

Márcio Felix de Freitas

**LIGAÇÕES METÁLICAS CONSTITUÍDAS POR
PARAFUSOS AUTO-ATARRAXANTES**

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.

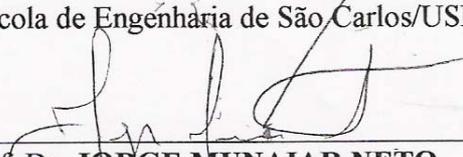
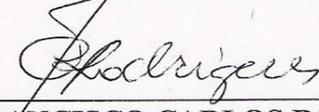
Orientador: Prof. Dr. Maximiliano Malite

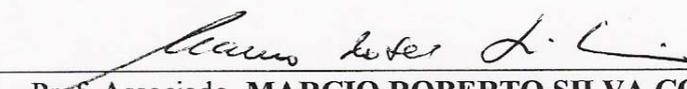
São Carlos
2004

FOLHA DE JULGAMENTO

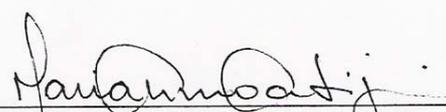
Candidato: Engenheiro **MÁRCIO FÉLIX DE FREITAS**

Dissertação defendida e julgada em 01-09-2004 perante a Comissão Julgadora:

 _____ Prof. Dr. MAXIMILIANO MALITE (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	<u>APROVADO</u>
 _____ Prof. Dr. JORGE MUNAIAR NETO (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	<u>APROVADO</u>
 _____ Prof. Dr. FRANCISCO CARLOS RODRIGUES (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)	<u>APROVADO</u>



Prof. Associado. **MARCIO ROBERTO SILVA CORRÊA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)



Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Ao Senhor meu Deus, e à minha família.

A lua não possui brilho, por não ser estrela. Pequenino astro não iluminado, ele não consegue refletir toda a luz que o sol lhe dá, apesar disso ela impede que as nossas noites sejam escuras. Assim também, eu quero poder refletir parte da luz que recebi em forma de amor, o que faço ao dedicar este trabalho:

A minha família;

À minha amada esposa **Adriana de Paula Almeida Freitas**. Todo meu respeito e meu amor, pela sua força e dedicação em nossa caminhada.

Aos meus filhos **Lucas** e **Regina**, obrigado por ceder esse pai que tanto vos ama, as horas de estudo.

Ao meu pai **Djalma Ferreira de Freitas**. Amo-te e me orgulho de ti. Aprendi contigo o conhecimento mais valioso do que qualquer um, vindo dos diversos professores que tive, você é e sempre será meu maior mestre.

À senhora **Antônia Felix de Freitas**. Minha mãe querida, que me ensinou o verdadeiro sentido de amar, meu amor (reflexo de ti) e minha devoção.

À minha irmã **Adriana Maria Felix Carneiro**. Minha eterna guardiã, amo o teu zelo e tua paixão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- Ao Professor Doutor Maximiliano Malite, meu orientador, apresento meu respeito e gratidão por este passo tão importante para mim;
- À Professora Doutora Ruth de Gouvea Duarte pela sua incomensurável contribuição à minha vida acadêmica e profissional;
- Ao Professor Doutor Jorge Munaiar Neto que acompanhou e contribuiu para o desenvolvimento desta pesquisa, sempre solícito;
- Ao Professor Doutor Antônio Alves Dias por suas sugestões no exame de qualificação;
- Ao Professor Duane Ellifritt PhD que tão prontamente me atendeu e me forneceu seguras e relevantes informações;
- Ao Professor Doutor Francisco Carlos Rodrigues por suas sugestões e, sobretudo por seu incentivo;
- À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pelas bolsas que propiciaram minha formação tanto na graduação quanto no mestrado;
- À PERFILAM S/A Indústria de Perfilados pelo fornecimento de perfis metálicos estruturais para os ensaios desenvolvidos;
- À Metalúrgica MANZATO Ltda pelo fornecimento dos parafusos auto-atarraxantes auto-brocantes utilizados neste trabalho;

Aos meus amigos, que apesar de suas individualidades os agradecerei em grupos, caso contrário eu teria que escrever outra monografia só para listá-los aqui:

Irmãos do PUR (Projeto Universidades Renovadas), em especial do GPP – São Carlos (Grupo de Partilha e Perseverança), que como irmãos me ajudaram na minha formação como um profissional do reino de Deus.

Colegas da UFAL – Universidade Federal de Alagoas

Colegas da USP – Universidade de São Paulo

Fé: "A fé em ação é amor, e amor em ação é trabalho - portanto, o" modo de se viver "é fruto da fé."

Sucesso: "Não fazemos coisa alguma. É Deus quem faz tudo. Toda a glória deve voltar para Ele. Deus não me convocou para ser bem sucedido. Ele me convocou para ser fiel."

Confiança: "Meu Deus, Tu, somente Tu. Eu confio em Teu chamado, em Tua inspiração. Tu não me desapontarás."

Família: "Cristo é o Chefe da família, O ouvinte silencioso em toda conversação, O convidado invisível em todas as refeições."

Pobres: "Hoje, os pobres sentem fome de pão e arroz, e do amor da palavra viva de Deus. Os pobres estão sedentos de água e paz, verdade e justiça. Os pobres estão desabrigados, necessitados de um abrigo, de um coração feliz que os entenda, os proteja e os ame. Os pobres estão nus: precisam de roupas, de dignidade humana e de compaixão. Estão doentes: necessitam de médicos, de carinho e de um sorriso sincero. Deus cuida dos pobres através de nós."

Perdão: Lembro-me de uma vez que retirei uma mulher de uma lata de lixo e vi que ela estava morrendo. Levei-a para o convento. Ela repetia as mesmas palavras:" Meu filho fez isso comigo ". Nem uma só vez pronunciou as palavras:" Estou faminta "," Estou morrendo "," Estou sofrendo ". Apenas continuava a repetir:" Meu filho fez isso comigo ". Levei muito tempo para ajudá-la a dizer, antes de morrer: "Eu perdôo meu filho".

Sufrimento: "Hoje, o mundo é um calvário aberto". Os sofrimentos mentais e físicos estão em toda parte. A dor e o sofrimento entraram em tua vida, mas lembra-te que a dor, o infortúnio e o sofrimento são beijos de Jesus - sinais de que tens estado tão próximo Dele que Ele pode beijar-te.

Obediência: "Hoje, em ti, Jesus desejo reviver sua total obediência a seu Pai. Permite que Ele o faça. Não importa como te sentes, já que Ele se sente bem em ti..."

Beata Madre Tereza de Calcutá
(1910-1997)

RESUMO

FREITAS, M. F. de (2004). *Ligações metálicas constituídas por parafusos auto-atarraxantes*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

O emprego de parafusos auto-atarraxantes em ligações metálicas, nos últimos anos, têm aumentado de forma significativa, principalmente como dispositivo de ligação entre componentes leves da construção metálica, como por exemplo, nas ligações entre telhas metálicas e terças. Tais ligações apresentam modos de falha diferentes dos observados para as ligações parafusadas convencionais, em função do tipo de parafuso e das reduzidas espessuras dos elementos conectados, definidos como “*pull-out*” e “*pull-over*”. No Brasil, a carência de estudos específicos nesse tema foi uma das razões da omissão da recente norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - NBR 14762:2001, quanto a procedimentos específicos para o projeto de ligações com parafusos auto-atarraxantes. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo abrangente sobre as ligações metálicas com parafusos auto-atarraxantes, com ênfase na ligação telha-terça, onde são apresentados os procedimentos e as recomendações das principais normas estrangeiras, bem como os ensaios padronizados para caracterização dos parafusos e para avaliação do comportamento estrutural e resistência de ligações. São apresentados também os resultados de uma investigação experimental, com base no ensaio padrão do AISI(1996) (*American Iron and Steel Institute*), em 27 corpos-de-prova com variação no diâmetro do parafuso e espessura dos componentes da ligação (terça e telha), com o objetivo principal de avaliar as expressões das AISI(2001b e 1996) para dimensionamento. Como conclusão, são relatadas as dificuldades associadas ao ensaio padrão, que apesar de sua concepção simples, conduz à elevada variabilidade nos resultados, indicando a necessidade da adoção de ensaios mais representativos e confiáveis.

Palavras-chave: parafusos auto-atarraxantes; estruturas metálicas; ligações; perfis formados a frio.

ABSTRACT

FREITAS, M. F. de (2004). *Steel connections constituted of screws*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

The use of screws in steel connections has increased significantly in recent years, mainly as connecting devices between light-gage components in steel construction, as, for example, in joints between metal roofing and purlins. These connections exhibit different failure modes from those displayed by conventional bolted connections, due to the type of fastener and the reduced thicknesses of the connected elements, defined as “pull-out” and “pull-over”. In Brazil, the lack of specific studies of this theme was one of the reasons for the omission of specific procedures for the design of screw connections from the new edition of the Brazilian code for cold-formed steel members – NBR 14762:2001. The work reported here involved a comprehensive study of steel connections using screws, with emphasis on the sheathing-purlin connection. A presentation is made of the procedures and recommendations of the main foreign codes, as well as of standardized tests for characterizing screws and evaluating the structural behavior and strength of connections. Also presented are the results of an experimental investigation based on the standard test of the AISI (1996) (American Iron and Steel Institute) applied to 27 test specimens with varying screw diameters and connector component thicknesses (purlin and sheathing), whose main purpose was to evaluate the AISI’s design equations (2001b e 1996). To conclude, a report is made of the difficulties associated with the standard test, which, despite its simple conception, leads to considerably variable results, indicating the need for the adoption of more representative and reliable tests.

Keywords: screws; steel structures; connections; cold-formed steel.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Exemplo de PAA's formador e cortador de rosca.</i>	5
<i>Figura 2 – Exemplos de parafusos para chapas finas.</i>	5
<i>Figura 3 – Exemplo de fixação com parafuso auto-atarraxante auto-brocante.</i>	6
<i>Figura 4 – PAA's auto-brocantes.</i>	6
<i>Figura 5 - Aplicação de PAA em ossos fraturados (HILLERYA, M. T. e SHUAIBB, I.)</i>	9
<i>Figura 6 – Cobertura e sistema de vedação lateral. www.bemo.com.br acesso 16-09-2002</i>	9
<i>Figura 7 – Fachada <www.bemo.com.br acesso 16-09-2002></i>	10
<i>Figura 8 – Diferença de fixação entre ganchos e PAA's.</i>	10
<i>Figura 9 – Exemplos de parafusadeiras. (http://www.felap.com.br/Bosch/industrial.htm; www.rionet.com.br/~amab/paginas/dewalt/dewalt.htm; http://www.hilti.com)</i>	11
<i>Figura 10 - Construção em STEEL FRAME < www.estruturametlica.com.br> acesso 14/12/2003</i>	13
<i>Figura 11 - Detalhes de ligações metálicas com PAA's em Steel Frame <www.estruturametlica.com.br> acesso 14/12/2003</i>	13
<i>Figura 12 - Cisalhamento do PAA.</i>	14
<i>Figura 13 - Inclinação do PAA.</i>	14
<i>Figura 14 - Esmagamento do furo do PAA.</i>	14
<i>Figura 15 - Cisalhamento por torque do PAA.</i>	15
<i>Figura 16 –Ruptura do PAA por tração.</i>	15
<i>Figura 17 - Arrancamento do PAA por tração.</i>	16
<i>Figura 18 – Puncionamento da chapa pelo PAA por tração.</i>	16
<i>Figura 19 - Foto do detalhe do furo do puncionamento da chapa pelo PAA por tração – notar a retirada de material da telha, provavelmente depositada junto a cabeça do PAA ainda fixo a terça (ELLIFFRIT 2001).</i>	17
<i>Figura 20 – Desenho esquemático de escorregamento do PAA através da chapa por tração.</i>	17
<i>Figura 21 - Fotos de detalhes de furos resultantes de escorregamento da telha sob o PAA, como resultado da ação de tração (ELLIFFRIT 2001) – Notar que diferentemente do rasgamento não existe a retirada de material da telha .</i>	18
<i>Figura 22 – Distorção da chapa da telha.</i>	18
<i>Figura 23 –Detalhe de uma ligação.</i>	22

<i>Figura 24 - Comparativo entre valores nominais de resistências a tração ENV/AISI</i>	26
<i>Figura 25 - Comparativo entre valores resistentes de cálculo</i>	27
<i>Figura 26 – Redução da resistência ao puncionamento quanto à posição dos PAA 's.</i>	30
<i>Figura 27 – Esquema de fixação do parafuso para ensaio de tração no parafuso</i>	35
<i>Figura 28 – Ensaio padrão de cisalhamento - 2 parafusos</i>	37
<i>Figura 29 – Métodos de ensaio U-tension e plate method MAHENDRAN (2001)</i>	39
<i>Figura 30 – Esquema do método de ensaio padrão MAHENDRAN (2001)</i>	40
<i>Figura 31 – Método de ensaio padrão específico. MAHENDRAN (2001)</i>	41
<i>Figura 32 – Método de ensaio Cross-Tension. MAHENDRAN (2001)</i>	42
<i>Figura 33 – Esquema de ensaio de arrancamento com vários parafusos (árvore de carregamento).</i>	43
<i>Figura 34 – Esquema de ensaio unidimensional com um parafuso</i>	43
<i>Figura 35 – Esquema do elemento de aplicação de carga no parafuso.</i>	44
<i>Figura 36 – Esquema de ensaio cíclico em ligação com PAA. Mahendran (2001)</i>	44
<i>Figura 37 – Comparação entre formas de ruptura da telha entre ensaio estático e cíclico. Mahendran (2001)</i>	45
<i>Figura 38 – Detalhe do ensaio de puncionamento pelo do método padrão (ELLIFRITT 2001)</i>	46
<i>Figura 39 – Solicitação no parafuso pelo ensaio padrão (a) e na instalação real (b).</i>	46
<i>Figura 40 – Ensaio em grande escala utilizando sacos de ar Mahendran e Tang (1998).</i>	48
<i>Figura 41 – Ensaio em grande escala com carregamento utilizando blocos cerâmicos Mahendran e Tang (1998)</i>	49
<i>Figura 42 – Caixa de vácuo</i>	49
<i>Figura 43 – Disposição do modelo em caixa de vácuo (vedação).</i>	50
<i>Figura 44 – Ruína de modelo em grande escala em ensaio de caixa de vácuo.</i>	50
<i>Figura 45 – Detalhes da célula de carga desenvolvida por Ellifritt e Kreiner (1998)</i>	51
<i>Figura 46 – Antigo esquema de aquisição de dados em ensaios de ligação com PAA</i>	51
<i>Figura 47 – Esquema de aquisição de dados utilizando nova célula de carga</i>	51
<i>Figura 48 – Ensaio de conjunto de caixa de vácuo com célula de carga conectada no PAA</i>	52
<i>Figura 49 - PAA utilizado nos ensaios $d=6,3mm$. (www.manzato.com.br acesso 05/05/2001)</i>	54
<i>Figura 50 - PAA utilizado nos ensaios $d=5,5mm$ (www.manzato.com.br acesso 05/05/2001)</i>	54

<i>Figura 51 – Pedaco de telha para ensaio. (unidades em mm)</i>	55
<i>Figura 52 – Seguimentos de terças utilizadas nos ensaios.</i>	56
<i>Figura 53 – Parafusadeira utilizada para fixação dos parafusos (www.bosch.com.br acesso 24/01/03)</i>	56
<i>Figura 54 - Exemplo de indicação para corpo-de-prova de caracterização</i>	57
<i>Figura 55 - Exemplo de identificação para corpo-de-prova de ensaio de ligação. (notação também adotada nas Figuras 24 e 25)</i>	57
<i>Figura 56 - Desenho esquemático do corpo-de-prova de caracterização dos aços utilizados nas terças (medidas em mm).</i>	58
<i>Figura 57 - Posicionamento dos corpos-de-prova na chapa de aço retirada da alma da terça (medidas em mm)</i>	58
<i>Figura 58 - Posição dos corpos-de-prova na telha (medidas em mm)</i>	59
<i>Figura 59 - Parte superior do aparato de ensaio padrão AISI (1996).</i>	61
<i>Figura 60 – Hastes transversais e calços de madeira do aparato de ensaio padrão AISI (1996).</i>	62
<i>Figura 61 - Garras de fixação (hastes centrais superior e inferior).</i>	63
<i>Figura 62 - Fixação da fatia de telha no aparato de ensaio, dispositivo produzido para o estudo.</i>	63
<i>Figura 63 - Furos para colocação de hastes horizontais de fixação.</i>	64
<i>Figura 64 – Detalhes da montagem do modelo telha-PAA-terça.</i>	65
<i>Figura 65 – Corpo-de-prova terça-PAA-telha.</i>	66
<i>Figura 66 - Parte inferior do aparato de ensaio.</i>	67
<i>Figura 67 - Aparato de ensaio e ferramentas.</i>	68
<i>Figura 68 - Ensaio padrão AISI.</i>	68
<i>Figura 69 - Puncionamento da telha (pul over)</i>	69
<i>Figura 70 –Arrancamento do parafuso da terça (pull out)</i>	70
<i>Figura 71 - Gráfico força x deslocamento típico (CP's 6.43.3 I e II)</i>	71
<i>Figura 72 - Gráfico força x deslocamento típico (CP's 6.65.2-I e II)</i>	71
<i>Figura 73 - Fases do ensaio de tração</i>	72
<i>Figura 74 - Comparação entre valores de ensaio e previsões normativas.</i>	74

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Classificação de variedades de PAA's conforme sua fabricação.</i>	4
<i>Tabela 2 – Exemplos de arruelas e cabeças: fabricante PK (PARKER-KALON, 2002).</i>	7
<i>Tabela 3 - Normas de controle de fabricação de PAA's seguida pelo ICBO ES.</i>	8
<i>Tabela 4 - Recomendações de pontas de PAA's em função da espessura da chapa de aço. (Catálogo comercial Buildex-ITW)</i>	12
<i>Tabela 5 - Tabela de tempo de perfuração de um PAA (Catálogo comercial Buildex-ITW)</i>	12
<i>Tabela 6 – Dimensionamentos de PAA's à tração segundo as principais normas.</i>	22
<i>Tabela 7 – Dimensionamentos de PAA's ao cisalhamento segundo as principais normas.</i>	23
<i>Tabela 8- Comparativos dos valores normativos de cálculo</i>	25
<i>Tabela 9 – Coeficiente estatístico em função do número de ensaios para determinação da resistência característica</i>	33
<i>Tabela 10 – Proporções geométricas sugeridas para ensaios de tração</i>	36
<i>Tabela 11 - Caracterização dos materiais</i>	60
<i>Tabela 12 – Resultados dos ensaios e previsões teóricas (comparação ensaio/normas)</i>	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
AS	Australian Standards
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
CAN	Canadian Standards
CANACERO	Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero - México
CCFSS	Wei-Wen Yu Center for Cold-Formed Steel Structures – University of Missouri-Rolla
ENV	European Committee for Standardization
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
ICBO ES	International Conference of Building Officials Evaluation Service, Inc.
NBR	Norma Brasileira Registrada
NZS	New Zealand Standard
PAA	Parafuso auto-atarraxante
SAE	Society of Automotive Engineers
UBC	Uniform Building Code

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A	área bruta da seção transversal da barra
A_n	área líquida da seção transversal da barra
A_p	área bruta da seção transversal de um parafuso
$F_{a,R}$	Força de arrancamento resistente
$F_{p,R}$	Força de puncionamento resistente
$F_{pr,R}$	Força de puncionamento resistente, submetido a cargas repetidas
$F_{t,Sd}$	Força de tração solicitante de cálculo
$F_{tp,Rf}$	Força de tração no parafuso, resistente, relatado pelo fabricante ou determinada por um laboratório independente de ensaio
FS	fator de segurança (Método das tensões admissíveis)
$F_{a,Rd}$	força de arrancamento resistente de cálculo
$F_{p,Rd}$	força de puncionamento resistente de cálculo
$F_{pr,Rd}$	força de puncionamento resistente de cálculo, submetido a cargas repetidas de vento
$F_{t,k}$	força de tração resistente característica
$F_{t,Rd}$	força de tração resistente de cálculo
$F_{t,Sd}$	força de tração solicitante de cálculo
$F_{t,Rf}$	força de tração resistente por parafuso relatado pelo fabricante ou determinada por um laboratório independente de ensaio
$F_{tl,Rd}$	força de tração resistente de cálculo da ligação
$F_{tp,Rd}$	força de tração resistente de cálculo do PAA
V_{Rd}	força cortante resistente de cálculo por parafuso
V_{Rf}	força cortante resistente de cálculo por parafuso, relatada pelo fabricante ou determinada por um laboratório independente de ensaio
V_{Sd}	força cortante solicitante de cálculo por parafuso
$V_{gi,Rd}$	força cortante de giro e inclinação resistente de cálculo
$F_{R,k}$	força resistente característica
$F_{R,m}$	força resistente média

Letras romanas minúsculas

d	diâmetro nominal do PAA
d_a	diâmetro da arruela do PAA
d_c	diâmetro da cabeça do PAA
d_w	maior valor entre o diâmetro da cabeça do PAA e o diâmetro da arruela fixa, compreendido entre 8,00mm (limitação de utilização) e 12,7mm (limitação de valor normativo), tais restrições não são aplicáveis ao Eurocódigo
f_y	resistência ao escoamento do aço na tração
f_{y1}	resistência ao escoamento do aço do elemento em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_{y2}	resistência ao escoamento do aço do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_u	resistência à ruptura do aço na tração
f_{u1}	resistência à ruptura do aço do elemento em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_{u2}	resistência à ruptura do aço do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_u	resistência à ruptura do aço na tração
f_{u1}	resistência à ruptura do aço do elemento em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_{u2}	resistência à ruptura do aço do elemento que não está em contato com a cabeça do PAA, na tração
p_1	espaçamento entre centros dos conectores na direção de aplicação da carga
p_2	espaçamento entre centros dos conectores na direção perpendicular a aplicação da carga
p_y	resistência de projeto do aço na tração $p_y=f_y$, porém a seguinte limitação $p_y \leq 0,84 f_u$
t	espessura da barra ou chapa
	espessura da barra ou chapa mais fina a ser conectada
t_1	espessura da chapa ou do elemento em contato com a cabeça do PAA
	espessura da barra ou chapa mais espessa a ser conectada
t_2	espessura da chapa ou do elemento que não está em contato com a cabeça do PAA
t_c	menor valor entre a profundidade de penetração e a espessura, t_2

Letras gregas minúsculas

ϕ	coeficiente de ponderação de resistência (Método dos estados limites AISI-AS/NZS)
γ_m	coeficiente de ponderação de resistência (ECCS)
γ_1	coeficiente de ponderação de ação (ECCS)
γ_{M2}	coeficiente de ponderação de resistência (conforme ENV)

SUMÁRIO

RESUMO	<i>i</i>
ABSTRACT	<i>ii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>iii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>vi</i>
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	<i>vii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>viii</i>
1 Introdução	1
1.1 JUSTIFICATIVA	1
2 Parafusos auto-atarraxantes – PAA’s	3
2.1 TIPOS DE PAA’S	4
2.2 CRITÉRIOS DE FABRICAÇÃO DOS PAA’S	7
2.3 UTILIZAÇÃO	8
2.4 EQUIPAMENTOS DE FIXAÇÃO	11
2.5 MODOS DE FALHA	13
2.6 DIMENSIONAMENTO	19
3 Ensaios de caracterização e ensaios de ligações (estado da arte)	31
3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	32
3.2 ENSAIOS EM PAA’S (Caracterização)	34
3.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	35
3.2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	36
3.3 ENSAIOS EM LIGAÇÕES METÁLICAS	38
3.3.1 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO (<i>PULL-OUT</i>)	39
3.3.1.1 ENSAIOS ESTÁTICOS	39
3.3.1.2 ENSAIOS DINÂMICOS	44
3.3.2 ENSAIOS DE PUNÇIONAMENTO (<i>PULL-OVER</i>)	45
3.3.2.1 ENSAIOS-PADRÃO	45
3.3.2.2 ENSAIOS ALTERNATIVOS	47
3.3.2.3 ENSAIOS DE CONJUNTO	47

4	Análise experimental	53
4.1	MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1.1	PARAFUSOS	54
4.1.2	TELHAS	55
4.1.3	PERFIS (terças)	55
4.1.4	EQUIPAMENTO DE FIXAÇÃO	56
4.2	NOMENCLATURA DOS CORPOS-DE-PROVA	57
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	58
4.4	ENSAIOS DE LIGAÇÃO	61
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5	Conclusões e sugestões	75
5.1	SOBRE O TRABALHO	75
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	76
	Bibliografia	78
	Apêndice	85

1 Introdução

1.1 JUSTIFICATIVA

A NBR 14762:2001 Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, é a mais recente sobre o assunto, representa a difusão dos avanços tecnológicos brasileiros, contudo ainda está defasada, em comparação com as outras normas estrangeiras, apresentando limitações ou até inexistência de critérios normativos.

Essas omissões não têm como causa a não necessidade originária de pouco uso de tais tópicos, nem tampouco a irrelevância dos temas ausentes. Em verdade, é decorrente da inexistência de estudos, que possam corresponder à realidade brasileira, com o conhecimento científico existente em outros países. Situação coerente, porque uma especificação normativa retrata o conhecimento da comunidade especializada a respeito de um determinado assunto, produzindo diretrizes para toda a população.

Esta é a motivação maior para este trabalho pois, apesar de serem amplamente utilizados no Brasil, os parafusos auto-atarraxantes (PAA's¹), não são referidos na NBR 14762:2001.

Como contribuição, este trabalho oferece subsídios básicos sobre o tema, propiciando novos estudos nacionais e sugestões para inclusão em futuras revisões normativas, quanto aos procedimentos de cálculo, identificação dos possíveis modos de falha, padronização de nomenclaturas, neologismos para termos ainda inexistentes nas referências nacionais e adoção de metodologias de ensaio como critério de dimensionamento, gerando maior orientação aos projetistas e consumidores de PAA's.

¹ Sigla empregada nesse trabalho para designar parafusos auto-atarraxantes.

O presente trabalho compreende um estudo criterioso sobre as ligações metálicas constituídas por PAA's, com base na análise de procedimentos normativos (normas estrangeiras) e bibliografia específica, que compreende uma referência bibliográfica abrangente. Os métodos e procedimentos de ensaios laboratoriais, descritos em referências internacionais, muitos desses não normativos, são identificados, detalhados e analisados. As expressões normativas de dimensionamento das principais normas estrangeiras são catalogadas e comparadas.

Foram realizados ensaios exploratórios, em ligações constituídas por PAA's comercializados no Brasil, e através destes ensaios verificar de forma inicial eventuais variações, quanto à capacidade resistente de carga a tração das ligações, em função das espessuras das chapas e diâmetros dos parafusos estudados e apresentar as dificuldades e limitações de cada tipo de ensaio.

2 Parafusos auto-atarraxantes – PAA's

PAA's é um tipo de parafuso que não necessita uma porca para realizar a ligação por ele constituída. Essa capacidade faz deste elemento conectivo um excelente produto para as mais diversas formas de ligação, pois possibilita realizar ligações de uma grande variedade de elementos constituídos pelos mais diversos materiais, nem sempre possíveis de serem realizadas com parafusos que usam porcas.

Esse trabalho propõe o estudo da aplicação dos PAA's em ligações entre componentes metálicos, e mais especificamente em estruturas de perfis formados a frio, onde essencialmente são utilizados na fixação das telhas metálicas às estruturas, também metálicas. Em caso de sucção, em sistemas de cobertura e de vedação lateral o comportamento estrutural geral da estrutura será controlado principalmente pela capacidade portante das ligações terça-telha ou longarina-telha.

As ligações são partes importantíssimas de uma estrutura, não apenas do ponto de vista de resistência estrutural, mas também em relação ao custo de produção. Segundo Sedlacek, G.; Tomà, A.; Weynand, K. (1993), tem-se observado que para uma estrutura metálica de perfis laminados ou soldados as conexões representam, direta ou indiretamente, cerca de 40% do custo total e não existe razão para crer que em estruturas de perfis formados a frio esta proporção seja inferior.

Em classes de espessuras mais elevadas de perfis formados a frio é possível aplicar todos os métodos de ligação utilizados em perfis soldados ou laminados. Entretanto, nos perfis formados a frio com menores espessuras, ocorrem diversos fenômenos que lhe são típicos.

A fixação de chapas finas existe uma grande variedade de formas de ligação e diversas patentes de elementos conectivos, o PAA é uma das opções mais utilizadas no mundo, e no Brasil há um grande crescimento de seu uso.

2.1 TIPOS DE PAA'S

Entre os muitos tipos de PAA's, Davis J. M. In Rhodes J. (1991) apresenta uma classificação na qual eles são agrupados em dois tipos distintos, em função da necessidade ou não de um pré-furo. Cada grande grupo se subdivide em sub-grupos, dependendo dos tipos de rosca, ponta, cabeça e arruela (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação de variedades de PAA's conforme sua fabricação.

PRÉ-FURO	ROSCA	PONTA	ARRUELA E CABEÇA
SIM	CORTADOR DE ROSCA	BROCA SEM PONTA PONTIAGUDA	VARIAM CONFORME O FABRICANTE
	FORMADOR DE ROSCA	BROCA SEM PONTA PONTIAGUDA	
NÃO	CORTADOR DE ROSCA	BROCA PONTIAGUDA	
	FORMADOR DE ROSCA	BROCA PONTIAGUDA	

Quanto à maneira com que os parafusos produzem a rosca para fixação, os “*formadores de rosca*”, - sugestão deste autor como neologismo em português para o termo *thread-forming* -, formam seu encaixe sem a retirada de material, ou seja, sem aparas ou rebarbas. A fixação se dá através do processo de modelagem que aumenta a capacidade resistente a folga, ou seja, realiza-se a fixação após conformar o material de base tornando-o uma rosca.

Além desses parafusos, há os “*cortadores de rosca*”, - sugestão de neologismo em português para o termo *thread-cutting* – que, para produzir a rosca necessária, com rosca fresadora cortam o material onde se fixará, ainda segundo Davis J. M. In Rhodes J. (1991), os PAA's cortadores de rosca constituem ligações com menor coesão e são caracterizadas por uma ou mais arestas de corte. A Figura 1, de modo esquemático, apresenta a comparação entre os dois processos.

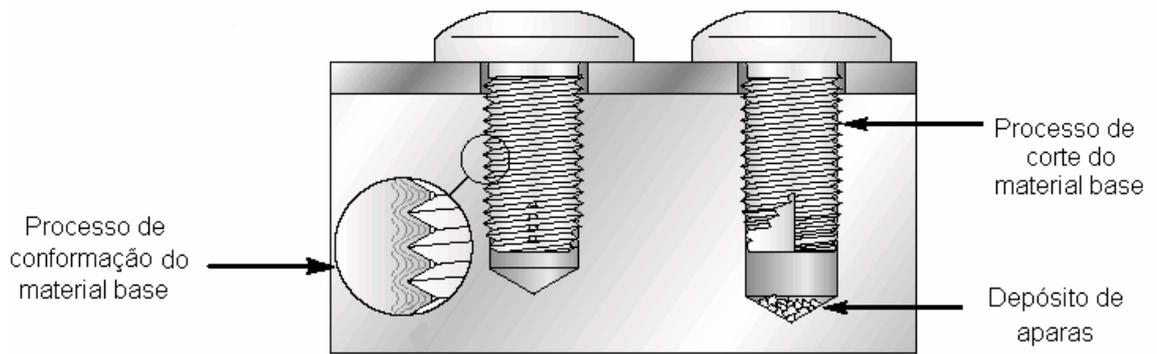


Figura 1 - Exemplo de PAA's formador e cortador de rosca.

As roscas com extremidade pontiaguda (Figura 2), usualmente são utilizadas para fixação de materiais metálicos pouca espessura, inferior a 2mm; para ligações nas quais a espessura da base excede a 2mm são usados os parafusos sem ponta (DAVIS J. M. In RHODES J. 1991).

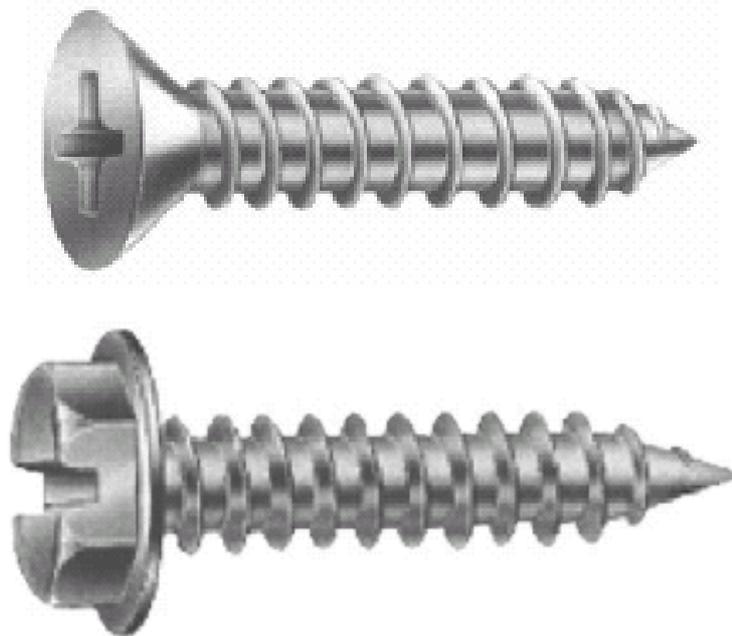


Figura 2 – Exemplos de parafusos para chapas finas.

O principal grupo é formado por PAA's auto-brocantes. Como mostrado na Figura 3, eles produzem seu próprio furo, formam sua própria rosca e realizam a fixação em simples e única operação. Esta capacidade é conferida pela presença de uma ponta de broca em sua extremidade

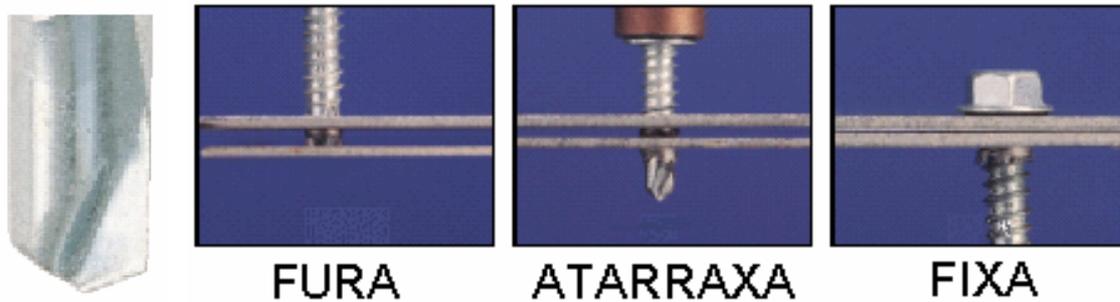


Figura 3 – Exemplo de fixação com parafuso auto-atarraxante auto-brocante.

Entre os PAA's auto-brocantes existem dois tipos básicos, que dependem da espessura do material base, como mostrado na Figura 4. Na Figura 4a, a broca possui diâmetro menor que o do corpo; tal PAA é utilizado nas ligações entre duas chapas finas (costura telha-telha). No PAA da Figura 4b o diâmetro da broca é igual ao do corpo; é indicado para ligações entre uma chapa fina e outra mais espessa (telha-terça).



Figura 4 – PAA's auto-brocantes.

Os PAA's usualmente são combinados com arruelas, conforme mostrado nos diversos exemplos. Tais arruelas servem para aumentar a capacidade de vedação ou portante. Segundo Davies In Rhodes (1991) as arruelas elastoméricas (neoprene) ou combinações metal-elastoméricas provocam uma notável redução na resistência e na rigidez da conexão.

Ao considerar a forma, ou melhor, os tipos de arruela e cabeça, fabricantes de PAA's criaram uma grande variedade deles. Para visualizar tal diversidade na Tabela 2 apresentam-se tipos de arruelas e cabeças de um único fabricante, (PARKER-KALON, 2002), a partir desse exemplo é fácil realizar uma analogia para parafusos de outros

fabricantes e concluir que devido à sua diversidade, torná-se-ia impossível registrar todos os tipos existentes.

Tabela 2 – Exemplos de arruelas e cabeças: fabricante PK (PARKER-KALON, 2002).

Arruelas padrão dos parafusos auto-atarraxantes P-K	Formato da arruela	Formatos padrão das cabeças				
Arruela Plana						
Arruela de Travamento Externamente Dentada						
Arruela de Travamento Internamente Dentada						
Arruela de Travamento Duplamente Dentada						
Arruela de Belleville Contorno Plano						
Aço/Neoprene						

Em suma, os PAA's são classificados da seguinte maneira:

- quanto à necessidade de um pré-furo, podem ser auto-perfurantes ou não;
- quanto à rosca, serem “*formadores de rosca*” ou “*cortadores de rosca*”;
- quanto à ponta podem ser do tipo broca, pontiaguda ou não ter ponta;
- quanto à arruela e cabeça, variam conforme fabricantes.

2.2 CRITÉRIOS DE FABRICAÇÃO DOS PAA'S

Para uma correta aplicação dos PAA's, como em qualquer outro material, equipamento ou serviço, faz-se necessária a sua caracterização. Entende-se como tal, um conjunto de especificações que visam padronizar e exigir índices mínimos de qualidade do produto, a fim de delimitar suas capacidades e, assim, atender às necessidades para as quais foram projetados. Em particular para os PAA's estudados neste trabalho, dentre vários critérios de avaliação destacam-se aqueles relacionados às resistências das ligações em estruturas metálicas, a saber: os procedimentos de avaliação

das garantias mínimas de capacidades resistentes às ações mecânicas de tração e cisalhamento, realizadas em ligações metálicas, pois são as mais relevantes da análise estrutural das ligações

Para a determinação das especificações dos PAA's tomou-se como fonte o documento AC118² (publicado pelo ICBO ES³ e baseado no *Uniform Building Code*TM 1994 - *UBC*⁴), que compreende um conjunto de critérios normativos a serem alcançados e estabelece exigências mínimas para reconhecimento de conectores do tipo PAA para conexão de aços. As normas referentes aos procedimentos de avaliação, correspondente à cada ponto de exigência, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Normas de controle de fabricação de PAA's seguida pelo ICBO ES.

CONTROLE DIMENSIONAL	ANSI/ASME ⁵ B18.6.4.
DUCTILIDADE	SAE ⁶ J81, item 3.8.9 para Thread Rolling Tapping Screw
DUREZA	SAE J933, item 3.4 para PAA's. SAE J78, item 3.2.3 para PAA's auto-brocantes.
RESISTÊNCIA À TORÇÃO	ANSI/ASME B18.6.4, item 2.9.1.2 para PAA's SAE J78, item 4.1 para parafusos auto-brocantes
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E AO CISALHAMENTO	AISI ⁷ (1996)

2.3 UTILIZAÇÃO

Os PAA's possuem amplo uso, como por exemplo: conexões em madeira, placas metálicas, ossos fraturados (Figura 5), chapas de carrocerias de veículos automotivos, placas de gesso acartonado, termoplásticos, perfis metálicos espessos e finos.

² Acceptance Criteria for Tapping Screw Fasteners - ICBO ES, Inc. (www.icbo.org)

³ ICBO ES – *International Conference of Building Officials Evaluation Service, Inc.*

⁴ UBC - *Uniform Building Code*

⁵ ANSI/ASME - *American National Standards Institute/American Society of Mechanical Engineers*

⁶ SAE - *Society of Automotive Engineers*

⁷ AISI - *American Iron And Steel Institute*

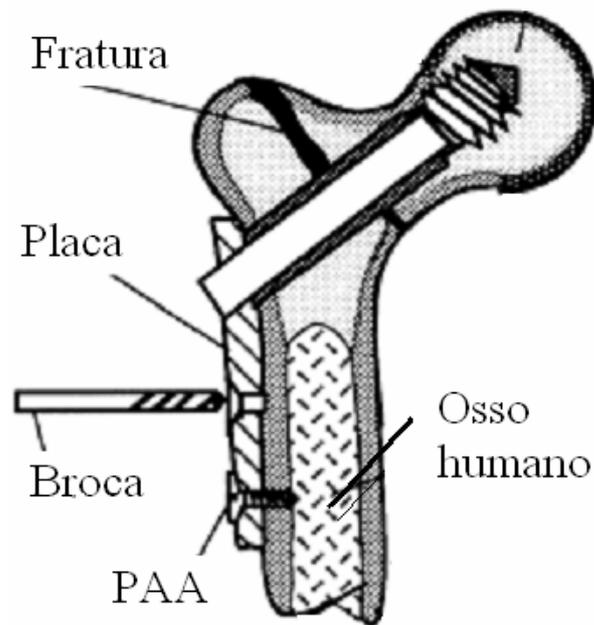


Figura 5 - Aplicação de PAA em ossos fraturados (HILLERYA, M. T. e SHUAIBB, I.)

Neste trabalho, refere-se os estudos referentes à utilização de PAA's na construção metálica em perfis de chapa fina, ou seja, fixação de telhas a estruturas de cobertura (terça-telha Figura 6), em sistemas de fechamento lateral para fachada de edifícios (longarina-telha Figura 7) e também para a costura de telhas na região da emenda.

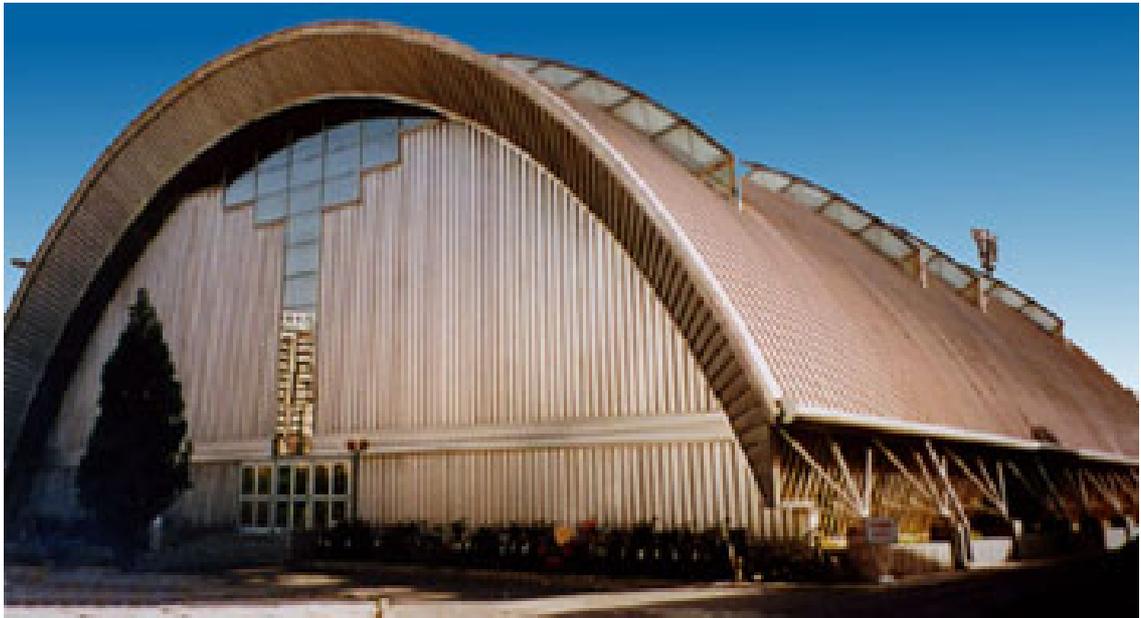


Figura 6 – Cobertura e sistema de vedação lateral. www.bemo.com.br acesso 16-09-2002



Figura 7 – Fachada <www.bemo.com.br acesso 16-09-2002>

Entende-se a importância deste sistema que reduz consideravelmente o tempo de execução, devido à simplicidade de operação, quando comparado com o outro dispositivo de fixação bastante utilizado no Brasil, o gancho com porcas para fixação das telhas metálicas às estruturas. Com PAA's a fixação ocorre na onda baixa enquanto o gancho prende as telhas pela onda alta (Figura 8).

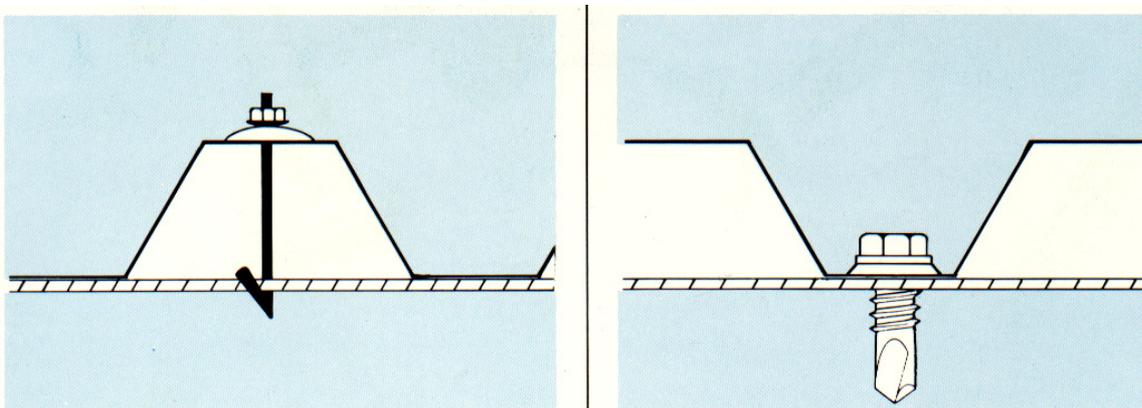


Figura 8 – Diferença de fixação entre ganchos e PAA's.

O uso de gancho confere uma relação de interação terço-telha praticamente desprezível; em contraponto, os PAA's favorecem uma elevada interação terço-telha, devido à influência do efeito diafragma do painel sobre o comportamento do perfil metálico, apresentando maior eficiência estrutural.

2.4 EQUIPAMENTOS DE FIXAÇÃO

A parafusadeira é equipamento indispensável para a execução do parafusamento dos PAA's. Um encaixe existente em sua extremidade é capaz de acoplar soquetes imantados de todos os tipos de cabeças e fendas; possui, também, fricção para regulagem de torque de aplicação, o que evita espanamentos dos parafusos e torques excessivos. A possibilidade de reversão de torque permite o reuso dos materiais, o melhor ajuste do parafuso e, até mesmo, o descarte de algum material deteriorado no parafusamento (Figura 9).



Figura 9 – Exemplos de parafusadeiras. (<http://www.felap.com.br/Bosch/industrial.htm>; www.rionet.com.br/~amab/paginas/dewalt/dewalt.htm; <http://www.hilti.com>)

A trabalhabilidade de fixação dos PAA’s, ou seja, a velocidade e a capacidade de fixação estão diretamente relacionadas não apenas à parafusadeira, mas também ao tipo de ponta do PAA; cada fabricante propõe uma orientação, na Tabela 4 estão apresentadas a classificação e recomendação de uso de PAA’s da ITW Buildex em função da espessura da chapa, e o tempo de fixação em função da espessura, Tabela 5.

Tabela 4 - Recomendações de pontas de PAA's em função da espessura da chapa de aço. (Catálogo comercial Buildex-ITW)

Ponta perfurante em relação ao diâmetro da rosca	Espessura do material (mm)										
	1,27	2,54	3,81	5,08	6,35	7,62	8,89	10,16	11,43	12,70	
1 #10 #12 1/4	[Barra hachurada]										
2 #12	[Barra laranja]										
3 #8 #10 #12 1/4		[Barra verde]	[Barra verde]	[Barra verde]	[Barra verde]						
4 #12 1/4				[Barra vermelha]	[Barra vermelha]	[Barra vermelha]					
5 12						[Barra verde]	[Barra verde]	[Barra verde]	[Barra verde]	[Barra verde]	[Barra verde]

Tabela 5 - Tabela de tempo de perfuração de um PAA (Catálogo comercial Buildex-ITW⁸)

Espessura (mm)	1,50	3,0	4,0	6,3	8,0	10,0	12,7
Tempo (segundo)	1,1	1,8	2,4	4,1	5,3	6,6	8,7

Atualmente outro grande uso de PAA’s na construção civil é a fabricação de residências industrializadas pelo sistema LIGHT STEEL FRAME (Figura 10). Neste caso, porém, os esforços solicitantes são bastante diferentes do caso de coberturas; ver detalhes das ligações na Figura 11.

⁸ Os resultados foram obtidos com uma carga final da parafusadeira de aproximadamente 300N (30 kgf) em rotação de 2.200 RPM. (ITW Buildex 2000)



Figura 10 - Construção em STEEL FRAME < www.estruturametalia.com.br> acesso 14/12/2003



Figura 11 - Detalhes de ligações metálicas com PAA's em Steel Frame
<www.estruturametalia.com.br> acesso 14/12/2003

2.5 MODOS DE FALHA

As ligações com PAA's apresentam os modos de falha descritos neste tópico, os quais variam conforme o tipo de solicitação; é fundamental salientar que os modos de falha aqui apresentados dizem respeito apenas às ligações nas quais a fixação entre a telha e a terço é realizada na onda baixa. Mahendran, M. (1994) reporta trabalhos que verificaram critérios de dimensionamento para ligações telha-terço, onde o PAA é fixado na onda alta da telha.

Quando o PAA for solicitado por força cortante;

- cisalhamento do parafuso – Figura 12;

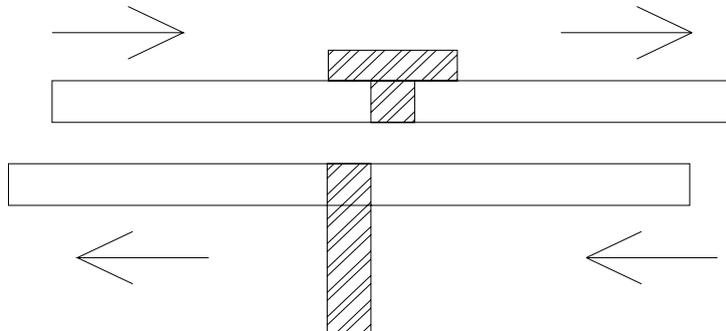


Figura 12 - Cisalhamento do PAA.

- inclinação excessiva do parafuso (*Tilting*) – Figura 13;

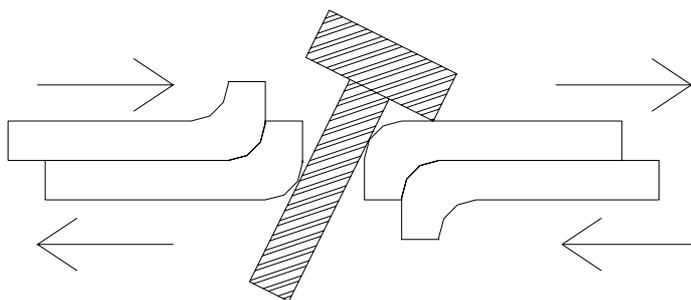


Figura 13 - Inclinação do PAA.

- ou esmagamento do furo (*Bearing*) – Figura 14;

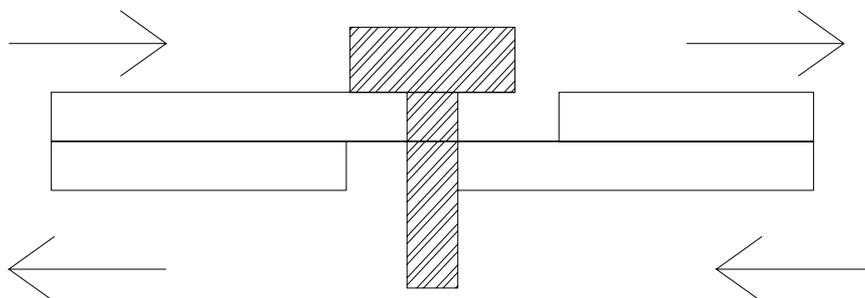


Figura 14 - Esmagamento do furo do PAA.

Quando o PAA for solicitado por torque:

- ruptura da cabeça do parafuso – Figura 15.

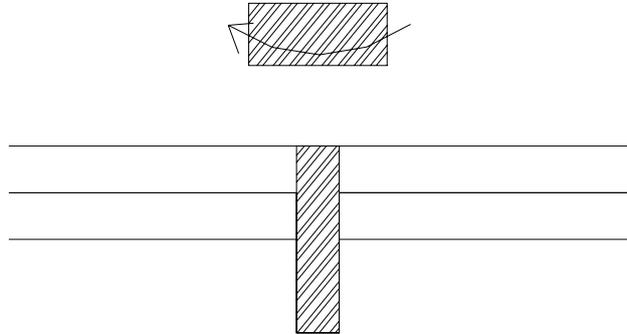


Figura 15 - Cisalhamento por torque do PAA.

Dos modos de falha existentes, dar-se-á mais atenção àqueles que ocorrem com a solicitação de tração do PAA; suas descrições segundo Davies, *In Rhodes* (1991) serão relatadas a seguir. Neste estudo, esses fenômenos ocorrem devido à ação do vento nas estruturas de coberturas e sistemas de vedação, pois causam efeitos de sucção nas chapas ou pressões negativas, e assim forçam o desprendimento das ligações, que em sua maioria solicitam os PAA's por tração.

Ruptura do parafuso. Este modo de falha é apenas provável de ocorrer quando as chapas são excessivamente espessas ou quando é usado um conector inadequado ou defeituoso. Tal colapso é pouco comum para as ligações terça-telha, entretanto é muito importante que haja, rigoroso controle sobre os critérios de fabricação para garantir a qualidade dos conectores – Figura 16.

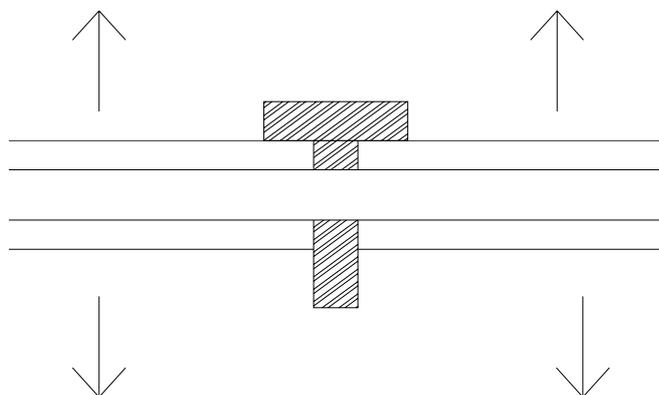


Figura 16 –Ruptura do PAA por tração.

Arrancamento do conector. (*pull-out*) Este modo de falha pode ocorrer quando a espessura da terça é insuficiente, ou seja, inferior à distância entre os fios da rosca do parafuso; ou quando não há suficiente engrenamento de rosca – Figura 17

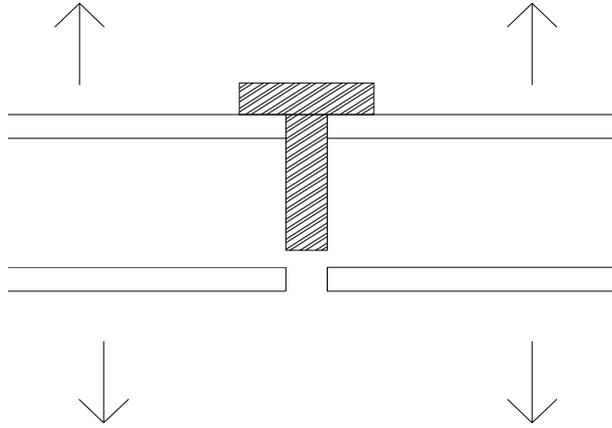


Figura 17 - Arrancamento do PAA por tração.

Puncionamento da chapa.(*pull-over*) Neste modo, a telha rasga-se ao redor da cabeça ou da arruela do parafuso. A baixa tensão de ruptura do aço da telha e uso inadequado da cabeça ou arruela são possíveis causas de tal colapso, Figura 18 e Figura 19.

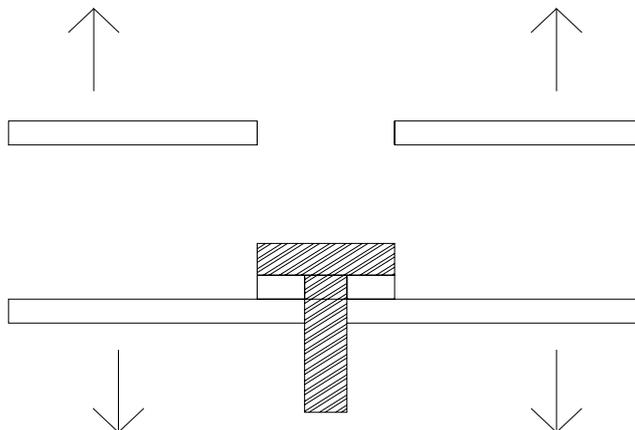


Figura 18 – Puncionamento da chapa pelo PAA por tração.



Figura 19 - Foto do detalhe do furo do puncionamento da chapa pelo PAA por tração – notar a retirada de material da telha, provavelmente depositada junto a cabeça do PAA ainda fixo a terça (ELLIFFRIT 2001).

Deslizamento do parafuso através da chapa. (pull-through) Neste caso, a telha distorce ou empena até escorregar por baixo da cabeça do PAA ou de sua arruela. Este modo de falha é sempre acompanhado por uma significativa distorção da telha e, possivelmente, também por empenamento da arruela. A geometria do perfil da telha começa a se tornar importante, nesse e no próximo modo de falha. Os procedimentos normativos de cálculo e de ensaio consideram como semelhantes o deslizamento do parafuso através da chapa e o puncionamento da chapa pelo parafuso, pois apresentam uma única expressão para determinar as forças resistentes – Figura 20 e Figura 21.

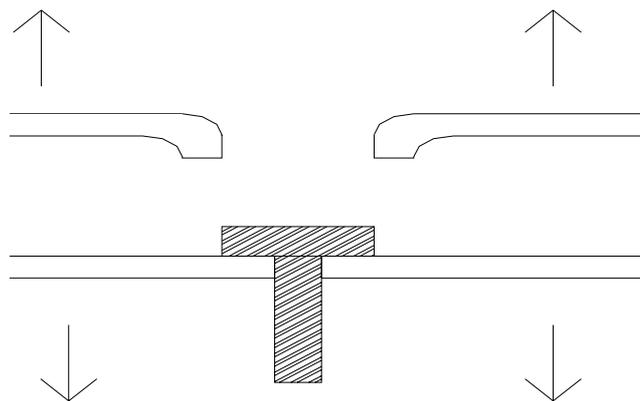


Figura 20 – Desenho esquemático de escorregamento do PAA através da chapa por tração.

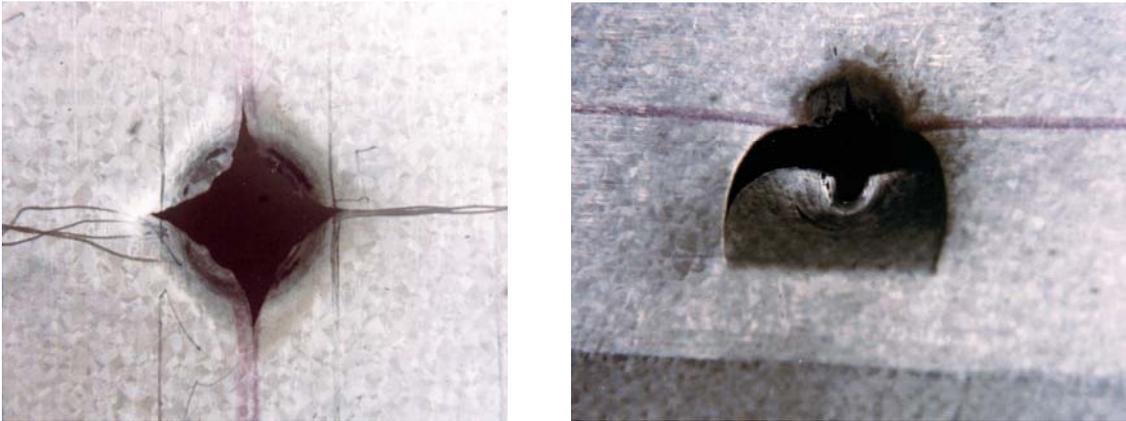


Figura 21 - Fotos de detalhes de furos resultantes de escorregamento da telha sob o PAA, como resultado da ação de tração (ELLIFFRIT 2001) – Notar que diferentemente do rasgamento não existe a retirada de material da telha .

Distorção da chapa. Esse modo de falha é relativo apenas à influência da geometria do perfil da telha, e não do conector. Desta maneira é sugerido que, quando identificada em um ensaio, tal falha seja apenas um comentário, (DAVIES, J. M. In RHODES, J. 1991).

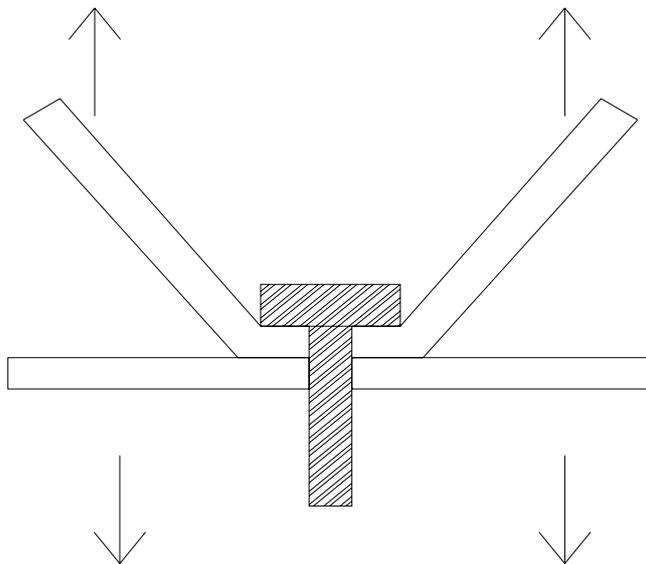


Figura 22 – Distorção da chapa da telha.

Os modos de falha apresentados podem ocorrer simultaneamente, na mesma ligação ou na mesma estrutura.

2.6 DIMENSIONAMENTO

Vários procedimentos normativos não brasileiros referentes aos perfis formados a frio determinam, para os PAA's e para as conexões por eles constituídas, suas aplicações, limitações, capacidade resistente nominal e de cálculo, para evitar os diversos modos de falha possíveis a cada situação de solicitação (Ítem 2.5). Neste trabalho apresentaremos o estado da arte, abordando os principais critérios normativos de dimensionamento de ligações constituídos por PAA's.

Segundo Hancock, Murray e Ellifritt (2001) a primeira recomendação normativa foi documentada na ECCS⁹ TC 7.1 (1987) e com base nos fundamentos detalhados em Stark, J. W. B. e Tomà, A. W. (1982), com base nesses estudos, foram desenvolvidas as recomendações para a norma europeia ENV¹⁰ 3 Parte 1-3 (1996). Posteriormente as equações e procedimentos foram adequados para a realidade dos Estados Unidos da América por Pekoz (1990) orientando a inclusão de tais recomendações na norma do AISI¹¹ (1996).

Tomà, A.; Sedlacek, G. e Weynand, K. (1993), apresentam os melhoramentos da ECCS TC7 (1983a e 1983b), referindo-se as bases de dados compostas por mais de 6000 ensaios em modelos, editadas por Bryan, E. R. (1990). Nesse trabalho foram adotados os seguintes princípios: verificar e corrigir as equações apresentadas na ECCS TC7 (1983a e 1983b); compatibilizar expressões com a ENV 3 Part 1-1, de forma a propiciar uma transição suave entre as duas recomendações; expressar as recomendações de cálculo através de modelos mecânico; e obter a maior abrangência possível. Como base estatística foram adotados valores resistentes característicos. Além disso em tal trabalho foi determinado o coeficiente de ponderação de resistência $\gamma_{M2}=1,25$ para todas as equações e todos os parafusos. As expressões sugeridas, nesse trabalho, constam ainda hoje no escopo da norma europeia.

Em Pekoz (1990) de forma resumida, há a apresentação dos trabalhos de adequação das expressões europeias a realidade dos EUA, contidas no AISI *Specification Provisions for Screw Connections* (1993) apud Yu (2000). Para iniciar os estudos, foi substituído das equações o termo f_u (tensão última na ruptura) por f_y (tensão de escoamento) e, em seguida, ajustado os coeficientes que multiplicam as expressões,

⁹ ECCS – *European Convention for Constructional Steelwork*

¹⁰ ENV – *European Committee for Standardization*

¹¹ AISI - *American Iron and Steel Institute*

para convergirem aos valores médios do banco de dados. Também foi determinado o fator de resistência $\phi=0,50$, através de métodos estatísticos.

Isso explica a afirmação de Mahendran (2001): “a diferença existente entre as duas formulações de equações de arrancamento, ocorre devido à recomendação européia ser baseada em resistência características (5 por cento), enquanto a norte americana (australiana) ser baseada na resistência média.” Tal fato pode ser generalizado para as demais equações de resistências dos PAA's. Consta, também, que o banco de dados para tais fundamentos normativos foram os mesmos, resultado de milhares de ensaios nos Estados Unidos da América, Canadá, Suécia, Reino Unido e nos países baixos.

A norma britânica BS 5950:Part 5 (1987), foi a primeira norma nacional estrangeira a adotar referências aos PAA's. Em fase atual, a AISI (1996) foi revista e em associação com a *Canadian Standard Association Technical Committee on Cold-Formed Steel Structural Members* (S136) do Canadá, e a *Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero* (CANACERO) do México, apresentam a norma unificada para os três países da América do Norte, *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – AISI (2001)*, são poucas as modificações referentes aos PAA's, com relação a norma AISI (1996).

A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os critérios de dimensionamento para PAA's, nelas estão inclusas, além das normas anteriormente citadas, da Cold-formed steel structures: AS/NZS¹² 4600:1996 (1996) que reporta-se a AISI (1996) como referência. Toda as notações das normas foram modificadas e unificadas, para atingirem uma conformidade com a nomenclatura adotada nas normas brasileiras atuais e estão descritas a seguir:

- d diâmetro nominal do PAA
- d_a diâmetro da arruela do PAA
- d_c diâmetro da cabeça do PAA
- d_w maior valor entre o diâmetro da cabeça do PAA e o diâmetro da arruela fixa, compreendido entre 8,00mm (limitação de utilização) e 12,7mm (limitação de valor normativo), tais restrições não são aplicáveis ao Eurocódigo
- f_y tensão de escoamento do aço na tração

¹² AS/NZS – Australian Standards / New Zealand Standards

f_{y1}	tensão de escoamento do aço do elemento em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_{y2}	tensão de escoamento do aço do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_u	resistência à ruptura do aço na tração
f_{u1}	resistência à ruptura do aço do elemento em contato com a cabeça do parafuso, na tração
f_{u2}	resistência à ruptura do aço do elemento que não está em contato com a cabeça do parafuso, na tração
$F_{a,R}$	Força de arrancamento resistente nominal
$F_{p,R}$	Força de puncionamento resistente nominal
$F_{p,Rd}$	Força de puncionamento resistente de cálculo
$F_{pr,R}$	Força de puncionamento resistente nominal, submetido a cargas repetidas
$F_{pr,Rd}$	Força de puncionamento resistente de cálculo, submetido a cargas repetidas,
$F_{t,Sd}$	Força de tração solicitante de cálculo
$F_{t,R}$	Força de tração resistente nominal da ligação (menor valor entre $F_{a,R}$ e $F_{p,R}$)
$F_{tp,R}$	Força de tração resistente nominal por parafuso
$F_{tp,Rd}$	Força de tração no parafuso resistente de cálculo
$F_{tp,Rf}$	Força de tração no parafuso, resistente, especificada pelo fabricante ou determinada por um laboratório independente de ensaio
p_y	resistência de projeto do aço na tração $p_y=f_y$, porém a seguinte limitação $p_y \leq 0,84 f_u$
t_1	espessura da chapa ou do elemento em contato com a cabeça do PAA (telha) espessura da barra ou chapa mais espessa a ser conectada pelo PAA
t_2	espessura da chapa ou do elemento que não está em contato com a cabeça do PAA (terça)
V_R	força cortante resistente nominal da ligação
V_{Rd}	força cortante resistente de cálculo
$V_{p,R}$	força cortante resistente no PAA nominal
$V_{p,Rd}$	força cortante no PAA resistente nominal
$V_{Rp,f}$	força cortante resistente no PAA, relatada pelo fabricante ou determinada por um laboratório independente de ensaio

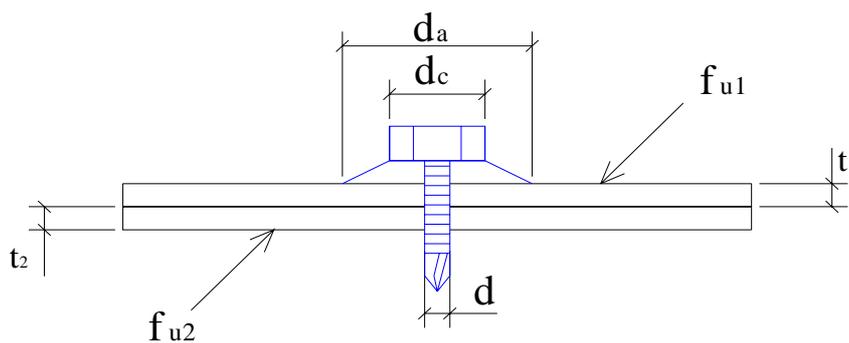


Figura 23 –Detalhe de uma ligação.

Tabela 6 – Dimensionamentos de PAA's à tração segundo as principais normas.

Dimensionamento à tração			
NORMA	Modos de falha		
	Arrancamento	Puncionamento (deslizamento)	Ruptura do PAA
BS 5950:Part 5 (1987)	$F_{a,R} = 0,65 \cdot t_2 \cdot d \cdot p_{y2}$	$F_{p,R} = 1,1 \cdot t_1 \cdot d_a \cdot p_{y1}$	¹ Determinado por ensaio ² Garantido pelo fabricante ² $F_{p,R} \geq 1,25 \cdot V_{Rd}$
ENV 1993-1-3 (1996)	$F_{a,R} = 0,65 t_2 \cdot d \cdot f_{u2}$	P/ ações estáticas $F_{p,R} = t_1 \cdot d_w \cdot f_{u1}$ P/ ações repetidas $N_{pr,R} = 0,5 \cdot t_1 \cdot d_w \cdot f_y$	³ $F_{p,R} = 0,80 \cdot F_{t,Rf}$
AISI (1996)	$F_{a,R} = 0,85 t_2 \cdot d \cdot f_{u2}$	$F_{p,R} = 1,5 \cdot t_1 \cdot d_a \cdot f_{u1}$	
AISI (2001b)			
AS/NZS 4600 (1996)			
¹ Aplicável a todas as normas ² Não aplicável a ENV 1993-1-3 (1996) ³ Aplicável apenas a AISI (2001b)			

Tabela 7 – Dimensionamentos de PAA's ao cisalhamento segundo as principais normas.

Dimensionamento ao cisalhamento			
<i>NORMA</i>	Modos de falha		
	Inclinação excessiva do PAA	Esmagamento do furo	Ruptura do PAA
BS 5950:Part 5 (1987)	a) $t_2/t_1 \leq 1,0$ $V_R \leq \begin{cases} 3,2 \cdot (t_1^3 \cdot d)^{1/2} \cdot f_y \\ 2,1 \cdot t_1 \cdot d \cdot f_y \end{cases}$		¹ Determinado por ensaio ² Garantido pelo fabricante ² $V_{p,R} \geq 1,25 \cdot V_R$ ³ $V_{p,R} = 0,80 \cdot V_{Rp,f}$
ENV 1993-1-3 (1996)	b) $t_2/t_1 \geq 2,5$ $V_R = 2,1 \cdot t_1 \cdot d \cdot f_y$ c) $1,0 < t_2/t_1 < 2,5$ Interpolação linear		
AISI (1996)	d) $t_2/t_1 \leq 1,0$ $V_R \leq \begin{cases} 4,2 \cdot (t_2^3 \cdot d)^{1/2} \cdot fu_2 \\ 2,7 \cdot t_1 \cdot d \cdot fu_1 \\ 2,7 \cdot t_2 \cdot d \cdot fu_2 \end{cases}$		
AISI (2001b)	e) $t_2/t_1 \geq 2,5$ $V_R \leq \begin{cases} 2,7 \cdot t_1 \cdot d \cdot fu_1 \\ 2,7 \cdot t_2 \cdot d \cdot fu_2 \end{cases}$		
AS/NZS 4600 (1996)	f) $1,0 < t_2/t_1 < 2,5$ Interpolação linear		
¹ Aplicável a todas as normas ² Não aplicável a ENV 1993-1-3 (1996) ³ Aplicável apenas a AISI (2001)			

A Tabela 8 apresenta as expressões normativas para determinação de resistências de cálculo referentes às normas estudadas. Algumas combinações de valores foram simuladas para comparar tais expressões. Os valores adotados foram escolhidos conforme os corpos-de-prova utilizados nas análises laboratoriais, que serão apresentadas no Capítulo 4. Para maior entendimento dos gráficos se faz necessário ler o tópico 4.2, no qual está relatada a descrição da nomenclatura dos corpos de prova.

Foram comparados apenas os resultados referentes às solicitações de tração, conforme os objetivos específicos desse trabalho, pois essa é a ação crítica nas ligações do tipo terça-telha.

No gráfico da Figura 24, apresentam-se as proporções de comparação entre os resultados das expressões *nominais* normativas da ENV 1993-1-3 (1996) pelos respectivos da AISI (2001b). Não é possível realizar a mesma comparação com a norma BS 5950:Part 5 (1987), pois as suas expressões já apresentam os valores de cálculo e não *nominais* como as outras. No gráfico da Figura 25 apresentam-se as relações comparativas dos valores de *cálculo*. Foram adotados os mesmos exemplos do gráfico da Figura 24.

Tabela 8- Comparativos dos valores normativos de cálculo

NORMA	Solicitação do PAA					
	Tração			Cisalhamento		
	Arrancamento	Puncionamento	Ruptura do PAA	Inclinação excessiva do PAA	Esmagamento do furo	Ruptura do PAA
BS 5950:Part 5 (1987)	$F_{a,Rd} = F_{a,R}$	$F_{p,Rd} = F_{p,R}$	$F_{tp,Rd} = F_{tp,R}$	$V_{Rd} = V_R$	$V_{Rd} = V_R$	$V_{p,R} \geq 1,25 \cdot V_R$
ENV 1993-1-3 (1996)	$F_{a,Rd} = F_{a,R} / 1,25$	$F_{p,Rd} = F_{p,R} / 1,25$	Ensaio	$V_{Rd} = V_R / 1,25$	$V_{Rd} = V_R / 1,25$	Ensaio
AISI (1996)	$F_{a,Rd} = 0,5 \cdot F_{a,R}$	$F_{p,Rd} = 0,5 \cdot F_{a,R}$	Ensaio $F_{tp,R} \geq 1,25 \cdot F_{tR}$	$V_{Rd} = 0,5 \cdot V_R$	$V_{Rd} = 0,5 \cdot V_R$	Ensaio $V_{p,R} \geq 1,25 \cdot V_R$
AISI (2001b)	$F_{a,Rd} = 0,5 \cdot F_{a,R}$	$F_{p,Rd} = 0,5 \cdot F_{a,R}$	Ensaio $F_{tp,R} = 0,5 \cdot (0,80 \cdot F_{t,Rf})$	$V_{Rd} = 0,5 \cdot V_R$	$V_{Rd} = 0,5 \cdot V_R$	Ensaio $V_{p,R} = 0,5 \cdot (0,80 \cdot V_{Rp,f})$
AS/NZS 4600 (1996)	$F_{a,Rd} = 0,5 \cdot F_{a,R}$	$F_{p,Rd} = 0,5 \cdot F_{a,R}$	Ensaio $F_{tp,R} \geq 1,25 \cdot F_{tR}$	$V_{Rd} = 0,5 \cdot V_R$	$V_{Rd} = 0,5 \cdot V_R$	Ensaio $V_{p,R} \geq 1,25 \cdot V_R$

Figura 24 - Comparativo entre valores nominais de resistências a tração ENV/AISI

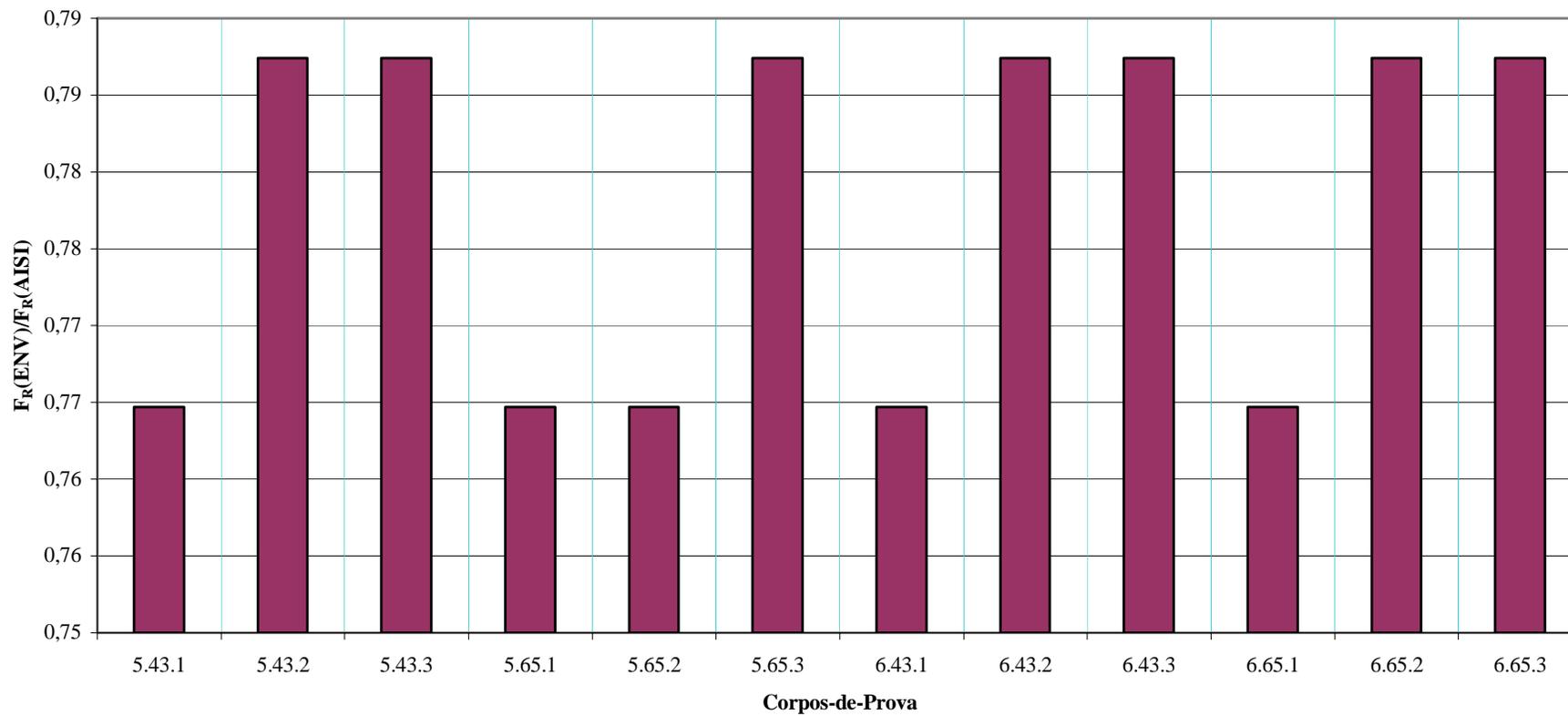
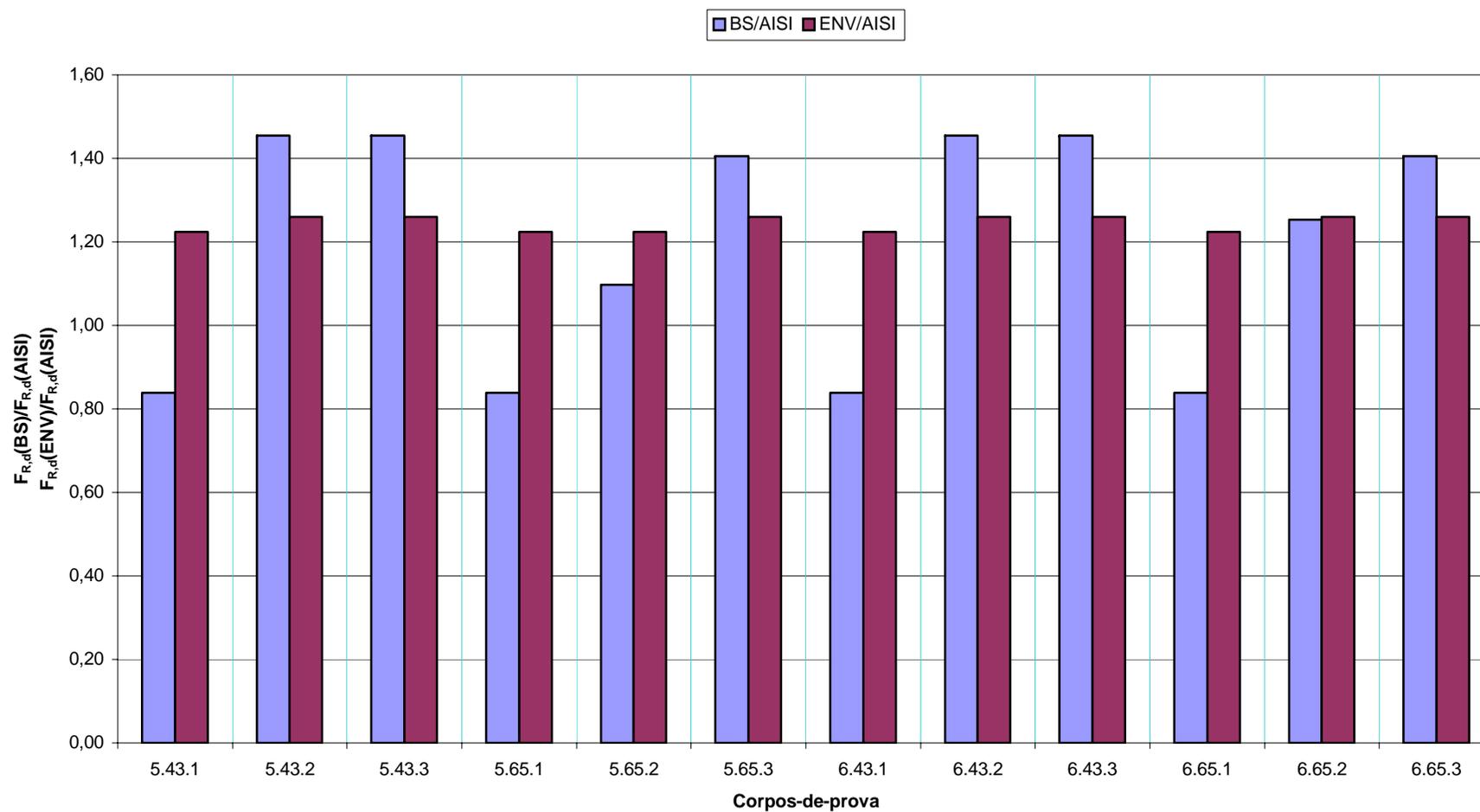


Figura 25 - Comparativo entre valores resistentes de cálculo



Além das diferenças entre normas de formulações, são notados também outros pontos de distinção ou particularidades, relatadas a seguir:

✓ A abrangência das normas, quanto ao diâmetro dos PAA's, são as seguintes: AISI (2001b e 1996) $2,03\text{mm} \leq d \leq 6,35\text{mm}$, AS-NZS (1996), $3,0\text{mm} \leq d \leq 7,0\text{mm}$ e o ENV (1996) $2,6\text{mm} \leq d \leq 6,4\text{mm}$, diferenças não significativas. Estas restrições de aplicabilidade das normas não possuem uma limitação muito severa quando comprovada a adequação das equações adotadas, através de ensaios;

✓ A diferença de nomenclatura e a forma de apresentação das expressões são pontos divergentes entre todas as normas estudadas. Tal fato decorre da adequação às especificidades de cada região às quais se aplicam.

✓ Os modos de falha, escorregamento (*pull through*) e puncionamento (*pull over*), apesar de serem diferenciados, não possuem diferentes métodos de cálculo na determinação dos esforços resistentes, traduzidos em igualdade nas normas estudadas. Há apenas uma diferença de nomenclatura, para a ENV (1996) e BS (1987) *pull-through*, para AS/NZS (1996) *pull-over/pull-through* e AISI (1996 e 2001b) *pull-over*, todas se referenciando ao mesmo fenômeno.

✓ A AISI (2001b) é a única a limitar as resistências nominais de ruptura por cisalhamento e tração do PAA em 80% do valor determinado por fabricante, através de comprovação de ensaios realizados em institutos idôneos e independentes.

✓ A AISI (1996) e a AS-NZS – determinam a resistência nominal a tração e ao cisalhamento do PAA por meio de ensaios (e desses ensaios determinam o fator de redução de resistência ϕ), além de limitar em no mínimo 25% maior que a maior força nominal resistente da ligação (menor valor entre a força nominal resistente de arrancamento e a de puncionamento).

✓ Tanto a AISI (2001b), quanto a AS/NZS (1996) adotam redução de resistência para 75% do valor calculado em aços de alta resistência que apresentam tensão de escoamento $f_y \geq 550\text{MPa}$ em chapas com espessura menores que 0,9mm, para reduzir o efeito de ruptura brusca, pois em geral os aços de alta resistência tem uma baixa relação f_u/f_y .

✓ A ENV 1993-1-3 (1996) é a única das normas estudadas que apresenta redução de resistência ao puncionamento de 50% ao considerar ações repetidas. De

igual forma é única, ao considerar o posicionamento de fixação do PAA na telha, pois também aplica um fator de redução de resistência ao puncionamento. Caso a fixação for a um quarto da onda baixa, a resistência de projeto precisará ser reduzida para $0,9 F_{p,Rd}$ e se existirem dois conectores fixos a dois quartos da onda baixa, a resistência deve ser tomada como $0,7 F_{p,Rd}$ por conector, Figura 26.

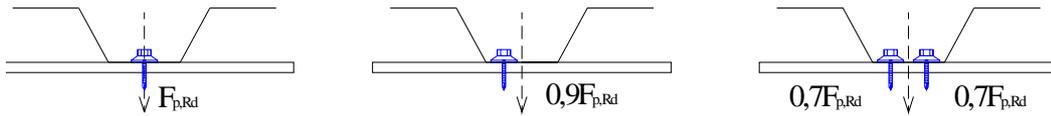


Figura 26 – Redução da resistência ao puncionamento quanto à posição dos PAA's.

✓ A AISI (2001b) é a única que reduziu a mínima distância entre os centros dos PAA's e as extremidades da peça de 3,0 vezes o diâmetro, para 1,5 vez o diâmetro do conector. Contudo para a distancia de centro a extremidade, paralela a aplicação da força, limita a resistência nominal ao cisalhamento por PAA a $V_{R,p}=t e f_u$ (ruptura da seção líquüida).

3 Ensaio de caracterização e ensaios de ligações (estado da arte)

Devido à grande variedade de parafusos e ao alto nível de influência de cada característica das ligações, os ensaios realizados em laboratórios apresentam-se como os mais adequados na análise de ligações constituídas por PAA's. As expressões normativas foram produzidas e ajustadas com base nos resultados de milhares de simulações de ligações como os apresentados em Pekoz (1990) e Tomà, A.; Sedlacek, G. e Weynand, K. (1993).

Devido aos avanços dos processamentos computacionais, que facilitaram o uso de ferramentas baseadas em métodos numéricos, há trabalhos que estudam simulações computacionais, a exemplo de Schiffner, K. e Helling, C. (1997). Entretanto essa metodologia de pesquisa não será abordada nesse trabalho, pois foram escolhidos os relatos de estudos laboratoriais. E dentre esses estudos, os que investigaram ligações sob a solicitação de tração, o mais característico para as ligações terço-telha.

Segundo Davies J. M. In Rhodes, J. (1991), a BS 5950: Part 5 não fornece regras específicas para ensaios de conectores ou conexões para estruturas de aço de perfil fino. Também afirma, entretanto, que no tópico 10.5 a norma remete os leitores às Recomendações européias da ECCS. Nelas os ensaios são divididos em duas categorias: determinação das características de resistência dos PAA's - ECCS-TC7 (1983b) – e determinação da resistência das ligações que utilizam os PAA's como elemento conectivo principal - ECCS-TC7 1983a -. Nesse trabalho utilizou-se o mesmo critério

de classificação dos ensaios encontrados na bibliografia, os quais foram divididos e apresentados, respectivamente nos itens 3.2 e 3.3.

Para espessuras mais elevadas de perfis formados a frio é possível realizar qualquer tipo de método de ligação utilizado nos perfis soldados e laminados a quente, tais como ligações parafusadas (parafuso e porca) e arco de solda elétrico. Nos perfis de menor espessura existe uma extraordinária variedade de técnicas e patentes de conectores, específicos para projetos onde há conexão de materiais esbeltos (perfis ou chapas). Há, como já apresentados, problemas específicos associados a essas conexões. Para a definição de resistências de projeto confiáveis e, em várias instâncias, os ensaios laboratoriais se apresentam com importante função. (DAVIES J. M. In RHODES J. 1991)

A maior ocorrência de falha nas estruturas metálicas, de cobertura e fechamento, que utilizam PAA's encontrados nas ligações e, com maior frequência, dois tipos básicos de modos de falha, arrancamento (*pull-out*) e o puncionamento (*pul-over*).

Há expressões normativas que determina analiticamente a resistência destas ligações, além disso as normas também permitem a determinação do esforço resistente de cálculo através de procedimentos de ensaios laboratoriais específicos para cada projeto. Em determinadas formas de solicitação, não adota expressão alguma, sendo o processo de determinação do esforço resistente exclusivamente determinado por ensaios.

Apresenta-se, a seguir, as considerações estatísticas abordadas nestes procedimentos de ensaio, a descrição dos métodos de ensaios específicos dos PAA's e uma breve explicação sobre os ensaios normativos e demais ensaios alternativos de ligações e as avaliações desses ensaios quanto à fidelidade em representar o fenômeno real.

3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Além dos procedimentos de ensaio, deve ser padronizada a análise dos resultados obtidos em laboratório, onde há influência além dos fatores intrínsecos ao estudo, o método e a velocidade do ensaio. Os resultados de ensaios em conectores podem mostrar uma significativa dispersão, portanto se faz necessário repetir um dado ensaio várias vezes e usar uma estatística apropriada e normalizada para fornecer informações conclusivas e confiáveis.

No relato de Davies J. M. in Rhodes J. (1991) apresenta a abordagem estatística padronizada da (ECCS), tal procedimento é mostrado a seguir.

Um ensaio de conector fornece três pontos de informação, resistência, rigidez e capacidade de deformação.

As recomendações europeias dão detalhes do procedimento de ensaio e descreve que a força resistente característica, $F_{R,k}$ pode ser obtida através da força resistente média $F_{R,m}$ em uma seqüência de ensaios menos o número do desvio padrão σ , o que depende do número de ensaios da série. Deste modo,

$$F_{R,k} = F_{R,m} - c \cdot \sigma$$

onde c é um coeficiente dado pela tabela 2.

Tabela 9 – Coeficiente estatístico em função do número de ensaios para determinação da resistência característica

Número de repetições da série	5	8	10	12	16	20	30	50	>50
c	2,13	1,89	1,83	1,80	1,75	1,73	1,70	1,67	1,64

É necessário o mínimo de cinco ensaios para cada conjunto de conector e material conectado.

A resistência de cálculo é então dada por:

$$F_{R,d} = \frac{K_t K_\sigma F_{R,k}}{\gamma_m} \quad \text{onde}$$

$$K_t = \frac{t_g}{t_t} \leq 1,0 \quad \text{- fator de correção para espessura da chapa;}$$

t_g - valor convencional da espessura da chapa de aço sem revestimento;

t_t - valor da espessura medida nos ensaios;

$$K_\sigma = \frac{f_y}{f_{y,r}} \leq 1,0 \quad \text{- fator de correção para tensão de escoamento;}$$

f_y - tensão de escoamento mínima garantida do material da chapa;

$f_{y,r}$ - tensão de escoamento real do material da chapa utilizada nos ensaios;

γ_m - coeficiente de ponderação da resistência para conectores.

Valores apropriados de γ_m são sugeridos pela Recomendação Européia para serem usados em conjunto com a interpretação estatística acima. Desse modo, para situações em que uma grande quantidade de conectores dúcteis atuam em conjunto (por exemplo em painéis) $\gamma_m = 1,1$; onde apenas poucos conectores atuam junto (por exemplo conexão entre dois perfis) $\gamma_m = 1,2$.

A flexibilidade ao cisalhamento, C_h , onde for exigido para a proposta de projeto, é dada como um deslocamento por unidade de força, sendo:

$$C_h = \frac{\gamma_1}{R_k} \cdot \frac{\sum a_h}{n}$$

onde

γ_1 = fator de carga parcial \times fator de material γ_m ;

a_h = escorregamento do conector em uma força de $F_{R,k}/\gamma_1$;

n = número de ensaios.

3.2 ENSAIOS EM PAA'S (Caracterização)

Embora a AISI (1996) contenha expressões para determinação da resistência de projeto para uma conexão parafusada com PAA's, a norma não se reporta à resistência de projeto, tanto ao cisalhamento quanto à tração, especificamente para um parafuso. Apesar disso, um protocolo de determinação da resistência dos PAA's, para uma melhor capacidade de avaliação tanto da parte dos engenheiros quanto dos fabricantes, foi adotado em fevereiro de 2001 no encontro do Comitê de Especificações do AISI. (AISI 2001a).

Essa metodologia de ensaio estabelece procedimentos para a condução de ensaios que determinam as resistências à tração e ao cisalhamento de parafusos auto-atarraxantes de aço carbono. Os parafusos podem ser formadores de rosca ou cortadores de rosca, com ou sem ponta auto-brocante, e com ou sem arruela fixa. O destino de aplicação destes PAA's é conectar materiais de chapas metálicas formadas a frio.

Esses métodos de ensaio padrão descrevem ensaios mecânicos para determinar as seguintes propriedades: resistência à tração e resistência ao cisalhamento simples.

Como documentos de referência são apresentadas as seguintes normas:

✓ Normas ASTM;

A 370 – *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*

E 4 – *Standard Practices for Force Verification of Testing Machines*

F 606 – *Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets*

✓ Normas AISI;

Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 1996 Edition with Supplement No. 1 Tests Methods for Mechanically Fastened Cold-Formed Steel Connections, Cold-Formed Steel Design Manual, 1996 Edition.

A metodologia de ensaios determina que uma série de testes deve ser conduzida para cada categoria de material, tipo de cabeça, tipo de perfuração e diâmetro nominal de parafuso.

3.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O parafuso auto-atarraxante deve ser ensaiado em uma garra com carga aplicada axialmente entre a cabeça e uma fixação adequada, a qual deve estar suficientemente aparafusada para desenvolver toda a resistência do conector. Um modelo do ensaio é mostrado na Figura 27 (os fios da rosca podem ser fixados diretamente nas garras da máquina de ensaio se o corpo do parafuso não for esmagado ao fazê-lo)

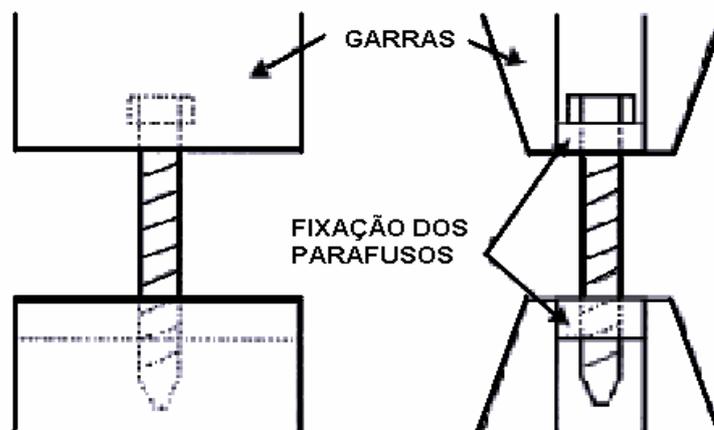


Figura 27 – Esquema de fixação do parafuso para ensaio de tração no parafuso

A velocidade do ensaio, determinada pelo deslocamento dos pistões da máquina de ensaio, deve ser limitada pelo maior entre 2,5mm por minuto e a razão de deslocamento causada por um passo de carga de 2kN por minuto.

A carga máxima aplicada ao espécime, simultaneamente ou antes da ruína do parafuso, deve ser registrada como a resistência à tração do parafuso.

3.2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O espécime deve ser ensaiado utilizando placas ou perfis de espessura suficiente para evitar falha por flexão e assegurar que a falha ocorra na seção completamente rosqueada. As placas ou perfis de cisalhamento devem criar uma sobrejunta conectada com um ou dois conectores.

Se dois conectores, utilizados são, a resistência total deve ser dividida por dois para determinar a resistência ao cisalhamento de cada PAA. Proporções geométricas sugeridas para o espécime ensaiado são dadas na Tabela 10, com referência à Figura 28.

O ensaio deve propiciar para um carregamento centrado paralelo a sobrejunta. Quando os prendedores são ajustáveis, ou quando a espessura de cada placa é menor que 2mm, os “calços” não são necessários para carga centrada.

Tabela 10 – Proporções geométricas sugeridas para ensaios de tração

Diâmetro do PAA d (mm)	w (mm)	L (mm)	e (mm)	p (mm)
≤ 6,5	50	Min. 250	25	50
>6,5	8d	Min. 250	3d > 25	3d > 50

O espécime a ser ensaiado pode ser unido a uma “base fixa de cisalhamento” ou rosqueado em duas chapas. O espécime deve ser preparado em uma máquina de ensaio à tração capaz de aplicar a carga e controlar o passo de carga. As garras devem ser auto-alinháveis e é preciso tomar o cuidado com a montagem do espécime para garantir que a carga seja transmitida em uma linha bem definida transversalmente até a falha do(s) PAA (‘s). A velocidade do ensaio, determinada pela razão de separação dos pistões da máquina de ensaio, deve ser limitada no máximo em 2,5 mm por minuto ou a “razão de separação” (deformação) causada por um passo de carga de 2 kN por minuto.

A máxima carga aplicada no espécime, coincidente ou anterior à ruína do parafuso auto-atarraxante, deve ser registrada como a resistência ao cisalhamento do parafuso.

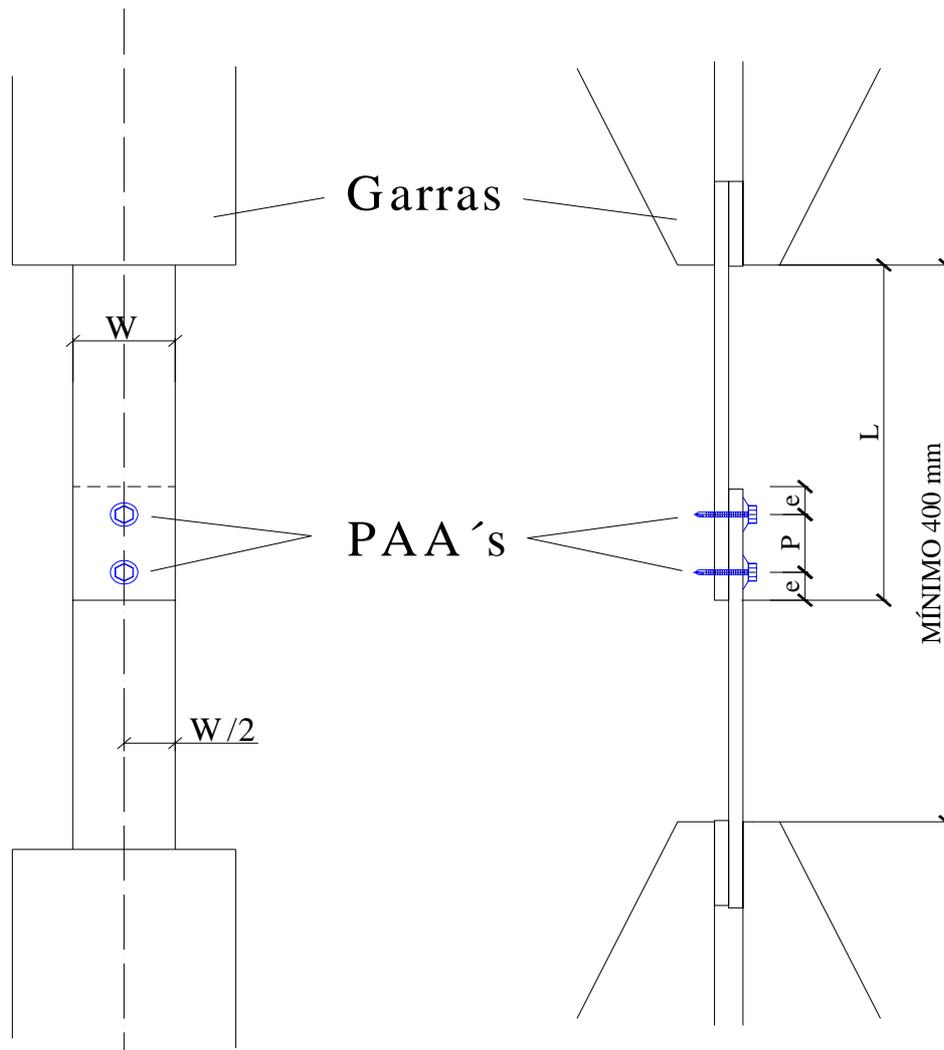


Figura 28 – Ensaio padrão de cisalhamento - 2 parafusos

O relatório de análise dos ensaios deve apresentar os objetivos e as propostas da série de ensaios devem ser atestadas no início do relatório. Os resultados esperados com a realização dos ensaios devem ser identificados, tais como a carga máxima por conector e o modo de falha. Os tipos de ensaios, a organização do ensaio, o engenheiro supervisor, e os dados nos quais os ensaios foram conduzidos também devem ser incluídos na documentação.

O espécime ensaiado deve ser completamente documentado, incluindo:

- a. Os dados sobre medida de dimensões e identificação de cada espécime.
 - ✓ Roscas (tipo e passo)
 - ✓ Roscas por comprimento
 - ✓ Dimensões da cabeça
 - ✓ Comprimento do PAA
 - ✓ Fabricante
 - ✓ Designação ou tipo
 - ✓ Comprimento sem rosca ou roscas imperfeitas abaixo da cabeça
 - ✓ Classe do material
 - ✓ Diâmetro da broca da ponta e comprimento das ranhuras para parafusos auto-brocantes
 - ✓ Alguma outra característica distinta
- b. Os detalhes das instalações dos conectores incluindo pré-furo, diâmetro da broca, se utilizada, torque de aperto e alguma ferramenta especial utilizada na instalação.
- c. Identificação dos dados das arruelas ou cabeças arrueladas, incluindo diâmetro, espessura, material, e dados sobre vedador se presente.

A instalação do ensaio deve ser completamente descrita incluindo o tipo de máquina de ensaio, o espécime e garras ou suportes.

O procedimento de ensaio deve ser completamente documentado incluindo “razão de carga” (passo de carga)

Em concordância com os objetivos do ensaio atestado por responsabilidade do engenheiro, o relatório deve incluir uma completa documentação de toda aplicabilidade dos resultados do ensaio para cada espécime como a carga máxima e o modo de falha. O relatório deve incluir também cálculos necessários para resistência de projeto e fator de segurança/fator de resistência baseado nas exigências especificadas na Seção F1 da AISI (1996).

3.3 ENSAIOS EM LIGAÇÕES METÁLICAS

Em situações de tempestades ou de ventos muito fortes, com velocidades de ventos fora de norma, as ruínas de coberturas metálicas ou sistemas de vedação, ocorrem nas ligações, devido à excessiva carga de vento, tanto de pressão, como de

sucção. A concentração de tensão ao redor da ligação geralmente ocasiona, o modo de falha de puncionamento¹³ da chapa. (MAHENDRAN 2001). Uma variação contínua de carga de subpressão causa fadiga da chapa. Por esse motivo a seguir são descritos os ensaios referentes aos possíveis modos-de-falha, tanto sob solicitações estáticas quanto cíclicas.

3.3.1 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO (*PULL-OUT*)

Devido à utilização de chapas metálicas com aços de alta resistência, em estruturas de coberturas e sistemas de vedação lateral, o modo de falha dessas estruturas se torna cada vez mais possível de ser o arrancamento (*pull-out*). Este modo de falha causa um colapso geral da estrutura de forma bastante abrupta.

3.3.1.1 ENSAIOS ESTÁTICOS

Originalmente vários métodos de ensaio foram utilizados para descrever o modo de falha de arrancamento, entre eles *U-tension* (Figura 29), *plate methods* (ensaio padrão e ensaio padrão específico) (Figura 30e Figura 31) e *cross tension* (Figura 32). As normas americana e europeia são fundamentadas em ensaios do tipo *U-tension* e a australiana em *cross tension*. As informações sobre estes métodos são referidas em Macindoe e Hanks (1994)” (MAHENDRAN (2001)).

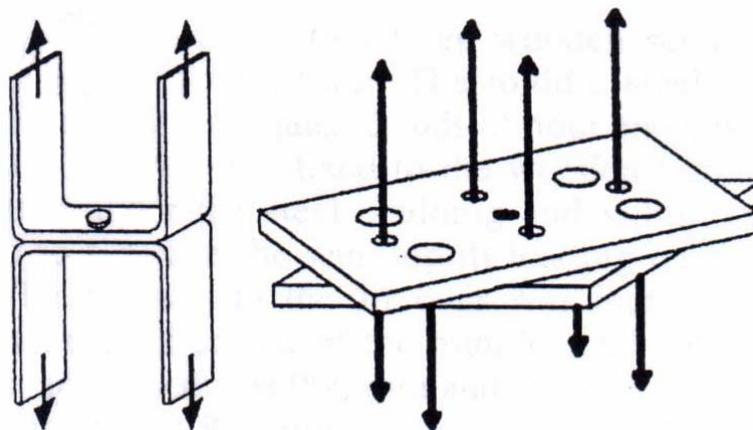


Figura 29 – Métodos de ensaio *U-tension* e *plate method* MAHENDRAN (2001)

¹³ É importante salientar que a afirmação quanto à ocorrência desse modo de falha, apresentado em MAHENDRAN (2001), decorre das características dos componentes terço-PAA-telha encontrados, mais comumente, em seu país de estudo, a Austrália. Tal fato não podemos generalizar para o Brasil, sendo necessário outro estudo para tal investigação.

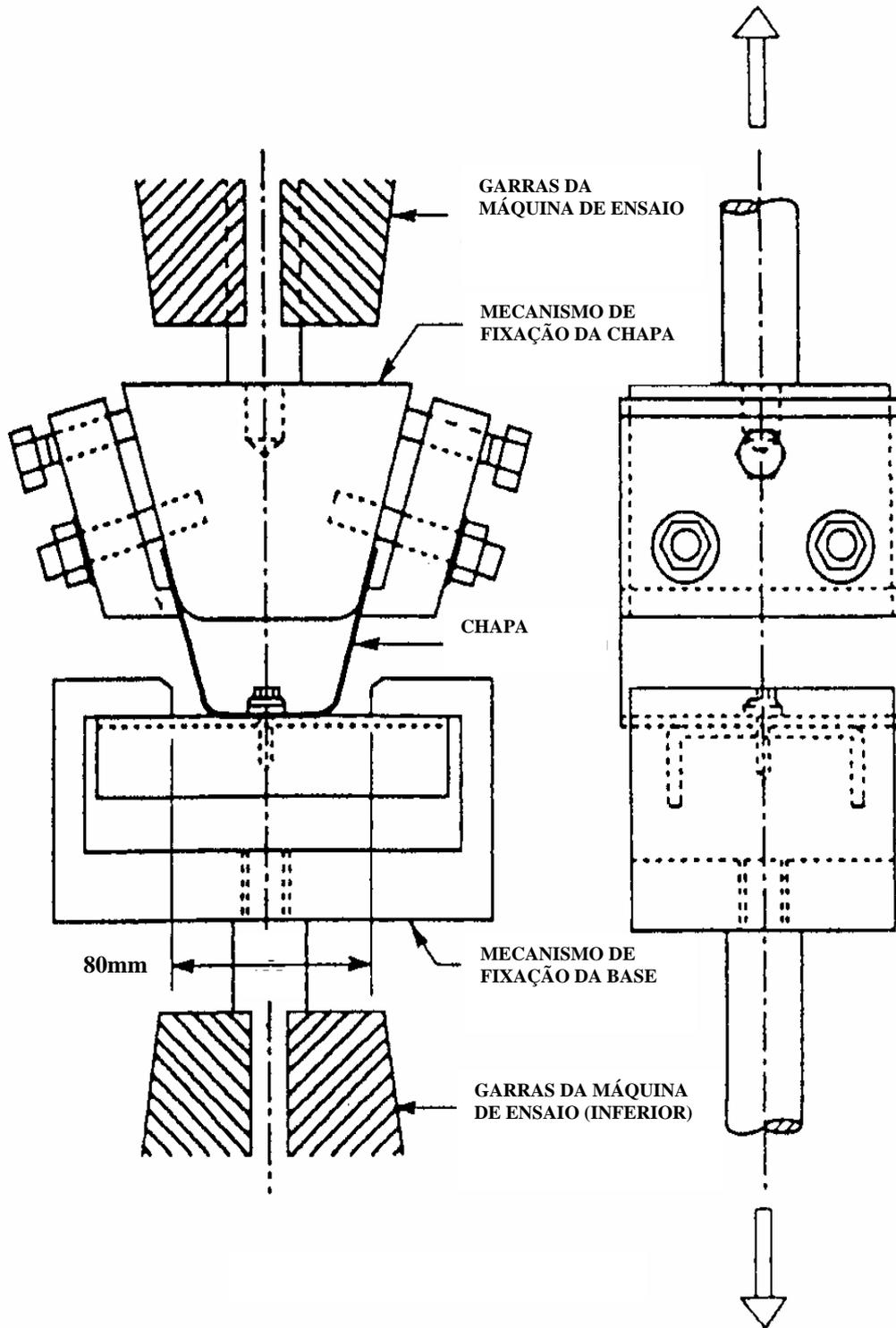


Figura 30 – Esquema do método de ensaio padrão MAHENDRAN (2001)

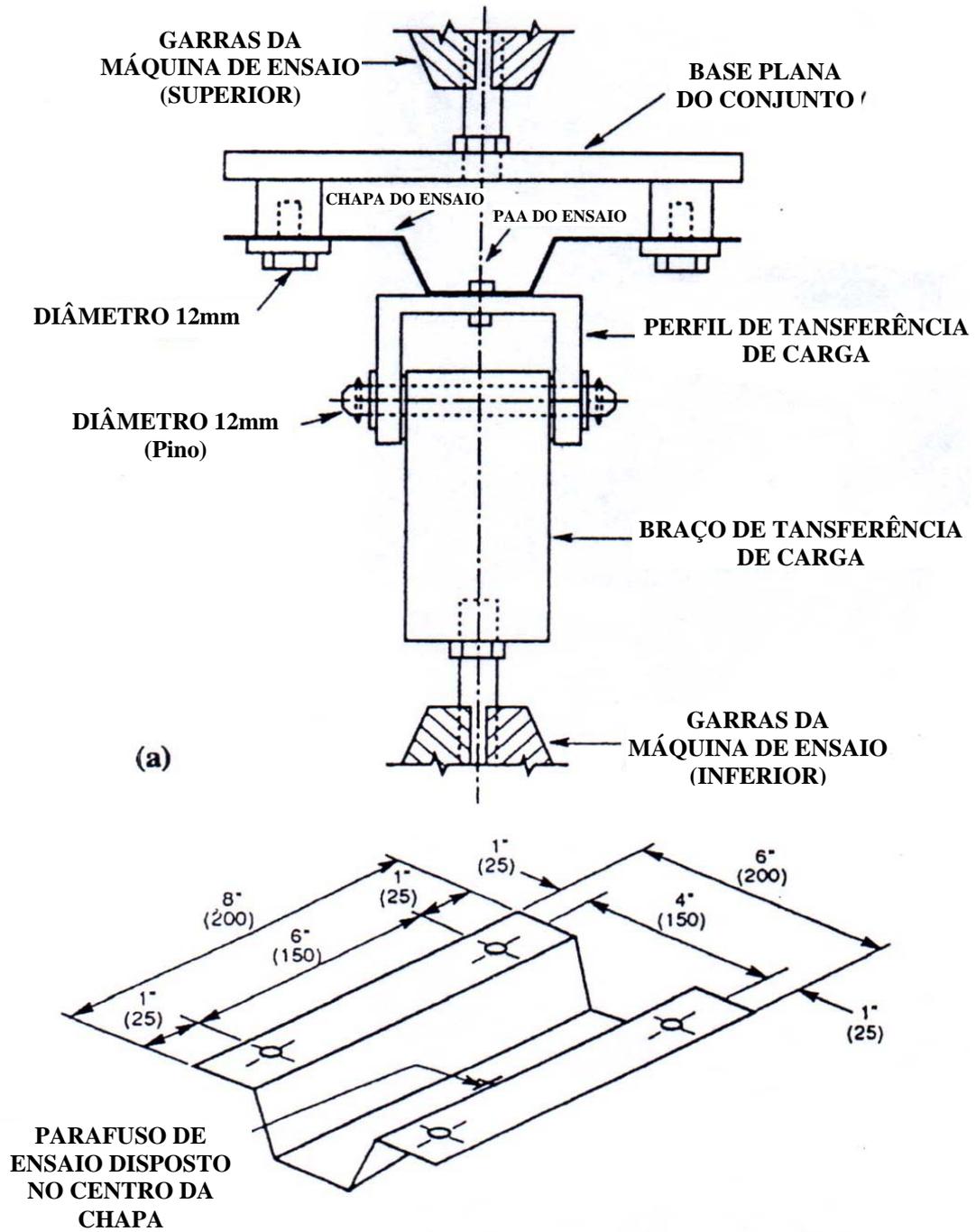


Figura 31 – Método de ensaio padrão específico. MAHENDRAN (2001)

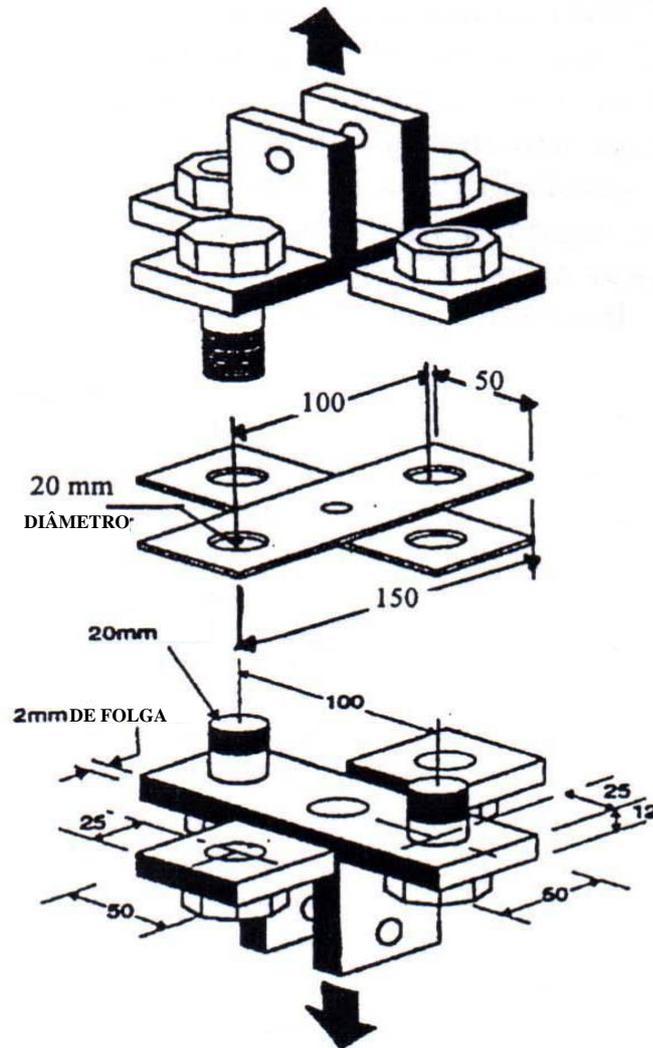


Figura 32 – Método de ensaio *Cross-Tension*. MAHENDRAN (2001)

Em trabalho mais recente, realizado por Mahendran (2001), foram feitos ensaios com modelos em porções reduzidas¹⁴, com sistemas de arrancamento de parafusos; tal método demonstra, para o autor, proximidade com a realidade pelo fato de as falhas se concentrarem exatamente na região próxima ao furo.

Para fazer a simulação, Mahendran (1998) utilizou porções reduzidas, sem levar em consideração a chapa, pelo pressuposto de a falha ocorrer no metal base (terça), uma vez que as telhas eram produzidas com aços de alta resistência $F_y=550$ MPa, o que é comum na Austrália. Inicialmente esse autor utilizou uma árvore de carregamento (Figura 33) com vãos semelhantes aos encontrados na construção civil e comparou seus resultados a outros realizados em modelos mais complexos, onde o carregamento é simulado pela utilização de sacos de ar infláveis.

¹⁴ Entenda-se simulações que utilizam pedaços de telha e de terça ligados por PAA, não levando em consideração o contorno ou configuração estrutural do telhado.

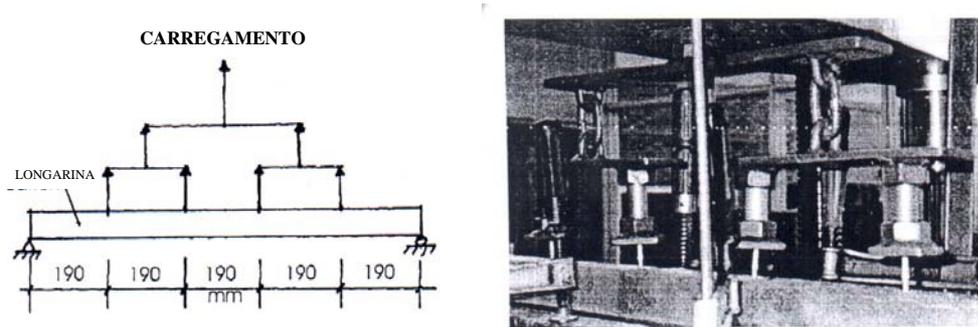


Figura 33 – Esquema de ensaio de arrancamento com vários parafusos (árvore de carregamento).

Em seguida, Mahendran (1998) desenvolveu um esquema de ensaio (Figura 34) que possibilitou uma maior velocidade e, assim, grande número de repetições com baixo custo de material (592 ensaios), pois utilizou apenas um vão de longarina metálica, com um único parafuso no centro e atuou a força na cabeça.

Para a determinação do vão mais adequado, realizou-se uma série de ensaios e analisaram-se os valores de carga de ruptura, e comparando-os com os resultados obtidos através dos ensaios de vários parafusos, obteve-se um vão ideal de 300mm. Com esse vão foram obtidos valores de cargas próximas aos anteriores e além de ser possível simular o efeito de flexão na longarina.

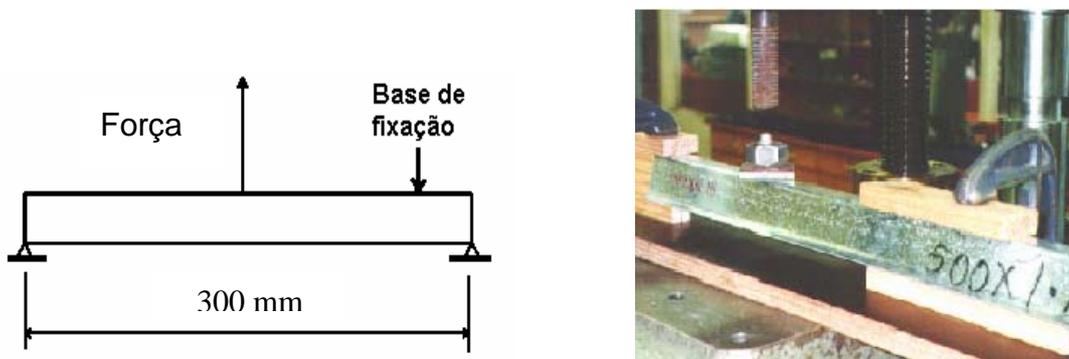


Figura 34 – Esquema de ensaio unidimensional com um parafuso

Na Figura 35 são mostrados os detalhes do mecanismo de transferência de carga para o PAA, usados nos ensaios de uma dimensão com vários ou um parafuso.

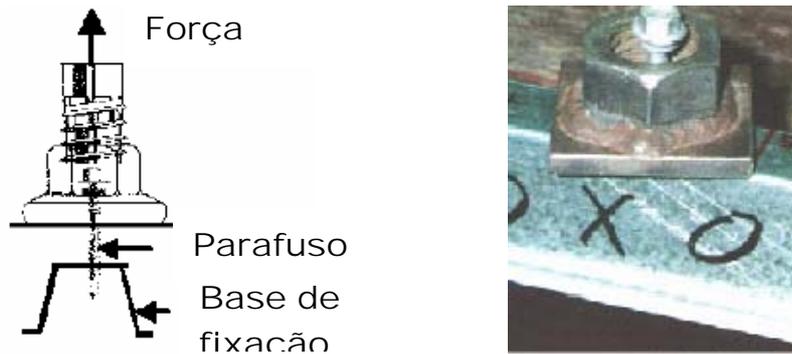


Figura 35 – Esquema do elemento de aplicação de carga no parafuso.

3.3.1.2 ENSAIOS DINÂMICOS

Na maioria dos casos, os estudos dinâmicos são investigações para verificar possíveis rupturas das ligações, sob o efeito de solicitações menores que os níveis de resistência de cargas estáticas, identifica-se nesse caso o efeito de fadiga da ligação. Os critérios normativos de dimensionamento, em geral são baseados em estudos estáticos, bem mais simples, e menos dispendiosos. Para países em que há uma frequente incidência de ciclones e furacões, ensaios cíclicos são bem mais realistas, pois além de simular o efeito de fadiga ainda pode avaliara o efeito de amplificação devido a freqüência de excitação da estrutura.

Esse tópico faz uma breve exposição dos mecanismos utilizados num estudo dinâmico. A Figura 36 apresenta um aparato de ensaio cíclico em ligações com PAA's extraído dos estudos de Mahendran (2001).

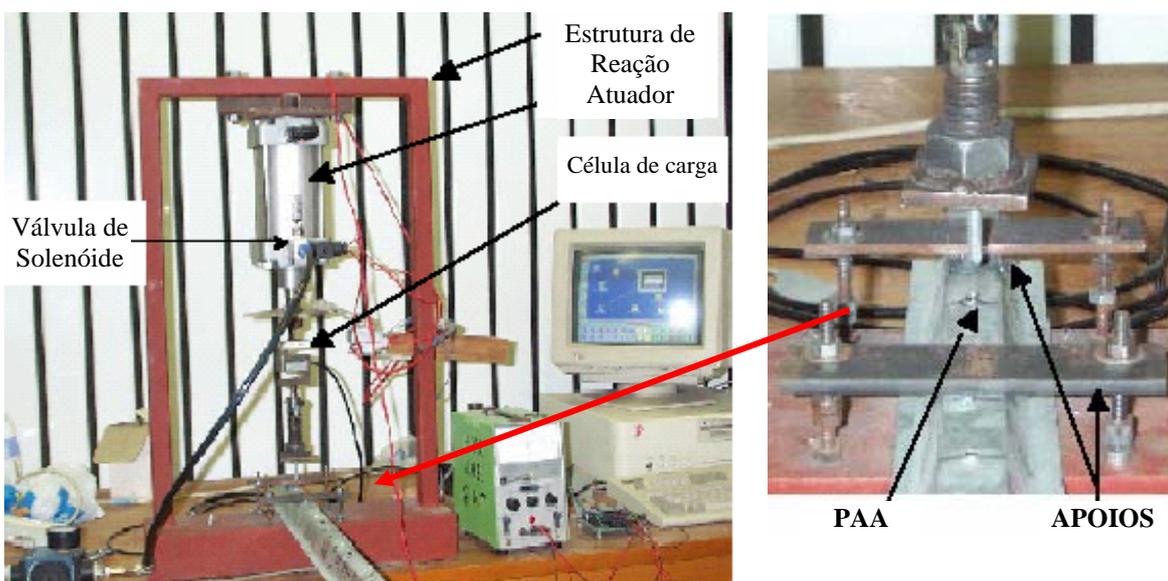
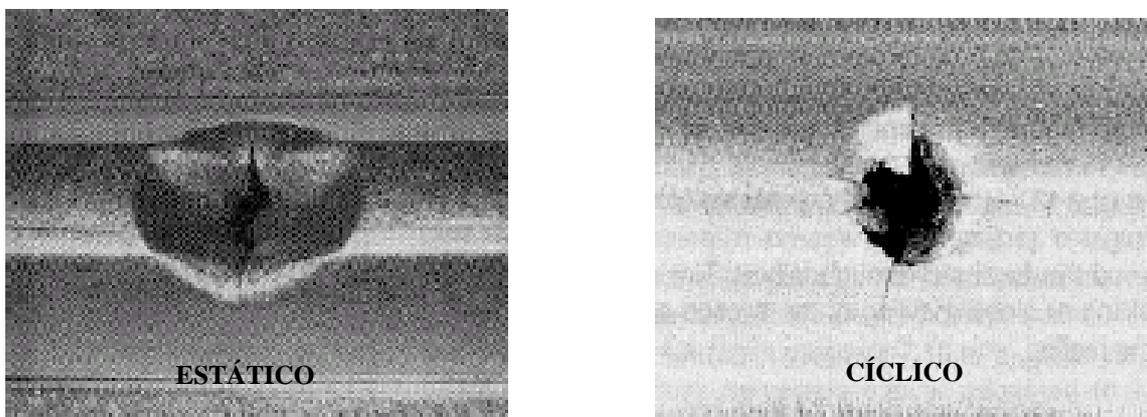


Figura 36 – Esquema de ensaio cíclico em ligação com PAA. Mahendran (2001)

Uma das conclusões apresentadas por Mahendran (2001) encontram-se possíveis variações nos detalhes de configuração dos corpos-de-prova, após a ruptura, como apresentada na Figura 37, onde observa-se



**Figura 37 – Comparação entre formas de ruptura da telha entre ensaio estático e cíclico.
Mahendran (2001)**

3.3.2 ENSAIOS DE PUNÇIONAMENTO (*PULL-OVER*)

Comumente, inclusive no Brasil, ainda se empregam perfis de sustentação de chapas não tão finas como os estudados por Mahendran, e as chapas utilizadas nas telhas e longarinas não são de aço de alta resistência; o que leva a crer que o modo de falha mais comum seja puncionamento, isso torna importante para a realidade brasileira o estudo sobre os ensaios referentes a esse modo de falha.

3.3.2.1 ENSAIOS-PADRÃO

Para a determinação da resistência ao puncionamento da chapa em uma ligação com PAA ao puncionamento, o ensaio padrão já apresentado anteriormente para o estudo de arrancamento é o mesmo recomendado pelas especificações dos EUA e Europa.

Quanto ao estudo do puncionamento Mahendran (1997) relata que o ensaio padrão apresenta duas desvantagens. Primeiro, assume que o puncionamento não depende do perfil da chapa de vedação. Desta maneira, desprezando o aspecto da geometria, um pedaço de chapa é recortado e dobrado para ser encaixado no aparato e realizar o ensaio, como é mostrado na Figura 38.

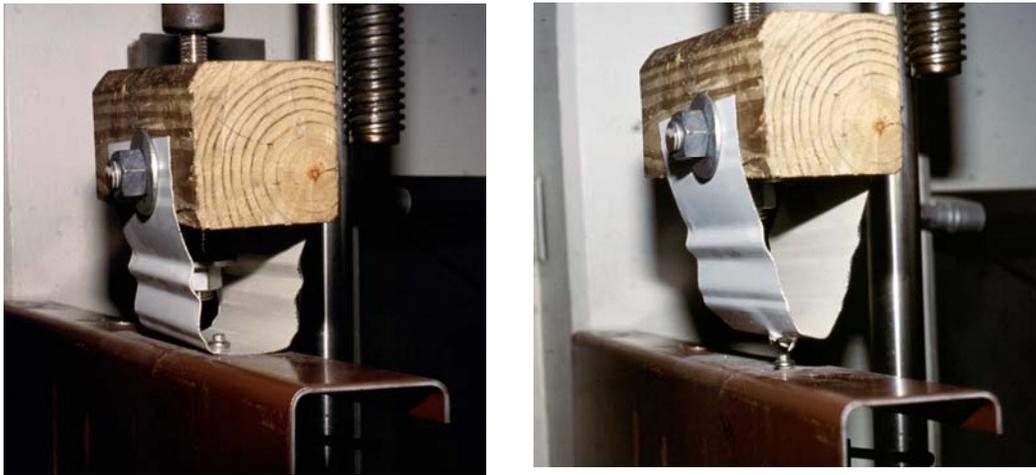


Figura 38 – Detalhe do ensaio de puncionamento pelo do método padrão (ELLIFRITT 2001)

A segunda desvantagem aponta para a inexistência da flexão transversal e longitudinal e da deformação de membrana da chapa ao redor do furo de fixação do conector, o que demonstra que o ensaio simula apenas o carregamento de tração no PAA. Ellifritt e Brunette (1990) *apud* Mahendran (1997), mostrou que tal condição é inadequada e superestima a resistência da ligação, ou seja, está contra a segurança.

Ellifritt e Kriener (1998) afirmam que o ensaio padrão não atende à simulação de reais condições de instalação pois, nas edificações atuais, as chapas metálicas são dispostas de forma perpendicular ao eixo do parafuso, em um estado de tração biaxial de membrana quando arrastado na direção paralela ao eixo do parafuso. Esta situação difere da condição do ensaio padrão que proporciona a mesma condição de carregamento, mas não apresenta a mesma condição de suporte Figura 39.

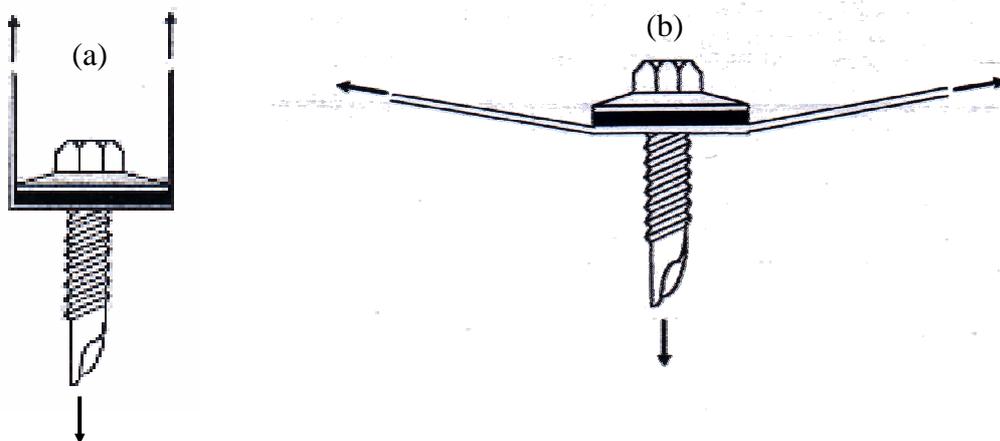


Figura 39 – Solicitação no parafuso pelo ensaio padrão (a) e na instalação real (b).

3.3.2.2 ENSAIOS ALTERNATIVOS

As recomendações normativas norte americana (AISI 1996) e europeia (ECCS 1983) *apud* Mahendran (1997) além dos métodos de ensaio padrão, sugerem um terceiro método, aplicável tanto para ligações fixas na crista como para as fixas no vale das chapas trapezoidais.

O comprimento do espécime é de no mínimo 12 vezes a largura da onda, a largura deve conter duas ondas para ensaios de ligações fixas no vale e três para as fixas na crista, na qual o PAA é conectado no centro. Diferente do ensaio padrão específico, os suportes são dispostos perpendicularmente às ondas. O espécime então sofre flexão longitudinal quando um carregamento de tração é aplicado no parafuso central. Quatro amarras de rigidez transversal são fixadas na face superior e inferior do espécime em dois locais por dentro do vão.

Ainda segundo Mahendran (1997) essa é a principal desvantagem desse método, pois não permite deformação, distorção, e flexão transversal da chapa, o que geralmente é mais representativo nos ensaios de conjunto. Esse é o único método de ensaio, indicado pelas normas norte americana e europeia, para ensaio de ligações fixas na crista, contudo parece ser inadequado.

3.3.2.3 ENSAIOS DE CONJUNTO

Para simular a força de arrancamento devido à ação do vento, principal ação que provoca o puncionamento, os ensaios de conjunto geralmente são realizados com dois vãos de telhas (chapas) apoiadas em três terças (longarinas). Desta forma, pode simular melhor o efeito de diafragma de tração e as vinculações reais da construção, assim caracteriza-se um ensaio de conjunto.

O ensaio realizado por Mahendran e Tang (1998) consiste de sacos plásticos acoplados a dois vãos de telhas que são fixas a três longarinas metálicas por PAA's; essas longarinas metálicas são ligadas a uma armação de madeira de grande bitola presas a uma base de reação. Na longarina central foram conectadas hastes com extensômetros nas duas extremidades, enquanto as outras duas longarinas de extremidade foram fixadas na armação de madeira. Dois sacos de ar foram dispostos

entre as longarinas e inflados para simular a ação do vento de sucção. A pressão dos sacos foi aumentada até o arrancamento dos PAA's. Figura 40.

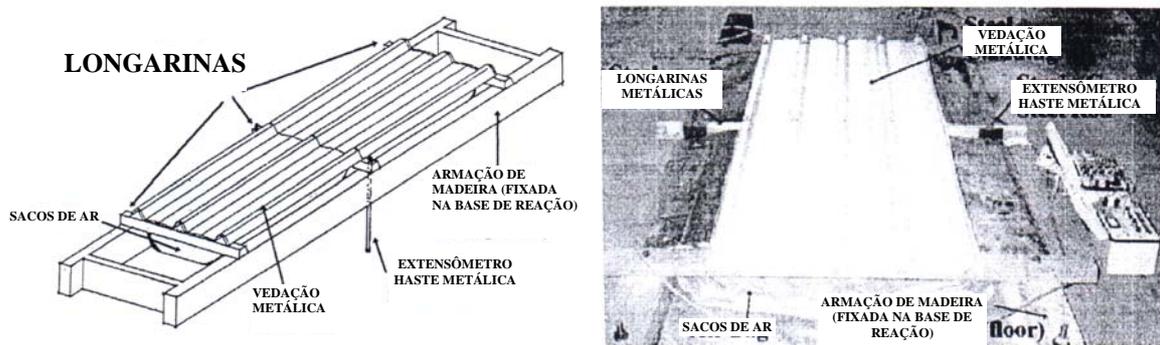


Figura 40 – Ensaio em grande escala utilizando sacos de ar Mahendran e Tang (1998).

Este método usou duas maneiras para obter o valor da carga média nos parafusos: primeiro dividiu a carga total na longarina central pelo número de PAA's nele conectados e depois utilizou a pressão do ar medida nos sacos em uma fórmula simples para determinar a reação da longarina central ($\text{reação} = 1,25 \times \text{pressão} \times \text{área carregada em cada vão}$).

Houve diferença entre os dois métodos de cálculo, fato que pode ser atribuído a uma série de razões: como a não uniformidade do carregamento de pressão nos sacos de ar; além disso, os sacos aplicam carga nas vigas e não apenas nas telhas; e inadequação da fórmula baseada em vigas de dois vãos ideais e nas reações previstas do suporte central. Em virtude desses motivos foram encontrados valores inconsistentes.

Mahendran e Tang (1998) também retomaram os ensaios com maior atenção e, alguns deles foram realizados com carregamento de blocos cerâmicos (tijolos) (Figura 41) usados para comparar os ensaios e as cargas médias; eles apresentaram razoável semelhança com os ensaios de sacos de ar. A precisão desses ensaios é discutível, uma vez que o acréscimo de carregamento não ocorre de maneira uniforme, e mais, não suaves (camadas de tijolos), que podem inviabilizar uma precisa medição; ademais o modo de avaliação dos esforços em cada parafuso possui a mesma imprecisão do ensaio com sacos de ar.

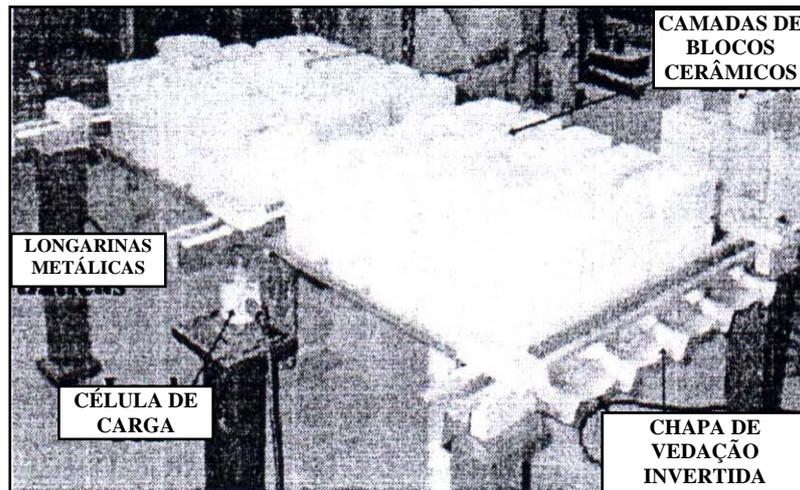


Figura 41 – Ensaio em grande escala com carregamento utilizando blocos cerâmicos Mahendran e Tang (1998)

Como alternativa para a simulação do efeito do carregamento de ventos de sucção, existe um aparato denominado caixa de vácuo, no qual uma caixa de madeira é fabricada para receber um modelo de ensaio de conjunto. Deve-se tomar os devidos cuidados para que a caixa seja bem vedada. Por meio de alguns orifícios em alguma parede lateral, nos quais são fixados tubos para acoplamento de equipamentos de sucção de ar e medidor de diferença de pressão. (Figura 42).

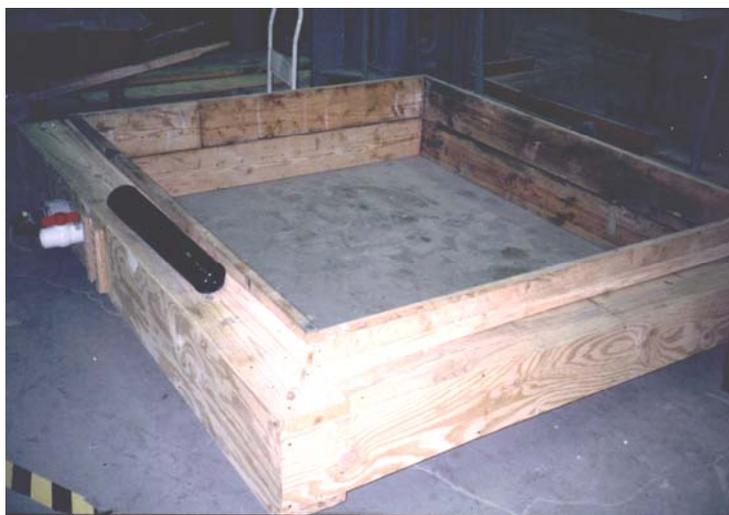


Figura 42 – Caixa de vácuo

Para a realização do ensaio as terças são apoiadas na caixa, com as telhas (chapas) dispostas para baixo, em seguida utiliza-se plástico para vedar por completo a região interior entre o piso, a caixa e a telha (Figura 43).



Figura 43 – Disposição do modelo em caixa de vácuo (vedação).

O ar interno ao aparato é retirado com o auxílio de uma máquina de sucção e, por diferença de pressão, é imposto um carregamento distribuído sobre a telha, até a ruína (Figura 44).

Ellifritt (1992) *apud* Ellifritt e Kreiner (1998) mostrou que o ensaio padrão produziu um carregamento aproximadamente 2,5 vezes maior que os carregamentos registrados através de ensaios de conjunto por eles confeccionados.



Figura 44 – Ruína de modelo em grande escala em ensaio de caixa de vácuo.

Ellifritt e Kreiner (1998) desenvolveram uma nova célula de carga (Figura 45, (a) a (d)) que adquire os valores de carregamento diretamente no parafuso, propiciando muito maior acurácia. As Figura 46 e Figura 47 mostram os dois modos de aquisição dos valores críticos nos ensaios de ligação.

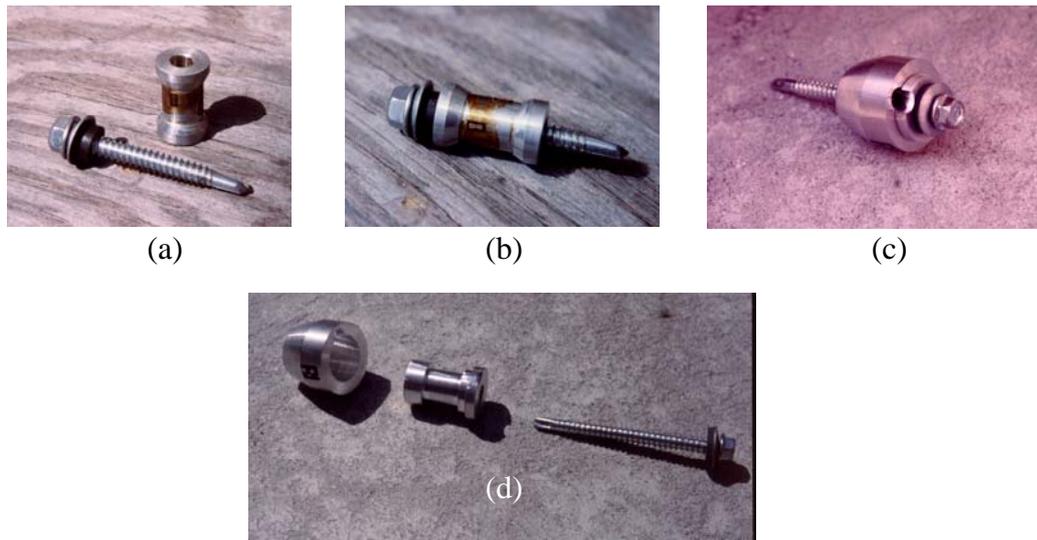


Figura 45 – Detalhes da célula de carga desenvolvida por Ellifritt e Kreiner (1998)

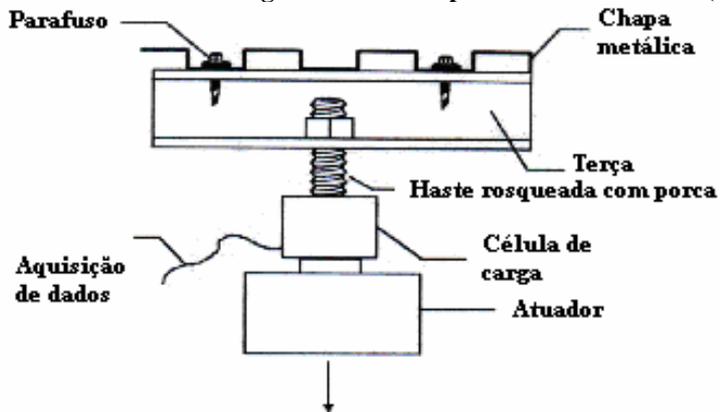


Figura 46 – Antigo esquema de aquisição de dados em ensaios de ligação com PAA

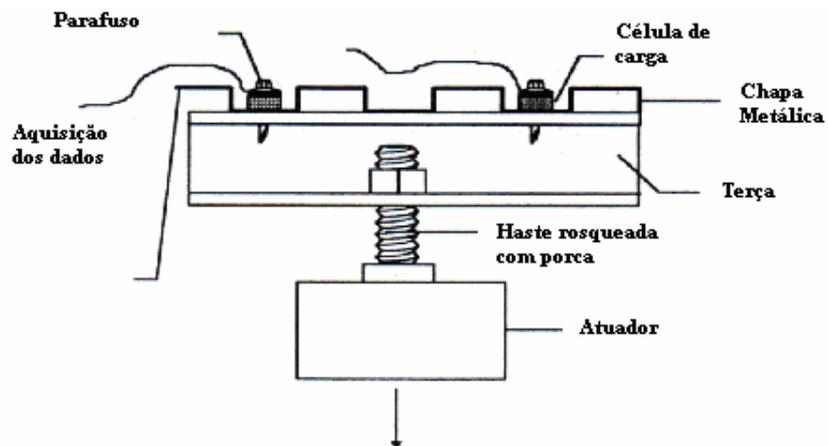


Figura 47 – Esquema de aquisição de dados utilizando nova célula de carga

Através dessa nova célula de carga é possível realizar coletas de dados por qualquer método de ensaio, a exemplo do ensaio em caixa de vácuo (Figura 48) e com valores mais realísticos.

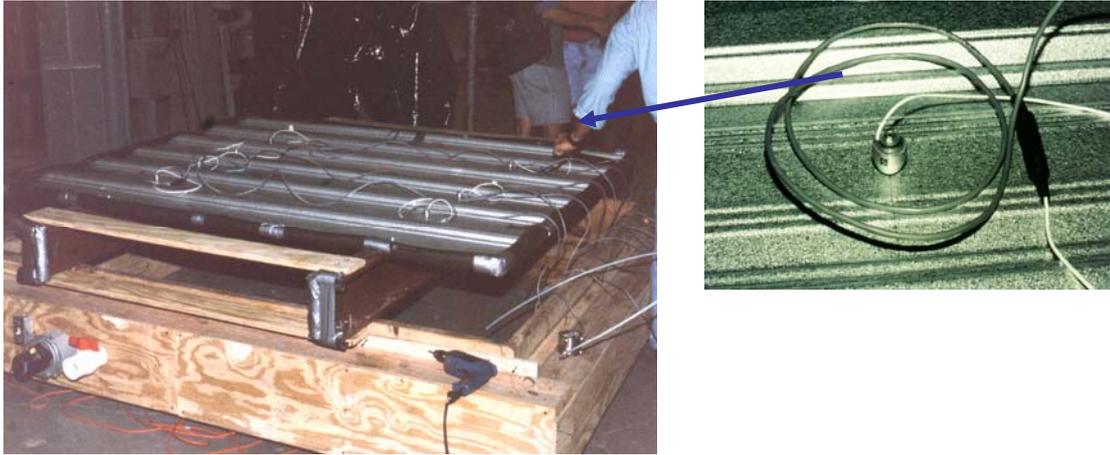


Figura 48 – Ensaio de conjunto de caixa de vácuo com célula de carga conectada no PAA

A grande desvantagem dos métodos de ensaio de conjunto é o custo envolvido na realização de cada ensaio, principalmente o custo operacional, que depende muito tempo e atenção de várias pessoas na confecção dos aparatos, para que o ensaio seja conduzido de maneira mais realística possível.

Entretanto em qualquer tentativa de simplificação desses ensaios faz-se necessária uma série de estudos que visem uma correlação entre todos os métodos de ensaios.

4 Análise experimental

Entre os estudos laboratoriais abordados na bibliografia aqui apresentada, podem-se distinguir dois grandes grupos: o que caracteriza as propriedades mecânicas dos elementos que constituem a ligação, tais como as resistências ao cisalhamento e a tração dos PAA's; e o que determina a capacidade resistente das ligações (telha-PAA-terça) propriamente ditas.

Os ensaios de ligações foram feitos conforme o padrão de Normalização do AISI (1996), neles verificou-se os modos de ruptura arrancamento e puncionamento. Semelhante aos identificados em sinistros nas coberturas e vedações laterais, devido aos efeitos de sucção provocados pela ação do vento. Para uma melhor acurácia na análise dos dados, o aço das telhas e terças utilizados nos ensaios foi caracterizado por ensaio mecânico de tração segundo ASTM 370-95.

Os objetivos principais da execução desses testes foram:

- ✓ caracterizar os modos-de-falha existentes;
- ✓ confrontar com resultados teóricos normativos;
- ✓ relatar detalhes do ensaio e avaliar a capacidade de execução

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Optou-se pela metodologia de ensaios preliminares, limitando-se a quantidade de ensaios, dos quais 27 estão relatados e analisados. Além disso determinou-se a escolha dos materiais (telhas, terças e PAA's), focando-se nos objetivos expostos,.

Os ensaios das ligações foram realizados no Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira – LaMEM, em máquina servo-hidráulica DARTEC. Os modelos foram confeccionados no Laboratório de Estruturas, ambos do Departamento de Engenharia de Estruturas. Os ensaios de caracterização foram realizados no

LAPROMECC – Laboratório de Propriedades Mecânicas do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística.

4.1.1 PARAFUSOS

Foram escolhidos os PAA's dentre os mais utilizados na construção civil brasileira na ligação terça-telha em coberturas metálicas. Esses parafusos, conforme suas características, são descritos da seguinte forma: não necessita pré-furo (auto perfurante), formador de rosca, com ponta tipo broca (auto brocante), arruela fixa à cabeça, combinada com borracha de neoprene (elemento de vedação). Dois diâmetros nominais de PAA foram utilizados nos experimentos, $d = 5,5\text{mm}$ e $d = 6,3\text{mm}$; as suas outras dimensões estão descritas, respectivamente, na Figura 49 e na Figura 50.

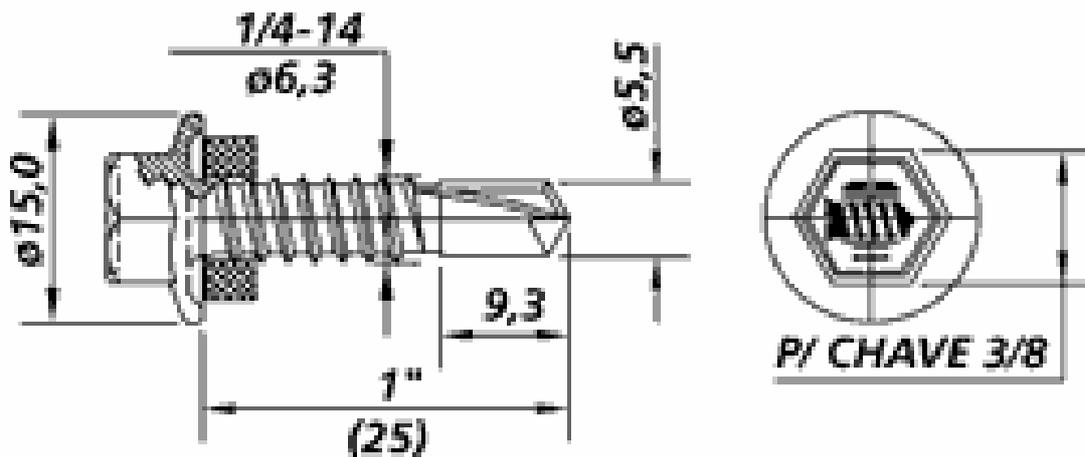


Figura 49 - PAA utilizado nos ensaios $d=6,3\text{mm}$. (www.manzato.com.br acesso 05/05/2001)

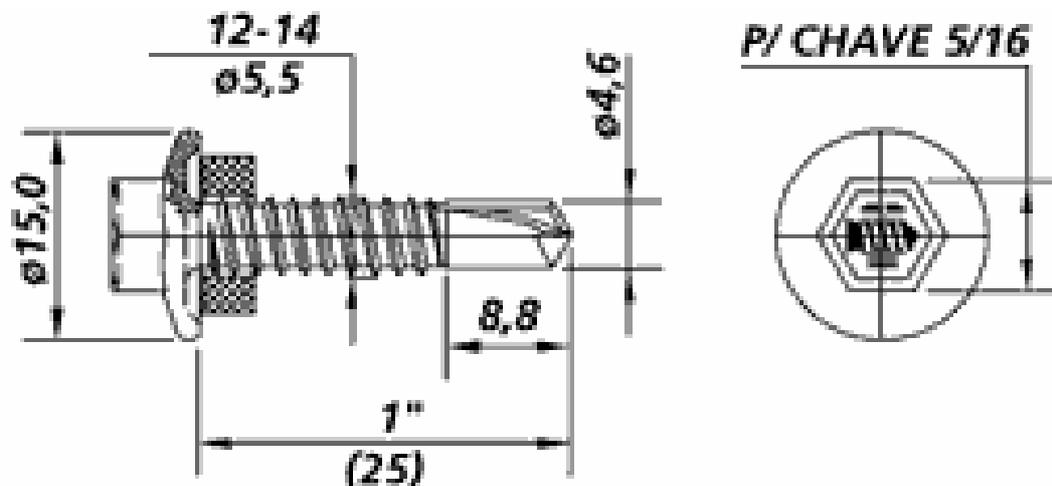


Figura 50 - PAA utilizado nos ensaios $d=5,5\text{mm}$ (www.manzato.com.br acesso 05/05/2001)

4.1.2 TELHAS

Como descrito anteriormente, o ensaio padrão AISI (1996) requer a utilização de pedaços de telhas, contendo duas cristas e um vale do perfil (Figura 51). Foram utilizadas telhas metálicas de aço, trapezoidais, de perfil 40 mm, e duas espessuras nominais de aço, $t = 0,43\text{mm}$ e $t = 0,65\text{mm}$ (considerado o revestimento de zinco $t_r = 0,036\text{ mm}$). Todos os pedaços utilizados foram retirados de uma única peça (uma para cada espessura), para garantir o padrão.

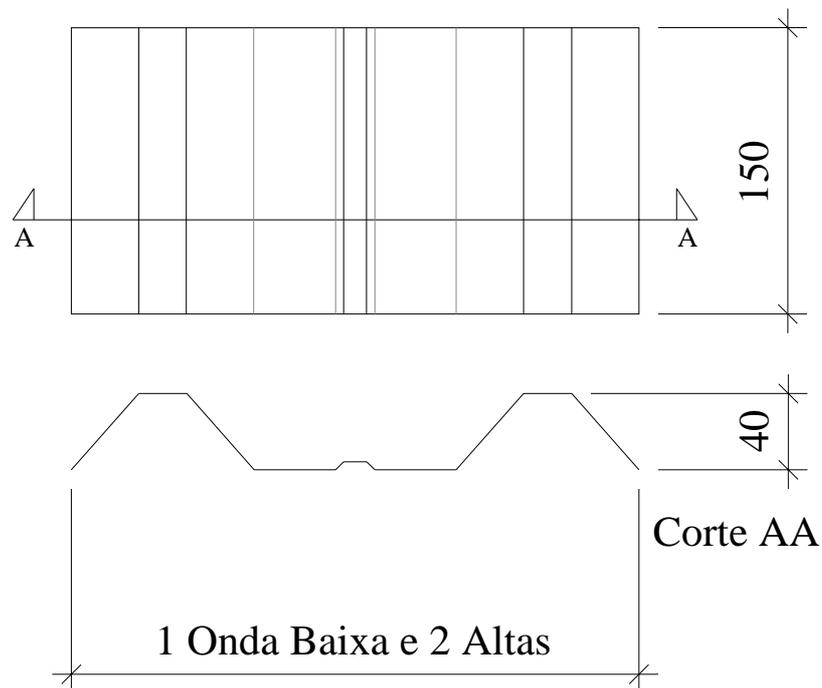


Figura 51 – Pedaço de telha para ensaio. (unidades em mm)

4.1.3 PERFIS (terças)

Pela metodologia de ensaio (AISI 1996), além das expressões normativas, a dimensão essencial a ser considerada é a espessura. Foram adotadas terças (pedaços) com três espessuras nominais diferentes, $t=0,90\text{mm}$ (Ue 127x50x17), $t=2,25$ (Ue 127x50x17) e $t=3,00$ (U 127x50). A espessura de 0,90mm foi indicada para atender o objetivo de caracterizar os distintos modos de falha, em especial o de arrancamento, apesar de não ser usualmente adotada para confecção de terças de coberturas ou fechamentos laterais.



Figura 52 – Seguimentos de terças utilizadas nos ensaios.

4.1.4 EQUIPAMENTO DE FIXAÇÃO

Uma parafusadeira (Figura 53) foi utilizada para realizar a ligação dos pedaços de telha e terça para constituir o corpo-de-prova, um modelo convencional de mercado. Sua principal característica é o controle de torque, pelo qual através de um sistema de embreagens, a parafusadeira elimina a transferência de rotação para o operador após a fixação do PAA. A capacidade de rotação reversa propicia a reutilização dos materiais e reparos de eventuais falhas de fixação.



Figura 53 – Parafusadeira utilizada para fixação dos parafusos (www.bosch.com.br acesso 24/01/03)

4.2 NOMENCLATURA DOS CORPOS-DE-PROVA

Os corpos-de-prova foram identificados através de um código que reflete as características dos materiais utilizados e a repetição do ensaio, tal procedimento foi adotado tanto nos ensaios de caracterização dos materiais quanto nos ensaios de ligações.

Nos ensaios de caracterização dos materiais os primeiros algarismos indicam o valor nominal da espessura da chapa a ser ensaiada, tal número é seguido de um algarismo romano, indicando a repetição, ver ilustração da Figura 54.

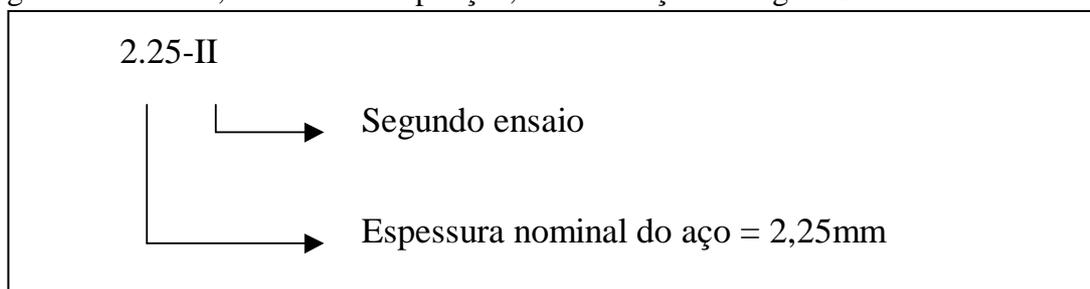


Figura 54 - Exemplo de indicação para corpo-de-prova de caracterização

Nos corpos-de-prova dos ensaios de ligação, o primeiro algarismo representa o diâmetro do parafuso, o segundo após o ponto indica a espessura nominal da chapa da telha, após o segundo ponto, o terceiro algarismo refere-se a espessura nominal da terça, e após o traço os algarismos romanos refletem a repetição do determinado ensaio. Para diferenciar um ensaio-piloto há na nomenclatura uma letra P em vez do algarismo romano. Ver ilustração da Figura 55.

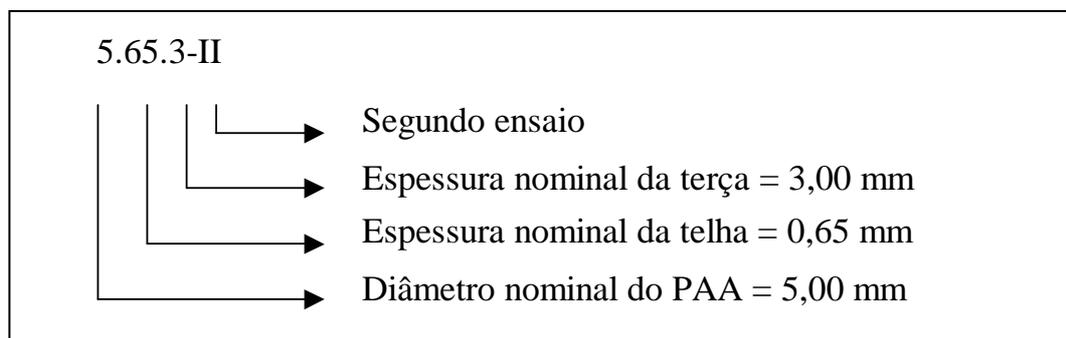


Figura 55 - Exemplo de identificação para corpo-de-prova de ensaio de ligação. (notação também adotada nas Figuras 24 e 25)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Ensaio de tração foram realizados em corpos-de-prova de 200mm, como mostra a Figura 56, por meio da metodologia prescrita pela ASTM 370-95, a fim de caracterizar os aços utilizados nas telhas e nas terças. Os elementos foram retirados do canal da telha, região da telha onde é feita a fixação com a terça (Figura 58). Normalmente a telha é fixada na mesa da terça, entretanto, como descrito na metodologia do ensaio padrão, a posição de fixação não é relevante e sim a espessura da terça, sendo assim os corpos-de-prova foram retirados da alma (Figura 57). Essas ações foram adotadas para que os resultados fossem os mais representativos possíveis.

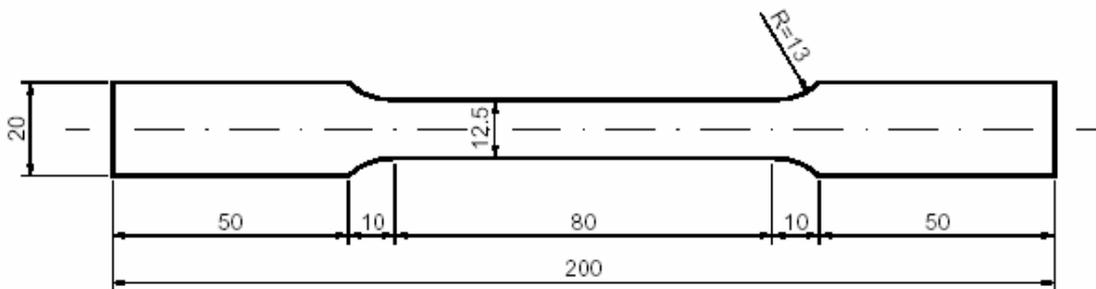


Figura 56 - Desenho esquemático do corpo-de-prova de caracterização dos aços utilizados nas terças (medidas em mm).

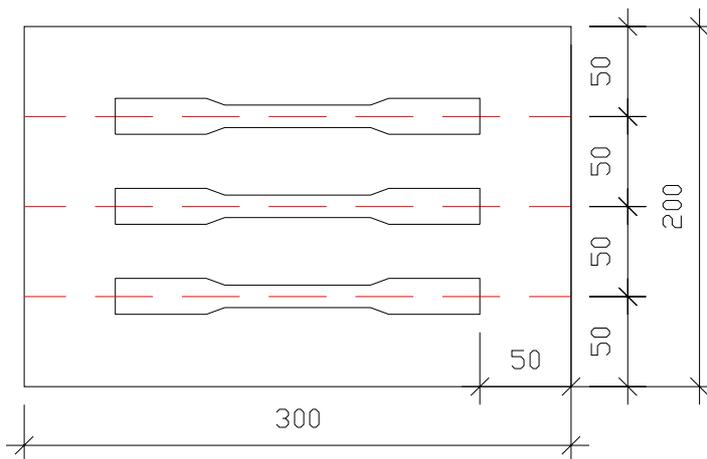


Figura 57 - Posicionamento dos corpos-de-prova na chapa de aço retirada da alma da terça (medidas em mm)

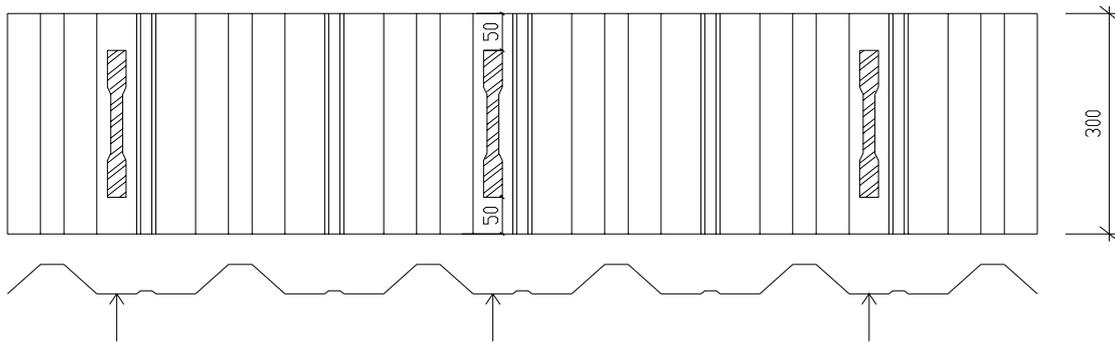


Figura 58 - Posição dos corpos-de-prova na telha (medidas em mm)

Os resultados da análise de propriedades mecânicas dos materiais estão apresentados na Tabela 11. Embora os corpos-de-prova sigam o padrão apresentado na Figura 56, os valores b , t_n , e l_f (largura, espessura e comprimento da região central do CP, respectivamente) foram obtidos por meio de medição manual com o uso de paquímetro e micrômetro digitais. Tais valores são utilizados no cálculo dos valores t e t_m (espessura do CP e média aritmética das espessuras medidas, separadas por grupos de espessuras), e A_o (área da seção transversal). Os valores F_y , e F_u foram obtidos pelos relatórios de ensaios de tração, realizados no LAPROMECC. O equipamento utilizado foi a máquina de ensaio de tração Emic DL10000 e o programa de aquisição de dados e emissão de relatórios, Tesc versão 1.10. Com base nos valores medidos e resultantes de aquisição de dados do ensaio obtivemos os valores de f_y , $f_{y,m}$, f_u , $f_{u,m}$ e σ .

Tabela 11 - Caracterização dos materiais

CP	b (mm)	t _n (mm)	$t = t_n - t_r$ $t_r = 0,036^2$ (mm)	t _m média (mm)	A ₀ =bxt (mm ²)	l ₀ (mm)	F _y (kN)	F _u (kN)	f _y (MPa)	f _{y,m} (MPa)	σ (MPa)	f _u (MPa)	f _{u,m} (MPa)	σ (MPa)	l _f (mm)	A (%)	f _{u,m} /f _{y,m}
0.43 I	12,65	0,438	0,402	0,407	5,085	50	1,56	1,90	306,77	296,15	31,01	373,04	356,93	34,60	63,60	27,20	1,21
0.43 II	12,64	0,431	0,395		4,993		1,60	1,90	320,46			380,55			64,46	28,92	
0.43 III	12,61	0,461	0,425		5,359		1,40	1,70	261,23			317,21			64,02	28,04	
0.65 I	12,68	0,657	0,621	0,624	7,874		2,40	3,00	304,79	308,31	9,20	380,99	388,51	7,17	65,49	30,98	1,26
0.65 II	12,60	0,668	0,632		7,963		2,40	3,10	301,39			389,29			66,05	32,10	
0.65 III	12,65	0,656	0,620		7,843		2,50	3,10	318,76			395,26			64,58	29,16	
0.90 I	12,65	0,849	0,849	0,846	10,740		1,90	3,50	176,91	177,47	0,50	325,89	326,92	0,93	68,39	36,78	1,84
0.90 II	12,64	0,845	0,845		10,681		1,90	3,50	177,89			327,69			68,69	37,38	
0.90 III	12,69	0,843	0,843		10,698		1,90	3,50	177,61			327,17			68,89	37,78	
2.25 I	12,71	2,268	2,268	2,272	28,826		8,90	12,40	308,75	306,42	2,06	430,16	426,68	3,23	67,50	35,00	1,39
2.25 II	12,70	2,273	2,273		28,867		8,80	12,30	304,85			426,09			65,37	30,74	
2.25 III	12,66	2,274	2,274		28,789		8,80	12,20	305,67			423,78			67,67	35,34	
3.00 I ¹	----	----	----	3,000	38,130		----	----	351,43	341,67	7,98	457,64	454,41	3,42	----	68,42	1,33
3.00 II ¹	----	----	----		37,324		----	----	348,30			455,47			----	67,15	
3.00 III ¹	----	----	----		38,440		----	----	340,79			450,05			----	66,75	
3.00 IV ¹	----	----	----		39,122		----	----	342,52			454,99			----	68,43	
3.00 V ¹	----	----	----		38,626		----	----	328,79			450,47			----	66,08	
3.00 VI ¹	----	----	----		38,440		----	----	338,19			457,86			----	65,12	

¹ Mesmo lote do material caracterizado por JAVARONI (1994).

² Espessura do revestimento de zinco (padrão B)

4.4 ENSAIOS DE LIGAÇÃO

Os equipamentos de fixação dos corpos-de-prova foram confeccionados para a execução dos ensaios, seguindo o modelo padrão do AISI (1996). Três peças de madeira, uma central e duas laterais simetricamente invertidas foram cortadas e aplainadas, para que a região de interface fosse segundo o formato de uma onda de telha trapezoidal, para propiciar a fixação da fatia de telha utilizada no corpo-de-prova mantendo o formato da onda trapezoidal (Figura 59). Foi escolhida a madeira da variedade Maçaranduba, devido a sua baixa deformabilidade, pois evita possíveis erros na leitura de deslocamentos.

Através da peça central de madeira foi introduzida uma haste metálica de forma a passar pelo seu centro de gravidade, e ser perpendicular às faces superior e inferior. Porcas e contra-porcas foram utilizadas na fixação da haste na peça central. Para evitar possíveis excentricidades o furo na madeira foi ajustado sem folga. Hastes transversais, porcas e arruelas realizam a união das três partes. (Figura 60)



Figura 59 - Parte superior do aparato de ensaio padrão AISI (1996).

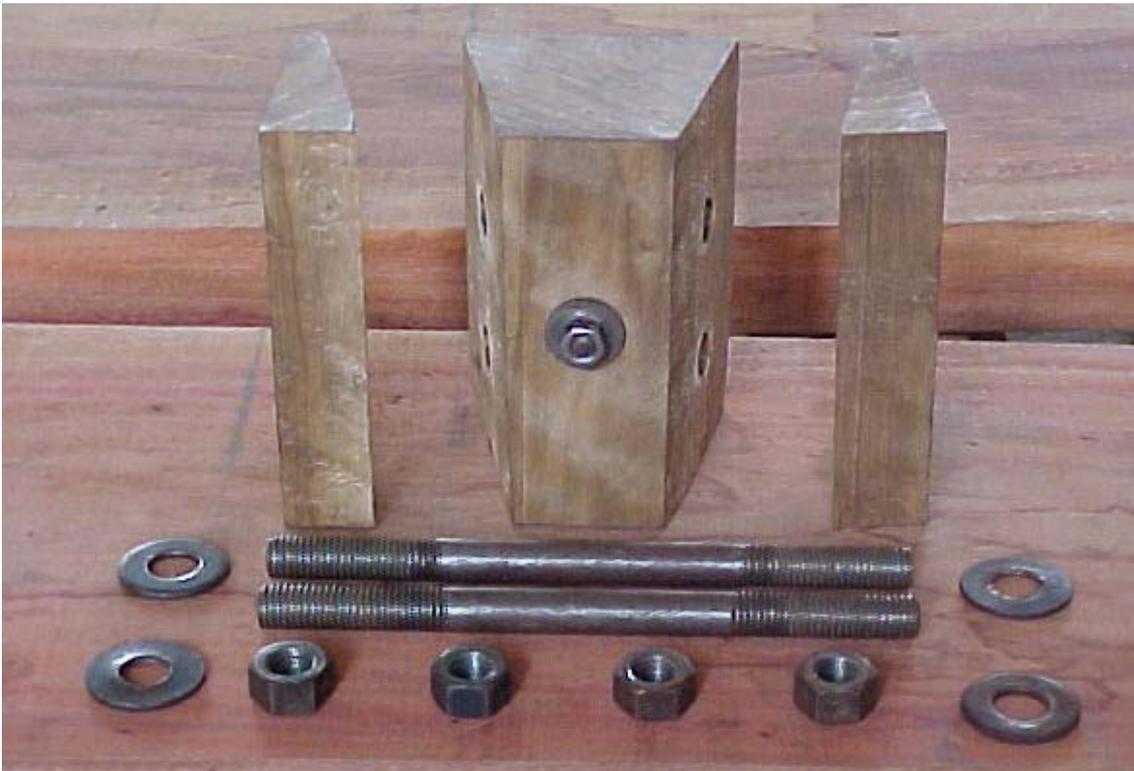


Figura 60 – Hastes transversais e calços de madeira do aparato de ensaio padrão AISI (1996).

A haste central é utilizada como elemento de transmissão dos esforços, por meio de sua fixação às garras da máquina aplicadora universal de carga. Para evitar vibrações excessivas e excentricidades, após os ensaios-piloto reduziu-se o seu comprimento. Barra de seção circular do tipo rosqueada não foi utilizada para a confecção da haste central, e sim barra trefilada na qual a rosca foi criada, apenas na extremidade próxima a região de contato com a peça de madeira central. Dessa maneira, evita-se o escorregamento entre a haste e as garras do atuador. O diâmetro dessa barra é 9,00 mm, por limitação das garras da máquina DARTEC (Figura 61), utilizadas nos ensaios, que não possuía garras para prender peças de maior diâmetro. Havendo a possibilidade sugere-se adotar maior diâmetro da barra da haste, pois possibilita maior área de contato haste-garra, minimizando a possibilidade de escorregamentos e vibrações.

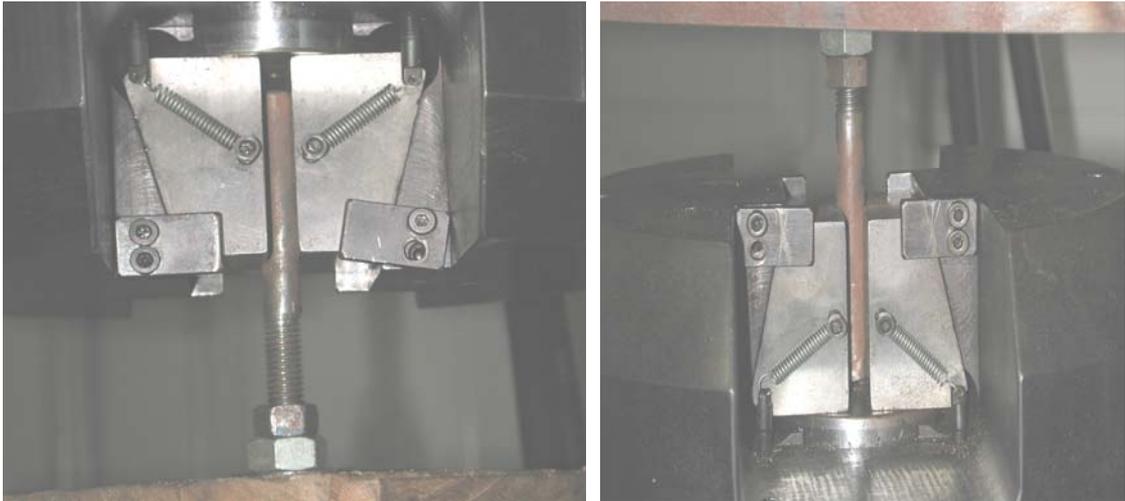


Figura 61 - Garras de fixação (hastes centrais superior e inferior).

A fixação dos segmentos de telha utilizadas nos modelos é feita através da união das três partes de madeira e posicionando a telha entre as duas faces de contato (Figura 62). Duas hastes metálicas rosqueadas nas extremidades atravessam as peças de madeira e também a fatia de telha. Essas hastes de fixação são posicionadas paralelas entre si, como mostra a Figura 62. Os furos para locação das hastes de fixação foram ajustados sem folga, seguindo o mesmo conceito do furo na madeira central no qual passa a haste de aplicação de carga.



Figura 62 - Fixação da fatia de telha no aparato de ensaio, dispositivo produzido para o estudo.

As telhas, após serem cortadas em fatias são conformadas para possuírem o formato adequado a sua fixação, preservando apenas o formato original de uma onda baixa. Nas partes em que a telha é presa ao aparato de transferência de carga (peças de madeira), são puncionados dois furos para a passagem das hastes de fixação do conjunto madeira-telha (Figura 63).

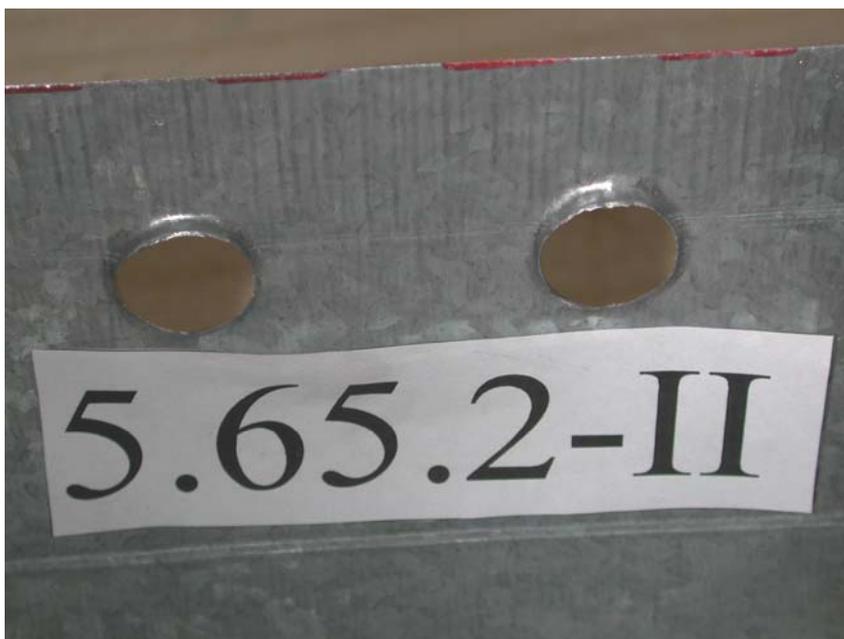


Figura 63 - Furos para colocação de hastes horizontais de fixação.

Para garantir a transferência total dos esforços e evitar possíveis deslocamentos do mecanismo, procurou-se um aperto nas porcas das hastes de fixação que favorecesse tal união, entretanto não houve controle de torque nem utilização de equipamentos pneumáticos ou hidráulicos no aperto dos parafusos. Dessa maneira a fixação da telha é realizada por uma ligação parafusada do tipo de contato. Em alguns casos, apesar de haver atrito suficiente para evitar escorregamentos, após os ensaios os espécimes de telhas possuíam sinais de rasgamento nos furos de transferência de esforços, caracterizando o contato.

Finalizada a preparação da fatia de telha, ocorre a sua fixação na porção de terço com PAA (Figura 64). A porção de telha foi fixada a alma da terço, pois pelas expressões normativas a resistência da ligação não depende da posição da ligação. Buscou-se precisão para evitar possíveis excentricidades de aplicação de cargas nos modelos terço-PAA-telha (Figura 65).

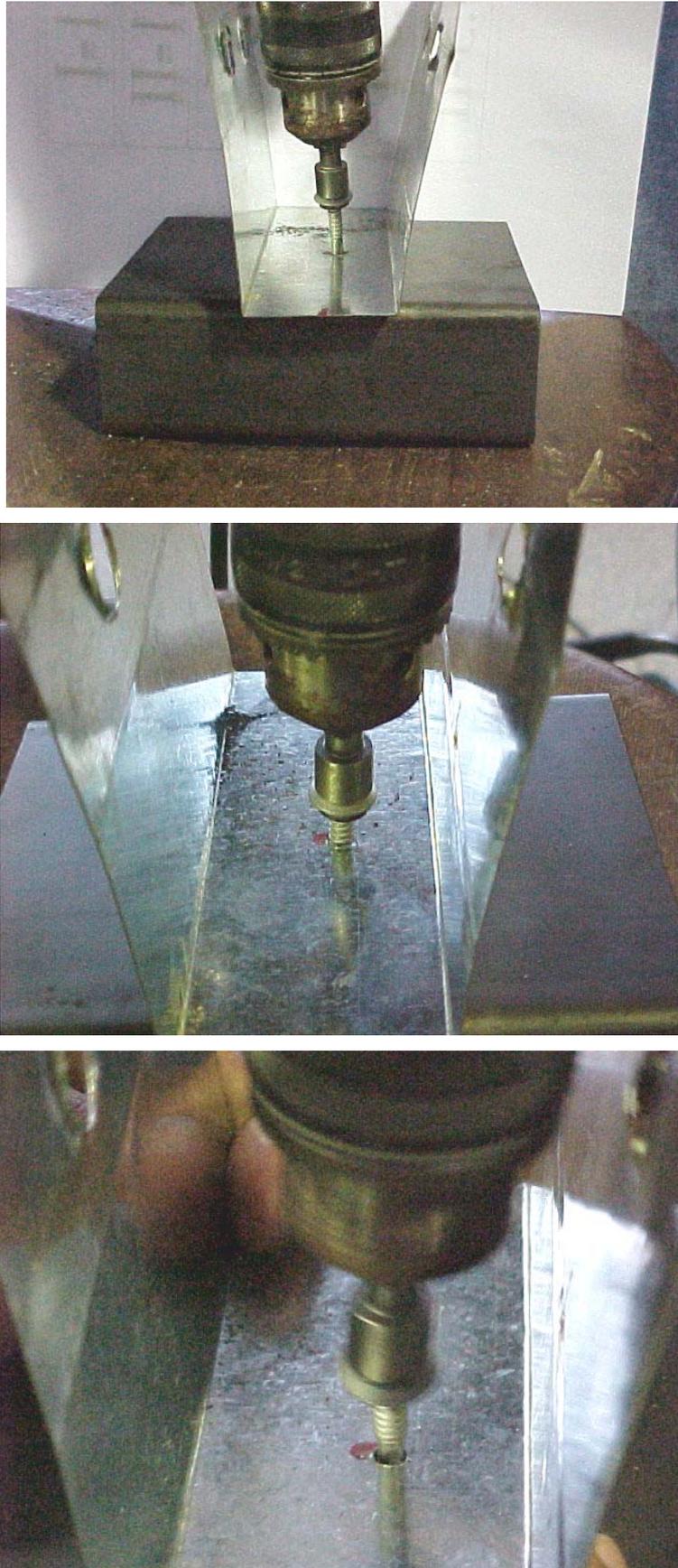


Figura 64 – Detalhes da montagem do modelo telha-PAA-terça.



Figura 65 – Corpo-de-prova terça-PAA-telha.

A parte inferior do aparato de ensaio foi confeccionada para a fixação da porção de terça do modelo. Em uma chapa metálica retangular com 150 mm x 230 mm e espessura 12,7mm, foram soldadas dois pedaços de cantoneiras laminadas de abas iguais, 76,4mm de aba e 6,35mm de espessura (3"x1/4").

Houve o cuidado de garantir o nivelamento das partes internas das cantoneiras, para evitar um contato irregular com a porção de terça a ser ensaiada. Semelhante a parte superior do aparato, no centro da chapa feito um furo ajustado e fixada através de porcas e arruelas uma haste de transferência de cargas, com as mesmas limitações da haste aplicada a parte superior, adotou-se o diâmetro de 9,00mm.



Figura 66 - Parte inferior do aparato de ensaio.

Na Figura 67 observa-se todas as peças do aparato de ensaio confeccionadas para esse trabalho. Na Figura 68 há uma vista geral do ensaio realizado (corpo-de-prova e máquina de aplicação de carga).



Figura 67 - Aparato de ensaio e ferramentas.



Figura 68 - Ensaio padrão AISI.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio dos ensaios foi possível caracterizar os modos-de-falha apresentados pela bibliografia estudada. Na Figura 69 observa-se a ocorrência do puncionamento da telha (pull-over) e na Figura 70 é possível observar o arrancamento do PAA da terço (pull-out).

Observa-se nas figuras apresentadas (e em todos os outros corpos-de-prova) que é visível a flexão da porção de telha, indiferentemente do modo de ruptura da ligação. Essa configuração não ocorre em estruturas reais, tornando a condição de contorno de aplicação da carga no parafuso diferente, tal fato foi estudado e apresentado por Ellifritt e Kriener (1998).

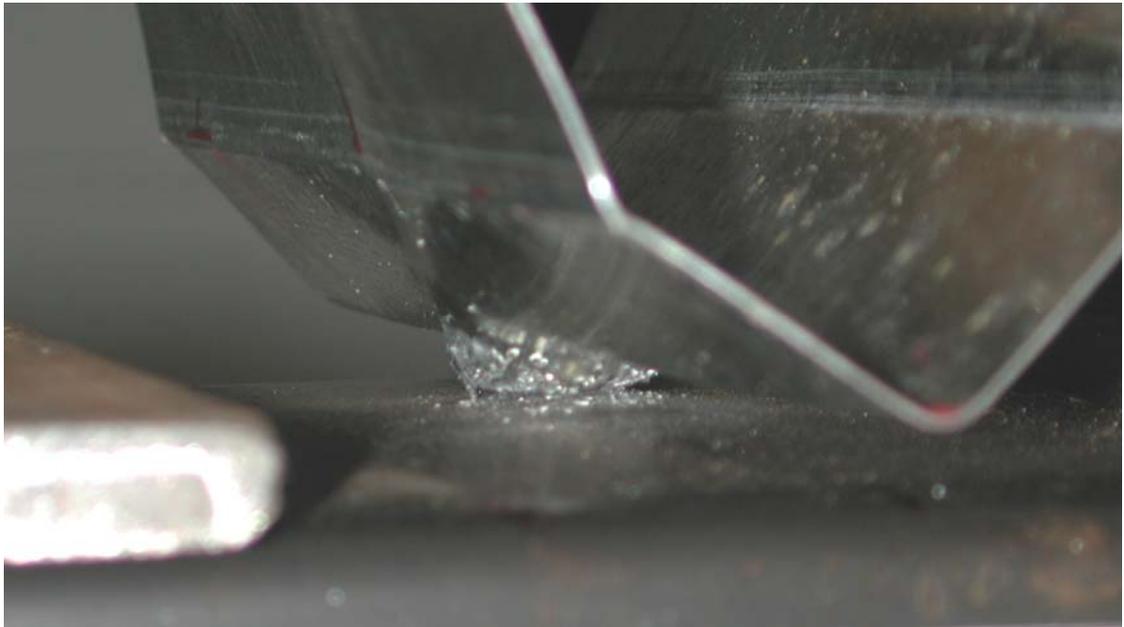


Figura 69 - Puncionamento da telha (*pull over*)



Figura 70 –Arrancamento do parafuso da terça (*pull out*)

Houve a perda de um dos CP's o 5.43.1-II, pois não ocorreu uma boa fixação dos elementos, que pode ter sido ocasionado devido a espessura da terça 0,90 mm ser muito próxima do passo de rosca de rosca do PAA, distância entre pontos homólogos da rosca do parafuso. Outro corpo-de-prova perdido foi o 5.65.3-I, por falha no fornecimento de energia elétrica na ocasião do ensaio. Esses fatos nos leva a desconsiderar o elevado valor de desvio padrão apresentado na Tabela 12, para os resultados desses ensaios.

Quanto à relação força x deformação, referente aos corpos-de-prova analisados observa-se um padrão de comportamento. Na fase inicial de aplicação de força há uma região de comportamento linear da curva, nessa fase ocorrem as acomodações do corpo-de-prova e principalmente a flexão da fatia de telha. Após essa fase, o gráfico apresenta um ganho de rigidez do sistema, pois a partir desse ponto ocorre na telha um comportamento de membrana, essencialmente solicitada à tração. A visualização desses comportamentos está registrada na Figura 73.

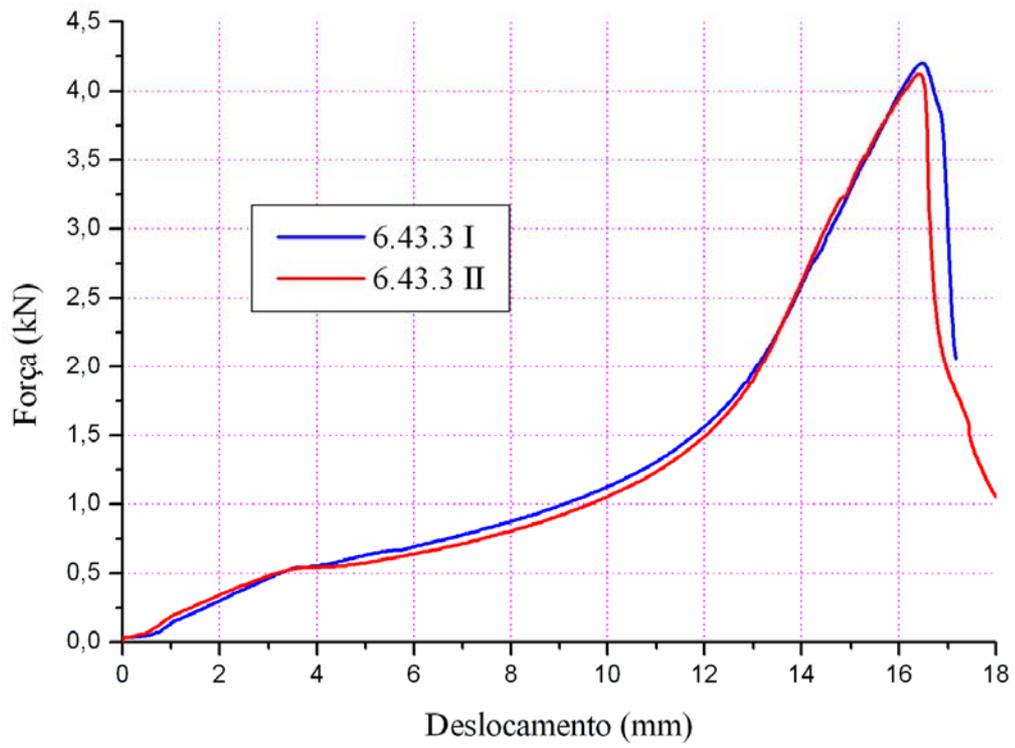


Figura 71 - Gráfico força x deslocamento típico (CP's 6.43.3 I e II)

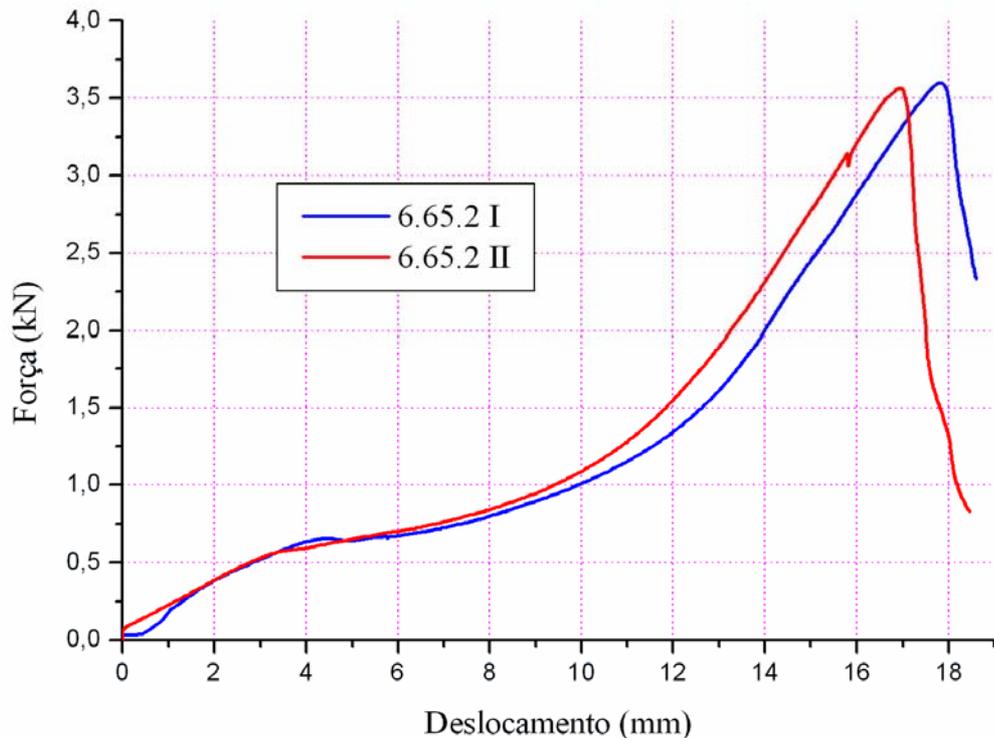


Figura 72 - Gráfico força x deslocamento típico (CP's 6.65.2-I e II)

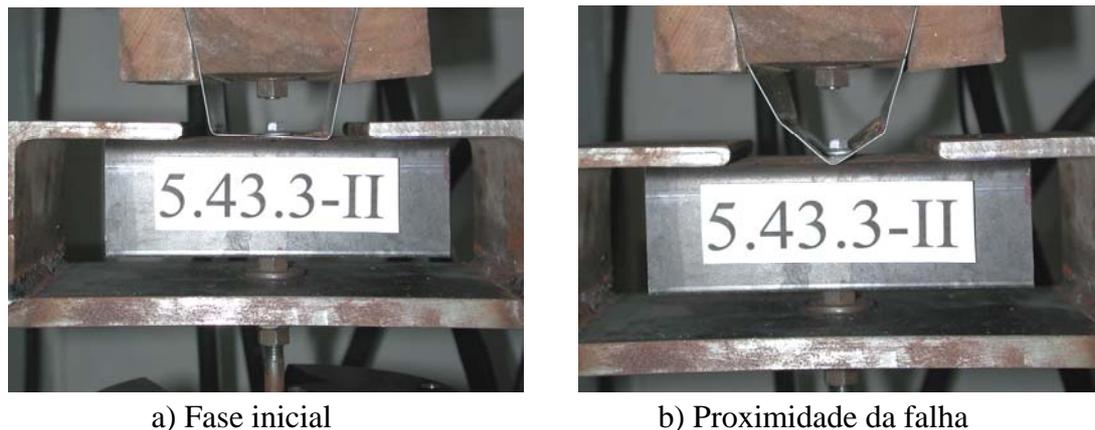


Figura 73 - Fases do ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de ligações estão apresentados na Tabela 12. Nela pode-se observar a concordância entre o modo de falha crítico, calculado por meio das expressões normativas estudadas e os observados através dos ensaios em corpos-de-prova. A maioria dos resultados correspondeu como esperado teoricamente, exceto, para os modelos 5.65.2-I e 5.65.2-II onde para as expressões o modo-de-falha esperado seria o arrancamento, contudo os ensaios apresentaram o modo-de-falha de puncionamento.

Já para os modelos 6.65.2-I e 6.65.2-II, a expressão normativa britânica apresenta como modo-de-falha crítico o arrancamento, em contradição com as demais expressões, e com os resultados dos ensaios, que apontaram para o puncionamento da telha.

O que nos demonstra a não confiabilidade do ensaio e através do gráfico da Figura 74 a grande variabilidade entre os resultados experimentais e os valores nominais normativos.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios e previsões teóricas (comparação ensaio/normas)

CP	TELHA			TERÇA			PARAFUSO		F _{a,R} AISI	F _{p,R} AISI	F _{a,R} BS	F _{p,R} BS	F _{a,R} ENV	F _{p,R} ENV	Modo de Falha	F _{e,i} (kN)	F _{e,m} (kN)	F _{e,m} /F _R AISI (kN)	F _{e,m} /F _R BS (kN)	F _{e,m} /F _R ENV (kN)
	t ^a (mm)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	t (mm)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	d (mm)	d _a (mm)	AS/NZS (kN)	AS/NZS (kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
5.43.1-I	0,407	296	357	0,846	177	326	5,50	15,00	1,29	2,77	0,54	1,99	0,98	2,18	A	1,09	1,09	0,85	2,03	1,11
5.43.2-I	0,407	296	357	2,272	306	427	5,50	15,00	4,54	2,77	2,49	1,99	3,47	2,18	P	4,36	4,18	1,51	2,10	1,91
5.43.2-II															P	3,99				
5.43.3-PI	0,407	296	357	3,000	342	454	5,50	15,00	6,37	2,77	3,66	1,99	4,87	2,18	P	3,12	3,36	1,21	1,69	1,54
5.43.3-PII															P	3,42				
5.43.3-I															P	2,79				
5.43.3-II															P	4,12				
5.65.1-P	0,624	308	389	0,846	177	326	5,50	15,00	1,29	4,62	0,54	3,18	0,98	3,64	A	1,17	1,06	0,82	1,97	1,07
5.65.1-I															A	1,11				
5.65.1-II															A	0,89				
5.65.2-I	0,624	308	389	2,272	306	427	5,50	15,00	4,54	4,62	2,49	3,18	3,47	3,64	P	3,72	3,36	0,74	1,35	0,97
5.65.2-II															P	2,99				
5.65.3-II	0,624	308	389	3,000	342	454	5,50	15,00	6,37	4,62	3,66	3,18	4,87	3,64	P	3,94	3,94	0,85	1,24	1,08
6.43.1-P	0,407	296	357	0,846	177	326	6,30	15,00	1,47	2,77	0,61	1,99	1,13	2,18	A	1,00	1,10	0,75	1,79	0,98
6.43.1-I															A	1,15				
6.43.1-II															A	1,15				
6.43.2-I	0,407	296	357	2,272	306	427	6,30	15,00	5,20	2,77	2,85	1,99	3,97	2,18	P	3,99	3,89	1,40	1,95	1,78
6.43.2-II															P	3,78				
6.43.3-I	0,407	296	357	3,000	342	454	6,30	15,00	7,30	2,77	4,20	1,99	5,58	2,18	P	4,20	4,16	1,50	2,09	1,91
6.43.3-II															P	4,12				
6.65.1-I	0,624	308	389	0,846	177	326	6,30	15,00	1,47	4,62	0,61	3,18	1,13	3,64	A	1,04	1,00	0,67	1,62	0,88
6.65.1-II															A	0,95				
6.65.2-I	0,624	308	389	2,272	306	427	6,30	15,00	5,20	4,62	2,85	3,18	3,97	3,64	P	3,60	3,58	0,77	1,26 ^b	0,98
6.65.2-II															P	3,56				
6.65.3-I	0,624	308	389	3,000	342	454	6,30	15,00	7,30	4,62	4,20	3,18	5,58	3,64	P	4,60	4,35	0,94	1,37	1,19
6.65.3-II															P	4,09				
Notas:																Média		1,00	1,70	1,28
a: t = t _n - t _r																Desvio Padrão		0,31	0,33	0,39
b: Modos de falha críticos diferentes entre norma e ensaio. 1,13 ao considerar os mesmos modos de falha.																Coef. de Variação %		31	19,4	30,5

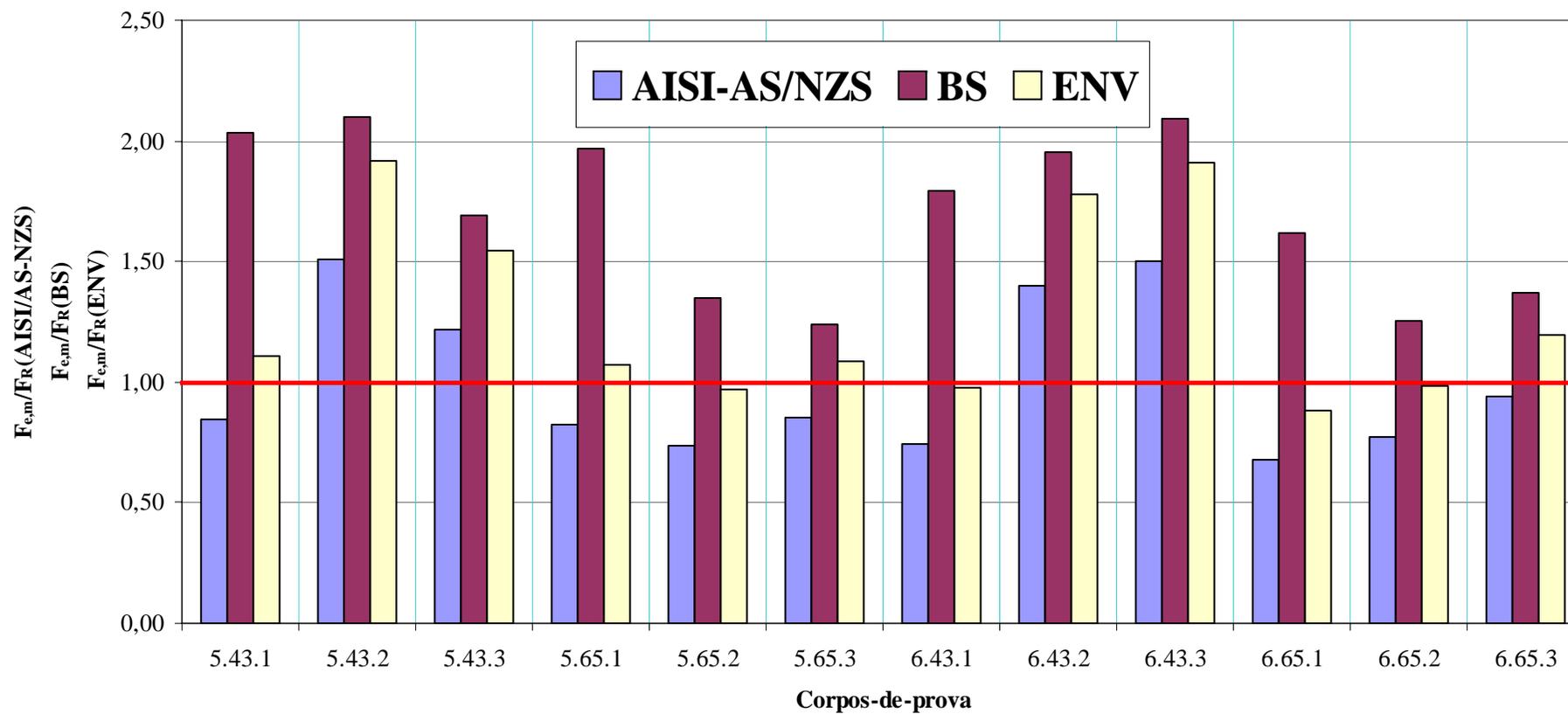


Figura 74 - Comparação entre valores de ensaio e previsões normativas.

5 Conclusões e sugestões

5.1 SOBRE O TRABALHO

A publicação da NBR 14762:2001 – *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio* não menciona ligações constituídas por PAA's. Essa lacuna na norma deve-se à inexistência de estudos no Brasil sobre tal conector – apesar de ser crescente o uso no mundo todo, inclusive no Brasil.

Alguns dos modos-de-falha possíveis de ocorrer em ligações com PAA's são específicos de ligações de perfis de baixa espessura. O uso mais comum dos PAA's ocorre em ligações do tipo terça-telha (coberturas e vedações laterais) e, por conseguinte, os modos de falhas mais característicos ocorrem em situação de tração do conector, sob efeito da ação dos ventos, a saber: arrancamento do PAA da terça (*pull-out*) e puncionamento da telha pelo PAA (*pull-over*).

As principais e mais tradicionais recomendações normativas, referentes aos PAA's são: a norma britânica **BS 5950:Part 5:1987** *Structural use of steelwork in building. Part 5. Code of practice for design of cold formed sections*, a mais antiga norma sobre o tema; a **ENV 1993-1-3: Eurocode 3 - design of steel structures: general rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting**; a **AISI-1996 LRFD cold-formed steel design manual**, norma americana, que adaptou os conhecimentos europeus já conhecidos ao padrão norte americano; a **AISI-2001 North american specification for the design of cold-formed steel structural members**, a qual reuniu e atualizou as norma dos EUA, México e Canadá; e a norma australiana **AS/NZS4500:1996: Cold-formed steel structures**.

As diferenças entre as normas acontecem em função de considerações estatísticas quanto às expressões de cálculo, as quais são baseadas em milhares de ensaios, além de nomenclaturas, adoção de coeficientes de ponderação de resistência e

especificidades regionais. Este trabalho não possui recursos para concluir qual expressão seria mais adequada aos parâmetros brasileiros, motivo pelo qual isso não se constituiu objetivo do trabalho.

É questionável a representatividade do método de ensaio padrão adotado pelo AISI (1996), por não caracterizar os efeitos de tanto de flexão como de diafragma dos elementos conectados, simulando apenas a força resultante e não as condições de vinculação.

O ensaio padrão adotado pela norma AISI (1996), embora de fácil repetição e conduzir a modos de falha crítico nem sempre iguais aos determinados através das expressões normativas, revelou a grande variabilidade de correlação entre resultados experimentais e normativos. Tais fatos refletem a origem das prescrições provenientes de grande variedade de dados, o que reflete a necessidade de adoção de ensaios mais específicos, que os torne mais representativos, para ligações do tipo terça-telha.

Entre os ensaios que procuram reproduzir, o mais próximo do real, as situações em que os PAA's se encontram tracionados, os ensaios de conjunto são os mais eficientes. Contudo é preciso cuidado quanto à forma de carregamento, à constituição dos modelos e ao método de aquisição de dados. Para evitar incoerências e desperdício de material e tempo, pois esses ensaios exigem muito mais tempo para preparo e execução, que os ensaios em modelos reduzidos.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- ✓ De posse dos dados dos ensaios realizados no mundo (PEKOZ 1990 e STARK, J. W. B. E TOMÀ, A. W. (1982)), introduzir estatísticas mais sofisticadas, como os de confiabilidade estrutural;
- ✓ Estudar detalhadamente as expressões normativas mundiais e sugerir inclusão de expressões para a NBR 14762:2001;
- ✓ Determinar os coeficientes de ponderação para o método dos estados limites, em função de parâmetros brasileiros;
- ✓ Realizar ensaios do tipo padrão AISI (1996) e de caixa de vácuo em maior escala, com fins exploratórios e para determinar fator de correlação entre eles;

- ✓ Realizar ensaios exploratórios para determinar uma metodologia que garanta resistências mínimas aos PAA's, quanto às suas resistências mecânicas (tração e cisalhamento).

Bibliografía

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (2001a). Standard test methods for determining the tensile and shear strength of screws. **Technical Bulletin**, Missouri-Rolla, v.10, n.1, p.3-6, Feb.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION , CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO (2001b). **North american specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington. .

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION , CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO (2001c). **Commentary on the 2001 edition of the north american specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (1993). **RG 933**: Fasteners for residential steel framing. Washington.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (1996). **LRFD cold-formed steel design manual**. Washington.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. (1996). **Specifications for the design of cold-formed steel structural members**. Washington.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. (1999). **Supplement n.1 to the 1996 specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington.

AMERICAN WELDING SOCIETY. (1978). **AWS D1.3-78**: Specification for welding sheet steel in structures. Washington.

AMERICAN WELDING SOCIETY. (1989). **ANSI/AWS D1.3-89**: Structural welding code – sheet steel. 2.nd.ed. Washington.

ANDERSON, G.A.; KELLEY, V.C. (1998). Lateral load strength of screw connections in 29 ga metal. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-

FORMED STEEL STRUCTURES, 14., 1998, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla. p.511-530.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). **NB 6355**: Perfis estruturais, de aço, formados a frio. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **NBR-8800**: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites). Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD (1996). **AS/NZS4500:1996**: Cold-formed steel structures. Australia; New Zealand.

BAEHRE, R.; BERGGREN. (1971). **Jointing of thin-walled steel and aluminum structures**. Sweden: National Swedish Institute for Building Research.

BAEHRE, R.; BERGGREN. (1973). **Joints in sheet metal panels**: document D8. Sweden: National Swedish Building Research.

BASKARAN, A.; DUTT, O. (1997). Performance of roof fasteners under simulated loading condition. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v.72, n.1/3, p.389-400, Nov.

BLODGETT, O.W. (1978). Report on proposed standards for sheet steel structural welding. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 4., 1978, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

BRITISH STANDARD (1987). **BS 5950**: Structural use of steelwork in building. Part 5. Code of practice for design of cold formed sections. London, England.

BROCKENGROUGH, R.L. (1995). **Fastening of cold-formed steel framing**. Washington: American Iron and Steel Institute.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (1984). **CAN3-S136-M84**: Cold-formed steel structural members. Toronto.

CENTER FOR COLD-FORMED STEEL STRUCTURES (1993). AISI specification provisions for screw connections. **Technical Bulletin**, Missouri-Rolla, v.2, n.1, Feb.

DAUDET, L.R.; LABOUBE, R.A. (1996). Shear behavior of self-drilling screws used in low ductility steel. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON

COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 13., 1996, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

DAVIES, J.M. (1991). Connections for cold formed steelwork. In: RHODES, J. (Ed.). **Design of cold-formed steel members**. London: Elsevier Applied Science. Cap.7, p.265-292.

DHALLA, A. K.; ERRERA, S. J.; WINTER G.. (1971). Connections in Thin Low-Ductility Steels. **Journal of the Structural Division**, *New York*, v.97, Oct.

EASTMAN, R.W. (1976). **Report on screw fastened sheet steel connections**. Hamilton: DOFASCO. 2v.

ELLIFRITT, D.S. (1993). **Static load tests on screwed-down metal roof and wall sheets**. Florida: University of Florida. Research Proposal.

ELLIFRITT, D.S. (2001). **Pull-over strength of screws in simulated building tests: pullover**: pullover. Formato ppt. 1 arquivo apresentação do Microsoft PowerPoint.

ELLIFRITT, D.S.; BURNETT, R. (1990). Pull-over strength of screws in simulated building tests. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 10., 1990, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. (1996). **ENV 1993-1-3**: Eurocode 3 - design of steel structures: general rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting, Brussels.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK (1983a). **ECCS-TC7**: The Design and testing of connections in steel sheeting and sections. (Publication n. 21, Maio).

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK. (1983b). **ECCS-TC7**: Mechanical fastener for use in steel sheeting and sections. (Publication n. 35, Jun..).

FAN, L.X.; RONDAL, J.; CESCOTTO S. (1997). Numerical simulation of lap screw connections. **Thin-Walled Structures**, Oxford, v.29, n.1/4, p.235-241, Sept./Dec.

GILBERT, C.; VAATSTRA, W.. The Behavior of Joints Constructed from Cold-Formed C-sections, **B. Eng Investigation Report**, School of Civil Engineering, South Australian Institute of Technology. (1986)

HEAGLER, R.B. (1982). How to fasten steel deck. **Modern Steel Construction**, New York, v.22. First Quarter.

HILLERYA, M.T.; SHUAIBB, I. (1999). Temperature effects in the drilling of human and bovine bone. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.92/93, p.302-308, Aug.

JOHNSON, D.L. (1980). Connections in cold-formed construction. In: COLD-FORMED STEEL STRUCTURES CONFERENCE, 1980, Canada. **Proceedings...** Canada: University of Windsor.

KATO, B.; NISHIYAMA, I. (1980). T-Joints made of rectangular tubes. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 5., 1980, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

KLIPPSTEIN, K.H. (1986). Criteria for connection spacing in cold-formed steel. **Journal of Structural Engineering**, Amsterdam, v.112, n.12, p.2711-2716, Dec.

KNAB, L.I.; LIND, N.C.; HALL, W.B. (1975). Economic study of the connection safety factor. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 3., 1975, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

KREINER, J.S.; ELLIFRITT, D.S. (1998). Understanding pullover. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 14., 1998, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

KULAK, G.L.; FISHER J.W.; STRUIK, J.H.A. (1987). **Guide to design criteria for bolted and riveted joint**. 2.ed. New York: John Wiley.

MAHENDRAN, M. (1994). Behaviour and design of crest-fixed profiled steel roof claddings under wind uplift. **Engineering Structures**, Guildford, v.16, n.5, p.368-376, July.

_____. (1997). Review of current test methods for screwed connections. **Journal of Structural Engineering**, New York, v.123, n.3, p.321-325, Mar.

MAHENDRAN, M (2001). Design of steel roof and wall cladding systems for pull-out failures. **Steel Construction**, v.35, n.1, p.14-27, Mar.

MAHENDRAN, M.; MAHAARACHCHI, D. (2000). Cyclic pull-out strength of steel roof and wall cladding systems. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 15., 2000, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

MAHENDRAN, M.; TANG, R.B. (1998). Pull-out strength of steel roof and wall cladding systems. **Journal of Structural Engineering**, New York, v.124, n.10, p.1192-1201, Oct.

MALITE, M.; SÁLES, J.J. (1993). **Estruturas de aço constituídas por perfis de chapa dobrada**: dimensionamento de ligações. São Carlos: EESC-USP. (Publicação 023/93)

_____. (1993). **Estruturas de aço constituídas por perfis de chapa dobrada**: dimensionamento de barras. São Carlos: EESC-USP. (Publicação 015/93)

MALITE, M. et al. (1999). Algumas considerações sobre a nova norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL "O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SME - Sociedade Mineira de Engenheiros. 1 CD-ROM.

MARSH, C. (1979). Tear-out failure of bolt groups. **Journal of the Structural Division**, New York, v.105, Oct.

McCAVOUR ENGINEERING LTD (1980). **Screw fastener connections**. Etobicoke. (Research 578)

McKINNEY, W.M.; LIU A.S.; YU, W.W. (1975). **Study of cold-formed steel structural members mad of thick sheets and plate**. Missouri: University of Missouri-Rolla. Final Report.

PARKER-KALON (2002). **Specialty screws**. Emhart Teknologies. Disponível em: <<http://www.emhart.com>>. Acesso em: 24 June 2002.

PEDRESCHI, R.F.; SINHA, B.P.; DAVIES, R. (1997). Advanced connection techniques for cold-formed steel structures. **Journal of Structural Engineering**, New York, v.123, n.2, p.138-144, Feb.

PEKOZ, T. (1990). Design of cold-formed steel screw connections. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 10., Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla. p.576-587.

PEKOZ, T.B.; McGUIRE, W. (1979). **Welding of sheet steel**. Washington: American Iron and Steel Institute. Report SG 79-2.

_____. (1980). Welding of sheet steel. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 5., 1980, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

RANG, T.N. et al. (1980). Load and resistance factor design of bolted connections. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THIN WALLED STRUCTURES, 1979, Glasgow. **Proceedings...** London: Granada.

RESEARCH COUNCIL ON STRUCTURAL CONNECTIONS. **Allowable stress design specification for structural joints using ASTM A325 or A490 Bolts.**

ROGERS, C.A.; HANCOCK, G.J. (1997). **Screwed connection tests of thin G550 and G300 sheet steels.** Sydney: University of Sydney, Dept. of Civil Engineering. Research Report, No. R761

SCHIFFNER, K.; HELLING, C.D. (1997). Simulation of prestressed screw joints in complex structures. **Computers & Structures**, New York, v.64, n.5/6, p.995-1003, Sept..

TOMÀ, A.; SEDLACEK, G.; WEYNAND, K. (1993). Connections in cold-formed steel. **Thin-Walled Structures**, Oxford, v.16, n.1/4, p.219-237.

SELEIM, S.; LaBOUBE, R. (1996). Behavior of low ductility steel in cold-formed steel connections. **Thin-Walled Structures**, Oxford, v.25, n.2, p.135-151, June.

SERRETTE, R.; LOPEZ, V. (1996). Performance of self-tapping screws in lap-shear metal-to-metal connections. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 13., 1996, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

SILVA, M.P. (2002). Normas de telhas metálicas de aço atualizadas. **Construção Metálica**, São Paulo, n.30, p.42-44, jul./ago.

SOKOL, M.A.; LaBOUBE, R.A.; YU, W.W. (1998). **Determination of the tensile and shear strength of screws and the effect of screw patterns on cold-formed steel connections.** Rolla: University of Missouri, Civil Engineering Study.

STANDARD Test Methods for Determining the Tensile and Shear Strength of Screws. (2001). **CCFSS Tech Bulletin**, Rolla, v.10, n.1. Disponível em: <<http://web.umar.edu/~ccfss/newsletters&bulletins.html>>. Acesso em: 30 Mar. 2002.

STANDARDS AUSTRALIA, STANDARDS NEW ZEALAND. (1996). **AS/NZS 4600-1996:** Cold-formed structures. Australia/New Zealand.

STARK, J.W.B.; TOMA, A.W. (1978). Connections in cold-formed sections and steel sheets. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 4., 1978, Missouri. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

STARK, J. W. B.; TOMA, A. W.. Connections in Thin-Walled Structures. In: RHODES, J.; WALKER, A. C. (Orgs.) **Developments in Thin-Walled Structures – 1**, Applied Science Publishers, London, 1982.

_____. (1979). Fastening of steel sheets for walls and roofs on steel structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THIN WALLED STRUCTURES, 1979, Glasgow. **Proceedings...** London: Granada.

STRNAD, M. (1984). Flexibility of mechanical fastenings of very thin-walled steel structures. **International Journal of Thin-Walled Structures**, v.2, n.3,

_____. (1998). **Design of screwed fastenings with regard to their elasto-plastic behaviour**. Karlsruhe: Der Metallbau im Konstruktiven-Ingenieurbau.

XU, Y.L. (1995). Fatigue performance of screw-fastened light-gauge-steel roofing sheets. **Journal of Structural Engineering**, New York, v.121, n.3, p.389-398, Mar.

XU, Y.L.; REARDON, G.F. (1993). Test of screw fastened profiled roofing sheets subject to simulated wind uplift. **Engineering Structure**, v.15, n.6, p.423-430.

YENER, M. (1984). Criteria for connection spacing in cold-formed steel. **Journal of the Structural Division**, New York, v.110, n.9, p.2178-2195, Sept.

_____. (1986). Spacing of connections in thin-walled compression elements. In: IABSE Colloquium, 1986, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: IABSE.

YU, W.W. (1982). AISI Design criteria for bolted connections. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 6., 1982. **Proceedings...** Missouri: University of Missouri-Rolla.

_____. (2000). **Cold formed steel design**. 3rd ed. New York: John Wiley.

YU, W.W.; MOSBY, R.L. (1981). **Bolted connections in cold-formed steel structures**. Missouri: University of Missouri-Rolla. Final Report..

Apêndice

Alguns gráficos são apresentados a seguir como ilustração do comportamento característico das curvas força x deslocamentos. Os dados produzidos por testes realizados nesse trabalho através do ensaio padrão AISI.

