

**AVALIAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES DE
CONCRETOS ESTRUTURAIS COM AGREGADOS
GRAÚDOS RECICLADOS MODIFICADOS COM LÁTEX
ESTIRENO-BUTADIENO**

LUIZ PAULO ZUPPANI BALLISTA

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. Eloy Ferraz Machado Júnior

São Carlos
2003

Dedico esta pesquisa a todos que me apoiaram e, acima de tudo, acreditaram neste trabalho, pois a confiança destas pessoas foi meu principal guia, inspiração e motivação. A vocês, meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todos aqueles que acreditaram em mim e nesta pesquisa, principalmente ao amigo Eloy e a Flávia.

Agradeço ao Prof. Dr. Eloy Ferraz Machado Júnior pelo apoio, ensinamentos, paciência, dedicação, conselhos, correções e toda ajuda que tive.

Agradeço à Comissão Julgadora da Qualificação e Defesa deste trabalho pelas valiosas contribuições e sugestões e à CAPES pelo financiamento desta pesquisa através da disponibilização de bolsa de estudos pelos 7 meses em que fui mestrando em tempo integral no Departamento de Engenharia de Estruturas. Agradeço também a todo o Departamento de Engenharia de Estruturas pelo apoio, à equipe do laboratório, secretaria, biblioteca, informática, aos professores (em especial ao Prof. Samuel) e colegas e a todos que contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho.

Agradeço à empresa em que trabalho, a Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., principalmente às pessoas envolvidas na minha contratação, pela disponibilização de horários durante a jornada de trabalho para conclusão das disciplinas obrigatórias, a saber: Sônia Radovan, Ennes Vilela, Edílson Rocha Dias e Weber Corrêa Pinto, envolvidos diretamente neste processo.

Agradeço a um grande incentivador, meu amigo Marcelo Furquim Paiva, colega de trabalho, mestre por esta Escola de Engenharia e também por este Departamento, pelo desafio do término desta pesquisa e ensinamentos de engenharia.

Agradeço também a outro colega de trabalho, Jorge Uemura, pelos ensinamentos referentes a centrais de britagem.

Agradeço a todos os outros colegas de trabalho da obra da CPTM, período no qual este trabalho se desenvolveu. Dentre todos os outros, Danilo, Fábio Guimarães,

Paulo Romanholi, Indyo, Jurandyr Moura, Weber, Nivaldo, Rafael Ferrara, Everaldo, Henrique Gante, Marcelo Godoy, Marcelo Santana e Paulo “Pert”.

Agradeço aos meus pais pela formação que me deram (na verdade, por tudo) e a toda minha família pela existência de cada um. Espelho-me muito em vocês, ainda que esteja sempre meio distante de tudo.

Agradeço por fim a Flávia, minha companheira desde sempre, e ao meu filho Ivan e peço desculpas pelas horas roubadas de nosso convívio. Vocês são a razão da minha vida e este trabalho existe por vocês.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. JUSTIFICATIVA.....	3
1.4. METODOLOGIA.....	4
2. AGREGADOS RECICLADOS – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. RECICLAGEM DE ENTULHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	5
2.1.1. Uma Abordagem Sucinta Sobre Reciclagem	5
2.2. GERAÇÃO E DEPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	8
2.2.1. Geração	8
2.2.2. Deposição	9
2.2.3. Aplicabilidade	10
2.2.4. Formas de Adição do Entulho em Argamassas e Concreto	11
2.2.5. Britagem do Entulho	12
2.2.5.1. <i>Britagem por Impacto</i>	13
2.2.5.2. <i>Britagem por Atrito</i>	14
2.2.5.3. <i>Britagem por Clivagem ou Puncionamento</i>	15
2.2.5.4. <i>Britagem por Compressão</i>	15
2.2.6. Um Caso Recente Sobre a Utilização de Agregados Reciclad	20
2.3. CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE C&D.....	21
2.3.1. Introdução	21
2.3.2. Propriedades	21
2.3.2.1. <i>Consistência/Trabalhabilidade</i>	21
2.3.2.2. <i>Teor de Ar Incorporado</i>	22
2.3.2.3. <i>Massa Específica</i>	22
2.3.2.4. <i>Tempo de Pega</i>	23
2.3.2.5. <i>Resistência à Compressão</i>	23
2.3.2.6. <i>Resistência à Tração</i>	24
2.3.2.7. <i>Módulo de Elasticidade</i>	24
2.3.2.8. <i>Aderência à Armadura</i>	25

2.3.2.9. <i>Retração por Secagem</i>	25
2.3.2.10. <i>Permeabilidade/Absorção</i>	26
3. POLÍMEROS – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1. INTRODUÇÃO	27
3.2. INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS	28
3.2.1. Conceitos Fundamentais	28
3.2.2. Classificação dos Polímeros	29
3.2.3. Fatores que Afetam as Propriedades dos Polímeros	30
3.2.4. Látex	30
3.2.4.1. <i>Influência da Composição dos Polímeros</i>	32
3.2.4.2. <i>Influência dos Surfactantes</i>	33
3.2.4.3. <i>Influência dos Ingredientes Complementares</i>	33
3.2.5. Testes Padronizados para Látex	34
3.2.5.1. <i>Teor de Sólidos</i>	34
3.2.5.2. <i>pH</i>	34
3.2.5.3. <i>Coagulação</i>	35
3.2.5.4. <i>Viscosidade</i>	35
3.2.5.5. <i>Estabilidade</i>	35
3.2.5.6. <i>Peso por Galão</i>	36
3.2.5.7. <i>Tamanho da Partícula</i>	36
3.2.5.8. <i>Tensão Superficial</i>	37
3.2.5.9. <i>Temperatura Mínima de Formação de Filme (TMFF)</i>	37
3.3. FORMAS DE UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS EM CONCRETO	37
3.3.1. Concreto Polímero (CP) ou Concreto de Resina	38
3.3.2. Concreto Impregnado com Polímero (CIP)	39
3.3.3. Concreto Modificado com Látex (CML)	40
3.4. CONCRETO MODIFICADO COM LÁTEX	40
3.4.1. Histórico	40
3.4.2. Generalidades	41
3.4.3. Princípio de Modificação do Látex	43
3.4.4. Propriedades dos Concretos Modificados com Látex Estireno-Butadieno	47
3.4.4.1. <i>Consistência/Trabalhabilidade</i>	47
3.4.4.2. <i>Teor de Ar Incorporado</i>	47
3.4.4.3. <i>Tempo de Pega</i>	48
3.4.4.4. <i>Resistência à Compressão</i>	48
3.4.4.5. <i>Resistência à Tração</i>	49
3.4.4.6. <i>Módulo de Elasticidade</i>	49
3.4.4.7. <i>Retração por Secagem</i>	49
3.4.4.8. <i>Permeabilidade/Absorção</i>	50
3.4.4.9. <i>Aderência à Superfícies</i>	50
3.4.4.10. <i>Aderência à Armadura</i>	51
3.4.4.11. <i>Resistência à Ciclos de Gelo-Degelo</i>	51
3.4.4.12. <i>Resistência à Carbonatação/Permeabilidade à Cloretos</i>	52
3.4.5. Proporções de Dosagem	52
3.4.6. Processo Produtivo	53
3.4.7. Forma de Cura	54

4. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	55
4.1. INTRODUÇÃO.....	55
4.2. AGLOMERANTE.....	56
4.3. AGREGADO MIÚDO NATURAL.....	56
4.4. AGREGADO GRAÚDO NATURAL.....	57
4.5. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO.....	58
4.5.1. A Usina de Reciclagem de Entulho de Ribeirão Preto	62
4.6. LÁTEX ESTIRENO-BUTADIENO.....	65
5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	67
5.1. METODOLOGIA.....	67
5.1.1. Traços Empregados	67
5.1.2. Processo Produtivo	68
5.2. PRIMEIRA FASE.....	69
5.2.1. Porcentagens de Látex Empregadas na Primeira Fase	71
5.2.2. Condições de Cura Empregadas na Primeira Fase	72
5.2.3. Composições dos Traços de Agregados Graúdos Reciclad	72
5.2.4. Resultados Obtidos na Primeira Fase	73
5.2.5. Análise dos Resultados da Primeira Fase	77
5.2.5.1. <i>Índice de Consistência na Mesa de Espalhamento (Flow Table)</i> ..	77
5.2.5.2. <i>Massa Específica no Estado Fresco</i>	78
5.2.5.3. <i>Consumo de Cimento</i>	79
5.2.5.4. <i>Resistência à Compressão Axial aos 28 dias</i>	80
5.2.5.5. <i>Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias</i>	83
5.2.6. Conclusões da Primeira Fase	85
5.3. SEGUNDA FASE.....	87
5.3.1. Ensaio de Corrosão	88
5.3.1.1. <i>Introdução</i>	88
5.3.1.2. <i>Metodologia</i>	92
5.3.1.3. <i>Ensaio de Corrosão em Célula de Corrosão Acelerada</i>	94
5.3.1.4. <i>Análise dos Resultados</i>	99
5.3.1.5. <i>Conclusões do Ensaio de Corrosão</i>	110
5.3.2. Ensaio de Aderência Aço-Concreto	111
5.3.2.1. <i>Introdução</i>	111
5.3.2.2. <i>Modelos para o Comportamento da Aderência e Prescrições das Normas sobre Aderência</i>	116
5.3.2.3. <i>Metodologia</i>	121
5.3.2.4. <i>Ensaio de Aderência</i>	122
5.3.2.5. <i>Análise dos Resultados</i>	124
5.3.2.6. <i>Conclusões do Ensaio de Aderência</i>	128
6. CONCLUSÃO	130
7. ANEXO I	135
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
9. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Standard Test Method

ACI – American Concrete Institute

C&D – Construção e Demolição

NBR – Norma Brasileira Registrada

RILEM – Réunion International dès Laboratoires Déssais et Matériaux

SBR – Styrene-Butadiene Rubber

SB – Styrene-Butadiene

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 - Ciclo produtivo do modelo dos três erres (3R).....	7
FIGURA 2.2 - Britagem por impacto dinâmico.....	14
FIGURA 2.3 - Britagem por atrito.....	14
FIGURA 2.4 - Britagem por clivagem ou puncionamento.....	15
FIGURA 2.5 - Britagem por compressão.....	15
FIGURA 2.6 - Circuito fechado de britagem.....	16
FIGURA 2.7 - Central de Britagem instalada em barragem no estado de Minas Gerais.....	17
FIGURA 2.8 - Detalhe do alimentador, do britador primário (de mandíbula) e da correia transportadora da central de britagem apresentada na Figura 2.7.....	17
FIGURA 2.9 - Foto de um conjunto de britagem móvel equipado com britadores primário e secundário e jogo de peneiras, com produtividade de 100t/h.....	18
FIGURA 2.10 - Princípio de funcionamento do conjunto apresentado na Figura 2.9.....	18
FIGURA 2.11 - Central de britagem móvel com britador primário.....	19
FIGURA 2.12 - Ilustração apresentada em catálogo técnico de central de britagem indicando uso específico para reciclagem.....	19

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 - Principais látex utilizados com aglomerantes hidráulicos.....	31
FIGURA 3.2 - Microfotografia eletrônica de concreto modificado com látex e concreto convencional.....	43
FIGURA 3.3 - Modelo de formação de filme de polímero.....	45
FIGURA 3.4 - Modelo de modificação.....	46

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural.....	57
FIGURA 4.2 - Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	58
FIGURA 4.3 - Fração granulométrica de amostra do entulho.....	59
FIGURA 4.4 - Composição da amostra de entulho correspondente a brita 0...60	
FIGURA 4.5 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado (brita 0). 61	
FIGURA 4.6 - Agregado graúdo reciclado (brita 0).....	61
FIGURA 4.7 - Vista geral da Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto-SP.....	63
FIGURA 4.8 - Vista do depósito de entulho processado em bica corrida.....	63
FIGURA 4.9 - Entulho classificado como Tipo A.....	64
FIGURA 4.10 - Entulho classificado como Tipo A.....	64
FIGURA 4.11 - Entulho classificado como Tipo B.....	65

CAPÍTULO 5

FIGURA 5.1 - Corpos-de-prova utilizados na Primeira Fase.....	70
FIGURA 5.2 - Corpos-de-prova utilizados na Primeira Fase.....	70
FIGURA 5.3 - Ensaio de compressão axial e tração por compressão diametral.....	71
FIGURA 5.4 - Exemplar do traço RI-B1. Detalhe dos agregados reciclados...76	
FIGURA 5.5 - Gráfico dos índices de consistência para concretos com agregados graúdos reciclados e concretos com agregados naturais.....	77
FIGURA 5.6 - Gráfico das massas específicas no estado fresco para concretos com agregados graúdos reciclados e concretos com agregados naturais.....	78
FIGURA 5.7 - Gráfico dos consumos de cimento para concretos com agregados graúdos reciclados e concretos com agregados naturais.....	79
FIGURA 5.8 - Gráfico das resistências à compressão axial para os traços RI e CI.....	80
FIGURA 5.9 - Gráfico das resistências à compressão axial para os traços RII e CII.....	81
FIGURA 5.10 - Gráfico das resistências à compressão axial para os traços RIII e CIII.....	82
FIGURA 5.11 - Gráfico das resistências à tração por compressão diametral para os traços RI e CI.....	83
FIGURA 5.12 - Gráfico das resistências à tração por compressão diametral para os traços RII e CII.....	84
FIGURA 5.13 - Gráfico das resistências à tração por compressão diametral para os traços RIII e CIII.....	85
FIGURA 5.14 - Volume do ferro em relação a alguns de seus produtos de corrosão.....	91
FIGURA 5.15 - Resultado da corrosão levando à fissuração e destacamento do concreto.....	91

FIGURA 5.16 - Detalhe do ataque às armaduras (N, R e RM, respectivamente).....	93
FIGURA 5.17 - Corpo-de-prova tipo pirulito (medidas em mm).....	95
FIGURA 5.18 - Posicionamento dos corpos-de-prova nos tanques (medidas em mm).....	96
FIGURA 5.19 - Corte A-A da Figura 5.17 (medidas em mm).....	96
FIGURA 5.20 - Corpos-de-prova moldados para o ensaio de corrosão.....	97
FIGURA 5.21 - Ensaio de corrosão – esquema geral.....	98
FIGURA 5.22 - Ensaio de corrosão – detalhe dos corpos-de-prova.....	98
FIGURA 5.23 - Ensaio de corrosão – RI-5%, RI-0% e CI-0%, respectivamente.....	98
FIGURA 5.24 - Ensaio para determinação da absorção, índice de vazios e massa específica – esquema de pesagem submersa.....	99
FIGURA 5.25 - Absorção de água para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%.....	100
FIGURA 5.26 - Índice de vazios para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%.....	100
FIGURA 5.27 - Massa específica real para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%...100	
FIGURA 5.28 - Resistência à compressão axial para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%.....	102
FIGURA 5.29 - Intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 28 dias.....	103
FIGURA 5.30 - Intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 90 dias.....	103
FIGURA 5.31 - Intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 120 dias.....	104
FIGURA 5.32 - Tempo de corrosão aos 28, 90 e 120 dias.....	104
FIGURA 5.33 - Perda de massa aos 28, 90 e 120 dias.....	105
FIGURA 5.34 - Exemplos fissurados após 28 dias de ensaio.....	106
FIGURA 5.35 - Exemplos rompidos dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (28 dias).....	106
FIGURA 5.36 - Armaduras dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (28 dias).....	107
FIGURA 5.37 - Exemplos fissurados após 90 dias de ensaio.....	107
FIGURA 5.38 - Exemplos rompidos dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (90 dias).....	108
FIGURA 5.39 - Armaduras dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (90 dias).....	108
FIGURA 5.40 - Exemplos fissurados após 120 dias de ensaio.....	109
FIGURA 5.41 - Exemplos rompidos dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (120 dias).....	109
FIGURA 5.42 - Armaduras dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (120 dias).....	110
FIGURA 5.43 - Aderência por adesão	112
FIGURA 5.44 - Aderência por atrito	113
FIGURA 5.45 - Aderência mecânica	113

FIGURA 5.46 - Curva teórica da tensão de aderência x deslizamento.....	116
FIGURA 5.47 - Modelo matemático da relação entre Tensão de Aderência e Deslizamento proposto pelo CEB-FIP MC 1990.....	118
FIGURA 5.48 - Zonas de boa e má aderência entre armadura e concreto.....	120
FIGURA 5.49 - Fôrmas e situação de moldagem dos testemunhos.....	122
FIGURA 5.50 - Esquema geral do ensaio de aderência entre aço e concreto....	123
FIGURA 5.51 - Resistência à compressão axial aos 28 dias.....	125
FIGURA 5.52 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	125
FIGURA 5.53 - Curva Tensão de Aderência x Deslizamento (traço RI-0%)...	126
FIGURA 5.54 - Curva Tensão de Aderência x Deslizamento (traço RI-5%)...	126
FIGURA 5.55 - Curva Tensão de Aderência x Deslizamento (traço CI-0%)...	127
FIGURA 5.56 - Curva Tensão de Aderência x Deslizamento para barras horizontais.....	127
FIGURA 5.57 - Curva Tensão de Aderência x Deslizamento para barras verticais.....	128

CAPÍTULO 7

FIGURA 7.1 - Ensaio com Agregados Reciclados – Primeira Fase.....	135
FIGURA 7.2 - Ensaio com Agregados Naturais – Primeira Fase.....	136
FIGURA 7.3 - Ensaio de Corrosão – Segunda Fase.....	136
FIGURA 7.4 - Ensaio de Aderência – Segunda Fase.....	137

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 - Participação dos resíduos de construção no total dos resíduos sólidos urbanos (em massa).....	9
--	---

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 - Composições típicas para polimerização em emulsão.....	34
TABELA 3.2 - Resistência ao arrancamento de barras.....	51

CAPÍTULO 4

TABELA 4.1 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento empregado.....	56
TABELA 4.2 - Composição granulométrica do agregado miúdo natural.....	56
TABELA 4.3 - Propriedades físicas do agregado miúdo natural.....	57
TABELA 4.4 - Composição granulométrica do agregado graúdo natural.....	57
TABELA 4.5 - Propriedades físicas do agregado graúdo natural.....	58
TABELA 4.6 - Natureza da composição do agregado graúdo reciclado.....	59
TABELA 4.7 - Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado.....	60
TABELA 4.8 - Propriedades físicas do agregado graúdo reciclado (brita 0)....	61
TABELA 4.9 - Propriedades do látex estireno-butadieno.....	66

CAPÍTULO 5

TABELA 5.1 - Traços empregados.....	68
TABELA 5.2 - Ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura.....	69
TABELA 5.3 - Porcentagens de látex e de polímero sobre a massa de cimento.....	72
TABELA 5.4 - Formas de cura empregadas.....	72

TABELA 5.5 - Composição em massa do traço RI (1:1,60:1,63).....	73
TABELA 5.6 - Composição em massa do traço RII (1:2,07:1,93).....	73
TABELA 5.7 - Composição em massa do traço RIII (1:2,55:2,22).....	73
TABELA 5.8 - Resultados obtidos para os traços RI e CI.....	74
TABELA 5.9 - Resultados obtidos para os traços RII e CII.....	75
TABELA 5.10 - Resultados obtidos para os traços RIII e CIII.....	76
TABELA 5.11 - Índice de Consistência (em mm) por traço e adição de látex.....	77
TABELA 5.12 - Massa específica no estado fresco (kg/dm^3) por traço e adição de látex.....	78
TABELA 5.13 - Consumo de cimento (kg/m^3) por traço e adição de látex.....	79
TABELA 5.14 - Resistência à compressão axial ao 28 dias (em MPa) para os traços RI e CI, por adição de látex e forma de cura.....	80
TABELA 5.15 - Resistência à compressão axial ao 28 dias (em MPa) para os traços RII e CII, por adição de látex e forma de cura.....	81
TABELA 5.16 - Resistência à compressão axial ao 28 dias (em MPa) para os traços RIII e CIII, por adição de látex e forma de cura.....	82
TABELA 5.17 - Resistência à tração por compressão diametral ao 28 dias (em MPa) para os traços RI e CI, por adição de látex e forma de cura.....	83
TABELA 5.18 - Resistência à tração por compressão diametral ao 28 dias (em MPa) para os traços RII e CII, por adição de látex e forma de cura.....	84
TABELA 5.19 - Resistência à tração por compressão diametral ao 28 dias (em MPa) para os traços RIII e CIII, por adição de látex e forma de cura.....	85
TABELA 5.20 - Tempo de corrosão e perda de massa da armadura.....	93
TABELA 5.21 - Propriedades físicas e mecânicas dos concretos analisados.....	93
TABELA 5.22 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido aos 28 dias.....	99
TABELA 5.23 - Resistência à compressão axial aos 28, 90 e 120 dias.....	101
TABELA 5.24 - Resistência à corrosão e perda de massa aos 28, 90 e 120 dias.....	102
TABELA 5.25 - Parâmetros para barra nervurada propostos pelo CEB-FIP MC 1990.....	118
TABELA 5.26 - Valores da tensão de aderência para condições de boa aderência segundo o EUROCODE 2.....	119
TABELA 5.27 - Resistência à compressão axial aos 28 dias.....	124
TABELA 5.28 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	125

RESUMO

BALLISTA, L.P.Z. (2002). *Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno*. São Carlos, 2002. 152p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esta pesquisa objetiva avaliar o emprego de agregados graúdos reciclados (produzidos a partir do entulho de construção e demolição) e o emprego do látex estireno-butadieno (polímero sintético) nas propriedades de concretos estruturais de média resistência. Todos os estudos são conduzidos comparando-se as propriedades de concretos com agregados naturais sem adição de látex, e de concretos com agregados graúdos reciclados com e sem adição de látex.

Na Primeira Fase da pesquisa, são avaliadas propriedades físicas e mecânicas destes concretos. São analisados três traços (com diferentes consumos de cimento) modificados com quatro percentagens de látex e submetidos a quatro formas de cura. Os resultados da Primeira Fase formam a base para a Segunda Fase da pesquisa, na qual apenas um dos traços contendo uma determinada porcentagem de látex e sob uma única forma de cura é submetido a ensaios em célula de corrosão acelerada e aderência aço-concreto.

Como resultado principal, tem-se que o emprego conjunto de agregados graúdos reciclados e látex estireno-butadieno fornece concretos com resistência mecânica equivalente aos concretos contendo agregados naturais e com desempenho em ambientes agressivos e aderência aço-concreto também semelhantes.

Conclui-se, portanto, pela viabilidade do emprego destes concretos como concreto estrutural armado no que tange às propriedades avaliadas.

Palavras-chave: concreto, cimento portland, agregado reciclado, reciclagem de entulho, látex estireno-butadieno, polímero.

ABSTRACT

BALLISTA, L.P.Z. (2002). *Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno*. São Carlos, 2002. 152p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This research aims at evaluating the use of coarse recycled aggregates (produced from construction and demolition debris) and the use of styrene-butadiene latex (synthetic polymer) in the concrete constitution of medium resistance concrete structures. All studies are carried out comparing the concrete properties with natural aggregates without latex, and concrete with coarse recycled aggregates with or without latex.

In the First Stage of the research, physical and mechanical properties of these concretes are evaluated (with different cement contents) modified with four percent of latex and submitted to four cure condition. The results of the First Stage produce the base for the Second Stage of the research, where only one of the features containing a determinate percentage of latex and under a sole form of cure condition it is submitted to tests in accelerated corrosive cell and steel-concrete adherence.

As a main result, it is believed that the joint usage of coarse recycled aggregates and styrene-butadiene latex provides mechanical resistant concrete equivalent to concrete containing natural aggregates with a similar performance in aggressive environments and with steel-concrete adherence.

Due to the its employment feasibility, one can conclude that this concrete is structurally armed in as far as its properties were evaluated.

Key-words: concrete, Portland cement, recycled aggregates, recycled debris, styrene-butadiene latex and polymer.

1. INTRODUÇÃO

A idéia de se estudar as propriedades físicas, mecânicas e de desempenho em ambientes agressivos em concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados de entulho empregando-se como adição o látex estireno-butadieno surgiu como uma forma de se conhecer mais a fundo a utilização de entulho como agregado para concretos estruturais de média resistência atacando os pontos que pesquisas anteriores já apontavam como deficientes nestes tipos de concretos: sua alta absorção e permeabilidade, danosos principalmente do ponto de vista de durabilidade das estruturas. Para tanto, a adição do látex estireno-butadieno, de uso já consagrado no combate a absorção/permeabilidade em argamassas de revestimentos (tendo ainda como principais benefícios aumentar a resistência mecânica, reduzir o módulo de elasticidade e atuar como plastificante no concreto fresco), foi decisiva para que o estudo almejasse produzir um material com reais possibilidades de ser empregado.

Como indicado nos capítulos subseqüentes, ambos os materiais possuem ampla bibliografia, ainda que pequena parte dela tenha sido desenvolvida no Brasil. É interessante notar que, salvo raríssimas exceções, as pesquisas foram desenvolvidas recentemente, principalmente com relação à reciclagem de entulho, o que indica o caráter atual desta pesquisa. O uso conjunto destes materiais (agregados reciclados e látex), na forma como empregados neste trabalho, por sua vez, jamais foi mencionado na bibliografia consultada.

Uma iniciativa que merece ser citada pelo caráter inovador e reflexo do potencial da utilização de entulho como material de construção é o livro publicado em 2001 e financiado pela Caixa Econômica Federal intitulado “RECICLAGEM DE ENTULHO PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO”

produzido pelo projeto ENTULHO BOM, com 311 páginas, e premiado pela Organização das Nações Unidas – ONU, como “**uma das 100 melhores práticas para melhorar a qualidade de vida**”. Vale ressaltar ainda que este livro é distribuído gratuitamente.

Espera-se que os resultados desta pesquisa auxiliem no emprego do **concreto estrutural com agregados reciclados de entulho e adição do látex estireno-butadieno** ou, ao menos, na caracterização de algumas de suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, fonte para continuidade de futuras pesquisas científicas.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal determinar algumas das propriedades físicas, mecânicas e de desempenho em ambientes agressivos de concretos estruturais de média resistência confeccionados com agregados graúdos reciclados provenientes da Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto-SP tendo como adição o látex estireno-butadieno, e comparar suas propriedades com as propriedades de concretos com agregados naturais.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser resumidos nos itens a seguir:

- Analisar as propriedades mecânicas de resistência à tração na compressão diametral e à compressão axial dos traços-alvo desta pesquisa quando submetidos a diferentes formas de cura e quantidades de látex;
- Analisar aspectos de desempenho em ambientes agressivos em exemplares através de índices de corrosão de armadura em célula de corrosão acelerada em diversas idades;
- Analisar parâmetros de aderência aço-concreto nos traços-alvo desta pesquisa.

1.3. JUSTIFICATIVA

A freqüente preocupação da população, em nível mundial, com a problemática dos resíduos urbanos e o destino dado a eles é o ponto de partida para esta pesquisa, visto que, como citado no Capítulo 2, o entulho compõe, via de regra, mais da metade dos resíduos gerados nas grandes cidades.

A viabilidade do emprego de entulho como agregado para concretos propõem uma visão de futuro onde os próprios canteiros de obra poderão produzir parcial ou totalmente seus agregados, consumindo seus próprios resíduos ou de obras adjacentes, evitando os já onerosos custos de transporte de matéria prima de jazidas cada vez mais distantes e de bota-foras igualmente afastados dos centros urbanos. Some-se a isso o impacto ao meio-ambiente devido ao lançamento de quantidades gigantescas de entulho em bota-foras e os custos com gerenciamento de aterros regulares e irregulares.

É evidente que uma reformulação no sistema de coletas de entulho deverá ocorrer de forma que, como não ocorre atualmente, as caçambas de entulho passem a conter apenas materiais propícios para serem empregados como agregados reciclados. **Deveremos partir então para uma espécie de coleta seletiva de entulho.**

O látex, por sua vez, vem somar alguns benefícios a este tipo de concreto, viabilizando seu emprego em estruturas principalmente no tocante aos aspectos de durabilidade, tão importante quanto a própria resistência mecânica do concreto. Este produto, cada vez mais comum em obras, sendo comercializado normalmente em vários países, tem a característica de maximizar seus efeitos sob certas condições específicas, principalmente quanto às proporções de dosagem e ao tipo de cura empregada. Eis a razão de sempre ser indicado pelos fabricantes que se faça um estudo caso a caso em corpos-de-prova antes da aplicação do látex.

1.4. METODOLOGIA

A metodologia empregada para o alcance de todos os objetivos a que esta pesquisa se propõe está descrita abaixo conjuntamente com a divisão do trabalho.

Vale observar como parte integrante da metodologia adotada que todos os materiais foram obtidos na praça e não apresentam características específicas além daquelas para as quais foram produzidos, com exceção dos agregados graúdos reciclados, que foram obtidos diretamente da Usina de Reciclagem de Entulhos de Ribeirão Preto, sob processo descrito em item específico, e que os ensaios foram sempre realizados à luz das Normas Brasileiras cabíveis, no Laboratório do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP) e, quando não, foram detalhadamente estudados baseando-se em artigos científicos ou Normas Internacionais.

O trabalho foi dividido em seis etapas principais:

1. Revisão bibliográfica sobre agregados reciclados, visando adquirir conhecimento sobre o assunto baseado em pesquisas anteriores;
2. Revisão bibliográfica sobre o látex estireno-butadieno, visando adquirir conhecimento sobre o assunto baseado em pesquisas anteriores;
3. Análise experimental da Primeira Fase, consistindo basicamente na determinação de resistências mecânicas em exemplares onde foram variados a porcentagem de látex e o tipo de cura. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral e foram determinadas algumas propriedades físicas dos elementos. Nesta etapa, determinou-se a forma de cura e porcentagem de látex sobre a massa de cimento que proporcionaram maiores resistências aos traços estudados;
4. Análise experimental da Segunda Fase, consistindo basicamente na determinação de parâmetros de desempenho em ambiente agressivo e resistência mecânica em exemplares, uma vez determinada a porcentagem de látex e forma de cura ideais através dos resultados da Primeira Fase. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de corrosão em célula de corrosão acelerada e aderência aço-concreto;
5. Análise dos resultados; e
6. Conclusão da pesquisa.

2. AGREGADOS RECICLADOS REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RECICLAGEM DE ENTULHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Junto à fronteira do terceiro milênio, a sociedade humana, composta de 6 bilhões de pessoas vivendo sob a regência de complexos sistemas sócio-econômicos, depara-se com uma realidade há muito esquecida e na qual está inserida: o modelo de sociedade criado pelo homem não levou em consideração a esgotabilidade dos recursos e a capacidade de absorção da natureza. Os seres humanos vêm, desde séculos atrás, utilizando mais e mais recursos naturais, e a partir de meados do século XIX, com a Revolução Industrial, o planeta passou por um processo de exploração indiscriminada de recursos naturais, jamais visto. Concomitantemente a isto, a sociedade vem devolvendo aos ecossistemas muito mais resíduos, cada vez mais difíceis de serem “absorvidos” pelo meio-ambiente.

Dentre as inúmeras toneladas diárias de resíduos sólidos devolvidos ao meio-ambiente, podem ser encontrados resíduos provenientes de uma das maiores atividades desempenhada pelos seres humanos em todos os tempos: a Construção Civil. Esta atividade, caracterizada por modificar radicalmente as paisagens naturais, é uma das que mais extraí recursos em todo o mundo, gerando, por consequência, enormes quantidades de resíduos.

2.1.1. UMA ABORDAGEM SUCINTA SOBRE RECICLAGEM

A exemplo de outros países, o Brasil também vem tentando buscar seu desenvolvimento econômico respeitando o conceito de Desenvolvimento

Sustentável. Para tanto, tem como principal ferramenta a ciência. Dentro do complexo contexto mundial de degradação ambiental, é inevitável se pensar em reutilizar materiais descartados como “lixo” para a produção de novos materiais que possam ser reintroduzidos no ciclo produtivo. Eis as idéias de Reaproveitamento e Reciclagem.

As Legislações Ambientais hoje em vigor regulamentam: (a) estabelecimentos de limites máximos para emissões atmosféricas e tratamento de efluentes líquidos; e (b) estabelecimento de procedimentos estritos para classificação e deposição de resíduos em aterros. Estas medidas significam maiores custos para os produtores e mesmo para o Estado. “Duas alternativas, não excludentes, podem ser consideradas quando se busca a redução dos custos de deposição e tratamento de resíduos: a redução dos volumes de resíduos produzidos e a reciclagem dos resíduos” (JOHN, 1996). O reaproveitamento e a reciclagem, além de diminuir a quantidade de resíduos lançados ao meio-ambiente, têm o potencial de agregar valor a estes materiais. “A construção civil, pelo extraordinário volume de materiais que incorpora, é um dos maiores mercados potenciais para reciclagem” (SILVA *et al.*, 1996).

“Reciclagem de resíduos, sob o ponto de vista da construção civil, é uma das maneiras de diversificar e aumentar a oferta de materiais de construção, viabilizando eventualmente reduções de preços que podem gerar inúmeros benefícios sociais. Esta situação pode ser favorecida pela adoção de medidas de incentivo específicas para a produção de habitações de baixo custo utilizando-se produtos reciclados de desempenho comprovado. Desta forma, a reciclagem de resíduos de construção combina a preservação ambiental com o aperfeiçoamento de políticas sociais” (JOHN, 1996).

A Figura 2.1 representa o ciclo produtivo conhecido por ciclo dos 3 Rs (três erres). Este ciclo apresenta o modelo produtivo ideal, onde o objetivo é eliminar a emissão de resíduos (“Lixo”).

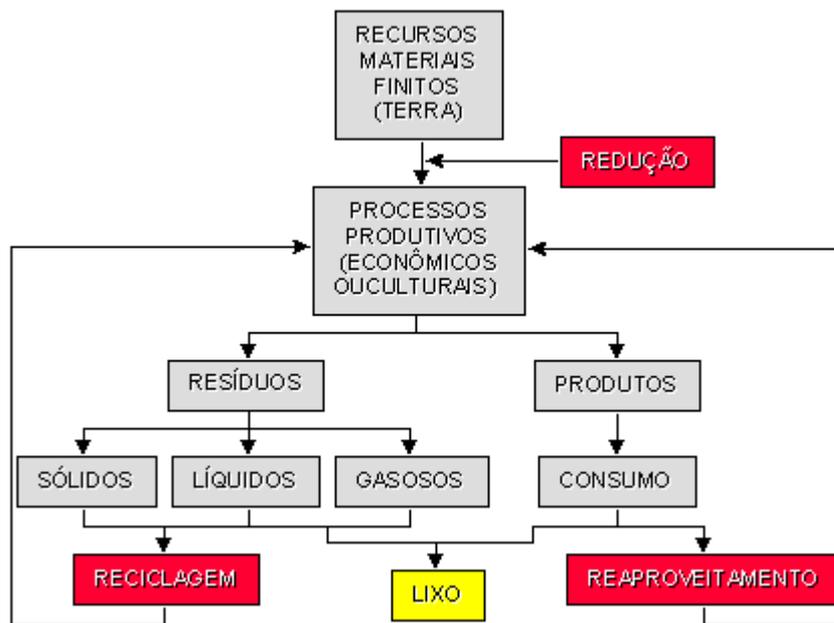


Figura 2.1 – Ciclo produtivo do modelo dos três erres (3R)

(FONTE: <http://www.ubn.br/admin/hpr/htm>)

De uma maneira simplificada, cada um dos erres tem o(s) seguinte(s) objetivo(s):

A **Redução** é colocada como a primeira etapa na diminuição da emissão de resíduos, e participa do ciclo propondo uma maneira de se extrair menos recursos da natureza, o que pode se dar através de evoluções nos processos de extração, armazenamento, beneficiamento e distribuição de recursos, visando a diminuição dos desperdícios e perdas nos processos.

O **Reaproveitamento** consiste em reutilizar materiais (ou produtos) o maior número de vezes possível. O reaproveitamento busca a reutilização em detrimento da descartabilidade.

A **Reciclagem** entra como última alternativa antes da devolução de resíduos ao meio-ambiente, sendo a única solução quando os dois primeiros itens (redução e reaproveitamento) não conseguem absorver todos os resíduos antes do fim do ciclo. Esta ferramenta busca modificar as características dos materiais, propondo seu uso em outras atividades, fora daquelas para as quais deveriam ter sido confeccionados.

2.2. GERAÇÃO E DEPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1. GERAÇÃO

Os resíduos provenientes da construção civil são gerados basicamente de duas maneiras: nas **construções** e nas **demolições**.

A atividade de construção civil é tradicionalmente uma das que mais desperdiçam materiais, devendo-se tal peculiaridade a diversos fatores, dentre os quais pode-se destacar o baixo grau de padronização e industrialização empregados por tal indústria e o baixo nível de instrução de seus funcionários. Estima-se que o desperdício nas construções varie de 10 a 35% de todos os materiais empregados. O desperdício durante as construções, em canteiros de obra, portanto, contribui com uma fatia significativa para a geração de entulho, principalmente em um país em desenvolvimento como o Brasil, que continua ampliando significativamente seu ambiente construído.

As atividades de demolição, menos freqüentes que as construções, são normalmente aplicadas quando uma ou mais construções apresentam instabilidade, perigo à população ou há necessidade da reutilização de terrenos ou áreas já ocupadas. As demolições geram volumes extremamente grandes de resíduos de uma só vez, haja vista as recentes implosões dos edifícios Portugal e Espanha, que foram demolidos após a queda do edifício Itália, na cidade de São José do Rio Preto (SP), o que gerou milhares de toneladas de entulho em poucos segundos.

Existe ainda a possibilidade de geração de entulhos devido a catástrofes naturais tais como movimentações da crosta terrestre, que são inexpressivas no Brasil, porém mais freqüentes em países que apresentam instabilidades constantes e intensas como Japão, Itália, Índia e o oeste dos Estados Unidos. A reconstrução de regiões atingidas por terremotos foi o berço para a reciclagem de entulho.

Uma cidade como Campinas - SP, que possui aproximadamente um milhão de habitantes, produzia no ano de 1996 cerca de 1.800 toneladas de resíduos provenientes da construção civil, representando aproximadamente 65% de todos os resíduos gerados no município (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS, 1996). Na cidade de Ribeirão Preto - SP, com aproximadamente 450 mil habitantes, estima-se que a geração de resíduos da construção civil seja de 970 toneladas por dia,

representando 67% da participação no total de resíduos sólidos gerados diariamente (LATTERZA, 1998). PINTO (1996) apresenta os seguintes dados:

Tabela 2.1 - Participação dos resíduos de construção no total dos resíduos sólidos urbanos (em massa)

Complexo Demográfico	Participação
São José dos Campos/SP	68%
Belo Horizonte/MG	51%
Brasília/DF	66%
Europa Ocidental	67%
Suíça	45%
Holanda	80%

(FONTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS, 1996)

2.2.2. DEPOSIÇÃO

Os resíduos da construção civil foram, desde o século passado, depositados indiscriminadamente em vales, depressões naturais, buracos, margens de rios, ou em aterros desprovidos de qualquer tratamento adequado, prática ainda utilizada em muitas localidades. “Contudo, desde alguns anos atrás, estes tipos de depósitos vêm tornando-se cada vez mais raros no ambiente urbano, e conseqüentemente, mais distantes destes centros, não mais atendendo à demanda crescente de destinação” (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS, 1996). Some-se a isto o custo de gerenciamento de deposições regulares e irregulares de entulho, a poluição visual gerada no ambiente urbano, a contaminação e o assoreamento das águas superficiais, entupimento de elementos de drenagem e os perigos à população, representados pelo surgimento de zoonoses e instabilidade de maciços formados pelos depósitos de entulho, dentre outros.

“Os custos atuais de manuseio e deposição de entulhos já são, em muitos casos, maiores que o custo das matérias-primas. Entulhos, que antes eram considerados lixo, podem hoje ser reciclados e empregados na própria construção ou ter outras destinações a custos razoáveis” (JUVAS, 1997).

2.2.3. APLICABILIDADE

A construção civil tem sido recentemente foco de diversos estudos com ênfase na reciclagem de subprodutos de diversas indústrias, sendo que alguns destes realmente obtiveram sucesso, tais como as escórias de alto-forno, incorporadas ao cimento Portland, e as cinzas provenientes da queima da casca do arroz, que possuem propriedades pozolânicas. Outros estudos têm proposto a incorporação na construção civil de resíduos de difícil degradação ambiental tais como garrafas PET e pneus.

Como os rejeitos da construção civil são constituídos de materiais que foram desenvolvidos para utilização em tal indústria, apresentam elevado potencial para reciclagem e aplicação na própria construção civil. São, portanto, materiais rotineiros das construções, o que lhes confere vantagens em relação à aplicação de outros tipos de rejeitos: possuem características físicas, químicas e mecânicas semelhantes.

Embora ainda não existam estatísticas de todo o país, na média, o entulho que sai dos canteiros de obra brasileiros é composto basicamente de 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação (tijolo maciço, tijolo furado e bloco) e 6% de outros materiais, como concreto, pedra, areia, metais e plásticos. Com essa composição, é fácil entender que o resultado seja um material básico de qualidade. Além deste potencial, há também as vantagens ambientais e econômicas, afirmam AGOPYAN & PINTO (1995).

Segundo PINTO (1996), o agregado reciclado já vem demonstrando muito bom desempenho para uma série de usos em obras urbanas, para os quais possibilita a obtenção de custos bastante vantajosos, podendo-se utilizá-lo em bases para pavimentação, execução de concreto para diversos fins (habitações, calçadas, muros, guias, sarjetas, tubos, blocos de alvenaria), contenção de encostas com uso de sacaria, dentre outros.

Além das vantagens ambientais, já mencionadas, existem as vantagens econômicas da reciclagem dos resíduos de construção e demolição (C&D). LATTERZA (1998) afirma que “as jazidas de agregados naturais para concreto estão se tornando mais escassas, fazendo com que se busque este material em lugares cada vez mais distantes, aumentando consideravelmente o custo total da construção, com reflexo, inclusive, nas obras destinadas à população de baixa renda. Segundo dados

de 1997 da Coordenadoria da Estação de Reciclagem de Ribeirão Preto, D.E.R.M.U.R.P. – Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Ribeirão Preto, o custo da reciclagem, quando a usina opera em capacidade total, é de U\$ 3,94/t contra U\$ 5,37/t para gerenciamento das deposições irregulares de entulho”. Segundo JUVAS (1997), agregados naturais têm sido transportados por longas distâncias, que na Escandinávia, variam de 50 a 150km e que na Europa Central, onde são transportados por barcaças, podem ser superiores a 1000km, custos estes que podem representar mais que 50% no valor destes agregados.

“A reciclagem vem estabelecer novas, efetivas e realistas soluções a alguns dos nossos problemas de engenharia, utilizando-se de materiais locais e de baixo custo, provendo novas ferramentas para enfrentar alguns dos problemas sociais e econômicos de peso em nosso país” (LATTERZA, 1998).

“Quando o conceito de reciclagem for estendido ao entulho de obra, seu significado, em última análise, deve ser o de um tratamento constituído por uma operação de britagem ou moagem que permita obter um material cuja granulometria esteja dentro de limites especificados e assim, possibilitar seu uso como agregado em argamassa, concreto ou atividade correlata” (LEVY, 1997).

2.2.4. FORMAS DE ADIÇÃO DO ENTULHO EM ARGAMASSA E CONCRETO

O entulho proveniente da construção civil pode ser adicionado aos concretos e argamassas de cimento Portland de várias maneiras, abaixo apresentadas:

Como agregado miúdo para argamassa – o entulho é adicionado em substituição parcial ou total ao agregado miúdo natural ou artificial, após tratamento adequado que consiste basicamente em britagem e classificação granulométrica. As principais aplicações citadas por LEVY (1997) se referem a argamassas de assentamento e revestimento.

Como agregado miúdo para concreto – idem ao item anterior, porém sem utilização expressiva. Contudo, vários estudos têm sido conduzidos para caracterização das propriedades e viabilização de aplicações para esta combinação.

Como agregado graúdo para concreto – o entulho é adicionado em substituição parcial ou total ao agregado graúdo natural ou artificial, após tratamento

adequado que consiste basicamente em britagem e classificação granulométrica. Certamente é a forma de utilização de entulho como “agregado para compostos de cimento portland” mais estudada e utilizada. Já é empregada em larga escala em concretos sem responsabilidade estrutural, mas pesquisas têm sido conduzidas no sentido de viabilizar o emprego deste material em concretos estruturais de média resistência, embora a Holanda já o permita.

Como agregado miúdo e graúdo para concreto – substituição parcial ou total de agregados naturais ou artificiais por agregados reciclados de entulho, seguindo as premissas anteriores. Assim como no emprego de agregado miúdo para concretos, esta forma de utilização ainda é pouco conhecida e empregada.

2.2.5. BRITAGEM DO ENTULHO

A forma de britagem do entulho reporta-se aos equipamentos já consagrados na britagem de outros materiais. A otimização dos resultados obtidos depende da correta escolha do tipo de britador, do dimensionamento da energia empregada através das experiências de aplicações anteriores e simulações, e da granulometria dos materiais de alimentação. A opção correta do britador quanto a estas características proporcionará agregados com a granulometria e forma de partículas desejadas.

De acordo com a necessidade, os britadores ou as centrais de britagem podem apresentar capacidade de produção variando de 10 a 3.000 toneladas por hora.

São ainda partes integrantes dos sistemas de britagem:

- Os **alimentadores**, que conduzem os materiais a serem britados até os britadores, e são escolhidos principalmente de acordo com a produtividade do equipamento de britagem e a granulometria de alimentação, e podem ser do tipo sapata, vibratórios, de gaveta, de correia, de vagões e tipo calhas;
- As **peneiras e grelhas**, que são sempre vibratórias e constituem os dispositivos de separação granulométrica dos materiais britados, e são apresentadas nos mais diversos tamanhos e aberturas de malha; e
- As **correias transportadoras**, que são responsáveis pela movimentação do material até os britadores e peneiras, ou até sua disposição final nos estoques.

Constituem um dos principais materiais de desgaste das centrais de britagem e têm custo bastante elevado.

Um outro processo envolvido com atividades de britagem e altamente indesejável do ponto de vista econômico é a lavagem dos agregados. A lavagem ocorre pela necessidade de remoção do *filler*, que é um material resultante do processo de britagem, de granulometria muito fina (passante na peneira nº 200) e que, dependendo do emprego dos agregados, conduz a altos consumos de cimento pela necessidade de água de amassamento para atingir determinadas trabalhabilidades em concretos estruturais convencionais. A lavagem de agregados tem como subproduto justamente este material, que deve ser separado da água empregada na lavagem em bacias de decantação e ter destinação adequada, fatores que encarecem o processo.

Quanto a redução das partículas, “existem quatro maneiras básicas: por impacto, atrito, clivagem (ou punção) ou compressão. Todas as centrais de britagem empregam um destes métodos ou combinação dos mesmos, o que é mais comum” (www.penncrusher.com). Segundo COELHO (2001), os meios de britagem mais empregados para reciclar entulhos são por meio de britadores de impacto e de mandíbula (ou por compressão). Estas quatro formas de redução de partículas são apresentadas a seguir.

2.2.5.1. Britagem por Impacto

Consiste basicamente em forçar a colisão entre partículas ou entre estas e um martelo. Existem duas variações desta forma de britagem: impacto por gravidade e impacto dinâmico. O impacto por gravidade ocorre quando o material a ser britado sofre queda livre contra um anteparo rígido estático. O impacto dinâmico tem o mesmo princípio, mas o anteparo, neste caso, está em movimento. A britagem por impacto dinâmico envolve, geralmente, maior energia de britagem e conduz, conseqüentemente, a partículas menores. A Figura 2.2 ilustra a britagem por impacto dinâmico.

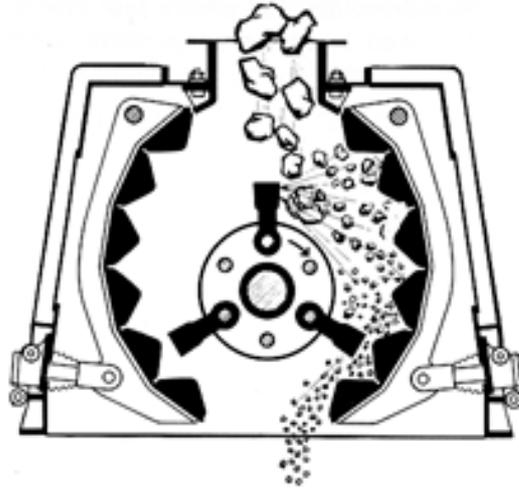


Figura 2.2 - Britagem por impacto dinâmico
(FONTE: www.penncrusher.com)

2.2.5.2. Britagem por Atrito

Britagem por atrito é o termo empregado para redução de materiais forçando sua passagem por entre duas superfícies rígidas. Este processo de britagem normalmente consome mais energia e exige mais do equipamento que os demais e, portanto, tem aplicações práticas restritas. A Figura 2.3 ilustra a britagem por atrito.

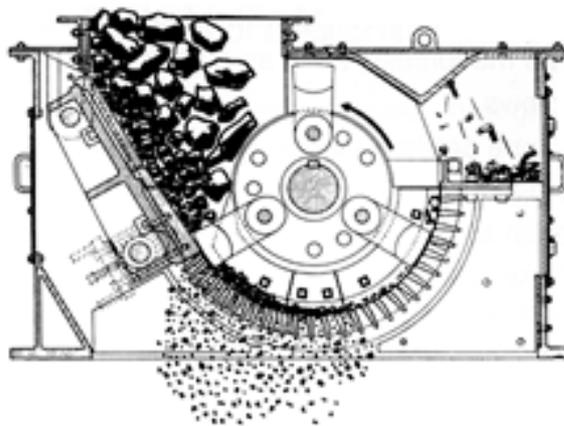


Figura 2.3 - Britagem por atrito
(FONTE: www.penncrusher.com)

2.2.5.3. Britagem por Clivagem ou Puncionamento

A britagem por clivagem ou puncionamento consiste em aplicar cargas concentradas nos materiais enquanto os comprime contra um anteparo rígido, como no processo de britagem por atrito. Este processo, apresentado na Figura 2.4, é empregado para uma redução inicial no tamanho das partículas dos agregados.

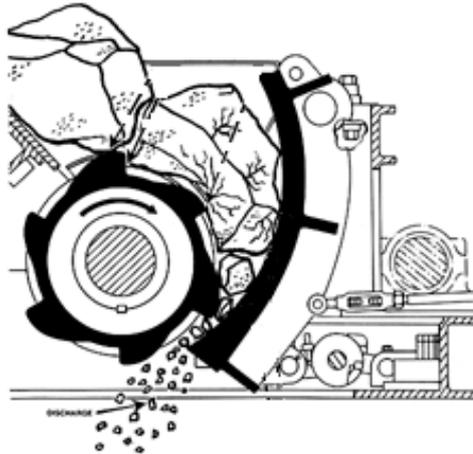


Figura 2.4 - Britagem por clivagem ou puncionamento

(FONTE: www.penncrusher.com)

2.2.5.4. Britagem por Compressão

A britagem por compressão é realizada entre duas superfícies rígidas, onde o trabalho é realizado por uma ou pelas duas superfícies e os materiais são comprimidos contra estas superfícies e contra si próprios. Este processo, mostrado na Figura 2.5, é largamente empregado para materiais duros e abrasivos.

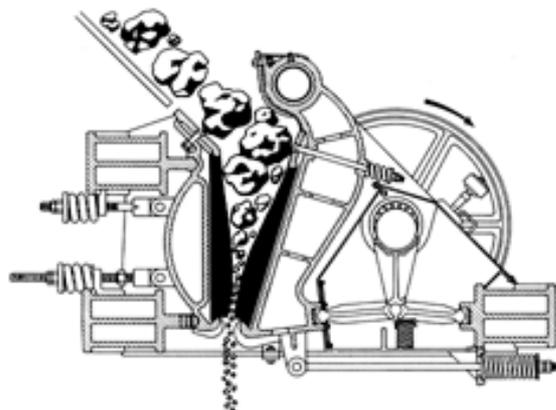


Figura 2.5 - Britagem por compressão

(FONTE: www.penncrusher.com)

Quanto aos tipos de circuitos, a britagem pode ainda ser realizada em circuitos abertos ou fechados. No circuito aberto, o material passa pelo britador uma única vez, independentemente de requisitos de granulometria. No circuito fechado, por sua vez, os materiais passam continuamente pelo britador até atingirem o tamanho máximo desejado, conforme pode-se ver na Figura 2.6. Para tanto, faz-se uso de peneiras que têm a função de retornar ao circuito os materiais com diâmetro acima do máximo desejado.



Figura 2.6 – Circuito fechado de britagem

Cabe ainda ressaltar que muitos equipamentos de britagem ou até mesmo centrais inteiras podem ser facilmente instalados nos canteiros de obra devido ao seu tamanho reduzido, sendo que muitos deles são autopropelidos ou montados sobre chassi e rebocados por cavalos mecânicos. Existem ainda os *estacionários*, que são montados em local apropriado e lá permanecem por um período relativamente longo, como por exemplo, aqueles montados para atender pedreiras que comercializam agregados. Instalações estacionárias são apresentadas nas Figuras 2.7 e 2.8. Equipamentos móveis são mostrados nas Figuras 2.9, 2.10 e 2.11. Na Figura 2.12 é mostrado o emprego de central de britagem para reciclagem de entulho.



Figura 2.7 – Central de Britagem instalada em barragem no estado de Minas Gerais



Figura 2.8 – Detalhe do alimentador, do britador primário (de mandíbula) e da correia transportadora da central de britagem apresentada na Figura 2.7



Figura 2.9 – Foto de um conjunto de britagem móvel equipado com britadores primário e secundário e jogo de peneiras, com produtividade de 100t/h
(FONTE: SVEDALA, 2001)

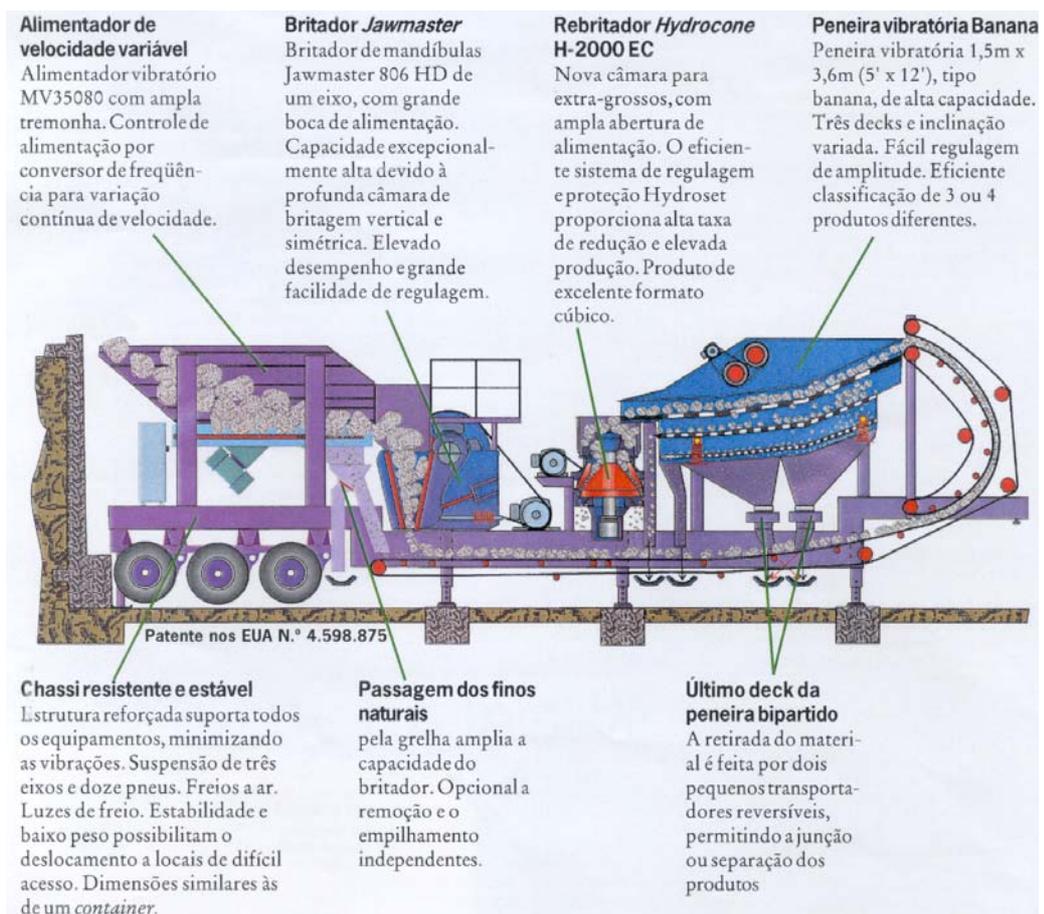


Figura 2.10 – Princípio de funcionamento do conjunto apresentado na Figura 2.9
(FONTE: SVEDALA, 2001)



Figura 2.11 – Central de britagem móvel com britador primário
(FONTE: INTERNATIONAL CONSTRUCTION, 1999)



Figura 2.12 – Ilustração apresentada em catálogo técnico de central de britagem
indicando uso específico para reciclagem
(FONTE: NORDBERG, 2001)

2.2.6. UM CASO RECENTE SOBRE A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

A 17 de agosto 1999, Marmara, na Turquia, foi atingida por dois terremotos que causaram enorme devastação na região, gerando cerca de 10 milhões de toneladas de entulho em poucos segundos. Além de todo o entulho gerado diretamente, as demolições subseqüentes vieram tornar seu volume ainda mais expressivo.

Por volta de novembro deste mesmo ano, a fase de demolição estava praticamente concluída e todo o entulho, empilhado em regiões determinadas. Por solicitação do governo de Turquia, o Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (United Nation Development Programme - UNDP) encaminhou uma equipe dinamarquesa chamada DEMEX para fornecer apoio técnico durante a reciclagem do entulho e seu emprego na reconstituição da região.

O processo de reciclagem do entulho esbarrou em vários empecilhos, dentre os quais a remoção de materiais tais como madeira e plástico foi o principal. Paralelamente a esta etapa, a britagem e separação granulométrica do material separado puderam prosseguir na medida em que os britadores eram alimentados.

A equipe DEMEX acabou por recomendar que os agregados reciclados fossem submetidos a uma série de ensaios para assegurar que satisfizessem aos padrões de norma. Durante o período dos testes, os agregados reciclados foram sendo empregados como material de reforço de subleito em estradas e como agregados em concretos para construção de abrigos temporários.

Após os ensaios iniciais, e com a credibilidade nos agregados reciclados aumentando, a equipe DEMEX recomendou sua utilização em concretos de baixa resistência e concreto de fundações.

Durante este período, outro terremoto ainda mais forte que os anteriores atingiu a região de Marmara e a reconstrução ainda continua. Os resultados apresentados pela equipe DEMEX não puderam ser encontrados na bibliografia consultada, mas “o desastre na Turquia implantou a consciência de que reciclar o entulho das áreas urbanas atingidas por desastres naturais deste tipo é uma maneira econômica e ecologicamente viável para a recuperação da região” (INTERNATIONAL CONSTRUCTION, 2000).

2.3. CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE C&D

2.3.1. INTRODUÇÃO

Dentre as principais diferenças apontadas na literatura entre agregados naturais e agregados reciclados, destaca-se, para os agregados reciclados, a maior absorção de água, maior heterogeneidade e menor resistência mecânica dos componentes. Contudo, “diversos pesquisadores japoneses (KIKUCHI *et al*, 1988; KASHINO & TAKAHASHI, 1988; YANAGI, 1988 e YAMAMOTO, 1988) concordam que a substituição de 30% dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados não altera significativamente as propriedades dos concretos produzidos” (LEVY, 1997). Porém, a substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados para execução de concretos estruturais ainda é inexpressiva no Brasil.

2.3.2. PROPRIEDADES

2.3.2.1. Consistência/Trabalhabilidade

“Os diversos trabalhos consultados são unânimes em afirmar que os concretos preparados com agregados reciclados apresentam consistência mais seca do que concretos convencionais preparados com a mesma relação água/cimento. A justificativa apresentada para esta tendência é a maior porosidade do agregado reciclado em relação ao agregado natural, que termina por elevar a absorção de água” (LEVY, 1997).

O fato dos agregados reciclados geralmente apresentarem camadas de argamassa aderida à sua superfície e de apresentarem parcelas de materiais cerâmicos faz com que seja absorvida maior quantidade de água de amassamento pelos agregados durante a mistura, conduzindo a maior perda de trabalhabilidade em relação aos concretos de agregados naturais. Este aumento na absorção é utilizado por alguns autores para justificar o processo intitulado de “cura interna”, no qual afirma-se que a água absorvida pelos agregados durante a fase de mistura irá ajudar na hidratação do cimento no entorno do agregado, aumentando assim a resistência da pasta nesta zona de interface.

MUKAI *et al. apud* HANSEN (1983) afirma que os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados requerem aproximadamente 10l/m³ (ou 5%) a

mais de água de amassamento que os concretos convencionais para manter o mesmo abatimento.

Deve-se, no entanto, atentar também para a forma dos agregados. Agregados britados em tipos diferentes de equipamentos apresentam formas diferentes, conduzindo a áreas superficiais diferentes, o que também influencia na quantidade de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade. Outro fato relevante é que como, em geral, a massa específica dos agregados reciclados é menor que a dos agregados naturais, a substituição em massa destes por agregados reciclados conduz a um maior volume de agregados na mistura, o que também aumenta a quantidade de água requerida para a mesma trabalhabilidade.

2.3.2.2. Teor de Ar Incorporado

MUKAI *et al.* *apud* HANSEN (1986) cita que o teor de ar incorporado em concretos frescos produzidos com agregados reciclados é cerca de 0,6% maior que o encontrado no concreto produzido com agregados naturais.

Segundo HEDEGAARD *apud* HANSEN (1986), não há diferenças significativas entre o teor de ar incorporado nos concretos com agregados reciclados e aqueles com agregados convencionais.

2.3.2.3. Massa Específica

A massa específica dos concretos no estado fresco produzidos com agregados reciclados varia entre 2.020 e 2.210 kg/m³, valores referentes a 85% e 95% daqueles obtidos nas misturas de controle (HANSEN, 1986). LATTERZA (1998) conclui que para concretos com 100% de agregados graúdos reciclados com $D_{máx} = 19,0\text{mm}$, há uma redução de 9% na massa específica no estado fresco em relação ao concreto de referência, e para os concretos com 100% de agregados reciclados com $D_{máx} = 9,5\text{mm}$, a redução chega a 4% da massa específica no estado fresco do concreto de referência.

“Os concretos leves estruturais têm massa específica no estado endurecido entre os limites de 1300kg/m³ e 1900kg/m³, com resistência mínima de 17MPa (NEVILLE, 1997), onde se enquadram os concretos de argila expandida. Já os concretos estruturais, de peso normal, têm massa específica variando entre

2300kg/m³ e 2500kg/m³. No intervalo entre 1900kg/m³ e 2300kg/m³, estão localizados os concretos estruturais com agregados reciclados de entulho de construção e demolição com resistência característica mínima de 15MPa” (MACHADO JUNIOR & AGNESINI, 1999).

Pesquisas realizadas por MACHADO JUNIOR & AGNESINI (1999), obtiveram valores variando de 1.997 a 2.040kg/m³ para concretos com 100% de agregados graúdos reciclados com $D_{máx} = 9,5\text{mm}$.

2.3.2.4. Tempo de Pega

Segundo RAVINDRARAJAH *et al.* (1987), o tempo de início de pega de concretos com agregados reciclados pode sofrer redução de 30 minutos e o tempo de fim de pega pode sofrer redução de até 35 minutos, se comparados com os concretos de referência. Ainda segundo o mesmo autor, as reduções nos tempos de início e fim de pega se devem provavelmente a maior absorção de água dos agregados.

2.3.2.5. Resistência à Compressão

NIXON *apud* HANSEN (1986) chegou à conclusão que há uma sensível queda no valor da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados, quando comparados aos concretos produzidos com agregados naturais. Segundo o mesmo, esta queda pode chegar a 20%, mas em geral é bem menor. LATTERZA (1998) apresenta em seu trabalho, valores variando de 15 a 20% acima, na resistência à compressão de concretos com agregados reciclados quando comparados aos respectivos concretos de referência. Segundo KHALOO (1994), concretos produzidos com agregados reciclados que apresentem baixos consumos de cimento podem apresentar maiores resistências à compressão. Esta situação se inverte com o aumento do consumo de cimento.

Pode-se atribuir os ganhos de resistência obtidos em alguns casos a três fatores:

1. A qualidade dos agregados empregados no que se refere aos seus componentes, homogeneidade, granulometria, dentre outros. Cabe ressaltar que a composição dos agregados reciclados, que varia muito em diferentes regiões, pode afetar sensivelmente os valores de resistência do

concreto, sendo esta, portanto, função do tipo de agregado reciclado empregado;

2. O aumento de hidratação do cimento na zona de interface do agregado com a pasta, promovido pela alta absorção de água dos agregados durante a mistura, fenômeno este mencionado anteriormente e referido como “cura interna”; e
3. A presença de partículas não hidratadas de cimento nos resíduos de concreto e argamassa dos agregados reciclados, que podem hidratar-se quando da reutilização destes agregados, acabando por aumentar a quantidade de cimento do traço empregado.

2.3.2.6. Resistência à Tração

A bibliografia existente, de maneira geral, afirma que não há diferenças significativas para os valores das resistências à tração por compressão diametral e tração na flexão entre concretos produzidos com agregados reciclados e concretos de referência, sendo inferiores a 10%.

“Resistência à tração por compressão diametral e na flexão nos concretos com agregados reciclados podem ser maiores ou menores que nos concretos de referência, dependendo da relação água/cimento empregada” (TAVAKOLI & SOROUSHIAN, 1996).

“Segundo vários autores, através da inspeção visual da superfície fraturada, percebe-se que as várias fissuras nos concretos com agregados naturais ocorrem ao longo da interface entre a argamassa e os grãos dos agregados, enquanto que nos concretos com agregados reciclados, as fissuras se desenvolvem no interior da argamassa original aderida à superfície dos grãos dos agregados reciclados. Pode-se concluir que a aderência entre a nova argamassa e os agregados reciclados é maior do que entre a argamassa e o agregado convencional” (LEVY, 1997).

2.3.2.7. Módulo de Elasticidade

“Devido à grande quantidade de argamassas de pequeno módulo de elasticidade aderida aos agregados reciclados, o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com este material é sempre menor que o do concreto de

referência” (HANSEN, 1986). Segundo LEVY (1997), este valor está compreendido entre 10 e 40%.

“O módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados é menor que o do concreto com agregados convencionais, e esta diferença aumenta com o aumento da resistência. Para um concreto de média resistência, as reduções no módulo de elasticidade estático e dinâmico são de cerca de 25% para concretos curados em imersão, e de 35% para concretos curados ao ar” (RAVINDRARAJAH & TAM, 1987).

Em estudos realizados por MACHADO JUNIOR & AGNESINI (1999), concretos produzidos com agregados reciclados com $D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$ e consumo de cimento variando entre 328kg/m^3 e 464kg/m^3 , foram obtidos módulos de elasticidade estáticos de 23,5GPa e 27,2GPa, respectivamente.

2.3.2.8. Aderência à Armadura

Segundo MUKAI *et al.* *Apud* HANSEN, a tensão de aderência à armadura nos concretos com agregados reciclados é equivalente a dos concretos convencionais mesmo sob ação de cargas repetidas quando são empregados agregados graúdos reciclados com areia natural. No entanto, quando são empregados agregados reciclados graúdos e miúdos, a tensão de aderência fica comprometida em torno de 30% do concreto de referência (com agregados naturais). Ainda segundo os mesmos, isto indica que os concretos com agregados graúdos reciclados podem ser empregados em concreto armado sem muitos inconvenientes, mas os agregados miúdos reciclados devem ser evitados.

2.3.2.9. Retração por Secagem

RAVINDRARAJAH & TAM (1987) concluíram que a retração por secagem nos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados é cerca de 50% maior do que a apresentada nos concretos de referência. O mesmo é observado por HANSEN (1992).

CUR (Commissie voor Uitvoering van Research) *apud* LEVY (1997), comparando a retração por secagem entre concretos convencionais e concretos com

agregados reciclados de 25MPa e 50MPa, encontrou valores 35% e 55% maiores para a retração nos concretos com agregados reciclados, respectivamente.

2.3.2.10. Permeabilidade/Absorção

A durabilidade das estruturas de concreto está intimamente ligada à sua permeabilidade, que é função da absorção de água do concreto endurecido.

Segundo KASAI *apud* HANSEN (1986), em estudos conduzidos com concretos de relação água/cimento variando de 0,5 a 0,7 e abatimento de 21cm, os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram permeabilidade de 2 a 5 vezes maior que os concretos de referência. A mesma tendência é seguida no caso da absorção de água.

Os ensaios conduzidos por MACHADO JUNIOR & AGNESINI (1999), a absorção de água obtida segundo a NBR-9778 para concretos produzidos com agregados reciclados com $D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$ e consumo de cimento variando entre 328kg/m^3 e 464kg/m^3 , foram 7,0% e 5,3%, respectivamente.

3. POLÍMEROS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

A ciência dos materiais, desde o início dos estudos das propriedades das argamassas e concretos de cimento portland, tem mostrado a imensa gama de possibilidades de associação destes com materiais diversos, visando a melhoria de suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Dentre os diversos componentes associados com êxito às argamassas e concretos de cimento portland, podemos citar principalmente as escórias de alto forno, as cinzas volantes, a sílica ativa, as fibras naturais e sintéticas, os superplastificantes e os polímeros.

Estas adições vêm suprir deficiências apresentadas pelos compósitos de cimento portland, visando a melhoria de propriedades específicas ou do conjunto em detrimento de outras, o que muitas vezes ocorre nos concretos e argamassas.

Como se sabe, materiais construtivos como concretos e argamassas produzidos a base de aglomerante hidráulico de cimento Portland costumam apresentar certas limitações com relação a resistência à tração na flexão, ataque de agentes agressivos, abrasão, absorção de água, etc. Para combater tais aspectos negativos, novas tecnologias têm sido desenvolvidas, dentre as quais, a adição de polímeros à estas composições tem apresentado resultados satisfatórios (TEZUKA *apud* STORTE, 1991).

3.2 INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS

3.2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

“As moléculas dos polímeros são tão grandes que são geralmente chamadas de *macromoléculas*. Na maioria dos polímeros, estas moléculas apresentam-se na forma de longas e flexíveis cadeias. Essas longas moléculas são compostas de entidades estruturais chamadas unidades *mero*, que são sucessivamente repetidas ao longo da cadeia. *Mero*, que vem da palavra grega *meros*, significa parte. Uma unidade *mero* é conhecida por *monômero*. O termo *polímero* significa muitos *meros*” (CALLISTER, 1997).

TEZUKA (1988) define monômero como “uma molécula orgânica, de baixa massa molecular, capaz de se combinar quimicamente com moléculas de mesma ou mais espécies para formar uma macromolécula, de alta massa molecular”.

“Quando as moléculas se tornam muito grandes, contendo um número de átomos encadeados superior a uma centena e podendo atingir valor ilimitado, as propriedades dessas moléculas – que se chamam então *macromoléculas* – ganham características próprias, gerais, muitos mais dominantes que as características que decorrem da natureza química dos átomos que as constituem ou dos grupamentos funcionais presentes. Estas propriedades decorrem de interações envolvendo segmentos da mesma macromolécula e de outra. A forma e o comprimento das ramificações presentes na cadeia macromolecular têm papel importante. Pontes de hidrogênio e interações dipolo-dipolo, ao lado de forças de Van der Waals, atuando nestas macromoléculas no estado sólido, criam resistência muito maior do que no caso de moléculas de cadeia curta. Em solução, estas interações entre moléculas de alto peso molecular acarretam um pronunciado aumento da viscosidade, que não se observa com as micromoléculas. Da mesma maneira, a evaporação do solvente destas soluções viscosas resulta na formação de filmes, enquanto que soluções de substâncias sólidas de baixo peso molecular geram cristais ou pós. Esse, aliás, é um dos meios mais simples e imediatos para o reconhecimento das macromoléculas: capacidade de formação de filmes ou películas” (MANO, 1988).

A *polimerização* é a reação de síntese que converte os monômeros em polímeros. O número de meros da cadeia polimérica fornece o *Grau de Polimerização*. Segundo MANO (1988), “quando há mais de um tipo de mero na

composição do polímero, este é designado como *copolímero*, e os monômeros que lhe dão origem, *comonômeros*”. O estireno-butadieno (SB – Styrene-Butadiene), por exemplo, é um copolímero formado por estireno e butadieno.

Polímeros naturais, derivados de plantas e animais, têm sido usados pelo homem por muitos séculos. Alguns exemplos de polímeros naturais utilizados há muito pelo homem são a borracha, o amido, o algodão, o couro, a lã e a seda. Outros polímeros naturais, utilizados diariamente por muitos dos seres vivos são a celulose, as proteínas e as enzimas, os polissacarídeos e os poli-hidrocarbonetos.

Modernas pesquisas científicas têm permitido a síntese de polímeros. Muitos dos plásticos, borrachas e materiais de fibras são feitos de polímeros sintéticos. Na verdade, após o fim da Segunda Guerra Mundial, o campo dos materiais foi revolucionado com o advento deste tipo de polímero. Os polímeros sintéticos podem ser produzidos a baixos custos, conseguindo-se obter facilmente algumas propriedades desejadas. Em alguns casos, os polímeros sintéticos estão substituindo madeira e aço, pois apresentam desempenhos mecânicos semelhantes, maior durabilidade e custo menor.

3.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS

Os polímeros podem ser classificados, normalmente, segundo as seguintes propriedades:

- **Estrutura Química:** classifica os polímeros quanto aos grupos funcionais presentes em sua cadeia. Podem ser: *poliéteres*, *poliamidas*, *poliésteres*, etc.
- **Método de Preparação:** conforme a ocorrência de adições, os polímeros podem ser classificados como *polímeros de adição* ou *polímeros de condensação*.
- **Processos Tecnológicos de Fusão:** os polímeros que permitem fusão e solidificação por aquecimento e resfriamento, respectivamente, são chamados de *termoplásticos*. Caso contrário, são chamados de *termorrígidos*.
- **Comportamento Mecânico:** quanto ao comportamento mecânico, os polímeros podem ser classificados como *elastômeros* (material bastante flexível à temperatura ambiente), *plásticos* (são moldáveis sob condições de pressão e calor, mas sólidos à temperatura ambiente) e *fibras* (apresenta

elevada razão entre seu comprimento e suas dimensões laterais, e comportamento próximo ao dos plásticos).

3.2.3 FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS

Segundo MANO (1996), são três os principais fatores que afetam as propriedades dos polímeros:

- Natureza química do monômero, peso molecular e estrutura molecular;
- Processos de preparação dos polímeros: *poliadição, policondensação e modificação de outros polímeros*; e
- Técnicas empregadas em polimerização: *em massa, em solução, em emulsão, em suspensão e interfacial*.

As peculiaridades destas propriedades são bastante específicas e não serão abordadas neste trabalho. Podem, entretanto, ser encontradas na referida bibliografia.

3.2.4 LÁTEX

Segundo WALTERS (1988), látex são dispersões de partículas de polímeros orgânicos em água. São fluidos leitosos que apresentam coloração branca. Sua consistência pode variar de fluido a muito viscoso.

“O termo látex foi originalmente usado para designar o produto natural obtido da seringueira, um leite branco constituído de partículas de borracha sólida dispersa em água” (TEZUKA, 1988). No entanto, atualmente pode-se chamar de látex qualquer material polimérico em emulsão na água.

Segundo WALTERS (1987), a primeira referência aos látex ocorreu no início do século XVI, quando exploradores espanhóis relataram que índios da América do Sul fabricavam sapatos a partir de látex retirados de árvores. O tipo de árvore, conhecida como *hevea brasiliensis*, produz o material conhecido como látex de borracha natural (NRL – Natural Rubber Latex).

“Há muitos tipos de látex no mercado, mas aproximadamente 5% deles podem ser utilizados convenientemente com aglomerantes hidráulicos. Os outros 95% poderão coagular quando combinados com cimento” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995). A Figura 3.1 apresenta uma lista que contém os

vários tipos de látex que foram ou são utilizados com aglomerantes hidráulicos. Os tipos em destaque são os mais utilizados atualmente.

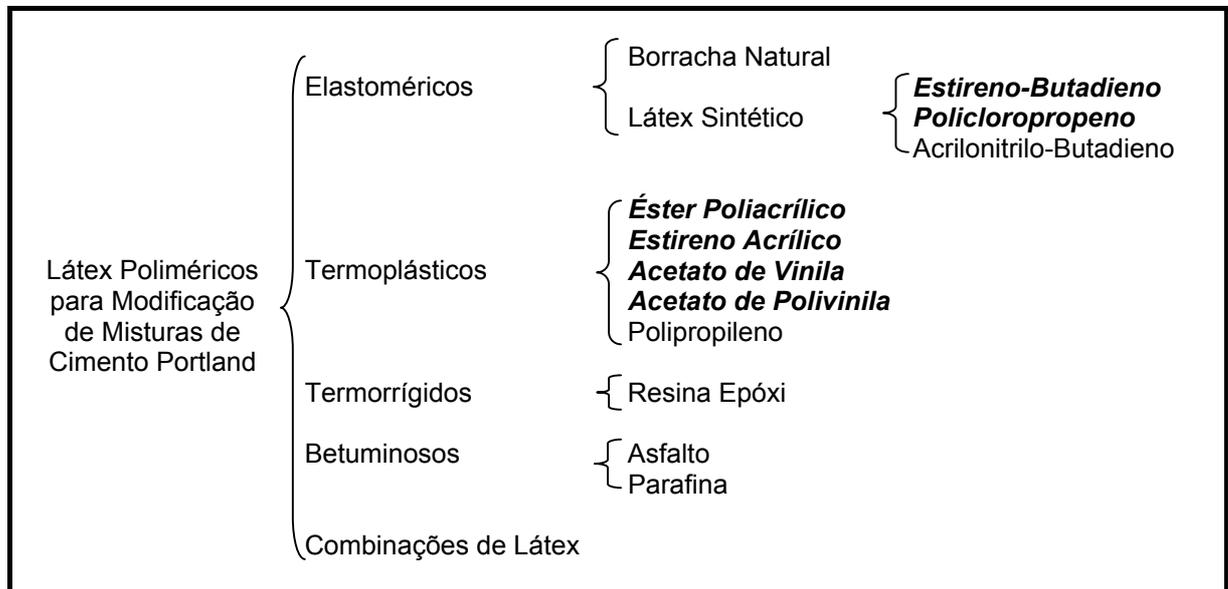


Figura 3.1 – Principais látex utilizados com aglomerantes hidráulicos
(FONTE: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995)

Combinações de Látex é a combinação dos diferentes tipos apresentados, como por exemplo, um látex elastomérico com um termoplástico. Contudo, sua utilização prática é limitada.

Com raras exceções, os látex normalmente utilizados com aglomerantes hidráulicos são produzidos por um processo conhecido como polimerização de emulsão. O processo básico envolve a mistura do monômero com água, *surfactantes* (estabilizadores) e *catalisadores*.

“A mistura é colocada num reator sob agitação. Pelo controle da temperatura e quantidade de catalisador, a reação normalmente é levada até a conversão de 90% a 99% do monômero em polímero. O látex resultante pode ser concentrado ou diluído (TEZUKA, 1988). Adiciona-se outros ingredientes durante o processo de polimerização por razões tais como controle do pH, tamanho das partículas e peso molecular. Contudo, “nem todos os látex são produzidos por polimerização em emulsão. Para estes produtos, o polímero é formado por outro processo de

polimerização, e é então disperso em água através de surfactantes” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

“Os látex podem ser divididos em três classes, de acordo com a carga elétrica das partículas, que é determinada devido ao tipo de surfactante usado na dispersão. Os três tipos são: catiônicos (ou positivamente carregados), aniônicos (ou negativamente carregados) ou não-iônicos (sem carga elétrica)” (WALTERS, 1987). “Normalmente, látex que utilizam surfactantes catiônicos ou aniônicos não são adequados para o uso conjunto com aglomerantes hidráulicos porque lhes falta adequada estabilização. A maioria dos látex utilizados com cimento Portland é estabilizada com surfactantes não-iônicos” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

Pode-se ainda adicionar aos látex alguns tipos de *conservantes* após a polimerização para proteção contra contaminação bacteriológica. Também, *agentes antiespumantes* são utilizados para reduzir a incorporação de ar durante a mistura.

3.2.4.1 *Influência da Composição dos Polímeros*

A composição do polímero tem maior efeito nas propriedades dos concretos endurecidos, mas também tem efeitos consideráveis nas propriedades do concreto fresco.

As variações nas propriedades do concreto ou argamassas endurecidos podem ser sensíveis, dependendo da composição e do tipo do polímero. Polímeros de mesmo tipo, mas com diferentes pesos moleculares ou diferentes adições, podem propiciar resultados bastante diferentes quando utilizados para modificação de concretos e argamassas de cimento Portland.

Segundo AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995), os polímeros utilizados para modificar misturas de aglomerantes hidráulicos aumentam a aderência a substratos diversos. No entanto, esta aderência pode ser ainda aumentada se utilizados monômeros que contenham grupos reativos tais como ácidos carboxílicos não-saturados. Estes monômeros tornam-se parte do polímero e os grupos reativos têm potencial químico de reagir com componentes da mistura ou com grupos químicos da superfície na qual está sendo aplicado o concreto. Há ainda grupos reativos que têm potencial de acelerar ou retardar a hidratação do cimento.

3.2.4.2 *Influência dos Surfactantes*

“Os surfactantes (também conhecidos como estabilizadores) são componentes químicos adicionados durante a fabricação dos látex que se anexam às partículas do polímero. Fazendo isto, eles afetam as interações entre as partículas e entre estas e as partículas do material misturadas ao látex” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

O maior efeito dos surfactantes reflete-se na trabalhabilidade da mistura, aumentando-a consideravelmente, sendo colaborante na redução da relação água/cimento (a/c) em concretos e argamassas modificados com látex.

3.2.4.3 *Influência dos Ingredientes Complementares*

“Os ingredientes complementares são aqueles materiais adicionados após a finalização da polimerização. Sua função é melhorar propriedades do produto, tais como resistência aos ataques de agentes químicos e físicos. Os ingredientes complementares mais comuns são os bactericidas, que protegem o polímero e surfactantes do ataque de bactérias. Antioxidantes e protetores ultravioletas são adicionados para promover proteção contra intempéries e luminosidade. Também surfactantes podem ser adicionados para aumentar a trabalhabilidade, promover proteção contra a ação de gelo-degelo, e reduzir o fator água/cimento. O nível de adição desses materiais é relativamente baixo, variando de partes por milhão para os bactericidas a porcentagens para os surfactantes. Outros ingredientes que podem ser adicionados são agentes antiespumantes. Se os látex não contiverem estes ingredientes, eles devem ser adicionados antes do uso para evitar elevados níveis de ar incorporado ao concreto ou argamassa” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

Os valores da Tabela 3.1 indicam as proporções em que normalmente são utilizados cada componente na fabricação de um polímero qualquer. Para melhor compreensão, poder-se-ia, por exemplo, adotar o seguinte “traço” para uma determinada quantidade de polimerização em emulsão: 100,0g de monômeros, 5,0g de surfactantes, 1,0g de catalisador e 80,0g de água.

Tabela 3.1 – Composições típicas para polimerização em emulsão

Item	Quantidades
Monômeros	100,0
Surfactantes (Estabilizadores)	1,0 – 10,0
Catalisadores (Iniciadores)	0,1 – 2,0
Água	80,0 – 150,0
Outros Ingredientes	0 – 10,0

3.2.5 TESTES PADRONIZADOS PARA LÁTEX

A publicação **State-of-the-Art Report Polymer-Modified Concrete** do ACI (American Concrete Institute) define alguns tipos de ensaios a que devem ser submetidos os látex e polímeros. Os procedimentos de teste abaixo apresentados para medição da dispersão e do polímero são freqüentemente utilizados para controle de qualidade. As propriedades podem também ser utilizadas para avaliar a adequação dos látex a usos específicos. Os ensaios estão apresentados abaixo conforme a referida publicação.

3.2.5.1 Teor de Sólidos

Teor de sólidos é a quantidade de polímero presente no látex, juntamente com outros ingredientes que não são voláteis à temperatura do teste. O teor de sólidos é o fator preponderante no custo do produto. É determinado pesando-se uma pequena amostra representativa de látex, secando-a sob condições específicas e pesando-se o resíduo. O resíduo é expresso como uma porcentagem do peso original. Existem vários métodos normalizados de ensaios. No entanto, pode-se obter valores diferentes, para os diferentes métodos de ensaio. A norma ASTM que regulariza este ensaio é a ASTM D 1076. As diferenças principais entre os métodos estão na temperatura e no tempo de secagem.

3.2.5.2 pH

O valor do pH de um material é medido através da concentração de íons hidrogênio e indica se o material é ácido ou básico. Os valores do pH variam de 1 (altamente ácido) à 14 (altamente básico). O valor 7 indica o neutro. A escala é

logarítmica, portanto a variação de uma unidade no pH representa um aumento de 10 vezes na concentração ácida ou alcalina. Este ensaio é normalizado pela ASTM D 1417.

3.2.5.3 Coagulação

Coagulação é a quantidade de polímero que é retida após a passagem de uma quantidade determinada de látex por uma determinada malha de peneira. Os tamanhos das malhas da peneira normalmente utilizados são número 100, 200 e 325. O teste é uma medida da quantidade do polímero que tem partículas maiores que as desejadas, normalmente formada por aglomeração das partículas ou formação de filmes.

3.2.5.4 Viscosidade

Viscosidade é a resistência interna ao escoamento apresentada por um fluido. Há diversas maneiras de se determinar a viscosidade, e esta pode variar de teste para teste. O método adotado para látex utiliza o *viscômetro* desenvolvido por Brookfield (ASTM D 1417). No entanto, a temperatura na qual ocorre o ensaio pode ter efeitos significativos nos resultados.

O estireno-butadieno e os látex acrílicos utilizados com cimentos hidráulicos são muito fluidos, apresentando viscosidade menores que 100cps. Como referência, a viscosidade do leite é de 100cps.

3.2.5.5 Estabilidade

A estabilidade é uma medida de resistência a mudanças, quando sujeito a choques, que podem ser basicamente de três tipos: mecânicos, químicos e térmicos.

- A *estabilidade mecânica* é determinada submetendo-se o látex à movimentação, normalmente agitação sob alta velocidade por um determinado tempo e depois medindo-se a quantidade de coágulo formado. O método padrão é apresentado na ASTM D 1417.
- A *estabilidade química* é avaliada determinando-se a quantidade de um produto químico para causar coagulação completa ou então adicionando-se

uma quantidade deste produto químico e submetendo-se o látex ao ensaio de estabilidade mecânica. O método é descrito na ASTM D 1076.

- A *estabilidade térmica* é determinada submetendo-se o látex a temperaturas específicas por um tempo padrão e depois, verificando-se o efeito deste processo em algumas propriedades do látex.

A Federal Highway Administration (FHWA) estipula um teste de *estabilidade a ciclos de gelo-degelo*, no qual é determinada a quantidade de coágulo formada após submeter-se o látex a dois ciclos de gelo-degelo.

Estas propriedades de estabilidade são muito importantes para látex utilizados com aglomerantes hidráulicos. A estabilidade mecânica é necessária porque os látex são normalmente submetidos a agitação em bombas de dosagem e movimentação. A estabilidade química é necessária devido à natureza química dos aglomerantes hidráulicos. A estabilidade térmica é necessária devido à possibilidade dos látex serem submetidos às mais diferentes variações de temperatura.

3.2.5.6 *Peso por Galão*

O peso por galão é uma medida de densidade do látex, e é determinado pesando-se um volume específico de látex sob condições-padrão (normalmente, 83,3ml à 25°C. O peso deste volume, em gramas, dividido por 10, é o peso em libras por galão). Este é um parâmetro importante porque, paralelamente ao teor de sólidos, indica a quantidade de sólidos do látex. Por exemplo, um galão do látex estireno-butadieno normalmente não contém a mesma quantidade de polímeros que um galão de látex Acrílico. O peso por galão do látex estireno-butadieno é de aproximadamente 8,45 libras, enquanto o de Acrílico é de 8,90 libras. Se ambos os látex têm 47% de sólido em massa, o látex estireno-butadieno contém aproximadamente 3,97 libras de polímero por galão, enquanto um galão de látex Acrílico contém 4,18 libras.

3.2.5.7 *Tamanho da Partícula*

O tamanho da partícula é uma medida do tamanho do polímero disperso em água. Normalmente, varia de 50 a 5000nm. Há muitos métodos de se determinar o tamanho das partículas, e provavelmente, cada método fornecerá um tamanho

diferente. Os métodos requerem o uso de equipamentos como microscópio eletrônico, centrífugas e foto-espectrômetros.

O tamanho das partículas depende dos níveis de dosagem e tipos de surfactantes.

3.2.5.8 Tensão Superficial

A tensão superficial é relacionada com a “habilidade” do látex em molhar ou não uma superfície, e é determinada utilizando-se um tensômetro. A FHWA estipula procedimentos adequados para o ensaio. Quanto menor o valor da tensão superficial, maior a capacidade do látex de molhar. Esta propriedade afeta a trabalhabilidade da mistura modificada com látex, e depende amplamente dos níveis de dosagem e tipo dos surfactantes.

3.2.5.9 Temperatura Mínima de Formação de Filme (TMFF)

A TMFF é definida como a menor temperatura na qual as partículas de polímero do látex apresentam mobilidade e flexibilidade suficientes para coalescer em um filme contínuo. Este fenômeno é controlado pelo tipo e quantidade de monômeros utilizados para fazer o polímero, e pode ser reduzido pela adição de plastificantes.

Geralmente, para o sucesso da utilização de mistura de cimento Portland modificado com látex, a TMFF deve ser menor que a temperatura de aplicação. Contudo, em alguns casos, resultados satisfatórios têm sido obtidos em misturas de cimentos modificados com látex abaixo da TMFF dos látex. Acredita-se que o cimento reduza o efeito da TMFF do látex.

3.3 FORMAS DE UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS EM CONCRETO

Os concretos com adição de polímeros podem ser divididos em três categorias quanto a forma de utilização, descritas abaixo:

3.3.1 CONCRETO POLÍMERO (CP) OU CONCRETO DE RESINA

Neste tipo de concreto não há presença de outro aglomerante a não ser o próprio polímero que é misturado aos agregados.

“Concreto Resina (ou de resina) é definido pelo *American Concrete Institute* – ACI, como compósito constituído de uma matriz de polímero e *filler*, preparado através da mistura completa da matriz polimerizável (monômero ou resina) e agregados (grãos e miúdos), seguida de polimerização *in situ*. O concreto de resina não contém cimento Portland como aglomerante, mas este pode ser utilizado como agregado ou *filler*. Difere da mesma forma do concreto impregnado com polímero e do concreto de cimento Portland e polímero (ou concreto modificado com látex) pois apenas o polímero orgânico é utilizado como aglomerante no compósito” (SILVA, 1996).

Existe, para a otimização da quantidade de polímero adicionada, a necessidade de faixas granulométricas específicas de agregados grãos e miúdos, além da necessidade de utilizá-los muito secos, pois a umidade dos agregados pode causar alterações danosas às propriedades do concreto.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), “devido à boa resistência química e à alta resistência inicial e módulo de elasticidade, o Concreto Polímero tem sido usado industrialmente, sobretudo em revestimentos e trabalhos de reparos. Características térmicas e de fluência do material normalmente não são favoráveis à aplicação de Concreto Polímero em estruturas”. Contudo, as propriedades finais dos concretos polímeros dependem da quantidade e do tipo do polímero utilizado.

“Os concretos e argamassas de resina são uma alternativa aos concretos e argamassas de cimento Portland convencionais, e as principais aplicações destes materiais são: reparos e reabilitações de concreto convencional, pavimentação de auto-estradas, obras em regiões de atmosfera marinha, obras e peças industriais (ou em ambientes agressivos) e produção de elementos pré-moldados. Uma das vantagens dos pré-moldados com concreto de resina é o curto tempo de endurecimento das peças, podendo chegar a 40 segundos após a moldagem, dependendo do monômero” (SILVA *apud* ROSSIGNOLO, 1999).

3.3.2 CONCRETO IMPREGNADO COM POLÍMERO (CIP)

Para a realização da impregnação de polímero no concreto é necessário selecionar um líquido de baixa viscosidade, além de secar e evacuar o concreto antes de submetê-lo à impregnação.

A impregnação propriamente dita consiste em forçar a entrada do líquido polimérico no concreto endurecido, contendo o mínimo de água possível em seus poros e capilares de modo que o polímero vá preencher os vazios do concreto, aumentando sua resistência e principalmente sua durabilidade através da diminuição da absorção e permeabilidade. A retração e a fluência são insignificantes neste tipo de concreto. Apresenta também como características marcantes, excelente resistência à abrasão, à ação de gelo e degelo, e ao ataque por soluções químicas fortes.

Abaixo está apresentada a seqüência de operações para fabricação de CIP em fábrica de pré-moldados:

- *Moldagem dos elementos com concreto convencional*: é feita sem cuidados especiais de seleção de materiais e dosagem. Contudo, a espessura dos elementos é limitada a 150mm devido às limitações da impregnação.
- *Cura dos elementos*: cura convencional à temperatura ambiente.
- *Secagem e evacuação da água*: o tempo e temperatura necessários dependem da espessura de cada elemento.
- *Imersão do concreto seco no monômero*: devido ao complexo sistema de vazios no concreto endurecido, é difícil se obter uma penetração completa. Quando isto for necessário, deve-se impregnar o monômero sob pressão.
- *Vedação do monômero*: os elementos, depois de impregnados, devem ser selados em recipientes de aço para prevenir a perda do monômero por evaporação.
- *Polimerização do monômero*: Após a impregnação, o monômero deve ser polimerizado no local, o que pode ser feito, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994) de três modos:
 1. Combinação de endurecedores químicos e catalisadores em temperatura ambiente;
 2. Radiação gama;

3. Mistura monômero-catalizador para impregnação e polimerização através de aquecimento do concreto com vapor, água quente ou aquecedores infravermelhos.

3.3.3 CONCRETO MODIFICADO COM LÁTEX (CML)

Dentre as formas de emprego de polímeros no concreto, pode-se dizer que o Concreto Modificado com Látex (CML), ou Concreto de Cimento e Polímero (PPCC) apresenta uma grande vantagem em relação às demais formas de empregos de polímeros em concreto: não necessita de mudanças significativas em seu processo de produção, que consiste em adicionar o látex (solução contendo polímeros) juntamente com parte da água de amassamento, durante a mistura.

O CML geralmente não apresenta melhoras significativas na resistência à compressão, mas sim na resistência à tração, flexão e abrasão, na absorção, na permeabilidade, na aderência e na penetração de agentes agressivos.

Após esta breve introdução, será focado o principal objeto deste trabalho, que é o Concreto Modificado com Látex.

3.4 CONCRETO MODIFICADO COM LÁTEX

3.4.1 HISTÓRICO

“O conceito de concreto de cimento e polímero teve seu início em 1923, quando a primeira patente do processo foi efetuada por L. Cresson, e se referia à utilização de borracha natural no concreto aplicado a calçamentos. A primeira publicação com intenção de produção de concreto com cimento e polímero foi a patente de Lebefure, onde também se usava a borracha natural através de um método racional de mistura, o que é relevante do ponto de vista histórico, haja vista que em 1925 uma idéia similar foi patenteada por S. M. Kirkpatrick” (STORTE, 1991). “A utilização de látex de borracha sintética para modificar concretos de cimento Portland foi sugerida, pela primeira vez, em 1932” (TEZUKA, 1988).

“Nos Estados Unidos, os estudos sobre concreto de cimento e polímero foram iniciados em 1952, e a primeira aplicação prática foi na restauração do tabuleiro de concreto da ponte Cheyboygan, Michigan, em 1959, e que ainda hoje apresenta boas condições de utilização” (TEZUKA, 1988).

O desenvolvimento do látex sintético estireno-butadieno como adição ao cimento Portland começou nos Estados Unidos na década de 50. As primeiras aplicações foram em rebocos e lajes. Em 1956, iniciaram-se as aplicações como revestimentos de pontes. O aumento da utilização de sais de degelo e o reconhecimento de seus efeitos desastrosos paralelamente à evolução da modificação de argamassas para concreto tornaram o concreto modificado com látex estireno-butadieno o sistema mais utilizado de proteção para pontes nos Estados Unidos. Estima-se que mais de 8000 pontes já tenham sido protegidas com este sistema.

“Nos anos 60, houve um grande incremento nas aplicações de concretos e argamassas de cimento e polímero utilizando-se o látex estireno-butadieno, o Éster Poliacrílico e os Ésteres Polivinílicos e, desde esta data, as pesquisas e o desenvolvimento de concretos de cimento e polímero têm tido considerável avanço nos Estados Unidos, Japão e Inglaterra” (STORTE, 1991).

“Em 1974, foram iniciados os trabalhos de normalização e em 1978 foram estabelecidos pela *Japan Industrial Standards (JIS)* cinco métodos de ensaios de argamassas e concretos de cimento e polímero. Este tipo de concreto foi utilizado em lajes expostas e em revestimentos em geral. Atualmente são usados em pavimentos e como material impermeabilizante, adesivo e anti-corrosivo. Estudos recentes sugerem a possibilidade de se obter concreto de cimento e polímero dúctil, capaz de absorver grandes energias e, portanto, de construir paredes resistentes ao cisalhamento sob ação de esforços de origem sísmica” (TEZUKA, 1988).

“Concretos e argamassas modificados com látex estireno-butadieno podem ser utilizados para diversos fins, nos quais diferentes propriedades são requeridas. Na maioria destas aplicações, a aderência a substratos e a impermeabilização são as necessidades mais comuns. Em aplicações externas, a resistência aos ciclos de gelo-degelo é muito importante” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

3.4.2 GENERALIDADES

O Concreto Modificado com Látex (CML), conforme sucintamente apresentado anteriormente, é definido como uma combinação de cimento Portland e agregados, combinados com polímeros no instante da mistura. A nomenclatura utilizada refere-se ao uso de polímeros tanto em argamassas quanto em concretos. A

dispersão de polímeros é adicionada ao concreto com a intenção se alterar, *especificamente*, algumas de suas propriedades, conforme será apresentado adiante.

O látex é uma suspensão coloidal de polímero em água, que pode ser adicionado normalmente durante a mistura dos materiais, sem a necessidade da introdução de novas tecnologias para sua utilização. Além disso, **a polimerização no CML ocorre naturalmente por secagem ou perda de água.**

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), um látex contém geralmente cerca de 50% em peso de partículas esféricas muito pequenas de polímeros mantidas em suspensão na água por agentes tenso-ativos, que tendem a incorporar grandes quantidades de ar no concreto. Conseqüentemente é necessário adicionar agentes desincorporadores de ar ao látex.

“A pasta de cimento endurecida é predominantemente uma estrutura aglomerada de Silicatos de Cálcio, Aluminatos e Hidróxidos mantidos juntos por forças de *Van der Waals* relativamente fracas. Conseqüentemente, microfissuras são induzidas na pasta devido às solicitações causadas pela evaporação em excesso de água (retração por secagem). A modificação com látex ajuda de duas formas: **as partículas do látex não somente reduzem a quantidade da movimentação de água através do bloqueio dos capilares, mas também quando há fissuração, o filme de látex polimérico tampa estes canais e restringe sua propagação** (Figura 3.2). Isto resulta no incremento de resistência à flexão. A restrição da movimentação de fluidos naturalmente ocorre nos dois sentidos, e reduz também a entrada de fluidos, aumentando a proteção a ataques de agentes químicos e resistência ao congelamento” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

Ainda segundo o AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995), o ponto ótimo de modificação com polímero situa-se entre 5% e 10% do teor de sólidos por peso de cimento. Percentagens menores não propiciam mudanças significativas nas propriedades dos concretos e argamassas modificados. Além disso, não trarão os benefícios da redução significativa da quantidade de água de amassamento, visto que os látex possuem propriedades plastificantes no concreto fresco. O uso de sólidos em excesso torna-se inviável economicamente e pode causar elevada incorporação de ar ou um comportamento de polímero

preenchido com agregados e cimento, no qual o cimento entra como *filler*, ocorrendo descaracterização do processo de modificação.

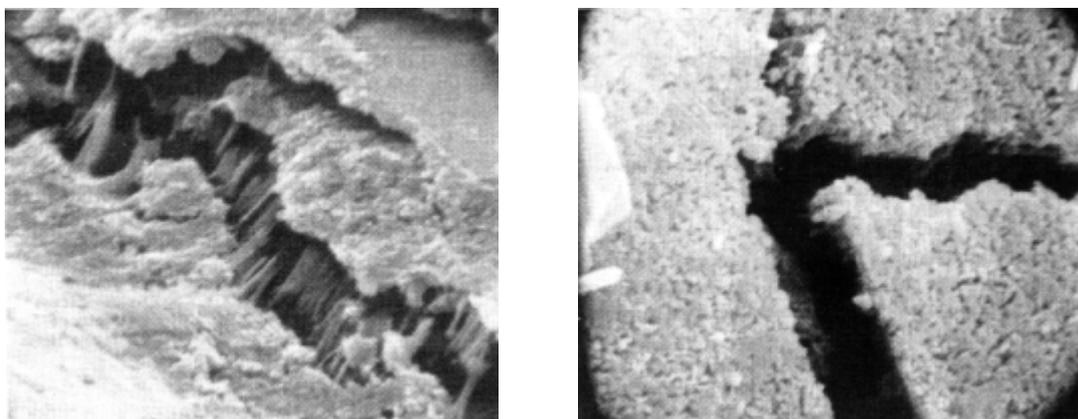


Figura 3.2 – Microfotografia eletrônica de concreto modificado com látex e concreto convencional

(FONTE: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995)

Alguns trabalhos analisaram a influência da modificação com látex no desenvolvimento da superfície das pastas. Estes trabalhos indicam que embora a modificação com látex possa acelerar ou retardar o tempo de pega, não há prejuízo algum na taxa de hidratação do cimento. A estrutura de poros dos sistemas modificados com látex é influenciada pelo tipo de látex e pela relação látex/cimento utilizada. De acordo com OHAMA & DEMURA (1991), e KUHLMANN (1987), a porosidade e o volume dos poros de argamassas modificadas com látex diferem das não modificadas principalmente porque sua matriz apresenta pequena quantidade de poros com 200 nm de raio, mas quantidades significativamente maiores de poros com raio de 25nm ou menos. A porosidade total ou volume de poros diminui com o aumento da taxa de polímero adicionada. Isto pode contribuir para o aumento de impermeabilização dos concretos ou argamassas, na resistência à carbonatação e resistência à ciclos de gelo-degelo.

3.4.3 PRINCÍPIO DE MODIFICAÇÃO DO LÁTEX

O princípio de modificação do látex, quando adicionado aos concretos e argamassas, é ainda bastante obscuro. Existem alguns modelos empíricos que tentam

explicar tal fenômeno, e dentre eles, o mais comumente aceito é aquele proposto por Ohama.

A modificação dos concretos e argamassas de cimento Portland é governada por dois processos: a hidratação do cimento e a coalescência do látex (polimerização).

Segundo ROSSIGNOLO (1999), a modificação dos concretos e argamassas é consequência da hidratação do cimento e da coalescência das partículas de polímero, formando um filme contínuo de polímero. A hidratação do cimento geralmente precede o processo de formação do filme de polímero.

“Geralmente, a hidratação do cimento ocorre primeiro e como as partículas hidratadas de cimento se estabilizam e a mistura endurece, as partículas do látex concentram-se nos espaços vazios” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

Segundo WALTERS (1988), o látex e o cimento formam uma co-matriz que une os agregados. Esta co-matriz apresenta maior eficiência no preenchimento de microfissuras, em relação às misturas sem polímeros, resultando na maior resistência à percolação de fluidos no concreto e em melhores propriedades de resistência mecânica. Da mesma forma que a matriz de látex e cimento aumenta a aderência entre os agregados na mistura, ela também aumenta a aderência entre a mistura e demais substratos. “A estrutura das argamassas e concretos modificados com látex é tal que os microporos e cavidades normalmente presentes em matrizes de cimento Portland convencionais são parcial ou totalmente preenchidas com filmes poliméricos que se formam durante a cura” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

Segundo OHAMA (1987), ocorrem três etapas principais durante o processo de modificação, e estão apresentadas nas etapas abaixo descritas. A Figura 3.3 apresenta o modelo de formação do filme, e a Figura 3.4 apresenta o modelo de modificação do látex, ambos propostos por OHAMA (1987).

Primeira Etapa: “Quando o látex é misturado ao concreto ou argamassa de cimento Portland, suas partículas são dispersas uniformemente na pasta de cimento. Na pasta de cimento e polímero, o gel de cimento é gradualmente formado pela hidratação do cimento e a parte líquida é saturada com hidróxido de cálcio formado durante a

hidratação, enquanto as partículas de polímero depositam-se parcialmente na superfície do gel já formado e das partículas ainda não hidratados de cimento” (OHAMA, 1987).

Segunda Etapa: Com o desenvolvimento da estrutura do gel, as partículas de polímero são gradualmente confinadas nos poros capilares. Então, as partículas do polímero formam uma camada contínua que envolve o gel de cimento e as partículas de cimento não hidratadas e, simultaneamente, adere às camadas de silicatos formadas nas superfícies dos agregados. Os macroporos existentes são preenchidos pelas partículas de polímero.

Terceira Etapa: Com a contínua remoção de água devido à hidratação do cimento, evaporação ou ambos, as partículas do látex coalescem em filmes ou membranas, os quais entrelaçam (envolvem) o cimento hidratado (uma vez que o látex coalesce por perda de água), formando uma co-matriz que reveste os agregados e aloja-se nos vazios intersticiais.

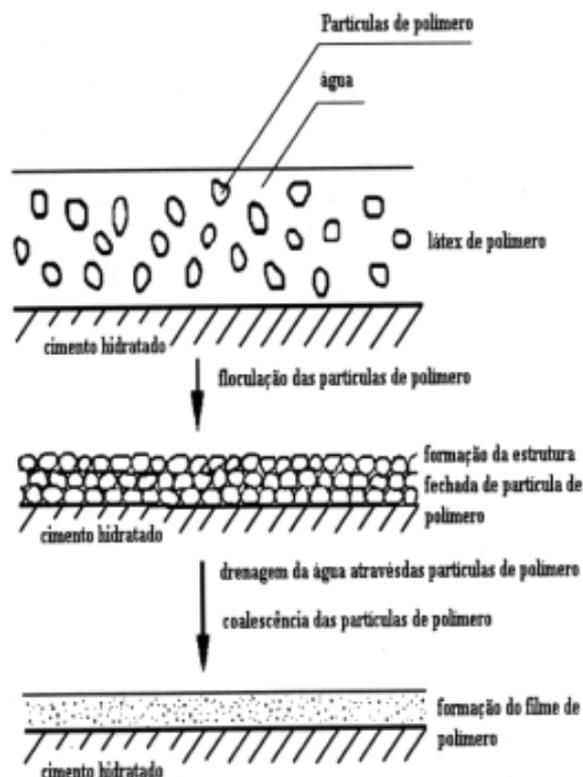


Figura 3.3 – Modelo de formação de filme de polímero
(FONTE: ROSSIGNOLO, 1999)

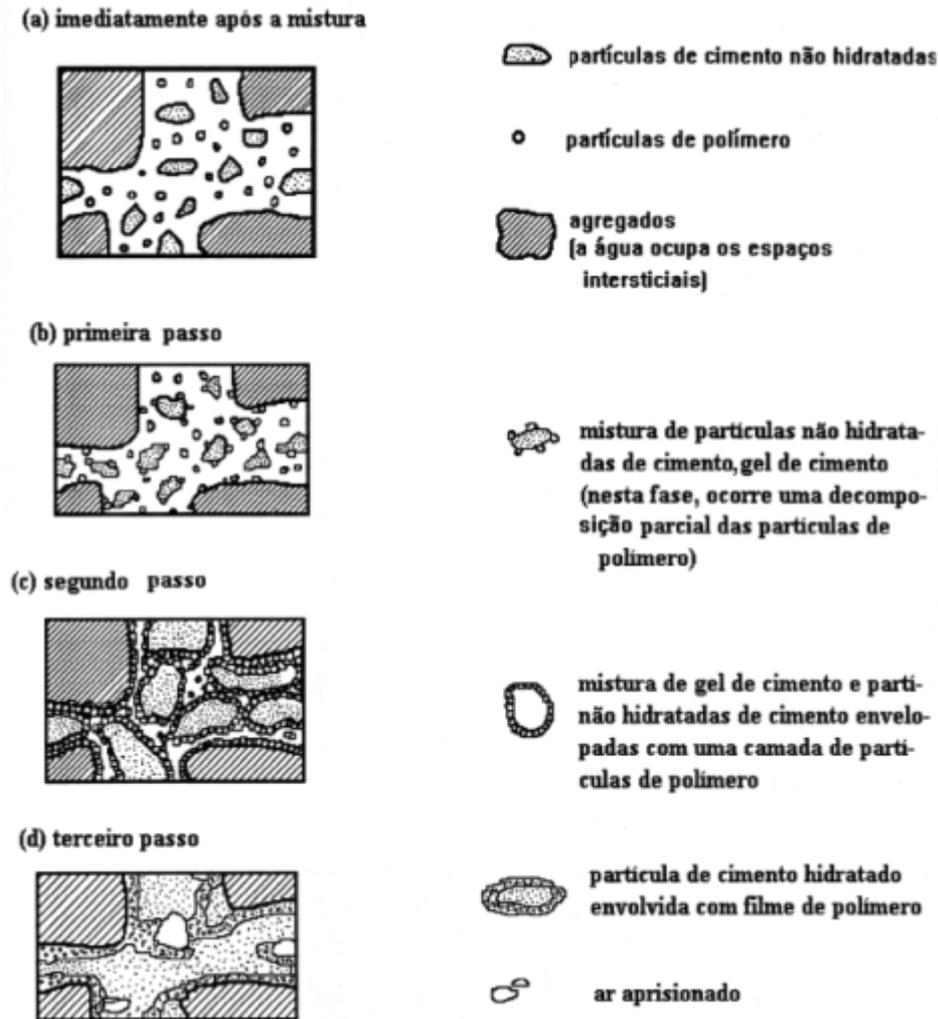


Figura 3.4 - Modelo de modificação
(FONTE: ROSSIGNOLO, 1999)

Segundo AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995), durante os estágios iniciais os concretos e argamassas modificados com látex são mais susceptíveis à fissuração por retração plástica do que concretos e argamassas não modificados. Este fenômeno é causado pela evaporação de água na superfície do elemento. Cuidados devem ser tomados para restringir esta evaporação superficial através da utilização de sistemas de cobertura (por exemplo, proteção da superfície exposta).

3.4.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS MODIFICADOS COM LÁTEX ESTIRENO-BUTADIENO

Com relação às propriedades dos concretos e argamassas modificados com látex, seguem as principais, físicas e mecânicas, no estado fresco e endurecido.

3.4.4.1 *Consistência/Trabalhabilidade*

Concretos e argamassas modificados com látex, inclusive com o látex estireno-butadieno, em geral, apresentam aumento da trabalhabilidade com relação a concretos e argamassas não modificados. Isto se deve ao efeito dispersante dos componentes do látex combinados a água. As partículas do polímero agem como plastificantes, aumentando consideravelmente a trabalhabilidade das misturas para uma mesma relação água/cimento. Desta forma, promove os benefícios dos plastificantes:

- Aumento da trabalhabilidade para uma mesma relação água/cimento, conforme dito anteriormente; e
- Diminuição da quantidade de água de amassamento, para o mesmo abatimento, em relação à mistura de referência, o que, conseqüentemente, aumenta a resistência mecânica do concreto.

3.4.4.2 *Teor de Ar Incorporado*

Visto que o teor de ar incorporado causa diminuição nas propriedades de resistência mecânica, deve ser controlado. Por este motivo, são adicionados aos látex agentes antiespumantes. “Os látex já estão sendo comercializados com estes agentes e, como conseqüência, o teor de ar incorporado nos concretos de cimento e polímero é da ordem de 2%, quase a mesma proporção de um concreto convencional” (STORTE, 1991). Para os látex do polímero estireno-butadieno, os agentes antiespumantes são feitos à base de silicone e são adicionados pelos fornecedores do látex.

3.4.4.3 *Tempo de Pega*

Tem-se observado que o tempo de pega em concretos e argamassas modificados com polímeros é praticamente o mesmo ou levemente maior que o dos concretos convencionais.

Segundo o AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995), há, no entanto, uma restrição quanto ao tempo de aplicação dos concretos modificados com látex, que não é relacionada com o tempo de pega. Como se sabe, o tempo de pega é função da hidratação do cimento e a mencionada restrição quanto ao tempo de aplicação ocorre pela secagem da superfície, quando o látex começa a formar filmes (coalescer), o que ocorre em poucos minutos. “Se a superfície de uma mistura com látex torna-se muito seca, ocorre a formação de uma membrana ou pele (coalescência do polímero). O tempo para formação destas membranas depende das condições de secagem, isto é, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento. Geralmente, o tempo disponível para trabalhar com material é de quinze a trinta minutos após mistura e exposição ao ambiente” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

3.4.4.4 *Resistência à Compressão*

Praticamente não ocorrem alterações significativas na resistência à compressão nos concretos modificados com látex estireno-butadieno. Na verdade, ganhos significativos podem ocorrer por causa da redução da água de amassamento, em virtude das propriedades plastificantes dos látex, conforme apresentado no item 3.4.4.1 – *Consistência/Trabalhabilidade*.

Segundo STORTE (1991), no entanto, a resistência à compressão é muito influenciada pelo teor de sólidos e pelo tipo de látex utilizado, bem como pela quantidade de monômeros que formam o polímero.

Resultados de pesquisas realizadas por KUHLMANN (1987) não indicaram alterações significativas na resistência à compressão em concretos modificados com látex. Já AFRID *et al.* (1994) obteve ganhos de resistência à compressão de 30 a 40% em relação ao concreto de referência, em adições em massa de látex estireno-butadieno variando de 5% a 20% sobre a massa de cimento, principalmente devido à redução do fator a/c da mistura.

3.4.4.5 Resistência à Tração

A resistência à tração, quer na flexão, quer na compressão diametral, apresenta melhoras significativas em seus valores.

AFRID *et al.* (1995) afirma que os concretos modificados com látex estireno-butadieno têm sua resistência mecânica melhorada sobremaneira, principalmente no que se refere à tração. Em suas pesquisas, obteve ganhos de até 100% nesta característica. O mesmo é observado por KUHLMANN (1987), que afirma que as modificações promovidas pela adição do látex geram concretos com maior resistência à flexão e tração.

FOLIC & RADONJANIN (1998) obtiveram ganhos de 40% no valor da resistência à tração na flexão em relação ao concreto de referência, para uma adição de 7,5% do teor de sólidos/cimento de estireno-butadieno. Segundo os mesmos, a resistência a tração depende fundamentalmente da aderência entre os agregados e a matriz de cimento, e a adição do polímero pode ajudar das seguintes formas:

1. Aumentando esta aderência; e
2. Protelando a microfissuração inicial devido ao menor módulo de elasticidade.

3.4.4.6 Módulo de Elasticidade

As modificações promovidas pela adição do látex geram concretos com menor módulo de elasticidade (KUHLMANN, 1987). RAY *et al.* (1994) obteve a mesma conclusão de suas pesquisas.

STORTE (1991) obteve módulo de elasticidade estático com 90% do módulo do concreto de referência para traços com $D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$, relação teor de sólidos/cimento = 5% e consumo de cimento de 320kg/m^3 , e 80% do módulo do concreto de referência para traços com $D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$, relação teor de sólidos/cimento = 10% e consumo de cimento de 320kg/m^3 .

3.4.4.7 Retração por Secagem

“A retração não aumenta com a adição de látex. Contudo, as argamassas e concretos modificados com látex são mais susceptíveis à retração inicial quando não submetidos a processos eficazes de cura” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE 1995).

OHAMA (1987) demonstrou em suas pesquisas que a adição de látex ao concreto não aumenta o valor de sua retração final. Nesta pesquisa, três porcentagens de látex estireno-butadieno foram utilizadas em corpos de prova de concreto de três diferentes tamanhos. O abatimento foi mantido constante através do ajuste do fator a/c. A medida da retração após vários dias de cura demonstrou que a retração é governada pela quantidade de água, e não aumenta com a adição de látex.

3.4.4.8 Permeabilidade/Absorção

“A estrutura dos concretos modificados com látex é tal que os microporos e vazios encontrados no concreto convencional estão parcialmente preenchidos com o filme de polímero que se forma durante o período de cura. Este filme é responsável pela redução da permeabilidade e absorção de água. Esta propriedade tem sido exaustivamente estudada em vários tipos de ensaios, tais como absorção de água, resistência à carbonatação e permeabilidade à cloretos” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

KUHLMANN (1987) percebeu esta mesma característica em suas pesquisas e afirma que as modificações promovidas pela adição do látex reduzem sobremaneira as características de permeabilidade em comparação a concretos convencionais com mesmas características.

3.4.4.9 Aderência à Superfícies

As propriedades de aderência dos concretos modificados com látex estireno-butadieno têm sido estudadas por muitos anos em aplicações como rebocos, estruturas mistas de aço e concreto e revestimentos em lajes de pontes. “A tensão de aderência dos concretos modificados com látex tem sido mediada por um ensaio de compressão diametral, utilizando metades de cilindros de concreto convencional como substrato. Estas metades são obtidas rompendo-se corpos de prova cilíndricos de 15 x 30 cm por compressão diametral. As amostras são então preparadas colocando estas metades em um molde e preenchendo a outra metade com o concreto modificado. Traços de concreto modificado com relação teor de sólidos/cimento de 0,15, curados por 28 dias, romperam nos agregados, com uma tensão média de 3,60 MPa” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

Um ensaio de tensão de corte (cisalhamento) em concretos modificados com látex estireno-butadieno tem sido realizado nos EUA com a utilização de uma guilhotina preparada para cortar uma capa de concreto modificado de um cilindro de concreto convencional. Em laboratório, os resultados indicam tensões de 1,77MPa com 7 dias de cura e 3,23MPa aos 28 dias. O concreto modificado com látex foi preparado com relação teor de sólidos/cimento = 0,15 e curado por um dia com umidade relativa de 100% e o restante com umidade relativa de 50% e temperatura de 22°C.

3.4.4.10 Aderência à Armadura

A aderência entre o concreto e armadura, em ensaio realizado segundo o procedimento da Norma ASTM C234-86 por FOLIC & RADONJANIN (1998), aumenta sobremaneira para concretos modificados com látex estireno-butadieno. Segundo os mesmos, a aderência entre o concreto modificado com látex e a armadura aumenta na proporção direta do aumento da taxa de polímero do traço. Este aumento na tensão de aderência chegou a 154% do valor obtido para os concretos convencionais.

TEZUKA (1988) apresenta resultados bastante generalistas para ensaios de arrancamento de barras de aço inseridas em concretos convencionais e modificados com látex, sendo que os concretos convencionais foram curados em câmara úmida e os concretos modificados tiveram uma cura seca (mantido com umidade de 50%). Os resultados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resistência ao arrancamento de barras

Concreto	Resistência ao arrancamento (MPa)
Sem Látex	21 a 56
Com Látex	119 a 154

3.4.4.11 Resistência à Ciclos de Gelo-Degelo

“A resistência aos ciclos de gelo-degelo tem sido mensurada em laboratório e no campo. Estudos baseados na Norma ASTM C 672 indicam excelentes resultados

quanto a esta propriedade. Conclui-se que a excelente performance dos concretos modificados com látex estireno-butadieno é resultado de sua resistência à penetração de água (baixa permeabilidade). Com pouca ou nenhuma água na matriz de concreto, danos por ação de gelo-degelo não ocorrem” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

3.4.4.12 Resistência à Carbonatação/ Permeabilidade a Cloretos

A resistência à carbonatação dos concretos modificados com látex também foram estudadas e comparadas com a resistência dos concretos de referência. OHAMA *apud* AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995) estudou concretos modificados com látex estireno-butadieno expostos à gás carbônico, e também expostos a soluções com dióxido de carbono. Após a exposição, os corpos-de-prova foram abertos diametralmente e a profundidade de carbonatação, medida com o uso de reagente à base de fenolfetaleína. Os resultado mostraram que a carbonatação é reduzida sobremaneira nos concretos modificados com látex.

A permeabilidade à cloretos dos concretos modificados com látex pode ser medida por vários testes. OHAMA *apud* AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995) conduziu testes onde os cilindros eram submersos em soluções de sais por 28 e 91 dias. A penetração dos cloretos foi medida nos corpos-de-prova rompidos diametralmente, com auxílio de uma solução reagente e se observa a mesma tendência da profundidade de carbonatação. Os baixos valores de permeabilidade e absorção obtidos nos concretos modificados com o látex estireno-butadieno acabam por promover proteção contra absorção e permeabilidade a cloretos.

3.4.5 PROPORÇÕES DE DOSAGEM

A inclusão do látex estireno-butadieno em argamassas e concretos de cimento Portland resulta na diminuição da quantidade de água para uma determinada consistência/abatimento. Componentes do látex funcionam como dispersantes do cimento Portland, aumentando, portanto a fluidez e a trabalhabilidade da mistura sem a necessidade de água adicional. Portanto, a especificação da quantidade de látex afetará as propriedades físicas do sistema endurecido de duas formas:

1. Através da quantidade de látex adicionada;

2. Através da quantidade de água retirada.

Valores usuais de adição de látex giram em torno de relações teor de sólidos/cimento de 0,15. Traços pilotos, naturalmente, são o método apropriado de se avaliar o efeito de cada componente (adição) na mistura.

Cimentos Portland tipos I, II e III (ASTM) são normalmente utilizados em concretos e argamassas modificados com látex.

Consumos mínimos e máximos de cimento não são estabelecidos para o concretos e argamassas modificados com látex. Consumos específicos de cimento têm sido utilizados de acordo com a aplicação dos concretos. Para concretos modificados com látex estireno-butadieno, o consumo gira em torno de 390kg/m^3 . Para aplicações em argamassas, o consumo de cimento varia amplamente com o uso, mas a maioria dos dados analisados indica, no entanto, relações agregado miúdo/cimento de 3/1 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1995).

3.4.6 PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo dos concretos e argamassas, quando da adição de látex à mistura, não sofre modificação alguma, a não ser a introdução de um novo componente, que é o látex em forma líquida. Este é um grande benefício para o processo, visto que a necessidade de modificações em processos/equipamentos poderia comprometer a aplicação prática dos látex.

Muitos autores defendem que a ordem de colocação na betoneira é de extrema importância para a maximização dos benefícios proporcionados pela adição. Segundo suas indicações, a ordem de colocação deve ser a seguinte:

1. Agregado graúdo
2. Parte da água (aproximadamente 60%)
3. Cimento
4. Agregado miúdo
5. Látex diluído no restante da água

Isso se justifica, pois ao se adicionar o látex por último, evita-se que os agregados (já úmidos) o absorvam, visto que isto não é o desejável, e sim que o látex fique disperso na matriz envolvendo o gel de cimento, os poros e os agregados.

Também o tempo de mistura deve ser controlado a fim de diminuir a incorporação de ar ao concreto. Geralmente, há um consenso em torno de um valor inferior a 5 minutos de batimento da mistura em betoneira.

3.4.7 FORMA DE CURA

Segundo GODOY & BARROS (1997), a forma como a cura é executada tem influência direta nas propriedades dos elementos confeccionados com látex: “Normalmente, estes elementos requerem um método de cura diferente devido à adição do polímero. As propriedades quase ótimas dos sistemas modificados são alcançadas por uma combinação de cura úmida e cura seca, isto é, cura úmida por um determinado número de dias, seguida de cura seca à temperatura ambiente”. A resistência ótima é obtida alcançando-se uma quantidade razoável de hidratação do cimento sob condições úmidas nos primeiros estágios, seguido de condições secas, para promover a formação do filme de polímero devido à coalescência do látex (OHAMA, 1987).

A melhor forma de cura para concretos modificados com látex estireno-butadieno é à umidade relativa de 100% nas primeiras 24 a 48 horas, seguidas de cura ao ar (umidade relativa de 50%, se em laboratório). Durante este período de cura ao ar, qualquer excesso de água evapora e permite a formação do filme que irá preencher a estrutura interna do concreto.

4. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Os materiais empregados neste trabalho para a confecção dos traços de concreto estudados foram:

1. Cimento portland;
2. Agregado miúdo natural;
3. Agregado graúdo natural;
4. Agregado graúdo reciclado;
5. Látex estireno-butadieno.

Todos os materiais foram obtidos na praça e não apresentam características específicas além daquelas para as quais foram produzidos, com exceção dos agregados graúdos reciclados, que foram obtidos diretamente da Usina de Reciclagem de Entulhos de Ribeirão Preto, sob processo descrito em item específico.

Os ensaios de caracterização dos materiais foram sempre realizados a luz das Normas Brasileiras cabíveis, no Laboratório do Departamento de Estruturas da EESC-USP e, quando não, principalmente no que se refere ao látex estireno-butadieno e ao cimento empregados, os dados foram fornecidos pelos fabricantes.

4.2. AGLOMERANTE

O aglomerante empregado na pesquisa foi o cimento CII-E-32, cujas características físicas e mecânicas estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento empregado

Norma	Propriedade	Amostra	NBR-11578
NBR-6474	Massa específica (kg/dm ³)	3,13	-
NBR-7215	Resistência à compressão (MPa)	3 dias	≥ 10
		7 dias	≥ 20
		28 dias	≥ 32
NBR-7224	Superfície específica Blaine (m ² /kg)	340	≥ 260
NBR-7251	Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,18	-
NBR-11579	Finura, resíduo na peneira #200	3,1%	≤ 12%
NBR-11581	Tempo de início de pega	2h 45min	≥ 1h
NBR-11582	Expansibilidade a quente (mm)	0,5	≤ 5

FONTE: Fabricante, 1998.

4.3. AGREGADO MIÚDO NATURAL

O agregado miúdo empregado foi areia natural quartzosa obtida do rio Mogi-Guaçu, adquirida na região de São Carlos-SP. Segundo sua classificação granulométrica, realizada conforme a NBR-7217, é classificada como Areia Fina Zona 2. As porcentagens retidas e acumuladas podem ser encontradas na Tabela 4.2 e a curva granulométrica, na Figura 4.1. As demais propriedades físicas do agregado miúdo natural encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Composição granulométrica do agregado miúdo natural

Peneira (mm)	Porc. Retida (%)	Porc. Retida Acumulada (%)
6,30	0	0
4,80	1	1
2,40	1	2
1,20	7	9
0,60	27	36
0,30	41	77
0,15	22	99
Fundo	1	100

Dimensão Máxima Característica = 2,4mm

Módulo de Finura = 2,24

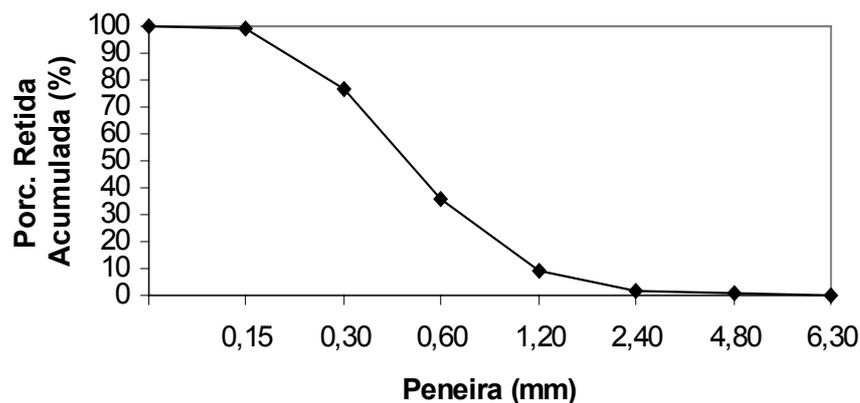


Figura 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural

Tabela 4.3 – Propriedades físicas do agregado miúdo natural

Norma	Propriedade	Amostra
NBR-9776	Massa específica (kg/dm ³)	2,60
NBR-7251	Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,52
NBR-7211	Substâncias nocivas	Isenta

4.4. AGREGADO GRAÚDO NATURAL

O agregado graúdo natural empregado foi o basalto britado classificado como pedrisco, proveniente da região de São Carlos. As porcentagens retidas e acumuladas são encontradas na Tabela 4.4 e a curva granulométrica, na Figura 4.2. As demais propriedades físicas do agregado graúdo natural encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural

Peneira (mm)	Porc. Retida (%)	Porc. Retida Acumulada (%)
9,5	0	0
6,30	4	4
4,80	28	32
2,40	53	85
1,20	12	97
0,60	2	99
0,30	1	100
0,15	0	100
Fundo	0	100

Dimensão Máxima Característica = 6,3mm

Módulo de Finura = 5,13

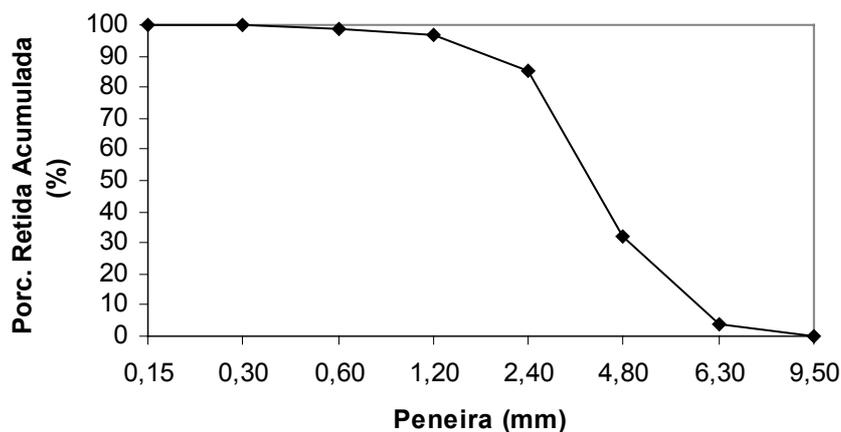


Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural

Tabela 4.5 – Propriedades físicas do agregado graúdo natural

Características Físicas do Agregado Graúdo Natural		
Massa específica (kg/dm ³)	2,85	NBR-9776
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,39	NBR-7251
Massa unitária no estado compactado (kg/dm ³)	1,56	NBR-7810
Absorção após 24 horas (%)	2,3	NBR-9937

4.5. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

O agregado graúdo reciclado foi fornecido pela Usina de Reciclagem de Entulhos de Ribeirão Preto, SP, onde foi processado em bica corrida e separado por peneiramento manual no Laboratório de Estruturas da EESC-USP, segundo as faixas granulométricas comerciais: brita 3 (76mm > D > 38mm), brita 2 (38mm > D > 19mm), brita 1 (19mm > D > 9,5mm), brita 0 (9,5mm > D > 4,8mm) e agregado miúdo (D < 4,8mm).

A Figura 4.3 mostra as porcentagens em que foram obtidas cada uma destas faixas granulométricas em pesquisas realizadas por LATTERZA (1998) com amostra coletada em novembro de 1996.

Conforme apresentado por LATTERZA (1998), vale ressaltar que outras análises realizadas pelo mesmo em amostras coletada em janeiro e abril de 1997, e por ZORDAN (1997), em 1996, não apresentaram variações significativas nestes valores.

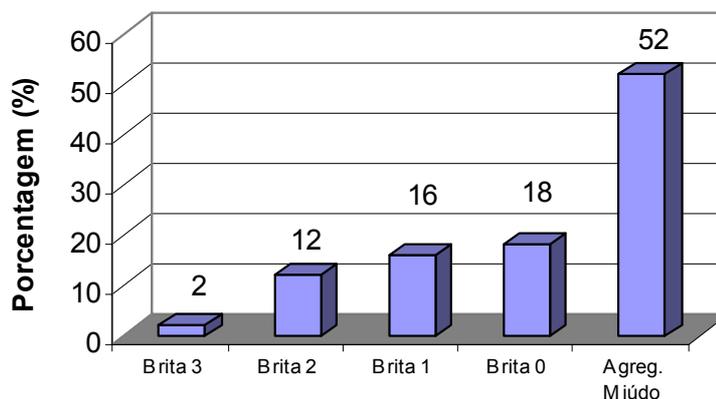


Figura 4.3 – Fração granulométrica de amostra do entulho
(FONTE: LATTERZA, 1998)

Após a classificação granulométrica, LATTERZA (1998) classificou qualitativamente o entulho britado com diâmetro acima de 4,8mm, separando-o em britas, pedaços de concreto, pedaços de argamassa, materiais cerâmicos e outros (vidros, plásticos, torrões, etc). A Tabela 4.6 mostra os resultados encontrados enquanto a Figura 4.4 ilustra esta classificação quantitativa enfocando apenas a parcela classificada como brita 0, objeto desta pesquisa. A Tabela 4.7 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo reciclado e a Tabela 4.8 apresenta as propriedades físicas destes agregados.

Tabela 4.6 – Natureza da composição do agregado graúdo reciclado

Material	Peneiras					Total da amostra (%)
	4,8mm (%)	9,5mm (%)	19mm (%)	25mm (%)	38mm (%)	
Britas	22,4	15,9	4,5	-	100	19,10
Pedaços de concreto	-	28,9	22,5	13,7	-	14,60
Argamassas	55,9	36,6	49,0	65,7	-	46,20
Cerâmicas	21,7	18,6	24,0	13,0	-	19,20
Outros	-	-	-	7,6	-	0,90
Total da peneira (%)	100	100	100	100	100	100

(FONTE: LATTERZA, 1998)

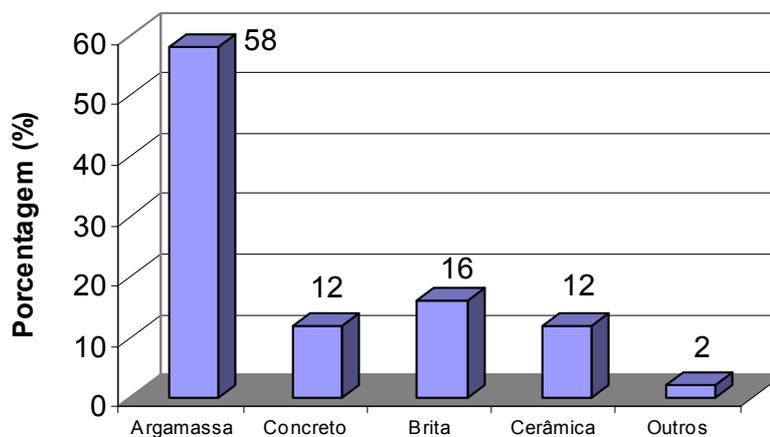


Figura 4.4 – Composição da amostra de entulho correspondente a brita 0
(FONTE: LATTERZA, 1998)

Tabela 4.7 – Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado

Peneira (mm)	Porc. Retida (%)	Porc. Retida Acumulada (%)
12,5	0	0
9,5	3	3
6,30	51	54
4,80	38	92
2,40	2	94
1,20	0	94
0,60	0	94
0,30	0	94
0,15	0	94
Fundo	6	100

Dimensão Máxima Característica = 9,5mm

Módulo de Finura = 5,65

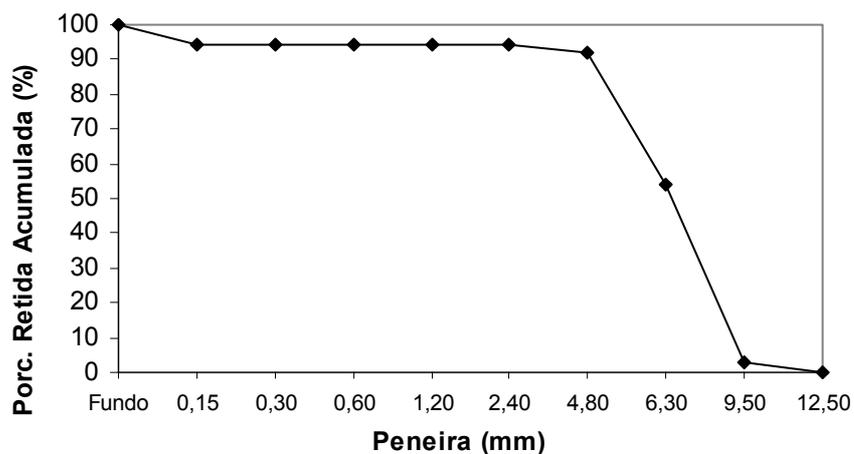


Figura 4.5 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado (brita 0)

Tabela 4.8 – Propriedades físicas do agregado graúdo reciclado (brita 0)

Características Físicas do Agregado Graúdo Reciclado		
Massa específica (kg/dm ³)	2,15	NBR-9776
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,09	NBR-7251
Massa unitária no estado compactado (kg/dm ³)	1,21	NBR-7810
Absorção após 24 horas (%)	8,70	NBR-9937



Figura 4.6 – Agregado graúdo reciclado (brita 0)

4.5.1. A USINA DE RECICLAGEM DE ENTULHO DE RIBEIRÃO PRETO

Com sua atuação iniciada em 1996, a Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto-SP, possui capacidade de processamento de 200 t/dia em bica corrida, tendo sempre trabalhado abaixo de sua capacidade.

Segundo LATTERZA (1998), os reciclados têm sido empregados, em sua maioria, na recuperação de vias públicas sem pavimentação asfáltica na periferia da cidade e, em menor proporção, em fábricas de blocos.

Segundo CONSTRUÇÃO *apud* LATERZZA (1998), a solução encontrada para a problemática dos resíduos na cidade foi a implantação de 2 usinas, das quais apenas uma opera e que, sem computar o custo de aquisição do terreno, custou aproximadamente R\$ 130.000,00 (data de 1996). Foram também implantados postos de recepção de entulho, pois sem estes o sistema ficaria ocioso.

Quando do recebimento de caçambas de entulho na usina de reciclagem, as mesmas passam por inspeção visual de um funcionário que classifica o material em Tipo A ou B. O entulho Tipo A é composto por materiais mais nobres tais como pedaços de argamassa, cerâmica e concreto. O entulho Tipo B possui, em meio aos citados, materiais diversos, dentre os quais, restos de poda de árvores, terra, plástico, papel, etc. A Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto forneceu o agregado reciclado objeto deste estudo a partir da britagem do entulho Tipo A. Cabe ainda ressaltar que uma das etapas do processo consiste na remoção de derivados de ferro através de um eletroímã instalado sobre a correia transportadora que alimenta o britador, onde pedaços de armaduras, arames e outros componentes metálicos são retidos.

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 ilustram a Usina de Reciclagem, algumas etapas de seus processos e o entulho classificado como Tipo A e Tipo B.



Figura 4.7 – Vista geral da Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto-SP
(FONTE: LATTERZA, 1998)



Figura 4.8 – Vista do depósito de entulho processado em bica corrida
(FONTE: LATTERZA, 1998)



Figura 4.9 – Entulho classificado como Tipo A
(FONTE: LATTERZA, 1998)



Figura 4.10 – Entulho classificado como Tipo A
(FONTE: LATTERZA, 1998)



Figura 4.11 – Entulho classificado como Tipo B
(FONTE: LATTERZA, 1998)

4.6. LÁTEX ESTIRENO-BUTADIENO

O látex empregado é constituído de uma dispersão aquosa aniônica do copolímero estireno-butadieno (SB – Styrene-Butadiene), de tamanho de partículas bastante reduzido, fabricado para aplicação em argamassas e concretos, obtido diretamente com o fabricante em Paulínia – SP. Possui teor de sólidos de $(50,0 \pm 1,0)\%$ e aditivo incorporador de ar e retentor de água, tem aspecto leitoso, é fornecido a granel ou em tambores plásticos de 200kg e é de fácil manuseio.

No catálogo do fabricante consta que o produto é compatível com ligantes hidráulicos e é utilizado para melhorar a aderência aos substratos, as propriedades mecânicas e diminuir a permeabilidade de concretos e argamassas.

Segundo o fabricante, não traz riscos à saúde humana. Com relação ao acondicionamento e estocagem, deve-se evitar grandes oscilações de temperatura e conservar as embalagens fechadas. Ainda segundo o mesmo, sob as condições de acondicionamento e estocagem descritas, o produto pode ser conservado por seis meses sem alterações notáveis em suas propriedades.

As propriedades do látex empregado, cedidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Propriedades do látex estireno-butadieno

Características	
Aparência	Branco leitoso
Estabilizador	Aniônico
Teor de sólidos (%)	50,0 ± 1,0
Ph	7,5 ± 0,5
Viscosidade Brookfield – RVT / 50rpm / 23°C (mPa.s)	75 ± 25
Densidade (g/cm ³)	1,02
Temperatura mínima de formação de filme – TMFF (°C)	< 0
Tensão superficial (mN/m)	35
Tamanho da partícula (µm)	0,16

(FONTE: Fabricante, 1998)

5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

5.1. METODOLOGIA

A metodologia empregada nos ensaios seguiu as recomendações das Normas Brasileiras aplicáveis, e quando não, de outras citadas oportunamente, ou baseou-se em artigos científicos publicados em veículos reconhecidamente idôneos. Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP).

A análise experimental foi dividida em duas etapas chamadas Primeira e Segunda Fases. A Primeira Fase consistiu em uma análise preliminar onde foram definidos os três traços a serem analisados, as condições de cura a que seriam submetidos, as porcentagens de látex sobre a massa de cimento empregadas e os ensaios que indicariam a melhor forma de cura e porcentagem de látex adicionada com base exclusivamente na resistência mecânica dos concretos.

Na Segunda Fase, a partir da condição ótima de cura, foram estudados parâmetros de desempenho em ambiente agressivo e resistência mecânica. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de corrosão em célula de corrosão acelerada e aderência aço-concreto, descritos em momento oportuno.

A seguir, seguem parâmetros comuns a Primeira e Segunda Fases.

5.1.1. TRAÇOS EMPREGADOS

O estudo foi desenvolvido com três traços contendo agregados graúdos reciclados, designados pelas siglas RI, RII e RIII, cada um deles recebendo três porcentagens diferentes de látex sobre a massa de cimento. Além disso, foram

empregados três traços equivalentes com agregados naturais, denominados CI, CII e CIII, sem adição de látex.

Os traços empregados foram desenvolvidos de forma a se manter constante o Teor de Água e o Teor de Argamassa Seca, obtidos respectivamente pelas expressões 5.1 e 5.2, porém os traços com agregados naturais tiveram suas relações água/cimento modificadas de forma que apresentassem o mesmo índice de consistência que os concretos com agregados graúdos reciclados sem látex.

$$\text{Teor de Água} = M_{\text{Água}} / M_{\text{Materiais secos}} \quad (5.1)$$

$$\text{Teor de Argamassa Seca} = (M_{\text{Cimento}} + M_{\text{Miúdo}}) / M_{\text{Materiais secos}} \quad (5.2)$$

onde $M_{\text{Materiais secos}} = M_{\text{Cimento}} + M_{\text{Miúdo}} + M_{\text{Graúdo}}$

Tabela 5.1 – Traços empregados

Concreto	Traço
RI	1:1,60:1,63 a/c=0,51
RII	1:2,07:1,93 a/c=0,60
RIII	1:2,55:2,22 a/c=0,69
CI	1:1,60:1,63 a/c=0,50
CII	1:2,07:1,93 a/c=0,54
CIII	1:2,55:2,22 a/c=0,69

5.1.2. PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo seguiu uma seqüência específica de colocação dos componentes na betoneira e também obedeceu determinados tempos de mistura, visto que, conforme observado na bibliografia consultada, é interessante que se adicione uma parte da água juntamente com os agregados para que estes a absorvam antes do látex ser adicionado, uma vez que o látex é mais benéfico enquanto disperso na matriz de concreto, e não nos poros dos agregados, ainda mais se tratando de agregados reciclados, que apresentam altos valores de absorção de água. O látex foi sempre adicionado ao restante dos materiais diluído em uma parcela da água de amassamento para melhorar sua distribuição na mistura.

As restrições impostas ao tempo de mistura devem-se ao fato da adição de látex estireno-butadieno (apesar de possuir em sua composição uma parcela de agente antiespumante) aumentar o teor de ar incorporado na mistura se agitada por muito tempo.

Pelos motivos apresentados acima, a ordem de colocação dos materiais na betoneira e os tempos de mistura seguiram o apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura

Lançamento	Materiais Adicionados	Tempo de Mistura
1º	Agregado Graúdo + Parte da Água	batimento por 1 minuto
2º	Cimento + Agregado Miúdo	batimento por 1 minuto
3º	Restante da Água + Látex	batimento por 3 minutos

Após a mistura, procedeu-se a moldagem e adensamento dos exemplares conforme a NBR 5738 – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto, adotando-se a vibração mecânica com vibrador de agulha (vibrador de imersão). Após 24 horas, todos os exemplares foram desmoldados e submetidos às respectivas formas de cura.

5.2. PRIMEIRA FASE

Na primeira fase, após a mistura dos materiais, foram determinados o índice de consistência pela mesa de espalhamento – “*flow table*” (NBR-7223) e massa específica no estado fresco (NBR-9833), e moldados exemplares cilíndricos de 100mm x 200mm sob condições de temperatura e umidade semelhantes.

Como já mencionado anteriormente, a cada traço foi adicionada uma determinada quantidade de látex e os exemplares foram submetidos a formas de cura diferentes. Atingidos os 28 dias de idade, os exemplares foram submetidos a ensaios de compressão axial (NBR-5739) e tração por compressão diametral (NBR-7222).

Foram moldados 96 exemplares de cada traço de concreto reciclado (RI, RII e RIII) totalizando 288 exemplares e 24 exemplares para cada traço de concreto com agregados naturais (CI, CII e CIII), totalizando 72 exemplares. Para cada traço, relação l/c (látex/cimento) e forma de cura, foram destinados 6 exemplares, dos quais, 3 foram ensaiados à compressão axial e os outros 3, à compressão diametral.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os corpos-de-prova empregados na Primeira Fase desta pesquisa. A Figura 5.3 mostra os ensaios de compressão axial e de tração na compressão diametral.



Figura 5.1 – Corpos-de-prova utilizados na Primeira Fase



Figura 5.2 – Corpos-de-prova utilizados na Primeira Fase



Figura 5.3 – Ensaio de compressão axial e tração por compressão diametral

Seguem abaixo as porcentagens de látex e formas de cura empregadas na primeira fase desta pesquisa.

5.2.1. PORCENTAGENS DE LÁTEX EMPREGADAS NA PRIMEIRA FASE

A definição das porcentagens de látex sobre a massa de cimento empregadas foi obtida na bibliografia consultada, que mencionava valores usuais de até 30% de látex estireno-butadieno sobre a massa de cimento.

Vale observar que para o látex empregado, com teor de sólidos de $(50,0 \pm 1,0)\%$ e densidade muito próxima a da água ($1,02\text{g/cm}^3$), aplicar uma determinada **massa do látex** sobre a massa de cimento é o mesmo que aplicar metade da **massa de polímero** sobre a massa de cimento, ou seja, a massa de polímero adicionada equivale a metade da massa de látex. Por exemplo, uma relação látex/cimento (l/c) de 20% equivale a uma relação polímero/cimento (p/c) de 10%.

Quando da adição da água de amassamento, foi levada em consideração esta quantidade de água já presente no látex. Como o látex estireno-butadieno empregado possui teor de sólidos de $(50,0 \pm 1,0)\%$, o que indica as frações de polímero e água que o compõe, e sendo a densidade do látex igual a $1,02\text{g/cm}^3$, pôde-se considerar que 50% da massa de látex empregada era de água e o restante, de polímero. Esta água presente no látex foi descontada da água de amassamento.

Tabela 5.3 – Porcentagens de látex e de polímero sobre a massa de cimento

Código	Relação l/c	Relação p/c
A	0 %	0 %
B	10 %	5 %
C	20 %	10 %
D	30 %	15 %

5.2.2. CONDIÇÕES DE CURA EMPREGADAS NA PRIMEIRA FASE

Assim como as porcentagens de látex sobre a massa de cimento empregada foram obtidas na bibliografia consultada, sabia-se de antemão que os concretos que utilizam o látex estireno-butadieno maximizam suas propriedades sob formas de cura combinadas, com um misto de poucos dias de cura úmida e os demais, de cura ao ar, de forma que o látex possa polimerizar. Desta forma, optou-se por submeter os traços estudados às condições de cura apresentadas na Tabela 5.4.

Todos os corpos-de-prova, após moldagem, permaneceram nas fôrmas por 1 dia e, após a desforma, foram submetidos as respectivas formas de cura. Os ensaios foram realizados sempre 28 dias após a moldagem dos testemunhos.

Tabela 5.4 – Formas de cura empregadas

Forma de Cura	Fôrma	Água	Ar	Ensaio
1	1 dia	0 dias	27 dias	28 dias
2	1 dia	2 dias	25 dias	28 dias
3	1 dia	6 dias	21 dias	28 dias
4	1 dia	27 dias	0 dias	28 dias

5.2.3. COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

A seguir são apresentadas as composições em massa dos materiais empregados em cada traço de acordo com a porcentagem de látex utilizada. A coluna $M_{\text{Água do Látex}}$ indica a quantidade de água já presente no látex, conforme mencionado no item 5.2.2 – CONDIÇÕES DE CURA EMPREGADAS. A coluna $M_{\text{Água Adicional}}$ somada a coluna $M_{\text{Água do Látex}}$ totaliza a água de amassamento empregada no traço.

Tabela 5.5 – Composição em massa do traço RI (1:1,60:1,63)

Concreto	A/c	M _{Cimento} (kg)	M _{Miúdo} (kg)	M _{Graúdo} (kg)	M _{Látex} (kg)	M _{Água do Látex} (kg)	M _{Água Adicional} (kg)
RI-A	0,51	22,0	35,2	35,9	-	-	11,22
RI-B	0,51	22,0	35,2	35,9	2,20	1,10	10,12
RI-C	0,51	22,0	35,2	35,9	4,40	2,20	9,02
RI-D	0,51	22,0	35,2	35,9	6,60	3,30	7,92

Tabela 5.6 – Composição em massa do traço RII (1:2,07:1,93)

Concreto	a/c	M _{Cimento} (kg)	M _{Miúdo} (kg)	M _{Graúdo} (kg)	M _{Látex} (kg)	M _{Água do Látex} (kg)	M _{Água Adicional} (kg)
RII-A	0,60	18,7	38,7	36,1	-	-	11,22
RII-B	0,60	18,7	38,7	36,1	1,87	0,94	10,28
RII-C	0,60	18,7	38,7	36,1	3,74	1,87	9,35
RII-D	0,60	18,7	38,7	36,1	5,61	2,81	8,41

Tabela 5.7 – Composição em massa do traço RIII (1:2,55:2,22)

Concreto	a/c	M _{Cimento} (kg)	M _{Miúdo} (kg)	M _{Graúdo} (kg)	M _{Látex} (kg)	M _{Água do Látex} (kg)	M _{Água Adicional} (kg)
RIII-A	0,69	15,8	40,3	35,1	-	-	10,90
RIII-B	0,69	15,8	40,3	35,1	1,58	0,79	10,11
RIII-C	0,69	15,8	40,3	35,1	3,16	1,58	9,32
RIII-D	0,69	15,8	40,3	35,1	4,74	2,37	8,53

5.2.4. RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA FASE

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados na Primeira Fase desta pesquisa. As siglas utilizadas indicam respectivamente o traço, a porcentagem de látex adicionada e a forma de cura empregada:

R = Agregado Graúdo Reciclado; C = Agregados Naturais;

I, II, III = Traço Empregado;

A, B, C, D = Relação Látex/Cimento (l/c);

1, 2, 3, 4 = Forma de Cura.

Por exemplo, RII-C-3 indica que o traço é 1:2,07:1,93, a relação l/c é 20% e a forma de cura é tipo 3 (1 dia na fôrma, 6 dias em água e 21 dias ao ar).

Segue abaixo a nomenclatura empregada nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10:

IC	Índice de Consistência na mesa de espalhamento “ <i>flow table</i> ”;
γ_{cf}	Massa específica no estado fresco (NBR-9833);
C	Consumo de cimento;
f_{c28}	Resistência à compressão axial aos 28 dias;
f_{tD28}	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos para os traços RI e CI

Concreto	IC (mm)	γ_{cf} (kg/dm ³)	C (kg/m ³)	f_{c28} (MPa)	f_{tD28} (MPa)
CI – A – 1	248	2,38	504	27,57	2,752
CI – A – 2				40,71	3,338
CI – A – 3				41,79	3,549
CI – A – 4				39,24	3,065
RI – A – 1	245	2,25	475	34,05	2,702
RI – A – 2				42,42	2,814
RI – A – 3				43,09	3,374
RI – A – 4				40,07	3,028
RI – B – 1	218	2,23	466	33,97	2,725
RI – B – 2				42,08	3,237
RI – B – 3				41,30	2,873
RI – B – 4				40,40	2,624
RI – C – 1	335	2,23	461	26,20	2,423
RI – C – 2				25,51	2,329
RI – C – 3				32,76	3,464
RI – C – 4				26,44	2,567
RI – D – 1	350	2,20	450	21,33	2,784
RI – D – 2				22,85	2,833
RI – D – 3				26,30	2,807
RI – D – 4				20,51	2,225

C = Convencional; R = Reciclado; I = Traço; A, B, C, D = % Látex; 1, 2, 3, 4 = Forma de Cura

Tabela 5.9 – Resultados obtidos para os traços RII e CII

Concreto	IC (mm)	γ_{cf} (kg/dm³)	C (kg/m³)	f_{c28} (MPa)	f_{td28} (MPa)
CII – A – 1	230	2,38	429	20,63	1,929
CII – A – 2				32,12	2,754
CII – A – 3				35,54	2,549
CII – A – 4				32,89	2,856
RII – A – 1	208	2,28	407	25,43	2,173
RII – A – 2				36,20	2,881
RII – A – 3				38,36	2,803
RII – A – 4				34,35	2,842
RII – B – 1	198	2,25	398	26,70	2,377
RII – B – 2				34,88	2,867
RII – B – 3				37,66	2,892
RII – B – 4				33,25	2,492
RII – C – 1	293	2,23	391	22,60	2,613
RII – C – 2				27,97	2,950
RII – C – 3				28,13	2,617
RII – C – 4				24,52	2,012
RII – D – 1	305	2,18	379	18,88	2,420
RII – D – 2				23,45	2,640
RII – D – 3				23,69	2,891
RII – D – 4				20,60	2,483

C = Convencional; R = Reciclado; II = Traço; A, B, C, D = % Látex; 1, 2, 3, 4 = Forma de Cura

Tabela 5.10 – Resultados obtidos para os traços RIII e CIII

Concreto	IC (mm)	γ_{cf} (kg/dm ³)	C (kg/m ³)	f_{c28} (MPa)	f_{td28} (MPa)
CIII – A – 1	185	2,35	364	14,80	1,546
CIII – A – 2				22,41	2,059
CIII – A – 3				23,76	2,668
CIII – A – 4				21,91	2,259
RIII – A – 1	180	2,28	353	19,56	1,664
RIII – A – 2				28,21	2,142
RIII – A – 3				30,59	2,261
RIII – A – 4				26,65	2,053
RIII – B – 1	165	2,25	346	22,57	2,069
RIII – B – 2				28,41	2,447
RIII – B – 3				31,00	2,623
RIII – B – 4				27,92	2,395
RIII – C – 1	315	2,23	340	18,06	1,934
RIII – C – 2				23,10	1,778
RIII – C – 3				24,48	1,960
RIII – C – 4				21,61	1,903
RIII – D – 1	310	2,21	334	15,41	2,053
RIII – D – 2				19,52	2,017
RIII – D – 3				20,38	2,182
RIII – D – 4				17,22	1,706

C = Convencional; R = Reciclado; III = Traço; A, B, C, D = % Látex; 1, 2, 3, 4 = Forma de Cura

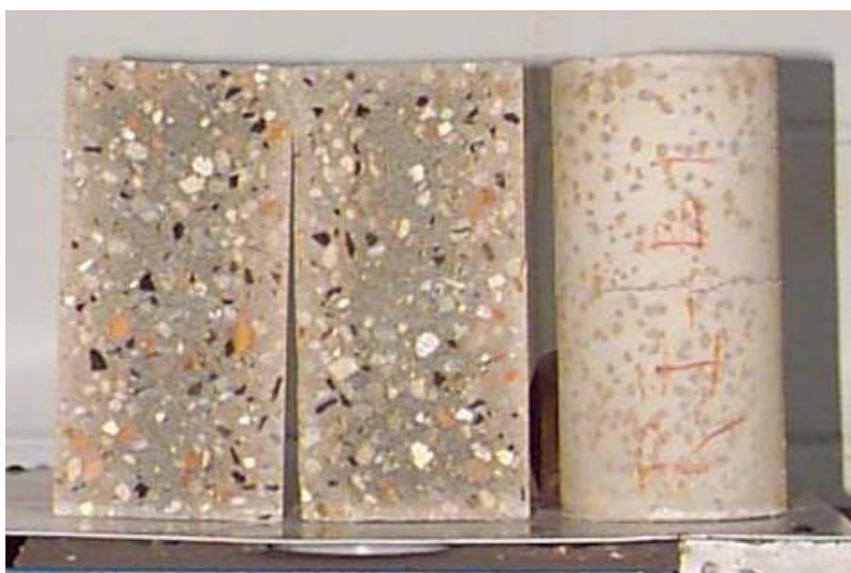


Figura 5.4 – Exemplo do traço RI-B1. Detalhe dos agregados reciclados

5.2.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE

A seguir, os resultados obtidos são analisados comparativamente através de gráficos e comentados no momento oportuno.

5.2.5.1. Índice de Consistência na Mesa de Espalhamento (Flow Table)

Tabela 5.11 – Índice de Consistência (em mm) por traço e adição de látex

	RI	RII	RIII
A (0%)	245	208	180
B (10%)	218	198	165
C (20%)	335	293	315
D (30%)	350	305	310

	CI	CII	CIII
A (0%)	248	230	185

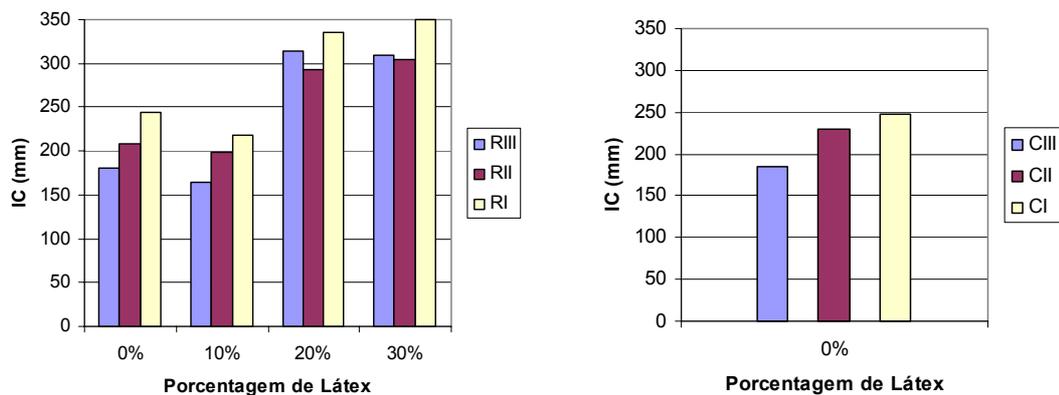


Figura 5.5 – Gráfico dos índices de consistência para concretos com agregados graúdos reciclados e concretos com agregados naturais

Para os concretos com agregados graúdos reciclados a adição de 10% de látex sobre a massa de cimento (relação B) promoveu uma diminuição sensível no espalhamento dos 3 traços (RI, RII e RIII) em relação aos concretos de agregados graúdos reciclados sem adição de látex (relação A). Isto deve-se ao aumento de coesão provocada pelo látex. As demais adições de látex, C e D, aumentaram sobremaneira o espalhamento dos concretos obtidos, onde as propriedades plastificantes do látex ficam bem caracterizadas.

5.2.5.2. Massa Específica no Estado Fresco

Tabela 5.12 – Massa específica no estado fresco (kg/dm^3) por traço e adição de látex

	RI	RII	RIII
A (0%)	2,25	2,28	2,28
B (10%)	2,23	2,25	2,25
C (20%)	2,23	2,23	2,23
D (30%)	2,20	2,18	2,21

	CI	CII	CIII
A (0%)	2,38	2,38	2,35

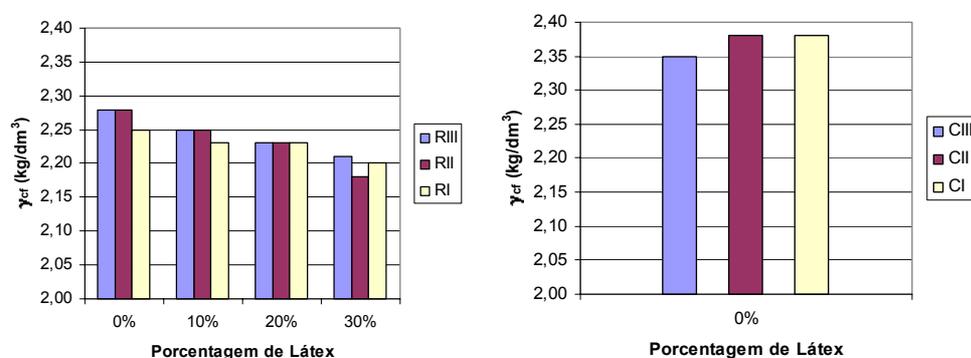


Figura 5.6 – Gráfico das massas específicas no estado fresco para concretos com agregados graúdos reciclados e concretos com agregados naturais

Para os concretos com agregados graúdos reciclados, a massa específica no estado fresco sofreu pequenas quedas conforme aumentou a porcentagem de látex adicionada, encontrando-se sempre na faixa entre 2,2 e 2,3 kg/dm^3 . Isto se deve, segundo citado na bibliografia consultada, à incorporação de ar nos concretos promovida pela adição do látex estireno-butadieno (ainda que tenham sido rigorosamente controlados os tempos de mistura em betoneira), e pela adição de material com menor densidade ao concreto.

Já para os concretos com agregados naturais, a massa específica no estado fresco manteve-se praticamente constante, próximo a 2,4 kg/dm^3 .

5.2.5.3. Consumo de Cimento

Tabela 5.13 – Consumo de cimento (kg/m^3) por traço e adição de látex

	RI	RII	RIII
A (0%)	475	407	353
B (10%)	466	398	346
C (20%)	461	391	340
D (30%)	450	379	334

	CI	CII	CIII
A (0%)	504	429	364

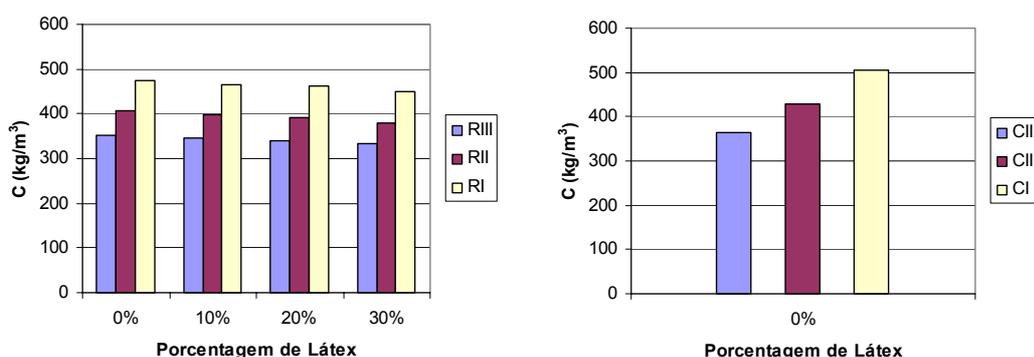


Figura 5.7 – Gráfico dos consumos de cimento para concretos com agregados gráudos reciclados e concretos com agregados naturais

Nos concretos com agregados gráudos reciclados, o consumo de cimento em cada traço seguiu a mesma tendência da massa específica no estado fresco, diminuindo com o aumento de látex no traço. Para o traço RI, o consumo obtido foi de $462,5 \pm 12,5 \text{ kg/m}^3$. O consumo no traço RII foi de $393 \pm 14,0 \text{ kg/m}^3$ e para o traço RIII, $343,5 \pm 9,5 \text{ kg/m}^3$.

Para os traços de concreto com agregados naturais, o consumo foi sempre maior em relação aos traços com agregados gráudos reciclados equivalentes (sem látex). O traço CI-A apresentou consumo de cimento 6,1% maior que o traço RI-A (504 kg/m^3 contra 475 kg/m^3). O traço CII-A apresentou consumo de cimento 5,4%

maior que o traço RII-A (429 kg/m^3 contra 407 kg/m^3). O traço CIII-A apresentou consumo de cimento 3,1% maior que o traço RIII-A (364 kg/m^3 contra 353 kg/m^3).

5.2.5.4. Resistência à Compressão Axial aos 28 dias

Tabela 5.14 – Resistência à compressão axial ao 28 dias (em MPa) para os traços RI e CI, por adição de látex e forma de cura

	1	2	3	4
CI-A	27,57	40,71	41,79	39,24
RI-A	34,05	42,42	43,09	40,07
RI-B	33,97	42,08	41,30	40,40
RI-C	26,20	25,51	32,76	26,44
RI-D	21,33	22,85	26,30	20,51

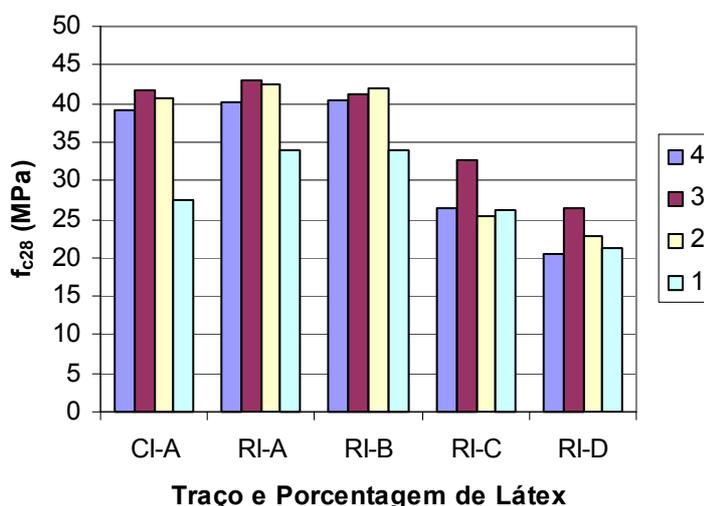


Figura 5.8 – Gráfico das resistências à compressão axial para os traços RI e CI

Pode-se perceber claramente que a adição de 10% de látex sobre a massa de cimento praticamente não alterou a resistência à compressão axial em relação ao concreto de agregados graúdos reciclados sem adição de látex. Contudo, adições superiores a esta fizeram com que a resistência diminuísse drasticamente à medida que a porcentagem aumentava.

Com relação à cura, ficam evidentes os efeitos danosos de sua ausência (forma de cura 1), o que se repetiu em todos os casos. Porém, tanto a forma de cura 2 quanto a 3 apresentaram bons resultados aos 28 dias, com destaque para a forma de cura 3 principalmente quando se analisa as adições C e D (20% e 30% de látex,

respectivamente). Pode-se perceber também que a ausência de cura afeta mais negativamente o traço com agregados naturais que o traço com agregados graúdos reciclados sem látex e com 10% de látex ($f_{c28\ CI-A-1} = 27,57\text{MPa}$, e $f_{c28\ RI-A-1} = 34,05\text{MPa}$, e $f_{c28\ RI-B-1} = 33,97\text{MPa}$).

Outra observação pertinente é que quando compara-se as resistências dos traços com agregados naturais e com agregados graúdos reciclados sem látex, as resistências dos traços com agregados naturais **são sempre menores** que as resistências dos traços com agregados graúdos reciclados, indicando sua competência como concreto estrutural de média resistência (comparação entre as linhas CI-A e RI-A da Tabela 5.14).

Tabela 5.15 – Resistência à compressão axial ao 28 dias (em MPa) para os traços RII e CII, por adição de látex e forma de cura

	1	2	3	4
CII-A	20,63	32,12	35,40	32,89
RII-A	25,43	36,20	38,36	34,35
RII-B	26,70	34,88	37,66	33,25
RII-C	22,60	27,97	28,13	24,52
RII-D	18,88	23,45	23,69	20,60

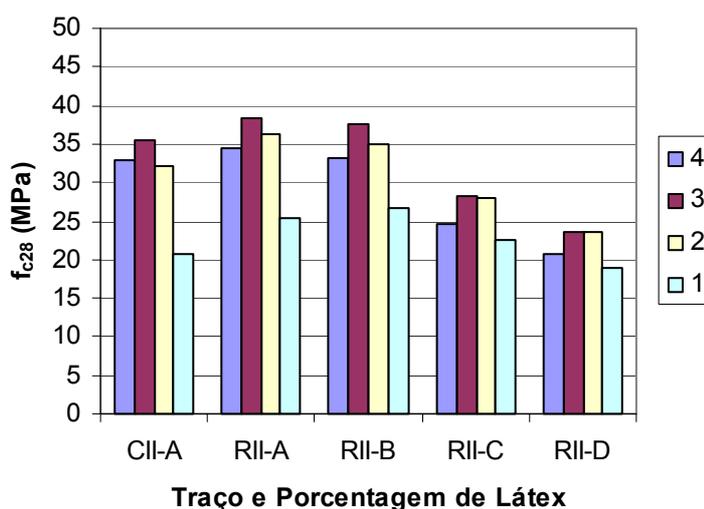


Figura 5.9 – Gráfico das resistências à compressão axial para os traços RII e CII

Novamente fica evidente o ganho proporcionado pela adição de 10% de látex em relação às demais adições, e a estreita semelhança entre esta adição e o concreto reciclado de referência (sem látex).

Aqui também a forma de cura 3 apresentou os melhores resultados na resistência à compressão aos 28 dias em relação às demais opções.

As demais observações feitas para os traços RI e CI também são válidas para este traço.

Tabela 5.16 – Resistência à compressão axial ao 28 dias (em MPa) para os traços RIII e CIII, por adição de látex e forma de cura

	1	2	3	4
CIII-A	14,80	22,41	23,76	21,91
RIII-A	19,56	28,21	30,59	26,65
RIII-B	22,57	28,41	31,00	27,92
RIII-C	18,06	23,10	24,48	21,61
RIII-D	15,41	19,52	20,38	17,22

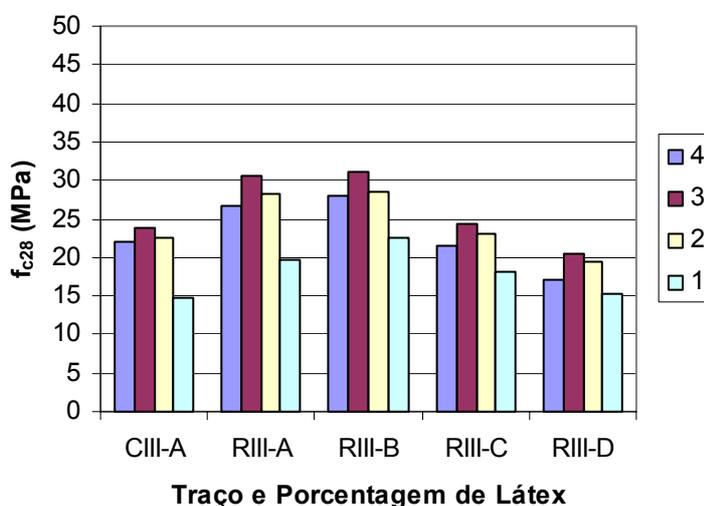


Figura 5.10 – Gráfico das resistências à compressão axial para os traços RIII e CIII

A mesma tendência citada anteriormente pode ser observada para o traço RIII, tanto com relação à quantidade ideal de látex quanto à forma de cura empregada.

Novamente, assim como para os traços anteriores, o concreto com agregados naturais sempre apresenta resistência inferior aos concretos com agregados graúdos reciclados sem látex e com adição de 10% de látex.

5.2.5.5. Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias

Tabela 5.17 – Resistência à tração por compressão diametral ao 28 dias (em MPa) para os traços RI e CI, por adição de látex e forma de cura

	1	2	3	4
CI-A	2,752	3,338	3,549	3,065
RI-A	2,702	2,814	3,374	3,028
RI-B	2,725	3,237	2,873	2,624
RI-C	2,423	2,329	3,464	2,567
RI-D	2,784	2,833	2,807	2,225

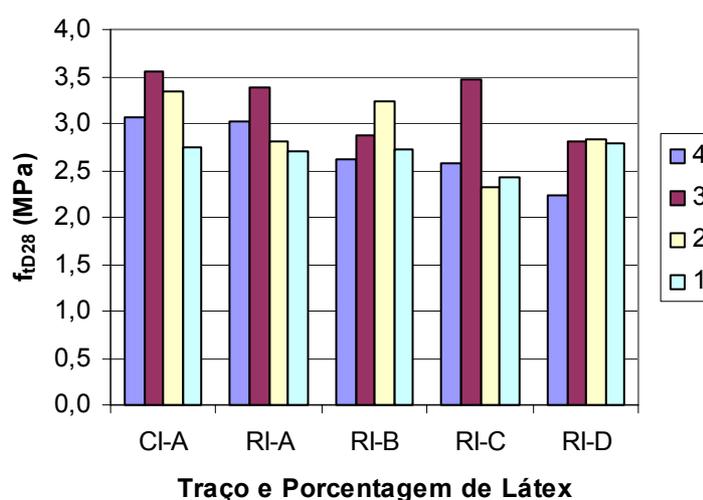


Figura 5.11 – Gráfico das resistências à tração por compressão diametral para os traços RI e CI

Para os concretos com agregados graúdos reciclados, o valor de resistência à tração por compressão diametral foi aumentada sobremaneira com a combinação de $l/c = 10\%$ e forma de cura 2 em relação ao concreto de referência ($l/c = 0\%$ e forma de cura 2). Um outro ponto notável foi a combinação da relação $l/c = 20\%$ e forma de cura 3, sendo este o maior valor obtido dentre os traços com agregados graúdos reciclados.

Novamente percebe-se que o ponto ideal de modificação ocorre com a adição de 10% de látex sobre a massa de cimento com as formas de cura alternando entre 2 e 3.

Na comparação entre o concreto de agregados naturais e o concreto de agregados graúdos reciclados sem látex fica evidente que este último apresenta resistência à tração por compressão diametral sempre menor que o primeiro.

Tabela 5.18 – Resistência à tração por compressão diametral ao 28 dias (em MPa) para os traços RII e CII, por adição de látex e forma de cura

	1	2	3	4
CII-A	1,929	2,754	2,549	2,856
RII-A	2,173	2,881	2,803	2,842
RII-B	2,377	2,867	2,892	2,492
RII-C	2,613	2,950	2,617	2,012
RII-D	2,420	2,640	2,891	2,483

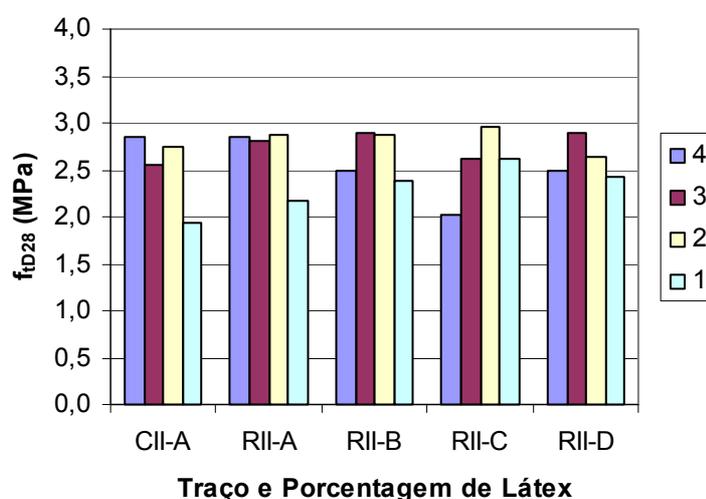


Figura 5.12 – Gráfico das resistências à tração por compressão diametral para os traços RII e CII

Para o traço RII, a tendência se manteve com a maximização das propriedades sendo alcançada entre as adições de 10% e 20% de látex e formas de cura 2 e 3.

Na comparação entre os traços com agregados naturais e com agregados graúdos reciclados, a tendência se inverteu em relação aos traços RI-A e CI-A: a resistência dos concretos RII-A é sempre maior que a dos traços CII-A.

Tabela 5.19 – Resistência à tração por compressão diametral ao 28 dias (em MPa) para os traços RIII e CIII, por adição de látex e forma de cura

	1	2	3	4
CIII-A	1,546	2,059	2,668	2,259
RIII-A	1,664	2,142	2,261	2,053
RIII-B	2,069	2,447	2,623	2,395
RIII-C	1,934	1,778	1,960	1,903
RIII-D	2,053	2,017	2,182	1,706

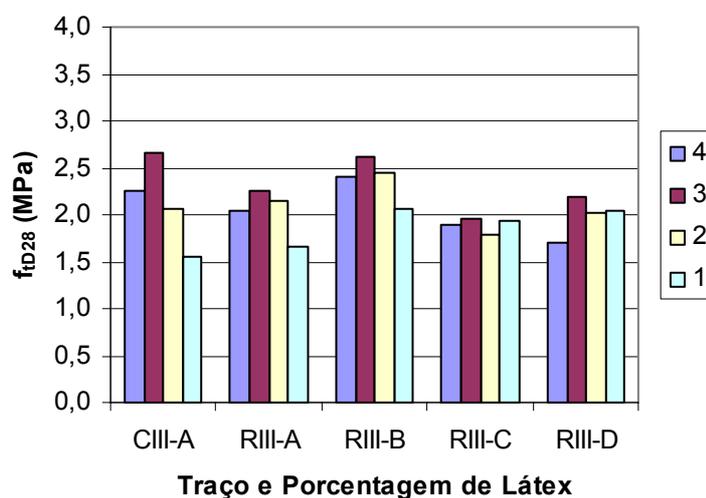


Figura 5.13 – Gráfico das resistências à tração por compressão diametral para os traços RIII e CIII

Para o traço RIII, que apresenta o menor consumo de cimento dentre os três traços empregados (I, II e III), a resistência à tração por compressão diametral aumentou consideravelmente com a adição de 10% de látex, diminuindo com o aumento da quantidade de látex adicionada.

Novamente a forma de cura 3 demonstrou ser a mais adequada, gerando as maiores resistências aos 28 dias.

5.2.6. CONCLUSÕES DA PRIMEIRA FASE

Segundo as análises e critérios apresentados até esta etapa da pesquisa, tira-se por conclusão que, dentre os traços, relações látex/cimento e formas de cura adotadas, para todos os traços, a relação l/c = 10% (relação B) é a porcentagem de látex que promoveu em âmbito geral as maiores resistências à compressão axial e à tração na compressão diametral, e a forma de cura 3 (6 dias de cura úmida + 21 dias de cura ao ar) também apresentou estes resultados.

Com relação à forma de cura, fica demonstrado que as formas de cura 1 e 2 (nenhum dia de cura úmida + 27 dias de cura ao ar, e 2 dias de cura úmida + 25 dias de cura ao ar, respectivamente) não promovem a hidratação necessária do cimento para promover aumentos de resistência, e que a forma de cura 4 (27 dias de cura úmida + 0 dias de cura ao ar) compromete a resistência do concreto provavelmente por atacar o polímero. Conforme citado na revisão bibliográfica do assunto, a forma de cura ideal para concretos modificados com látex é um misto de cura úmida e cura ao ar.

Com relação à quantidade de polímero adicionada, as relações de 20 e 30% aumentaram sobremaneira a trabalhabilidade dos concretos, como pode-se perceber pelos índices de consistência obtidos. Apesar da relação l/c = 10% ter promovido os maiores ganhos de resistência, não significa que as relações de 20 e 30% apresentem desvantagens, muito pelo contrário: há a possibilidade de se aproveitar este aumento significativo de trabalhabilidade para promover a diminuição da água de amassamento e, com isso, promover ganhos também significativos de resistência. Também na revisão bibliográfica sobre o assunto, pesquisadores têm optado por conduzir pesquisas semelhantes a esta mantendo constante a índice de consistência (ou o abatimento do tronco de cone, se for o caso), variando a quantidade de água de amassamento, e têm obtido bons resultados com relações de até 30% de látex sobre a massa de cimento.

Através dos resultados e conforme explicitado nos momentos oportunos, pode-se perceber que os traços de concreto com agregados graúdos reciclados sem látex sempre apresentaram resistência à compressão axial maior que os traços com agregados naturais. Este fato já não é observado para a resistência à tração na

compressão diametral, onde os dois tipos de concretos citados acima se alternavam nos valores de maior resistência.

Outra conclusão pertinente é que, se comparados os traços com agregados graúdos reciclados sem adição de látex e com adição de 10% de látex (traços R – A e R – B) e sob as condições de cura 1 e 2 (nenhum dia de cura úmida + 27 dias de cura ao ar, e 2 dias de cura úmida + 25 dias de cura ao ar, respectivamente), pode-se notar que a carência de cura (representada nas formas de cura 1 e 2) afeta muito mais negativamente os concretos sem adição de látex.

5.3. SEGUNDA FASE

Depois de identificados os parâmetros básicos (relação látex/cimento e forma de cura ideais), foram realizados nesta segunda fase de pesquisa os testes que têm o caráter de indicar a aplicabilidade prática dos concretos com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno, representados na forma de dois ensaios: corrosão de armaduras e aderência aço-concreto.

O ensaio de corrosão de armadura foi realizado em célula de corrosão acelerada, em procedimento experimental descrito em vários artigos, tais como “Corrosion of Steel Reinforcement in Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Structures”, de AL-TAYYIB, A.H.J. & AL-ZAHRANI, M.M., “Durability of Styrene-Butadiene Latex Modified Concrete” de SHAKER, F.A., EL-DIEB, A.S. & REDA, M.M., “Evaluation of the Corrosion Resistance of Latex Modified Concrete” de OKBA, S.H., EL-DIEB, A.S. & REDA, M.M. e “Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures”, de DETWILER, R.J., KJELLEN, K.O. & GJØRV, O.E., com um eletrólito (solução) que procurou reproduzir as condições de agressividade da água do mar das costas brasileiras.

O ensaio de corrosão aqui apresentado foi realizado em conjunto com o aluno de graduação da EESC-USP **Bruno Campos Carvalho** e apresentado à FAPESP – Fundação de Amparo e Apoio à Pesquisa no relatório citado nas Referências Bibliográficas como **CARVALHO, B.C. (2000)**.

Quanto a aderência entre concreto e armadura, procedeu-se um ensaio baseado nas especificações da Norma ASTM C234/91a (*Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel*),

critério empregado por FOLIC & RADONJANIN (1998) para análise de concretos modificados com látex.

5.3.1. ENSAIO DE CORROSÃO

5.3.1.1. Introdução

O concreto vem sendo utilizado há muito como material construtivo e, desde sua associação ao aço formando o concreto armado, suas aplicações em estruturas ampliaram-se consideravelmente. Nesta associação, o concreto efetivamente contribui na resistência à compressão e o aço, na resistência à tração. Além desta complementação de propriedades mecânicas, o concreto oferece **proteção química** ao aço, caracterizada por seu pH alcalino, e **proteção física**, caracterizada pelo cobrimento da armadura, o que dificulta que agentes agressivos atinjam a mesma.

“Contudo, a passividade do aço nesse ambiente alcalino pode ser quebrada caso íons agressivos consigam penetrar na estrutura – os mais agressivos são os sulfatos e os cloretos – ou pela carbonatação da camada de cobrimento causada pelo ingresso de gás carbônico, o que diminui o pH do concreto, criando condições para o desenvolvimento da corrosão das armaduras” (TESSARI & DAL MOLIN, 1998).

O ataque de agentes agressivos e a conseqüente corrosão das armaduras tende a diminuir a vida útil, ou durabilidade dos elementos estruturais. “A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado representa uma de suas maiores patologias, especialmente para as estruturas que se encontram em meios agressivos tais como aquelas em contato com ambiente marinho” (OKBA *et al.*, 1997).

Cabe ainda ressaltar que, mesmo quando não há o comprometimento estrutural da armadura ou do próprio concreto, a corrosão das armaduras compromete o aspecto visual da estrutura.

Durante o processo de corrosão eletroquímica em meio aquoso, pode-se identificar 4 componentes principais, a saber:

- Ânodo – eletrodo que sofre oxidação, disponibilizando elétrons que serão utilizados nas reações catódicas;
- Cátodo – eletrodo que recebe elétrons provenientes do ânodo e no qual ocorre deposição dos produtos da reação química, conhecidos como deposição catódica;

- Eletrólito – solução aquosa que contém íons que permitem a passagem de corrente elétrica; e
- Circuito metálico – ligação entre ânodo e cátodo externa à solução através da qual há passagem de elétrons do ânodo para o cátodo.

TUUTTI *apud* CASCUDO (1997) propôs um modelo teórico segundo o qual a corrosão das armaduras ocorre. Este mecanismo pode ser dividido em duas fases: iniciação e propagação.

A **iniciação** envolve desde a execução do concreto, a penetração dos agentes agressivos através do cobrimento, e a despassivação da armadura. A despassivação da armadura pode ocorrer, via de regra, devido a dois fatores: a presença de íons cloretos (Cl⁻), que podem advir do meio externo (sais anticongelantes, maresia, resíduos industriais, etc) ou estarem presentes no interior do concreto (em aditivos aceleradores de pega, dispersos na água de amassamento, em agregados, etc), e a diminuição da alcalinidade do concreto através do fenômeno conhecido como carbonatação.

Quando provenientes do meio externo, a penetração dos íons cloretos será tanto mais rápida quanto maiores forem a absorção do concreto, a difusão iônica em meio aquoso, a permeabilidade e a migração iônica.

A carbonatação ocorre devido à diminuição do número de moléculas de Hidróxido de Cálcio – Ca(OH)₂ que reagem com o Gás Carbônico – CO₂ segundo a reação:



A segunda fase do mecanismo de corrosão proposto por TUUTTI, conhecida como **propagação** representa o fenômeno de corrosão da armadura. Uma vez despassivada quer pela ação dos cloretos, pela carbonatação ou por ambos simultaneamente, a corrosão desenvolver-se-á na “presença de eletrólito, diferença de potencial e oxigênio, podendo ou não haver presença de agentes agressivos” (HELENE, 1986).

O **eletrólito**, nesta fase, é representado pela água presente nos capilares do concreto, a qual será responsável pela troca de elétrons entre ânodo e cátodo.

A **diferença de potencial** é essencial no processo de corrosão e ocorre naturalmente devido a fatores como composições químicas diferentes no aço, solicitações mecânicas diferentes entre aço e concreto em regiões próximas, concentração diferenciada de sais ou íons, porosidade diferenciada no concreto, dentre outras.

O **oxigênio** é fundamental na reação química de oxidação do aço e deve estar presente na microregião de formação da pilha eletroquímica. A difusão do oxigênio é mais rápida em concretos não saturados do que em concretos saturados. “Investigações indicaram que embora os cloretos estejam presentes, a taxa de corrosão do aço será baixa se o concreto for continuamente molhado com água; isto pela maior dificuldade de difusão do oxigênio nestas condições” (CASCUDO, 1997).

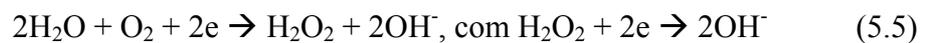
Os **agentes agressivos** não são indispensáveis na formação da pilha eletroquímica, mas aumentam sobremaneira a condutividade elétrica do eletrólito, facilitando trocas entre ânodo e cátodo.

Como principais reações anódicas e catódicas, destaca-se:

- Junto às zonas corroídas (ânodos), ocorre a seguinte reação:



- Na zona catódica, ocorre a seguinte reação:



“Os produtos da reação química de corrosão são, em sua maioria, expansivos, o que pode gerar tensões de tração de até 15MPa no interior do concreto. Como principais produtos da corrosão, pode-se encontrar a deotita, a lepidocrocita e a magnetita” (CASCUDO, 1997). A Figura 5.14 apresenta os principais produtos de corrosão e seus volumes em relação ao ferro (Fe). A Figura 5.15 representa esquematicamente os esforços, deformações e fissuração que ocorrem no concreto por consequência da corrosão.

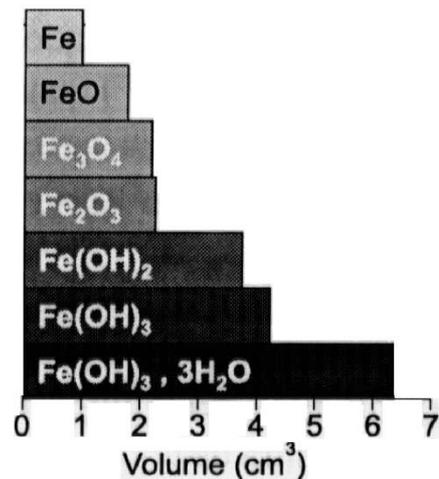
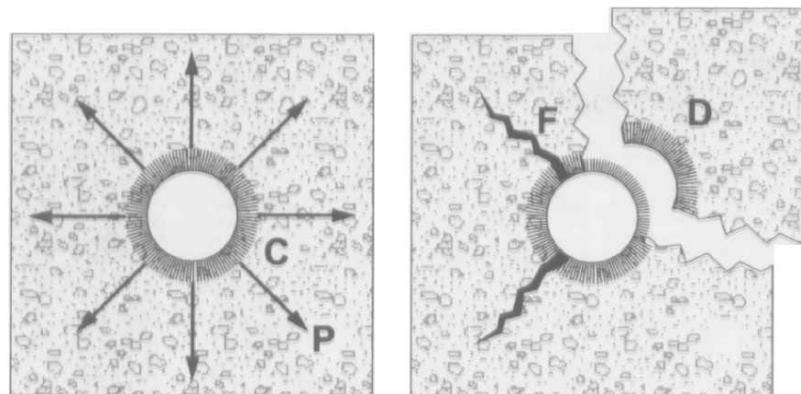


Figura 5.14 – Volume do ferro em relação a alguns de seus produtos de corrosão
(FONTE: CASCUDO, 1997)



C – Produto de Corrosão
P – Esforços Radiais

F – Fissura
D – Destacamento do Concreto

Figura 5.15 – Resultado da corrosão levando à fissuração e destacamento do concreto
(FONTE: CASCUDO, 1997)

“A durabilidade do concreto tem sido vastamente investigada nos últimos 50 anos. Normalmente, a durabilidade do concreto está associada à sua qualidade, embora o termo qualidade seja muito subjetivo” (SHAKER *et al.*, 1997). Sabendo-se que a estrutura interna de natureza porosa do concreto é o principal facilitador através do qual agentes externos penetram no concreto até alcançarem a armadura, o concreto modificado com látex (CML) vem sendo explorado como alternativa para melhorar o desempenho do concreto quanto à sua durabilidade, dentre outros.

5.3.1.2. Metodologia

A metodologia empregada nos ensaios de corrosão de armaduras deriva daquela empregada na Primeira Fase desta pesquisa no que tange aos traços empregados, formas de cura e relação látex/cimento, com o diferencial que, devido a restrição de recursos, tornou-se inviável o estudo de todos os traços analisados anteriormente. Portanto, este ensaio foi realizado apenas para os traços RI e CI, onde o traço RI recebeu adição de 5% de látex sobre a massa de cimento (designado por RI-5%), além do traço de agregados graúdos reciclados sem látex (RI-0%). O traço de agregados naturais também não recebeu adição de látex (CI-0%). No entanto, este ensaio foi repetido para diversas idades dos elementos, a saber: 28 dias, 90 dias e 120 dias. Foram também analisadas a resistência à compressão aos 28, 90 e 120 dias e a absorção de água aos 28 dias de idade. Todos os traços foram submetidos a forma de cura 3 (6 dias de imersão + 21 dias de cura ao ar). Explicações mais detalhadas a respeito das opções adotadas são fornecidas a seguir.

Ensaio em células de corrosão acelerada envolvendo três traços (R – com agregados graúdos reciclados sem látex, RM – com agregados graúdos reciclados com $l/c = 30\%$, e N – com agregados naturais sem látex), realizados por MACHADO *et al.* (1999), mostraram que uma taxa de modificação de 30% de látex sobre a massa de cimento promovia ganhos consideráveis de resistência à corrosão (definida como o tempo determinado pelo aumento abrupto da corrente elétrica de corrosão no circuito), e na perda de massa (devido à ação da corrosão) das barras de aço dos testemunhos. As Tabelas 5.20 e 5.21 trazem os resultados obtidos, onde pode-se perceber que os traços de agregados reciclados e naturais, ambos sem adição de látex, apresentaram o mesmo tempo de corrosão (111 horas), porém no traço com agregados reciclados o ataque à armadura foi significativamente maior (4,9% de perda de massa, contra 3,4% para o traço com agregados naturais). Já o traço com agregados reciclados e adição de látex teve tempo de corrosão de 160 horas e perda de massa de armadura de 1,6%, melhorias bastante significativas. Outra observação pertinente é referente a absorção de água, muito menor no traço RM que nos outros.

Tabela 5.20 – Tempo de corrosão e perda de massa da armadura

Tipo de Concreto	Tempo de Corrosão (h)	Perda de Massa (%)
Agregado Natural	111	3,4
Agregado Graúdo Reciclado	111	4,9
Agregado Graúdo Reciclado com l/c = 30%	160	1,6

FONTE: MACHADO *et al.* (1999)

Tabela 5.21 – Propriedades físicas e mecânicas dos concretos analisados

Tipo de Concreto	Propriedades Físicas			Propriedades Mecânicas	
	A (%)	I (%)	γ_c (kg/m ³)	f_{c28} (MPa)	f_{tD28} (MPa)
N	7,9	17,3	2.180	24,7	2,1
R	9,5	19,3	2.040	27,3	2,3
RM	2,5	4,5	1.810	18,6	1,8

NOTA: A: Absorção; i: Índice de Vazios; γ_c : Massa Específica; f_{c28} : Resistência à Compressão axial aos 28 dias; f_{tD28} : Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias.

FONTE: MACHADO *et al.* (1999)

A Figura 5.16 mostra as barras de aço retiradas dos corpos-de-prova N, R e RM após término dos ensaios realizados por MACHADO *et al.* (1999).



Figura 5.16 – Detalhe do ataque às armaduras (N, R e RM, respectivamente)

Portanto, a partir destes resultados e já se conhecendo, a partir da Primeira Fase, que a relação látex/cimento de 10% ($l/c = 10\%$) gera concretos de agregados graúdos reciclados com resistência compatíveis aos traços de agregados graúdos reciclados sem látex e traços de agregados naturais, e que a forma de cura ideal para concretos de agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno é a 3 (6 dias de imersão + 21 dias de cura ao ar), procedeu-se o ensaio de corrosão com uma quantidade de látex correspondente a 5% da massa de cimento ($l/c = 5\%$) com o intuito de comprovar que esta relação, ainda que abaixo daquela adotada nos demais ensaios, produz resultados satisfatórios do ponto de vista da corrosão de armaduras sem que, no entanto, altere significativamente as resistências mecânicas analisadas na Primeira Fase. Para tanto, foi analisada a resistência à compressão axial aos 28 dias, a título de comparação com os resultados obtidos na Primeira Fase.

Em paralelo aos ensaios de corrosão foram analisadas a Absorção de Água por Imersão e a Massa Específica (NBR-9778) das amostras. Além disso, antes da moldagem dos corpos-de-prova, as barras de aço de 10mm que constituiriam a armadura dos corpos-de-prova, depois de escovadas mecanicamente para remoção de ferrugem, tiveram suas massas determinadas para a análise da perda de massa devida a corrosão.

5.3.1.3. Ensaio de Corrosão em Célula de Corrosão Acelerada

Para o ensaio de corrosão de armadura em célula de corrosão acelerada foram moldados corpos-de-prova tipo pirulito 100mm x 200mm com uma haste de aço estrutural de diâmetro 10mm previamente escovada para remoção de “carepa” de ferrugem, perfeitamente centrada no testemunho, imersa até a 50mm do fundo do mesmo, conforme Figura 5.17. Este tipo de corpos-de-prova também é conhecido por “lollipop” ou “pirulito” em inglês.

Como eletrólito foi empregada uma solução aquosa com concentração de 64g/l de Cloreto de Sódio (NaCl P.A. – ACS) e 26g/l de Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$).

Os equipamentos utilizados na montagem da célula de corrosão acelerada foram:

- 3 Tanques acrílicos de dimensão 500 x 250 x 145mm;

- Eletrodos de aço inoxidável (cátodos);
- Unidade de aquisição de dados acoplada a um computador;
- Fonte elétrica de corrente contínua e constante de 12 V;
- Fios, garras e conectores elétricos;
- Termômetro e higrômetro;
- Medidor de pH.

No ensaio de corrosão, os corpos-de-prova (ânodos) e os eletrodos de aço inoxidável (cátodos) foram posicionados dentro do tanque de acrílico, convenientemente espaçados conforme apresentado nas Figuras 5.18 e 5.19.

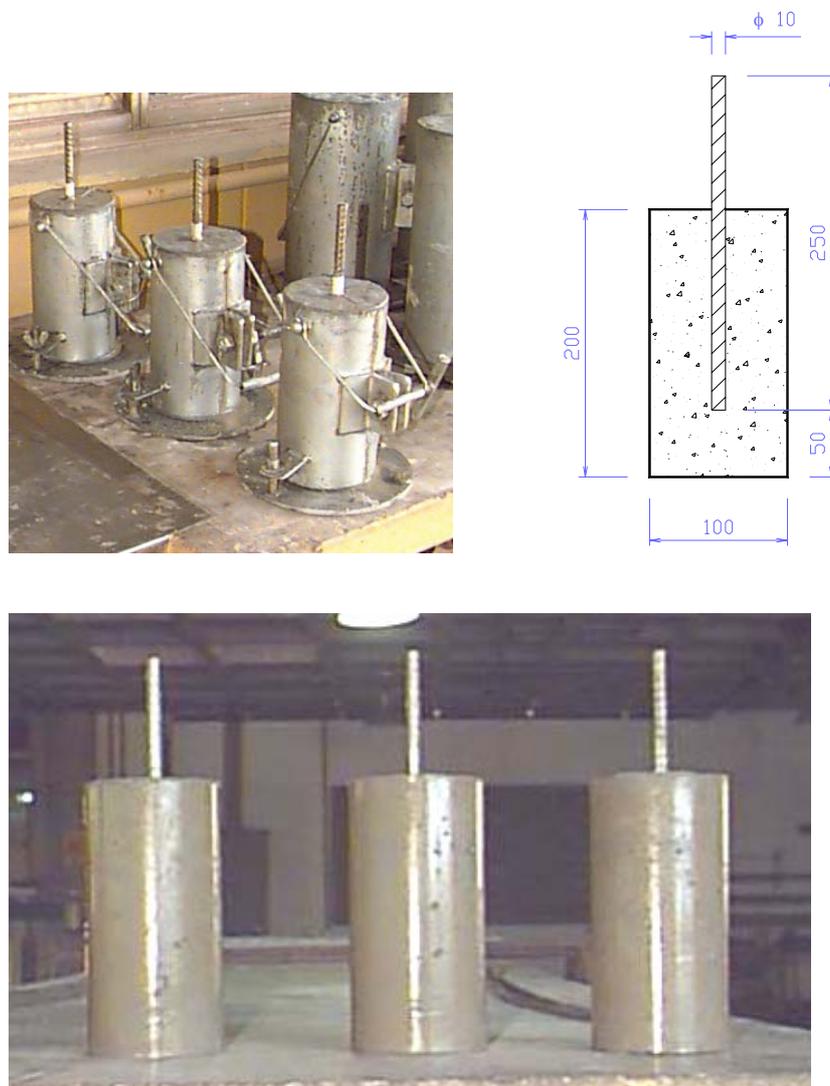


Figura 5.17 – Corpo-de-prova tipo pirulito (medidas em mm)

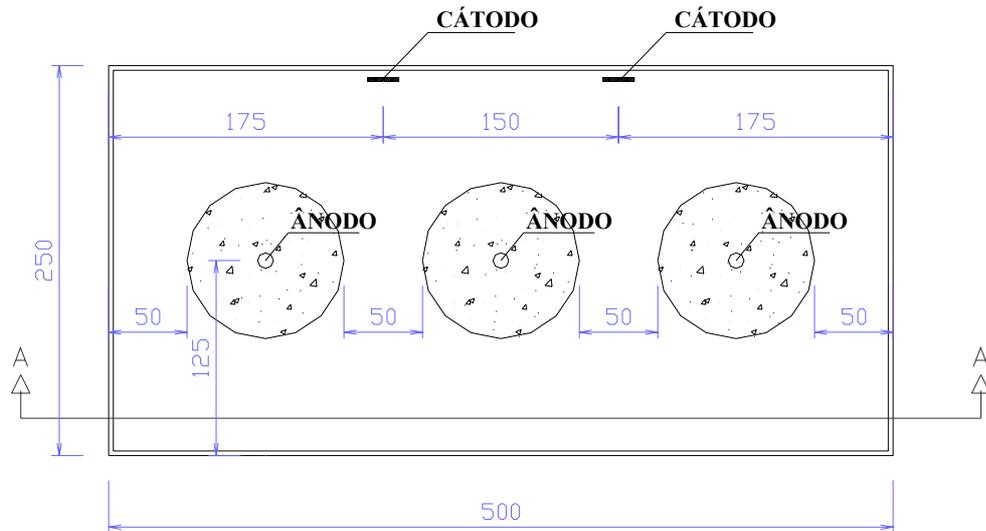


Figura 5.18 – Posicionamento dos corpos-de-prova nos tanques (medidas em mm)

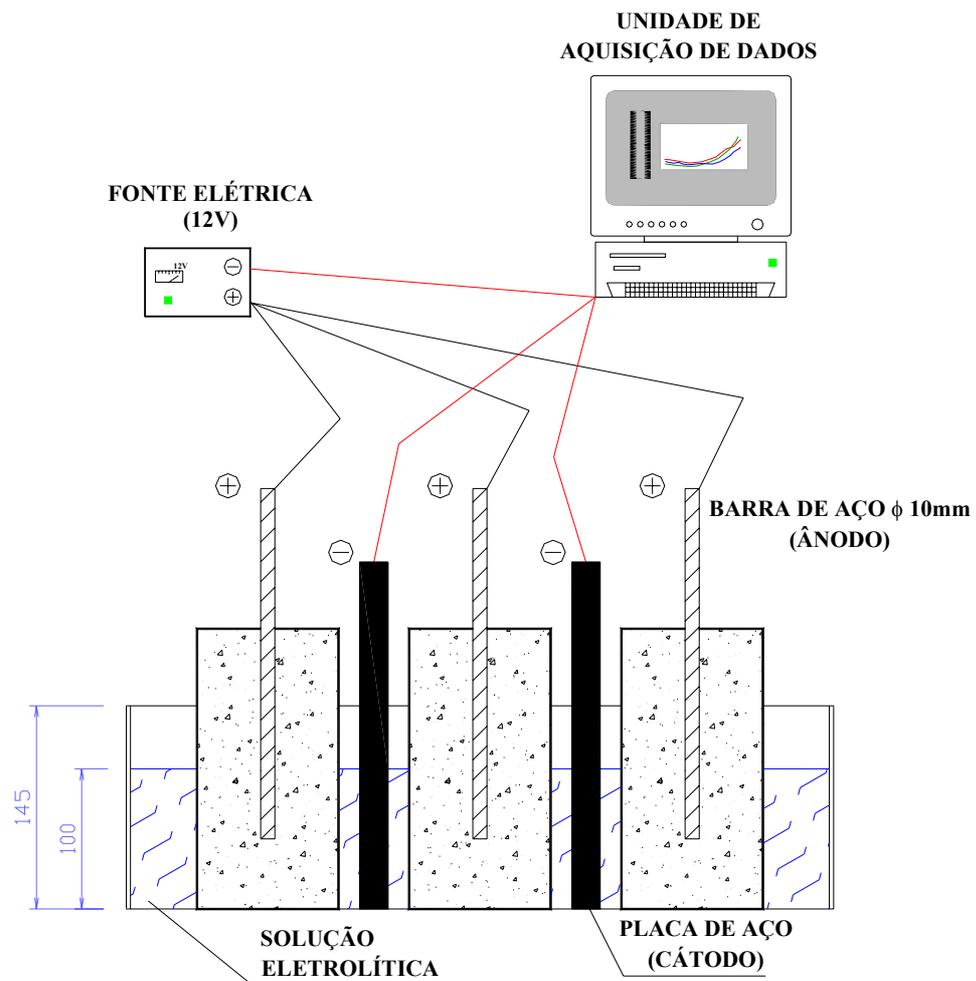


Figura 5.19 – Corte A-A da Figura 5.17 (medidas em mm)

O tanque de acrílico foi preenchido com a solução-eletrólito até atingir a cota de 100mm nos corpos-de-prova. Todas as conexões foram feitas e a fonte de corrente contínua foi acionada, iniciando o registro e armazenamento dos dados através da placa de aquisição de dados e da unidade computacional, sendo os valores das correntes elétricas registrados, para cada corpo de prova, a cada 30 minutos. O pH da solução e a temperatura e umidade ambiente foram monitorados diariamente e os eletrodos catódicos foram limpos a cada 24 horas, devido à deposição de partículas sobre os mesmos.

Após encerramento dos ensaios, os dados armazenados na unidade computacional foram coletados para análise e as barras de aço foram removidas dos elementos, limpas cuidadosamente para remoção do concreto aderido e pesadas novamente. As Figuras 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 são referentes aos ensaios de corrosão em célula de corrosão acelerada.



Figura 5.20 – Corpos-de-prova moldados para o ensaio de corrosão



Figura 5.21 – Ensaio de corrosão – esquema geral



Figura 5.22 – Ensaio de corrosão – detalhe dos corpos-de-prova



Figura 5.23 – Ensaio de corrosão – RI-5%, RI-0% e CI-0%, respectivamente



Figura 5.24 – Ensaio para determinação da absorção, índice de vazios e massa específica – esquema de pesagem submersa

5.3.1.4. Análise dos Resultados

Seguem abaixo os resultados obtidos nos ensaios de absorção, índice de vazios, massa específica da amostra, resistência à compressão axial, tempo de corrosão e perda de massa da armadura.

A Tabela 5.22 apresenta os resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido aos 28 dias. As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam graficamente os resultados obtidos.

Tabela 5.22 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido aos 28 dias

Traço	A (%)	i (%)	γ_c (g/cm³)
CI-0%	7,37	16,32	2,21
RI-0%	8,49	17,65	2,08
RI-5%	7,97	16,49	2,07

NOTA: A: Absorção de água; i: Índice de vazios; γ_c : Massa específica

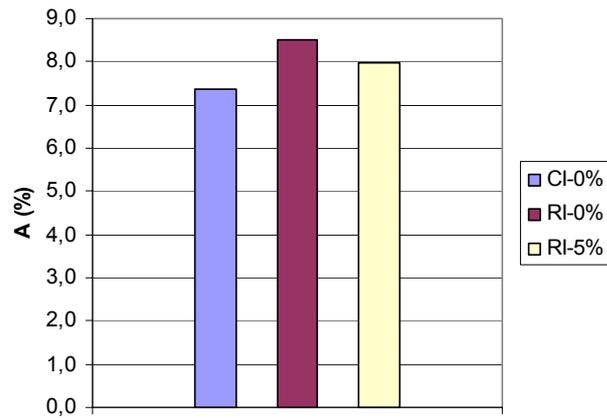


Figura 5.25 – Absorção de água para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%

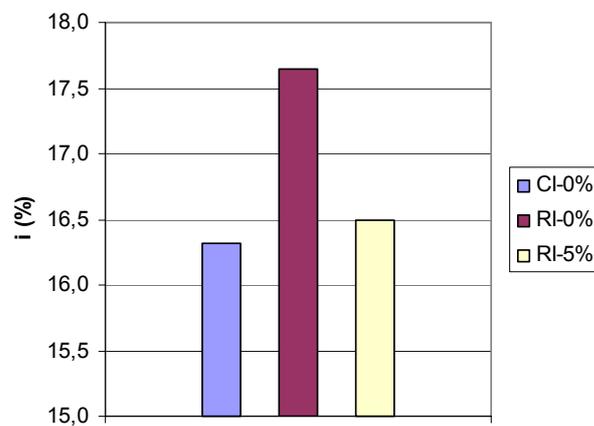


Figura 5.26 – Índice de vazios para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%

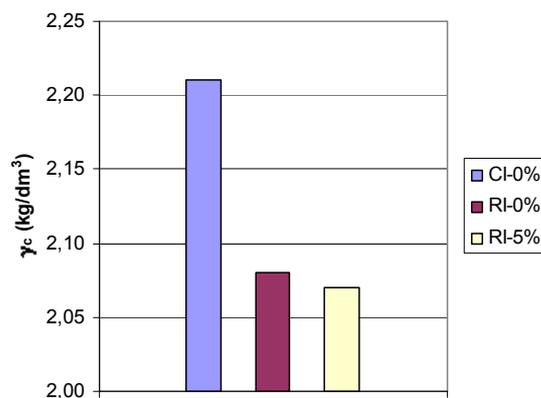


Figura 5.27 – Massa específica para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%

Como pode-se perceber, o traço de agregados graúdos reciclados sem adição de látex (RI-0%) apresenta maior absorção de água (A) que o traço de agregados naturais (CI-0%), variação esta de 15% ($A_{CI-0\%} = 7,37$ contra $A_{RI-0\%} = 8,49\%$).

A adição de 5% de látex estireno-butadieno sobre a massa de cimento no traço de agregados graúdos reciclados (RI-5%) diminuiu a absorção de água em relação ao traço equivalente sem látex (RI-0%). Esta diminuição foi de 6,1% ($A_{RI-5\%} = 7,97\%$ contra $A_{RI-0\%} = 8,49\%$). Em relação ao traço de agregados naturais, o traço RI-5% apresentou ainda maior absorção de água, que foi de 8,1% ($A_{RI-5\%} = 7,97\%$ contra $A_{CI-0\%} = 7,37\%$).

Os resultados referentes ao índice de vazios (i) seguem a mesma tendência dos resultados obtidos para absorção, onde o concreto com agregados graúdos reciclados sem adição de látex (RI-0%) apresenta altos valores de índice de vazios e, por fim, a adição de 5% de látex (RI-5%) vem reduzir estes valores para valores quase próximos do concreto convencional (CI-0%).

A massa específica da amostra para o traço de agregados naturais (CI-0%) foi 6,3% maior que no traço RI-0% , e este, por sua vez, foi 0,5% maior que no traço RI-5%, o que indica o aumento do teor de ar incorporado no concreto devido a adição do látex.

A Tabela 5.23 apresenta os resultados de compressão axial aos 28 dias e a Figura 5.28 representa graficamente estes resultados.

Tabela 5.23 – Resistência à compressão axial aos 28, 90 e 120 dias

Traço	f_{c28} (MPa)	f_{c90} (MPa)	f_{c120} (MPa)
CI-0%	34,8	42,6	40,8
RI-0%	38,3	43,1	41,6
RI-5%	37,9	43,0	41,6

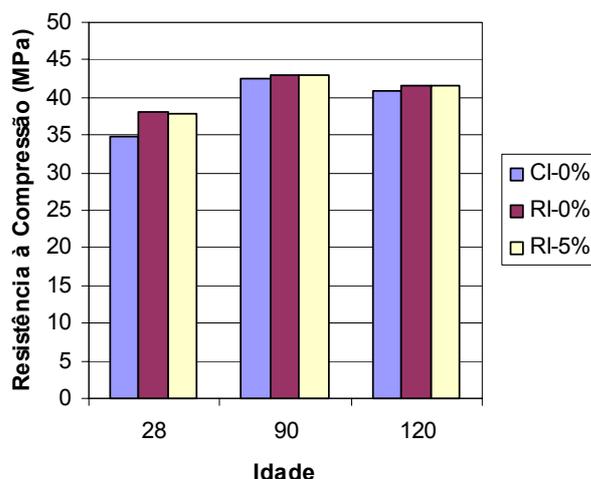


Figura 5.28 – Resistência à compressão axial para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%

Os resultados obtidos para a resistência à compressão axial aos 28 dias, apesar de terem mantido a mesma tendência em relação a Primeira Fase (**traço de agregados graúdos reciclados sem adição de látex apresenta maior resistência à compressão axial que o traço com agregados naturais, e a adição de látex em pequenas proporções – 5% na Segunda Fase – vem reduzir um pouco o valor da resistência à compressão, que ainda assim se mantém maior que no traço com agregados naturais**), apresentaram queda geral em torno de 10% nos valores de resistência obtidos, certamente por influências externas, apesar dos cuidados tomados.

A Tabela 5.24 apresenta os resultados dos ensaios de corrosão e perda de massa das armaduras nos concretos a partir dos 28, 90 e 120 dias de idade, respectivamente, e as Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 representam os gráficos de intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 28, 90 e 120 dias para os traços CI-0%, RI-0% e RI-5%.

Tabela 5.24 – Resistência à corrosão e perda de massa aos 28, 90 e 120 dias

Traço	28 dias		90 dias		120 dias	
	Tempo de Corrosão (h)	Perda de Massa (%)	Tempo de Corrosão (h)	Perda de Massa (%)	Tempo de Corrosão (h)	Perda de Massa (%)
CI-0%	255	1,19	316	1,15	280	3,53
RI-0%	230	1,90	314	1,07	330	2,04
RI-5%	183	3,15	340	0,66	400	1,29

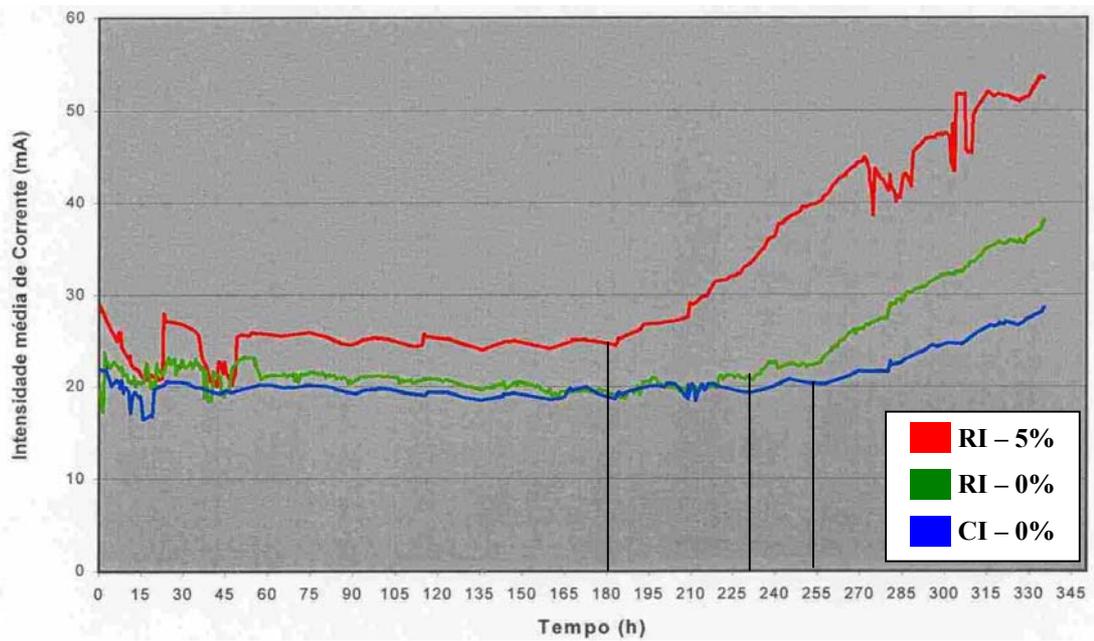


Figura 5.29 – Intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 28 dias

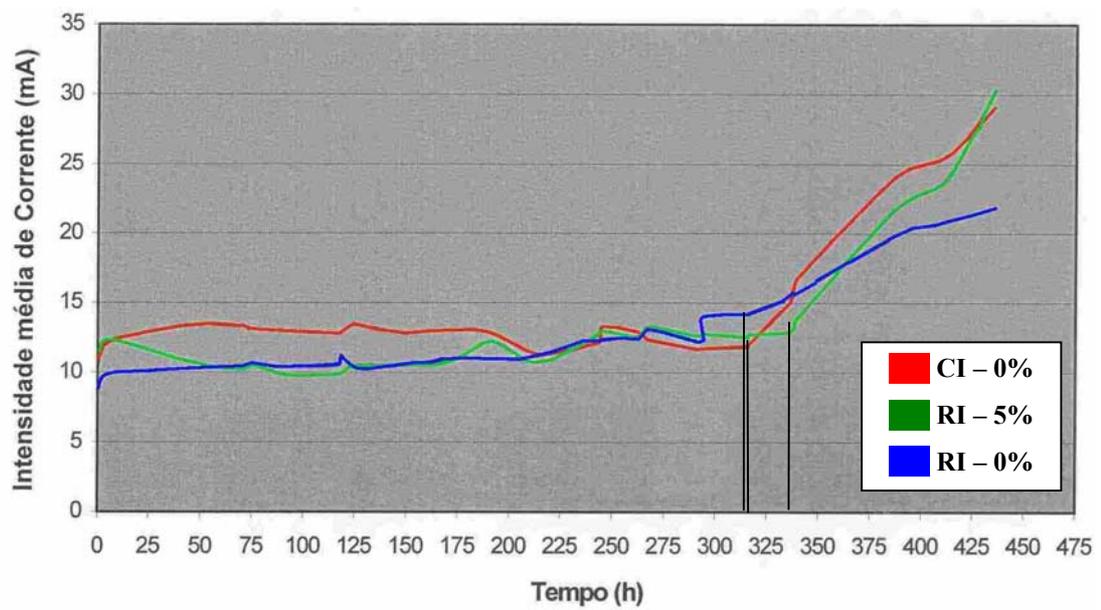


Figura 5.30 – Intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 90 dias

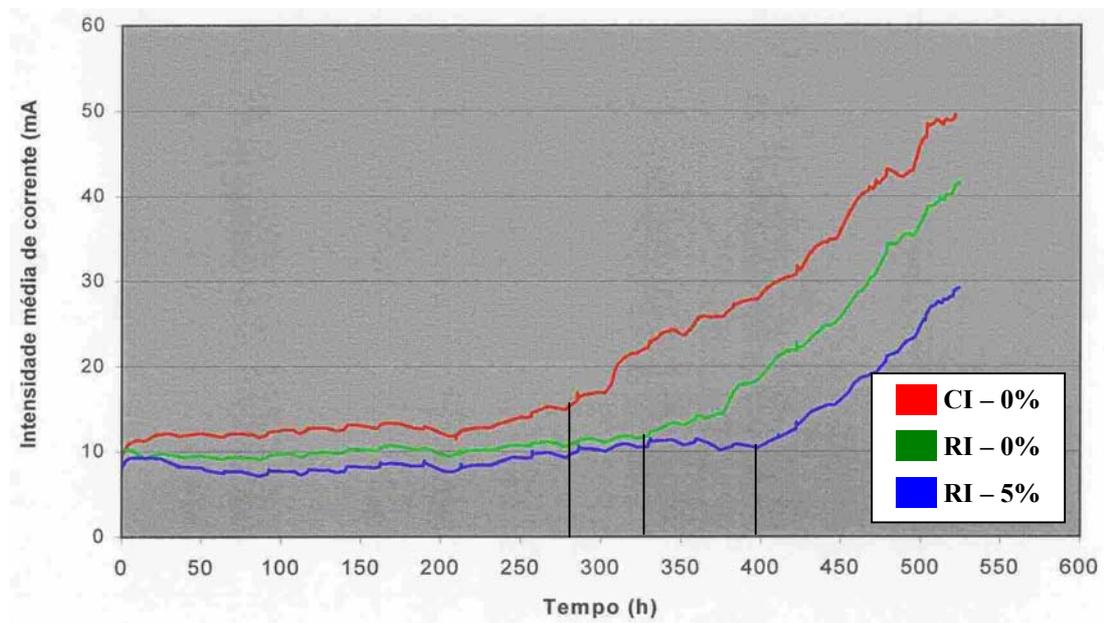


Figura 5.31 – Intensidade da corrente de corrosão x tempo aos 120 dias

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam os gráficos de comparativos de tempo de corrosão e perda de massa para os três traços, aos 28, 90 e 120 dias.

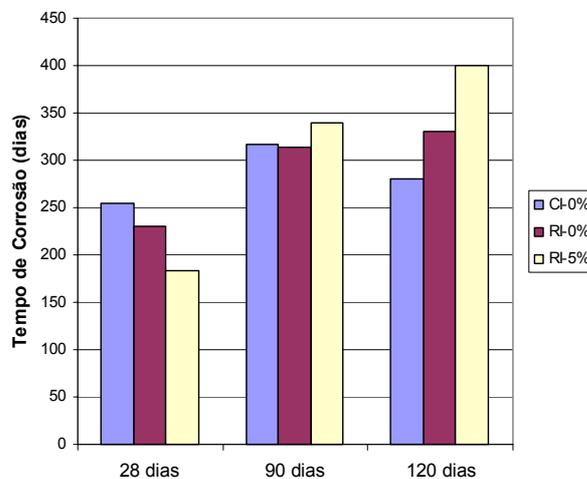


Figura 5.32 – Tempo de corrosão aos 28, 90 e 120 dias

Como pode-se observar, a adição de látex na proporção de 5% sobre a massa de cimento promoveu um aumento considerável no tempo de corrosão com o aumento da idade dos testemunhos, chegando a propiciar um aumento de 119% de 28 para 120 dias. Esta mesma tendência de aumento no tempo de corrosão com o aumento da idade é comum ao traço de agregados graúdos reciclados sem adição de

látex (RI-0%), mas para o traço de agregados naturais (CI-0%) o tempo de corrosão aos 120 dias diminuiu misteriosamente.

Analisando-se comparativamente os três traços em uma mesma idade, pode-se perceber que aos 28 dias o traço de agregados graúdos reciclados com adição de 5% de látex (RI-5%) foi o que apresentou menor tempo de corrosão. “Isso pode ser explicado pelo fato de a ligação entre a matriz aglomerante e os agregados estar em formação no primeiro mês de idade. Pesquisas mostraram uma melhora das propriedades dos concretos modificados com látex até três meses de idade. OKBA *et al.* (1997) também verificaram que a adição de látex promove um acréscimo na resistência à penetração dos agentes agressivos com o aumento da idade do ensaio de 28 para 56 e 90 dias” (CARVALHO, 2000). Já aos 90 e 120 dias, o traço RI-5% foi o que propiciou o maior tempo de corrosão dentre os demais.

Com relação à perda de massa, esta é diretamente proporcional ao tempo do ensaio e à capacidade do concreto em proteger a armadura. Portanto, em determinados momentos ocorreu de a perda de massa aumentar significativamente com o aumento da idade dos testemunhos, ainda que o concreto em idades maiores (principalmente no caso do traço RI-5%) promovesse maior proteção à armadura. Contudo, a comparação dos três traços em uma mesma idade comprova as tendências apresentadas pelo tempo de corrosão, onde a adição de látex mais uma vez comprovou sua eficácia na proteção da armadura aos 120 dias, superando em muito os traços RI-0% e CI-0%.

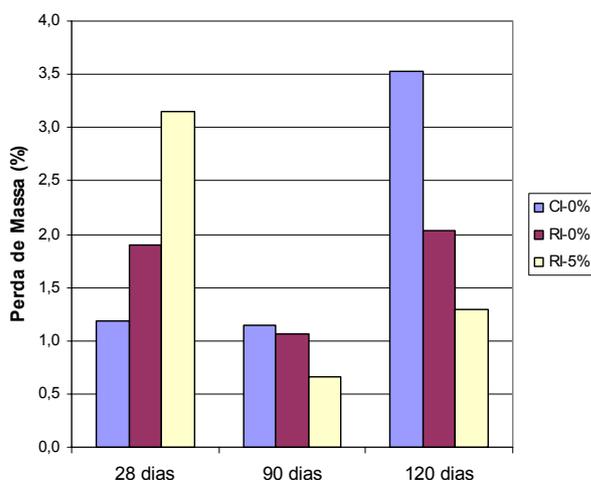


Figura 5.33 – Perda de massa aos 28, 90 e 120 dias

A seguir são apresentadas figuras referentes aos resultados dos ensaios em célula de corrosão acelerada aos 28, 90 e 120 dias.



Figura 5.34 – Exemplares fissurados após 28 dias de ensaio



Figura 5.35 – Exemplares rompidos dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (28 dias)



Figura 5.36 – Armaduras dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (28 dias)

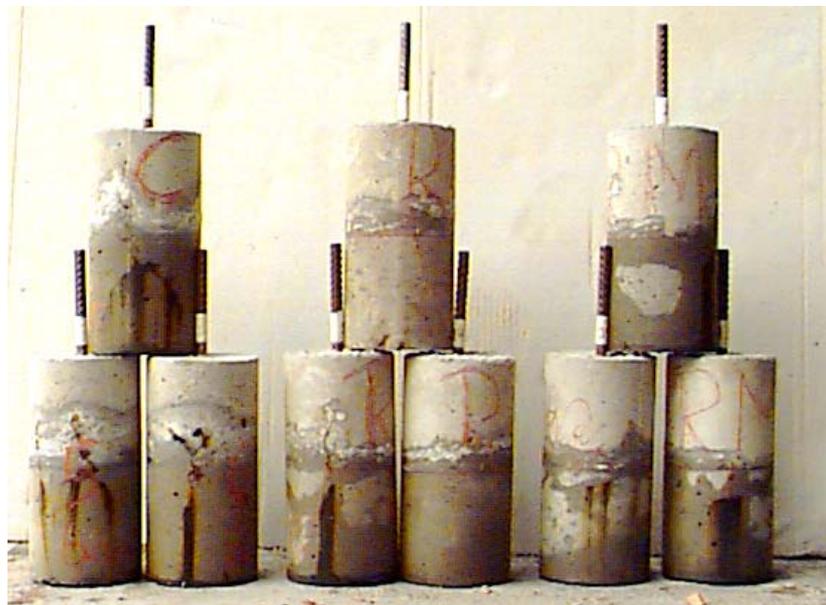


Figura 5.37 – Exemplos fissurados após 90 dias de ensaio



Figura 5.38 – Exemplos rompidos dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (90 dias)



Figura 5.39 – Armaduras dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (90 dias)



Figura 5.40 – Exemplos fissurados após 120 dias de ensaio



Figura 5.41 – Exemplos rompidos dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (120 dias)



Figura 5.42 – Armaduras dos concretos tipo CI-0%, RI-0% e RI-5%, da esquerda para a direita, após o ensaio de corrosão (120 dias)

5.3.1.5. Conclusões do Ensaio de Corrosão

O ensaio intitulado “Ensaio de Corrosão em Célula de Corrosão Acelerada”, que acabou por englobar outras características relacionadas tais como absorção de água, índice de vazios e resistência mecânica, veio comprovar a eficiência da adição de látex estireno-butadieno em concretos de agregados graúdos reciclados, ainda que em quantidade bastante reduzida em relação ao praticado em pesquisas semelhantes (5% sobre a massa de cimento), através dos seguintes resultados:

- Diminuindo da absorção em relação ao traço de agregados graúdos reciclados sem adição de látex (RI-0%) e praticamente igualando o valor obtido para o traço de agregados convencionais (CI-0%);
- Diminuindo do índice de vazios em relação ao traço de agregados graúdos reciclados sem adição de látex (RI-0%) e praticamente igualando o valor obtido para o traço de agregados convencionais (CI-0%);
- Mantendo as resistências mecânicas dos concretos analisados em um patamar de relativa igualdade;
- Aumentando sobremaneira o tempo de aparecimento de fissuras induzidas por processo corrosivo acelerado em meio equivalente ao ambiente marítimo das

costas brasileiras para as idades de 90 e 120 dias, muito superior aos demais traços analisados; e

- Reduzindo a perda de massa induzida pelo processo corrosivo acelerado.

Este ensaio veio também demonstrar que apesar da resistência mecânica atingir patamares esperados aos 28 dias de idade, a proteção promovida pela adição de látex necessita idades mais avançadas para maximizar seus efeitos, quando então, promove proteções superiores até mesmo aos concretos com agregados naturais, que em baixas idades, acaba por superar os traços modificados com látex.

Desta forma, fica comprovada a eficiência quanto ao desempenho em ambiente agressivo (mensurado através deste ensaio) dos concretos de agregados graúdos reciclados produzidos com entulho de construção e demolição modificados com látex estireno-butadieno na proporção de 5% sobre a massa de cimento.

5.3.2. ENSAIO DE ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO

5.3.2.1. Introdução

O concreto armado é um material composto, constituído por concreto simples e barras de aço. Os dois materiais constituintes devem agir solidariamente para resistir aos esforços a que forem submetidos e devem ser dispostos de maneira a utilizar econômica e racionalmente as resistências próprias de cada um deles.

O princípio básico das peças de concreto armado é combinar o concreto e o aço de maneira tal que, em uma mesma peça, os esforços de tração sejam absorvidos pelo aço e os esforços de compressão, pelo concreto. As barras da armadura devem absorver, em primeira instância, os esforços de tração que surgem nas peças submetidas à flexão ou à tração, já que o concreto possui alta resistência à compressão, porém pequena resistência à tração. É através da aderência entre o concreto e as barras da armadura que os esforços de tração são transmitidos ao concreto.

“Pode-se definir aderência como sendo o mecanismo de transferência de tensões que existem na interface entre a barra de aço da armadura e o concreto que a envolve. Esse fenômeno é tão importante que a própria definição de concreto armado se condiciona a sua existência. A forma usual de consideração dessa ligação tem sido

por meio da definição de uma tensão de aderência, e sua distribuição ao longo da interface tem sido exaustivamente investigada, já que seu conhecimento é essencial para a compreensão do comportamento de ancoragens retas, dos ganchos e das emendas” (FERNANDES, 2000).

Três componentes constituem o fenômeno de aderência entre aço e concreto: a aderência por adesão (R_{b1}), a aderência por atrito (R_{b2}) e a aderência mecânica (R_{b3}). A magnitude destas parcelas é tal que $R_{b1} < R_{b2} < R_{b3}$.

A aderência por adesão origina-se das reações físico-químicas entre a superfície de interface entre o aço e o concreto durante a pega do cimento. Esta parcela da aderência pode ser percebida quando da separação de um bloco de concreto moldado sobre uma chapa metálica.

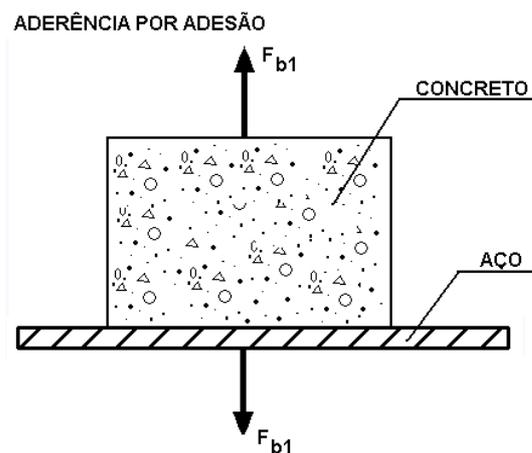


Figura 5.43 – Aderência por adesão

A aderência por atrito é resultante do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, que por sua vez, depende da rugosidade superficial da barra, e das tensões que o concreto exerce sobre a seção transversal da armadura devido a fenômenos tais como retração e confinamento. Essas tensões e a rugosidade da barra de aço mobilizam esforços que constituem a aderência por atrito. A parcela da aderência por atrito pode ser percebida, aparecendo conjuntamente com a aderência por adesão, em um ensaio de arrancamento de uma barra de aço imersa em um testemunho de concreto.

ADERÊNCIA POR ATRITO

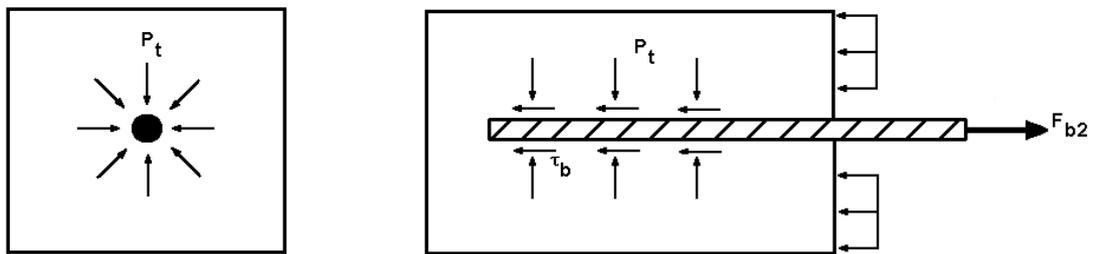


Figura 5.44 – Aderência por atrito

A aderência mecânica, parcela mais significativa da aderência entre aço e concreto, ocorre devido às saliências (mossas) presentes nas barras de aço, e é função de sua forma. A parcela de aderência mecânica é mobilizada quando as mossas impedem o deslocamento do concreto na interface com a armadura.

ADERÊNCIA MECÂNICA

BARRAS LISAS (CA-25)

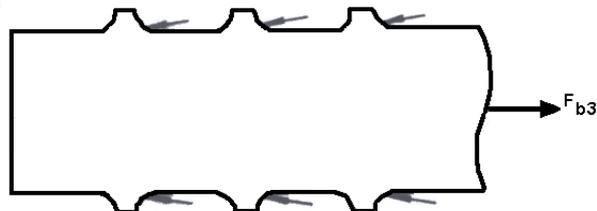
BARRAS CORRUGADAS
(CA-50, CA-60)

Figura 5.45 – Aderência mecânica

Segundo GIONGO (1999), a tensão de aderência nos elementos estruturais de concreto armado atuam sempre que houver variação de deformação nas barras de aço e, por conseguinte, variação de tensão em um segmento desta.

FERNANDES (2000) traz uma relação das causas das tensões de aderência e dos fatores que influenciam na aderência.

Causas das tensões de aderência:

- Ações externas – influenciam alterações das tensões de tração e compressão no aço;
- Fissuras – acarretam um acréscimo de tensões na armadura, aumentando, por conseguinte, as tensões de aderência;
- Forças de ancoragem nas extremidades das barras – pelas tensões de aderência, a força atuante na barra é transferida ao concreto;
- Variações de temperatura – a maior condutibilidade térmica do aço induz a uma deformação maior das barras de aço em relação ao concreto, elevando as tensões de aderência e podendo ocasionar a ruptura do cobrimento;
- Retração do concreto – é impedida pela barra de aço, ocasionando tensões de tração no concreto e tensões de compressão na armadura; e
- Deformação lenta do concreto em peças comprimidas de concreto armado (pilares) – devido ao encurtamento causado pela deformação lenta, a armadura sofre um acréscimo de tensões de compressão, aliviando o concreto.

Fatores que influenciam na aderência:

- Características do concreto e de seus componentes;
- Classe do aço;
- Tensão de escoamento do aço (se houver escoamento da armadura);
- Cobrimento e espaçamento da armadura;
- Diâmetro da armadura;
- Comprimento de ancoragem;
- Tipo e geometria da nervura;
- Efeitos de confinamento;
- Quantidade e posição da armadura transversal;
- Posição da armadura em relação a concretagem;
- Repetição do carregamento;
- Número de ciclos e amplitude do carregamento cíclico;
- Tipo, velocidade e duração do carregamento;
- Temperatura; e
- Revestimento da armadura.

As alterações nas propriedades do concreto, citadas dentre os fatores que influenciam a aderência como “características do concreto e de seus componentes”, certamente são bastante significativas com relação à aderência entre aço e concreto. Os concretos analisados nesta pesquisa empregando agregados reciclados e látex estireno-butadieno comprovaram sua competência em termos de resistência mecânica através dos resultados de ensaios de compressão axial e tração na compressão diametral aqui apresentados e aqueles apresentados por diversos autores citados nas referências bibliográficas, mas em relação a aderência com a armadura, pouco se conhece. Na bibliografia consultada são raros os autores que analisaram as propriedades de aderência aço-concreto, quer em concretos com agregados reciclados, quer em concretos com adição de látex. A análise desta propriedade visa explorar o emprego prático de concretos estruturais de agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno, sendo empregados como concreto estrutural armado.

Segundo FERNADES (2000), A eficiência da ligação entre aço e concreto pode ser convenientemente quantificada através da relação tensão x deslizamento, a qual representa a variação da tensão que surge na interface do aço com o concreto, relacionada ao deslocamento relativo entre a barra da armadura e o concreto envolvente. Valores máximos destes deslizamentos podem ser usados para definir a destruição da aderência, geralmente associados a um certo estado de deformações e fissuração.

A ruptura da aderência entre aço e concreto para carregamentos monotônicos (objetos do ensaio a ser realizado nesta pesquisa), pode ocorrer por arrancamento direto da barra, quando há confinamento suficiente da barra da armadura, e por fendilhamento do cobrimento do concreto, quando o cobrimento é insuficiente para garantir o arrancamento da barra.

Sendo a aderência um dos principais condicionantes do emprego do concreto como elemento estrutural através do conceito de concreto armado, justifica-se a análise desta propriedade na pesquisa aqui apresentada.

5.3.2.2. Modelos para o Comportamento da Aderência e Prescrições das Normas sobre Aderência

Segundo TASSIOS *apud* FERNANDES (2000), o modelo de comportamento do desenvolvimento de tensões com seus respectivos deslocamentos se encontra na Figura 5.46.

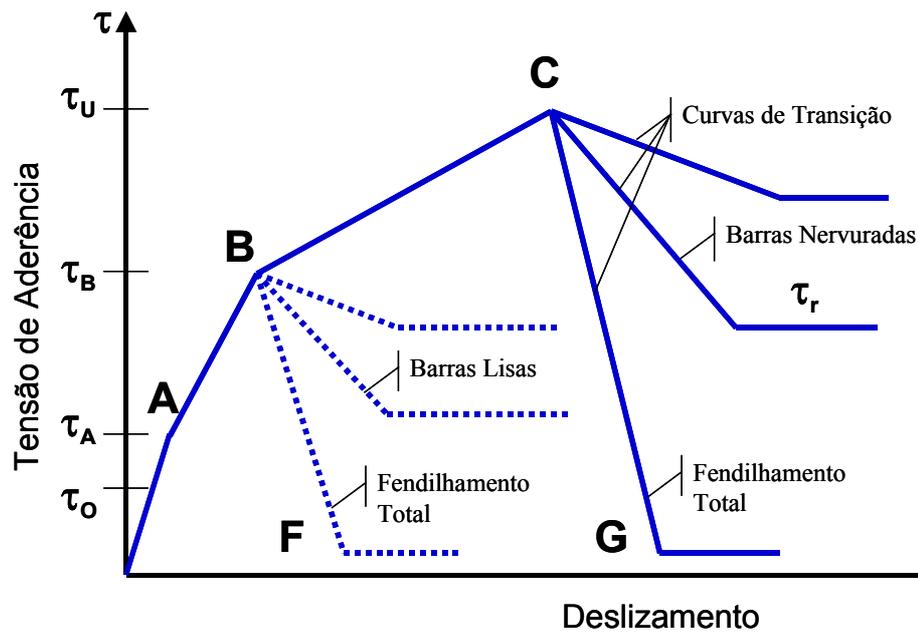


Figura 5.46 – Curva teórica da tensão de aderência x deslizamento

Antes da tensão de aderência por adesão ser mobilizada, ocorrem deslizamentos extremamente pequenos, da ordem de poucos microns. Com o aumento do carregamento, ocorre a ruptura por adesão, caracterizada pelo nível de tensão τ_0 , e a posterior mobilização do engrenamento mecânico tanto entre a pasta de cimento e as irregularidades microscópicas da superfície da armadura, no caso de barras lisas, como entre o concreto e as nervuras, no caso de barras nervuradas. Após a tensão τ_A , surgem as primeiras fissuras internas (transversais e diagonais) devido às tensões de tração da força de arrancamento ultrapassarem a resistência à tração do concreto. A partir deste ponto, a rigidez do concreto é reduzida, caracterizada por uma inclinação menor da curva.

No trecho AB ocorre a perda parcial do engrenamento e é introduzida então uma componente de atrito para contribuir com a aderência. À medida que o

carregamento continua crescendo, as fissuras de fendilhamento se propagam radialmente e longitudinalmente até a tensão τ_B ser alcançada. A partir deste nível, as barras lisas são perfeitamente arrancadas deixando um orifício quase intacto, enquanto o concreto, no caso de barras nervuradas, rompe por fendilhamento quando não há confinamento suficiente (ramo BF da curva).

Após este estágio, para as barras nervuradas, o único mecanismo de aderência restante é o atrito, que também contribuía anteriormente. Sob as condições de ensaio de deformação controlada, pode-se capturar o comportamento da aderência após a ruptura. Após o pico do diagrama (ponto C), ocorre um decréscimo brusco da curva, até um certo valor, que caracteriza a resistência residual de aderência τ_r . Contudo, quando o fendilhamento se desenvolve ao longo de todo o cobrimento, a tensão de aderência residual é quase nula.

Prescrições do CEB-FIP MC 1990

A modelação matemática para representação das tensões de aderência entre o concreto e a armadura está apresentada abaixo, em função do deslocamento relativo “S”.

$$\tau = \tau_{bu} \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad 0 \leq S \leq S_1 \quad (5.6)$$

$$\tau = \tau_{bu} \quad S_1 < S \leq S_2 \quad (5.7)$$

$$\tau = \tau_{bu} - (\tau_{bu} - \tau_f) \left(\frac{S - S_2}{S_3 - S_2} \right) \quad S_2 < S \leq S_3 \quad (5.8)$$

$$\tau = \tau_f \quad S_3 < S \quad (5.9)$$

onde:

τ_{bu} - valor último da tensão de aderência;

S – Deslocamento relativo da armadura.

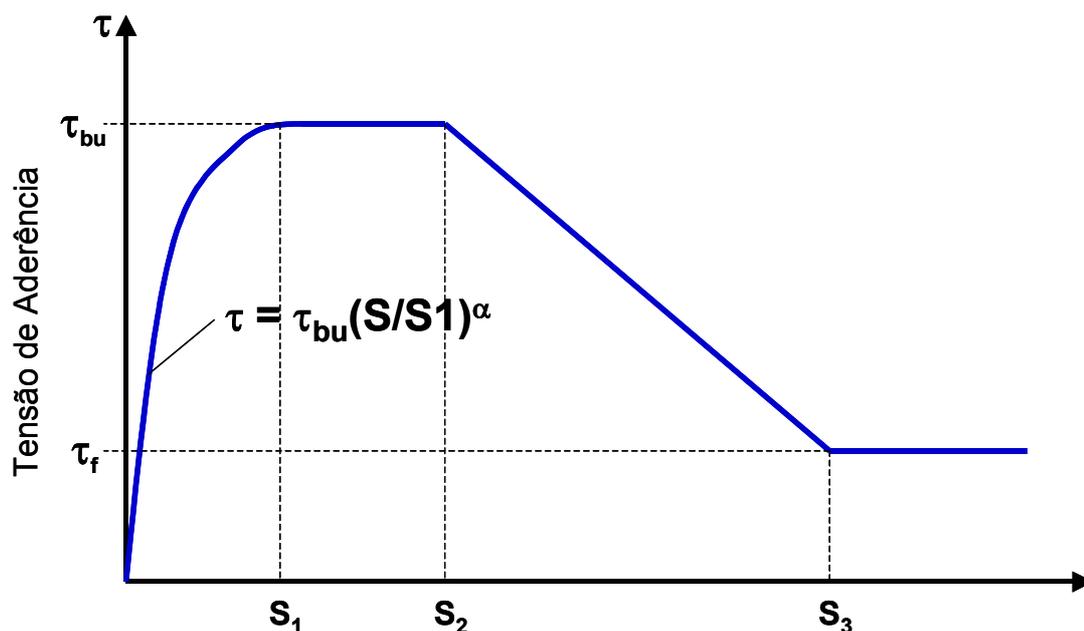


Figura 5.47 – Modelo matemático da relação entre Tensão de Aderência e Deslizamento proposto pelo CEB-FIP MC 1990

Os valores dos parâmetros S_1 , S_2 , S_3 , α e τ_{bu} são apresentados na Tabela 5.25, para armadura nervurada em regiões de concreto confinado e não-confinado.

Tabela 5.25 – Parâmetros para barra nervurada propostos pelo CEB-FIP MC 1990

Parâmetro	Concreto não-confinado (Ruptura por Fendilhamento)		Concreto confinado (Ruptura por arrancamento)	
	Condições de Aderência		Condições de Aderência	
	Boas	Todos os outros casos	Boas	Todos os outros casos
S_1	0,6 mm	0,6 mm	1,0 mm	1,0 mm
S_2	0,6 mm	0,6 mm	3,0 mm	3,0 mm
S_3	1,0 mm	2,5 mm	Distância entre nervuras	
α	0,4	0,4	0,4	0,4
τ_{bu}	$2,0\sqrt{f_{ck}}$	$1,0\sqrt{f_{ck}}$	$2,5\sqrt{f_{ck}}$	$1,5\sqrt{f_{ck}}$
τ_f	$0,15\tau_{bu}$	$0,15\tau_{bu}$	$0,40\tau_{bu}$	$0,40\tau_{bu}$

Prescrições do EUROCODE 2

Os valores determinados pelo EUROCODE 2 para condições de boa aderência são apresentados na Tabela 5.26. Para as demais situações, os valores devem ser multiplicados por um coeficiente de 0,70.

Os valores apresentados na Tabela 5.26 são oriundos das seguintes equações:

$$\tau_{bu} = \frac{0,36\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \quad \text{barras lisas} \quad (5.10)$$

$$\tau_{bu} = \frac{2,25f_{ctk}}{\gamma_c} \quad \text{barras nervuradas} \quad (5.11)$$

f_{ck} = Resistência característica a compressão aos 28 dias em corpos-de-prova cúbicos

f_{ctk} = Resistência característica a tração

$\gamma_c = 1,5$

Tabela 5.26 – Valores da tensão de aderência para condições de boa aderência segundo o EUROCODE 2

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
Barras Lisas	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Barras Nervuradas	1,6	2,0	2,3	2,7	3,0	3,4	3,7	4,0	4,3

Prescrições da NB 1/78 (NBR 6118)

“Embora as tensões de aderência não sejam uniformemente distribuídas ao longo do comprimento da barra, para o cálculo do comprimento de ancoragem, adota-se o valor último da tensão de aderência (τ_{bu}), constante, para barras lisas e nervuradas” (GIONGO, 1999).

Para a NB 1/78, as condições de boa e má aderência, segundo a posição das barras da armadura, são apresentadas na Figura 5.48. Para as situações não contempladas na Figura 5.48, considera-se sempre como zona de má aderência.

As equações prescritas pela NB1/78 referem-se ao valor da tensão de aderência para barras situadas em zonas de boa aderência. Para zonas de má aderência, basta dividir o valor de τ_{bu} por 1,5.

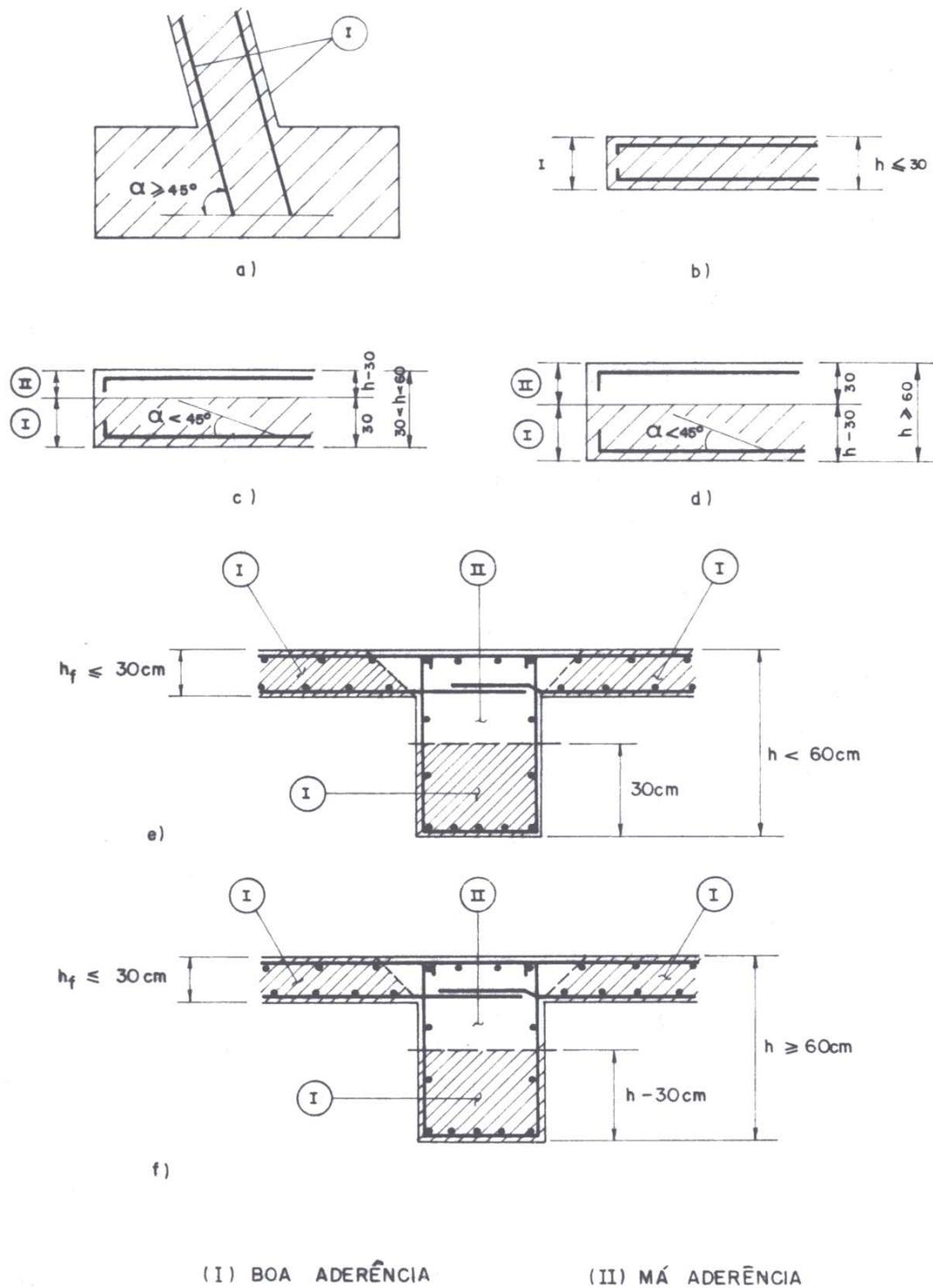


Figura 5.48 – Zonas de boa e má aderência entre armadura e concreto

$$\tau_{bu} = 0,28\sqrt{f_{cd}} \qquad \eta_b \leq 1,0 \qquad (5.12)$$

$$\tau_{bu} = 0,42\sqrt[3]{f_{cd}^2} \qquad \eta_b \geq 1,5 \qquad (5.13)$$

5.3.2.3. Metodologia

O procedimento empregado nos ensaios de aderência entre concreto e armadura é baseado nas prescrições da Norma ASTM C234/91a (*Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel*).

Para este ensaio foram mantidas as mesmas diretrizes empregadas no ensaio de corrosão no que tange a escolha dos traços a serem utilizados, ou seja, o traço I com agregados naturais e grãos reciclados, ou seja, CI e RI.

Quanto à porcentagem de modificação (adição de látex sobre a massa de cimento) também foram mantidos os padrões do ensaio de corrosão, ou seja, foi adicionada uma quantia de 5% de látex sobre a massa de cimento ($l/c = 5\%$) no traço de agregados grãos reciclados (RI-5%).

O mesmo se mantém com relação a forma de cura. Foi empregada a forma de cura 3 da Primeira Fase desta pesquisa (6 dias de cura em imersão + 21 dias de cura ao ar). **Portanto, os traços empregados, as porcentagens de modificação e a forma de cura são exatamente iguais àquelas empregadas no ensaio de corrosão.**

Com este ensaio, analisou-se comparativamente a influência dos diversos tipos de concretos com base na aderência entre aço e concreto, comparando-se os efeitos promovidos pelos agregados grãos reciclados (traço RI-0%) e pelos agregados grãos reciclados e pela adição do látex estireno-butadieno (traço RI-5%) em comparação ao traço de concreto com agregados naturais sem adição de látex (CI-0%).

Os ensaios de aderência entre aço e concreto foram desenvolvidos fora dos laboratórios da EESC/USP, por empresa especializada em controle tecnológico de concreto armado, bastante conhecida no mercado por sua competência em equipamentos, mão-de-obra e rígida aplicação de procedimentos de ensaio. Optou-se por conduzir a pesquisa desta forma pois os laboratórios da EESC/USP não possuíam o conjunto de equipamentos e fôrmas segundo os padrões da Norma que orientou este procedimento experimental.

Desta forma, os principais materiais empregados (cimento, agregados grãos reciclados e látex estireno-butadieno) foram transportados até a sede da empresa, que

fica em São Paulo (SP), e os demais materiais (agregados naturais, água e barras de aço) foram obtidos na região.

5.3.2.4. Ensaio de Aderência

Segundo a Norma em que se baseia o ensaio, a ASTM C234/91a, seu procedimento se aplica a comparação de concretos com base na aderência da armadura e seu procedimento consiste em moldar corpos-de-prova e ensaiá-los sob esforço de arrancamento da barra, monitorando os deslocamentos da mesma em relação ao testemunho.

Dois tipos de fôrmas são necessárias na moldagem dos corpos-de-prova: uma para testemunhos cúbicos de 150mm de aresta contendo uma barra vertical imersa, e outra para testemunhos prismáticos de 150 x 150 x 300mm contendo duas barras imersas horizontalmente. As barras de aço para armadura recomendadas no procedimento são de 19mm, mas podem ser de qualquer diâmetro, desde que as fôrmas estejam preparadas para acomodá-las durante a moldagem. Estas fôrmas e respectivas formas de moldagem são apresentadas na Figura 5.49.

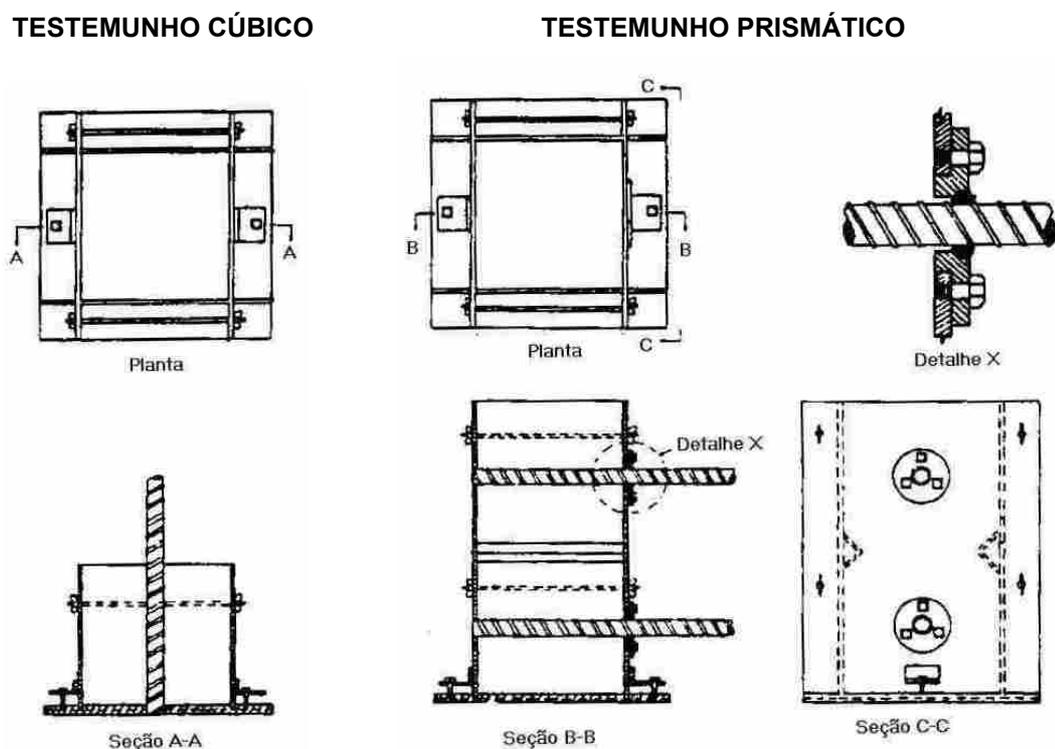


Figura 5.49 – Fôrmas e situação de moldagem dos testemunhos

Após moldagem, desforma e cura dos corpos-de-prova, os testemunhos contendo barras horizontais são rompidos em um procedimento semelhante ao ensaio de flexão de prismas de concreto, de maneira a tornarem-se dois cubos de 150mm de aresta, como o primeiro testemunho. Duas cantoneiras fixadas nas fôrmas do testemunho prismático (vide seção C-C da Figura 5.49) formam um plano enfraquecido onde a ruptura ocorre. Esta separação entre os testemunhos ocorre entre os 7 e 14 dias após a moldagem dos testemunhos.

O ensaio foi conduzido com a aplicação de parcelas de carregamento enquanto o deslizamento da barra era monitorado até seu arrancamento ou até que ocorresse um deslizamento significativo. A Figura 5.50 apresenta os aparatos e esquemas de ensaio segundo a Norma ASTM C234/91a.

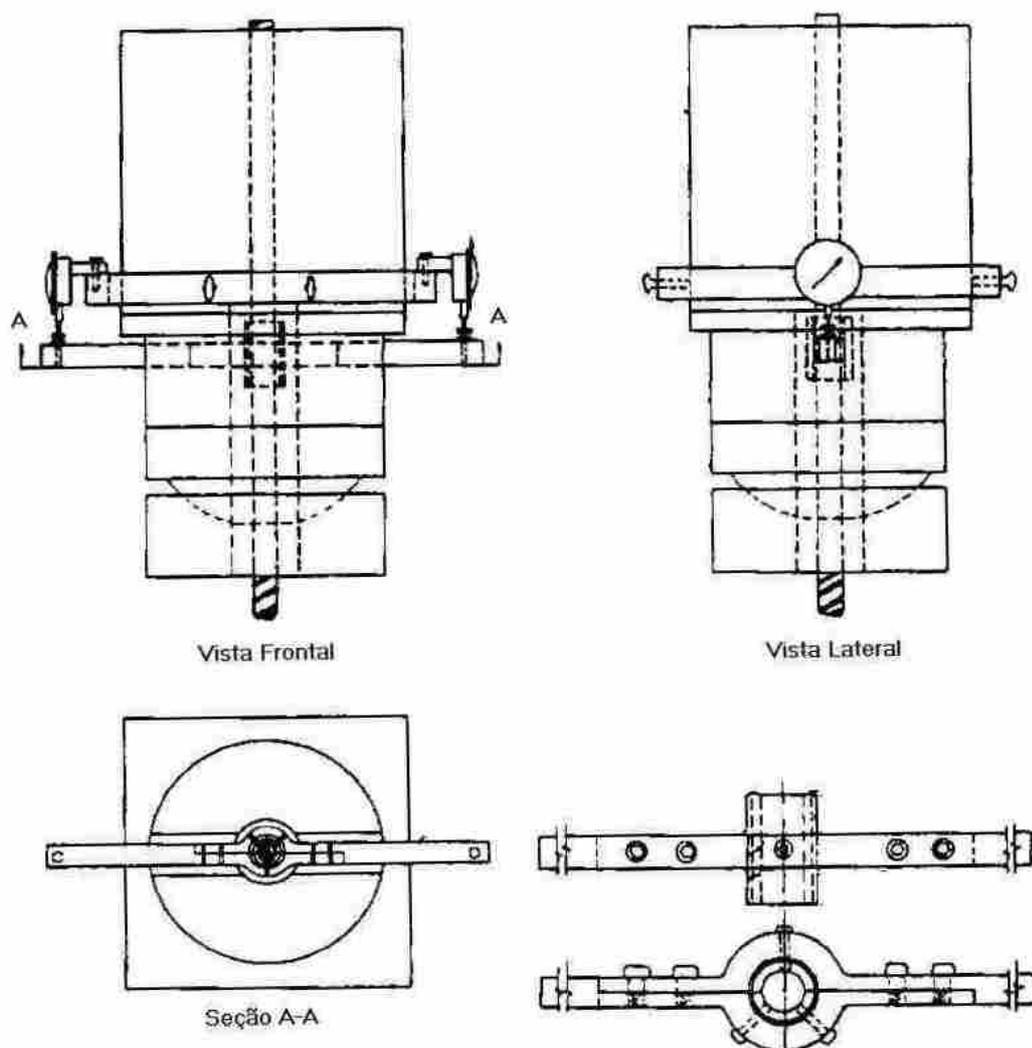


Figura 5.50 – Esquema geral e aparatos do ensaio de aderência entre aço e concreto

A tensão de aderência pode ser calculada tomando-se a carga em um determinado ponto do ensaio e dividindo-a pela superfície nominal da barra com comprimento imerso no concreto. Para a barra de bitola 19mm imersa 150mm no testemunho, a superfície a ser empregada no cálculo foi tomada como 90cm^2 ($D \cdot \pi \cdot L = 1,905 \cdot \pi \cdot 15,0$).

O deslizamento da barra foi calculado como a média das leituras dos dois relógios de medição corrigindo-se o alongamento da barra na distância entre a superfície de reação do cubo de concreto e o ponto onde o dispositivo de leitura estava fixado. Para o cálculo deste alongamento, a seção transversal da barra de bitola 19mm foi tomada como sendo 285mm^2 ($\pi \cdot D^2 / 4 = \pi \cdot 19,05^2 / 4$), e o módulo de elasticidade, assumido como sendo 205GPa. Teoricamente, uma correção similar é necessária para a deformação por compressão do concreto entre a superfície de apoio e o local onde o quadro apóia os relógios de medição. Este deslocamento, no entanto, é muito pequeno e foi desconsiderado, segundo orientação do Procedimento empregado.

Foram também moldados 10 corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20cm para cada traço de concreto para serem rompidos em ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral.

5.3.2.5. Análise dos Resultados

A seguir são apresentados os valores obtidos para a resistência a compressão axial e a tração por compressão diametral, ambos aos 28 dias nos corpos-de-prova cilíndricos dos traços ensaiados, obtidas a partir de uma série de 5 corpos-de-prova para cada traço.

Tabela 5.27 – Resistência à compressão axial aos 28 dias

Traço	f_{c28} (MPa)
CI-0%	32,1
RI-0%	35,0
RI-5%	35,9

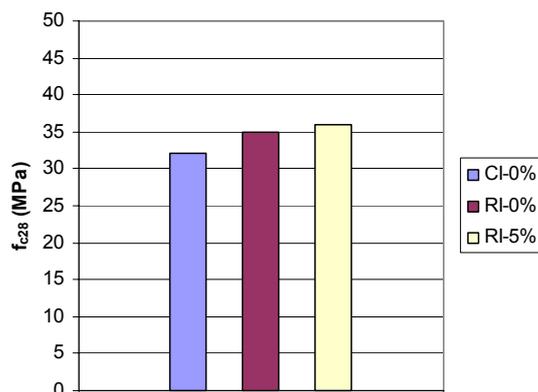


Figura 5.51 – Resistência à compressão axial aos 28 dias

Tabela 5.28 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Traço	f_{tD28} (MPa)
CI-0%	3,363
RI-0%	3,068
RI-5%	3,125

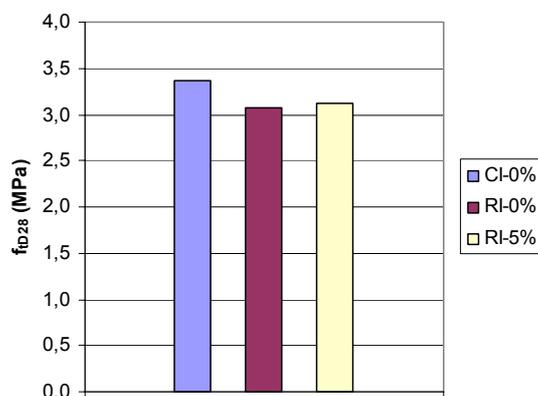


Figura 5.52 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

As Figuras 5.53, 5.54 e 5.55 trazem os gráficos comparativos entre barras horizontais e verticais para cada traço de concreto (RI-0%, RI-5% e CI-0%, respectivamente). As Figuras 5.56 e 5.57 trazem os gráficos comparativos entre os tipos de concreto analisados, para barras horizontais e verticais, respectivamente.

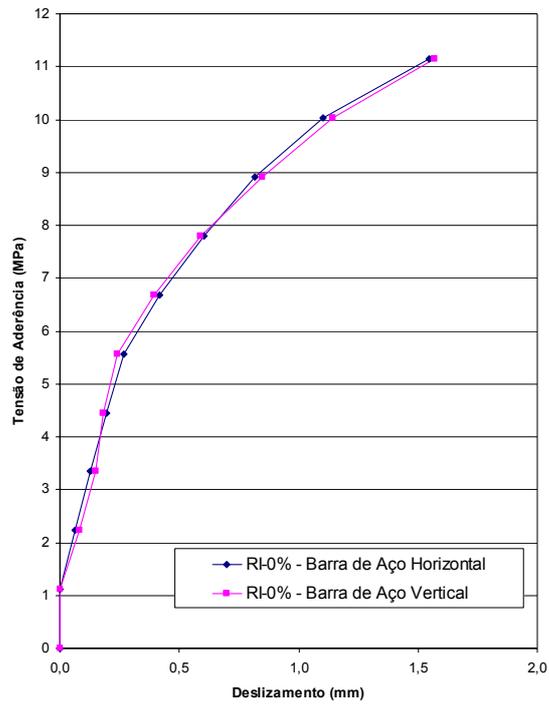


Figura 5.53 – Curva Tensão de Aderência x Deslizamento (traço RI-0%)

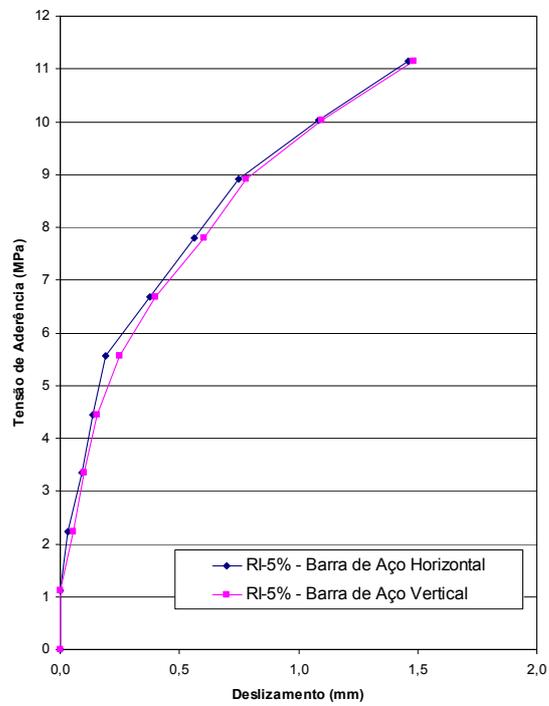


Figura 5.54 – Curva Tensão de Aderência x Deslizamento (traço RI-5%)

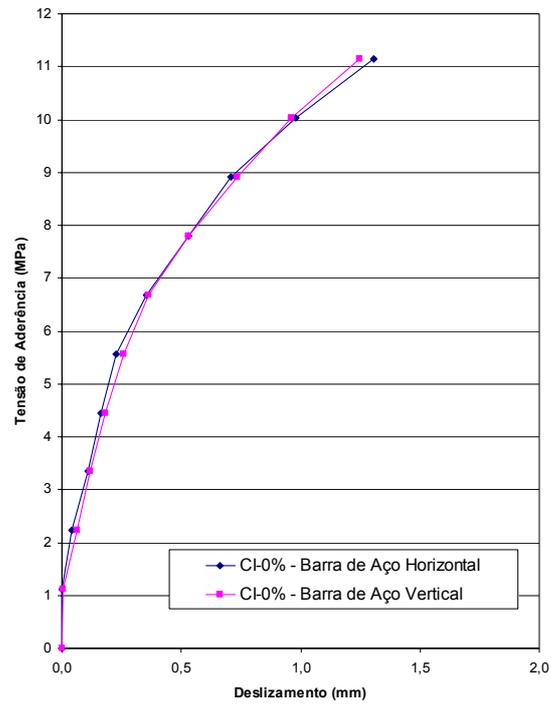


Figura 5.55 – Curva Tensão de Aderência x Deslizamento (traço CI-0%)

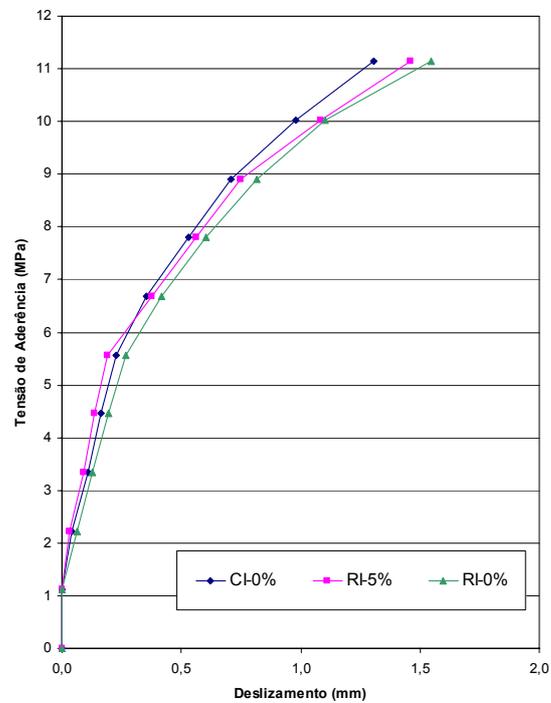


Figura 5.56 – Curva Tensão de Aderência x Deslizamento para barras horizontais

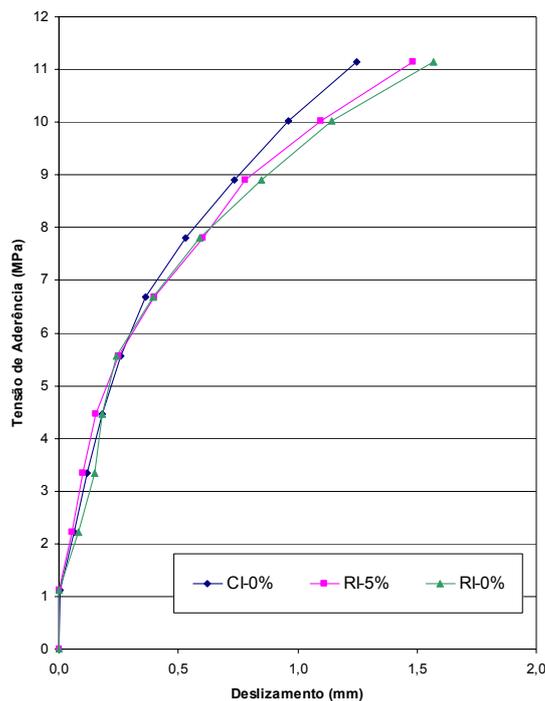


Figura 5.57 – Curva Tensão de Aderência x Deslizamento para barras verticais

Conforme apresentado graficamente, não foi possível determinar τ_{bu} pois o ensaio de aderência entre aço e concreto foi realizado com carregamento constante, de forma que as barras foram arrancadas entre aplicações de quinhões de carga. Contudo, este não era o objetivo do ensaio, e sim, analisar comparativamente o comportamento dos diferentes tipos de concreto quanto a aderência com as barras de aço.

5.3.2.6. Conclusões do Ensaio de Aderência

O comportamento das curvas de tensão de aderência x deslizamento das barras de aço de 19mm foi muito semelhante em todos os traços, comportamento este que pode ser observado nas Figuras 5.56 e 5.57.

O traço CI-0% sempre apresentou desempenho superior aos demais traços, provavelmente devido a maior resistência à tração por compressão diametral apresentada por este traço, ainda que a resistência à compressão axial tenha sido inferior aos demais.

Outra característica interessante de se observar é que para todos os traços, os corpos-de-prova com barras verticais e os corpos-de-prova com barras horizontais apresentaram também comportamentos bastante semelhantes, com os corpos-de-prova com barras verticais apresentando desempenho levemente inferior ao outro.

Os resultados do ensaio de aderência aço-concreto mostraram que, em princípio, a adição de 5% de látex sobre a massa de cimento melhora as propriedades de aderência do aço com o concreto em relação ao concreto sem adição de látex e com mesmo tipo de agregado. Por outro lado, o emprego de agregados reciclados tende a piorar sensivelmente o desempenho da aderência entre aço e concreto, segundo as condições empregadas nestes ensaios e com os agregados reciclados analisados e estudados, em relação aos concretos com agregados naturais, ainda que promova ganhos na resistência à compressão axial.

6. CONCLUSÃO

As conclusões deste trabalho foram sendo todas apresentadas ao longo do mesmo, uma vez que sempre foram comentadas após cada etapa de modo que pôde-se compreendê-las de uma maneira mais eficiente enquanto em meio ao contexto dos próprios ensaios. Optou-se por esta forma de apresentação devido à vasta quantidade de ensaios e de resultados a serem analisados sob vários enfoques. Ainda assim, uma análise menos detalhada e mais abrangente do conjunto dos resultados é necessária e será apresentada nos parágrafos a seguir.

A Primeira Fase da pesquisa teve como objetivo principal a definição de porcentagens de adição de látex sobre a massa de cimento e formas de cura, dentre aquelas estudadas, que conduzissem principalmente a maiores resistências à compressão axial e à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20cm, além da caracterização de parâmetros físicos dos concretos estudados.

De posse dos resultados da Primeira Fase, concluiu-se principalmente que a taxa ideal de adição de látex sobre a massa de cimento foi de 10% e que a forma de cura que maximizou as propriedades analisadas dos traços de concreto foi a forma de cura 3 (6 dias de imersão em água e 21 dias de cura ao ar livre).

Contudo, sabe-se que a maximização das resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral para a taxa de adição de látex sobre a massa de cimento de 10% ocorreu em função de se fixar a quantidade de água de amassamento, desprezando-se desta forma, as propriedades plastificantes do látex. Desta maneira, os traços apresentavam todas as propriedades diferentes, sendo substancialmente maiores a medida que a relação látex/cimento aumentava. Optou-se

por conduzir este estudo desta maneira para se evidenciar apenas os benefícios da adição de látex, e não da remoção de água de amassamento. Pesquisas que analisem taxas ideais de modificação fixando parâmetros de trabalhabilidade dos traços, chegarão certamente a conclusões distintas, pois estarão colhendo benefícios da redução da quantidade de água de amassamento, além das melhorias geradas pela adição do látex.

Pôde-se concluir também que os concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados, de acordo com os traços estudados, apresentam resistência sempre maior que os traços equivalentes contendo agregados naturais. É importante salientar que estes resultados coincidem com os resultados de demais pesquisas contendo agregados reciclados com caracterizações semelhantes, mas que podem ser completamente divergentes dependendo das características do entulho de onde são provenientes os agregados reciclados.

Outra conclusão pertinente é sobre a influência da cura nos traços estudados (com agregados naturais, com agregados graúdos reciclados e com agregados graúdos reciclados e adição de látex), onde verificou-se que a carência de cura afeta mais negativamente os traços de agregados naturais que os demais, sendo que os traços de agregados graúdos reciclados com adição de látex sofrem menos negativamente a influência desta falta de cura.

Conclui-se também através dos dados obtidos que as propriedades analisadas independem do consumo de cimento dos traços, já que houve um padrão de comportamento para todos os três traços estudados, apresentando consumos de cimento variando de 334 a 504 kg/m³.

Dentre as conclusões obtidas da Primeira Fase desta pesquisa, uma das mais importantes é que todos os traços submetidos à porcentagem ideal de látex e forma de cura ótima apresentaram classes de resistência semelhantes, seguindo mesmo padrão de comportamento perante as propriedades analisadas. Este padrão de comportamento confere aos traços com agregados graúdos reciclados (aqueles agregados empregados nesta pesquisa) com e sem adição de látex, confiabilidade suficiente para emprego como concreto estrutural, em termos de resistência mecânica.

Assim como a Primeira Fase analisou parâmetros de resistência dos tipos e traços de concretos estudados, a Segunda Fase foi responsável pela análise de propriedades relacionadas ao desempenho em ambientes agressivos e aderência com a armadura destes concretos. Todos os ensaios da Segunda Fase foram sempre conduzidos para apenas um dos traços (o traço I - 1:1,60:1,63 - a/c=0,51), com apenas uma taxa de modificação (5%) e uma forma de cura (forma de cura 3 – 6 dias de cura por imersão e 21 dias de cura ao ar livre), sendo estudados os traços com agregados graúdos reciclados e com agregados naturais.

Com relação aos ensaios em célula de corrosão acelerada, verificou-se que o desempenho dos concretos confeccionados com agregados reciclados tende a ser sempre inferior àquele com agregados naturais, comprometendo mais significativamente a armadura no que tange a corrosão. Por outro lado, o desempenho dos concretos modificados com látex estireno-butadieno superou em muito os demais, característica esta que teve seu desempenho melhorado com o acréscimo da idade do ensaio, mostrando que esta propriedade promovida pelo látex aumenta com o tempo. Estas características de desempenho em ambientes agressivos foram mensuradas através do tempo de corrosão e perda de massa da armadura imersa no corpo-de-prova de concreto após determinado tempo.

A característica de proteção às armaduras contra corrosão promovida quando do emprego do látex estireno-butadieno sempre tem sido citada na bibliografia, juntamente com a aderência a substratos, como uma das principais propriedades dos concretos modificados com látex estireno-butadieno. Um dos principais fatores que contribuem para esta proteção das armaduras em meios agressivos, certamente é a impermeabilização que o emprego deste tipo de látex confere aos concretos, e que foi comprovado nos ensaios comparativos realizados para os três tipos de concretos, onde se obteve índices de absorção de água muito semelhantes para concretos com agregados naturais e concretos com agregados graúdos reciclados modificados com 5% de látex estireno-butadieno sobre a massa de cimento, taxa esta bastante pequena em relação ao que tem sido citado na literatura como taxas de modificação usuais para maximização de propriedades de impermeabilização de concretos.

Com relação aos ensaios de aderência entre aço e concreto, esperava-se, na verdade, ganhos mais substanciais em relação à aderência com as armaduras. Contudo, ficou evidenciado que há uma melhora no desempenho da aderência, pois o traço com agregados graúdos reciclados com adição de 5% de látex sobre a massa de cimento teve a aderência aumentada com relação ao traço de agregados graúdos reciclados sem adição de látex, ainda que ambos apresentaram desempenho abaixo do traço com agregados naturais sem adição de látex. Ressalta-se também que mesmo em virtude de uma pequena taxa de adição de látex sobre a massa de cimento (5%), os resultados obtidos mostraram que a aderência entre aço e concreto aumentou até 6% entre os traços de agregados graúdos reciclados com e sem adição do látex estireno-butadieno.

Com relação às barras da armadura na posição vertical e horizontal, os comportamentos foram bastante semelhantes, praticamente não havendo diferenças significativas, provavelmente devido a todas estarem localizadas em zonas de boa aderência, segundo as prescrições da NB1/78.

Dentre todas as propriedades analisadas, e de acordo com os traços, tipos de agregados (naturais e reciclados), porcentagens de látex e formas de cura, conclui-se pela viabilidade do emprego de concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno como concreto estrutural armado de média resistência, garantindo-se que os requisitos físicos, mecânicos, o desempenho em ambientes agressivos conforme simulado pelo ensaio em célula de corrosão acelerada, e os parâmetros de aderência com a armadura são completamente atendidos.

Por fim, a continuidade das pesquisas é fundamental para que este conjunto de materiais possa ser mais amplamente analisado, inclusive critérios de dosagens, para que se possa vir a ter aplicações práticas destes concretos. Vale ressaltar que o emprego de entulho como agregado para concretos de baixa responsabilidade estrutural já é uma realidade no Brasil e no mundo, assim como o emprego do látex estireno-butadieno como aditivos impermeabilizantes. O uso conjunto destes

materiais, como explorado nesta pesquisa, tem potencial para produzir concretos com desempenhos aceitáveis para diversas aplicações estruturais.

Por fim, torna-se importante enfatizar aspectos já abordadas no Capítulo 2 – Agregados Reciclados, sobre a importância de se promover destinações adequadas ao entulho gerado pela construção civil, uma vez que a destinação conveniente destes materiais pode minimizar problemas de escassez de matérias-primas (jazidas), e dos grandes volumes de materiais depositados em bota-foras, além das distâncias incorridas no transporte dos mesmos. Fatores técnico-econômicos demonstram a viabilidade da utilização do entulho proveniente da construção civil com ganhos ambientais e de qualidade de vida para a população.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-TAYYIB, A.J.; AL-ZAHRANI; M.M. (1990). Corrosion of steel reinforcement in polypropylene fiber reinforced concrete structures. **ACI Materials Journal**, v.87, n.2, p.108-13, Mar./Apr.
- AFRIDI, M.U.K. et al. (1995). Water retention and adhesion of powdered and aqueous polymer-modified mortars. **Cement & Concrete Composites**, v.17, n.4, p.113-8.
- AGOPYAN, V.; PINTO, T.P. (1995). Reciclagem: minas de entulho. **Téchne**, v.3, n.15, p. 15-9, mar./abr.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995). **ACI 548.3R - State-of-the-art report on polymer-modified concrete**. Detroit, ACI.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). **NBR 5738 – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). **NBR 5739 – Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). **NBR 7222 - Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos**.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **NBR 9778 - Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **NBR 9833 - Concreto Fresco – Determinação da Massa Específica e do Teor de Ar pelo Método Gravimétrico.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). **NBR 7223 – Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.**
- BALLISTA, L.P.Z.; CARVALHO, B.C.; MACHADO JR, E.F. (2000). Influência do procedimento de cura e da relação polímero/cimento na resistência à compressão e à tração indireta em concretos de agregados reciclados de resíduos de C&D modificados com látex [CD-ROM]. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., Fortaleza, agosto 2000. **Anais.** São Paulo, IBRACON. 15p.
- BALLISTA, L.P.Z.; MACHADO JR, E.F. (2000). Concreto com agregado reciclado modificado com látex estireno-butadieno – determinação da condição ótima de cura [CD-ROM]. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 29., Punta Del Este, Uruguay, nov. 2000. **Memorias.** Montevideo, Universidad de la República/ASAIE. 14p.
- CALLISTER JR, W.D. (1997). **Materials science and engineering – an introduction.** 4.ed. Utha - EUA, Wiley.
- CASCUDO, O. (1991). **Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras em concreto armado.** São Paulo, 152p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CASCUDO, O. (1997). **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo, Pini.
- CARVALHO, B.C. (2000). **Resistência à corrosão de armaduras em microconcretos com agregados reciclados de construção e demolição através**

- de célula de corrosão acelerada.** São Carlos. 69p. Relatório Final de Iniciação Científica (FAPESP) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CENCO TURBO CRUSHER (1999). <http://www.cencoturbo.com/> (18 jul.).
- COELHO, P.E. (2001). **Reciclagem de entulho – o melhor ainda está por vir.** <http://www.unilivre.org.br/centro/experiencias/experiencias/> (05 set.).
- DETWILER, R.J.; KJELLEN, K.O.; GJØRV, O.E. (1991). Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures. **ACI Materials Journal**, v.88, n.1, p.19-24, Jan./Feb.
- EAGLE CRUSHER (1999). <http://www.eaglecrusher.com/> (18 jul.).
- FERNANDES, R.M. (2000). **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto.** São Carlos, 155p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FOLIC, R.J.; RADONJANIN, V.S. (1998). Experimental research on polymer modified concrete. **ACI Materials Journal**, v.95, n.4, p.463-9, Jul./Aug.
- FUSCO, P.B. (1995). **Técnica de armar as estruturas de concreto.** São Paulo, Pini.
- GODOY, E.H.P.; BARROS, M.B. (1997). A avaliação de desempenho dos sistemas de impermeabilização com argamassas poliméricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 10., São Paulo. **Anais**, p.206-18.
- HANDBOOK of crushing (1999). <http://www.penncrusher.com> (10 out.).
- HANSEN, T.C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985. RILEM Technical Committee. 37 DRC. **Matériaux et Constructions**. v.19, n.111, p.201-246.
- HANSEN, T.C.; NARUD, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International**, v.5, n.1, p.79-83, Jan.

INTERNATIONAL CONSTRUCTION (1999). **Crushed by the wheels of industry**. v.38, n.5.

INTERNATIONAL CONSTRUCTION (2000). **Making the best of it**. v.39, n.5.

JOHN, V.M. (1996). Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo, SP, 1996. **Anais**. São Paulo. p.21-30.

JUVAS, K. (1997). Recycling in the precast concrete industry. In: PREFRABICATION - FACING THE NEW CENTURY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Finland. **Proceedings**. Concrete Association of Finland.

KHALOO, A.R. (1994). Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate. **ACI Materials Journal**, v.91, n.4, p.401-7, Jul./Aug.

KUHLMANN, L.A. (1987). Application os styrene-butadiene latex modified concrete. **Concrete International**, v.4, n.3, p.48-53, Dec.

LATTERZA, L.M. (1998). **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição - um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. São Carlos, 116p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LEVY, S.M. (1997). **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MACHADO JR, E.F.; LATTERZA, L.M. (1997). Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28., São Carlos, SP, 1997. **Anais**. São Carlos. v.5, p.1967-75.

MACHADO JR, E.F.; LATTERZA, L.M.; MENDES, C.L. (1998). Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda do abatimento do concreto fresco e nas propriedades

- mecânicas do concreto endurecido [CD-ROM]. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 40., Rio de Janeiro, ago. 1998. **O estado da arte do concreto: tecnologia e qualidade na construção civil**. São Paulo, IBRACON. 14p.
- MACHADO JR, E.F.; AGNESINI, M.V.C. (1999). Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição[CD-ROM]. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., Salvador, 30 ago.-03 set. 1999. São Paulo, IBRACON. 19p.
- MACHADO JR, E.F.; AGNESINI, M.V.C.; BALLISTA, L.P.Z. (2000). Dosagem de microconcretos estruturais leves com agregados reciclados de construção e demolição – estudo de caso [CD-ROM]. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., Salvador, abril 2000. **Modernização e sustentabilidade**. Salvador, UEFS/EFBA/UNEB. 8p.
- MACHADO JR, E.F.; VAREDA, L.V.; BALLISTA, L.P.Z. (1999). Resistência à corrosão de armaduras em microconcreto com agregado reciclado modificado com látex estireno-butadieno. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DE LAS CONSTRUCCIONES, 5. / CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD, 7., Montevideo, Uruguay, oct. 1999. **Memorias / Proceedings**. Montevideo, ASICONPAT / Saga & Asociados v.1, p.491-498.
- MACHADO JR, E.F.; VAREDA, L.V.; BALLISTA, L.P.Z. (2000). Resistência à corrosão de armaduras em microconcreto com agregado reciclado modificado com látex estireno-butadieno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza, CE, 2000. – 14pg
- MACHADO JR, E.F.; VAREDA, L.V.; BALLISTA, L.P.Z. (2000). Concreto com agregado reciclado modificado com látex estireno-butadieno. Determinação da condição ótima de cura. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 29, 2000, Punta Del Este, Uruguay. **Instituto de Estructuras y Transporte**, 2000.
- MACHADO JR, E.F.; BALLISTA, L.P.Z. (2000). Coarse aggregate from recycling of construction and demolition waste (debris): influence of the aggregate in the

- properties of the fresh and hardened concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PREFABRICATION, 2., Helsinki, Finland, May, 2000. **Proceedings**. Helsinki, Concrete Association of Finland. p.248-253.
- MANO, E.B. (1996). **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo, Edgard Blücher.
- MANO, E.B. (1988). **Introdução a polímeros**. São Paulo, Edgard Blücher.
- MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. (1994). **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo, Pini.
- NEVILLE, A.M. (1997). **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo, Pini.
- OHAMA, Y. (1987). Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes. **ACI Materials Journal**, v.84, n.6, p.511-8, Nov./Dec.
- OHAMA, Y.; DEMURA, K. (1991). Pore size distribution and oxygen diffusion resistance of polymer-modified mortars. **Cement and Concrete Research**, v.21, n.2/3, p.309-15.
- OKBA, S.H.; EL-DIEB, A.S.; REDA, M.M. (1997). Evaluation of the corrosion resistance of latex modified concrete (LMC). **Cement and Concrete Research**, v.27, n.6, p.861-8.
- PINTO, T.P. (1996). Reciclagem de resíduos da construção urbana no brasil. situação atual. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo, SP, 1996. **Anais**. São Paulo. p.159-70.
- PROJETO ENTULHO BOM (2001). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador, Editora EDUFBA.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS (1996). **Campinas: a gestão dos resíduos sólidos urbanos**. Concepção, coordenação técnica, supervisão geral de Ernesto Dimas Paulella e Clair de Oliveira Scapim. Campinas.

- RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, C.T. (1987). Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.39, n.141, p.214-20, Dec.
- RAY, I.; GUPTA, A.P.; BISWAS, M. (1994). Effect of latex and superplasticiser on portland cement mortar in the fresh state. **Cement & Concrete Composites**, v.16, n.4, p.309-16.
- RECICLAGEM para a vida (1999). <http://www.ubn.br/admin/hpr/htm> (10 jan.).
- ROSSIGNOLO, J.A. (1999). **Propriedades da argamassa de cimento Portland modificada com lates estireno-butadieno para revestimentos de fachadas**. São Carlos, 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SHAKER, F.A.; EL-DIEB, A.S.; REDA, M.M. (1997). Durability of styrene-butadiene latex modified concrete. **Cement & Concrete Research**, v.27, n.5, p.711-20.
- SILVA, I.J. (1996). **Contribuição ao estudo da utilização da resina poliuretana a base de óleo de mamona na construção civil**. São Carlos, 163p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- STORTE, M. (1991). **Látex estireno-butadieno – aplicação em concretos de cimento e polímero**. São Paulo, Técnica.
- TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. (1996). Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **ACI Materials Journal**, v.96, n.2, p.182-90, Mar./Apr.
- TEZUKA, Y. (1988). **Concreto de cimento e polímeros**. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland.
- WALTERS, G. (1987). What are latexes? **Concrete International**, v.9, n.12, p.44-7, Dec.
- WALTERS, G. (1988). Latex hydraulic cement additives. **Transportation Research Record**, n.1204, p.71-6.

ZORDAN, S.E. (1997). **A utilização do entulho como agregado na confecção de concreto**. Campinas, 166p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

9. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1989). **ACI 222R – Corrosion of metals in concrete**. Detroit, ACI.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. Designation C 157 – 93.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1997). **Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus**. Designation C 177 – 97.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). **Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforced Steel**. Designation C 234 – 91a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). **Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes**. Designation C 267 – 96.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting**. Designation C 418 – 90.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). **Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete.** Designation C 490 – 96.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces.** Designation C 779 – 95.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). **Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforced Steel in Concrete.** Designation C 876 – 91.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.** Designation C 944 – 95.
- ÂNGULO, S.C. (2001). **Concreto com agregados reciclados de entulho.** <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm> (14 jan.)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). **NBR 7211 - Agregado para Concreto.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **NBR 7217 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 7251 - Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). **NBR 7810 - Agregado em Estado Compactado Seco. Determinação da Massa Unitária.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **NBR 9776 - Agregados. Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco de Chapman.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **NBR 9935 – Agregados - Terminologia.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **NBR 9937 – Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 7215 – Ensaio de Cimento Portland.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 7477 - Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras de Concreto Armado.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1995). **NBR 7584 - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 8522 – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão-Deformação.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 8728 – Látex – Determinação dos Sólidos Totais.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). **NBR 9779 – Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Capilaridade.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). **NBR 10342 - Concreto Fresco – Perda de Abatimento.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1989). **NBR 10786 – Concreto Endurecido – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade à Água.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). **NBR 12142 – Concreto – Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos-de-Prova Prismáticos.**

BERNIER, G.; MALIER, Y.; MAZARS, J. (1978). Un materiau nouveau provenant de la démolition du béton: “le bibeton”. **C. R. Cont. Int. Sous Produits et Déchets Dans le Génie Civil.** Paris, p.157-62.

- CECCATO, M.R.; NUNES, N.L.; FIGUEIREDO, A.D. (1997). Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4. / CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., Porto Alegre, RS, 1997. **Anais**. Porto Alegre. p.539-46.
- CENTER OF EXCELLENCE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (1999). <http://www.sustainable.doe.gov/search.htm> (08 jul.).
- CHENG, T.P.; LEE, J.T.; TSAI, W.T. (1990). Corrosion os reinforcements in artificial sea water. **Cement and Concrete Research**, v.20, p.243-52.
- COELHO, P.E.; CHAVES, A.P. (1998). Entulho oferece produto bom e barato. **Jornal da USP**, São Paulo, p.8, 01 jun.
- COELHO, P.E.; CHAVES, A.P.; DJANIKIAN, J.G. (1998). Aproveitamento de entulho em concreto. **Saneamento Ambiental**, n.54, nov./dez.
- COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE) (1999). <http://www.cempre.org.br/> (08 jul.).
- CORBIOLI, N. (1996). Entulho – do caos à solução. **Construção**, n.2505, p.4-7, fev.
- CORROSION OF METALS IN CONCRETE (1990). **Reported by ACI Committe 222R-89**. Detroit, Michigan.
- EL DEBS, M.K.; HANAI, J.B.; MIGLIORE JR, A.R.; HAGA, H.C.R. (1997). Evolução com o tempo da corrosão da armadura em concreto de granulometria fina observada em ensaio acelerado. In JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28., São Carlos, SP, 1997. **Anais**, São Carlos, v.6, p.2411-20.
- FRANCHI, C.C.; SOIBELMAN, L.; FORMOSO, C.T. (1993). As perdas de materiais na indústria da construção civil. In: SEMINÁRIO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., Porto Alegre. **Anais**. p. 133-98.
- FREEDMAN, S (1998). Corrosion resistance os reinforcement in architectural precast concrete. **PCI Journal**, v.43, n.1, p.12-9, Jan./Feb.
- GENTIL, V. (1983). **Corrosão**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois.

- GLOBAL RECYCLING NETWORK (1999). <http://www.grn.com/> (08 jul.).
- GOMES NETO, D.P. (1998). **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – estudo de caso**. São Carlos. 156p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HAMASSAKI, L.T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M.C. (1996). Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo, SP, 1996. **Anais**. São Paulo. p.107-15.
- HANSEN, T.C. (1990). Recycled concrete aggregates and fly ash produce concrete without portland cement. **Cement and Concrete Research**. v.20, n.3 p.355-6.
- HANSEN, T.C. (1992). **Recycling of demolished concrete and masonry**. London, E & FN Spon. 305p. (RILEM Technical Committee, Report 6)
- HELENE, P.R.L. (1986). **Corrosão em armaduras de concreto**. São Paulo, Pini/IPT.
- KHALOO, A.R. (1994). Crushed tile coarse aggregate. **Cement, Concrete, and Aggregates**, v.17, n.2, p.119-25, Dec.
- NAIK, T.R.; SINGH, S.; RAMME, B. (1998). Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash. **ACI Materials Journal**, v.95, n.4, p.454-62, Jul./Aug.
- O'MAHONY, M.M. (1997). An analysis of the shear strength of recycled aggregates. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v.30, p.599-606, Dec.
- ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. (1997). Effect of coarse aggregates type on mechanical properties of concretes with different strenghts. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.2, p.165-70.
- PERDRIX, M. C. A. (1992). **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação de Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini.

- PINHEIRO, L.M.; GIONGO, J.S. (1986). **Concreto armado – propriedade dos materiais**. São Carlos, Publicação EESC-USP, n. 018/95.
- PEREIRA FILHO, J. (2001). Construção mais barata com entulho. **Gazeta Mercantil**, Caderno “Por Conta Própria”, p.7, 21 fev.
- PINTO, T.P. (1992). Entulho de construção: problema urbano que pode gerar soluções. **Construção**, n.2325, p.11-2, ago.
- PINTO, T.P. (1995). De volta à questão do desperdício. **Construção**, n.2491, p.18-9, nov.
- RASHWAN, M.S. & ABOURIZK, S. (1997). The properties of recycled concrete - factors affecting strength and workability. **Concrete International**, v.19, n.7, p.56-60, July.
- RAY, I.; GUPTA, A.P.; BISWAS, M. (1995). Effect of latex and superplasticiser on portland cement mortar in the hardened state. **Cement & Concrete Composites**, v.17, n.4, p.9-21.
- RAYMOND COMMUNICATIONS (1999). <http://www.raymond.com/> (08 jul.).
- RECICLAR para construir (1999). <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> (18 jul.).
- RECYCLING WORLD (1999). <http://www.tecweb.com/recycle/rwcont.htm> (15 jul.).
- RILEM BULLETIN (1994). Third International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. **Materials and Structures**, v.27, p.307-10.
- RILEM RECOMENDATION (1994). Specification for concrete with recycled aggregates. 121- DRG guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. **Materials and Structures**, v.27, p.557-59.
- SADEGZADEH, M.; KETTLE, R. (1986). Indirect and non-destructive methods for assessing abrasion resistance of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.38, n.137, p.183-90, Dec.
- SILVA, M.G.; SOUZA, F.L.S.; SILVA, V.G. (1996). Reciclagem de cinza de casca de eucalipto e entulho de obra em componentes de construção. In: WORKSHOP

- RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo, SP, 1996. **Anais**. São Paulo. p.99-105.
- SOLID WASTE ON LINE (1999). <http://www.solidwaste.com/> (08 jul.).
- SOUZA, J.C.S.; MELHADO, S.B. (1997). Impermeabilização dos pisos do pavimento tipo de edificios: diretrizes para o projeto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 10., São Paulo. **Anais**. p.180-97.
- TESSARI, R.; DAL MOLIN, D.C. (1998) Otimização das qualidades do concreto armado frente à corrosão das armaduras – escolha do tipo de cimento [CD-ROM]. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 40. Rio de Janeiro, ago. 1998. **O estado da arte do concreto: tecnologia e qualidade na construção civil**. São Paulo, IBRACON. 9p.
- THE HONG KONG CONSTRUCTION ASSOCIATION LTD. (1993). **Reduction of construction waste – final report**. Hong Kong Polytechnic.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1999). <http://www.epa.gov> (08 jul.).
- ZHOU, F.P.; BARR, B.I.G. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strenght of high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 1, p.177-86.
- ZORDAN, S.E.; PAULON, V.A.; JOHN, V.N. (2001). **Concreto confeccionado com entulho reciclado: avaliação do desempenho em função do consumo de cimento**. <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm> (14 jan.).

7. ANEXO I

A seguir são apresentados os organogramas dos ensaios realizados, separados em 4 etapas distintas desta Pesquisa:

- 1 – Ensaios dos concretos com agregados graúdos reciclados da Primeira Fase;
- 2 – Ensaios dos concretos com agregados naturais da Primeira Fase;
- 3 – Ensaios referentes ao estudo de corrosão, da Segunda Fase;
- 4 – Ensaios referentes ao estudo de aderência, da Segunda Fase.

Somando-se todos os ensaios realizados nesta pesquisa, foram moldados e ensaiados 480 testemunhos de várias formas e tamanhos, conforme indicado individualmente nas Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4, abaixo apresentadas.

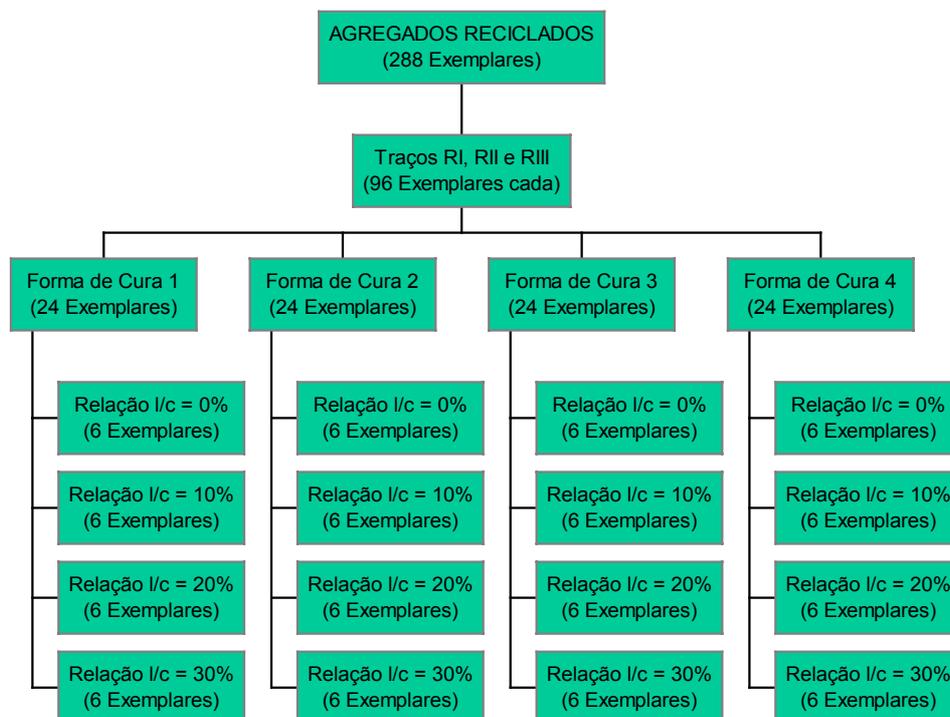


Figura 7.1 – Ensaios com Agregados Reciclados – Primeira Fase

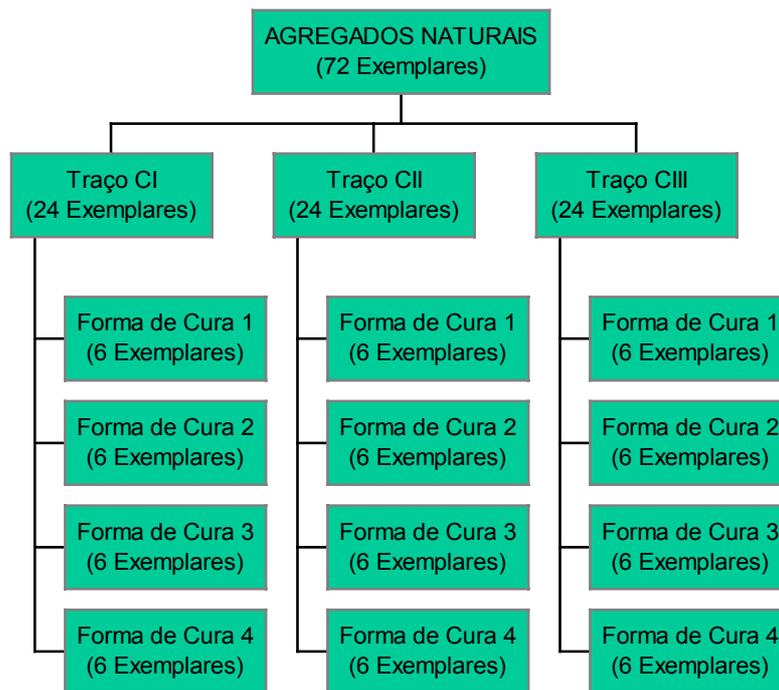


Figura 7.2 – Ensaios com Agregados Naturais – Primeira Fase

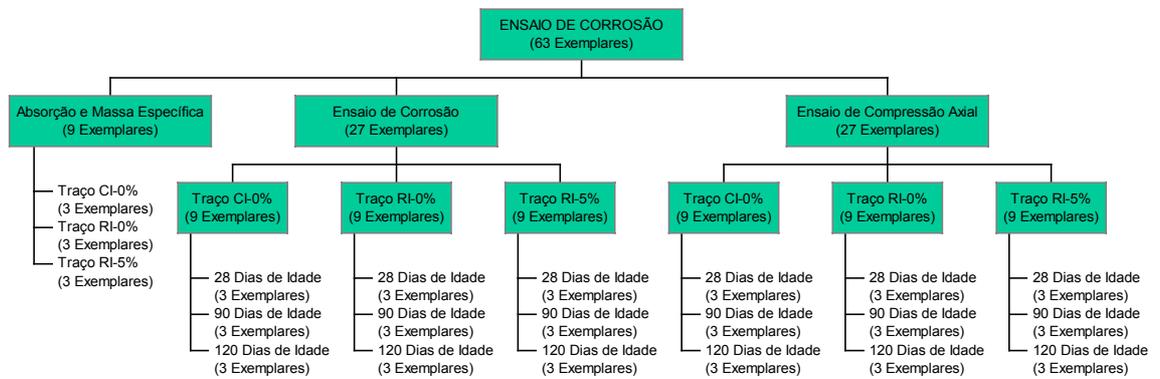


Figura 7.3 – Ensaios de Corrosão – Segunda Fase

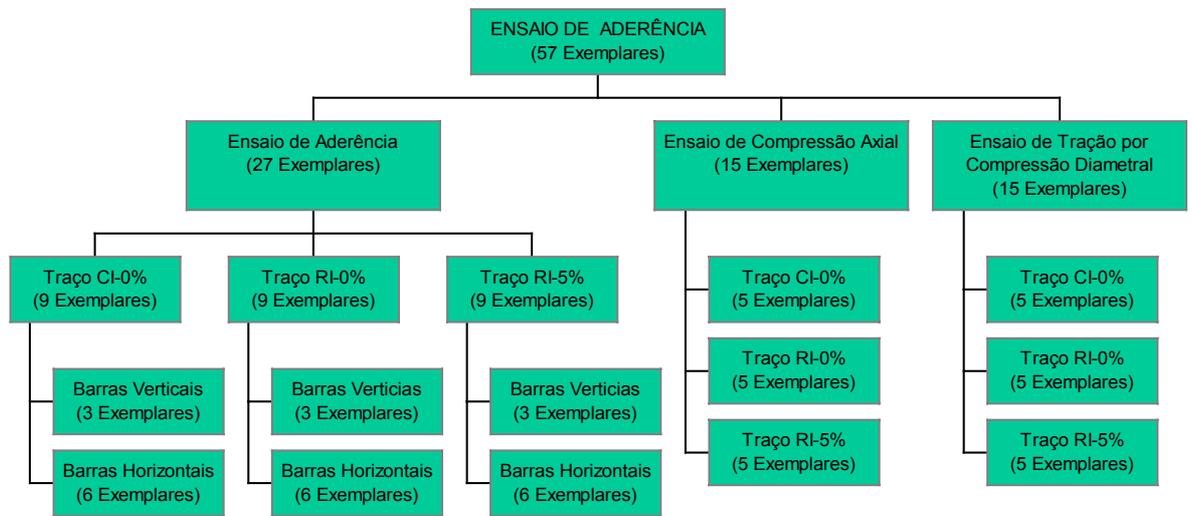


Figura 7.4 – Ensaio de Aderência – Segunda Fase