

A determinação da tensão atuante, τ_{atoe} , é similar à da tensão τ_{atop} .

A resistência de cálculo deve ser determinada a partir da equação de Hankinson, utilizando as resistências características da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras paralelas e normais. A seguir é apresentada esta equação:

$$f_{stoek} = \frac{f_{stopk} \cdot f_{stonk}}{f_{stopk} \cdot \text{Sen}^2 \cdot 6(\theta) + f_{stonk} \cdot \text{Cos}^2 \cdot 6(\theta)}$$

assim, a resistência de cálculo é:

$$f_{stoed} = f_{stoek} / \gamma_a$$

sendo:

- f_{stoek} = resistência característica da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras inclinadas
- f_{stoed} = resistência de cálculo da linha adesiva ao cisalhamento na torção com as fibras inclinadas
- τ_{atoe} = tensão de cisalhamento atuante na linha adesiva, na torção, com as fibras inclinadas

A tensão atuante não deve ultrapassar a resistência de cálculo, assim:

$$f_{stoed} \geq \tau_{atoe}$$

4.5 - DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ADESIVAS SOLICITADAS À TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

A tensão atuante pode ser determinada a partir da equa -

ção:

$$\sigma_{atn} = \frac{S_d}{A_c}$$

sendo:

σ_{atn} = tensão de tração normal atuante da ligação adesiva

A_c = área colada

A resistência de cálculo será:

$$f_{atnd} = f_{atnk} / \gamma_a$$

sendo:

f_{atnk} = resistência característica da ligação adesiva à tração normal às fibras

f_{atnd} = resistência de cálculo da ligação adesiva à tração normal às fibras

A tensão atuante não deve ultrapassar a resistência de cálculo, assim:

$$f_{atnd} \geq \sigma_{atn}$$

APÊNDICE A - TIPOS DE ADESIVOS

1 - ADESIVOS INORGÂNICOS (A.1)

Neste item serão estudados somente os produtos utilizados na fabricação dos adesivos. As vezes é difícil diferenciar adesivos de cimento.

Em geral, na formação dos cimentos, as reações são químicas e nos adesivos, a ligação se forma por desidratação da solução dos adesivos.

1.1 - SILICATOS SOLÚVEIS

Algumas das propriedades dos silicatos são: baixo custo e boa resistência à combustão. Entretanto, as ligações silicosas são susceptíveis ao ataque de soluções alcalinas fortes e de ácido fluorídrico.

1.1.1 - PROPRIEDADES

Os silicatos solúveis comuns comerciais são preparados fundindo areia silicosa purificada com carbonato de sódio.

Os silicatos solúveis podem ser encontrados comercialmente, tanto no estado sólido como no estado líquido. Em ambos os casos variam as porcentagens de SiO_2 e Na_2O .

Os silicatos mais comumente utilizados para elaboração de adesivos são:

- Silicatos de sódio
- Silicatos silicosos
- Silicatos de potássio

Os adesivos de silicato de sódio comerciais se compõem de partículas de eletrólitos coloidais com carga negativa relativa

mente alta, que dificilmente se transformam em eletropositivos, conforme o pH se aproxima de zero.

Os silicatos silicosos caracterizam-se pelo seu conteúdo de sílica e álcali.

Os silicatos de potássio não são usados freqüentemente como adesivos devido ao seu alto custo.

Os silicatos de sódio curam por perda de umidade, a não ser que existam outros materiais que reajam com os mesmos.

1.1.2 - APLICAÇÕES

Nas aplicações do silicato solúvel como adesivo, a película adesiva é delgada e a secagem ocorre por perda de umidade.

Podem ser utilizados silicatos para unir vidros. Estas ligações são muito resistentes, mas quando solicitadas por esforços elevados o vidro rompe-se antes. Isto ocorre porque o silicato reage parcialmente com o vidro (ligação primária).

Os adesivos de silicatos solúveis podem também ser utilizados para unir metais. O papel - alumínio utilizado para empacotar cigarro é colado com silicatos solúveis, os quais são inodores, não venenosos, resistentes ao fogo, não corrosivos, resistentes a insetos e mofo.

1.1.2.1 - UTILIZAÇÃO NA MADEIRA

Pode-se obter uma boa ligação entre peças de madeira utilizando silicatos solúveis. Para isso deve-se espalhar adesivo suficiente para preencher os poros existentes na madeira, deixando uma película contínua entre os aderentes. Geralmente, com uma certa pressão, obtêm-se ligações de resistência mecânica elevada.

Já se estudou a fabricação de madeiras compensadas utilizando silicatos tendo em suspensão carbonato de cálcio para aumentar sua viscosidade. O resultado foi satisfatório e ocorreu aumento de resistência à água e ao fogo, fazendo-se recobrimento com silicato de sódio contendo lã de vidro. A resistência mecânica é considerável.

Os adesivos de soja utilizados na fabricação de madeira compensada para uso interior, freqüentemente contêm silicatos solúveis para melhorar: o umedecimento do aderente, a dispersão da proteína, regular a alcalinidade, aumentar a resistência mecânica da

ligação e a resistência à água. A formulação mais comum envolve a seguinte mistura aproximada: 100 partes de farinha de soja finamente moída, 200 partes de água, 110 partes de água contendo 36 partes de uma dispersão a 33% de cal, 16 partes de uma solução de soda cáustica a 50%, 30 partes de silicato de sódio e finalmente 2,5 partes de uma mistura a 25% de tetracloreto de carbono e 75% de bisulfeto de carbono. A prensagem é feita a quente. A madeira compensada feita com esta fórmula resiste a imersão em água por mais de um mês.

Os silicatos podem ser utilizados para melhorar os adesivos à base de albumina e de caseína.

A aplicação mais importante dos adesivos de silicatos solúveis é na colagem de papel. Por exemplo, as folhas laminadas de fibras sólidas, o papel corrugado, etc.

2 - COLAS ANIMAIS (A.2)

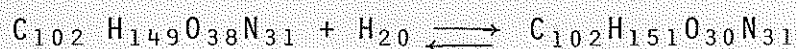
As colas animais são adesivos de grande versatilidade, com ampla aceitação na indústria. As colas animais são colóides orgânicos derivados do colágeno, um constituinte proteico da pele, cartilagens e ossos de animais, principalmente do gado bovino. Sua ampla aceitação como adesivo é o resultado de sua capacidade de formar uma película viscosa e aglutinante de uma solução da cola em água quente. Esta solução, ao resfriar-se, passa a um estado gelatinoso adquirindo resistência mecânica inicial moderadamente forte. Posteriormente, por secagem natural forçada, ter-se-á uma ligação elástica, permanente e forte entre os aderentes.

As características mais importantes das colas animais são: facilidade de preparação, facilidade de aplicação, baixo custo e secagem rápida.

Comercialmente a cola animal pode ser obtida de várias formas: produtos granulados secos, para serem usados como colas quentes; colas líquidas frias, para uso imediato; colas em pasta e gelatinosas.

2.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A cola animal é uma proteína derivada da simples hidrólise do colágeno que é o constituinte protéico principal das peles animais, tecidos conectivos e ossos. O colágeno, a cola animal e a gelatina são proteínas com composição química semelhante. Alguns pesquisadores consideram a gelatina (cola) como um colágeno hidrolizado:



A composição elementar da cola animal:

COMPONENTES	PORCENTAGEM
Carbono	51.29
Hidrogênio	6.39
Oxigênio	24.13
Nitrogênio	18.19
T O T A L	100.00

é confirmada, dentro de certas tolerâncias, por muitos pesquisadores (A.3).

Como proteína, a cola animal é essencialmente composta por poliamidos e certos ácidos alfa-aminos.

Os amino-ácidos presentes na cola animal (gelatina) foram pesquisados detalhadamente por Eastoe (A.4), Neuman (A.5) e Pouradier (A.6). Sabe-se que os amino-ácidos presentes nas colas a

(A.3) BOGUE, R.H. - The chemistry and technology of gelatin and glue, New York, McGraw-Hill, 1922.

(A.4) EASTOE, J.E. - The amino acid composition of mammalian collagen and gelatin. Biochem J., 61: 589-602, 1955.

(A.5) NEUMAN R.E. - Amino acid composition of gelatins, collagens, and elastins from different sources. Arch. Biochem., 24: 289-298, 1949.

(A.6) POURADIER, J. - Status of knowledge of the constitution of gelatin. Science et indus. phot., 19: 81-91, 1948.

animais não se encontram no estado livre, mas, como resíduos associados com eliminação de moléculas de água, para formar cadeias longas.

A cola animal é um sistema polidisperso contendo misturas de moléculas similares, com pesos moleculares diferentes e tendo como peso molecular, a média do peso das moléculas componentes, variando de 20 000 a 250 000. Ward (A.7) indica que a maioria das moléculas de cola consistem de cadeias simples as quais terminam num extremo com um grupo amino e no outro com um grupo carboxílico. Pauling, (A.8), sugeriu para o colágeno uma forma espiral.

2.2 - TIPOS

Existem dois tipos principais de cola animal: de pele e de cartilagem.

2.2.1 - COLAS DE PELE

São preparadas a partir de peles de animais lavadas com água pura e tratadas com leite de cal, para eliminar as proteínas que não produzem colas. Posteriormente o material é tratado com ácidos como o clorídrico, sulfúrico e sulfuroso, seguindo-se uma lavagem com água para eliminar o excesso de ácido. O material tratado é transferido para tanques de cozimento. Faz-se uma série de cozimentos com tempo e calor cuidadosamente programados e controlados, para separar sucessivamente soluções de cola extraídas da matéria-prima. Estas soluções são filtradas, evaporadas até um conteúdo de 16 a 45% de sólidos e submetidas à secagem até a obtenção de barras ou placas.

(A.7) WARD, A.G. - *The chemical structure and physical properties of gelatin.* Photographic. Sci., 3:60-67, 1955

(A.8) PAULING, L. - *A theory of the structure and process of formation of antibodies.* J. Am. Chem. Soc., 62: 2643-57, 1940.

2.2.2 - COLA DE CARTILAGEM

As colas de cartilagem são fabricadas a partir dos tecidos conjuntivos dos ossos. A preparação é feita limpando-se os ossos com água e com ácidos diluídos e cozimento em autoclave. Faz-se uma série de cozimentos em água quente e pressão separando-se soluções de colas diluídas das matérias cartilaginosas. Faz-se a filtragem para remover a gordura, evaporação até se obter o conteúdo desejado de sólidos e secagem na forma de barras ou placas.

2.3 - CARACTERÍSTICAS

Os adesivos animais, apresentados na forma granular e pulverizada, são secos, duros, sem odor e com coloração entre parda e marrom escuro. Mantidos secos, eles se conservam indefinidamente sem perder a sua resistência, nem as suas propriedades reativas.

A densidade do adesivo animal é aproximadamente de 12.7 KN/m³, sendo considerada seca, comercialmente, com teor de umidade entre 10 e 14%.

Os adesivos de pele têm pH quase neutro, em solução aquosa, geralmente são mais ácidos, com pH entre 5.8 a 6.3.

Os adesivos animais são solúveis em água, sendo insolúveis em óleos, ceras, solventes orgânicos e álcool absoluto.

Os adesivos animais são solúveis em água quente. Ao resfriar-se voltam ao estado gelatinoso.

Ensaio feitos por pesquisadores americanos indicam resistência ao cisalhamento acima de 2100 N/cm² (A.9).

A maioria dos ensaios para qualificação e para a determinação da resistência das colas animais foi desenvolvida pela Associação Nacional de Manufatureiros de Colas (A.10). Entre os ensaios mais importantes tem-se a determinação da viscosidade, do pH e das propriedades físicas e mecânicas das colas.

(A.9) HUBBARD, J.R. - Op. cit.

(A.10) NATIONAL ASSOCIATION OF GLUE MANUFACTURERS - Standard Methods [revised] for determining viscosity and jelly strength of glue. Ind. Eng. Chem., 16, [30]:310, Mar. 1924.

2.4 - PREPARAÇÃO

2.4.1 - COLAS ANIMAIS SECAS

A maioria dos adesivos animais secos modernos, são fornecidos para a preparação imediatamente antes da aplicação.

Para preparar rapidamente, recomenda-se adicionar água quente diretamente ao adesivo num recipiente com misturador. De preferência a água quente deve estar entre 60^o e 80^oC, antes de adicionar a cola. À medida que a cola começa a se dissolver, com o calor e a agitação, a temperatura abaixa até 50^o ou 60^oC, que é a margem ótima de temperatura para se desenvolver as propriedades da cola. Neste estado, a cola encontra-se pronta para ser utilizada.

Para obter melhores resultados deve-se dosar a cola e a água de acordo com a formulação ideal.

2.4.2 - COLAS ANIMAIS LÍQUIDAS

Atualmente em muitas indústrias preferem-se utilizar adesivos líquidos, de origem animal, para aplicação direta à temperatura ambiente. Estes adesivos são fornecidos prontos para utilização, possuindo: resistência, estabilidade, elasticidade e facilidade de uso. O tempo de cura ou secagem e o tempo de início da pega, dependem da formulação. Os adesivos animais líquidos são preparados a partir de soluções quentes de cola animal, modificadas através de processos químicos adequados.

2.5 - APLICAÇÃO

A maioria das colas comerciais de origem animal são preparadas com solução de 25 a 50% de sólidos à 60^oC para proporcionar fluidez, permitir um rápido espalhamento e formação de uma película fina e contínua de adesivo.

Os princípios para a obtenção de uma ligação resistente com a utilização de cola animal são os seguintes:

- Aplicar uma película de cola fina e contínua sobre a superfície dos aderentes.

- Aguardar que a película de cola adquira uma certa vis-

cosidade antes de aplicar pressão.

- Aplicar pressão suficiente até expulsar o excesso de a desivo e obter contato perfeito entre os aderentes.

- Manter a pressão o tempo necessário, para se obter uma boa resistência da ligação.

2.6 - RESISTÊNCIA À ÁGUA E AOS MICRO-ORGANISMOS

Os adesivos de origem animal não apresentam resistência à ação da água e quando umedecidos são atacados e destruídos por micro-organismos.

Alguns preparados químicos têm sido adicionados aos adesivos animais com a finalidade de melhorar a sua resistência à água, como o paraformaldeído, o ácido acético, etc. Deve-se ressaltar, que esses preparados químicos produzem apenas uma limitada proteção à ação da água.

3 - COLAS DE PEIXE (A.11)

Provavelmente, existe menos informação técnica escrita sobre colas de peixe do que a respeito de qualquer outro adesivo, apesar da cola de peixe ser usada há mais de 100 anos. Esta falta de informação se deve, sem dúvida alguma, ao segredo da sua manufatura até o fim do século passado.

Com o aparecimento dos especialistas em adesivos e com o crescente aumento da importância dos mesmos, surgiu um novo interesse pela cola de peixe.

3.1 - MANUFATURA

A cola de peixe é derivada da pele do mesmo. Em geral todas as peles de peixe produzem cola, no entanto, dependendo do tipo de pele usada para a manufatura do adesivo, poderão se tornar industrialmente indesejável. Com uma seleção apropriada do tipo de pele, é possível manufaturar um produto com razoável uniformidade,

obtendo melhores propriedades convenientes para uso geral. São de grande importância, os seguintes requisitos para a seleção de peles de peixe.

- deve ser fácil e contínua a fonte de obtenção nas quantidades requeridas;

- um tipo de pele sem óleo;

- uma pele de tamanho razoável.

Por exemplo: a pele do bacalhau cumpre estes requisitos, dando uma cola de boa qualidade e volume elevado por tonelada de peixe. Uma tonelada de bacalhau dá aproximadamente 190 litros de cola de peixe líquida.

Para armazenar as peles de peixe, adiciona-se sal prevenindo degradação bactericida e espera-se sua secagem. É necessário eliminar o sal antes de extrair a cola das peles. Após a remoção do sal, as peles são cozidas em água, obtendo-se um licor contendo aproximadamente 5 a 7% de sólidos.

Posteriormente o licor de cola é evaporado para aumentar o conteúdo de sólidos até os níveis desejados, entre 40 e 50%. Para o armazenamento da cola adiciona-se um bactericida podendo-se guardá-la com segurança pelo menos por um ano.

3.2 - CARACTERÍSTICAS

Geralmente, a cola, com um conteúdo de sólidos de 40 a 50%, têm peso específico de 11.0 a 12.0 KN/m³.

Para o controle da velocidade de cura, pode-se agregar uma cola animal como acelerador. No caso de retardador, pode-se usar um sal (cloreto de sódio ou de cálcio).

O pH da cola de peixe geralmente se encontra entre 6.5 a 7.2 podendo-se variar com a adição de produtos químicos.

Às vezes é necessário um solvente para melhorar a penetração no aderente. São indicados a seguir alguns solventes com suas respectivas tolerâncias para evitar dissociação da cola.

<u>Solvente</u>	<u>Quantidade em gramas</u>
álcool etílico	50
acetona	25
metil "celosalve"	95
di-metil formalina	110

A cola de peixe pode solidificar-se e fundir-se repetidas vezes sem afetar o seu comportamento.

Com a mistura de dextrina, a cola de peixe pode formar um adesivo bastante utilizado na indústria (adesivos de dextrina).

Adicionando-se cola de peixe a emulsões de acetato de polivilina e a emulsões de latex, melhora-se notavelmente as suas propriedades.

Misturando formaldeído ou cromato de alumínio pode-se obter um adesivo resistente à água. Para obter sucesso nestas misturas, deve-se pesquisar previamente a compatibilidade dos componentes da mistura.

3.3 - APLICAÇÕES

A cola de peixe misturada a cola animal é utilizada na manufatura de papel adesivo. A cola de peixe misturada a outros adesivos melhora o seu nível de adesão, ampliando a capacidade de se aderir em outras superfícies tais como: madeira, metal e vidro.

Esta cola também é utilizada na indústria das artes gráficas, chamando-se-lhe cola fotogravadora. É matéria prima na fabricação de papel de impressão e de matrizes de papel para impressão tipográfica (mimeografo).

4 - ADESIVOS DE CASEÍNA (A.12)

A natureza adesiva da caseína do leite é conhecida desde os primeiros tempos na prática das artes, identificada como adesivo das antigas peças de museu. Tem-se informações da utilização da caseína para ligações adesivas no início do século XIX, na Suíça e na Alemanha. No início do século XX, formulou-se uma mistura de caseína seca (A.13), marcando-se assim, o início da indústria do adesivo de caseína para madeiras. Estes adesivos assumiram grande importância comercial na primeira guerra mundial.

O alto grau de durabilidade da madeira colada com caseí-

(A.12) SALZBERG, H.K. - Adhesivos y colas de caseína. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives., 1962

(A.13) BOGUE, R.H. - Op. cit.

na foi a principal razão do seu amplo e corrente uso na madeira compensada, em madeira laminada para grandes vigas e arcos, nas ligações e em membros colados de estruturas de madeira empregadas em interiores de casas e galpões. Inicialmente o adesivo de caseína adquiriu boa reputação como adesivo para madeira resistente às intempéries. Por exemplo: a madeira laminada utilizada na construção de aeroplanos durante a primeira guerra mundial. Mas, com a inovação ocorrida nos EEUU, dos adesivos sintéticos do tipo das resinas fenólicas em 1935, e das resinas formaldeído-resorcinol em 1943, o adesivo de caseína foi gradualmente substituído. Os adesivos de úrea-formaldeído, introduzidos em 1937 na fabricação de madeira compensada, eliminaram o emprego de caseína devido ao seu custo mais baixo, sem prejuízo da resistência da ligação nem de sua durabilidade. No início de 1947 apareceu outro substituto da caseína para colagem de madeira, as emulsões de resina de acetato de polivinila.

4.1 - MANUFATURA DA CASEÍNA

A caseína é a principal proteína do leite. É obtida facilmente do leite desnatado após a separação do creme para o fabrico da manteiga.

A produção anual da caseína para o uso de adesivos na indústria já chegou a atingir milhões de metros cúbicos.

A caseína para ser utilizada como adesivo é isolada do leite desnatado, mediante acidulação do mesmo, com pH em torno de 4.5. Retira-se uma quantidade de coalhada. Após secagem, ela é moída, obtendo-se aproximadamente 1.5 Kg. de caseína de cada 50 Kg. de leite. São muitos os fatores que determinam o rendimento e a qualidade do produto. Atualmente o elevado custo do leite desestimula a produção da caseína.

4.2 - COMPOSIÇÃO DA CASEÍNA

A caseína é uma proteína formada essencialmente pela condensação de aminoácidos na qual a ligação principal das cadeias é a da amina (CO.NH), conhecida como a ligação peptídica na proteína.

Pode-se também definir a caseína como uma fosfoproteína, já que ela contém aproximadamente 0.75% de fósforo, parte da qual é um fosfato inorgânico, que se converte em cinza na combustão da

caseína.

4.3 - CLASSIFICAÇÃO

4.3.1 - ADESIVOS RESISTENTES À ÁGUA, CONTENDO CAL

Diz-se que um adesivo cura, quando muda do estado líquido para o semi-sólido (estado de gel), conseguindo uma união mais ou menos rígida. Os adesivos de caseína resistentes à água tornam-se semi-sólidos, devido a uma lenta reação química quando uma solução de caseinato de sódio é gradualmente convertida pela cal em um semi-sólido de caseinato de cálcio.

Adiciona-se cal ao adesivo de caseína para converter o sal de sódio em um hidróxido de sódio. À medida que o excesso de cal aumenta, o tempo de trabalho do adesivo diminui, mas a resistência à água da linha adesiva também aumenta.

Os produtos comerciais de maior uso para o sal de sódio são: fosfato trisódico, sulfeto de sódio, carboneto de sódio, fluoreto de sódio, carbonato de sódio e a combinação destes. O uso adequado e a formulação correta destes produtos químicos darão uma gama de variações das propriedades físicas e mecânicas do adesivo.

4.3.2 - ADESIVOS DE CASEÍNA LIVRES DE CAL

Os adesivos de caseína que não contêm cal são feitos dissolvendo-se a caseína em sais hidrolizáveis de sódio. Os sais comumente usados são: bórax, carbonato de sódio anidro e fosfato trisódico.

Na ausência de cal, os adesivos de caseína não formam uma película resistente à água. Para conseguí-la, usam-se os seguintes recursos:

- inclusão de formaldeído ou bi-sulfeto de carbono no adesivo úmido;
- inclusão no adesivo de um produto na forma de resina, contendo formaldeído ou hexametilenotetramina.
- inclusão no adesivo de um sal ou óxido (sais de cromo, zinco ou alumínio).

4.3.3 - ADESIVOS COMBINADOS DE CASEÍNA

Os adesivos combinados referem-se a misturas de caseína com: farinha de soja, albumina de sangue ou as duas misturadas com alguns produtos químicos que produzam ligações resistentes à água.

Estes adesivos encontraram grande utilização nas ligações de madeira aglomerada, diminuindo o custo do produto.

4.4 - CARACTERÍSTICAS DOS ADESIVOS DE CASEÍNA

Os adesivos de caseína para madeira têm valores de pH de 12 a 13. Para altos valores de alcalinidade a formação do semi-sólido se retarda.

Os adesivos de caseína, quando usados adequadamente, têm um desempenho excelente. Possuem limitada resistência à água, mas são resistentes ao calor sem umidade e suportam temperaturas até 80°C. Os adesivos de caseína não apresentam resultados satisfatórios para uso exterior nem para interiores úmidos. Nestas condições, a caseína é suscetível ao ataque de micro-organismos e fungos.

Os adesivos de caseína geralmente têm uma vida útil de 6 a 7 horas, a 21°C e um tempo de espera de 30 a 45 minutos para a mesma temperatura. O tempo de espera depende de vários fatores. Quando a temperatura é alta, a madeira está seca e tem baixa densidade reduz-se este tempo; inversamente. Baixa temperatura e madeira de alta densidade exigem tempo de espera maior.

Os adesivos de caseína podem ser aplicados em baixas temperaturas, 5 a 10°C, mas será necessário um tempo de prensagem bastante longo para se obter cura adequada, embora estes adesivos não possuam a durabilidade daqueles curados acima de 15°C.

Geralmente é adotada uma pressão de 70 N/cm² para madeiras moles e 110 N/cm² para madeiras duras.

O tempo de prensagem recomendado é usualmente 16 horas a 15°C ou menos em temperaturas mais elevadas.

4.4.1 - ADITIVOS PARA ADESIVOS DE CASEÍNA

4.4.1.1 - Óleos

A caseína geralmente é tratada com 1 a 3% de óleo antes de se misturar os produtos químicos, na hora de preparar os adesivos. Este tratamento retarda a interação entre a caseína e os produtos químicos e promove, ao misturar-se a saída de água do adesivo.

4.4.1.2 - Substâncias que melhoram a película adesiva

Muitos adesivos preparados contêm pequenas quantidades de farinha de soja, farinha de casca de nozes ou de celulose, com o objetivo de dar consistência ao adesivo e uma pequena ação sobre a penetração na madeira.

4.4.1.3 - Agentes reguladores da viscosidade

Os adesivos de caseína podem ser engrossadas com cloreto de cálcio, sulfato de sódio ou formaldeído e podem ser desengrossadas, aumentando o tempo de trabalho, agregando-se sulfeto de sódio, hexametáfosfato de sódio ou açúcar.

4.4.1.4 - Preservativos

A caseína é susceptível à decomposição bacteriana requerendo uma proteção. Isto se consegue adicionando-se no adesivo um potente fungicida, geralmente o fenol-clorinado, à razão de 3 a 5% do adesivo seco. Outra alternativa, seria o tratamento da madeira já colada com preservativos convencionais para madeira, como o penta-clorofenol ou o creosoto.

4.4.1.5 - Plastificantes

A película de caseína seca é quebradiça, mas isto não exclue a obtenção de ligações fortes na madeira. Algumas vezes se agrega glicerina ou sorbital aos adesivos de caseína para proporcionar à ligação certo grau de elasticidade.

4.5 - APLICAÇÕES

A obtenção de uma boa ligação entre madeiras com este ade

sivo dependerá da seqüência controlada das operações. Necessariamente deve existir um controle da consistência do adesivo, da temperatura, da madeira empregada, do tempo de espera e da prensagem.

Os adesivos de caseína geralmente são usados na indústria da madeira: carpintaria e estruturas.

Os adesivos de caseína para serem usados precisam seguir determinadas especificações considerando a resistência a umidade (A.14).

A prática correta indica; quando se usa o adesivo caseína, deve-se secar a madeira antes de usá-la (A.15).

5 - ADESIVOS DE SOJA (A.16)

A soja tem sido um alimento de grande importância para o homem durante milhares de anos. Os dados mais antigos da sua cultura datam do ano 3000 a.C. Mas o uso da farinha de soja como adesivo é recente, em vista de sua longa história como alimento. Há mais de 40 anos foi descoberto que podia ser extraído um azeite da farinha de soja, sem alteração da solubilidade da sua proteína, principal ingrediente do adesivo.

A indústria dos adesivos de soja diversificou-se com o passar dos anos, embora sua tecnologia tenha permanecido quase a mesma.

5.1 - CARACTERÍSTICAS

A soja para se converter em uma base útil para adesivos, deve ser descascada, secada, extraído o óleo com solvente e, finalmente, moída para transformar-se em farinha. Deve-se manter a temperatura constante durante todo esse processo, no máximo a 70°C. Uma composição típica da farinha de soja é:

(A.14) U.S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION - Adhesives, casein-type, water-and mold-resistant. Federal spec. MMM-A-225, 1955.

(A.15) PERRY, T.D. - Modern wood adhesives. New York, Pitman publishing, 1942.

(A.16) LAMBUTH, A.L. - Colas de soja. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962

ELEMENTO	PORCENTAGEM
proteína	54.0
carbohidratos	} 26.0
hemicelulose	
celulose	
gordura	7.0
cinza	6.0
água	7.0
TOTAL	100.0

A pureza da farinha de soja é um fator muito importante no seu aproveitamento como adesivo.

5.2 - MANUFATURA E FORMULAÇÃO

Uma substância deve ser altamente polar, para ser adesivo para aderentes polares como a madeira.

Para aproveitar integralmente o grau polar interno da farinha de soja, é necessário dispersar as moléculas polares da proteína. Isto pode ser conseguido quando o pH da dispersão atingir a proximadamente o valor de 11 (A.17).

Para a modificação e melhoramento das propriedades adesivas da proteína de soja, podem ser usados os seguintes compostos: para melhorar a resistência à água, adicionar hidróxido de cálcio ou hidróxido de sódio; para aumentar a capacidade de retenção de água, estabilizar a viscosidade e prolongar o tempo de vida do adesivo adicionar silicato de sódio líquido; para aumentar a resistência à água e a viscosidade, adicionar bi-sulfeto de cromo e tricarbonato de etileno. Como endurecedores, adicionar compostos de formaldeído e resinas de formaldeído.

As várias fases necessárias para converter a farinha de soja em um adesivo são: umidhecimento, moagem, dispersão e eliminação da espuma.

Para proteger os adesivos de soja dos ataques de fungos

e de micro-organismos são empregados: pentaclorofenol, compostos como o cloro-2-fenilfenol, naftenato de cobre, orto-fenilfenol, óxido de tributilina, quinolinolato-8-cobre e outros. Estes compostos devem ser agregados ao adesivo seco durante qualquer das fases da preparação do adesivo, de 1 a 5% do seu peso, dependendo do grau de proteção desejado. Os inibidores de mofo protegem somente o adesivo e a madeira adjacente à linha adesiva e não a estrutura toda.

Na continuação é indicado um adesivo típico de soja para madeira compensada.

<u>Procedimento</u>	<u>quantidade (Kg.)</u>
água a 16 - 21°C	79.00
farinha de soja	44.00
óleo de pinho ou desespumante equivalente	1.33
<i>misturar estes ingredientes du- rante 3 minutos, até amolecer</i>	
acrescentar água 16-21°C	66.00
<i>misturar durante 2 minutos até amolecer</i>	
cal hidratada	5.50
água a 16-21°C	11.00
<i>misturar durante 1 minuto</i>	
adicionar solução a 50% de hidró- xido de sódio	6.33
<i>misturar durante 1 minuto</i>	
acrescentar silicato de sódio	11.33
<i>misturar durante 1 minuto</i>	
acrescentar bi-sulfeto de carbono	0.50
tetracloroeto de carbono	0.25
pentaclorofenol	2.25
<i>misturar durante 10 minutos</i>	

Feito isto, o adesivo encontra-se pronto para uso. O tempo de trabalho varia de 6 a 10 horas.

A adição de caseína no adesivo de soja proporciona maior adesão e uma certa tolerância no tempo de trabalho das peças a serem ligadas. Este adesivo pode ser utilizado na fabricação de madeira laminada. O tempo de trabalho deste adesivo varia de 6 a 8 horas

em temperatura ambiente.

A farinha de soja também pode ser misturada com sangue seco, para se obter um adesivo com maior resistência à água, curado e prensado a quente.

Nos últimos anos desenvolveu-se uma nova geração de adesivos de soja a partir da adição de certas emulsões de latex à soja e aos adesivos de soja-caseína. Estes adesivos têm uma excelente resistência à água, boa pega, elasticidade e adesão. Atualmente o adesivo de soja é empregado na fabricação de móveis, de madeira laminada, etc.

5.3 - APLICAÇÕES

Os adesivos à base de farinha de soja são geralmente utilizados na fabricação de compensados de madeira, tanto para interiores como para exteriores. O prensado a frio, na fabricação dos compensados de madeira, foi desenvolvido em 1946 e adotado universalmente. Utilizando este processo, uma porção de aglomerado de madeira pode ser prensado durante 15 minutos e apiloado fora, até desenvolver a sua força total sem necessidade de mais pressão.

Praticamente todos os adesivos de soja endurecem a frio, dando como resultado, ligações satisfatórias na madeira laminada.

Deve-se ter cuidado especial com a viscosidade do adesivo, pois dela depende a boa aderência. Para cada tecnologia de prensagem existe um grau de viscosidade recomendado.

6 - ADESIVO DE SANGUE (A.18)

O uso do sangue como adesivo é conhecido desde a antiguidade. Os índios astecas misturaram o sangue animal com cimento, tornando possível a execução de estruturas de arcos planos ou elípticos característicos de suas construções.

O uso dos adesivos de sangue foi difundido durante a primeira guerra mundial, onde era necessário um compensado de madeira para ser usado na construção de aeroplanos. Os adesivos de sangue

curados a quente eram os mais resistentes da época. Com o aparecimento dos adesivos à base de resinas formaldeído-fenol o uso do adesivo está limitado, principalmente, ao compensado de madeira. A necessidade dos adesivos de albumina de sangue serem curados a quente, tem impedido seu uso em móveis, laminados de madeira e em outras áreas tradicionais da aplicação dos adesivos na madeira.

6.1 - COMPOSIÇÃO DO SANGUE

Quanto à secagem existem três categorias de sangue: solúvel, parcialmente solúvel e insolúvel. Os estágios preliminares da secagem são os mesmos para todos os casos. O sangue líquido e fresco é colhido nos matadouros em intervalos de horas. É removida a substância coagulante por agitação mecânica ou mediante precipitação ácida. Neste estágio se agrega um preservativo. O sangue agora transformado em um soro de albumina e hemoglobina em suspensão coloidal é relativamente estável. Está pronto para a secagem.

A fonte onde se obtêm o sangue animal é de grande influência no seu comportamento e em suas propriedades adesivas. O sangue difere consideravelmente de uma espécie para outra, como também na mesma espécie de animal devido a idade, condições de alimentação, etc.

A solução comercial para este problema é secar separadamente cada tipo de sangue e a seguir misturar para se obter uma massa com as mesmas propriedades. Os principais sangues secos são bovinos e suínos.

O mais importante constituinte adesivo do sangue é a sua proteína (a albumina do soro). Na realidade, o sangue contém outros constituintes de proteínas, tais como os compostos de coagulação e as células vermelhas (hemoglobina). Durante a secagem, os compostos de coagulação se eliminam e a hemoglobina forma compostos complexos muito pesados, deixando somente aproveitável a albumina para propósitos adesivos.

6.2 - CARACTERÍSTICAS E FORMULAÇÕES

A albumina de sangue reage com um bom número de íons de metal formando proteínatos insolúveis. Frequentemente se adicionam aos adesivos de sangue, sais de cálcio e magnésio com o propósito

de aumentar o caráter granular destes adesivos, como também para melhorar sua resistência à água. Os silicatos solúveis são excelentes agentes dispersantes, atuam como reguladores da viscosidade e prolongam o tempo de trabalho (A.19).

Para a formação de adesivos é necessário a transformação da proteína. Para este fim existem uma série de substâncias como o paraformaldeído, o formaldeído-fenol, etc.

As resinas fenólicas proporcionam aos adesivos de sangue resistência ao mofo, quando é agregado ao adesivo uma proporção de 1:10 do peso do mesmo. No quadro 26 do anexo, são apresentados alguns adesivos de sangue.

6.3 - APLICAÇÕES

Com o desenvolvimento relativamente recente da tecnologia dos adesivos de proteínas, os adesivos de sangue estão sendo muito efetivos para fabricação de madeira laminada, a ponto de competir com os adesivos de soja, com base no custo/comportamento.

A maioria dos adesivos de prensagem a frio são adesivos excelentes para madeira laminada, portas, laminação de papelão duro e mole e uma infinidade de aplicações quando se deseja uma ligação prensada a frio, com alta resistência à água e cura rápida.

7 - ADESIVOS DE AMIDO (A.20)

A maioria dos adesivos de amido é derivada da mandioca, da soja e do milho, embora adesivos possam também ser fabricados de outros vegetais como trigo, batata, banana, etc. A mandioca, vegetal mais freqüentemente usada na indústria de adesivos de amido, é mais conhecida na sua forma comestível como farinha de mandioca. Estes adesivos são usados na indústria do compensado em algumas partes do mundo.

(A.19) BJORKSTEN, J. - *Cross linkages in protein chemistry. Advances in protein chem., 6: 353-358, 1951.*

(A.20) CAESAR, George V. - *Almidón y sus derivados. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962.*

7.1 - CARACTERÍSTICAS

As vantagens dos adesivos de amido são: alta viscosidade, baixo custo, longo tempo de vida (armazenagem) e fácil aplicação.

O adesivo é fornecido em forma de farinha, devendo ser adicionada a água na proporção de três vezes o peso do adesivo.

Quando, durante a preparação do adesivo não houver calor suficiente, adiciona-se soda cáustica à mistura até a proporção de 10%.

A linha adesiva feita com este adesivo, é resistente quando não exposta a umidade. Quando isto acontece, ocorre rápida deteriorização e o adesivo pode sofrer o ataque de micro-organismos.

Apesar das vantagens deste adesivo para a indústria, a sua aplicação só é conveniente em temperaturas constantes e moderadas e em condições de ausência de umidade.

8 - ADESIVOS CELULÓSICOS (A.21)

A celulose é encontrada nos elementos estruturais das plantas. A borra do algodão proporciona em torno de 85% de celulose purificada, enquanto a polpa da madeira proporciona em torno de 60% de celulose útil.

A celulose é um polímero natural de cadeia alongada, Os adesivos formam-se mediante a reação dos grupos hidroxilos.

8.1 - CARACTERÍSTICAS

Pode-se fazer uma classificação dos adesivos derivados de celulose, com base nas suas características de solubilidade. Alguns, como o nitrato de celulose e a celulose de etilo são solúveis em solventes orgânicos, enquanto que outros são solúveis em água, tais como o metil celulose, hidroxietil celulose e carboximetil celulose os quais são bastante resistentes à água.

8.2 - APLICAÇÕES

São inúmeras as aplicações dos adesivos celulósicos. Um dos adesivos mais utilizados é o nitrato de celulose, ótimo para unir porcelana, madeira, metal, vidro, papel e couro. No quadro 27 do anexo, é apresentada uma formulação deste adesivo.

Quando é necessário um adesivo menos inflamável para unir papel, plástico ou papelão é utilizado o acetato butirato de celulose desenvolvido pela Eastman Chemical Producte. Co. (A.22). Também existem os adesivos para unir as lentes de contato à córnea (metil celulose), além dos adesivos para indústria metalúrgica, têxtil e de explosivos (nitrocelulose-ligante químico).

9 - ADESIVOS DE BORRACHA (A.23)

Os adesivos de borracha oferecem maior gama de propriedades que qualquer outro adesivo. Desenvolvimentos recentes dos adesivos de borracha, de elevada resistência, permitiram sua utilização nas ligações estruturais de aeroplanos.

A introdução de uma série de combinações de resinas elásticas-termosazonáveis formou a espinha dorsal sobre a qual se desenvolveram os adesivos à base de borracha. A maioria destas combinações foram resinas fenólicas com neopreno ou borracha nitrilo. As propriedades de elevada resistência e baixo deslizamento que possuem estes sistemas, os levaram a muitas aplicações estruturais.

9.1 - COMPOSIÇÃO

Os adesivos à base de borracha podem conter alguns ou todos os materiais listados na tabela 1-A.

Na tabela 2-A, encontram-se os tipos de adesivos à base de borracha.

(A.22) - Op. cit.

(A.23) WELZEL, F.H. - Introducción a los adhesivos a base de hule.

In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives., 1962.

TABELA 1-A - COMPOSIÇÃO DOS ADESIVOS DE BORRACHA	
MATERIAL	PORCENTAGEM
elastômeros	30-50
aglutinante ou resina	30-50
carga	10-40
plastificantes	1-6
antioxidantes	0.2-3
agentes de curado	0.5-5
agentes inibidores	0.2-1.5

TABELA 2-A - TIPOS DE ADESIVOS SEGUNDO SUA BASE
borracha natural
borracha ciclizada - por ácido sulfúrico
- por cloreto estânico
copolímero butadieno estireno (SBR)
copolímero butadieno - acrilonitrilo
(borracha nitrilo)
borracha clorinada
policloropropeno (neopreno)
borracha hidroclorada
polisulfeto de borracha
elastômeros carboxílicos
borracha silicone
isocianato de borracha
resinas fenólicas misturadas com borracha nitrilo
neopreno nylon
borracha recuperada
borracha butilo

Os aglutinantes são resinas de trementina, resinas de polisterpeno e certos tipos de resinas fenólicas termoplásticas.

As cargas são materiais como o carvão, óxido de zinco e várias argilas. Também se utilizam a diatomita calcária, gesso, barita e silicato de cálcio.

Utilizam-se como plastificantes o ácido esteárico, lauro de zinco, óleo mineral e lanolina.

Os antioxidantes são materiais como as lâminas aromáticas e fenoles substituídos ou quinonas.

Os agentes de curado são exemplificados pelo enxofre, sendo provavelmente o agente vulcanizante mais comum. Ultimamente também estão sendo utilizados os peróxidos, sais metálicos, etc.

Os agentes inibidores são adicionados, principalmente, para inibir os efeitos do magnésio e do cobre. A presença destes metais acelera a deterioração de muitas borrachas.

9.2 - CARACTERÍSTICAS

As características físicas dos adesivos à base de borracha podem variar com a formulação. Reologicamente, os adesivos podem variar desde um líquido extremamente viscoso até sistemas altamente elásticos e duros. Assim muitas borrachas sem vulcanizar, como as borrachas naturais ou as SBR são pegajosas, plásticas e flexíveis, mesmo em temperaturas em torno de 60°C. Mas, a resistência à tração e ao cisalhamento, das ligações formadas por estes materiais de módulo de elasticidade baixo e elevado alongamento, é baixa, embora aumentem com a temperatura. Esta combinação de propriedades proporciona uma boa resistência ao impacto e à vibração mas são propensos a deslizar ou fluir em frio. Outros elastômeros não vulcanizados como o neopreno ou o hidrocloreto de borracha são igualmente flexíveis, mas menos glutinosos e mais duros, tendo um alongamento mais baixo e um coeficiente de elasticidade mais elevado, embora sejam menos resistentes ao impacto e à vibração, são mais estáveis à temperatura. Assim pode-se obter muitas variações nas suas propriedades mudando os elastômeros e os vulcanizantes.

A maioria dos adesivos à base de borracha se encontram sem desnaturalização. Mas, os adesivos que se desnaturalizam estão adquirindo bastante importância. A desnaturalização da borracha melhora consideravelmente sua resistência ao cisalhamento e à deformação além de aumentar o coeficiente de elasticidade e a velocidade de recuperação elástica.

Os adesivos à base de elastômeros, na forma de misturas fenólicas, apresentam a máxima resistência ao cisalhamento.

As misturas de elastômeros-fenólicos desnaturalizados são

utilizadas para ligar metais nas aplicações estruturais (A.24).

9.3 - TIPOS E APLICAÇÕES

Entre os muitos adesivos à base de borracha serão citados apenas os mais importantes:

a) - Os adesivos de borracha natural e regenerada, utilizados intensamente na II guerra mundial, são aplicados para ligar papel, borracha, plásticos, placas de gesso, madeira, couro, cerâmica, metais, etc. A sua maior aplicação está na indústria automotriz, calçados e diversas drogas. Na indústria da construção existem três principais usos: (A.25) impermeabilização, fixação de acabamento em interiores e construção de painéis.

b) - Os adesivos de borracha butilo e poli-isobutileno são utilizados para fitas adesivas, fitas industriais sensíveis à pressão para encanamentos, impermeabilização, para unir madeira, etc.

c) - Os adesivos de borracha nitrilo têm aplicações diversas, principalmente na construção, para unir diferentes materiais (combinados com resinas fenólicas) (A.26), podendo ser ferro, madeira, vidro, papelão e muitos materiais porosos. Também são muito utilizados na fabricação de estruturas de aeroplanos, de painéis para construção de paredes intermediárias, etc.

d) - Os adesivos de borracha estireno-butadieno encontram-se entre os adesivos mais resistentes ao calor. Sua principal aplicação é na ligação de metal a metal ou outro material (A.27), na ligação de madeira com madeira, etc.

(A.24) DEBRUYNE, N.A. & HOUWINK, R. - Adhesion and adhesives. New York, Elsevier Publishing, 1951, p.391-392

(A.25) PALINCHAK, S. & YUEGEN, W.J. - Adesivos de hule natural y regenerado. Ohio, Battelle memorial institute columbus

(A.26) BROWN, H.P. & ANDERSON, J.F. - Adesivos de hule nitrilo. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives. , 1962.

(A.27) ANDERSON, J.F. & BROWN, H.P. - Adesivos de hule estireno-butadieno. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives. , 1962.

10 - ADESIVOS DE RESINA FENÓLICA (A.28)

A resina fenol-formaldeído foi a primeira totalmente sintética. O seu estudo começou pela análise da reação do fenol-aldeído.

Existem dois tipos de resinas fenólicas: Resoles e Novaloes. As resoles são chamadas de resinas de um passo. As resinas novaloes apresentam uma molécula a menos de formaldeído por molécula de fenol. O produto resultante tem, na sua estrutura em cadeia, terminações de fenol. As novaloes são também conhecidas comumente como resinas de dois passos.

As resinas fenólicas são dispersões em soluções alcalinas.

10.1 - QUÍMICA DA RESINA

As resinas resoles são formadas utilizando-se catalisadores alcalinos, com uma proporção de fenol-formaldeído, no intervalo de 1:1 até 1:1.5. O amoníaco é o catalisador mais utilizado para a formação de resol. Com o calor, completa-se a cura da resina.

As resinas novaloes são formadas em presença de catalisadores, de preferência ácidos, sendo mais comum o ácido oxálico. A proporção de fenol-formaldeído esta no intervalo de 1:0.8 a 1:1.1. Estas resinas encontram-se incompletas, podendo manter-se indefinidamente tanto na forma seca como em soluções com solventes orgânicos. Efetua-se a cura adicionando-se hexametilenotetramina e calor.

10.2 - CARACTERÍSTICAS DAS RESINAS FENÓLICAS

A vida das diferentes resinas fenólicas varia consideravelmente. Nas temperaturas em torno de 20°C a estocagem varia de 6 a 12 meses. Podem ter vida mais longa quando armazenadas à temperatura de 10°C. Quando a resina é armazenada em outras formas que não seja filme, a sua vida poderá se prolongar até 2 anos, à temperatura de 20°C.

Quando a colagem se dá em baixa temperatura, são emprega-

dos conjuntamente com as resinas fenólicas, catalizadores fortemente ácidos ou fortemente alcalinos. Entre eles podem ser citados os ácidos: fosforoso, fosfônico, tricloroacético, maleico, oxálico e os alcalis: amônia e o hidróxido de sódio.

A quantidade de endurecedor a ser usada depende da velocidade de cura desejada e da concentração da substância, mas, geralmente varia em torno de 15% do peso da resina usada.

O volume de sólidos, como as demais propriedades dos adesivos de resina fenol-formaldeído, varia com a mistura e com os demais componentes usados. A porcentagem de sólidos nas resinas fenólicas, nos extensores, nos modificadores e nos solventes, incorporados na preparação do adesivo, variará consideravelmente com o tipo de aplicação e as espécies de superfície a serem unidas.

O teor de sólidos resinosos no adesivo preparado variará entre 23 a 27%.

São utilizados vários compostos como solventes das resinas fenólicas como por exemplo, o hidróxido de sódio. Porém, os mais empregados são a água e o álcool ou uma mistura dos dois.

A formulação dos adesivos de fenol-formaldeído baseia-se nas combinações da resina, água e álcool.

A seguir são apresentadas três exemplos de mistura para uma resina fenólica e solvente, fornecidas pela Amberlite:

<u>Compostos</u>	<u>Proporções</u>		
	<u>1ª</u>	<u>2ª</u>	<u>3ª</u>
Amberlite	40%	60%	56%
Água	60%	28%	---
Álcool	---	12%	44%

A vida dos adesivos de resina fenol-formaldeído, após a ativação com o catalisador, em recipientes ou no decorrer das aplicações, varia de 2 horas a 32°C para 4 horas a 21°C. Estes períodos podem ser diminuídos ou prolongados de acordo com a concentração do catalisador usado (A.29).

O espalhamento recomendado para madeira com um teor de umidade de 6 a 9% é:

(A.29) CARSWELL, T.S. - Phenoplasts - their structure, properties, and chemical technology. New York, Interscience publ., 1947.

Madeiras moles (coníferas)	300 a 400 g/m ²
Madeiras duras (dicotiledôneas)	250 a 350 g/m ²

Há dois grupos de adesivos de resina fenol-formaldeído quanto à temperatura de cura: adesivos aplicados a elevada temperatura e a temperatura intermediária.

Os adesivos aplicados em alta temperatura são alcalinos e vendidos no mercado em três formas:

- em filme de papel impregnado de resina;
- em pó para ser suspenso em água ou em soluções de álcool;
- e em soluções líquidas de resina, em água ou álcool.

Estes adesivos de resina fenol normalmente curam entre 137 e 150°C.

Os adesivos aplicados em temperaturas intermediárias têm catalisadores ácidos. Alguns destes adesivos são indicados para aplicação a temperatura ambiente: 25°C.

Esses adesivos são normalmente fornecidos como resinas líquidas, tendo catalisador ácido separado para ser adicionado na hora da preparação do adesivo.

O tempo de prensagem é em função da temperatura, do tipo de adesivo e da espessura dos painéis de madeira. Quando se usam pratos quentes, a 150°C por exemplo, o tempo de prensagem é de 2 minutos, para uma distância de 1 mm do prato quente até a linha adesiva. Quando a distância aumenta para 10 mm o tempo de prensagem passa a ser de 15 minutos.

O período de cura pode ser controlado, particularmente, pelo uso de um tipo adequado, quantidade exata de catalisador e pelo método de preparação da resina.

O tempo de cura varia com a dureza requerida, expansivos e temperatura. Quando a porcentagem de dureza e expansivos aumenta, o tempo de cura diminui.

Os adesivos de resina fenol-formaldeído apresentam garantia de resistência mecânica e ao calor, durabilidade e resistência à água, quando utilizados de acordo com as especificações do fabricante.

A resistência ao calor das resinas de fenol-formaldeído é extremamente elevada, podendo atingir valores acima daqueles em que a madeira entra em combustão e ocorre também para variações al

ternadas de temperatura.

Fatores biológicos, de uma maneira geral, não agem sobre os adesivos de fenol-formaldeído. Fungos poderam crescer superficialmente se as condições de umidade forem propícias, mas viverão apenas na superfície do adesivo. Uma exceção se verifica quando são usados expansivos em excesso, mas, mesmo nestas condições, a resina não é atacada. As bactérias atacam expansivos à base de proteínas, se as condições de exposição forem severas, mas, as resinas fenólicas têm demonstrado uma ação protetora, retardando a deterioração.

Não são indicados plastificantes para as resinas de fenol-formaldeído.

O tempo de espera para o fenol-formaldeído varia com a formulação do adesivo, com a quantidade e tipo de extensores, modificadores ou filmes usados. Algumas misturas permitem curto tempo de espera, menos de uma hora, enquanto outras misturas exigem várias horas ou mesmo dias. A maioria das formulações apresenta um tempo de espera mínimo, além do qual o adesivo formará ligações fracas.

Os filmes impregnados de resina aplicados em temperatura elevada demandam madeira entre 8 e 12% de umidade. Abaixo de 8%, a resina fenólica no filme não se liquefará e não fluirá adequadamente, e a colagem não será perfeita. Acima de 12% a excessiva umidade tenderá a "lavar" a resina fenólica dentro da madeira, causando o enfraquecimento da ligação.

As resinas fenólicas em pó ou em soluções, aplicadas em temperatura elevada demandam madeira com baixo teor de umidade: 1 a 7%.

Os adesivos de resina fenólica com catalisadores ácidos podem ser aplicados a temperaturas de 25 a 100°C e umidade da madeira de 6 a 12%.

As resinas fenólicas têm cor vermelha-escura.

10.3 - DURABILIDADE

A durabilidade dos adesivos se mede em termos de resistência da ligação às influências deteriorantes. A resistência de uma ligação deve permanecer inalterável durante a vida do aderente.

A durabilidade é uma composição da permanência da resis-

tência mecânica, da resistência à fadiga e a resistência à termodeformação.

As influências deteriorantes dependem da exposição ao calor, aos fatores biológicos, às alterações atmosféricas e às tensões cíclicas. As resinas fenol-formaldeído, adequadamente formuladas têm surpreendente resistência a todos estes fatores.

Os efeitos naturais mais nocivos sobre as ligações, são as tensões alternadas devidas à expansão e contração térmica do adesivo, ou ao inchamento e à retração da madeira devidos à mudança de umidade. Nesta situação deve-se utilizar a resina fenol-formaldeído junto com um cuidadoso controle de pH e não é recomendado o uso de extensores.

10.4 - APLICAÇÕES

As resinas fenólicas são aplicadas na fabricação de compensados de madeira para uso exterior, de compensados duros, de compensados resistentes ao fogo, de madeira aglomerada, de chapas de fibra de vidro para isolamento, de discos para esmeril e de moldes de fundição.

As resinas fenólicas não são recomendáveis para uso em metais e vidros, porque a sua natureza polar geralmente não aderirá à superfície não polar.

A cor vermelha escura das resinas fenólicas pode torná-las inadequadas para aplicações nas quais a beleza e a estética devem ser consideradas.

11 - ADESIVOS DE RESORCINOL E FENOL-RESORCINOL-FORMALDEÍDO (A.30)

Novatny (A.31), apesar de não ter sido o iniciador das pesquisas sobre este assunto, parece ter sido o primeiro a desenvolver um método controlável para produzir um condensado de resorcinol e formaldeído, capaz de endurecer com paraformaldeído, e ade

(A.30) HEMMING, C.B. - Adesivos de resina resorcinol. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962.

(A.31) - Op. cit.

quado para ser usado como adesivo.

As resinas de resorcinol-formaldeído podem ser baseadas inteiramente em resorcinol ou em misturas de fenol-resorcinol-formaldeído. Esta última mistura geralmente é de custo mais baixo, porém requer temperatura de cura mais elevada do que as resinas resorcinol-formaldeído.

A introdução comercial destas resinas só ocorreu em 1943, embora a possibilidade de sua produção já fosse prevista há 70 anos, para atender as necessidades do tempo de guerra, pois consistia em um adesivo capaz de curar à temperatura ambiente, produzindo aderência à prova d'água e de elevada durabilidade.

O resorcinol tem custo elevado e a sua disponibilidade é limitada. Tem cor marrom escuro, inconveniente para as aplicações de caráter estético. Por isto os adesivos de resorcinol têm sido usados somente onde são necessárias resistência e durabilidade.

Os adesivos fenólicos não podem curar-se à temperatura ambiente, sem ajuda de um ácido forte como catalisador, propenso a debilitar as fibras adjacentes à linha adesiva. A mistura fenol-resorcinol elimina este problema e têm custo moderado. O fenol-resorcinol pode ser empregado à temperatura ambiente e forma ligações adequadas para madeiras expostas às intempéries. Apesar das suas limitações, as resinas de resorcinol cobrem estes requisitos, pois podem ser curados à temperatura ambiente, são substancialmente neutras e inofensivas às fibras da madeira, produzem ligações de durabilidade muito alta e apresentam um comportamento superior ao da resina fenólica curada a quente. Naturalmente estes adesivos encontraram grande aceitação na elaboração de barcos e outras estruturas marítimas, encaixes de aeroplanos, ligações e compensados de madeira para exterior, etc.

11.1 - QUÍMICA DA RESINA

Do ponto de vista prático, só existem no mercado dois tipos de adesivos contendo resorcinol: resorcinol puro e fenol-resorcinol.

Os adesivos fenol-resorcinol contêm, em média, 15% de resina fenólica, sua cura é mais lenta, a temperatura de cura é ligeiramente maior, o seu custo é um pouco menor, o tempo de armazenamento é mais curto e o fissuramento é menor quando aquecido.

A propriedade das resinas resorcinol de curar-se à temperatura ambiente, é devida aos grupos adicionais de hidróxilo que existem nos núcleos de fenol, os quais aumentam a velocidade de condensação com o formaldeído. A resina sintética, líquida, é preparada condensando-se primeiramente, uma molécula de resorcinol com 0.6 a 0.65 moléculas de formaldeído, em ausência de catalisador, a uma temperatura entre 100 e 150°C, seguido de resfriamento para evitar a continuação da reação. O condensado se dissolve em álcool etílico para ajudar na estabilidade da resina líquida e fornecer uma boa consistência para o manuseio e a mistura. O adesivo estará pronto para a sua utilização adicionando-se um endurecedor (A.32).

11.2 - CARACTERÍSTICAS

Devido a estas resinas estarem incompletas, antes de adicionar o endurecedor, não é problema a temperatura de armazenagem em recipientes herméticos. Embora devam ser evitadas as altas temperaturas durante prolongados períodos de armazenagem. As temperaturas baixas não causam perturbações na resina, porém antes de sua utilização deve-se fazer verificações esquentando o recipiente e misturando a resina. O tempo de armazenagem dos componentes separados, varia de acordo com sua origem, geralmente indicado pelos fabricantes.

Quando conservados nos recipientes originais e hermeticamente fechados em lugares secos, à temperatura em torno de 16 a 21°C, a vida de armazenagem do resorcinol é de um ano.

Os endurecedores mais conhecidos são o formaldeído e o paraformaldeído. O mais utilizado é o paraformaldeído por apresentar menos odor e ser mais trabalhável. Geralmente, o paraformaldeído é misturado com farinha de casca de noz que atua como carga.

O conteúdo de sólidos é significativo dentro de certos limites, já que se encontra relacionado com a quantidade requerida do endurecedor. A verificação pode ser feita mediante uma extração com álcool, pesando a resina seca e determinando a diferença de conteúdo verdadeiro do endurecedor.

A porcentagem de sólidos no adesivo varia entre 50 a 56%.

Os solventes mais utilizados são principalmente a água e o álcool. As porcentagens devem seguir as instruções dos fabricantes.

As proporções de mistura variam com as formulações de cada fabricante.

Na continuação, é apresentado a dosagem para um adesivo típico de resorcinol, fabricado pela Alba SA. "Cascochem RS-216-M". Resina sintética em solução de álcool e água, especialmente recomendada para ligações resistentes à umidade, ao mofo, ao calor, à água fria ou fervida, a dissolventes orgânicos, etc. Excelente para trabalhos navais, hidráulicos e outros, onde a ligação deverá ficar exposta temporária ou definitivamente à ação de intempéries ou d'água, como é o caso de barcos, caixas d'água, etc. É preparada com a utilização de catalisador na proporção 100:20, entre a resina e o catalisador. A preparação é feita misturando-se o catalisador (em pó) FM-60-M na resina até que sua dispersão fique homogênea. O adesivo assim preparado, em uma temperatura de 20°C, terá vida útil de aproximadamente 5 horas e a 32°C, será apenas de 1 hora e 45 minutos.

A adição de 5 a 10% de álcool é recomendada quando o adesivo estiver viscoso devido à evaporação do solvente e/ou quando for necessário melhorar a penetração do adesivo na ligação de madeiras densas.

O pH destes adesivos é em torno de 7.2, ou seja, praticamente neutro e, portanto, não danifica as fibras da madeira.

A uma temperatura entre 23 e 24°C a vida útil do adesivo preparado será de 2 1/2 a 3 horas. Para uma temperatura de 20°C a vida útil será de 3 a 9 horas.

O espalhamento deve ser feito de acordo com o tipo particular de resina em uso na proporção de 200 a 400 g/m².

Os adesivos de fenol-resorcinol produzem boa ligação entre peças de madeira com um teor de umidade de 6 a 17%.

Uma ótima resistência ao cisalhamento será obtida quando o tempo de espera for de 10 a 15 minutos, para a evaporação de todo ou quase todo o solvente. O tempo de espera fechado varia de 15 a 45 minutos a 16°C, dependendo do tipo de resina e da temperatura ambiente. Em altas temperaturas o tempo de espera é mais curto.

A temperatura de cura pode variar da temperatura ambiente até 100°C. O fato destes adesivos poderem curar a temperatura

ambiente é uma das suas melhores qualidades.

O tempo de prensagem é função da temperatura, da formulação do adesivo, da espessura dos painéis de madeira ou da distância até a linha adesiva. Para madeiras moles, é recomendado um período de prensagem de 16 horas com uma temperatura mínima, na linha adesiva, de 38°C e pressão de 70 N/cm². Para madeiras densas ou duras a pressão será aumentada para 100 N/cm², a temperatura na linha adesiva para 66°C, por um período de 24 horas. Ambos os períodos podem ser aumentados se as condições de exposição forem excepcionalmente severas, ou se o raio de curvatura, para o qual a lâmina é submetida, for muito pequeno.

O período de cura pode ser controlado pelo uso de um catalisador adequado, sua quantidade, pela variação de temperatura e pela variação de pressão de prensagem.

Há dois tipos de manchas que ocorrem nestes adesivos. Um tipo é a mancha direta, causada por um espalhamento acidental. Pode ser removida por lixamento, aplainamento ou corte. O outro tipo é a imagem deixada após a remoção do solvente. Tempo e luz fá-la-ão aparecer, é necessário um agente químico para removê-la.

Os adesivos à base de fenol-resorcinol desenvolvem considerável resistência ao calor.

Estes adesivos apresentam excelente resistência aos micro-organismos.

11.3 - DURABILIDADE

Com estes adesivos são produzidas ligações mais duráveis, especialmente de madeira-madeira.

Na exposição da madeira à água salgada deve-se evitar tensões elevadas.

Os fatores de deteriorização não têm efeito sobre as ligações de fenol-resorcinol.

A termodeformação e a fadiga não representam problemas.

11.4 - APLICAÇÕES

As principais aplicações destes adesivos, separados ou misturados são: a fabricação de compensado de madeira de fino acabamento para uso exterior, de compensado naval, de elevada resistência ao calor e às intempéries; nas ligações de madeira para ob-

ter elementos mais longos e ou de seção composta para as estruturas de madeira como tesouras, vigas e arcos estruturais; de madeira laminada submetida a solicitações elevadas e severas; a ligação de certos plásticos, entre si e a madeira; a ligação de metal a madeira.

A superfície do metal para a ligação a madeira deve ser preparada com a aplicação de um adesivo elastômero-fenólico. Os Adesivos de resorcinol não têm afinidade com o metal, mas ligar-seão forte e facilmente a um recobridor apropriado para este trabalho. Deve-se controlar cuidadosamente a cura do recobridor. Uma cura exagerada reduz a capacidade do resorcinol de ligar-se ao recobridor. Uma cura incompleta permitirá que o resorcinol descole do recobridor.

Cada uma destas aplicações requer, pelo menos, uma das três vantagens dos adesivos resorcinol: cura a temperatura ambiente, alta durabilidade da ligação e adesão específica desenvolvida pela resina resorcinol.

12 - ADESIVOS DE UREA-FORMALDEÍDO (A.33)

As resinas de urea são encontradas em soluções ou em forma de pó. A resina de urea modificada com álcool de furfurilo só se encontra na forma líquida.

Um adesivo de urea-formaldeído típico para utilizar-se na fabricação dos compensados de madeira é encontrado na forma líquida ou em pó.

As resinas urea são as mais versáteis do grupo, obtendo-se ligações de moderada resistência a umidade.

Na década de 1930 I.G. Farbenindustrie apresentou um adesivo para madeira a base de urea-formaldeído. Embora não tendo a resistência a água dos fenólicos, este adesivo pode ser curado a temperaturas mais baixas tem um custo bem menor e proporciona uma linha adesiva incolor. Sua principal aplicação está, de um modo geral, na indústria de móveis e ligações para uso interior.

12.1 - QUÍMICA DA RESINA

As resinas de urea para aplicação como adesivo são condensadas de urea e de formaldeído com polimerização avançada. A quantidade de moléculas é aproximadamente duas de formaldeído para uma de urea.

A cura do adesivo é feita mediante a adição de um catalisador liberador de ácido. Para aumentar a polimerização poder-se-á usar calor. Na prática, o catalisador é adicionado na forma de um sal de amônio. Reagindo com o formaldeído libera ácidos fórmicos e acéticos. O ácido liberado atua como um catalisador para promover a condensação do monômero e dos polímeros intermediários com eliminação de água.

12.2 - CARACTERÍSTICAS (A.34)

Os adesivos líquidos de resina urea têm boa estabilidade no armazenamento. Isoladamente não são suficientemente reativos para serem usados como adesivos, devendo-se adicionar um catalisador antes de usá-las como adesivos. Os produtos encontrados em forma de pó têm excelente tempo de armazenamento a baixas temperaturas e umidade. Assim, como nas resinas líquidas, também deve-se adicionar um catalisador antes da sua aplicação.

Na prensagem a frio para a resina na forma líquida (xarope viscoso) é adicionado um catalisador e um extensor e para as resinas em forma de pó, um catalisador carga ou extensor. Os retardadores de cura como o fosfato tricálcico são, muitas vezes, empregados na mistura adesiva para aumentar a vida de trabalho.

Na prensagem a quente nenhum catalisador é empregado. No entanto, extensores ou cargas podem ser adicionadas para diminuir o custo.

Na prensagem a quente o volume de sólidos é de 23 a 39 % e na prensagem a frio este volume é de 40 a 67%.

A água e o álcool são geralmente, usados como solventes para as resinas de urea-formaldeído.

A proporção da mistura varia com a formulação de cada fa

bricante. A seguir, é apresentada três formulações para um adesivo típico de urea (prensado a frio):

<u>Componentes</u>	<u>Formulações em Kg.</u>		
	<u>1ª</u>	<u>2ª</u>	<u>3ª</u>
urea	50.0	50.0	50.0
farinha de casca	7.5	7.5	7.5
farinha de trigo	0.5	12.5	25.0
água	45.0	60.0	70.0
catalisador	2.5	2.5	2.5
<i>tempo de trabalho em horas</i>			
à 21°C	4	4	4 1/2
à 27°C	2	2	2 1/2
à 32°C	1	1	1 1/2

Na prensagem a frio, dependendo do tipo e da quantidade de catalisador usado, o pH do adesivo pode ser prejudicial à celulose da madeira. De um modo geral, o endurecedor contém um estabilizador do pH, como o fosfato tricálcico, para estabilização do pH em valor próximo de 3 e, ao mesmo tempo, aumenta o período de trabalho do adesivo.

Os adesivos de cura rápida em baixa temperatura têm geralmente pH mais elevado.

A vida de trabalho dos adesivos de urea depende da temperatura ambiente, do tipo de endurecedor, da natureza do catalisador, enfim, da formulação dos componentes do adesivo. O tempo de trabalho, para adesivos de cura à temperatura ambiente, é de 3 a 9 horas. Para trabalhos estruturais são usados somente estes tipos de adesivos.

Para diminuir o efeito prejudicial de aumento de temperatura ambiente, na hora da colagem, sobre a vida de trabalho do adesivo, algumas formas de resfriamento podem ser aplicadas ao recipiente de adesivo. Por exemplo, deixá-lo em posição vertical dentro de uma vasilha contendo água fria.

O espalhamento varia com a natureza do trabalho e o tipo do adesivo, isto é, da formulação adesiva. Entre tanto, ele pode variar de 120 a 400 g/m² na prensagem a frio e de 100 a 300 g/m² na prensagem a quente.

É recomendado o emprego de madeira com teor de umidade entre 7 e 15%. Alguns pesquisadores recomendam, para uma boa colagem com estes adesivos à temperatura ambiente, o teor de umidade da madeira entre 7 e 12%. Abaixo e acima destes valores, há um pequeno decréscimo na resistência da linha adesiva.

O tempo de espera a 20°C é 20 minutos.

A temperatura de cura varia da temperatura ambiente até 130°C.

O tempo de prensagem para a ligação de grandes peças, é de 16 horas a 20°C com uma pressão de 70 N/cm², para madeiras moles e 110 N/cm² para madeiras duras. Para pequenas ligações, o tempo é de 2 horas a 20°C com uma pressão de 30 a 70 N/cm². Para a fabricação de compensado, o tempo de prensagem é de vários minutos a 100°C e pressões acima de 140 N/cm², dependendo geralmente da profundidade da linha adesiva, das formulações adesivas e do tipo de madeira.

A velocidade de endurecimento destes adesivos pode ser controlada pela mudança do pH da mistura úmida. Frequentemente existem diferentes catalisadores para a mesma resina.

Estes adesivos, geralmente, não mancham e uma das suas boas qualidades é produzir uma linha adesiva invisível.

Os adesivos de urea-formaldeído não têm boa resistência à água.

A resistência ao ataque de micro-organismos é uma das boas qualidades dos adesivos de urea-formaldeído. Por isto não é necessário adicionar nenhum preservativo.

12.3 - APLICAÇÕES

A maior aplicação dos adesivos de urea-formaldeído é no compensado de madeira para interiores (prensado a frio), móveis, laminados de madeira decorados para divisórias, etc,

As resinas de urea-formaldeído, modificadas com álcool furfurilo são mais resistentes às fissuras. Por isto são utilizados nos compensados de madeira para interiores e ligações estruturais.

13 - ADESIVOS DE MELAMINA-FORMALDEÍDO (A.35)

Atribui-se a Liebig, em 1834, o descobrimento e identificação da melamina. A produção em escala comercial começou em 1939, utilizando a decianamina como matéria prima. Tem custo mais elevado, mas possui maior durabilidade que a urea.

As resinas de melamina e melamina-urea são encontradas comercialmente apenas na forma de pó. São utilizadas sem catalisador.

Para a cura do adesivo é necessária a prensagem a quente.

É freqüente adicionar-se melamina à resina urea para melhorar a resistência à água.

As ligações feitas com adesivos de resina melamina são compatíveis, na durabilidade, com as ligações feitas por adesivos e resinas fenólicas e resorcinol.

13.1 - QUÍMICA DA RESINA

A melamina é um composto orgânico, sintetizado da cyanamida, obtido do cálcium cyanamida e tem forma de um pó branco cristalino. A melamina reage com o formaldeído, formando uma resina com baixa solubilidade em água, álcool e outros solventes orgânicos. A dissolução é rápida em formalina quente, formado mediante uma reação, uma variedade de metinol. A resina melamina original tem forma líquida e é de difícil armazenagem. Ela é fornecida normalmente, em forma de pó, para ser misturada em água ou em água e álcool e um extensor geralmente farinha de casca de noz. A resina melamina também é fornecida em forma de filmes, para certos trabalhos.

13.2 - CARACTERÍSTICAS

O tempo de armazenagem a alta temperatura será consideravelmente reduzido. É recomendável temperatura de armazenagem menor ou igual a 16°C. Quando são armazenados nos recipientes originais em lugar seco e a temperaturas inferiores a 20°C, o tempo de vida se prolongará por 1 a 2 anos. Estes dados se referem aos adesivos em pó. Nos casos de adesivos em filme, o tempo de armazenagem será de 3 meses.

Na fabricação de compensados dispersa-se a resina na água e adiciona-se farinha de casca de noz, para se obter melhor consistência no espalhamento.

Os adesivos de melamina formaldeído não curam satisfatoriamente em temperatura ambiente, mesmo com um catalisador ácido.

O volume de sólidos no adesivo varia em torno de 68 a 72 %.

A água e o álcool ou os dois, são usados como solventes na maioria dos adesivos de melamina-formaldeído.

A preparação da mistura resina-catalisador, varia de acordo com as formulações de cada fabricante. A seguir são apresentadas algumas formulações típicas de adesivos de melamina-formaldeído e melamina urea-formaldeído.

- Adesivo à base de melamina-formaldeído

<u>componentes</u>	<u>formulação em Kg.</u>
resina	40
farinha de casca	10
água	30
<i>tempo de trabalho a 21°C</i>	12 a 18 horas

- Adesivo à base de melamina-urea-formaldeído em pó

<u>componentes</u>	<u>formulação em Kg.</u>	
	1 ^a	2 ^a
resina	50.0	50.0
farinha de casca	10.0	3.75
água	27.5	22.5
catalisador	0.125	1.25
<i>tempo de trabalho a 21°C (Hs.)</i>	8	2 a 3

- Adesivo à base de urea-formaldeído em forma líquida

<u>componentes</u>	<u>formulações em kg.</u>		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
resina líquida	75.0	75.0	75.0
fortificador	----	2.5	5.0
farinha de casca	5.0	5.0	5.0
endurecedor	1.0	1.0	1.0
<i>tempo de trabalho a 21°C (Hs.)</i>	2 a 3	12 a 15	15 a 20

O pH do adesivo permanece neutro em todos os adesivos de resina de melamina-formaldeído curados.

A vida do adesivo preparado varia com as formulações de cada fabricante. Nos adesivos em forma de pó, várias horas e na forma de filme, até 3 meses.

O espalhamento recomendado para estes adesivos é de 120 a 600 g/cm², dependendo da natureza do trabalho e da formulação adesiva.

Para estes adesivos atingirem plenamente todas as suas propriedades a umidade da madeira deve-se encontrar entre 6 e 16%.

O tempo de espera varia com o tipo de adesivo e espécie da madeira. Quando se deseja unir madeiras de alta densidade, o tempo ótimo mínimo é de 45 minutos e o máximo é de 24 horas. Para madeiras de baixa densidade o tempo mínimo é de 30 minutos e o tempo máximo é de 16 horas.

A temperatura também varia com as formulações adesivas de 45 a 95°C. A durabilidade destes adesivos é tão boa quanto a dos adesivos de fenol.

O tempo de prensagem depende da formulação adesiva, da temperatura, da espécie de madeira e da profundidade da linha adesiva. Podendo ser de poucos minutos a 95°C, a várias horas a 45°C, com pressões de 70 a 100 N/cm². Na laminação de compensados de madeira, para profundidade da linha adesiva de 3 mm, é de 9 a 13 minutos.

A velocidade de cura destes adesivos pode ser acelerada mediante adição de um catalisador adequado.

Quando devidamente curadas, estas resinas produzem uma linha adesiva incolor e invisível, exceto quando são usadas cargas coloridas.

Todas as resinas melamina-formaldeído são, a prova d'água. Provavelmente o maior uso da melamina no campo dos adesivos é como fortificador dos adesivos de urea-formaldeído, para proporcionar maior resistência à água particularmente à água fervida. A resistência ao calor e aos produtos químicos é relativamente boa.

Uma das características mais notáveis da melamina é a sua resistência a fungos e micro-organismos. Por isto não é necessário adicionar à resina melamina-formaldeído nenhum preservativo, porém é necessário que não entre em contato com o adesivo, nenhum álcali, pois pode prejudicar a sua cura.

13.3 - APLICAÇÕES

Estes adesivos são comumente requisitados na produção de artigos nos quais a resistência à água é essencial. Por terem custo elevado, os adesivos de melamina-formaldeído têm as suas aplicações restringidas a compensados de madeira a prova d'água, laminação de madeirame pesado para aplicação naval, barcos e como fortificadores de adesivos de urea.

14 - ADESIVOS DE RESINA EPOXI (A.36)

As resinas epoxi estão entre as mais novas e revolucionaram a tecnologia dos adesivos. Este tipo de adesivo, até o momento, tem tido pouca influência na indústria madeireira devido ao seu custo elevado. Mas, a sua aplicação no campo da engenharia tem sido extraordinária, sendo usado nas ligações de concreto, metal, vidro, cerâmica, etc.

A resistência elevada e facilidade de aplicação dos adesivos à base de resina epoxi têm permitido a sua utilização crescente em quantidade e complexidade.

14.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As resinas mais comuns utilizadas como adesivos são: as resinas derivadas do epiclorohidrato "EPI" e resinas formadas por peroxidação.

As resinas intermediárias, formadas pela condensação alcalina do epiclorohidrato e do bisfenol (A.37), são designadas como "BIS-EPIS". Comercialmente se apresentam misturadas com polímeros.

14.2 - CARACTERÍSTICAS

Devido aos grupos polares epoxi, hidróxidos, e outros, as

[A.36] SKEIST, I. & SOMERVILLE, G.R. - Epoxy resins., New York, Reinhold publishing, 1958.

[A.37] GOULD, B. - Everybody needs epoxies. New York, Breskin publications, 1960

resinas epoxi têm grande adesão específica em metais e cerâmicas . As misturas podem ser formuladas para obter viscosidade conveniente, espalhamento e penetração garantida. Quando a resina está adequadamente curada, a força coesiva na linha adesiva é relativamente alta. A adesão das resinas epoxi a outros materiais é muito boa, e quando solicitada, a ruptura se dá freqüentemente no aderente ou na interface aderente-adesivo.

A cura das resinas epoxi se desenvolve sem liberação de água ou outros subprodutos de condensação, isto é, contêm 100% de sólidos. Isto torna possível realizar ligações sem necessidade de pressão e ligar superfícies impermeáveis.

As tensões internas indroduzidas, devido a retração durante a cura, na linha adesiva, são relativamente inferiores em comparação com outros adesivos.

As resinas epoxi são insensíveis à ação d'água, resistentes a solventes, calor e energia elétrica.

Os adesivos epoxi têm uma gama diversificada de propriedades dependentes da:

- seleção da resina base e do catalisador;
- combinação com outras resinas;
- combinação com cargas.

Os adesivos à base de resinas "BIS-EPI" apresentam-se em forma líquida e sólida.

As resinas epoxi intermediárias antes de serem curadas são líquidas e têm cor de mel. A cura destas resinas para formação de adesivos, se dá mediante um catalisador ou um reativo endurecedor. A cura é exotérmica.

A mistura com aminas e com anídridos dá como resultado uma resistência melhor ao calor (A.38).

As resinas epoxi curadas não são nocivas à saúde, mas, as resinas sem curar e os endurecedores são reativos químicos. Por isso deve ser evitado o contato com a pele, principalmente do endurecedor. A escolha dos endurecedores deve ser um ato de responsabilidade.

Às vezes é necessário adicionar cargas aos adesivos epoxi para se obter uma ou várias das seguintes vantagens:

- diminuição do custo;
- redução dos efeitos de retração, na cura;
- diminuição do coeficiente de expansão térmica
- aumento da resistência ao calor.

Alguns adesivos epoxi mais comuns são apresentados a seguir:

- adesivos de alta temperatura;
- adesivos fenólicos-epoxi
- adesivos epoxi-novalac
- adesivos epoxi-nylon

Um adesivo que pode ser considerado para madeira é fabricado pela Ciba. A sua formulação é: resina araldite AW-108, 100 partes em peso e endurecedor HV-997 de 60 a 100 partes em peso. Aproveitando-se na mistura maior parcela do endurecedor, consegue-se a formação de um adesivo com maior resistência ao cisalhamento. Empregando por outro lado, menor parcela de endurecedor, obtêm-se melhores valores correspondentes à resistência térmica e à estabilidade sob os efeitos dos agentes químicos.

14.3 - APLICAÇÕES

A utilização dos adesivos epoxi é muito variada. São usados nas indústrias de aeroplanos, na união de lâminas de alumínio entre si, ou em outros metais. Também é usado na fabricação de tanques de fibras para combustível e para unir concreto.

Na realidade, são poucos os materiais que não podem ser ligados com estes adesivos.

15 - ADESIVOS DE ACETATO DE POLIVINILA (A.39)

As resinas de acetato de polivinila apresentam excelentes características adesivas.

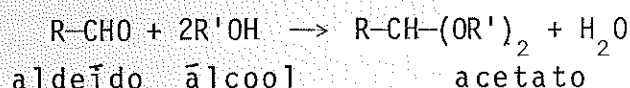
Elas são usadas nas ligações estruturais de metal, vidro e papel. A excelente adesão do butiral polivinila desenvolvida no vidro o torna intercapa quase universal para os vidros de seguran-

(A.39) LAVIN, E. & SNELGROVE, J.A. - Adesivos de acetal polivinílico. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives., 1962.

ça. Também são usados como recobridores.

15.1 - QUÍMICA DA RESINA

Os acetatos se formam pela reação de uma molécula de aldeído e duas moléculas de álcool:



Os acetatos de polivinila são preparados com aldeído e álcool polivinila. O álcool polivinila é preparado a partir da hidrólise do acetato de polivinila. Este, por sua vez, é preparado a partir da polimerização do monômero de acetato de vinila.

As películas de acetato de polivinila se caracterizam pela alta resistência aos hidrocarbonetos alifáticos, azeites minerais e vegetais e aos álcalis.

Como a condensação do álcool polivinila com os aldeídos é uma reação bastante conhecida, os produtos químicos e a literatura de patentes contêm muitos exemplos (A.40).

O desenvolvimento comercial se limita aos produtos de reação de formaldeído, acetato-aldeído e n-butirol-deído com álcool polivinilo.

15.2 - CARACTERÍSTICAS

As propriedades das resinas de acetato de polivinila dependem principalmente do tipo e da quantidade dos compostos presentes, como também dos pesos moleculares das resinas.

A resistência à tração varia de 4200 a 7700 N/cm², podendo aumentar com o peso molecular.

O peso específico varia entre 11 e 12 KN/m³.

Em geral, os butinol-polivinila são solúveis em álcool, éter de glicol e certas misturas de solventes polares e não polares. Os formol-polivinila, são solúveis em hidrocarbonetos clorina

(A.40) BLAIKIE, K.G. & SMALL, M.W.S. - Encyclopedia of chemical technology. New York, Interscience publishing, v.14, p. 716-723.

dos, dioxano e mistura de solventes polares e não polares.

Geralmente a viscosidade destes adesivos aumenta consideravelmente com o peso molecular.

Para melhorar a flexibilidade destes adesivos à baixa temperatura pode-se incorporar plastificantes.

O primeiro adesivo utilizado na união estrutural de metais foi aquele baseado na combinação de formol-polivinila-fenólico. Atualmente existem muitas variações deste adesivo em função das combinações do acetato de polivinila e resinas termofixas, geralmente fenólicas.

O conteúdo de sólidos varia de 5 até 15%.

Na aplicação deste tipo de adesivo é importante a limpeza do aderente.

A espessura da linha adesiva é de 3 a 10 milésimos de milímetros.

É necessária a aplicação de pressão para se conseguir uma cura perfeita.

A maioria dos adesivos precisa de uma temperatura apropriada para desenvolver a cura. Esta temperatura varia em torno de 138°C, durante 15 a 30 minutos.

15.3 - APLICAÇÕES

As aplicações dos adesivos à base de resina polivinila misturados com outros adesivos são as seguintes:

- Nos vidros de segurança a capa intermediária é confeccionada com estes adesivos (butinol-polivinila).

- Nos arames esmaltados é utilizado adesivo formol-polivinila. Estes adquirem excelentes propriedades dielétricas (A.41).

- As resinas acetato, formol e butinol polivinila, isoladas ou combinadas, resultam composições de superfícies muito eficientes. Como as pinturas de impregnação e os recobrimentos metálicos.

- Nos móveis de madeira. Também usados como seladores da madeira.

APÊNDICE B - CARACTERÍSTICAS DOS ADESIVOS E DOS ADERENTES

1 - PARÂMETROS DE SOLUBILIDADE

Quando o aderente é orgânico e não muito comum, é de interesse conhecer a sua solubilidade para selecionar o adesivo ideal.

Hildebrand (B.1) e outros utilizaram o conceito de solubilidade para demonstrar por que alguns materiais se misturam mais rapidamente que outros. Mencionam ainda que, quanto mais próximos os parâmetros de solubilidade dos adesivos e dos aderentes, maior será a sua afinidade e mais eficiente a ligação.

Na tabela B-1, estão indicados os parâmetros de solubilidade de alguns materiais.

Na tabela B-2, encontra-se o trabalho realizado por Reinhart e Callomon (B.2), indicando os tipos de adesivos que se adaptam melhor aos aderentes, em função dos parâmetros de solubilidade.

O tecnólogo obterá êxito numa ligação, atendendo algumas regras para a seleção do adesivo como:

- a) - Selecionar o adesivo de maneira a obter os parâmetros de solubilidade (adesivo-aderente) o mais próximo possível.
- b) - Evitar os polímeros cristalizáveis.
- c) - Escolher os adesivos mais rígidos em relação aos aderentes.

Quando se deseja fazer a ligação de dois materiais de solubilidade muito diferentes, deve-se misturar um adesivo de alta solubilidade com um adesivo de solubilidade moderada.

(B-1) HILDEBRAND, J. & SCOTT, R., L. - The solubility of nonelectrolytes. 3ed., New York, Reinhold publishing, 1950.

(B.2) REINHART, F., W. & CALLOMON, I., G. - Survey of adhesion and adhesives. Wadco technical report: 58-450, 1959.

TABELA B-1 - PARÂMETROS DE SOLUBILIDADE (B.3)		
MATERIAL	SOLUBILIDADE PARÂMETRICA δ	CRISTALINIDADE
Politetrafluoretileno	6.2	alta
Silicone, polidimetil	7.3	baixa-média
Borracha butílica	7.7	baixa
Polietileno	7.9	alta
Borracha natural	8.3-7.9	baixa
Butadieno-estireno	8.5-8.1	baixa
Poliisobutileno	8.0	baixa
Poliestireno	9.7-8.6	baixa
Polisulfeto de borracha	9.4-9.0	variável
Neopreno	9.2	baixa
Nitrilo-butadieno	9.5-9.4	baixa
Acetato de polivinila	9.4	baixa
Metacrilato polimetila	9.5-9.0	média
Cloreto de polivinila	9.7-9.5	baixa
Resinas amina	10.1-9.6	baixa
Epoxi	10.9-9.7	baixa
Etil celulose	10.3	baixa-média
Cloreto acetato de polivinila	10.4	alta
Tereftalato de poliglicol	10.7	média
Acetato de celulose	10.9	baixa-média
Nitrato de celulose	11.5-10.6	baixa
Fenólico	11.5	alta
Cloreto de polivinilideno	12.2	alta
Nylons	13.5-12.7	
Poliacrilonitrila	15.4	

TABELA B.2 - SELEÇÃO DOS PRINCIPAIS POLÍMEROS ADESIVOS CONFORME A NATUREZA DOS ADERENTES (B.4)

Adesivos	Couros	Papel cartão	Madeiras	Feltros	Tecidos	Plásticos vinílicos	Plásticos fenólicos	Borrachas	Telhas, etc.	Massas alvenárias	Vidro e cerâmica	Metais
Metais	1, 4, 21, 24, 25	1, 21, 22	1, 4, 11, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	1, 5, 22	1, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	13, 21, 22, 31, 32, 33, 35, 36	5, 6, 13, 22, 35	5, 6, 13, 32	13, 32, 33, 34, 35	11, 13, 31, 32, 33, 36
Vidro e cerâmica ...	1, 4, 13, 24	1, 21, 22	1, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	1, 5, 6, 21, 22	1, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 21, 31, 35, 36	21, 22, 31, 35, 36	4, 22		4, 13, 32, 35, 36	
Telhas, etc.	1, 4, 21, 24	1, 21, 22	1, 5, 6, 21, 22	5, 6, 21, 22, 24	5, 6, 21, 22, 24	25, 36	5, 13, 36	21, 22, 31, 35, 36	4, 5, 6, 22	5, 13		
Alvenárias massames	1, 21, 24	1, 21, 22	1, 5, 6, 21, 22	5, 6, 21, 22	5, 6, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 36	21, 22, 31, 35, 36	5, 6, 22			
Borrachas	21, 24	21, 22	21, 22, 33, 35, 36	21, 22	21, 22, 23	25, 36	21, 22, 36	21, 22, 31, 35, 36				
Plásticos fenólicos ...	21, 24, 25	21, 22	11, 13, 21, 24, 32, 33, 36	21, 22, 25, 36	21, 22, 24, 25	36	13, 32, 33, 36					
Plásticos vinílicos ...	21	21	21	21	21	25, 36						
Tecidos e panos	21, 22, 23, 24	21, 22, 23	21, 22, 23	5, 21, 22, 23	1, 21, 22, 23							
Feltros	21, 22, 23, 24	21, 22, 23	21, 22, 23	5, 22								
Madeiras	21, 22, 23, 24	2, 21, 22	1, 11, 12, 14, 15, 36									
Papel e cartões	21, 22, 23, 24	2, 4, 21										
Couros	1, 4, 21, 22, 23, 24											

Termoplásticos:	Termoendurecíveis:	Elastômeros:	Mistura de resinas (duplo polímero):
(1) Acetato de polivinilo	(11) Fenólicos	(21) Borracha natural	(31) Fenólica-vinilica
(2) Alcool polivinílico	(12) Resorcinol; fenol-resorcinol	(22) Borracha clorada (reclaim)	(32) Fenólica-butiral de polivinilo
(3) Acrílicos	(13) Epoxilicos (epoxy)	(23) Estireno-butadieno (SBR)	(33) Fenólica-formal de polivinilo
(4) Nitrocelulose	(14) Ureia-formaldeído	(24) Policloropreno (Neopreno)	(34) Fenólica-poliâmida
(5) Asfaltos	(15) Melamina; ureia-melamina	(25) Buna-N	(35) Fenólica-neopreno
(6) Oleorresinosos	(16) Alquídicos	(26) Silícões	(36) Fenólica-butadieno-nitrilo

(B.4) - Op. cit.

2 - EXTENSÃO

Quando a superfície do aderente está livre de contaminação e o adesivo tem uma viscosidade baixa, colocando-se uma gota de adesivo na superfície do aderente, esta formará um ângulo θ com a superfície do aderente. Quando a gota se estende formando uma película fina, tornando impossível a medição do ângulo de contato, este será considerado nulo. O adesivo tendo se estendido desta maneira, umidificou o aderente encontrando-se em íntimo contato e formando uma ligação adesiva resistente. Se a gota não se estende sobre a superfície lisa e polida, formando um ângulo nítido de contato, o adesivo tem pouca afinidade pelo aderente e formará uma ligação pouco resistente. (ver figura 1.B).

O ângulo de contato pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} = \frac{A}{\gamma_{LV}}$$

sendo:

$A = \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$ = tensão de adesão

γ_{SV} = tensão superficial do aderente

γ_{SL} = tensão interfacial adesivo-aderente

γ_{LV} = tensão superficial do adesivo

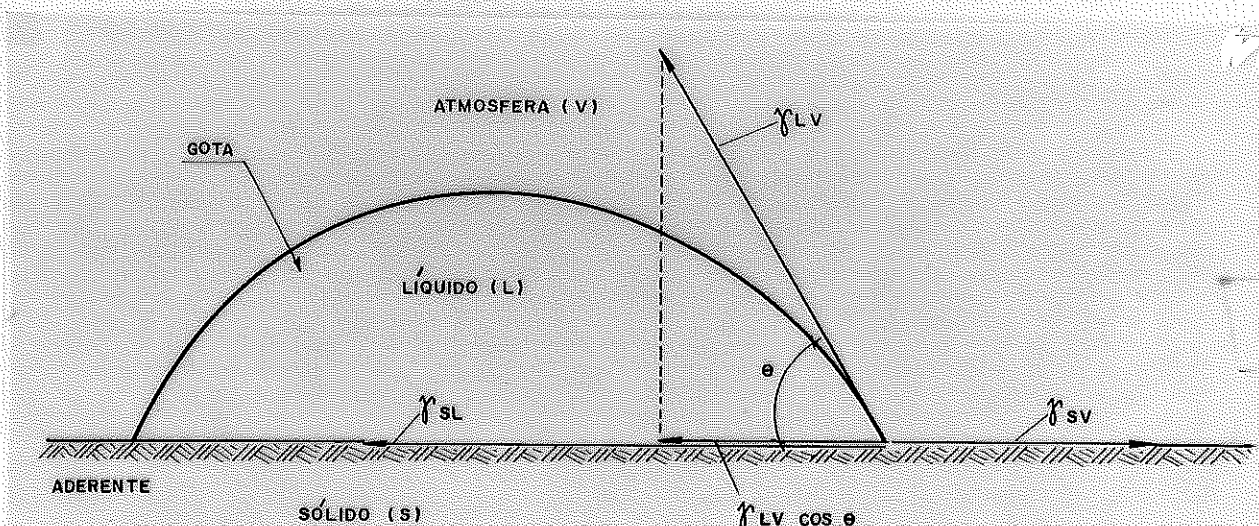


FIG. 1.B - EQUÍBRIO DE FORÇAS EM TORNO DO ÂNGULO DE CONTATO

3 - RUGOSIDADE

A maioria das superfícies aderentes é apreciavelmente rugosa, com saliências e poros. Às vezes, entretanto, utilizam-se banhos de ácidos ou abrasão mecânica das superfícies com o objetivo de aumentar a rugosidade, aumentando também a área colada.

Quando se coloca uma gota de adesivo numa superfície rugosa, sem retirar o ar existente entre as rugosidades da superfície, a gota não se espalhará como se fosse em um aderente liso. Assim, formam-se pontes sobre as bolsas de ar e, em consequência, o adesivo não atinge o aderente e a ligação terá menor resistência, figura 2.B.

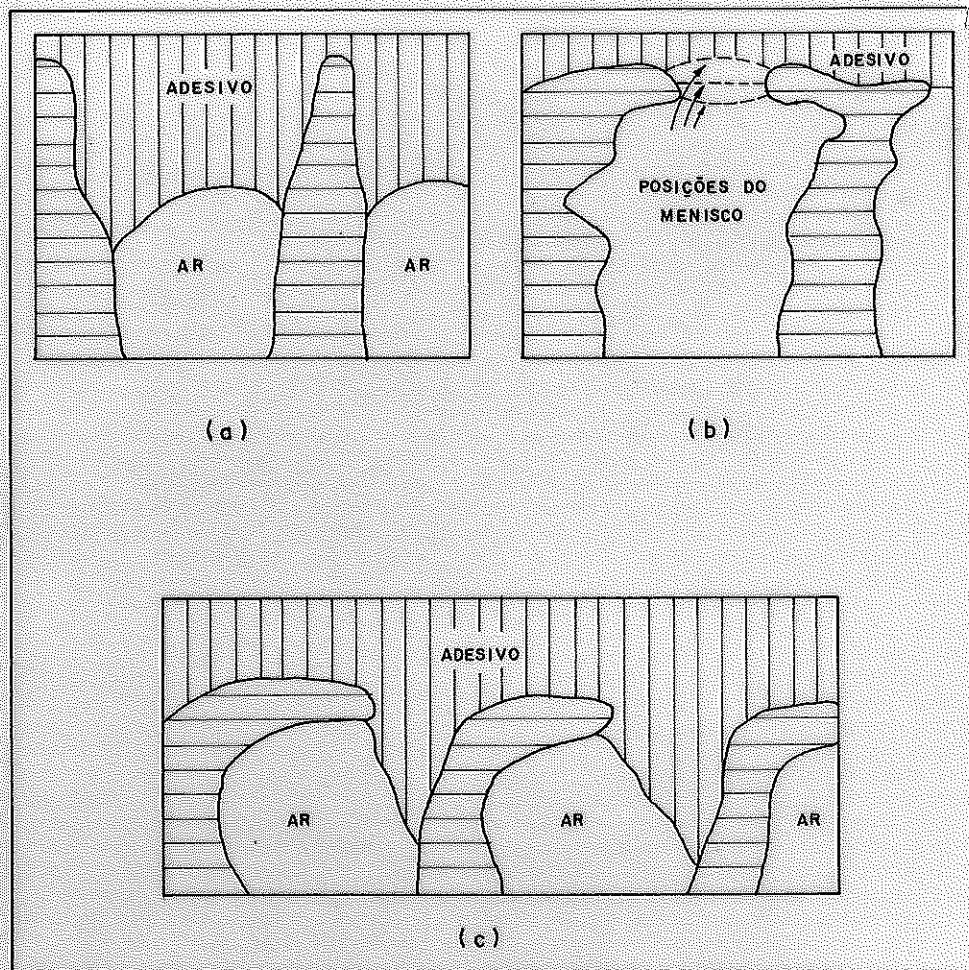


FIG.2.B- PONTES DE ADESIVO SOBRE AS BOLSAS DE AR

A quantidade de ar retido pode ser calculada através da equação:

$$\cos(\theta_a) = S_1 \cdot \cos(\theta_s) - S_2$$

sendo:

- θ_a = ângulo de contato sobre a superfície rugosa
 θ_s = ângulo de contato em uma superfície lisa do mesmo material
 S_1 = fração da superfície do aderente coberta por ar
 S_2 = fração da superfície útil do aderente

Vários fatores podem influenciar na quantidade de ar que ficará retido sob uma gota de adesivo numa superfície rugosa. Caso o adesivo tenha forte afinidade pelo aderente, viscosidade baixa e os poros se estreitem conforme se aprofundem, então não existirá a preciosa quantidade de ar retido e a ligação será relativamente resistente, figura 2.B-a. Ao contrário, o adesivo que não tenha afinidade pelo aderente, não sendo bastante viscoso cure ou seque rapidamente, poderá reter apreciáveis quantidades de ar qualquer que seja o acabamento do aderente, prejudicando a ligação, figura 2.B-b. Ainda na situação em que o adesivo é muito viscoso, pode-se observar a existência de excessiva penetração nos poros do aderente, deixando a zona de ligação com escassez de adesivo, prejudicando a ligação.

Nem sempre é desejável superfícies lisas, podendo se notar que nas ligações solicitadas a esforços de cisalhamento, são convenientes superfícies relativamente rugosas, pois existe mais área de contato, além de existir atrito entre as saliências das superfícies.

4 - POROSIDADE

Como foi mencionado anteriormente, quando o aderente tem poros abertos e são molhados por um adesivo, este poderá fluir através deles (penetração). A pressão do fluido depende da viscosidade do adesivo e do diâmetro dos poros.

Segundo a lei de Poiseuille, a profundidade de penetração é dada pela equação:

$$p_p = \sqrt{\frac{\sigma_a \cdot r \cdot t}{2 \cdot n}}$$

sendo:

- σ_a = tensão de adesão
- r = raio médio dos poros
- t = tempo de fluxo
- n = viscosidade do material
- p_p = profundidade de penetração

Outro fator que influencia na penetração é o formato do poro. Segundo DeBruyne (B.5), a influência na penetração é dada pelo ângulo de declividade da parede do poro θ . Quando o ângulo de contato do adesivo, θ , mais o ângulo de inclinação da parede é menor que 180° , tende a ocorrer certa penetração no poro, figura 3.B-a e c. Quando a soma é maior que 180° , a pressão do adesivo será negativa e não penetrará no poro, exceto se for forçada por uma pressão externa, figura 3.B-b.

Na figura 3.B, são mostrados os efeitos da forma do poro e as pressões capilares. As setas indicam a direção da tendência do fluxo do adesivo.

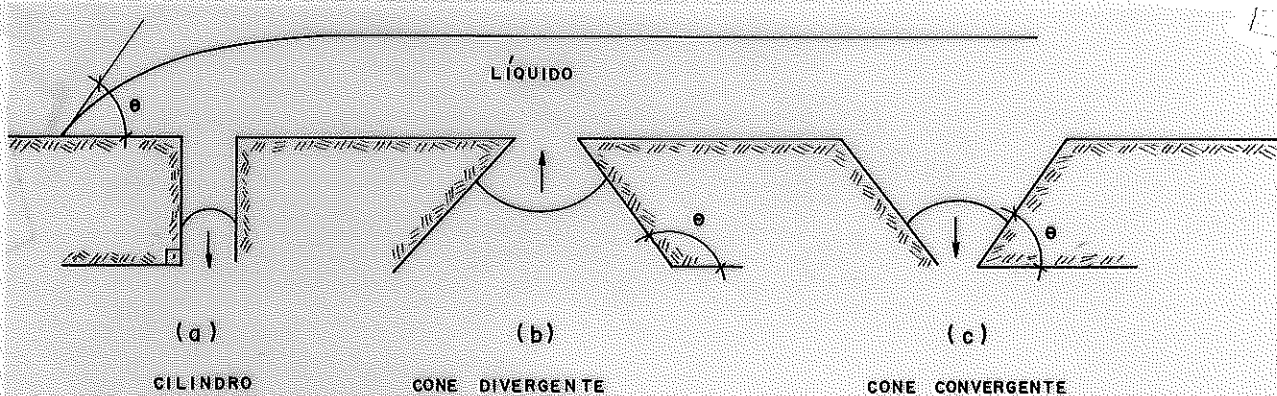


FIG. 3.B - FORMATO DOS POROS E PRESSÃO CAPILAR

Assim, a profundidade de penetração de um adesivo no poro e a quantidade de ar retido dependerão da sua forma, da tensão de adesão, da viscosidade ou consistência do adesivo, do tamanho do poro e do tempo de cura.

(B.5) DEBRUYNE, N., A. - The extent of contact between glue and adherend. Duxford, aero research, Dec. 1956 (Aero research technical notes, Bull. 168)

5 - DIFUSÃO

Um sólido em contato com as moléculas de um líquido as absorverá até atingir a saturação quando não existirá mais absorção, a não ser que haja mudança nas condições externas ou aplicação de um gradiente que force as moléculas absorvidas a migrarem para fora do sólido.

Os processos de difusão são de considerável importância nas ligações adesivas. Entretanto, se há cuidado na escolha dos solventes para se obter uma boa difusão do adesivo no aderente, obter-se-á uma ligação bastante resistente.

6 - DEFORMAÇÃO E FLUXO - REOLOGIA

É necessário que o adesivo flua ou deforme, com o objetivo de penetrar nos poros do aderente, deslocar o ar e chegar a um íntimo contato com a superfície do aderente. Quando o aderente é poroso, o adesivo não deve fluir através dos poros a ponto da junta ficar empobrecida. Também é evidente que a consistência do adesivo deve ser suficiente para poder se esparramar no aderente, com a espessura desejada.

Três características influem na capacidade do adesivo fluir: viscosidade, plasticidade e elasticidade.

Um líquido viscoso fluirá a uma velocidade muito baixa sob uma carga muito pequena, não recuperando sua forma original. Os adesivos não têm características newtonianas (B.6).

Um sólido plástico não fluirá ou se deformará apreciavelmente a menos que a carga aplicada exceda um certo valor (B.7).

Um material elástico deformar-se-á quando carregado e recuperará sua forma original quando descarregado. O módulo de elasticidade de um material é proporcional à tensão, devido ao carregamento e à deformação correspondente. Por exemplo, uma barra de aço e um pedaço de borracha são basicamente materiais elásticos, mas o módulo de elasticidade do aço é um milhão de vezes maior, do que o módulo de elasticidade da borracha. Um módulo de elasticidade alto

(B.6) EIRICH, F., R. - Rheology theory and application. New York, Academic. press., 1956-1959. v.1-3.

(B.7) HOEKSTRA, J., & FRITZIUS, C., W. - Rheology of adhesives: in adhesion and adhesives. New York, Elsevier publ., 1951.

indica que as moléculas, cristais ou outras estruturas absorvem bastante energia quando se deformam ligeiramente. Um módulo de elasticidade baixo indica que a energia absorvida durante a deformação é pequena.

O adesivo (visco-elástico) caracteriza-se por uma elasticidade "retardada". Enquanto os sólidos de Hooke deformam-se imediatamente e proporcional a tensão, os visco-elásticos, para atingir sua deformação elástica final podem demorar minutos e até horas.

Para estes materiais, inicialmente é rápida a velocidade de deformação sujeita a uma carga constante, diminuindo até ter-se completado a deformação elástica. A deformação posterior é puramente viscosa a velocidade proporcional à tensão de cisalhamento.

A figura 4.B ilustra a diferença entre os materiais viscosos e visco-elásticos (B.8). Quando uma carga é aplicada instantaneamente, num tempo (a), o material elástico, I, deforma-se imediatamente e permanecerá constante. Quando se descarrega em um tempo (b), retorna ao seu estado original. O líquido viscoso, III, deforma-se a velocidade constante até ser descarregado, permanecendo deformado. O material visco-elástico experimenta uma deformação inicial, embora a deformação elástica (c) não seja instantânea, seguida de um fluxo viscoso (e) até a remoção do carregamento. Em seguida recuperará a deformação elástica (d) = (c), permanecendo deformado.

Os polímeros, em concentrações razoáveis, são visco-elásticos

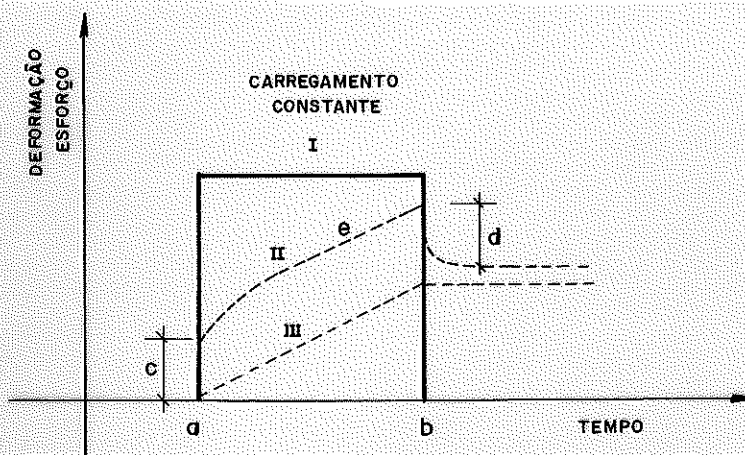


FIG. 4.B- EFEITOS DO ESFORÇO EM FUNÇÃO DE TEMPO

- I. SÓLIDO HOOKEANO
- II. VISCO-ELÁSTICO
- III. LÍQUIDO-VISCOSO

7 - ESPESSURA

Para se conseguir o máximo de resistência e rigidez em uma ligação adesiva, a linha adesiva deve ser tão delgada quanto possível, sem chegar a faltar adesivo para a adesão. Para prevenir esta insuficiência, a quantidade de adesivo deve preencher todas as ondulações e rugosidades da superfície do aderente, levando-se em conta o volume de retração do adesivo e a perda por difusão. As razões que demonstram a conveniência das películas delgadas são: (B.9)

a) - necessidade de uma força maior para deformar uma película delgada;

b) - a probabilidade do adesivo fluir ou cristalizar-se cresce com a espessura;

c) - as tensões internas nas interfaces do adesivo e as tensões térmicas devido às diferenças de deformação são razoavelmente proporcionais à espessura da película;

d) - se o adesivo é rígido, uma película delgada é mais resistente contra o fissuramento quando a ligação é solicitada;

e) - quanto maior o volume do adesivo de uma ligação adesiva, maior é a probabilidade do aparecimento de bolhas de ar, partículas sólidas ou algumas outras fontes de enfraquecimento.

8 - PRESSÃO

A aplicação de pressão em uma ligação adesiva, antes da cura, produz enchimento dos poros e deslocamento do ar da interface do aderente. Esta pressão é necessária para obter uma linha adesiva fina, a menos que o adesivo apresente cura muito rápida, não dando tempo para fluir o excesso de adesivo. Para a linha adesiva não ficar fina demais, deve-se considerar o seguinte:

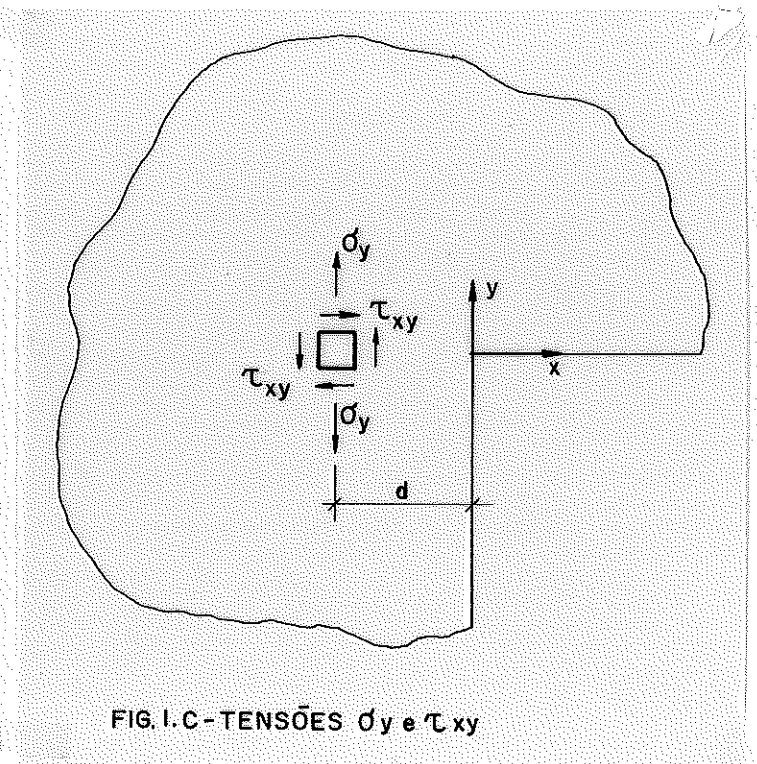
a) - pode se agregar material para enchimento (carga) dando maior espessura ao filme de adesivo, impedindo a sua fuga e reduzindo o custo;

b) - pode-se variar a formulação do adesivo tendo em vista proporcionar maior rendimento;

c) - pode-se aplicar o adesivo em ambas as superfícies do aderente permitindo que o adesivo seja parcialmente curado antes da aplicação da pressão.

 APÊNDICE C - DEFINIÇÃO DOS FATORES K_A E K_B

Em uma análise elástica do resultado do ensaio de um corpo de prova, com o carregamento paralelo às fibras, as tensões próximas da origem da linha adesiva são definidas em função do produto $K_A \cdot f_A(\theta)$ e $K_B \cdot f_B(\theta)$. Os campos dos fatores K_A e K_B são definidos assim: (C.1)



sendo:

$$\sigma_y = K_A \cdot (2 \cdot \pi \cdot d)^{-0.4502}$$

$$\tau_{xy} = K_B \cdot (2 \cdot \pi \cdot d)^{-0.1028}$$

O cálculo de K_A e K_B foi feito através de uma análise de resistência do problema. Os resultados da tabela 1-c foram determinados a partir de uma análise elástica linear, em duas dimensões, usando a técnica dos elementos finitos (C.2)

(C.1) WALSH, P., F. - Stress intensity factors by a calibrated finite element method. Eng. Mech. J., Dec. 1972.

(C.2) - Op. cit.

TABELA 1-C - VALORES DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO

$\frac{2 \cdot c}{b}$	$\frac{2 \cdot L}{b}$	$K_A = \alpha \cdot \sigma_{nom} \cdot (b/2)^{0.4502}$ $K_B = \beta \cdot \sigma_{nom} \cdot (b/2)^{0.1028}$	
		α	β
0.5	2	0.214	0.023
	4	0.126	0.016
	6	0.102	0.015
	8	0.080	0.014
1.0	2	0.194	0.026
	4	0.148	0.013
	6	0.125	0.013
	8	0.104	0.013
2.0	2	0.183	0.028
	4	0.144	0.014
	6	0.130	0.012
	8	0.124	0.011

sendo:

- L = comprimento da linha adesiva
- b = espessura da peça principal
- c = espessura da peça cobrejunta

APÊNDICE D - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NORMAIS À LINHA ADESIVA

Na literatura nacional e internacional, tem-se pouco ou quase nada sobre a determinação da distribuição de tensões normais na linha adesiva durante a ruptura.

A distribuição destas tensões, conforme a verificação experimental, tem forma triangular na zona comprimida e parabólica na zona tracionada, figura 1.D. A tensão de compressão normal às fibras é maior que a tensão de tração normal às fibras.

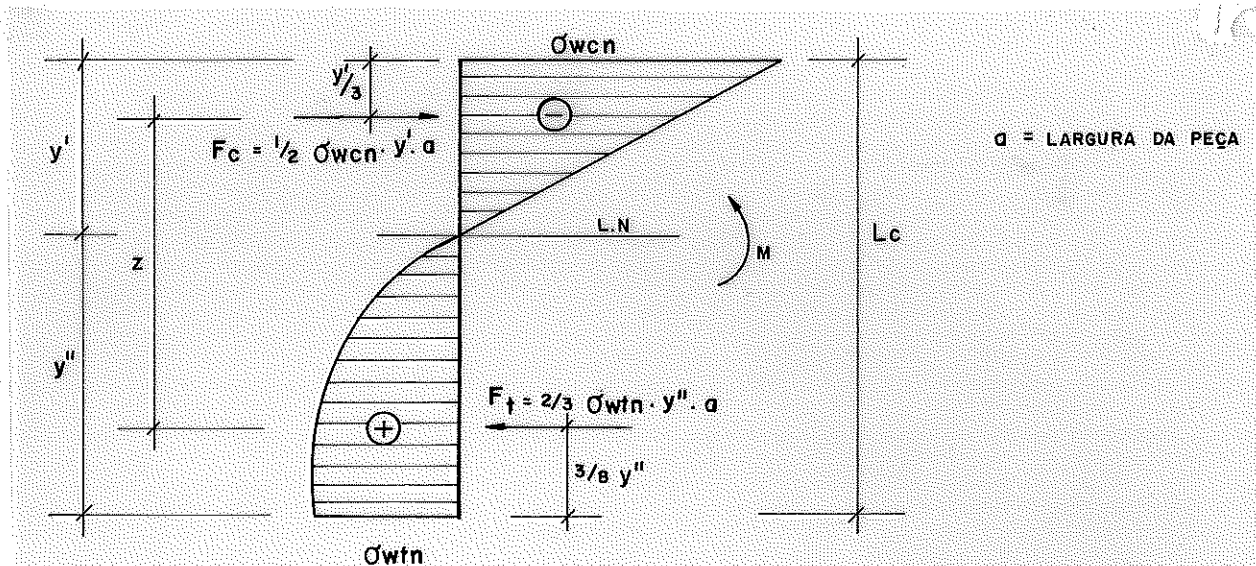


FIG.1.D - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

Fazendo o equilíbrio de forças, tem-se:

$$\sum F_h = 0 \quad \Rightarrow \quad F_c = F_t$$

$$1/2 \cdot \sigma_{wcn} \cdot y' \cdot a = 2/3 \cdot \sigma_{wt_n} \cdot y'' \cdot a \quad \dots \dots \dots (D.1)$$

$$\sum M_{L.N.} = 0 \Rightarrow M = F_c \cdot (y' - y'/3) + F_t \cdot (y'' - 3/8 \cdot y'') \dots (D.2)$$

$$L_c = y' + y''$$

Assim, a partir das equações D.1 e D.3, tem-se:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{wcn} &= \frac{4}{3} \cdot \sigma_{wtn} \cdot \frac{y'}{y''} \\ y' &= L_c - y'' \end{aligned} \right\} \Rightarrow y'' = \frac{L_c}{\left(\frac{4}{3} \frac{\sigma_{wtn}}{\sigma_{wcn}} + 1 \right)}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{wtn} &= \frac{3}{4} \cdot \sigma_{wcn} \cdot \frac{y'}{y''} \\ y' &= L_c - y' \end{aligned} \right\} \Rightarrow y' = \frac{L_c}{\left(\frac{3}{4} \frac{\sigma_{wcn}}{\sigma_{wtn}} + 1 \right)}$$

$$z = 2/3 \cdot y' + 5/8 \cdot y''$$

APÊNDICE E - ANÁLISE ESTATÍSTICA

1 - ELEMENTOS ESTATÍSTICOS

Neste item serão abordadas apenas algumas definições mais importantes. Para maiores detalhes é aconselhável ver (E.1), (E.2) e (E.3).

1.1 - HISTOGRAMA

É uma representação gráfica da distribuição de frequência. Consiste em um conjunto de retângulos, figura 1.E.

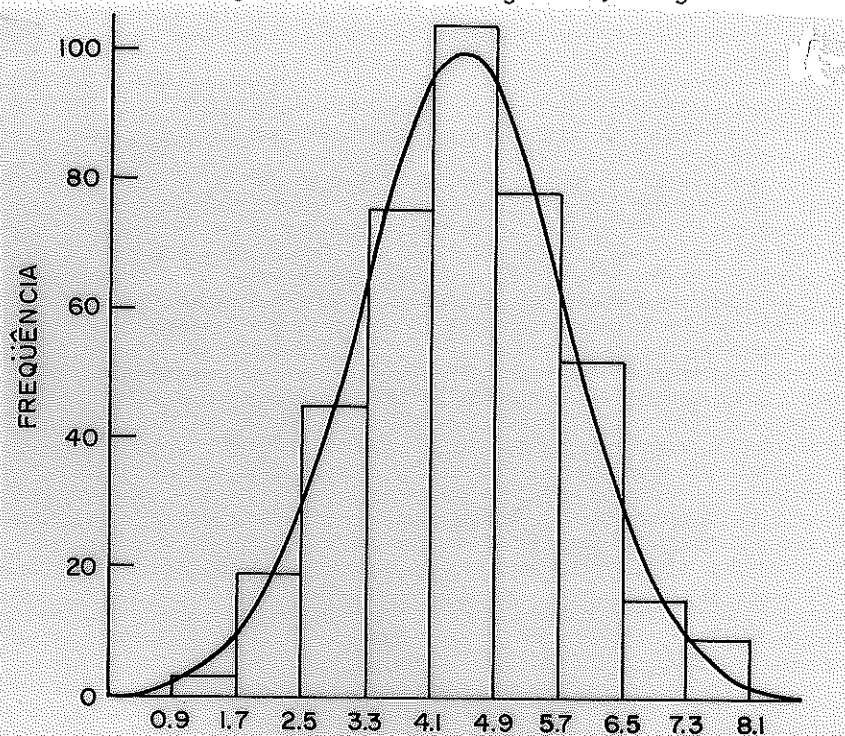


FIG. 1.E - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO HISTOGRAMA

(E.1) BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. - Statistics for experimenters. New York, John Wiley & Sons, 1978.

(E.2) SNEDECOR, G.W. - Statistical methods. Ames, Iowa, State University, 1962

(E.3) DRAPER, N.R. & SMITH, H. - Applied regression analysis. New York, John Wiley & Sons, 1966.

1.2 - MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

São as que visam determinar o centro de uma distribuição. Vários tipos de medidas podem ser definidos. Os mais comuns são: a média aritmética, a mediana, a moda, os quantis, etc.

a) - Média aritmética .- É definida como a soma de todos os valores da variável considerada, dividida pelo número total de dados.

b) - Mediana .- A mediana de um conjunto de números ordenados é a média aritmética dos valores centrais.

c) - Moda .- É o valor da variável correspondente à frequência máxima.

d) - Quantis .- São os valores da variável que dividem o conjunto ordenado em partes iguais.

e) - Decis .- São os valores que dividem o conjunto ordenado dos valores da variável em 10 partes iguais.

f) - Percentis .- São os valores da variável que dividem o conjunto ordenado em 100 partes iguais.

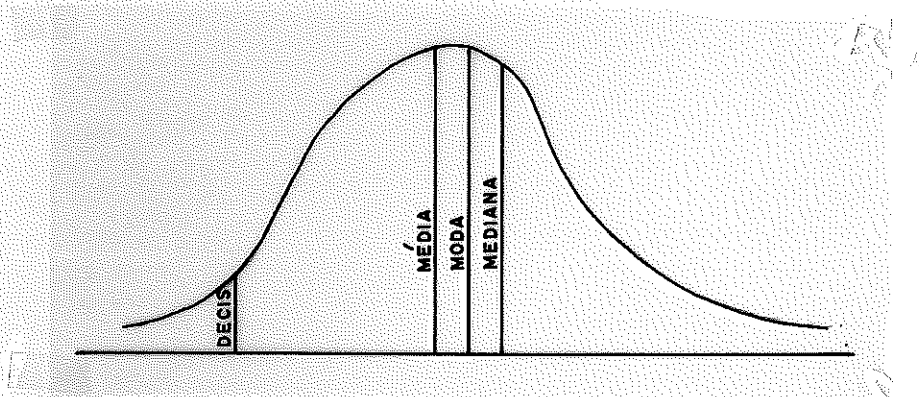


FIG.2.E - MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

1.3 - MEDIDAS DE VARIABILIDADE OU DE DISPERSÃO

As medidas de variabilidade ou de dispersão mais utilizadas são: a amplitude, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A amplitude é a diferença entre a maior e a menor observação.

A variança, como medida de dispersão, apresenta a desvantagem de possuir dimensão diferente dos dados iniciais. Assim, a variança da resistência será dada em MPa^2 . Esta desvantagem pode ser eliminada com uma medida de dispersão da mesma dimensão que os dados, o desvio padrão igual à raiz quadrada da variança, figura 3.E, ou com uma medida adimensional, o coeficiente de variação, quociente entre o desvio padrão e a média.

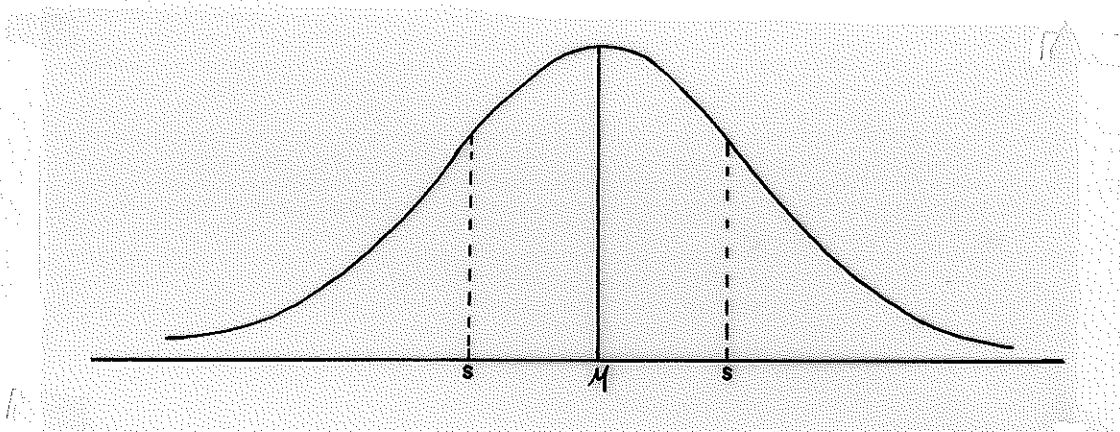


FIG. 3.E - DESVIO PADRÃO COMO MEDIDA DE DISPERSÃO

1.4 - ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

1.4.1 - ESTIMATIVA DA MÉDIA

A estimativa da média de uma população normal (μ) pode ser dada por:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

sendo:

x_i = dados, de $i=1$ até n

n = número de dados

1.4.2 - ESTIMATIVA DA VARIANÇA E DO DESVIO PADRÃO

A estimativa da variância da população (σ^2) pode ser dada por:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

A estimativa do desvio padrão da população (σ) será a raiz quadrada da estimativa da variância, isto é:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

1.5 - INTERVALOS DE CONFIANÇA

A probabilidade dos parâmetros estatísticos da população se encontrar em um intervalo, é definido pelo nível de significância.

1.5.1 - INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA DA POPULAÇÃO (μ)

$$\bar{X} - t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-1\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-1\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

sendo:

$t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-1\right)}$ = valor crítico de t de "student", com nível de significância α e grau de liberdade $n-1$

1.5.2 - INTERVALO DE CONFIANÇA DA VARIANÇA (σ^2)

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{b} < \sigma^2 < \frac{(n-1) \cdot s^2}{a}$$

sendo:

a e b = limite superior e inferior, para probabilidades iguais, na distribuição Qui-quadrado, figura 4.E.

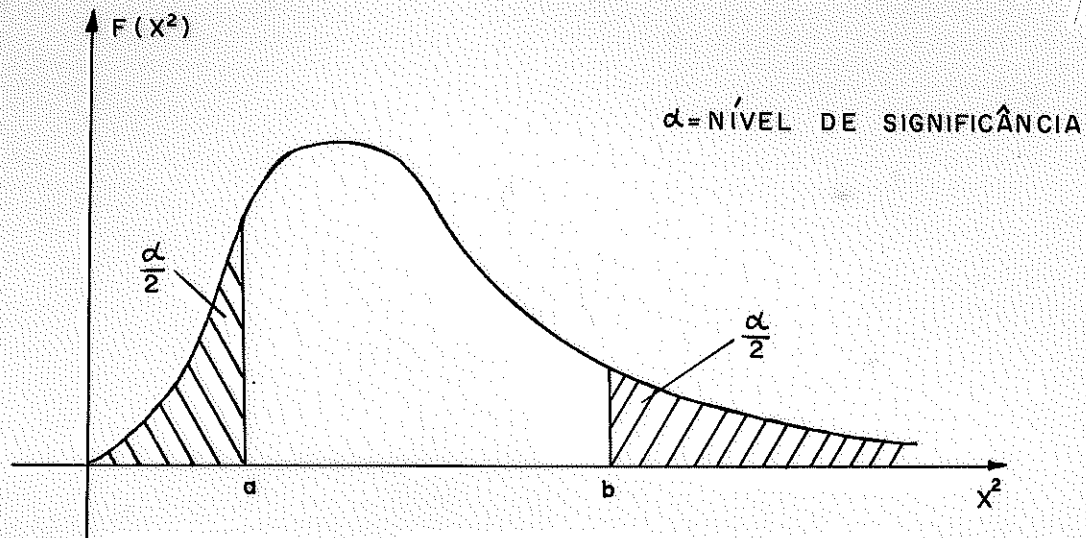


FIG. 4.E-DISTRIBUIÇÃO χ^2 (QUI-QUADRADO)

2 - COMPARAÇÃO DE SÉRIES DE DADOS

Para definir as diferenças entre grupos de dados, existem recursos estatísticos, dos quais os mais importantes são:

2.1 - COMPARAÇÃO DE PARES DE INDIVÍDUOS (E.4, E.5 e E.6)

Deseja-se comparar duas séries de dados X e Y com n valores:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$$

Para cada par de valores a diferença será:

$$d_i = x_i - y_i$$

[E.4] BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. - Op. cit.

[E.5] SNEDECOR, G.W. - Op. cit.

[E.6] LEME, R.A. - Estatística matemática. São Paulo, Escola politécnica-USP., 1959. v.II.

A média e a variância da diferença d_i , dos n valores, será:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad ; \quad s^2(\bar{d}_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}$$

O desvio padrão da estimativa de (d) , com $n-1$ graus de liberdade será:

$$s(\bar{d}) = \frac{s(d_i)}{\sqrt{n}}$$

assim

$$t = \frac{(\bar{d} - \mu_d)}{s(\bar{d})}$$

Existe uma distribuição de t de student com $n-1$ graus de liberdade, a qual pode ser utilizada para verificar a hipótese nula da diferença $H_0: \mu_d = 0$, ou para determinar o intervalo de confiança da média da diferença das populações (μ_d).

2.1.1 - TESTE DE SIGNIFICÂNCIA

O procedimento para testar a hipótese da média da diferença ser nula, isto é, para testar a hipótese $H_0: \mu_d = 0$ contra a hipótese alternativa $H_1: \mu_d \neq 0$, baseia-se na relação:

$$t = \frac{\bar{d}}{s(\bar{d})}$$

Escolhendo o nível de significância desejado (α) obtém-se mediante a distribuição de t de student, o valor crítico de t , t_0 .

Caso:

$$\left| \frac{\bar{d}}{s(\bar{d})} \right| \leq t_0$$

aceita-se a hipótese H_0 e conclui-se com risco α , que as médias não são diferentes. A região crítica ocorre quando:

$$\frac{\bar{d}}{s(\bar{d})} > t_0$$

Caso:

$$\left| \frac{\bar{d}}{s(\bar{d})} \right| > t_0$$

rejeita-se a hipótese nula da diferença, obtando-se pela hipótese alternativa H_1 . Assim pode-se concluir com significância α , pela diferença significativa das médias.

2.1.2 - INTERVALO DE CONFIANÇA

O intervalo de confiança com nível de significância α , é dado por:

$$\bar{d} - t_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)} \cdot s(\bar{d}) \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)} \cdot s(\bar{d})$$

Se o intervalo contém o zero, a diferença das médias pode ser nula, isto é:

$$\frac{\bar{d}}{s(\bar{d})} \leq t_{0,5} \quad \dots\dots\dots \text{a hipótese nula é significante}$$

$$\frac{\bar{d}}{s(\bar{d})} \leq t_{0,1} \quad \dots\dots\dots \text{a hip. nula é altamente signif.}$$

Se o intervalo não contém o zero, a diferença das médias não pode ser considerada nula, isto é:

$$\frac{\bar{d}}{s(\bar{d})} > t_{0,5} \quad \dots\dots\dots \text{a hipótese nula é rejeitada}$$

2.2 - COMPARAÇÃO DE GRUPOS DE INDIVÍDUOS

Dados X e Y, com n valores, determina-se:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad ; \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad ; \quad s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n-1}$$

$$\sum_{i=1}^n z_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2$$

$$s_z^2 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2}{n \cdot (n-1)} \quad e \quad s_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n z_i^2}{n \cdot (n-1)}}$$

$$s_{\bar{z}} = \frac{s_z}{\sqrt{n}}$$

$$s_{(\bar{X}-\bar{Y})} = \sqrt{2} \cdot s_{\bar{z}} = \frac{\sqrt{2} \cdot s_z}{\sqrt{n}}$$

finalmente:

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_{(\bar{X}-\bar{Y})}}$$

2.2.1 - TESTE DE SIGNIFICÂNCIA

Analogamente ao item 2.1.1 definem-se as hipóteses, o nível de significância e verificam-se as hipóteses de nulidade. Sendo válidas todas as considerações e conclusões anteriores.

2.2.2 - INTERVALO DE CONFIANÇA

O intervalo de confiança com nível de significância α , é dado por:

$$(\bar{X}-\bar{Y}) - t_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)} \cdot s_{(\bar{X}-\bar{Y})} \leq \mu_1 - \mu_2 \leq (\bar{X}-\bar{Y}) + t_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)} \cdot s_{(\bar{X}-\bar{Y})}$$

São válidas as mesmas considerações e conclusões do item

2.1.2.

3 - REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

3.1 - MONTAGEM DO MODELO (E.7, E.8 e E.9)

Para estabelecer o modelo de regressão linear múltipla , foi pressuposto as seguintes hipóteses;

- a) - a variável dependente é função linear das variáveis independentes;
- b) - os valores das variáveis independentes são fixos;
- c) - a média dos erros é nula, isto é $E(e_i) = 0$;
- d) - os erros são homocedásticos, isto é, a variância do erro, $E(e_i^2)$ é sempre igual;
- e) - os erros são independentes, isto é, $E(e_i, e_j) = 0$ para $i \neq j$;
- f) - os erros têm distribuição normal. Condição necessária para se realizar testes de hipóteses.

Tem-se uma regressão linear múltipla quando se admite a variável dependente (Y) ser função linear de duas ou mais variáveis independentes (X_1, X_2, \dots, X_k). O modelo estatístico de uma regressão linear múltipla com k variáveis independentes é:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 \cdot X_{1i} + \beta_2 \cdot X_{2i} + \dots + \beta_k \cdot X_{ki} + e_i$$

Onde a variável e_i , denominada erro, representa as variações medidas ou o efeito de outras variáveis omitidas no modelo.

Utilizando a notação matricial o modelo fica:

$$\{Y\} = \{X\} \cdot \{\beta\} + \{e\}$$

(E.7) DRAPER, N.R. & SMITH, H. - Op. cit.

(E.8) FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A.; TOLEDO, G.L. - Estatística aplicada. São Paulo, Atlas, 1978.

(E.9) HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. - Análise de regressão. São Paulo, Hucítec, EDSP, 1977.

sendo:

$$\{Y\} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad \{X\} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}$$
$$\{\beta\} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \{e\} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_n \end{bmatrix}$$

A partir de uma amostra de n observações das variáveis Y, X₁, X₂, X₃, , X_k deve-se obter as estimativas a, b₁, b₂, b₃, , b_k dos parâmetros α, β₁, β₂, β₃, , β_k, respectivamente. Assim, obtêm-se a estimativa dos valores de Y, observados.

$$\hat{Y} = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + \dots + b_k \cdot X_k$$

O método dos mínimos quadrados consiste em adotar como estimativas dos parâmetros os valores que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos, sendo:

$$e_i = (Y_i - \hat{Y}_i) \dots \dots \text{resíduo}$$

A função que deve ser minimizada é:

$$M = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Desenvolvendo têm-se:

$$M = (Y_i - a - b_1 \cdot X_{1i} - b_2 \cdot X_{2i} - \dots - b_k \cdot X_{ki})^2$$

Assim:

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 0 ; \frac{\partial M}{\partial b_1} = 0 ; \frac{\partial M}{\partial b_2} = 0 ; \dots ; \frac{\partial M}{\partial b_k} = 0$$

Estas derivadas parciais formam um sistema de equações normais. Utilizando notação matricial e algumas transformações, tem-se:

$$\{X'\} \cdot \{X\} \cdot \{b\} = \{X'\} \cdot \{Y\}$$

se $\{X'\}$ é uma matriz não singular, existe a matriz inversa $\{X' \cdot X\}^{-1}$, dada por:

$$\{b\} = \{X' \cdot X\}^{-1} \cdot \{X'\} \cdot \{Y\}$$

sendo:

$$\{X' \cdot Y\} = \begin{bmatrix} \Sigma Y_i \\ \Sigma X_{1i} \cdot Y_i \\ \Sigma X_{2i} \cdot Y_i \\ \vdots \\ \Sigma X_{ki} \cdot Y_i \end{bmatrix} \quad \{b\} = \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_i \end{bmatrix}$$

$$\{X' \cdot X\} = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_{1i} & \Sigma X_{2i} & \dots & \Sigma X_{ki} \\ \Sigma X_{1i} & \Sigma X_{1i}^2 & \Sigma X_{1i} \cdot X_{2i} & \dots & \Sigma X_{1i} \cdot X_{ki} \\ \Sigma X_{2i} & \Sigma X_{1i} \cdot X_{2i} & \Sigma X_{2i}^2 & \dots & \Sigma X_{2i} \cdot X_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \Sigma X_{ki} & \Sigma X_{1i} \cdot X_{ki} & \Sigma X_{2i} \cdot X_{ki} & \dots & \Sigma X_{ki}^2 \end{bmatrix} \quad i=1 \text{ até } n$$

3.2 - ANÁLISE DE VARIANÇA

A finalidade da análise de variância é estabelecer relações de "causa" e "efeito" (E.10), (E.11) e (E.12).

Através da análise de variância é possível testar uma série de hipóteses e observar alguns indicadores a respeito do comportamento do modelo matemático.

A soma dos quadrados total mostra a variação dos valores da variável dependente em torno de sua média, pode ser dividida em duas partes; uma explicada pela regressão (incluindo as variáveis consideradas) e a outra pelas variáveis aleatórias não consideradas no modelo, isto é, a soma dos quadrados dos resíduos mais a soma dos quadrados da regressão.

$$S.Q. \text{ total} = S.Q. \text{ res.} + S.Q. \text{ reg.}$$

A relação entre a soma dos quadrados da regressão e a soma dos quadrados total indica a variação da variável dependente explicada pela relação; este valor é denominado: coeficiente de determinação múltipla, R^2 .

$$R^2 = \frac{S.Q. \text{ reg.}}{S.Q. \text{ total}} \quad 0 < R^2 \leq 1$$

Analogamente, o grau de liberdade total pode ser dividido em graus de liberdade da regressão e dos resíduos.

$$G.L. \text{ total} = G.L. \text{ res.} + G.L. \text{ reg.}$$

Regressão $k = p-1$

Resíduo $n-p$

Total $n-1$

(E.10) SNEDECOR, G.W. - Op. Cit.

(E.11) PARADINE, M.A. & RIVETT, B.H.P. - Métodos estatísticos para tecnologistas. São Paulo, EDUSP, 1974.

(E.12) HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. - Op. cit.

sendo:

- k = número de variáveis
- p = número de parâmetros
- n = número de observações

Por definição, os quadrados médios são obtidos dividindo a soma dos quadrados pelos respectivos graus de liberdade.

Sendo verdadeiras as hipóteses adotadas no item 3.1, tem-se:

- a) - O quadrado médio dos resíduos (Q.M. res.) é uma estimativa não tendenciosa da variância do erro (σ^2).
- b) - Os erros têm uma distribuição normal e o quociente

$$F = \frac{\text{Q.M. reg.}}{\text{Q.M. res.}}$$

tem distribuição de Fisher (F) com 1 e n-2 graus de liberdade.

3.3 - TESTE PARA EXISTÊNCIA DA REGRESSÃO - TESTE F

Dada uma hipótese de nulidade (H_0) define-se como erro tipo I o erro de rejeitar H_0 , sendo H_0 verdadeira. Define-se como erro tipo II o erro de rejeitar H_0 , sendo H_0 falsa. Será usada a letra α para indicar a probabilidade de cometer-se erro tipo I, sendo o nível de significância do teste, e a letra β para indicar a probabilidade de cometer-se erro tipo II.

Para efetuar este teste deve-se:

- a) - Definir as hipóteses H_0 e H_1 , com o modelo

$$Y = \alpha + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_k \cdot X_k + e$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \dots \neq \beta_k \neq 0$$

- b) - Fixar o nível de significância do teste (α)
- c) - $F_{(k, n-p)}$ é a variável aleatória com distribuição F, tendo k graus de liberdade no numerador e n-p graus de liberdade no denominador.

d) - Determinar as regiões da aceitação da hipótese H_0 considerando o nível de significância α e os graus de liberdade k e $n-p$, figura 4.1.E.

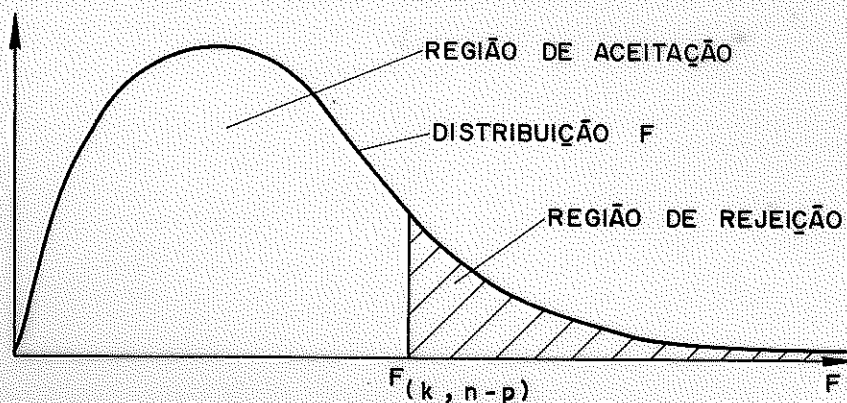


FIG.4.1E- NÍVEIS DE ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO DAS HIPÓTESES EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (teste F)

e) - Conclusão: se $F_{cal} > F(k, n-p)$, rejeita-se H_0 em favor de H_1 e existe a regressão.

3.4 - TESTE PARA DETERMINAR A SIGNIFICÂNCIA DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO MODELO - TESTE t

A partir da estimativa do desvio padrão das estimativas dos parâmetros, dados pela raiz quadrada da diagonal principal da matriz $(X'.X)^{-1}$, s^2 , pode-se utilizar o valor:

$$t = \frac{b_i - \beta_i}{s(b_i)}$$

com $(n-p)$ graus de liberdade para testar hipóteses a respeito dos valores de cada parâmetro (E.13). Com este teste é possível medir o nível de significância de cada variável no modelo. Para executar este teste pode ser observada a seguinte seqüência:

a) Definir as hipóteses H_0 e H_1 por exemplo:

$$H_0: \beta_i = 0 \quad e \quad H_1: \beta_i \neq 0$$

b) - Fixar o nível de significância do teste.

c) - Determinar as regiões de aceitação e rejeição da hipótese H_0 utilizando a tabela t de Student, definida anteriormente, com $n-p$ graus de liberdade, figura 5.E.

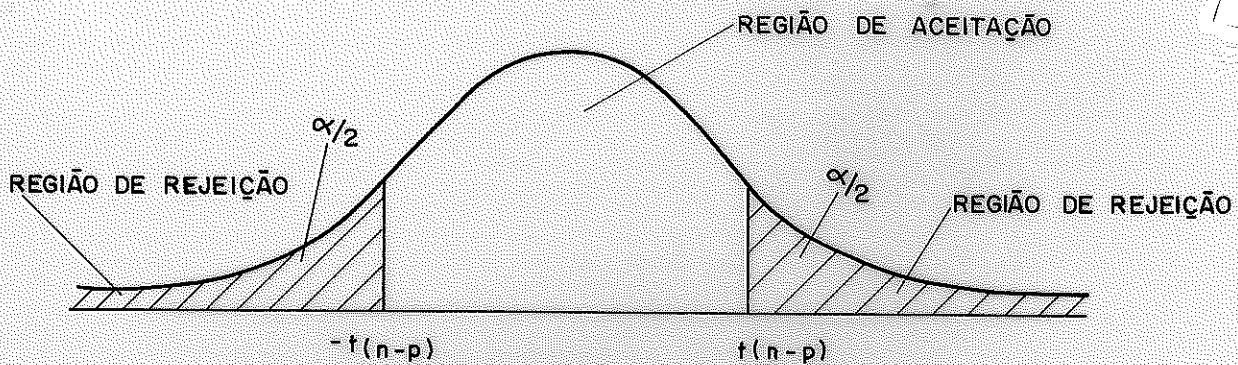


FIG.5.E - NÍVEIS DE ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO DAS HIPÓTESES EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (teste t)

d) - Calcular a variável

$$t = \frac{b_i}{s(b_i)}$$

e) - Conclusão:

Se $|t_{cal}| > t_{(n-p)}$ rejeita-se H_0 e conclui-se, com risco α , que o parâmetro b_i é diferente de zero, portanto a variável X_i é significativa no modelo.

3.5 - ANÁLISE DE RESÍDUOS

Talvez uma das fases mais importantes, na análise de regressão, seja a análise de resíduos.

Os resíduos definidos a partir da diferença entre os valores observados e os estimados pela regressão $e_i = (Y_i - \hat{Y}_i)$, com $i = 1$ até n , são parte dos valores observados não explicados pelo modelo matemático.

A análise de resíduos consiste em um estudo gráfico do comportamento dos resíduos em relação às variáveis estudadas. Este estudo pode evidenciar discrepâncias de diversas naturezas. Caso os resíduos indiquem tendências sistemáticas, deve-se suspeitar do

modelo adotado. A análise de resíduos permitirá comprovar as hipóteses básicas sobre os erros envolvidos, sobre o comportamento do modelo e sobre anomalias que podem ocorrer em relação a uma outra variável.

Segundo Box, Hunter (E.14) e Draper, Smith (E.15), as formas mais comuns de se apresentar os resíduos são:

a) - O gráfico de resíduos contra a frequência dos resultados observados, determinando um histograma, com distribuição normal e média zero, comprovando-se desta maneira algumas das hipóteses da regressão.

b) - O gráfico de resíduos contra as variáveis observadas poderá indicar anomalias ocorridas ao longo da experimentação. Esta indicação poderá revelar uma nova variável.

c) - O gráfico de resíduos contra os valores estimados \hat{Y}_i da regressão indicará irregularidades no modelo.

d) - O gráfico de resíduos contra os valores de cada variável independente, poderá indicar necessidade de considerar algumas transformações da variável no modelo.

Quando estes gráficos apresentam uma dispersão de pontos em torno da média, figura 6.E, todo o efeito da variável foi considerado no modelo ou sua influência nos resultados observados não é significativa.



FIG. 6.E- DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS EM FUNÇÃO DE UMA VARIÁVEL A SER ESTUDADA

(E.14) BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. - Op. cit.

(E.15) DRAPER, N.R. & SMITH, H. - Op. cit.

Aparecendo tendência de acréscimos ou decréscimos sucessivos de dispersão ao longo do eixo, figura 7.E, a variância não é uniforme, exigindo uma transformação preliminar nos valores observados Y .

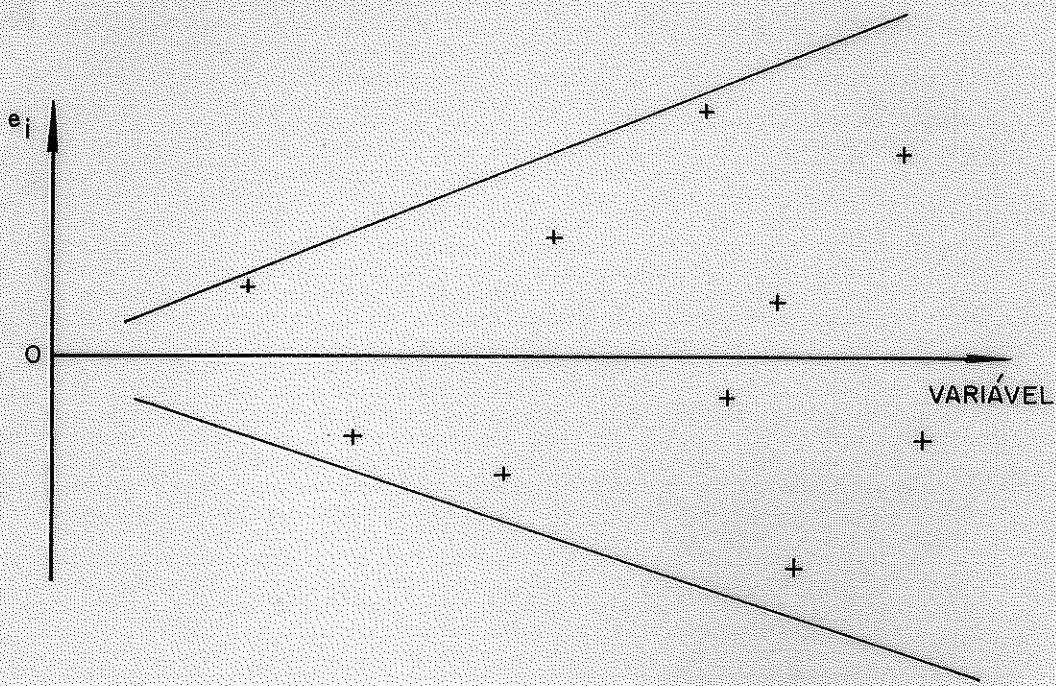


FIG. 7.E- TENDÊNCIA DE ACRÉSCIMO DA DISPERSÃO DOS RESÍDUOS.

Ocorrendo uma tendência linear, figura 8.E, a variável deverá ser incluída no modelo ou se exige transformações preliminares na variável dependente.



FIG. 8.E - TENDÊNCIA LINEAR DOS RESÍDUOS

Aparecendo uma tendência curva, figura 9.E, outras variáveis devem ser incluídas no modelo para eliminar estes efeitos, por exemplo, a inclusão de um termo linear e um quadrático, ou a necessidade de transformações iniciais nas observações Y .

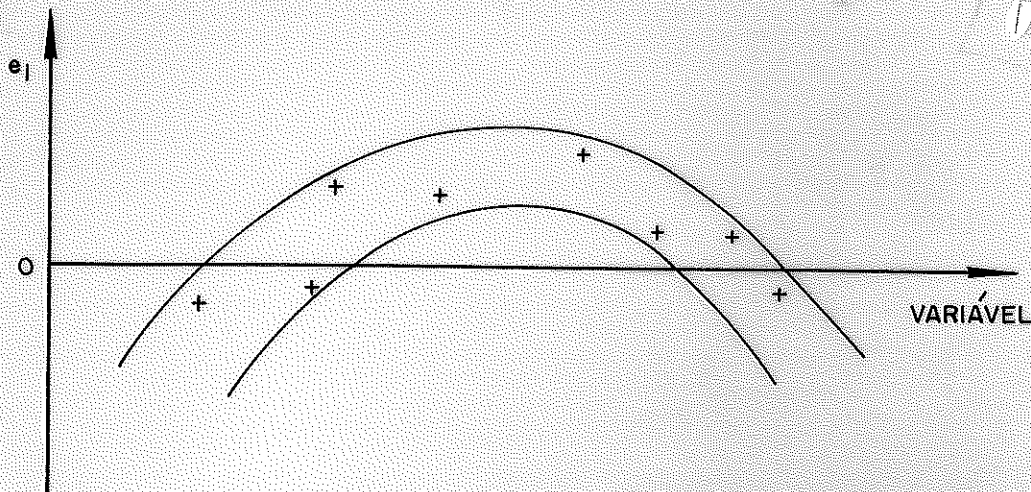


FIG. 9 E- TENDÊNCIA CURVA DOS ERROS.

As discrepâncias mais comuns reveladas nos gráficos ocorrem quando um ou mais valores dos resíduos são muito maiores ou muito menores do que os outros. A simples eliminação destes valores observados não é um bom procedimento, deve-se analisar as suas causas, pois estes resultados podem trazer informações importantes ao pesquisador. Caso estas observações discrepantes persistirem em todos os gráficos de resíduos \times variáveis, tem-se indicação da conveniência da exclusão destes pontos.

3.6 - INTERVALO DE CONFIANÇA

O intervalo de confiança para a média dos valores de Y , $E(Y)$, dado pelos valores $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$, pertencentes ou não à amostra com $n-p$ graus de liberdade e nível de significância α , pode ser obtido por: (E.16)

$$\hat{Y} \pm t_{(n-p-1, 1-0.5.\alpha)} \cdot s \sqrt{X_0' \cdot C \cdot X_0}$$

sendo:

$$s = \sqrt{Q.M. \text{ res.}}$$

$$C = \{X' \cdot X\}^{-1}$$

$$X_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_k \end{bmatrix}$$

O intervalo de confiança para um valor individual de Y , dada uma seqüência de observações $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$, com nível α de significância e $n-p-1$ graus de liberdade é dado por:

$$\hat{Y} \pm t_{(n-p-1, 1-0.5\alpha)} \cdot s \cdot \sqrt{1 + X_0' \cdot C \cdot X_0}$$

Pode-se ainda construir intervalos de confiança para os parâmetros da regressão. Escolhido o nível de significância, e sendo t_0 o correspondente valor crítico de t , o intervalo de confiança é:

$$b_i - t_0 \cdot s(b_i) < \beta_i < b_i + t_0 \cdot s(b_i)$$

$$a - t_0 \cdot s(b_i) < \alpha < a + t_0 \cdot s(b_i)$$

3.7 - TESTE DE DURBIN-WATSON

Para verificar a existência de autocorrelação nos resíduos da regressão utiliza-se, freqüentemente, o teste de Durbin Watson baseado no valor,

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

Sendo e_t os desvios da regressão ajustada pelo método dos

mínimos quadrados.

O valor de d varia entre zero e quatro. Um valor perto de zero indica a existência de auto correlação positiva e um valor de d próximo de 4 indica que os erros estão negativamente correlacionados.

A distribuição de d depende do tamanho (n) da amostra, do número de parâmetros estimados e da matriz X . O intervalo (d_L, d_U) que contém o valor crítico de d encontra-se tabelado para diferentes valores de n e p (parâmetros), e níveis de significância 1% a 5%. Para efetuar-se este teste pode ser observada a seguinte sequência:

a) - Definir as hipóteses H_0 e H_1 por exemplo:

$$\begin{array}{ll} H_0: \rho = 0 & \text{e} \quad H_1: \rho > 0 \\ H_0: \rho = 0 & \text{e} \quad H_1: \rho < 0 \end{array}$$

sendo:

ρ = autocorrelação dos erros

- b) - Fixar o nível de significância do teste.
- c) - Determinar os valores do intervalo (d_L, d_U).
- d) - Calcular o valor de d .
- e) - Conclusão:

Teste da hipótese $H_0: \rho = 0$ contra $H_1: \rho > 0$

O valor de d deve ser comparado com d_L e d_U

- se $d < d_L$, o resultado é significativo, rejeita-se H_0 em favor de H_1
- se $d > d_U$, o resultado é não significativo, isto é não se rejeita H_0 e pode-se aplicar na regressão os mínimos quadrados ordinários
- se $d_L < d < d_U$, o resultado é inconclusivo

Teste da hipótese $H_0: \rho = 0$ contra $H_1: \rho < 0$

O valor de d é comparado com $4-d_L$ e $4-d_U$

- se $d > 4-d_L$, o resultado é significativo, rejeitando-se H_0 em favor de H_1
- se $d < 4-d_U$, o resultado é não significativo, não se rejeitando H_0 , isto é, pode-se aplicar na regressão os mínimos quadrados ordinários.

- se $4-d_U < d < 4-d_L$, o resultado é inconclusivo.

A validade deste teste depende: da distribuição dos erros ser normal com média zero e variância constante e das variáveis independentes não serem aleatórias.

3.8 - ANÁLISE DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO SOFT-WARE MINITAB (E.17)

```
-- REGRESS C1 4. C5 C6 C7 C8 C40 C41
```

```
THE REGRESSION EQUATION IS
Y = 41.0 + 26.8 X1 - 1.92 X2
    - 0.888 X3 + 0.0116 X4
```

	COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
1	4	41.00	23.51	1.74
2	C5	26.76	15.58	1.72
3	C6	-1.9175	0.5919	-3.24
4	C7	-0.8876	0.5267	-1.69
5	C8	0.011593	0.003866	3.00

```
THE ST. DEV. OF Y ABOUT REGRESSION LINE IS
S = 7.342
WITH ( 54 - 5 ) = 49 DEGREES OF FREEDOM
```

```
R-SQUARED = 76.9 PERCENT
ADJUSTED R-SQUARED = 75.1 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.
```

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	4	8815.00	2203.75
RESIDUAL	49	2641.20	53.90
TOTAL	53	11456.19	

FURTHER ANALYSIS OF VARIANCE

SS EXPLAINED BY EACH VARIABLE WHEN ENTERED IN THE ORDER GIVEN

DUE TO	DF	SS
REGRESSION	4	8815.00
C5	1	131.79
C6	1	57.51
C7	1	8140.87
C8	1	484.82

ROW	X1	Y	PRED. Y	ST. DEV. PRED. Y	RESIDUAL
22	0.810	71.240	52.885	1.685	18.355
44	0.810	21.545	15.762	3.638	5.783
50	0.750	34.195	27.062	3.905	7.133
51	0.830	73.680	61.816	3.278	11.864
54	0.840	20.585	15.463	3.239	5.122

R DENOTES AN OBS. WITH A LARGE ST. RES.
X DENOTES AN OBS. WHOSE X VALUE GIVES IT LARGE INFLUENCE.

```
DURBIN-WATSON STATISTIC = 2.31
```

.378.

O coeficiente de determinação múltipla \bar{e} (R-SUARED) = 76.9 %.

A equação da regressão \bar{e} :

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4$$

$$Y = 41.0 + 26.8 \cdot X_1 - 1.92 \cdot X_2 - 0.888 \cdot X_3 + 0.0116 \cdot X_4$$

O valor de F \bar{e} :

$$F_{\text{cal}} = \frac{MS_{\text{reg.}}}{MS_{\text{res.}}} = \frac{2203.75}{53.90} = 40.89 > F_{\text{cr}} \Rightarrow \text{existe a regres.}$$

As estimativas do desvio padrão dos coeficientes da regressão (ST.DEV.OF COEF.) são:

Parâmetros	ST.DEV.OF COEF.
a	23.5100
b ₁	15.5100
b ₂	0.5919
b ₃	0.5267
b ₄	0.0038

Os graus de liberdade desta estimativa são: 54-5 = 49

Os intervalos de confiança dos parâmetros, com nível α de significância e sendo t_0 o correspondente valor crítico de t , são dados por:

$$41.0 - t_0 \cdot (23.51) < \alpha < 41.0 + t_0 \cdot (23.51)$$

$$26.8 - t_0 \cdot (15.51) < \beta_1 < 26.8 + t_0 \cdot (15.51)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$0.0116 - t_0 \cdot (0.0038) < \beta_4 < 0.0116 + t_0 \cdot (0.0038)$$

A determinação da significância das variáveis envolvidas no modelo (teste t), será:

$$t_{\text{cal}} = \frac{a}{s(a)} = 1.74 < t_0$$

$$t_{\text{cal}} = \frac{b_1}{s(b_1)} = 1.72 < t_0$$

$$t_{\text{cal}} = \frac{b_4}{s(b_4)} = 3.00 < t_0$$

O intervalo de confiança para a média da população do valor Y é construído a partir da estimativa do desvio padrão da média do valor predito de Y (ST.DEV.PRED.Y).

Por exemplo, dado um nível α de significância e o t de student crítico t_0 , o intervalo de confiança da média da população do valor $Y = 71.24$ (ROW 22) com seus correspondentes valores de X_1 , X_2 , X_3 e X_4 é dado por:

$$y - t_0 \cdot (\text{ST.DEV.PRED.}) < \hat{Y} < Y + t_0 \cdot (\text{ST.DEV.PRED.})$$

$$71.24 - t_0 \cdot (1.685) < \hat{Y} < 71.24 + t_0 \cdot (1.685)$$

O intervalo de confiança para um valor individual de Y é determinado a partir da estimativa do desvio padrão da média do valor predito de Y (ST.DEV.PRED.Y) e da estimativa do desvio padrão de um valor individual em torno do valor médio (THE ST.DEV.OF Y ABOUT REGRESSION LINE IS $s = 7.342$). Considerando o exemplo anterior, o intervalo de confiança do valor de $Y = 71.24$ é dado por:

$$Y \pm t_0 \cdot \sqrt{(\text{ST.PRED.Y})^2 + s^2}$$

$$71.24 - t_0 \cdot \sqrt{1.685^2 + 7.342^2} < \hat{Y} < 71.24 + t_0 \cdot \sqrt{1.685^2 + 7.342^2}$$

Outra informação que pode ser obtida do Minitaba é a contribuição da soma dos quadrados das variáveis na soma dos quadrados da regressão. Quanto maior for esta contribuição, maior será a importância da variável na regressão. No exemplo citado, a variável C_7 tem maior influência que todas as variáveis ($SS = 8140.870$) podendo-se, inclusive, afirmar que a influência da variável C_6 ($SS = 57.510$), na regressão, é mínima, podendo a mesma ser eliminada.

Finalmente, o Minitab fornece o valor de d_{cal} para realizar o teste de DURBIN-WATSON, no exemplo citado $d = 2.31$.

4 - ANÁLISE DE EXPERIMENTAÇÃO FATORIAL (E.18, E.19, E.20)

O objetivo da análise de experimentação fatorial é o estudo da influência de alguns fatores sobre um determinado fenômeno.

Todas as grandezas que possam afetar o resultado de uma experiência, devem ser consideradas como fatores. Os diversos valores, que podem assumir cada fator, são denominados níveis deste fator.

Um dos maiores problemas do planejamento de experiências é estabelecer quais os fatores a considerar, em cada caso particular. Toda grandeza cuja variação tenha possibilidade de afetar o resultado da experiência, pode ser considerado como fator.

Para o estudo do efeito de qualquer fator, na experiência, é necessário a inclusão de três ou mais níveis, escolhidos de maneira a cobrir todo o campo de interesse experimental.

Para analisar uma experimentação fatorial é necessário distinguir, efeito principal e efeito de interação. O efeito principal é a variação do atributo estudado na experimentação fatorial, quando se varia o fator considerado, permanecendo constantes os níveis dos demais fatores. A variação simultânea dos fatores denomina-se interação.

4.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para explicar a análise estatística de uma experimentação fatorial, será considerada o caso de uma em dois fatores X e Y, com m e n níveis, respectivamente. Adotando um delinhamento entre blocos causalizados (blocos escolhidos para se ter o máximo de variação e o máximo de uniformidade dentro dos blocos), tem-se m.m unidades por bloco. Sendo v o número de blocos, tem-se m.n.v observações, representados esquematicamente no quadro a seguir.

(E.18) SNEDECOR, G.W. - Op. cit.

(E.19) BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. - Op. cit.

(E.20) FONSECA, J.S. - Op. cit.

QUADRO 1.E - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS OBSERVAÇÕES

		NÍVEL DO FATOR X				
		X ₁	X ₂	X ₃	.....	X _m
NÍVEL DO FATOR Y	Y ₁	b1.1 b2.2 : : b1.v				
	Y ₂	b1.1 b2.2 : : b1.v				
		: : : : :				
	Y _n	bi.1 b2.2 : : b1.v				

Calcula-se: os totais das observações em cada bloco B_1 , B_2 , , B_v e as médias respectivamente \bar{b}_1 , \bar{b}_2 , , \bar{b}_v . A seguir totalizam-se as observações dos diferentes blocos, referentes aos mesmos tratamentos (T_{ij} , sendo $i=1$ até m e $j=1$ até n) e determina-se o quadro de totais, 2.E.

Sendo:

$$X_i = \sum T_{ij} \text{ com } j=1 \text{ até } n \rightarrow \text{ totais de todas as observações em todos os blocos referentes ao nível } i \text{ do fator } X$$

$Y_j = \sum T_{ij}$ com $i=1$ até $m \rightarrow$ totais de todas as observações em todos os blocos referentes ao nível j do fator Y

$G =$ total geral

QUADRO 2.E - TOTAIS							
		NÍVEL DO FATOR X					
		X_1	X_2	X_3	.....	X_m	TOTAIS
NÍVEL DO FATOR Y	Y_1	T_{11}	T_{21}	T_{31}	.....	T_{m1}	Y_1
	Y_2	T_{12}	T_{22}	T_{32}	.....	T_{m2}	Y_2

	Y_n	T_{1n}	T_{2n}	T_{3n}	.....	T_{mn}	Y_n
TOTAIS		X_1	X_2	X_3	.....	X_m	G

A continuação, constroe-se o quadro de médias, 3.E, dividindo os totais pelo número de observações, respectivamente.

A partir desta série de valores e a soma dos quadrados de todas as observações, $\sum x^2$, pode-se construir o quadro de análise de variância, 4.E.

Teste F

Seguindo o mesmo encaminhamento do item 3.3, define-se as hipóteses, fixa-se o nível de significância do teste (α) e determina-se a região de aceitação das hipóteses (F)

Se

$$\frac{s_{11}^2}{s_2^2} > F_{(\alpha_2, \alpha_{11})} \Rightarrow \text{o efeito do fator X é significativo}$$

$$\frac{s_{12}^2}{s_2^2} > F_{(\alpha_2, \alpha_{12})} \Rightarrow \text{o efeito do fator Y é significativo}$$

$\frac{s_{13}^2}{s_2^2} > F(\theta_2, \theta_{13}) \Rightarrow$ o efeito da interação dos fatores é significativo.

QUADRO 3.E - MÉDIAS							
		NÍVEL DO FATOR X					
		X ₁	X ₂	X ₃	...	X _m	MÉDIA
NÍVEL DO FATOR Y	Y ₁	\bar{t}_{11}	\bar{t}_{21}	\bar{t}_{31}	.....	\bar{t}_{m1}	\bar{Y}_1
	Y ₂	\bar{t}_{12}	\bar{t}_{22}	\bar{t}_{32}	.....	\bar{t}_{m2}	\bar{Y}_2
	.						
	Y _n	\bar{t}_{1n}	\bar{t}_{2n}	\bar{t}_{3n}	.....	\bar{t}_{mn}	\bar{Y}_n
MÉDIAS		\bar{X}_1	\bar{X}_2	\bar{X}_3	.....	\bar{X}_m	\bar{g}

QUADRO 4.E - ANÁLISE DE VARIANÇA			
FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	VARIANÇA
EFEITO PRINC. X	$a = \sum X_i \cdot \bar{X}_i - G \cdot \bar{g}$	$\theta_{11} = m - 1$	$s_{11}^2 = \frac{a}{\theta_{11}}$
EFEITO PRINC. Y	$b = \sum Y_j \cdot \bar{Y}_j - G \cdot \bar{g}$	$\theta_{12} = n - 1$	$s_{12}^2 = \frac{b}{\theta_{12}}$
INTERAÇÃO X.Y	$c = d - a - b$	$\theta_{13} = m \cdot n - m - n + 1$	$s_{13}^2 = \frac{c}{\theta_{13}}$
ENTRE TRATAMENTOS	$d = \sum T_{ij} \cdot \bar{t}_{ij} - G \cdot \bar{g}$	$m \cdot n - 1$	
ENTRE BLOCOS	$e = \sum B \cdot \bar{b} - G \cdot \bar{g}$	$v - 1$	
RESTO	$f = g - d - e$	$\theta_2 = m \cdot n \cdot v - m \cdot n - v + 1$	$s_2^2 = \frac{f}{\theta_2}$
TOTAL	$g = \sum X^2 - G \cdot \bar{g}$	$m \cdot n \cdot v - 1$	

APÊNDICE F - CORREÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS

1 - CORREÇÃO DE UMA CARACTERÍSTICA MECÂNICA EM FUNÇÃO DA UMIDADE E DA DENSIDADE

Dado o modelo matemático representando o conjunto de dados da amostra.

$$y = f(U, D)$$

sendo:

U = umidade da madeira

D = densidade da madeira

A figura 1.F, mostra a variação da variável Y com a umidade e a densidade, isto é, para cada densidade se terá uma curva.

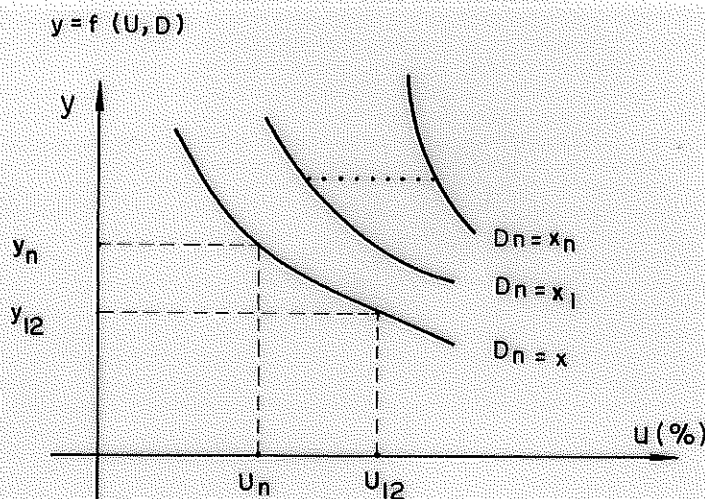


FIG.1.F-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA VARIAÇÃO DA CARACTERÍSTICA MECÂNICA Y EM FUNÇÃO DA UMIDADE E DENSIDADE.

Para corrigir os valores observados da variável dependente Y, para umidade padrão 12%, será feita a diferença do valor observado e o valor corrigido dessa observação, assim:

$$Y_n - Y_{12} = f(U_n, D_n) - f(U_{12}, D_{12})$$

e a equação de correção será:

$$Y_{12} = Y_n - f(U_n, D_n) + f(U_{12}, D_{12}) \dots\dots\dots (F.1)$$

com

$$D_{12} = D_n + D_n \cdot (0.01 - v) \cdot (U_{12} - U_n) \dots (F.1 \text{ e } F.2)$$

sendo:

- Y_{12} = valor observado corrigido a 12% de umidade
- Y_n = valor observado com n% de umidade
- U_n = n% de umidade
- U_{12} = 12% de umidade
- D_n = densidade a n% de umidade
- D_{12} = densidade a 12% de umidade
- v = coeficiente de retratibilidade volumétrica

2 - CORREÇÃO DE UMA CARACTERÍSTICA MECÂNICA EM FUNÇÃO DA UMIDADE, DA DENSIDADE E DA PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA

O modelo matemático representando o conjunto de dados varia com as três variáveis.

$$Y = f(U, D, P_{ac})$$

A representação gráfica dos valores observados (variável) dependente, em função das variáveis umidade, densidade e porcentagem de área colada é mostrada na figura 2.F.

A variação da densidade com a umidade já é um fato bastante conhecido. Mas a variação da porcentagem de área colada com a umidade e a densidade deverá ser determinada. Seja esta variação dada pela função, $P_{ac} = z(U, D)$, representada na figura 3.F.

A diferença do valor observado e o valor corrigido a umidade padrão de 12% será:

$$P_{acn} - P_{ac12} = z(U_n, D_n) - z(U_{12}, D_{12})$$

[F.1] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Métodos de ensaios adotados no IPT....., São Paulo, IPT, 1956 (boletim 31).

[F.2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras - MB-26. Rio de Janeiro, ABNT, 1940.

Assim, a equação de correção da porcentagem de área colada será:

$$P_{ac12} = P_{acn} - z(U_n, D_n) + z(U_{12}, D_{12}) \dots\dots\dots (F.2)$$

Com as equações de correção da porcentagem de área colada e da densidade para umidade padrão de 12%, pode-se determinar a equação de correção de um valor observado em função da umidade, da densidade e da porcentagem de área colada.

Seguindo o mesmo raciocínio do item 1, obtém-se:

$$Y_n - Y_{12} = f(U_n, D_n, P_{ac}) - f(U_{12}, D_{12}, P_{ac12})$$

a equação de correção será:

$$Y_{12} = Y_n - f(U_n, D_n, P_{acn}) + f(U_{12}, D_{12}, P_{ac12}) \dots (F.3)$$

com,

$$D_{12} = D_n + D_n \cdot (0.01 - v) \cdot (U_{12} - U_n)$$

e

$$P_{ac12} = P_{acn} - z(U_n, D_n) + z(U_{12}, D_{12})$$

sendo:

- Y_{12} = valor observado corrigido a 12% de umidade
- Y_n = valor observado a n% de umidade
- U_{12} = 12% de umidade
- U_n = n% de umidade
- D_n = densidade a n% de umidade
- D_{12} = densidade a 12% de umidade
- P_{ac12} = porcentagem de área colada a 12% de umidade
- P_{acn} = porcentagem de área colada a n% de umidade
- v = coeficiente de retratibilidade volumétrica

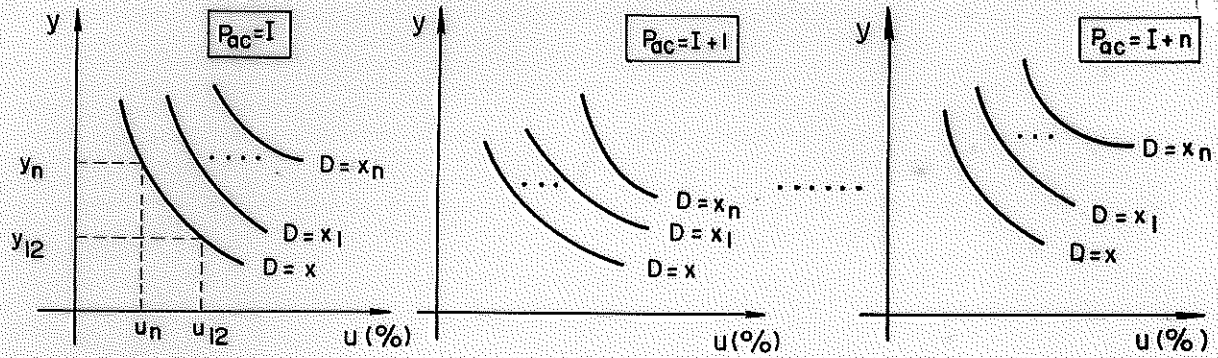


FIG.2.F - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA VARIAÇÃO DO VALOR OBSERVADO EM FUNÇÃO DA UMIDADE, DENSIDADE E PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA

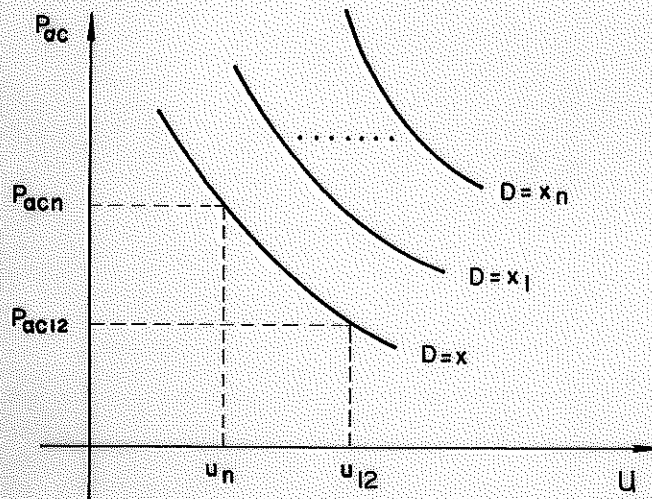


FIG.3.F - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA VARIAÇÃO DA PORCENTAGEM DE ÁREA COLADA EM FUNÇÃO DA UMIDADE E DENSIDADE

A N E X O

QUADRO 1 - ADESIVOS DE FUSÃO PELO CALOR. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS MAIS UTILIZADOS (Ax.1)

ANTIGA TECNOLOGIA	TECNOLOGIA MODERNA	FUTURA TECNOLOGIA
Resinas naturais e grudes Calofônia e derivados Ceras minerais, vegetais e do petróleo Asfaltos e pez de alcatrão Resinas alquídicas Resinas terpênicas Resinas fenólicas estáveis ao calor	Etilcelulose Acetato-butirato celulose Acetato de polivinilo. Metacrilatos de butilo Polietileno e polipropileno Co-polímeros etileno/ acetato de vinilo. Poliestireno e co-polímeros Poli-isobutileno Poliâmidas Poliésteres	Termopolímeros Resinas fenoxi Trans-polisopreno

(Ax.1) LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL.- Introdução ao estudo e ensaios de colas orgânicas. Lisboa, LNEC, Agosto 1973. (circular de informação técnica).

QUADRO 2 - CARACTERÍSTICAS DE UTILIZAÇÃO DOS ADESIVOS FLUIDIFICADOS (Ax.2)	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
<p>Baixo custo de embalagem e transporte por grama de substância sólida.</p> <p>Não congelamento.</p> <p>Não inflamáveis nem tóxicos.</p> <p>Boa estabilidade no armazenamento.</p> <p>Dispensável equipamento para secagem.</p> <p>Rápida secagem ou cura.</p> <p>Fornecem películas impermeáveis e resistentes à água.</p>	<p>Necessidade de equipamento especial para aplicação.</p> <p>Limitada resistência da ligação.</p> <p>Degradação por aquecimento continuado.</p> <p>Difícil controle do peso da película.</p> <p>Necessidade de pre-aquecimento dos aderentes.</p>

QUADRO 3 - PRINCIPAIS POLÍMEROS ADESIVOS PARA ADESIVOS E SOLVENTES ORGÂNICOS (Ax.3)		
BASE AQUOSA	BASE AQUOSA OU SOLVENTE	BASE SOLVENTE
<p>Grudes e gelatinas.</p> <p>Albumina.</p> <p>Caseína.</p> <p>Amidos e dextrinas.</p> <p>Soja</p> <p>Gomas - resinas</p> <p>Carboximetilcelulose</p> <p>Álcool polivinilo</p> <p>Linhina.</p>	<p>Borracha natural.</p> <p>Borracha clorada.</p> <p>Borrachas sintéticas:</p> <p>Neopreno (policloropreno)</p> <p>Estireno-butadieno</p> <p>Butadieno-nitrilo</p> <p>Polímeros e co-polímeros vinílicos:</p> <p>Poli(vinilacetato).</p> <p>Poli(vinilcloreto).</p> <p>Poli(viniléteres).</p> <p>Poli(vinildeno cloreto).</p> <p>Acrílicos:</p> <p>Poliacrilatos.</p> <p>Polimetacrilatos.</p> <p>Poliamidas.</p> <p>Uréia-formaldeído.</p> <p>Fenol-formaldeído.</p> <p>Resorcinol-formaldeído.</p> <p>Ésteres de colofônia e celulos.</p> <p>Substâncias betuminosas.</p>	<p>Nitrocelulose.</p> <p>Acetato-butirato de celulose.</p> <p>Celulose.</p> <p>Borracha ciclizada.</p> <p>Poli-isobutileno:</p> <p>Epoxílicos.</p> <p>Poliuretanos.</p> <p>Poliéster.</p> <p>Silicones.</p> <p>às } vezes</p>

(Ax.2) - Op. cit(Ax.3) - Op. cit.

QUADRO 4 - PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS ADESIVOS AQUOSOS (Ax.4)	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
Baixo custo. Não inflamáveis nem tóxicos. Larga gama de teores de sólidos e de viscosidades. Elevada concentração de polímeros com alto peso molecular. Facilidade de variar o poder de penetração e de molhagem. Fácil limpeza do equipamento de aplicação. Fabricação relativamente simples. Facilidade de aplicação.	Fraca resistência à água (principalmente as do tipo solúvel). Sujeitos a congelação. Secagem as vezes relativamente lenta. Corrosivas para alguns metais. Alteração ou contaminação por longa armazenagem. Fracas propriedades elétricas. Fraco poder de molhagem de superfícies hidrofobas.

QUADRO 5 - EMULSÕES MAIS USADAS EM ADESIVOS (COLAS-LÁTEX) (Ax.5)			
POLÍMERO	SÓLIDOS %	VISCOSIDADE CPs	pH
Borracha natural:			
normal	38 - 41	25	10.5
centrifugada	61.5	50	10.2
creme	64.0	50	11 - 12.5
concentrada	72 - 74	pastosa	10.5
Neopreno	50 - 58	8 - 35	12.2-12.5
Butilo	55.0	900	5 - 6
Estireno-butadieno:			
alto em sólidos	55.0	200 - 2500	10 - 11.5
médio em sólidos	39 - 55	15 - 300	10 - 11.5
baixo em sólidos	24 - 27	8 - 20	9 - 11
Nitrilo	40 - 55	12 - 200	8.5- 11
Cloreto de polivinilo	50 - 55	20 - 200	8.0
Acetato de polivinilo	55.0	800 - 1500	4 - 5
Co-polímeros cloreto vinilideno	50 - 52	20 - 50	6 - 8
Poliacrílicas	47 - 55	25 - 47	7.5 - 9.5
DISPERSÕES DIVERSAS:			
Borracha clorada, Poliamidas, Asfaltos, Uréia e melamina, Resinas fenol e resorcinol-fenol, Ésteres de colofônia, Ésteres celulósicos.			

(Ax.4) - *Op. cit.*(Ax.5) - *Op. cit.*

QUADRO 6 - PRINCIPAIS SOLVENTES USADOS NA PREPARAÇÃO DAS COLAS-LACAS (Ax.6)

Acetona (30) + acetato de butilo (50) + acetato de metilcellosolve (20).
 Acetona (90) + lactado de etilo (10).
 Acetona (80) + acetato de metoxi-etilo (20).
 Acetona (70) + acetato de metilcellosolve (30).
 Acetato de butilo (38) + metilmetacrilato (62).
 Ciclo-hexanona (20) + tetra-hidrofurano (80).
 Acetato de etilo.
 Álcool etílico (10) + tolueno (90).
 Di-cloreto de etileno.
 Di-cloreto de etileno (50) + cloreto de metileno (50).
 Flúor-álcool (C₃).
 Cloreto de metileno.
 Cloreto de metileno (60) + metilmetacrilato (40).
 Metiletilcetona.
 Metiletilcetona (50) + tolueno (50).
 Metiliso-butilcetona.
 Metiliso-butilcetona (75) + xileno (25)
 Percloroetileno (tetracloroetileno).
 Tetracloroetano.
 Tolueno.
 Tricloroetano.
 Tricloroetileno.

QUADRO 7 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS ADESIVOS A SOLVENTE ORGÂNICO (Ax.7)

Resistência à água.
 Grande versatilidade no tempo de secagem e de espera "open time".
 Desenvolvem rapidamente alta resistência inicial.
 Boa molhagem das superfícies difíceis.
 As colas-laca de baixa viscosidade e de secagem rápida permitem alta velocidade de produção.
 A aparência dos produtos laminados é melhor à dos preparados com colas aquosas.

Perigo de inflamação e, às vezes, de toxicidade.
 Necessidade de equipamento à prova de explosão.
 Necessidade de ventilação e de estufas de secagem.
 Preço geralmente mais elevado.
 A utilização das colas-laca nas operações de laminagem necessita de maior cuidado e esforço devido à complexidade da maquinaria usada.

(Ax.6) - *Op. cit.*(Ax.7) - *Op. cit.*

QUADRO 8 - PREÇO DOS COMPONENTES DOS ADESIVOS (Ax.8)

PRODUTOS NATURAIS E DERIVADOS	¢-Su\$/Kg.	PRODUTOS NATURAIS E DERIVADOS	c/-Su\$/Kg
amido	15.00	urea	10.00
dextrina	20.00	formaldeído (aquosa, base seca)	20.00
metil celulose	140.00	<i>inorgânicos:</i>	
etil celulose	140.00	silicato de sódio	6.60
nitrocelulose	66.00	<i>solventes:</i>	
carboximetil celulose	80.00	acetona	17.00
colas animais	4.00	ciclohexanol	47.00
caseína	36.00	ciclohexanona	67.00
albumina de sangue	27.00	acetato de etila	26.00
sangue de res, seco	23.50	Heptano (lata de 1 litro)	9.00
proteína de soja isolada	43.00	metiletil cetona	29.00
farinha de soja	12.00	tolueno (lata de 1 litro)	14.00
borracha	54.00	xileno (lata de 1 litro)	16.00
resina de terebentina	32.00		
éster de goma	37.00	<i>ceras, humectantes e plastificantes</i>	
éster de resina terebentina	48.00	cera	44.00
éster hidrogenado de metilo de R.T	55.00	parafina	30.00
goma arábica	42.00	polietileno de baixo peso molecular	55.00
goma laca	88.00	" carbowax"	44.00
<i>sintéticos:</i>		glicerol	58.00
acrílico (emulsão, base seca)	84.80	etil glicol	32.00
acrilonitrila-butadieno (latex base seca)	98.00	dietilo glicol	30.50
resina estireno-butadieno (latex, base seca)	57.00	fosfato tricresol	70.00
epoxi	124.00	ftalato de dibutilo	32.00
formaldeído-melamina	72.75	ftalato de dioctilo	57.00
neopreno	79.00	dietanolamina	49.00
resinas de petróleo	25.00		
fenólicos	50.00	<i>cargas:</i>	
poliamidas	152.00	giz	1.90
poliésteres (não saturados)	78.00	bentonita	1.40
polissulfureto de borracha	192.00		

QUADRO 8 - Cont.... PREÇO DOS			
PRODUTOS NATURAIS E DERIVADOS	¢-Su\$/kg *	PRODUTOS NATURAIS E DERIVADOS	c-Su\$/kg
materia prima de poliuretano (aprox.)	100.00	caolin	2.25
emulsão de acetato de polivinila, base seca	58.20	magnesita	56.00
álcool polivinílico	115.00	óxido de zinco	29.00
butiral polivinílico	210.00	sílica	2.80
cloreto de polivinila	37.00	<i>agentes catalisadores e de curado</i>	
formaldeído-resorcinol	188.00	fenildiamina	220.00
borracha butadieno-estireno (SBR)	54.00	tetraetilenopentamina	112.00
formaldeído urea	33.00	hexametenotetramina	26.60
		borãx	5.00

* ¢-Su\$ = centavos de dolar

QUADRO 9 - ADESIVOS À BASE DE SILICATOS SOLÚVEIS	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Moderada resistência à água, resistência ao fogo, aos micro-organismos e aos fungos.
FORMA DO ADESIVO	Sólidos e líquidos.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Indefinido.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Depende da formulação.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Depende da formulação podendo variar de alguns minutos a várias horas.
TEMPERATURA DE CURA	Varia da temperatura ambiente a 110°C.
PERÍODO E INTENSIDADE DE PRENSAGEM	Varia de 6 a 14 horas com pressão variando de 70 a 100 N/cm ²
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda de umidade.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 600 a 800
PERÍODO DE CURA	Depende da temperatura. Varia de algumas horas a vários dias.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Em laminados de madeira resistentes ao fogo. Na mistura com outros adesivos. Na fabricação de compensados de madeira para interior com moderada resistência à água.

QUADRO 10 - ADESIVOS ANIMAIS	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos de origem animal têm resistência reduzida à água e aos micro-organismos. A durabilidade pode ser melhorada com o uso de preparados químicos.
FORMA DO ADESIVO	Pasta, grãos, pó, pedaços, gelatinas e líquida.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Na forma sólida é ilimitado; na forma gelatinosa e líquida, alguns meses.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Breve, mas, pode ser renovada.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Depende do tipo de adesivo animal utilizado e das indicações do fabricante.
TEMPERATURA DE CURA	Geralmente temperatura ambiente. Certos tipos de adesivos especiais são curados entre 80 e 90°C.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	De 30 a 60 N/cm ² para madeiras moles e 100 a 200 N/cm ² para madeiras duras. O tempo depende do tipo do adesivo animal e da natureza do material ligado.
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda d'água.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 250 a 300
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Em móveis e outras aplicações destinados a ambientes internos não agressivos.
PERÍODO DE CURA A 20°C	Até 7 dias para desenvolver plena resistência.

QUADRO 11 - ADESIVOS DE PEIXE	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos de peixe não têm resistência à água nem aos micro-organismos. Esta desvantagem pode ser eliminada mediante a mistura com outros adesivos resistentes à água e aos micro-organismos.
FORMA DO ADESIVO	Líquida e excepcionalmente sólida.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Na forma líquida aproximadamente 1 ano.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Breve, mas, pode ser renovada.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DA PRESSÃO A 20°C	Depende dos componentes, dos solventes e dos aceleradores adicionados.
TEMPERATURA DE CURA	Temperatura ambiente.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	Não é necessária pressão elevada.
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda d'água.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 300 a 350.
PERÍODO DE CURA A 20°C	Alguns dias, para desenvolver plena resistência.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Pouca aplicação em móveis. Comumente mais utilizado como aditivo para os adesivos animais.

QUADRO 12 - ADESIVOS DE CASEÍNA	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos de caseína são indicados para uso interior. Têm limitada resistência à água e aos micro-organismos, podendo ser melhorada por período limitado, mediante a adição de preservativos químicos. Uso, conveniente em madeiras secas e a temperatura de 66°C.
FORMA DO ADESIVO	Na forma de pó, para misturar com água.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Em torno de 7 horas.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Varia de 45 a 60 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Temperatura ambiente.
PERÍODO DE INTENSIDADE DE PRENSAGEM	De 4 a 6 horas para trabalhos em geral. De 16 horas para trabalhos estruturais. Pressão de 175 N/cm ² para madeiras duras e 70 N/cm ² para madeiras moles.
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda d'água.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	Para trabalhos estruturais de 200 - 250
PERÍODO DE CURA A 20°C	De 24 a 48 horas para desenvolver plena resistência.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	É aplicado em móveis, estruturas, compensado de madeira para interior e colagem em ambiente interno e não agressivo.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Na forma que se apresenta comercialmente , 12 meses.

QUADRO 13 - ADESIVOS DE SOJA	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos de soja têm moderada resistência à água, ao mofo e aos micro-organismos.
FORMA DO ADESIVO	Na forma de farinha de soja misturado com outros produtos.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Vários anos.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Em torno de 6 a 10 horas em temperatura ambiente. De 3 a 5 horas em temperaturas mais altas.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Varia em torno de 15 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Em geral, temperatura ambiente.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	Na prensagem a quente 15 minutos com pressão de 140 N/cm ² . Na prensagem a frio 30 minutos com pressão de 130 a 140 N/cm ² .
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda d'água.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO g/m ²	De 200 a 300
PERÍODO DE CURA A 20°C	De 4 a 6 horas.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	É aplicado na fabricação de compensado de madeira para interior e exterior (com pouca exposição à intempérie).

QUADRO 14 - ADESIVOS DE SANGUE

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos de sangue têm moderada resistência à água. Propenso ao desenvolvimento de mofo, fungos e micro-organismos.
FORMA DO ADESIVO	Na forma de pó para misturar com soda cáustica, cal hidratada e outros produtos químicos.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	No armazenamento em ambiente seco até 12 meses.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Geralmente curto - 10 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Varia de 77 a 110°C
PERÍODO E INTENSIDADE DE PRENSAGEM	Alguns minutos com pressão de 50 a 70 N/cm ² . Depende da temperatura e do tempo decorrido entre o espalhamento do adesivo e a aplicação de pressão.
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda d'água.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	Varia de 150 a 250
PERÍODO DE CURA A 20°C	Em torno de 24 horas.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	É aplicado na indústria dos compensados de madeira para interior. Com algumas misturas pode ser utilizado em compensados para exterior
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	De 6 a 24 horas.

QUADRO 15 - ADESIVOS DE AMIDO	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos de amido têm limitada resistência à água e aos micro-organismos.
FORMA DO ADESIVO	Na forma de farinha de mandioca misturada com produtos químicos.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO a 20°C	No armazenamento em ambiente seco até 12 meses
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	De 2 a 3 dias.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DA PRESSÃO A 20°C	En torno de 15 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Temperatura ambiente.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	De 12 a 24 horas à pressão de 50 e 70 N/cm ²
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por perda d'água.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 300 a 420.
PERÍODO DE CURA A 20°C	De 2 a 3 dias
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Na indústria de compensados de madeira para uso interior.

QUADRO 16 - ADESIVOS CELULÓSICOS	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Os adesivos celulósicos têm moderada resistência à água.
FORMA DO ADESIVO	Em forma de polímero líquido e em pó para ser misturado com produtos químicos.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Em média 2 anos
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	De 3 a 5 horas.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Geralmente curto, aproximadamente 10 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Variável, dependendo da composição do adesivo.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	Alguns minutos, em altas temperaturas e pressão de 70 a 210 N/cm ²
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por policondensação.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 150 a 200.
PERÍODO DE CURA A 20°C	De várias horas a vários dias dependendo da formulação do adesivo.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	É utilizado na laminação de madeiras para uso interior com moderada resistência à água. Na construção de móveis e portas.

QUADRO 17 - ADESIVOS DE BORRACHA

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Depende do tipo de adesivo
FORMA DO ADESIVO	Varia do estado líquido ao sólido.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Depende da formulação.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Depende do tipo de adesivo.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Função da formulação.
TEMPERATURA DE CURA	De 4°C até 60°C
PERÍODO DE INTENSIDADE DE Prensagem	Depende do tipo de adesivo
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por policondensação
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 300 a 400
PERÍODO DE CURA A 20°C	Vários dias.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Somente em ligações de pequena responsabilidade

QUADRO 18 - ADESIVOS DE RESINA FENÓLICA

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Para uso exterior resistente à água, ao calor, aos fungos, aos micro-organismos e outros.
FORMA DO ADESIVO	Em forma de filme, resina em pó, resina líquida. São utilizados frequentemente extensores.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Na forma de filme de 6 a 12 meses. Outros tipos até dois anos.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Função da concentração do catalisador.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Varia com a espécie de madeira usada e a natureza do adesivo. Alguns adesivos permitem poucos minutos e outros vários minutos, até horas.
TEMPERATURA DE CURA	Para adesivos na forma de filmes 130 a 150°C. Alguns tipos permitem temperaturas inferiores entre 100 e 140°C.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	Alguns minutos, em altas temperaturas e pressão de 70 a 210 N/cm ² .
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por policondenação.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	Função do tipo de adesivo e da espécie de madeira.
PERÍODO DE CURA A 20°C	Varia de 4 a 48 horas.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Compensado de madeira para uso exterior, aglomerado naval, etc.

QUADRO 19 - ADESIVOS DE RESORCINOL E RESORCINOL-FORMALDEÍDO

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Para uso exterior resistente à água, ao calor, a água fervida, aos fungos e micro-organismos, etc.
FORMA DO ADESIVO	Resina na forma líquida e endurecedor em pó. O endurecedor é encontrado, também, na forma líquida.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	A resina de 6 a 12 meses. O endurecedor líquido, 12 meses e o pó indefinido
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Varia de 3 a 9 horas
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Varia de 5 a 60 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Varia de 5°C até 100°C
PERÍODO E INTENSIDADE DE PRENSAGEM	Para colagem de um modo geral, 1 hora a 5°C e alguns minutos a 100°C com pressão de 40 a 70 N/cm ² . Para trabalhos estruturais em engenharia, mínimo de 16 horas a 24°C, para uso interior e, 38°C para uso exterior, com pressão de 70 N/cm ² para madeiras moles e 100 N/cm ² para madeiras duras
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por policondensação
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	Para colagem geral 150 a 200, para trabalhos estruturais de 300 a 450
PERÍODO DE CURA A 20°C	Varia de 6 a 9 dias
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Compensados especiais, trabalhos estruturais em madeira para interior e exterior: vigas, tesouras, treliças, estruturas marítimas, peças para estruturas portuárias, etc.

QUADRO 20 - ADESIVOS DE UREA-FORMALDEÍDO	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Para uso interior, não exposto a meios agressivos. Resistência a fungos e micro-organismos.
FORMA DO ADESIVO	Resina na forma líquida e em pó. O endurecedor é encontrado também na forma líquida e em pó.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	Para as resinas líquidas de 3 a 6 meses e para as resinas em pó de 1 a 2 anos. O tempo de armazenamento do endurecedor é indefinido.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Acima de 48 horas, dependendo das formulações e da temperatura de cura
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Até 20 minutos.
TEMPO DE CURA	Para trabalhos estruturais, temperatura ambiente. Para fabricação de compensados até 120°C
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	Para colagem de um modo geral, 2 horas a 20°C com pressão de 40 a 70 N/cm ² . Para trabalhos estruturais, 16 horas a 20°C com 70 N/cm ² , para madeiras moles, e 100 N/cm ² para madeiras duras. Para fabricação de compensado alguns minutos a 100°C com pressão acima de 170 N/cm ² .
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por policondensação
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	Para colagem em geral 200, para trabalhos estruturais de 250 a 350 e para compensado 150.
PERÍODO DE CURA A 20°C	Acima de 7 dias. Períodos mais curtos poderão ser conseguidos se forem usadas temperaturas acima de 20°C.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Na fabricação de compensados para interior, fabricação de móveis e na fabricação de madeira aglomerada.

QUADRO 21 - ADESIVOS DE MELAMINA FORMALDEÍDO	
PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Moderada resistência à água e micro-organismos. Resistente à água fervida.
FORMA DO ADESIVO	Em forma de pó branco ou de filme transparente.
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	De um a 2 anos em forma de pó e até 3 meses na forma de filme
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	Até 3 meses na forma de filme e de várias horas em forma de pó
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DE PRESSÃO A 20°C	Varia de 10 a 20 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	Varia de 55 a 95°C.
PERÍODO E INTENSIDADE DE Prensagem	Poucos minutos a 95°C e várias horas a 55°C com pressões de 70 a 100 N/cm ² .
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Por policondensação.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	Para colagem geral de 300 a 400 e para fabricação de compensado de 150 a 250.
PERÍODO DE CURA A 20°C	24 horas.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	Na fabricação de compensado de madeira a prova d'água. Na laminação de madeira para uso naval. Como fortificante dos adesivos de urea.

QUADRO 22 - ADESIVOS DE RESINA EPOXI

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDADE	Apresenta resistência à água, ao fogo, aos solventes, aos micro-organismos e à energia elétrica.
FORMA DO ADESIVO	Resina e catalisador na forma líquida e em pó
TEMPO DE ARMAZENAMENTO A 20°C	De 1 a 2 anos. As resinas e os endurecedores, sem curar, são reativos químicos devendo ser evitado o contato com a pele.
VIDA DO ADESIVO PREPARADO	A temperatura de 25°C de 20 a 30 minutos.
PERÍODO DECORRIDO DO ESPALHAMENTO DO ADESIVO À APLICAÇÃO DA PRESSÃO A 20°C	Varia de 5 a 10 minutos.
TEMPERATURA DE CURA	A partir de 5°C.
PERÍODO E INTENSIDADE DE PRENSAGEM	Geralmente não é necessário pressão.
ENDURECIMENTO DO ADESIVO	Solidificação sem liberação de subprodutos. Polimerização. Cura exotérmica.
ESPALHAMENTO DO ADESIVO EM g/m ²	De 250 a 300.
PERÍODO DE CURA A 20°C	Função do tipo de resina. A partir de 30 min.
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA	No reparo de barcos de madeira. Geralmente em trabalhos onde seja necessária as suas propriedades específicas.

QUADRO 23 - CUSTOS APROXIMADOS E PROPRIEDADES PRINCIPAIS DOS ADESIVOS PARA MADEIRA (Ax.9)						
TIPO DE RESINA USADA	CUSTO/kg. PESO LIQ. ¢ de Su\$**	CUSTO/kg. DO ADESIVO ¢ de Su\$*	CUSTO/m ² LINHA ADS. ¢ de Su\$	USO PRINCIPAL	PROPRIEDADE PRINCIPAL	LIMITAÇÃO PRINCIPAL
Formaldeído urea, união primaria	prens. quen 25.0-39.0 prens. frio 25.0-39.0	6.0-10.0 10.2-15.6	1.9-2.6 3.0-4.8	madeira a madeira, uso interior	facil penetração, boa adesão	pouca durabilidade
Furfurilato de formaldeído urea	50.0-60.0	46.0-56.0	11.7-17.5	madeira a plástico uso interior	pouco fissuramento boa adesão ao plástico	tempo longo de cura
Fenol-formaldeído	49.0-55.0	13.0-17.0	3.0-4.0	compensado exter.	alta durabilidade	tempo longo de cura
Melamina formaldeído	90.0-100	63.0-69.4	15.0-27.0	madeira a madeira, reformas	adesão, cor, durabilidade	custo alto, difícil limpeza, curado quent.
Melamina-urea	50.0-60.0	40.0-44.0	9.7-11.1	encolado exterior	durabilidade	custo
Formaldeído-resorcinol	124-130*	124-130	25.0-35.0	madeira a madeira, exter. laminado	curado a frio, durabilidade	custo, odor
Fenol-resorcinol 10/90	75.0-93.0	72.0-87.2	20.0-25.0	madeira a madeira, exter. laminado	curado a quente, durabilidade	custo, odor
Emulsão de acetato de polivinila	90.0-110	50.0-60.0	25.0-30.0	madeira a madeira, uso interior		falta de H ₂ O e resistência ao calor
Formaldeído creosoto	50.0-60.0	-----	-----	madeira a madeira, uso exterior		
Nitrocelulose	80.0	70.0	-----	madeira a madeira, uso interior		
Formaldeído-urea, união secundaria	39.0	25.0	10.0-15.0	madeira a madeira, uso interior	rapidez e boa adesão	pouca durabilidade

(Ax.9) SKEIST, I. - Op. cit.

* Líquido

** resina sólida

QUADRO 24 - CLASSIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA ADESIVOS (Ax.10)

Tipos e classes	Alguns exemplos químicos mais característicos		Aspecto e cor	Consistência ou natureza de filme	Sólidos totais (%)	Sensam e endurecime
Acrílica Acrílicos Metacrílicos Cianocrílicos Acrilonitrilos Acrilamidas Diésteres acrílicos Co-polímeros acrílicos e carboxílicos (carboxilato-ísteros) (*) (*) Ver também borracha nitrilo.	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ | \\ \text{CH} - \text{COOR} \end{array} \right]$ Poliacrílicos $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} \\ | \\ \text{COOR} \end{array} \right]$ Polimetacrilatos $\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{O} - (\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O})_n - \text{C} - \text{CH}_2 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]$ Diéster: metacrilato-dimetacrilato $\left[\begin{array}{c} \text{CN} \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} \\ | \\ \text{COOR} \end{array} \right]$ Poliacrilamidas $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ \text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} \\ | \quad | \\ \text{CN} \quad \text{CN} \end{array} \right]$ Poliacrilonitrilo	$\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{O} - (\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O})_n - \text{C} - \text{CH}_2 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]$ Diéster: metacrilato-dimetacrilato $\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{O} - (\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O})_n - \text{C} - \text{CH}_2 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]$ Copolímero vinilacetato-ethylhexacrilato $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ \text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} \\ | \quad | \\ \text{CN} \quad \text{CN} \end{array} \right]$ Poliacrilonitrilo	Clara, leitosa Clara Clara Cores escodiga Clara	Líquida Xaropes, fino Líquido Líquido e xarope Xaropes, médio	40-55 25-40 100 100 100	Temperatura normal Temperatura normal Temperatura normal Temperatura normal Temperatura normal
Albuminídica Sangue cristalizado (bovinos)	$\left[\begin{array}{c} \text{R}_1 \\ | \\ \text{NH} - \text{CO} - \text{NH} - \text{CH} - \text{CO} - \text{N} \\ | \\ \text{CO} \\ | \\ \text{NH} \\ | \\ \text{R}_2 - \text{CH} \end{array} \right]$ Albumina do sangue (proteína do tipo esférica)	(cerca de 100 grupos carboxido e 50 grupos amino por molécula, 4 sub-unidades de polipeptídeos; cadeia em espiral)	Castanho-avermelhado Castanho-avermelhado	Xarope fino Xarope a pasta fina	12-20 Variável	Temperatura normal Temperatura normal (ou a quente)
Alquídica Glicerifalatos Glicofalatos	$\left[\begin{array}{c} \text{O} - \text{CO} - \text{R} - \text{CO} - \\ | \\ \text{O} (\text{C}_6\text{H}_4)_n \text{CH} (\text{C}_6\text{H}_4)_m - \text{O} - \text{CO} - \text{R} - \text{CO} - \end{array} \right]$ Resina alquídica (geral)	$\left[\begin{array}{c} - \text{CO} - \text{COOCH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{O} - \\ | \\ \text{OCCOR} \end{array} \right]$ Glicerifalato	Clara ou pigmentada	Xarope Sólida	40-80 100	Temperatura normal Temperatura de fusão
Anilídica Amidas Dextrinas Amídicos	$\left[\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{OH} \\ | \\ \text{HC} - \text{O} \\ | \\ \text{HC} - \text{O} \\ | \\ \text{HC} - \text{O} \\ | \\ \text{OH} \quad \text{OH} \end{array} \right]$ Amidos (acetilinos)	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \quad | \\ \text{C} - \text{C} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \quad | \quad | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]$ Pol-isopreno (cis)	Clara ou pigmentada	Xarope Sólida	40-80 100	Temperatura normal Temperatura de fusão
Amidas Dextrinas Amídicos	$\left[\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{OH} \\ | \\ \text{HC} - \text{O} \\ | \\ \text{HC} - \text{O} \\ | \\ \text{HC} - \text{O} \\ | \\ \text{OH} \quad \text{OH} \end{array} \right]$ Amidos (acetilinos)	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \quad | \\ \text{C} - \text{C} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \quad | \quad | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]$ Pol-isopreno (cis)	Parda	Pasta, gel Xarope fino a médio	80-95 20-60 100	Temperatura normal Temperatura normal Temperatura normal
Borracha, natural e dióxido Gutapercha (CIS) Balata (Trans.) Borracha clorada e hidroclorada	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} = \text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH} - \\ | \quad | \quad | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]$ Pol-isopreno (cis)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{C} = \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]$ Isopreno manufaturado (63,3% cis)	Castanho a preto Pálida a creme	Xarope fino a pasta macia Xarope a pasta fina	30-80 38-60	Normal Normal

(Ax.10) INEC. - Op. c.c.c.

QUADRO 24 - contn...

Tipo e classe	Alguns representantes químicos mais comuns (lata)	Variedades na aplicação	Aspecto e uso	Quantidade em percentagem de filme	Sólidos totais (%)	Temperatura e endurecimento
Borrachas sintéticas Estireno-butadieno Puros Modificados e carbonilados	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>BUNA S, SBR</p>	1 - Dispersão aquosa (látex). 2 - Solução orgânica. 3 - Solução, modificada a poliisobutileno. 4 - Filme, sensível à pressão.	Clara e creme Creme-escuro a preto Clara e translúcida Clara	Xarope médio a pasta fina Xarope fino a pasta espessa Xarope fino 0,025 mm	38-59 50-60 30-37 100	Temperatura normal. Temperatura normal (e vulcanização) Temperatura normal Temperatura normal
Neoprene Solúveis (AC e AD) Bipolimeros fenólicos	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>NEOPRENO, CR (poliisopreno)</p>	1 - Solução orgânica. 2 - Solução, contacto. 3 - Filme suportado, activado c/ solvente. 4 - Filme suportado, activado pelo calor.	Perda a castanho Perda a castanho Perda Perda	Xarope fino a pasta macia Xarope fino a médio 0,127-1,016 mm 0,380-0,760 mm	20-53 18-36 100 100	Normal a 130 °C Normal a 95 °C Normal 120-175 °C
Acrílico Alto teor de acrilonitrilo Médio teor de acrilonitrilo Carboxílicos (Mycar 1072)	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>butadieno-acrilonitrilo</p>	1 - Dispersão aquosa (látex). 2 - Solução orgânica. 3 - Filme suportado, activado c/ solv. ou calor. 4 - Filme livre, activado c/ solvente ou pelo calor.	Perda Perda a castanho-escuro Perda a castanho Perda a castanho	Xarope a pasta fina Xarope fino a médio 0,38-0,76 mm 0,05-0,20 mm	30-60 20-37 100 100	Normal Normal a 163 °C Normal a 93-176 °C Normal a 93-176 °C
Nitrilo/Fenólica Bipolímico com 4:1 até 1:1 de fenolico-nitrilo	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>butadieno-nitrilo - Fenólica</p>	1 - Solução orgânica. 2 - Filme suportado. 3 - Filme livre. 4 - Filme composto (com uma face epoxi).	Âmbar a preto Perda a castanho Perda a castanho Castanho (lado nitrilo)	Sem dados	16-35 100 100 100	138-218 °C 138-218 °C 138-218 °C 177 °C
Polibutadieno	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>Polibutadieno</p>	1 - Solução orgânica.	Clara	Sem dados	5-10	140-155 °C
Poliisobutileno (Butilo) Baixo P. M. Médio P. M. Alto P. M.	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>Poli isobuteno - isopreno</p>	1 - Solução orgânica (catalisador dixitima). 2 - Dispersão aquosa (látex).	Translúcida e âmbar Branco leitosa	Xarope Sem pasta	20-40 —	Temperatura normal; ou vulcanização Temperatura normal
Caseína Caseína láctea	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{H} - \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ | \\ \text{H} \end{array} \right]_m$ <p>Proteína animal linear (cadeias inter cruzadas pelo P)</p>	1 - Solução aquosa (látex).	—	—	—	Temperatura normal

QUADRO 24 - cont.

Tipo e classe	Alguns exemplos sintéticos mais característicos	Vantagens na aplicação	Aspecto e cor	Consistência ou aparência do filme	Sólidos totais (%)	Sensação e endurecimento
Colofônias Ésteres Éteres Hidrox-ésteres Carboxi-ésteres	Alguns exemplos sintéticos mais característicos: (a) acetocelulose (b) nitrocelulose (c) metilcelulose (d) carboximetilcelulose (e) benzilcelulose (f) hidroetilcelulose (g) acetobutirato de celulose (h) carboximetilcelulose (i) hidroetilcelulose	1 - Solução orgânica (*) (ésteres, etilcelulose) 2 - Solução aquosa (metilhidrocélulose e carboximetilcelulose) 3 - Fuso a quente (etilcelulose) (*)	Clara e ambar Clara, leitosa —	Xarope e gel Xarope fino e pasta fina Sólida	18-35 Variável (geralmente baixo) 100	Temperatura normal Temperatura normal Amolecimento
Colofônias Abietatos Goma-éster Adições abietomálicas, e fenólicas	Ácido abietico Goma-éster (gibbericabietato) Adição abieto-maleica	1 - Solução orgânica (*) 2 - Solução aquosa (leite fina) 3 - Fuso a quente (*)	— — —	— — —	— — —	Temperatura normal; ou fuso pelo calor
Cumarona Resina cumarona-indeno	Indeno Cumarona	(*) Normalmente como agente de pegajosidade, ou em mistura com outros colantes.	— —	— —	— —	Temperatura normal; ou fuso pelo calor
Epoxídicas Alifáticas Bis-epi-líquidas Bis-epi-sólidas Peróxidas Modificadas: Epi-fenólicas Epi-PVAc Epi-polissulfuro Epi-poliâmida Epi-acetal	Grupo epi Grupo bisfenol-hidroxiéter Resinas bisfenol-epoxidadas (bis-epi) Epi-epi-glicidamina Epi-epi-novolac Tetra-epitetrafenil etano (sólida) Epi-epi-peroxida (líquida)	1 - Solução orgânica (*). 2 - Fuso a quente (*). (*) Usualmente como modificadora de outros polímeros colantes.	— —	— —	— —	Temperatura normal; ou fuso pelo calor

(*) Geralmente em mistura com outros polímeros colantes ou plastificantes.

(*) Normalmente como agente de pegajosidade, ou em mistura com outros colantes.

(*) Usualmente como modificadora de outros polímeros colantes.

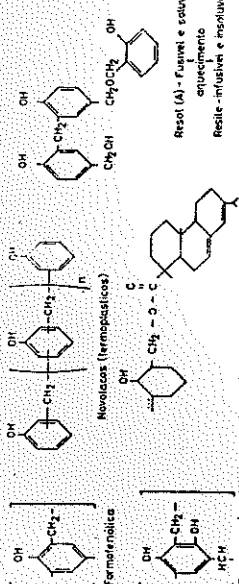
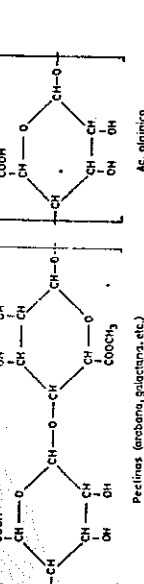

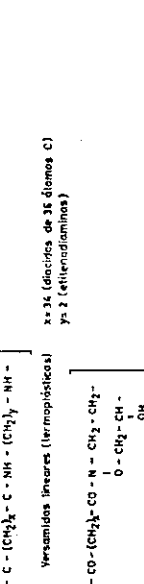
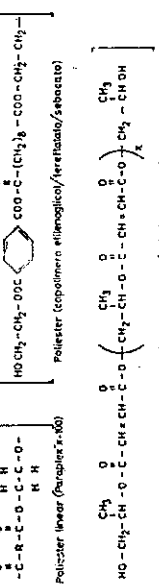
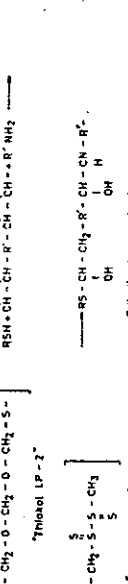
Modificador
 1 - Nada.
 2 - A - Polivinilo.
 3 - Res. fenólica.
 4 - Polissulfuro líquido.
 5 - Nitrilo.
 6 - Silicões.
 7 - Nylon solúvel (metoxi-metilo).

Endurecedor
 a - Poliamida
 b - Hexametileno-tetramina
 c - Amina terciária
 d - Sal de amina terciária
 e - Amina aromática
 f - Amida cadeia curta
 g - Poliamidas
 h - Anidrido

Filter
 A - Nada
 B - Mineral
 C - Mineral titatró-pico
 D - Pigmento metálico
 E - Preto (flocos)
 F - Fibra de vidro

Qualificação à temperatura normal; ou termendurecíveis.
 - Líquida ou em solução para aplicações específicas.
 - Filmes suportados
 - Filmes livres
 - Filmes compostos (com uma face epi)

QUADRO 24 - cont.

Tipo e classe	Alguns agrupamentos químicos mais característicos	Verificações na aplicação	Aspecto e cor	Compatibilidade na espessura de filme	Solúveis em água (%)	Sensação e endurecimento
Fenóis e resorcinol Novolacs e resóis (A) Sulfonados Resorcinol Resorcinol/ferol Fenol/epi (*) (*) Ver aplicações.	 <p>Formolfenólicos Novolacs (termostáticos) Resol (A) - Fusível e solvente endurecimento Resol - infusível e insolúvel Adição orto- fenólica Fenolresorcinol</p>	1 - Dispersão aquosa (*). 2 - Solução alcoólica (francamente alcalina). 3 - Solução alcoólica (c/ endurecedor ácido). 4 - Dispersão aquosa-alcoólica (c/ endurecedor para formaldeído (**)).	Com endurecedor hexametileno tetramina. Resorcinol e resorcinol-ferol.	Xarope espesso a pasta fina; ou em pó para sinterização (fenólica).	40-50 75-95 50-65	105-115 °C 115-130 °C Normal Normal ou 60-80 °C
Gomas-resinas Arábica Tragaçanto Goma-laca Alginatos	 <p>Pectínicos (arabano, galactana, etc.) Ac. algínico</p>	1 - Solução orgânica (goma-laca). 2 - Solução aquosa (goma-arábica). 3 - Fusão a quente (goma-laca).	Âmbar Amarelada Castanha	Xarope fino Xarope fino Pelitos, barras	40-60 40-60 100	Temperatura normal Temperatura normal 138 °C
Grude e gelatina Cola de ossos Cola de peles Gelatinas	 <p>Proteína animal - Gelatina</p>	1 - Solução aquosa (alcalina). 2 - Glicificada, para fusão a quente.	Farda Amarelo-acastanhado	Xarope (vários graus) Gel sólido	25-66 95-100	Normal Temperatura de fusão
Poliâmidas Versamidas lineares Versamidas epoxidadas	 <p>x=36 (diácidos de 36 átomos C) y=2 (etilendiaminas)</p>	1 - Filme suportado (*), acetivado por calor. 2 - Solução nos álcoois (epoxidadas) (**).	— —	— —	100 —	90-190 °C —
Poliéster Lineares insaturados Copolímeros tereftalato Vinil tolueno/butadieno («Butons») (*) (*) Ver borrachas sintéticas.	 <p>Poliéster linear (Duroplax 100) Poliéster insaturado (propileno glicol/ácido maleico)</p>	1 - Solução no estireno (*). 2 - Solução de copolímero tereftalato. 3 - Filme de poliéster copolimerizado.	Pelha Clara	Xarope fino a espesso Xarope fino 0,006 mm	100 15-30 100	Normal, e 120 °C 93-176 °C 162-176 °C
Poliisulfuratos Líquidos (thiokol LP-2) Sólidos (thiokol LP-3) Mistos (epoxiaminados)	 <p>Thiokol LP-2 Thiokol LP-3</p>	1 - Endurecidos com dióxido de chumbo. 2 - Endurecidos com cromato de chumbo. 3 - Polissulfureto-epoxi (cat. e amínia).	Perde Preto Metálico, etc.	Pasta (*) Pasta (*) Pasta (*)	100 100 100	Normal Normal Normal

(*) Muitas vezes também usadas como modificadoras para colas de tubo a quente.
 (**) Como reativos para as resinas epoxidadas através dos grupos amínia.

(*) Mais recentemente está a utilizar-se também o dióxido de titânio em vez de estireno, e catalisadores sensíveis aos U.V. tais como a benzoina em conjunto com o peróxido de benzoina.

(*) Os polissulfuretos, assim como a resina epoxi, são líquidos; juntamente com os aditivos formam pastas ou mastiques.

QUADRO 24 - cont....

Tipo e classe	Alguns exemplos químicos mais característicos	Variedades na aplicação	Aspecto e cor	Características por aparência de filme	Sólidos totais (%)	Temperatura de endurecimento
Silícões Hidropoliisiloxano Acilopoliisiloxano Polifeniloxisiloxano Vinilaciloxisiloxano Cianolquissiloxano	$\begin{matrix} R & & R \\ | & & | \\ -Si-O- \\ | & & | \\ R & & R \end{matrix}$ Polissiloxanos $NH_2-R-C-N-R-COOH$ (Aminoácidos) $H_2C-C-NH_2$ (Aldeído) $R-OH$ Polissiloxanos-OH desidratado (2 partes) $R-OH$ Polissiloxanos-OH desidratado (1 parte) $R-OH$ Polissiloxanos-OH desidratado (1 parte) $R-OH$ Polissiloxanos-OH desidratado (1 parte)	1 - Solução orgânica (sensível à pressão). 2 - Sem solvente (1 parte). 3 - Solução orgânica (1 parte). 4 - Solução orgânica (2 partes).	Amarelado Branca ou corada Branca ou corada Clara e pálida	Xarope Pasta Pasta fina Xarope fino	40 100 35 75	70-100 °C Normal, ou 107-121 °C 107-121 °C Normal
Soja Farinha	$H_2C-C-NH_2$ (Aldeído) $R-OH$ Polissiloxanos-OH desidratado (2 partes) $R-OH$ Polissiloxanos-OH desidratado (1 parte)	1 - Solução ou dispersão aquosa, alcalina.	Clara	Xarope a pasta fina	20-45	Normal (ou a quente) (*)
Ureia e melamina Res. líquidas, não modificadas Res. líquidas modificadas Res. em pó Misturas ureia/PVAc	$\begin{matrix} NH & -CH_2- \\ | & \\ C=O \\ | & \\ -NH \end{matrix}$ Ureia-formol (UF) $\begin{matrix} NH & -C & -NH_2 \\ | & & | \\ N & & N \\ | & & | \\ NH & & NH \end{matrix}$ Melamina-formol (MF) $\begin{matrix} NH & -C & -NH_2 \\ | & & | \\ N & & N \\ | & & | \\ NH & & NH \end{matrix}$ Melamina-formol (MF) $\begin{matrix} NH & -C & -NH_2 \\ | & & | \\ N & & N \\ | & & | \\ NH & & NH \end{matrix}$ Melamina-formol (MF)	1 - Solução ou dispersão aquosa (c/ catalisador separado). 2 - Pó seco (com ou sem catalisador incorporado) (*). 3 - Dispersão aquosa-alcool furfúrico (c/ endur, se parado).	Branco leitoso Clara a pálida Branca ou leitosa	Xarope ou pasta fina Xarope Xarope	60-72 60-72 50-70	Normal ou 120 °C Normal (**) Normal
Ureano (isocianatos) Poli-isocianatos Poli-isocianato-poliéster Poli-isocianatos bloqueados Elastômeros-poli-isocianatos	$\begin{matrix} O & & O \\ || & & || \\ -C & - & -C- \\ | & & | \\ NH & & NH \end{matrix}$ Ureia-formol (UF) $\begin{matrix} NH & -C & -NH_2 \\ | & & | \\ N & & N \\ | & & | \\ NH & & NH \end{matrix}$ Melamina-formol (MF) $\begin{matrix} NH & -C & -NH_2 \\ | & & | \\ N & & N \\ | & & | \\ NH & & NH \end{matrix}$ Melamina-formol (MF)	1 - Solução de dl ou poli-isocianatos (edemodura) (*). 2 - Solução de isocianatos + substâncias hidroxiladas. 3 - Solução de dl ou poli-isocianato + elastômero convencional (primários adesivos). 4 - Solução ou dispersão aquosa de poli-isocianato bloqueado com fenol ou álcool (TDI).	(a) 1 parte: Ex. - Pré-polímero di-isocianato/poliéster em solução com catalisador básico (hidroxi-dimetilamina). (b) 2 partes: Ex. - Glicol-diisocianato (DESMODUR HHS) em solução a 75 % no acetato de etila, e poliéster (DESMODUR 900) em solução a 70 % no acetato de etila. (Outros exemplos de resinas isocianatois semelhantes são MONDUR/MULTRON (M/M); DESMOCOL/DESMODUR, etc.) Aplicada na superfície dum di: aderentes e decois, contactase o outro aderente e sec-se ao ar ou vulcanize: Ex. - Dimetilamino di-isocianato (MDI-50) + Borracha (natural, estireno, neopreno) em solução no benzeno, xileno ou ortodiolobenzeno. Aplicada aos aderentes que o di: de contacto são aquecidos para decompor o agente bloqueador e regenerar o isocianato livre. Ex. - (a) metileno-bisfenol-A fenil carbamato (4-Hy/one NP) bloqueado com fenol (A cura a 60 °C de cerca de 30 min a 140 °C); (b) solução de isocianato bloqueado com álcool (pentanol) e solução de resina vermicida (cura a 100-150 °C).	Branco leitoso Clara a pálida Branca ou leitosa	60-72 60-72 50-70	Normal ou 120 °C Normal (**) Normal

(*) Ex.: Tolueno-diisocianato; Hexametileno-diisocianato; Trifenilmetileno-diisocianato, etc.

QUADRO 24 - cont.....

Tipo e classe	Alguns representantes sulfônicos mais característicos	Variedades na aplicação	Aspecto e cor	Consistência ou espessura de filme	Sólidos totais (%)	Secagem e endurecimento
<p>Vinílica</p> <p>Acetato de polivinilo e copolímeros; clorato de polivinilo e copolímeros.</p> <p>Alcool polivinílico de vários graus em álcool.</p> <p>Acetato de polivinilo de vários graus em acetato e oxidrilo.</p>	<p> $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{O} \quad \text{O} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]$ Acetato de polivinilo (PVAc) </p> <p> $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{OH} \end{array} \right]$ Alcool polivinílico (PVA) </p> <p> $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{O} \end{array} \right]$ Tereftalo de polivinilo (PVC) </p> <p> $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2- \\ | \quad | \quad | \\ \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \\ \text{C} \\ \text{CO}_2\text{R} \end{array} \right]$ Butirato de polivinilo (PVBu) </p> <p> $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH} \\ | \quad | \quad | \\ \text{H} \quad \text{O} \quad \text{OH} \end{array} \right]$ PV Alcool (hidroxiacetato) </p> <p> $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH} \\ | \quad | \quad | \\ \text{H} \quad \text{O} \quad \text{CO} \end{array} \right]$ PV Acetato </p> <p> $\left(\begin{array}{c} \text{Acetal} \\ \text{OH} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right)$ R. Acetal - epoxi (construções anidrido maleico) </p> <p> $\left(\begin{array}{c} \text{Acetal} \\ \text{OH} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right)$ Bipolímero endurecido </p>	<p>1 - Dispersão aquosa de PVAc e copolímeros (1 parte e 2 partes).</p> <p>2 - Solução a solvente orgânico.</p> <p>3 - Solução de clorato de polivinilo (PVC).</p> <p>4 - Fusão a quente de resina sólida.</p> <p>5 - Filme solúvel em água re-humidificável (tipos altos em éster).</p>	<p>Leitosa</p> <p>Ambar</p> <p>Amarelo-pálido</p> <p>Claro</p> <p>Amarelo-pálido</p>	<p>Xarope a pasta</p> <p>Xarope médio a fino</p> <p>Xarope fino</p> <p>Sólido termoplástico</p> <p>Folícula sólida</p>	<p>30-60</p> <p>12-25 35-55</p> <p>4-100</p> <p>100</p> <p>100</p>	<p>Normal</p> <p>Normal</p> <p>Normal</p> <p>60-90 °C (*)</p> <p>Normal</p>
<p>Vinilo-fenólica</p> <p>Acetato de polivinilo. Fenólicas (resas ou no-voacas).</p>	<p> $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2- \\ | \quad | \quad | \\ \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \\ \text{C} \\ \text{C}_6\text{H}_4 \end{array} \right]$ Polivinilo butacal - fenólico </p> <p> $\left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{OH} \\ \text{OH} \end{array} \right)$ Bipolímero, Polivinilo (Ac. Al) / Fenólica </p>	<p>1 - Solução a solvente orgânico.</p> <p>2 - Filme livre, activado pelo calor.</p> <p>3 - Filme livre, activado com solvente.</p> <p>4 - Filme suportado.</p>	<p>Ambar</p> <p>Ambar + cores</p> <p>Ambar + cores</p> <p>Ambar</p>	<p>Xarope médio e espesso</p> <p>0,025 - 0,05 mm</p> <p>0,025 - 0,05 mm</p> <p>0,33 - 0,76 mm</p>	<p>20-40</p> <p>100</p> <p>100</p> <p>100</p>	<p>140-176 °C</p> <p>140-176 °C</p> <p>Normal (*)</p> <p>140-176 °C</p>

(*) Temperatura de selagem pelo calor. O ponto de amolecimento das resinas vinílicas varia entre 65 e 230 °C conforme se trate de acetato, álcool, ou acetol de polivinilo.

QUADRO 25 -

ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIO DOS ADESIVOS INDUSTRIAIS
(Ax.11)

Títulos	Normas	Resumo do ensaio
I — Ensaio químicos e físico-técnicos		
1 — Determinação da matéria volátil e dos sólidos totais das colas industriais.	ASTM D1489-69: ASTM D1490-64: ASTM D1582-60: Nonvolatile Content of Aqueous Adhesives; Urea-Phormaldehyde; Phenol, Resorcinol and Melamine Adhesives. F. S. Method 4021: ASTM D 553-42: «Total Solids Content of Adhesives.	As técnicas variam um pouco consoante os tipos de colas mas o método de ensaio consiste essencialmente em determinar a perda da massa específica de uma amostra apropriada, por aquecimento em estufa a uma temperatura e durante um tempo especificado (geralmente a $105 \pm \pm 0,2$ °C até massa específica constante).
2 — Determinação qualitativa dos amidos nas colas e adesivos.	ASTM D1488-60: «Amylaceous Matter in Adhesives».	A substancia amilácea à pesquisada qualitativamente com solução de iodo, depois de se ter dissolvido a matéria resinosa da cola com solvente apropriado e separado o amido por decantação.
3 — Determinação do teor em inertes («filler») das colas fenólicas e melamina.	ASTM D1579-60: Filler Content of Phenol, Resorcinol and Melamine Adhesives.	Dissolução da matéria resinosa de uma amostra da cola com álcool metílico (fenol. e resorc.) ou com ac. acético e álcool etílico (melamina); filtração, lavagem e pesagem do resíduo.
4 — Determinação da humidade nas colas animais granuladas ou em pó.	B. S. 647: 1959: Sampling and Testing Glues. Meth. for Determination of Moisture Content.	A 1 g da amostra, pesada em cápsula de porcelana, junta-se 10 ml água destilada; deixa-se amolecer e dissolver a cola colocando em banho de vapor. Conserva-se até evaporação da maior parte da água e se forme uma película delgada e uniforme. Seca-se na estufa e determina-se a perda de massa específica, em percentagem.
5 — Determinação de gorduras nas colas animais em pó.	B. S. 647: 1959: Sampling and Testing Glues. Meth. for Determination of Grease.	Saponificação com OHKN da amostra de cola dissolvida em água e evaporação em banho de vapor até secagem do resíduo. Dissolve-se o resíduo com ClH dil. e extrai-se com porções de 50 ml de solução de éter etílico em funil de decantação. Evapora-se o éter, pesa-se o resíduo e calcula-se a percentagem em relação à amostra.
6 — Determinação de cloretos nas colas animais em pó.	B. S. 647: 1959: Sampling and Testing Glues. Meth. for the Determination of Chlorides.	Pesam-se 5 g da amostra de cola, pulverizada, para uma cápsula de Pt e amolece-se com 10 ml de água destilada. Aquece-se em banho de vapor e junta-se óxido de cálcio; seca-se e calcina-se o resíduo até queimar toda a matéria orgânica. Extrai-se o resíduo com água, filtra-se, neutraliza-se o filtrado com ácido acético. Titula-se com sol. de NO_3Ag usando cromato de potássio como indicador.
7 — Determinação do anidrido sulfuroso nas colas animais em pó pelo processo volumétrico.	B. S. 647: 1959: Sampling and Testing Glues. Meth. for the Determination of Sulphur Dioxide.	Ataca-se uma amostra de 20 g da cola, que se dissolve em 75 ml de água, com ácido sulfúrico em aparelho de destilação apropriado. Arrasta-se o destilado sulfuroso com corrente de vapor para um recipiente receptor onde se titula com OHNa, usando vermelho de metilo e azul do metileno como indicadores.
8 — Ensaio de formação de espuma das colas animais.	B. S. 647: 1959: Sampling and Testing Glues. Meth. for the Determination of Foam.	Consiste em determinar o volume de espuma que se forma por agitação vigorosa, em condições especificadas, de uma amostra de 5 g da cola dissolvida em 50 ml de água numa proveta graduada.

Títulos	Normas	Resumo do ensaio
I — Ensaios químicos e físico-técnicos (continuação)		
9 — Determinação das cinzas nas colas animais.	B. S. 647: 1959: Method for the Determination of Ash.	Incineram-se cuidadosamente 5 g da amostra e calcina-se até queimar todo o carbono. Deixa-se arrefecer em excitador e pesa-se o resíduo de cinzas.
10 — Determinação da qualidade de conservação das colas animais.	B. S. 647: 1959: Method for the Determination of Keeping Quality.	Consiste essencialmente em determinar o período até liquação, putrefação ou formação de bolores de uma solução da cola numa cápsula «Petri», mantida a 37 °C numa incubadora.
11 — Determinação do pH das colas e películas colantes.	ASTM D1583-61: F. S. Meth. 175 e 4011: B. S. 647: 1959: Meth. for the Determination of pH of Adhesives and Dry Adhesive Films.	A amostra para ensaio é preparada, conforme o tipo da cola, com o fim de obter uma película colante seca que se pulveriza. Toma-se uma amostra (2 g ou múltiplo) que se suspende em 10 ml de água destilada fria num recipiente de vidro. Tapa-se o recipiente e só se abre quando para medição do pH com um potenciómetro aferido usando o eléctrodo de vidro.
12 — Resistência ao gelamento das colas animais com o gelómetro de Bloom.	B. S. 647: 1959: Method for the Determination of the Jelly Strength.	O gelómetro de Bloom dá a massa em gramas necessária para produzir, por meio de um mergulhador de 12,7 mm de Ø, uma descida de 4 mm num gel de 12,5 % de concentração mantido a $10 \pm 0,1$ °C durante 16 a 18 horas.
13 — Determinação do ponto de amolecimento das colas animais pelo método do tubo de ensaio.	B. S. 647: 1959: Method for the Determination of Melting Point.	Consiste em preparar um gel a partir de uma solução especificada da cola dentro de um tubo de ensaio. Coloca-se num banho termostático numa posição inclinada a 45°, e elevando gradualmente a temperatura verifica-se o ponto de amolecimento usando um indicador corado na superfície do gel para indicar o seu movimento através do tubo.
14 — Determinação da absorção de água das colas animais — Diluibilidade.	B. S. 647: 1959: Method for the Determination of Water Absorption.	Consiste em determinar o teor de água absorvida por uma cola, em pó ou granulada, sob condições especificadas de tempo e temperatura. Dissolve-se a cola em grande excesso de água e retira-se e mede-se a quantidade de água sobrenadante.
15 — Ensaio de manchamento das colas vinílicas para madeira.	B. S. 3544: 1962: Methods of Test for Polyvinyl Acetate Adhesives for Wood. Test for Staining.	O ensaio consiste em verificar a intensidade da mancha provocada por gotas da cola depositadas em papel de filtro impregnado com ácido tânico, em comparação com gotas de uma solução de sulfato férrico e amónio preparada recentemente.
16 — Estabilidade ao arrefecimento de colas vinílicas para madeira.	B. S. 3544: 1962: Methods of Test for Polyvinyl Acetate Adhesives for Wood. Freeze and Thaw Treatment.	O ensaio consiste essencialmente em sujeitar um certo volume de cola (geralmente 200 ml), contido num recipiente de aço inox., ao arrefecimento a -10 ± 2 °C durante 18 h, e depois levar à temperatura normal sem agitar. O ciclo repete-se 3 vezes para as colas vinílicas.
17 — Determinação da densidade das colas líquidas (peso do litro).	ASTM D1875-61: Density of Adhesives in Fluid Form.	Determinação da massa, em gramas, de um volume de 100 ml da cola usando um recipiente apropriado, munido de tampa, e à temperatura de 25 °C.

Títulos	Normas	Resumo do ensalo
I — Ensaios químicos e físico-técnicos (continuação)		
18 — Determinação da consistência ou viscosidade das colas e adesivos.	ASTM D1084-63: B. S. 647: 1959: Consistency of Adhesives.	Especificam-se para o efeito diversos tipos de viscosímetros quer rotativos quer de efluxo, ou de torsão. Um dos mais usados parece ser o viscosímetro rotativo tipo «Brook-field» ou marca equivalente. As medições viscosimétricas são usualmente efectuadas a 23 °C, salvo no caso de utilização de um viscosímetro de tubo em U especificado pela B. S. 647, em que a medição se faz a 60 °C.
19 — Peso de película seca e de película húmida por unidade de superfície (rendimento).	ASTM D898-51: ASTM D899-51: Applied Wenght per Unit Area of Dried Adhesive Solids; or of Liquid Adhesives.	O peso da película seca por unidade de superfície é obtido por $M = \frac{(m_2 - m_1) \times 317,5}{M \times a}$ em que: m_2 = massa específica do provete depois de aplicação da cola e eliminação do solvente por secagem; m_1 = massa específica do provete padrão não revestido; a = área do provete de ensaio (em polegadas quadradas); n = número de superfícies a que se aplicou a cola consoante indicação do fabricante.
20 — Determinação da vida útil das colas líquidas ou pastosas.	ASTM D1338-56: Working Life of Liquid or Paste Adhesives.	Consiste em verificar a variação da consistência (processo A), ou no poder de colagem (processo B), sofrido pela cola depois de suportar um certo número de ciclos de agitação (5 seg) e repouso (10 min) em determinadas condições de temperatura e humidade.
21 — Ensaio de penetração das colas em material poroso.	ASTM D1916-61: Penetration of Adhesives.	Utiliza-se um «penetrómetro» apropriado, por meio do qual a cola (0,1 ml), quando colocada na base de um martelo-pilão, é comprimida na sua queda sobre uma pilha de 6 papéis de filtro assentes na base do aparelho. As manchas são realçadas com corante e mede-se a sua transmissão luminosa com um colorímetro-densitómetro.
22 — Análise dos amidos e dextrinas para colas e adesivos.	TAPPI, Monograph Series N.º 26. «Testing of Adhesives».	As determinações mais importantes para o seu controle são: acidez ou alcalinidade (pH); solúvel na água fria; teor em dextrina; determinação dos açúcares redutores; fluidez alcalina (método do funil padrão).
23 — Análise dos grudes e gelatinas animais.	B. S. 647: 1959: Sampling and Testing Glues.	As principais características a determinar são: humidade; gorduras; cloretos e sulfuretos; formação de espuma; cinzas; concentração hidrogeniônica (pH); resistência do gel; viscosidade a determinada concentração.
24 — Análise da caseína para colas e adesivos.	ASTM Standard Methods of Test of Caseine and Similar Protein Materials.	Os ensaios mais importantes a efectuar são: dimensão das partículas; humidade; admissão de álcali; teor de azoto; gorduras; acidez livre; viscosidade da solução em água.
25 — Análise do acetato de polivinilo para colas e adesivos.	TAPPI, Monograph Series N.º 26. «Testing of Adhesives».	As propriedades mais importantes para controle das emulsões são: sólidas totais; viscosidade; dimensão das partículas (microscopia); conteúdo de monómero; estabilidade ao bórax; estabilidade mecânica e de diluição; tolerância de solvente; tèmpera ou tempo aberto («rate-of-set»).

Títulos	Normas	Resumo do ensaio
I — Ensaio químicos e físico-técnicos (continuação)		
26 — Análise do látex natural.	ASTM D1076-68: Specification and Methods for Concentrated, Ammonia Preserved, Creamed and Centrifuged Nat. Rubber Latex.	As principais características a determinar são: sólidos totais; conteúdo de borracha; alcalinidade total; viscosidade de «Brookfield» sedimentação; teor de coágulo; estabilidade mecânica; densidade; ácidos gordos voláteis.
27 — Análise química dos produtos de borracha e da borracha natural, e dos co-polímeros estireno-butadieno.	ASTM D297-68: ASTM D1278-68a: Chemical Analysis of Rubber Products ASTM D1416-68: Analysis of Solid Styrene-Butadiene Copolymers.	Prescrevem-se os métodos gerais de análise extractiva com solventes; determinações do enxofre total, orgânico e inorgânico; cinzas e sua análise; negro de fumo; azoto; etc. Identificam-se e estimam-se os polímeros de borracha natural e sintética (IR, CR, NR, IIR e SBR) por métodos químicos e instrumentais.
II — Ensaio de resistência mecânica das colagens		
28 — Resistência à tracção das colagens. Tensão rotura.	ASTM D2094-62: ASTM D2095-62: ASTM D897-49: ASTM D1344-57: Fed. Spec. Methd. N.º1011.1 e 1012: Tensile Properties of Adhesives and for Rubber Like Materials. DIN 53237	Consiste em determinar o esforço de tensão do provetes colados topo a topo, com formas e dimensões especificadas consoante a natureza dos materiais aderentes. Utiliza-se uma máquina de tracção capaz de medir o esforço com a precisão de $\pm 1\%$ com capacidade de carga e velocidade de afastamento especificadas e com registo automático da força de rotura. A resistência à tensão da colagem obtém-se dividindo a força de rotura pela área da superfície colada (kg cm^{-2}).
29 — Resistência das colagens ao corte por esforço de tracção.	ASTM D906-49: ASTM D1002-64: Strength Properties of Adhesives in Plywood Type Construction in Shear by Tension Loading, and in Metal-to-Metal. B. S. 647: 1959: B. S. 1444:1948 B. S. 1203 DIN 53254	Determina-se a força necessária para rotura da ligação quando o provete especificado é sujeito a um esforço de tensão aplicado no mesmo plano da colagem sendo esta efectuada por sobreposição das faces dos aderentes em certa extensão (geralmente 2,5 ou 1,25 cm, face a face). A máquina de tracção deve possuir características especificadas e condições para controlar a razão de aplicação da força, e registo da carga de rotura, auto-alinhamento das garras, etc. Na norma DIN a superfície de colagem em sobreposição é de 2 cm^2 ($1 \times 2 \text{ cm}$).
30 — Resistência das colagens ao corte por esforço de compressão.	ASTM D905-49: ASTM D2182-63: Fed. Spec. Meth. 1031: Strength Properties of Adhesives in Shear by Compression Loading.	Determina-se a resistência ao corte das colagens de madeira e de metal a metal por meio de compressão aplicada no mesmo plano da colagem sobre o provete colado face a face e com a forma e dimensões especificadas. A aplicação da força de compressão faz-se à razão de $0,38 \text{ mm/min}$ nas colagens de madeira, e a 1200 a 1400 psi/min (85 a $100 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$) nos provetes metálicos. A força de corte é calculada em kg/cm^2 em função da área colada.
31 — Resistência das colagens sujeitas à flexão.	ASTM D1184-55: Fed. Spec. Meth. N.º 1021 Strength of Adhesive Bonds on Flexural Loading	Fixa-se o processo de ensaio para determinar, comparativamente, a resistência das colagens quando sujeitas à flexão. Tanto o provete com a técnica de ensaio são fixados de modo a provocar apreciável proporção de força de corte na linha de colagem, ou pelo contrário reduzi-las ao mínimo. Os resultados tornam-se comparativos por meio da utilização de fórmulas especificadas.

Títulos	Normas	Resumo do ensaio
II — Ensaio de resistência mecânica das colagens (continuação)		
32 — Ensaio de resistência ao choque das colagens.	ASTM D1062-51 : Fed. Spec. Meth. N.º 1071 Impact Strength of Adhesives.	Consiste, essencialmente, em determinar a energia absorvida por um provete padrão colado e acondicionado em condições especificadas, quando sujeito a uma pancada, na direcção do plano de colagem, dada pelo martelo de uma máquina de ensaio do tipo pendular.
33 — Resistência à clivagem das colagens metal a metal.	ASTM D1062-51 : Fed. Spec. Meth. N.º 1071 : Clivage Strength of Metal-to-Metal. Adhesive Bonds.	Determinam-se as propriedades de clivagem de provetes metálicos colados face a face, aplicando um esforço de tensão, a uma velocidade de cruzeiro que não exceda 1,27 mm/min, até provocar a separação dos aderentes metálicos. A cisão pode ser coesiva, adesiva, ou de contacto, conforme se der na própria camada de cola, ou se reconhecer falta de aderência desta ao metal, ou tiver havido carência de película colante nas interfaces em contacto.
34 — Resistência das colagens à fadiga.	Fed. Spec. Meth. N.º 1061 : Fatigue Strength of Adhesives.	Preparam-se provetes colados em sobreposição e ensaiam-se em máquina apropriada e capaz de exercer um esforço axial cíclico, à razão máxima de 3600 ciclos/min até cisão ou falhanço da colagem. A cisão deve ser registada, consoante o tipo, em coesiva, adesiva, ou de contacto.
35 — Resistência das colagens à despelagem (esgarre).	ASTM D903-49 : ASTM D1876-61 : ASTM D1781-62 : Fed. Spec. Meth. 1041-1 : Fed. Spec. Meth. 1042 : Peel or Stripping, Strength of Adhesive Bonds.	Determina-se a força necessária para separar duas partes coladas quando a ponta de uma delas for fixada na garra fixa de uma máquina de tracção e a outra ponta flexível se puxar, com a garra móvel, no plano da colagem e a um ângulo de 180° (despelagem simples); ou quando as duas partes forem puxadas, simultaneamente, na direcção perpendicular ao plano de colagem (despelagem em T). A tensão aplicada deve medir-se e registar-se com máquina de tracção adequada e com a precisão de $\pm 1\%$. O ensaio pode fazer-se também pelo processo do «tambor rolante», com a ponta do aderente flexível ligada a um cilindro que gira, puxado pela máquina, a uma velocidade de 2,5 cm/min.
36 — Ensaio de pegajosidade das colas e adesivos de contacto, ou sensíveis à pressão.	ASTM D1878-61 : Pressure-Sensitive Tack of Adhesives.	Determina-se a força necessária para separar o adesivo, espalhado sobre uma chapa de vidro colocada num dos pratos de uma máquina de tracção e que se leva a contacto, durante 1 seg, com um punção especificado preso a um apoio, que desliza verticalmente numa corrediça, e que liga a uma célula amplificadora e registadora, ou a um osciloscópio, onde se regista essa força de rotura da ligação.
37 — Ensaio de adesão das colas baseadas em borrachas.	ASTM D816-55 : ASTM D429-68 : Standard Methods of Testing Rubber Cements; and of Vulcanized Rubber to Metal.	Prescrevem-se três métodos: (A) determinação da adesão por tensão aplicada normalmente ao plano de colagem (os provetes formados por um cilindro de borracha a cujas faces se colam dois discos de metal); (B) adesão por corte em que o provete é formado por duas barras coladas face a face e a tensão é aplicada no mesmo plano da linha de colagem; (C) adesão por despelagem de uma tira («Friction Test») colada a outra tira, em sobreposição, até 5 cm de um dos extremos — cada uma destas pontas que ficam livres prende-se às garras da máquina de tracção que faz o registo autográfico do esforço.

Títulos	Normas	Resumo do ensaio
III — Ensaio de comportamento e durabilidade das colagens		
38 — Envelhecimento das colagens pela luz artificial do arco voltaico.	ASTM D904-57: Determining the Effect of Artificial (Carbon-Arc Type) on the Permanence of Adhesives.	Prescrevem-se as condições para exposição de colas, na forma de películas transparentes ou translúcidas, à acção da luz artificial do arco voltaico no aparelho «Atlas single and twin arc», segundo um número de ciclos desejável. A degradação é avaliada pela perda de resistência mecânica da colagem depois de sujeição ao ensaio.
39 — Ensaio de exposição atmosférica de juntas de colagem ou de estruturas-coladas.	ASTM D1828-61: Atmospheric Exposure of Adhesive-Bonded Joints and Structures	Os provetes colados são expostos no exterior em suportes apropriados, com a inclinação de 45° e a face a ensaiar voltada ao sul. As atmosferas internacionalmente adoptadas são: (1) atmosfera rural; (2) atmosfera industrial; (3) atmosfera marítima; (4) atmosfera tropical. A degradação sofrida é avaliada em comparação com provetes padrão não sujeitos a ensaio e pode recorrer-se a qualquer ensaio de resistência mecânica.
40 — Resistência das colas para madeira a condições cíclicas de envelhecimento laboratorial.	ASTM D1183-55: ASTM D1151-61: Ted. Spec. Meth. 2051: Resistance of Adhesives for Wood to Cyclic Laboratory Aging Conditions.	Prescrevem-se os processos de ensaio para determinar a resistência das colagens em condições de serviço a diferentes temperaturas e humidades relativas, ou em imersão em água pura ou salgada e secagem em estufa. Os ciclos de exposição são muito variados (interior e exterior) e pode recorrer-se a qualquer ensaio de resistência mecânica para avaliar a extensão da degradação.
41 — Resistência das colagens à acção da água ou a condições cíclicas de humidade e secagem (ciclos diversos).	Fed. Spec. Meth. 2031: Resistance of Adhesive Bonds to Water (wet strength).	Os provetes colados podem ser sujeitos a qualquer dos seguintes ensaios: (1) imersão contínua em água destilada durante 48 h \pm 24; (2) imersão em água fervente (34 \pm 10 min); (3) acção cíclica de humidade e secagem (4 ciclos diferentes); (4) acção cíclica de água fervente e secagem (2 ciclos diferentes); (5) condições cíclicas de secagem, imersão em água e pressão de vácuo (3 ciclos diferentes).
42 — Resistência das colagens a reagentes químicos.	ASTM D896-66: Fed. Spec. Meth. 2011-1: Resistance of Adhesive Bonds to Chemical Reagents.	O ensaio consiste em sujeitar cada provete colado à acção do reagente especificado, contido em recipiente apropriado, de modo que fique totalmente imerso nele durante 7 dias a temperatura normal. Permitem-se outras temperaturas e tempos de ataque. A avaliação do ataque efectua-se pela perda de resistência mecânica da colagem que for especificada.
43 — Resistência das colagens ao nevoeiro salino.	ASTM B117: Salt Spray (Fog) Testing.	Os provetes colados são sujeitos, continuamente, à acção de uma atmosfera saturada de nevoeiro salino, provocada pela pulverização de água salgada artificial em câmara de ensaio fechada e bem vedada. A intensidade da degradação sofrida pela colagem pode avaliar-se pela variação na resistência mecânica da colagem antes e depois de sujeita ao ensaio.
44 — Resistência das colas e das colagens à deterioração biológica.	ASTM D1286-57: Effect of Mold Contamination of Permanence of Adhesive Preparations and Adhesive Bonds.	Toma-se uma amostra de cerca de 1400 g da cola — ou preparam-se provetes colados para o ensaio de resistência mecânica que for seleccionado — e sujeita-se à acção de culturas de «Aspergillus niger» e «Penicillium luteum» que são inoculadas na cola ou nos provetes colados. Depois de um tempo especificado determina-se a variação da viscosidade sofrida pela cola, ou da resistência mecânica no caso da colagem.

QUADRO 26 - FORMULAÇÕES DE ADESIVOS DE SANGUE

- COMPOSIÇÃO DO SANGUE SECO SOLÚVEL DE ANIMAIS BOVINOS

Proteína solúvel	72.5%
Nitrogênio total	15.7%
pH.	7.4%
Conteúdo de umidade	6.4%

FORMULAÇÃO Nº 1 - ADESIVO DE SANGUE (com 4 a 8 horas de vida útil)

Água a 63 ^o C	100.0 kg.
Sangue solúvel de vaca	40.0 kg.
Serragem de madeira	9.0 kg.
Óleo de pinho ou desespumador equivalente	1.0 kg.
<i>Misturar durante 10 minutos</i>	
Água fria	175.0 kg.
Óleo de pinho ou desespumador equivalente	1.0 kg.
<i>Misturar durante 2 minutos</i>	
Ca1 hidratada em água a 18 ^o C até 21 ^o C	10.5 kg.
<i>Misturar durante 2 minutos</i>	
Solução de hidróxido de sódio a 50%	7.5 kg.
<i>Misturar durante 2 minutos</i>	
Solução de silicato de sódio	17.5 kg.
<i>misturar durante 5 minutos.</i>	

FORMULAÇÃO 2 - ADESIVO DE SANGUE (com 6 a 12 horas de vida útil)

Água à temperatura entre 16 e 21 ^o C	150.0 kg.
Sangue seco de vaca com baixa solubilidade	37.5 kg.
Serragem de madeira	10.5 kg.
Óleo de pinho (<i>misturar durante 3 minutos</i>)	2.0 kg.
Água à temperatura entre 16 e 21 ^o C (<i>misturar durante 2 min.</i>)	165.0 kg.
Ca1 hidratada em água à temperatura entre 16 e 21 ^o C	25.0 kg.
Solução de hidróxido de sódio a 50% (<i>misturar durante 10min.</i>)	8.0 kg
Solução de silicato de sódio	17.5 kg
<i>Misturar durante 5 minutos</i>	

QUADRO 27 - ADESIVO DE NITRATO DE CELULOSE

	PARTES EM PESO
Nitrato de celulose com 11.4 % nitrogênio (base seca)	100
Alcanfor	40
Alcool etílico (desnaturalizado)	300
Acetona	75
Acetato de amido	165

QUADRO 29 - CORREÇÃO DOS DADOS DE ENSAIO PARA UMIDADE DE 12% ESC. NATURAL

τ_{ac} (N/cm ²)x10	τ_w (N/cm ²)x10	σ_{wc} (N/cm ²)x10	MD (N/cm ²)x10	P_{ac} %	σ_{tn} (N/cm ²)x10	σ_{cn} (N/cm ²)x10
92.968	222.606	534.615	43357.6	74.179	95.982	150.333
76.864	196.641	457.143	53090.8	64.282	79.492	131.061
86.408	232.685	554.784	33753.5	95.552	88.262	115.742
83.555	220.841	442.276	48190.1	79.906	86.625	144.235
62.694	178.975	591.388	20528.3	102.308	65.656	111.520
74.528	221.034	502.262	69328.4	50.655	76.166	109.031
86.209	249.168	577.660	62957.8	77.733	83.677	91.562
61.194	168.621	463.625	45410.7	85.115	61.685	165.797
43.067	220.078	618.937	29521.8	79.719	46.162	197.192
92.424	204.656	587.592	52656.6	70.218	92.073	106.655
53.856	193.187	505.449	48225.9	59.497	57.105	95.420
39.831	168.055	530.268	40212.7	59.873	40.270	124.505
70.034	190.780	595.437	31614.7	78.883	73.897	96.615
96.843	195.226	601.477	48072.3	101.633	102.010	159.775
78.774	174.893	464.349	42922.8	90.480	81.745	124.878
79.954	261.373	507.897	43515.3	78.887	82.690	152.739
54.042	184.274	363.723	62287.0	79.960	55.880	129.362
75.327	163.558	606.139	52746.4	79.937	78.707	87.632
86.408	220.490	664.694	63570.9	90.686	92.089	145.230
77.425	166.280	633.127	34759.1	43.444	79.730	59.485
108.264	202.366	564.502	50153.5	92.051	112.324	195.959
60.124	163.425	491.489	36969.6	96.757	62.032	123.743
56.500	170.597	470.711	68678.2	40.260	53.963	138.243
88.967	242.467	627.127	56606.5	89.771	92.939	72.301
67.307	208.950	659.001	42574.6	80.293	71.201	128.035
91.101	212.489	654.973	46664.9	91.502	97.518	175.930
63.927	172.032	566.150	50413.1	60.247	66.434	104.054
61.063	165.177	535.584	49295.6	88.362	63.772	81.715
77.491	167.955	472.890	41931.6	70.210	80.654	87.396
49.348	146.644	403.439	37159.9	68.776	50.884	130.683
66.689	148.828	542.883	40368.3	80.614	69.612	163.532
78.847	175.752	475.940	46445.3	93.200	82.593	107.122
49.656	165.122	556.412	56367.6	71.179	52.172	116.768
65.261	169.678	481.387	37735.4	87.443	67.269	135.678
66.353	127.859	582.044	51095.6	74.396	62.024	144.211
77.592	199.716	495.694	50828.1	81.262	76.471	129.515
59.498	181.359	523.611	76923.9	69.316	58.459	97.159
53.325	136.618	519.282	47531.2	63.288	55.950	99.884
53.142	170.341	489.941	46173.5	74.270	55.799	105.361
69.685	165.306	564.206	57405.1	50.928	73.937	115.805
59.888	185.990	468.443	47009.2	81.273	63.080	112.902
74.008	256.798	614.178	47323.9	75.878	77.745	53.684

QUADRO 29 - Continuação CORREÇÃO DOS DADOS.....

τ_{ac} (N/cm ²)x10	τ_w (N/cm ²)x10	σ_{wc} (N/cm ²)x10	MD (N/cm ²)x10	P_{ac} %	σ_{tn} (N/cm ²)x10	σ_{cn} (N/cm ²)x10
35.3072	172.775	533.586	39807.6	75.078	36.5296	57.215
42.8492	160.533	504.339	36001.9	74.155	44.3327	77.701
23.6931	175.418	473.193	42593.7	38.410	24.5134	72.688
55.1497	203.554	588.224	69106.1	95.040	57.0590	43.033
22.2461	172.791	457.865	35879.6	46.132	23.0162	55.708
48.3936	148.707	450.222	40418.3	82.372	50.0689	74.264
47.9488	175.713	507.928	43862.8	79.892	49.6090	114.349
44.9450	125.623	452.540	37282.8	84.576	46.5010	95.017
30.9931	168.422	605.063	37639.6	49.889	32.0661	51.845
60.9246	178.929	479.075	48714.4	89.441	63.0339	36.050
48.4895	166.118	594.411	40813.0	85.867	50.1683	78.577
19.9170	156.348	554.247	56239.1	39.932	20.6066	37.182
44.8556	173.229	423.834	40161.7	69.323	46.4085	84.510
36.9818	180.544	554.992	41611.8	68.588	38.2622	44.005
73.7009	226.909	487.534	51304.3	92.648	76.2525	44.680
47.7020	208.862	469.394	50458.9	49.817	49.3535	128.423
22.9452	172.025	467.619	65518.1	38.355	23.7396	152.322
81.5551	178.681	550.467	42786.8	90.010	84.3787	89.370
26.5558	150.133	466.856	52306.1	60.286	27.4752	98.728
53.7713	202.083	542.355	45121.2	68.806	55.6331	77.301
56.3387	165.395	571.635	31949.6	79.879	58.2893	142.507
87.9410	180.518	472.342	61542.9	89.221	90.9853	69.273
52.1507	182.355	385.869	45918.3	80.469	53.9561	97.988
29.2216	173.536	389.053	41155.6	55.994	30.2334	40.720
34.3771	190.597	385.118	60495.3	51.643	35.5672	56.082
55.2861	168.254	404.317	43845.5	87.982	57.2003	69.437
25.4429	188.986	435.146	34196.1	50.235	26.3237	72.833
42.7479	171.713	364.804	36025.0	60.350	44.2279	59.929
27.1557	169.198	403.083	40913.4	49.592	28.0958	87.136
51.5863	168.626	465.679	31690.1	72.676	53.3721	89.591
45.8277	151.915	251.301	37490.2	74.364	47.4144	93.428
57.6541	188.800	366.692	33932.6	84.212	59.6501	38.504
43.8002	192.899	419.422	47928.0	70.022	45.3166	84.644
60.4682	191.932	402.048	42235.3	90.386	62.5616	62.207
27.5719	193.768	455.232	77074.3	50.443	28.5266	38.394
76.2863	192.700	442.009	34874.9	89.681	78.9277	50.224
70.5541	173.955	528.963	50509.0	95.234	73.0073	119.432
23.7604	190.921	508.466	60652.3	41.334	24.5830	91.296
36.9531	150.533	387.257	52618.8	57.692	38.2325	41.230
25.1282	153.955	221.338	28580.6	40.828	25.9982	70.978
79.2494	150.320	416.241	31336.4	90.133	81.9932	59.882
67.7637	151.302	453.130	39075.1	88.286	70.1100	85.765
58.6351	157.886	452.134	40335.9	89.577	60.6650	78.421
52.2336	188.009	479.549	47192.6	95.206	54.0420	32.275
52.9250	202.413	501.035	31856.4	94.069	54.7575	132.159
34.6079	161.163	379.093	30959.8	81.631	35.8061	47.353
93.9971	182.405	629.899	55058.9	102.210	97.2515	83.595
45.4760	172.515	524.731	33472.0	90.361	47.0505	123.621
31.9932	176.813	573.644	50029.7	72.570	33.1009	109.811
38.3880	177.197	624.545	30508.0	60.281	39.7169	73.693
100.256	177.177	634.700	46355.2	96.822	105.855	106.303
88.163	191.867	555.778	38878.1	75.357	92.724	80.835
79.844	198.229	651.566	53425.1	67.519	83.436	119.296
68.492	221.444	538.752	40867.9	76.528	72.084	63.073
97.322	194.757	567.713	66150.2	92.713	101.386	123.277
92.013	182.757	613.116	59094.4	84.765	96.467	145.566
122.703	194.022	527.692	63318.4	104.025	125.900	79.698
35.870	203.100	685.139	27313.3	57.580	37.979	119.774
100.515	191.830	534.428	58425.5	92.960	104.409	121.769
33.151	227.421	514.251	26743.0	49.452	34.275	151.093
66.570	155.623	423.386	60651.8	64.511	68.573	182.188
111.532	211.944	512.109	66313.9	94.618	116.320	74.320
65.192	208.535	382.049	46816.3	87.207	68.095	102.835
119.861	192.497	557.339	59985.5	93.948	125.113	89.442

QUADRO 29 - Continuação CORREÇÃO DOS DADOS.....

τ_{ac} (N/cm ²)x10	τ_w (N/cm ²)x10	σ_{wc} (N/cm ²)x10	MD (N/cm ²)x10	P _{ac} %	σ_{tn} (N/cm ²)x10	σ_{cn} (N/cm ²)x10
66.608	188.926	474.172	43629.2	79.215	68.393	87.522
66.032	210.677	509.041	41504.4	89.218	67.871	84.520
39.915	155.634	368.104	73795.3	46.378	41.238	126.325
45.506	180.717	647.457	37679.0	58.027	47.450	97.146
58.876	171.228	526.096	35546.0	98.914	60.922	98.801
75.878	152.007	517.778	51522.1	93.240	79.005	158.797
71.956	181.802	535.211	45600.2	69.745	74.552	107.404
50.238	167.695	556.464	35786.9	52.856	51.610	64.589
61.898	180.029	624.441	39972.5	63.628	63.620	99.646

QUADRO 30 - CORREÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALH: E COMPRESSÃO

τ_w N/cm ² x10	σ_{wc} N/cm ² x10	τ_w N/cm ² x10	σ_{wc} N/cm ² x10	τ_w N/cm ² x 10	σ_{wc} N/cm ² x10
168.254	468.443	222.606	404.317	185.990	534.615
188.986	614.178	196.641	435.146	256.798	457.143
171.713	655.700	232.684	364.804	177.176	554.784
169.197	534.778	220.840	403.083	191.867	442.276
168.626	651.566	178.974	465.679	198.228	591.388
188.799	538.752	221.034	366.692	221.444	502.262
192.899	567.713	249.168	419.422	194.756	577.660
193.767	613.116	220.078	455.232	182.756	618.937
192.700	527.692	168.621	442.009	194.022	463.625
173.954	685.139	204.656	528.963	203.099	587.592
190.920	534.428	193.187	508.466	191.829	505.449
150.533	514.251	168.055	387.257	227.421	530.268
150.319	423.386	190.780	416.241	155.623	595.437
151.301	512.109	195.225	453.130	211.944	601.477
157.885	457.640	174.893	452.134	189.191	464.349
172.774	382.049	261.372	533.586	208.534	507.897
160.532	557.339	184.273	504.339	192.497	363.723
200.628	473.193	163.557	649.115	175.417	606.139
164.590	588.224	220.490	572.734	203.553	664.694
187.954	457.865	166.280	547.097	172.790	633.127
201.855	450.222	202.365	736.989	148.707	564.502
204.213	507.928	163.425	549.563	175.712	491.489
206.009	452.540	170.597	779.526	125.622	470.711
155.660	605.063	242.467	571.338	168.422	627.127
167.769	479.075	208.949	514.937	178.929	659.001
209.495	594.411	212.488	612.583	166.118	654.973
181.698	554.247	172.032	729.711	156.348	566.150
258.726	423.834	165.177	677.849	173.229	535.584
209.052	554.992	167.955	589.590	180.544	472.890
178.981	487.534	146.644	557.774	226.909	403.439
219.886	469.394	148.828	667.108	208.861	542.883
195.848	467.619	175.752	716.182	172.024	475.940
160.384	550.467	165.121	569.048	178.680	556.412
143.911	466.856	169.678	582.884	150.133	481.387
147.988	542.355	127.859	586.678	202.082	481.044
158.540	571.635	199.716	582.680	165.395	495.694
169.615	472.342	181.358	590.343	180.518	523.611
171.411	385.869	136.618	561.488	182.355	519.282
163.765	389.053	170.340	588.645	173.535	489.941
173.458	385.118	165.306	636.086	190.596	564.206

QUADRO 30 - Continuação CORREÇÃO DOS RESULTADOS.....

τ_w (N/cm ²) x 10	σ_{wc} (N/cm ²) x 10	τ_w (N/cm ²) x 10	σ_{wc} (N/cm ²) x 10
210.676	509.041	201.603	627.443
155.634	368.104	207.785	608.865
180.717	647.457	208.026	609.392
171.227	526.096	167.341	583.384
202.943	384.849	137.697	532.514
152.006	517.778	221.787	630.868
181.801	535.211	172.090	676.275
167.695	556.464	195.359	565.641
180.028	624.441	198.076	595.033
121.597	578.044	143.537	589.546
164.822	431.301	164.429	456.469
197.241	492.823	276.589	631.501
152.034	367.104	217.223	643.380
167.260	545.882	142.779	484.541
154.659	434.584	181.022	555.710
165.464	500.001	154.980	476.578
179.992	539.859	164.576	613.257
174.787	464.885	155.779	532.376
176.043	637.588	171.043	478.033
160.028	579.538	214.545	492.190
155.835	543.348	200.849	601.749
139.707	413.742	188.950	444.676
190.594	475.937	140.834	491.182
132.446	409.609	132.666	338.795
189.427	518.114	160.954	576.386
142.943	549.315		
165.269	365.117		
136.418	480.749		
163.691	458.778		
163.202	466.382		
157.321	581.140		
162.745	580.629		
188.008	479.549		
202.413	501.035		
161.163	379.093		
182.405	629.899		
172.515	524.731		
207.158	397.771		
160.757	514.566		
177.381	550.330		
176.813	573.644		
177.196	624.545		

QUADRO 31 - PROGRAMA PARA A MINI-CALCULADORA HP-41-CV PARA DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES NA FLEXÃO

PRP "TEN"
 01 LBL "TEN"
 02 RCL 03
 03 RCL 06
 04 +
 05 RCL 07
 06 +
 07 STO 11
 08 RCL 03
 09 2
 10 /
 11 -
 12 RCL 03
 13 RCL 02
 14 *
 15 STO 12
 16 *
 17 RCL 05
 18 RCL 06
 19 X12
 20 *
 21 2
 22 /
 23 +
 24 ENTER↑
 25 RCL 05
 26 RCL 06
 27 *
 28 STO 13
 29 RCL 12
 30 +
 31 /
 32 STO 14
 33 RCL 11
 34 X<>Y

35 -
 36 STO 15
 37 RCL 03
 38 2
 39 /
 40 -
 41 X12
 42 RCL 03
 43 X12
 44 12
 45 /
 46 +
 47 RCL 12
 48 *
 49 RCL 14
 50 RCL 06
 51 2
 52 /
 53 -
 54 X12
 55 RCL 06
 56 X12
 57 12
 58 /
 59 +
 60 RCL 13
 61 *
 62 +
 63 STO 16
 64 RCL 09
 65 RCL 10
 66 *
 67 2
 68 /
 69 X<>Y

70 /
 71 STO 11
 72 RCL 15
 73 RCL 14
 74 X<>Y
 75 GTO 01
 76 X<>Y
 77 ENTER↑
 78 ENTER↑
 79 RCL 03
 80 LBL 02
 81 -
 82 RCL 11
 83 *
 84 TONE 0
 85 STOP
 86 X<>Y
 87 RCL 11
 88 *
 89 TONE 4
 90 TONE 9
 91 STOP
 92 +
 93 2
 94 /
 95 RCL 03
 96 *
 97 TONE 9
 98 TONE 1
 99 TONE 6
 100 STOP
 101 RCL 01
 102 2
 103 /
 104 /
 105 GTO 02

106 LBL 01
 107 ENTER↑
 108 ENTER↑
 109 RCL 06
 110 STO 03
 111 RCL 05
 112 STO 02
 113 RDN
 114 RCL 04
 115 STO 01
 116 RDN
 117 GTO 02
 118 LBL 03
 119 BEEP
 120 END

ENTRADA

- RCL 01 = 1_{c1}
- RCL 02 = $b_{c1} \cdot 1_{c1}/2$
- RCL 03 = h_{c1}
- RCL 04 = 1_{c2}
- RCL 05 = b_{c2}
- RCL 06 = h_{c2}
- RCL 07 = h_p
- RCL 08 = b
- RCL 09 = 1_1
- RCL 10 = F

EXECUÇÃO

SAIDA

- XEQ "TEN" → σ_1
- R/C → σ_c
- R/C → F_2
- R/C → τ_{ab}

QUADRO 32 - RESULTADOS DO PROGRAMA TEN - HP-41CV

INCLINAÇÃO FIBRAS	σ_1	σ_c	F_2	τ_{ab}	σ_1	σ_c	F_2	τ_{ab}
	N/cm ²	N/cm ²	N	N/cm ²	N/cm ²	N/cm ²	N	N/cm ²
	VIGA 1				VIGA 2			
0	1191.8	2401.5	2267.0	975.0	1395.3	2683.5	2404.3	1011.3
15	1153.5	2251.6	2153.0	926.0	1179.7	2387.5	2211.6	951.2
30	1121.6	2101.5	1980.0	851.6	825.6	1521.4	1337.8	679.1
45	1011.5	1931.6	1771.5	761.9	592.1	860.1	842.2	358.4
60	971.8	1852.5	1680.3	722.7	339.5	498.5	494.4	222.2
75	891.6	1631.8	1445.3	621.6	177.3	337.7	293.5	133.4
90	832.4	1511.6	1375.5	591.6	286.1	587.2	567.6	242.6
	VIGA 3				VIGA 4			
0	1150.0	2291.2	2236.8	1033.1	1032.4	1934.7	1661.8	772.8
15	1007.0	2060.0	2070.3	1022.3	1165.2	2219.8	1966.4	993.1
30	876.9	1989.8	1892.0	880.0	1181.6	2214.4	1901.8	884.5
45	853.9	1676.3	1644.6	773.9	1301.7	2440.4	2098.6	976.1
60	790.7	1581.5	1542.0	748.5	1181.7	2214.4	1901.8	874.4
75	752.2	1518.3	1509.4	792.6	761.9	1457.4	1287.2	643.6
90	319.9	652.1	656.1	326.4	898.3	1704.6	1496.6	634.2
	VIGA 5				VIGA 6			
0	812.9	1415.5	1114.2	685.7	1042.4	1782.6	1341.8	813.2
15	775.4	1395.7	1085.6	611.6	1109.8	1971.0	1494.2	948.7
30	801.4	1506.6	1269.4	715.1	896.1	1564.6	1181.1	722.4
45	693.3	1226.1	1036.5	609.7	905.1	1553.8	1131.1	675.3
60	283.9	547.4	490.5	280.3	762.8	1298.3	927.5	553.7
75	546.2	969.6	757.9	489.0	388.3	682.6	524.7	361.9
90	524.7	938.5	731.6	418.1	416.3	717.6	544.3	334.9
	VIGA 7				VIGA 8			
0	1072.9	1858.1	1377.6	950.1	921.4	1639.3	1280.3	839.6
15	1190.8	2042.3	1454.9	868.6	942.1	1695.7	1318.9	775.9
30	1099.8	1825.4	1316.4	774.3	983.5	1788.7	1455.4	856.1
45	851.6	1443.1	1032.6	655.6	643.5	1142.4	910.8	535.8
60	585.6	1007.2	716.7	459.4	587.5	1053.3	836.8	499.6
75	458.0	782.6	558.3	366.1	376.0	665.7	520.9	336.0
90	355.7	609.7	434.4	278.5	323.2	581.8	452.5	270.2
	VIGA 9				VIGA 10			
0	964.4	1632.0	1168.4	677.3	1019.1	1755.3	1276.2	746.3
15	1109.5	1891.4	1350.4	771.6	1005.9	1732.5	1232.3	724.9
30	1970.1	1648.4	1178.3	663.8	1009.2	1728.6	1286.8	735.3
45	833.4	1421.6	1014.7	624.5	1041.8	1768.3	1292.6	783.4
60	701.9	1191.5	852.0	532.5	506.9	880.6	645.2	385.2
75	333.8	557.7	392.3	265.9	285.6	492.3	361.7	226.1
90	286.0	477.4	324.4	202.8	285.0	500.2	380.8	224.0

QUADRO 33 - PROGRAMA PARA A MINICALCULADORA HP-41-CV PARA A DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES DE TORÇÃO

01+LBL "TORC"	22 STOP	49 /
02 RCL 02	23 STO 14	49 ENTER:
03 RCL 05	24 X<>Y	50 X12
04 +	25 /	51 0.10
05 2	26 RCL 11	52 *
06 /	27 *	53 X<>Y
07 STO 11	28 2	54 0.22
08 3	29 *	55 *
09 YX	30 TONE 0	56 -
10 RCL 03	31 TONE 9	57 0.32
11 RCL 05	32 STOP	58 +
12 +	33 RCL 02	59 RCL 12
13 12	34 RCL 03	60 X12
14 /	35 +	61 RCL 11
15 *	36 RCL 05	62 *
16 RCL 03	37 +	63 *
17 RCL 10	38 3	64 RCL 14
18 *	39 /	65 X<>Y
19 2	40 STO 13	66 /
20 /	41 RCL 01	67 BEEP
21 TONE 9	42 RCL 04	68 ENT
	43 +	
	44 3	
	45 /	
	46 STO 13	
	47 X<>Y	

ENTRADA

RCL 01 = l_{c1}
 RCL 02 = h_{c1}
 RCL 03 = b_{c1}
 RCL 04 = l_{c2}
 RCL 05 = h_{c2}
 RCL 06 = b_{c2}
 RCL 07 = b
 RCL 08 = h_p
 RCL 09 = l_1
 RCL 10 = F

EXECUÇÃO

SAIDA

XEQ "TORC"	→	$M_{torç.}$
R/S	→	$\sigma_{max.}$
R/S	→	τ_{ato}

QUADRO 34 - RESULTADOS DO PROGRAMA TORC - HP-41CV

INCLINAÇÃO FIBRAS	M_{torc} KN.cm	σ_{max} N/cm ²	τ_{ato} N/cm ²		M_{torc} KN.cm	σ_{max} N/cm ²	τ_{ato} N/cm ²
		VIGA 1				VIGA 2	
0	22.15	10083.0	1201.6		24.50	9257.2	1141.2
15	21.50	9100.5	1096.3		20.49	8157.0	915.9
30	20.50	8301.6	981.6		12.52	5256.7	755.6
45	18.30	5903.0	721.5		12.88	5393.2	566.8
60	9.50	5409.3	448.9		7.66	5231.6	503.8
75	4.30	3951.6	428.5		2.76	1158.2	131.6
90	3.95	2871.6	386.4		5.45	2095.5	256.1
	VIGA 3				VIGA 4		
0	23.50	9003.0	1061.6		26.69	11618.2	1339.6
15	20.25	8002.0	890.7		18.35	8173.3	955.8
30	18.22	7269.0	761.6		19.69	8610.3	1071.6
45	11.41	4327.3	919.2		12.52	5465.5	760.8
60	7.18	2716.0	375.7		8.28	3524.0	418.5
75	4.60	1699.8	298.4		8.28	3648.1	401.5
90	3.60	1201.6	173.5		7.73	3419.2	376.9
	VIGA 5				VIGA 6		
0	10.12	4628.7	836.3		17.86	8572.8	1218.6
15	9.76	4683.5	708.0		15.35	7923.6	1187.1
30	11.78	5140.4	854.8		11.02	5510.0	820.0
45	9.76	4037.5	744.8		7.22	3614.2	544.3
60	4.60	1943.1	337.4		4.94	2324.5	377.3
75	6.81	3190.1	619.7		3.04	1504.3	297.3
90	6.44	3156.0	493.5		2.28	1152.0	172.3
	VIGA 7				VIGA 8		
0	14.06	7855.9	1165.3		11.71	5566.1	954.5
15	4.75	2534.4	336.4		11.93	5906.7	981.7
30	8.17	4651.8	765.7		10.83	5413.7	819.7
45	6.84	3958.3	619.9		6.59	3162.2	566.8
60	3.80	1920.0	301.6		3.59	1680.2	300.4
75	2.47	1302.7	243.5		3.66	1673.1	298.3
90	2.85	1652.5	287.6		2.93	1420.8	252.7
	VIGA 9				VIGA 10		
0	10.61	5485.0	774.4		13.30	7093.3	1069.6
15	11.71	6373.2	846.4		11.40	5891.9	899.8
30	10.25	5542.9	715.9		9.50	4800.0	817.3
45	9.80	4107.8	767.3		8.36	4275.8	638.5
60	7.68	3985.0	615.4		3.99	2014.2	318.6
75	3.51	1882.2	321.6		3.23	1650.4	261.3
90	2.82	1575.8	237.8		1.71	878.0	138.1

BIBLIOGRAFIA

- (1) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Strength properties of adhesives in shear by compression loading. Philadelphia, PA, 1949. (ASTM D-905-49).
- (2) ADERSON, J.F. & BOWN, H.P. - Adesivos de hule estireno-butadieno. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives., 1962.
- (3) AOUWINK & SALOMON - Adhesion and adhesives . Amsterdam, 1966, v.1.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físico e mecânico de madeiras . MB-26. Rio de Janeiro, ABNT. 1940.
- (5) AUSTRALIAN STANDARD CODE OF PRACTICE FOR USE OF TIMBER IN STRUCTURES: ANON AS-CA65, Sydney, Australia, 1972 (clause 4.10.3.2.).
- (6) BARBOSA, S.A. - Viga de madeira protendida. Orientação Profº João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1982, dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- (7) BJORKSTEN, J. - Cross linkages in protein chemistry. Advances in protein chem., 6: 353-358, 1951.
- (8) BLAIKIE, K.G. & SMALL, M.W.S. - Encyclopedia of chemical technology . New York, Intercience publishers. v.14, p 716 - 723.
- (9) BLAIS, J.F. - Adesivos de resinas amina. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962.
- (10) BOGUE, R.H. - The chemistry and technology of gelatin and glue New York, McGraw-Hill, 1922.
- (11) BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. - Estadistics for experimenters. New York, John Wiley & Sons, 1978.
- (12) BROWN, H.P. & ANDERSON, J.F. - Adesivos de hule nitrilo. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962
- (13) BUREAU OF SHIPS' DEPARTMENT OF NAVY - Boat and ship construction techniques: a manual for its use as a shipbuilding material. Washington, 1962. v.2 (navships 250-336).
- (14) CAESAR, G.V. - Almidón y sus derivados. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962.
- (15) CALIL JUNIOR, Carlito - Silos de madeira. Orientação, Profº

- João Cesar Hellmeister, São Carlos EESC-USP, 1978. dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- (16) CANADIAN STANDARD ASSOCIATION - Definitions and standard test methods of wood adhesives. Ottawa, Canada, 1960 (CSA 0112.0-60).
- (17) CARSWELL, T.S. - Phenoplasts - their structure properties and chemical technology. New York., Interscience publishers , 1947. Chap. IV.
- (18) CASSINELLO, F., - Construcción: carpintaria. Madrid, Rueda , 1973.
- (19) CHUGG, W.A. - Glulam: the theory and practice of the manufacture of glued laminated timber structures. London, Ernest Benn, 1964.
- (20) CORDOVIL, F.A.B. - Projeto e experimentação de pórticos planos de madeira. Orientação Profº João Cesar Hellmeister , São Carlos, EESC-USP, 1977. dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- (21) DeBRUYNE, N.A. - The extent of contact between glue and adherend. Duxford, Aero research, Dec. 1956 (Aero research technical notes, Bull. 168).
- (22) DeBRUYNE, N.A. - The physics of adhesion. Trans. of the plastics institute, 27, 141, Oct. 1959.
- (23) DeBRUYNE, N.A. & HOUWINK, R. - Adhesion and adhesives. New York, Elsevier Publishing. 1951. p 391-392.
- (24) DeLMONTE - The technology of adhesives. Berlin, Nafnir Publ., 1965.
- (25) DEUTSCHE NORMEN DIN 53253 - Bestimmung der Biegezugfestigkeit von schaftverleimungen im zugversuch. Berlin. 1959.
- (26) DRAPER, N.R. & SMITH, H. - Applied regression analysis. New York., John Wiley & Sons, 1966.
- (27) EASTOR, J.E. - The amino acid composition of mammalian collagen and gelatin. Biochem.J., 61: 589-602, 1955.
- (28) EIRICH, F.R. - Rheology theory and application. New York, academic press, 1956. v.1-3.
- (29) FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A.; TOLEDO, G.L. - Estatística aplicada. São Paulo, Atlas, 1978.
- (30) FUSCO, P.B. - Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, EDUSP, McGraw-Hill, 1976.
- (31) GOULD, B. - Everybody needs epoxies. New York, Breskin publi-

cation, 1960.

- [32] HELLMMASTER, J.C. - Sobre a determinação das características físicas da madeira. EESC-USP, 1973 (tese de Doutorado).
- [33] HEMMING, C.B. - Adesivos de resina fenólica. In: SKEIST, I. Handbook of adhesives, 1962.
- [34] HEMMING, C.B. - Adesivos de resina resorcinol. In: SKEIST, I. Handbook of adhesives, 1962.
- [35] HILDEBRAND, J. & SCOTT, R.L. - The solubility of nonelectrolytes. 3ed. New York, Reinhold publishing, 1950
- [36] HOEKSTRA, J & FRITZIUS, U.W. - Rheology of adhesives: in adhesion and adhesives. New York, Elsevier publishing, 1951.
- [37] HOFFMANN, R. & VIETRA, S. - Análise de regressão. São Paulo, EDUSP, 1977.
- [38] HORTEGAL, I.R. - Contribuição ao estudo das pontes pênseis de madeira. Orientação, Profº João Cesar Hellmeister, São Carlos EESC-USP, 1978, dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- [39] HUBBARD, J.K. - Colas animais. In: SKEIST, I. Handbook of adhesives, 1962.
- [40] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Métodos de ensaios adotados pelo IPT para o estudo de madeiras nacionais. São Paulo, IPT, 1956. (boletim 31).
- [41] KASS, R.E. & LAVIN, E. - Wire and wire products. Oct. 1956.
- [42] KOLLMANN, F. - Technologie des holzes und der holzwepkstoffe. Erster band. Berlin, Springer-Berlag, 1951.
- [43] LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Introdução ao estudo e ensaio de colas orgânicas. Lisboa, LNEC., Agosto 1973 (circular de informação técnica).
- [44] LAMBUTH, A.L. - Colas de sangue. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962.
- [45] LAMBUTH, A.L. - Colas de soya. In: SKEIST, I. Handbook of adhesives, 1962.
- [46] LAURIE, A.C. - Materials of the painters craft. London, 1910.
- [47] LAVIN, E. & SNELGROVE, J.A. - Adesivos de acetal polivinilo. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives, 1962.
- [48] LEE, H. & NEVILLE, K. - Epoxy resins. New York, McGraw-Hill, 1957.
- [49] LEICESTER, R.H. - Some aspects of stress fields at sharp notches in ortotropic materials: I. Plane stress. Technol.pap.

div. Forest. Prod. CSIRO Australia nº 57, 1971.

- (50) LEICESTER, R.H. - The size effect of notches. Proceedings Australasian conference on the mechanics of structure and materials, 2. 1969.
- (51) LEME, R. A. - Estatística matemática. São Paulo, Escola Politécnica- USP, 1959. v.II.
- (52) MEGSON, N.J.L. - Phenolic resin chemistry. New York, academic press, 1958 [chap. X].
- (53) MÖHLER, K. - Capacidad de carga de vigas y puntales de sección transversal compuesta y medios de unión flexibles. T.U Karlsruhe, 1956.
- (54) MARQUES, R. - Elementos de estatística. Campinas, Universidade estadual de Campinas, 1969.
- (55) MOLITERNO, A. - Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira. Edgard Blücher, 1981.
- (56) NATIONAL ASSOCIATION OF GLUE MANUFACTURERS - Standard methods (revised) for determining viscosity and Jelly strength of glue. Ind. Eng. Chem., 16, (3): 310, Mar. 1924.
- (57) NEUMAN, R.E. - Amino acid composition of gelatins, collagens, and elastins from different sources. Arch. Biochem., 24:289-298, 1949.
- (58) OBERG, F. R. - Heavy timber construction. American technical society, 1963.
- (59) PAIST, W.D. - Adesivos celulósicos. In: SKEIST, I. Handbook of adhesives. 1962.
- (60) PALINCHAK, S. & YURGEN, W.J. - Adesivos de hule natural y regenerado. Ohio, Battelle memorial institute Columbus.
- (61) PARADINE, M.A. & RIVETT, B.H.P. - Métodos estatísticos para tecnólogos. São Paulo, EDUSP, 1974.
- (62) PAULING, L. - A theory of the structure and process of formation of antibodies. J. Am. Chem. Soc., 62: 2643-57, 1940
- (63) PAYNE, H.F. - Organic coating technology. New York, John Wiley & Sons, 1954. v.1.
- (64) PAULA, E.V.C.M. - Viga vierendeel de madeira. Orientação Profª João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1982. dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- (65) PERRY, T.D. - Modern wood adhesives. New York, Pitman publishing, 1942.
- (66) PHILIPPOFF, W; COOKE, S.B.R.; CADWELL, D.E. - Contact angles

- and surface coverang. Mining. Eng., 4: 283-286, Mai. 1952 (ns. AIME, 93).
- [67] PIGOZZO, J.C. - Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira. Orientação, Profº João Cesar Hellmeister, São Carlos, EESC-USP, 1982, dissertação (Mestre - Engenharia de Estruturas).
- [68] PINTO, M.L. - Flexão em peças de madeira. Orientação, Profº João Cesar Hellmeister. São Carlos EESC-USP, 1983. dissertação (Mestre em Arquitetura).
- [69] POURADIER, J. - Status of knowledge of the constitution of gelatin. Science et indus. Phot., 19:81-91, 1948
- [70] REINHART, F.W. & CALLOMON, I. G. - Survey of adhesion and adhesives. Wadc technical report: 58-540, 1959
- [71] REIS, T. - Introduction a la chimie- physique des surfaces. Paris, Dunod, 1952. v.1.
- [72] RYAN JR., T.A.; LOINER, B.L.; RYAN, B.F. - Minitab - student Handbook. Duxbury press., Massachussets, 1967.
- [73] SALZBERG, H.K. - Adhesivos y colas de caseina. In: SKEIST, I. Handbook of adhesives, 1962.
- [74] SCHIEL, F. - Introdução a resistência dos materiais. São Carlos, EESC-USP, 1982. (fascículos I e II).
- [75] SEGERLIND, L.J. - Shear stresses in adhesive of joints subjected to bending. Purdue University, June 1966. (Unpublished Ph.D. Thesis).
- [76] SIEBETE NEUBEARBEITETE AUFLAGE - Holzbau-taschenbuch. Berlin, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1974.
- [77] SILVA JR., J. F. - Resistência dos materiais. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1974.
- [78] SKEIST, I. - Handbook of adhesives. New York, Reinhold publishing, 1962.
- [79] SKEIST, I. & SOMERVILLE, G.R. - Epoxy resins. New York, Reinhold publishing, 1958.
- [80] SNEDECOR, G.W. - Statistical methods. Ames, Iowa, State University, 1962.
- [81] TIMOSHENKO, S. - Teoria de la elasticidad. Ed. el Ateneo, Buenos Aires, Argentina, 1954.
- [82] TORROJA, E. - Lecciones elementares de elasticidad con aplicación en la técnica de la construcción. Ed. Dossat SA., Madrid, 1945.

- (83) U.S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION - Adhesives, casein-type water-and-mold-resistant. Federal Spec. MMM-A-125, 1955.
- (84) WALSH, H.C. - Cola de pescado. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives., 1962.
- (85) WALSH, P.F. - Cleavege fracture in timber. CSIRO, Australia, [65], 1971. (technology paper div. Forest prod.).
- (86) WALSH, P.F. - Stress intensity factors by a calibrated finite element method. Eng. Mech. J., Dec. 1972.
- (87) WALSH, P.F.; LEICESTER, R.H.; RYAN, A. - The sthenth of glued lap joints in timber. Forest Products Journal, 23 (5), May. 1973,
- (88) WAGNER, M.M. - El fundamento de las especificaciones de la norma alemana DIN 1052 relativas al diseño de piezas estructurales de maderade sección transversal compuesta solicitadas a flección y a compresión. Santiago, Universidade do Chile, seção de construção, 1975 (informe 45).
- (89) WARD, A. G. - The chemical structure and physical properties of gelatin. Photographic Sci., 3:60-67, 1955
- (90) WETZEL, F.H. - Introducción a los adhesivos a base de hule. In: SKEIST, I. - Handbook of adhesives., 1962.
- (91) WILLS, J.H. - Adhesivos inorgánicos y cementos. In: SKEIST, I. handbook of adhesives, 1962.
- (92) YOUNGQUIST, J.A et alii - Design, fabrication, testing and installation of press - lam bridge. USDA-FS-FPL., Mad., Wis., 1979 (paper FPL 332).

