

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

# **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**

**Israel Rodrigo de Freitas Martins**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

ILHA SOLTEIRA

2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

# **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**

**Israel Rodrigo de Freitas Martins**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

ILHA SOLTEIRA

2005



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU

**AUTOR:** ISRAEL RODRIGO DE FREITAS MARTINS  
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

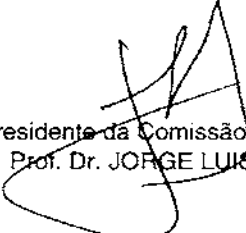
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI  
Depto. de Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA  
Depto. de Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. GERALDO CECHELLA ISAIA  
Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia Civil - UFSM - Santa Maria/RS

Data da realização: 18 de novembro de 2005.

  
Presidente da Comissão Examinadora  
Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

## DEDICATÓRIA

*Aos meus Pais, Evanildo Martins e Sueli de Freitas Martins, que além de me sustentarem com ouro fartam-me com o mais puro amor, e me ensinaram desde cedo, que a humildade absoluta é o instrumento perfeito para a busca do mais alto grau de sabedoria.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos guias da minha vida, meu pai e minha mãe pela proteção, incentivo, paz e apoio incondicional ao longo da minha vida. Estaremos eternamente juntos!

À amada e companheira Gisela e à seus pais e irmã por virem somar ainda mais aconchego e alegria na minha vida em família.

É mister explicitar minha eterna gratidão ao meu orientador prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, pessoa do mais alto quilate, reconhecido pela transparência de sua conduta, dedicação e generosidade na extensão de sua sabedoria para com seus alunos. Obrigado pela orientação precisa e competente, pela amizade e apoio quando eu mais precisei!

Ao Dr. Edilberto Pinato gostaria de tornar público meu sincero agradecimento a este anjo da guarda o qual durante uma cruel tormenta me acolheu e defendeu como um Pai. Deus lhe abençoe!

Ao Mackenzie, e seus inúmeros e queridos docentes, que me iniciaram nos estudos de engenharia. À Unesp que me acolheu e aperfeiçoou.  
Aos professores do Conselho do PPGEc pela imparcialidade, coragem e apoio aos alunos do programa.

À minha Família radicada na cidade de São Paulo foram muitas as saudades mas as boas lembranças foram sempre maiores, homenageio todos com a citação dos venerados decanos Antonio de Freitas Cabral e Maria Aurora de Freitas Cabral.

O apoio concreto e de alto desempenho de toda equipe do Laboratório CESP de Engenharia Civil na pessoa do estimado colega e amigo Eng. Flávio Moreira Salles e dos técnicos e também amigos: Michelan, Lana, Chiquinho, Joaquim, Euclides, Milton (in memoriam), Branco, Serjão, Jorge, Bertolucci, Pascoalim, Iverson, Henrique e Anderson.

Da mesma maneira aos técnicos e funcionários do DEC: Ronaldo, Mario, Gilson, José Carlos, Sandra, Renatinho e Aldir. À atenção sempre dispensada pelos funcionários da Biblioteca da FEIS: João, Sandra, Terezinha, Neide, Marta, Elaine, Cleide e Maria.

Às empresas Votorantim Cimentos, Camargo Corrêa/CAUÊ, Sika do Brasil, Porto de Areia São Judas, Mineração Noroeste Paulista e a Regigant Recuperadora de Pneus Pará, pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Aos colegas do mestrado e de iniciação científica pelo espírito de companheirismo e convivência: Mauro, Michele, Joel, Ana Carolina, Mario, Carlos Adriano, Renato, Everton, Eduardo e Carlos Rogério.

## REFLEXÃO

*“... Porque ter a mente boa não é o bastante; o principal é aplica-la bem. As maiores almas são capazes tanto das maiores virtudes quanto dos maiores vícios, e aqueles que marcham lentamente podem avançar muito mais, se seguirem o caminho certo, do que os que correm porém dele se afastam.”*

**Descartes**, Discurso sobre o método, parte I - (1637).

# SUMÁRIO

**Lista de Figuras**

**Lista de Tabelas e Quadros**

**Resumo**

**Abstract**

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>HISTÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>ESTRUTURA DO CONCRETO .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>MATERIAIS CONSTITUINTES.....</b>	<b>9</b>
2.3.1	Cimento.....	9
2.3.2	Agregados .....	10
2.3.3	Adições Minerais .....	12
2.3.4	Aditivos Químicos .....	13
2.3.5	Água.....	15
<b>2.4</b>	<b>PROPRIEDADES DO CAD.....</b>	<b>15</b>
2.4.1	Propriedades no Estado Fresco .....	15
2.4.2	Propriedades no Estado Endurecido .....	16
<b>3.</b>	<b>RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>HISTÓRICO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>ORIGEM .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b>APLICAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>APLICAÇÕES EM MATERIAIS DE CIMENTO PORTLAND .....</b>	<b>36</b>
3.5.1	Generalidades.....	36
3.5.2	Caracterização dos Resíduos e Manipulação.....	37
3.5.3	Influencia na Resistência e na Microestrutura .....	37
3.5.4	Aspectos da Aderência.....	38
3.5.5	Aspectos da Trabalhabilidade .....	39
3.5.6	Comportamento como Fibras e Tenacidade .....	40
3.5.7	A Problemática da Determinação do Módulo de Elasticidade .....	42
3.5.8	Durabilidade.....	42

3.5.9	Atualidades .....	44
<b>4.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR QUANTO À ESCOLHA DO CIMENTO E ADITIVO QUÍMICO.....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Introdução .....	46
4.2.2	Pré-Seleção de Materiais, Mistura e Procedimento .....	47
4.2.3	Resultados Preliminares.....	50
4.2.4	Análise dos Resultados Preliminares .....	53
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>54</b>
4.3.1	Aglomerantes .....	54
4.3.2	Agregados .....	56
4.3.3	Aditivo Químico .....	67
4.3.4	Água.....	67
<b>4.4</b>	<b>MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>67</b>
4.4.1	Método de Dosagem .....	68
4.4.2	Produção dos Concretos.....	69
4.4.3	Ensaio.....	74
<b>4.5</b>	<b>DOSAGEM DOS CONCRETOS.....</b>	<b>83</b>
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>PERFORMANCE, QUANTO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRABALHABILIDADE, DOS TRAÇOS.....</b>	<b>89</b>
5.1.1	Resistência à Compressão.....	89
5.1.2	Trabalhabilidade .....	92
5.1.3	Escolha do Traço com Borracha de Melhor Performance .....	93
<b>5.2</b>	<b>AVALIAÇÃO DO CAD E CAD COM BORRACHA NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....</b>	<b>94</b>
5.2.1	Propriedades no Estado Fresco .....	94
5.2.2	Resistência à Compressão.....	95
5.2.3	Módulo de Elasticidade .....	100
5.2.4	Módulo Unitário .....	101
5.2.5	Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	102
5.2.6	Resistência ao Impacto .....	104
5.2.7	Absorção de Água por Imersão .....	109
5.2.8	Resistência à Abrasão .....	110
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>114</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>114</b>



<b>6.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>117</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>118</b>
<b>7.1</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>118</b>
<b>7.2</b>	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....</b>	<b>129</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do agregado, da zona de transição e da matriz de pasta de cimento.....	7
Figura 2: Curvas tensão-deformação para várias resistências de concreto.....	18
Figura 3: Sistema de capeamento não aderente constituído por bases de neoprene e anéis de alumínio .....	22
Figura 4: Máquina retificadora com mesa móvel .....	23
Figura 5: Retífica acoplada em torno mecânico .....	24
Figura 6: Máquina retificadora de corpos-de-prova de concreto.....	25
Figura 7: Acúmulo de pneus inservíveis.....	28
Figura 8: Incêndio em áreas com acúmulo de pneus inservíveis.....	29
Figura 9: Esquema de um pneu em corte.....	30
Figura 10: Operação de raspagem do pneu à ser recauchutado .....	31
Figura 11: Detalhe da raspagem do pneu à ser recauchutado.....	32
Figura 12: Detalhe da ferramenta rotativa de raspagem de pneus.....	32
Figura 13: Configurações de pneus velhos utilizadas como recifes artificiais .....	35
Figura 14: Combinação de laterais e banda de rodagem de pneus descartados.....	35
Figura 15: Zona de transição entre a pasta de cimento-borracha e pasta de cimento-areia..	38
Figura 16: Curvas tensão-deformação controladas.....	41
Figura 17: Funil de Marsh .....	47
Figura 18: Misturador .....	49
Figura 19: Visualização geral do procedimento básico de ensaio .....	50
Figura 20: CP V-ARI e Superplastificante Y - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante .....	51
Figura 21: CP V-ARI e Superplastificante Z - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante .....	51
Figura 22: CP II-F-32 e Superplastificante Y - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante .....	52
Figura 23: CP II-F-32 e Superplastificante Z - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante .....	52

Figura 24: Espectrofotômetro de absorção atômica .....	55
Figura 25: Aparelho de Blaine.....	55
Figura 26: Frasco Chapman com querosene e resíduos de borracha de pneu .....	57
Figura 27: Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneu.....	58
Figura 28: Borracha grossa.....	60
Figura 29: Borracha média .....	60
Figura 30: Borracha fina.....	61
Figura 31: Curva granulométrica da borracha grossa.....	62
Figura 32: Curva granulométrica da borracha média .....	63
Figura 33: Curva granulométrica da borracha fina.....	64
Figura 34: Curva granulométrica da areia .....	65
Figura 35: Curva granulométrica da brita.....	66
Figura 36: Fluxograma do método de dosagem proposto.....	69
Figura 37: Betoneira com capacidade de 120 litros.....	70
Figura 38: Betoneira com capacidade de 360 litros.....	70
Figura 39: Moldagem dos corpos-de-prova para ensaio de resistência à impacto .....	72
Figura 40: Moldagem do corpo-de-prova para ensaio de resistência à abrasão .....	72
Figura 41: Moldagem dos corpos-de-prova de 10cm X 20cm .....	73
Figura 42: Câmara úmida para cura dos corpos-de-prova.....	73
Figura 43: Ensaio de Abatimento do tronco de cone.....	74
Figura 44: Aparelho para a medição do teor de ar.....	74
Figura 45: Balança e recipiente utilizados na determinação da massa específica .....	75
Figura 46: Termômetro digital para determinação da temperatura .....	75
Figura 47: Prensa hidráulica com capacidade de 100t.....	76
Figura 48: Prensa informatizada com capacidade de 200 toneladas.....	76
Figura 49: Par de LVDT fixados no corpo-de-prova.....	77
Figura 50: Configuração de tela durante o ensaio de módulo de elasticidade.....	77
Figura 51: Corpo-de-prova sendo capeado.....	78
Figura 52: Corpos-de-prova de composto de enxofre de alta resistência .....	78
Figura 53: Aparato para ensaio de resistência ao impacto.....	79
Figura 54: Detalhe do ajuste do corpo-de-prova .....	79

Figura 55: Estufa utilizada na secagem dos corpos-de-prova.....	81
Figura 56: Aparelho de abrasão .....	82
Figura 57: Corpo-de-prova submerso no interior do aparelho de abrasão e esferas de aço .	82
Figura 58: Corte do aparelho para ensaio de abrasão do concreto .....	83
Figura 59: Evolução da resistência à compressão de diversos traços elaborados.....	89
Figura 60: Típico corpo-de-prova do traço padrão rompido à compressão (7dias).....	90
Figura 61: Típico corpo-de-prova dos traços com adição de borracha rompido à compressão (7dias) .....	91
Figura 62: Trabalhabilidade de diversos traços elaborados.....	92
Figura 63: Evolução da resistência à compressão do CAD e do CAD com Borracha .....	95
Figura 64: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (3 dias).....	96
Figura 65: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (3 dias) .....	96
Figura 66: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (7 dias).....	97
Figura 67: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (7 dias) .....	97
Figura 68: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (28 dias).....	98
Figura 69: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (28 dias) .....	98
Figura 70: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (91 dias).....	99
Figura 71: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (91 dias) .....	99
Figura 72: Módulo de elasticidade do CAD e do CAD com Borracha .....	100
Figura 73: Módulo unitário do CAD e do CAD com Borracha.....	101
Figura 74: Resistência à tração do CAD e do CAD com Borracha .....	102
Figura 75: Corpo-de-prova de CAD após o ensaio de tração .....	103
Figura 76: Corpo-de-prova de CAD com Borracha após o ensaio de tração.....	103
Figura 77: Detalhe do procedimento de abertura do corpo-de-prova de CAD com Borracha .....	104
Figura 78: Corpo-de-prova de CAD com Borracha após abertura .....	104
Figura 79: 1° fissura (0,1mm) em uma das placas de CAD .....	105
Figura 80: 1° fissura (0,1mm) em uma das placas de CAD com Borracha.....	106
Figura 81: Última fissura observada (1mm) em uma das placas de CAD.....	106
Figura 82: Placa de CAD ao fim do ensaio .....	107
Figura 83: Última fissura observada (0,5mm) em uma das placas de CAD com Borracha	107

Figura 84: Placa de CAD com Borracha ao fim do ensaio, face superior .....	108
Figura 85: Placa de CAD com Borracha ao fim do ensaio, face inferior .....	108
Figura 86: Placa de CAD com Borracha sendo separado manualmente .....	109
Figura 87: Absorção de água por imersão do CAD e do CAD com Borracha .....	110
Figura 88: Resistência à abrasão do CAD e do CAD com Borracha.....	112
Figura 89: Corpo-de-prova de CAD ao fim das 71 horas de ensaio de abrasão.....	112
Figura 90: Corpo-de-prova de CAD com Borracha ao fim das 71 horas de ensaio de abrasão .....	113

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Composições e suas variações quanto ao teor de superplastificante .....	48
Tabela 2: Análise físico-química do cimento CP II-F-32.....	54
Tabela 3: Análise físico-química da Sílica Ativa .....	56
Tabela 4: Análise granulométrica do resíduo de borracha de pneu .....	58
Tabela 5: Classificação granulométrica do resíduo de borracha de pneu.....	59
Tabela 6: Análise granulométrica da borracha grossa .....	61
Tabela 7: Análise granulométrica da borracha média.....	62
Tabela 8: Análise granulométrica da borracha fina .....	63
Tabela 9: Análise granulométrica da areia.....	64
Tabela 10: Demais características da areia .....	65
Tabela 11: Análise granulométrica brita.....	66
Tabela 12: Demais características da brita .....	67
Tabela 13: Composição PADRÃO .....	85
Tabela 14: Composição MODIFICADA 3%.....	86
Tabela 15: Composição MODIFICADA 5%.....	86
Tabela 16: Traço ESPECIAL 3% borracha TOTAL .....	88
Tabela 17: Análise dos resultados de resistência ao impacto .....	105
Quadro 1: Resultados de resistência à abrasão .....	111

# Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu

Israel Rodrigo de Freitas Martins

## RESUMO

Em consequência as inúmeras vantagens intrínsecas dos concretos de alto desempenho, sejam relacionadas à performance mecânica ou de durabilidade, se faz constante no cenário mundial a expansão de suas aplicações.

Contudo os concretos de alto desempenho apresentam comportamento de ruptura frágil, característica destoante dos demais materiais usualmente empregados na concepção de estruturas, os quais por serem dúcteis propiciam maior capacidade de redistribuição de esforços aos elementos estruturais.

Neste enfoque aborda-se a investigação do concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu, sendo que, dentre as mais variadas aplicações bem sucedidas dos resíduos de borracha de pneu ressalta-se sua adição em cimentos asfálticos, no intuito do aumento da resistência à temperatura e à esforços mecânicos, e também em concretos convencionais de cimento Portland, visando por exemplo majorar a tenacidade.

Com a utilização desses resíduos de borracha de pneu ocorre ainda notável contribuição ao desenvolvimento sustentável e ao meio ambiente, uma vez que em todo o mundo existe uma grande problemática ligada ao acúmulo pneus inservíveis.

Assim no intuito de substanciar a performance do concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu obtido, cabe destacar alguns números: resistência à compressão superior a 70MPa, aos 28 dias de idade; módulo de elasticidade acima dos 50GPa, aos 91 dias; maior tenacidade em relação ao CAD; sua resistência ao impacto foi superior de 11% a até 26% a do CAD; possui absorção de água por imersão menor que 1%, aos 28 dias; resistência à tração equivalente a até 12,6% da sua resistência à compressão e ainda demonstrou maior resistência à abrasão do que um concreto de alta resistência, com resistência à compressão equivalente.

**Palavras-chave:** Concreto de alto desempenho, resíduos de borracha de pneu, resistência mecânica, durabilidade, reciclagem, meio ambiente.

# High Performance Concrete with Tire Rubber Scrap Addition

Israel Rodrigo de Freitas Martins

## ABSTRACT

Innumerable advantages of high performance concrete, being related to the mechanics or durability performance, it makes world-wide expansion scene of its application.

However, fragile rupture behavior is presented on high performance concrete, different characteristic of usual material used into the structure conception, which being ductile, it propitiates higher redistribution capacity efforts of structural elements.

In this way it is approached the high performance concrete inquiry the tire rubber scrap addition, being the most varied successful tire rubber scrap application, standing out its addition in asphalt cements, aiming the resistance increasing to temperature and mechanical strength, and also to conventional Portland cement concrete, reaching better tenacity.

The tire rubber scrap using occurs sustainable development and also to the environment, there are a great problematic on idle tire accumulation.

Intentioning to substantiate the presentation of high performance concrete with tire rubber scraps addition obtained, some numbers can be highlighted: compressive strength higher than 70MPa, age of 28 days; modulus of elasticity above 50GPa, to 91 days; greater tenacity in relation to the HPC; its impact resistance was superior of 11% up to 26% of the HPC; occurs water absorption for lesser than 1%, to the 28 days; tensile splitting strength equivalent up to 12,6% of its compressive strength and still demonstrated to greater resistance to the abrasion of that a high strength concrete, with the same compressive strength.

**Keywords:** High performance concrete, tire rubber scraps, mechanical strength, durability, recycling, environment.



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

A crescente evolução dos projetos arquitetônicos, cada vez mais arrojados, e o desenvolvimento da indústria do concreto permitiram e levaram a elaboração de novos materiais, que por sua vez induziram ao estudo de novos tipos de concretos, dentre eles o Concreto de Alto Desempenho (CAD).

O CAD é aquele que possui resistência mecânica elevada; acima de 42MPa segundo Shah e Ahmad (1994, p.2); a qual deve ser suficiente para receber as solicitações impostas no projeto, e definitivamente mostra-se durável ao longo do tempo, caracterizando-se também pela excelente seleção de materiais constituintes e rigorosos controles de produção.

A constante ascensão do emprego do CAD está ligada às vantagens atreladas ao seu comportamento estrutural, dentre elas sua superioridade em relação a resistência à compressão, e pela incorporação de maior durabilidade.

Contudo, devido às alterações em sua microestrutura, o CAD, quando submetido à tensões máximas, apresenta ruptura frágil. Este comportamento o diferencia dos demais materiais empregados na concepção de elementos estruturais, inclusive do concreto convencional.

Nas estruturas, de modo geral, almeja-se uma boa performance quanto sua capacidade de redistribuição de esforços, para isto é necessário que os elementos estruturais, em especial pilares como é citado por Câmara e Pinto (2004, p.357), possuam uma capacidade de deformação suficiente, ou seja, certa ductilidade.

O fato de não fornecer indícios do início de ruína pode ser visto como um aspecto negativo para a segurança de uma estrutura, considerando-se o caso desta vir a sofrer um colapso. Desta forma, o comportamento de ruptura do CAD não é vantajoso, à medida que se faz corriqueiro o aumento da taxa de armadura a fim de propiciar ductilidade a tais estruturas, acarretando então no acréscimo dos gastos com armadura.

No caso de pilares, sendo o CAD um material não dúctil, é corrente o uso de cintamento transversal, como recomenda a norma norueguesa NS 3473 – NORWEGIAN

STANDARDS apud ABCP (1999), com o intuito do aumento da capacidade das deformações longitudinais.

O uso de fibras, em sua maioria metálicas, também é empregado no CAD com o intuito de elevar sua ductilidade e o trabalho de fratura. Dentre outros estudos, Jamet et al (1995, p.32), e Lima Junior e Giongo (2004, p.205) ao ensaiar, respectivamente, vigas e pilares de CAD com adição de fibras metálicas, constataram o aumento da ductilidade destes elementos em relação àqueles sem adição de fibras.

Noutro norte, com o intuito de minimizar impactos ao meio ambiente, se faz constante, no cenário mundial, a elaboração de estudos para a reciclagem de diversos materiais nocivos ao desenvolvimento sustentável.

Dentre diversos resíduos com projeção globalizada, quanto ao impacto ambiental gerado, tem-se a borracha provinda de pneu inservível, a qual por apresentar demorada degradação e perfazer quantidades colossais, tem sido objeto de estudo de inúmeras pesquisas, que visam, entre outras aplicações, aproveitar parte desse enorme potencial na produção de concretos.

Segundo Bignozzi e Sandrolini (2004, p.78), com o intuito de melhorar o comportamento a mudanças de temperatura e a resistência mecânica do cimento asfáltico a adição de borracha de pneu inservível tem sido investigada por mais de trinta anos, sendo tal adição vantajosa em diversos aspectos. Ainda em acordo com estes autores os estudos da utilização de borracha de pneu inservível em concretos de cimento Portland existem à cerca de uma década e dentre variados objetivos tem-se a análise da influência no comportamento de fratura dos concretos.

Dessa forma esta pesquisa vem ao encontro da necessidade mundial de contribuir à preservação do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável, a medida que estuda a possibilidade da utilização de resíduos de borracha de pneu na produção de CAD, almejando-se elevados níveis de resistência à compressão, avaliando também outras propriedades e abordando questões ligadas à granulometria e taxas de adição do referido resíduo. Visando sobretudo somar possíveis vantagens ao concreto de alto desempenho, no que diz respeito ao seu comportamento e aptidão aos fins da engenharia civil mundial.

## ***1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO***

Esta dissertação está subdividida em 7 capítulos:

No primeiro capítulo consta a introdução ao tema abordado, sua importância, objetivo geral e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo engloba uma revisão literária do concreto de alto desempenho, a qual encontra-se direcionada as necessidades desta pesquisa.

O terceiro capítulo aborda os resíduos de borracha de pneu e expõe a interação da comunidade científica no combate da problemática ligada ao acúmulo de pneus inservíveis.

Ao quarto capítulo foi reservada a descrição do programa experimental realizado e a investigação da compatibilidade entre cimentos e aditivos químicos.

É no quinto capítulo onde são apresentados os resultados, obtidos no decorrer da pesquisa, e suas respectivas análises.

As considerações finais são proferidas no sexto capítulo.

Por fim no sétimo capítulo são apresentadas as bases teóricas desta pesquisa, onde seguem divididas entre referências bibliográficas e bibliografia consultada.

## 2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

### 2.1 HISTÓRICO

O surgimento do concreto de alto desempenho está unido ao desencadeamento de alguns fatos fundamentais: a busca da elevação da resistência à compressão do concreto, o desenvolvimento de superplastificantes atuantes na sua reologia, e o emprego da sílica ativa como material cimentício complementar. Acontecimentos estes que quando somados possibilitaram a transposição de barreiras na tecnologia do concreto.

No início dos anos 60 do século passado, em específico na cidade de Chicago, de acordo com Moreno apud Aïtcin (2000, p.27), o trabalho em conjunto de um projetista e um fornecedor de concreto iniciou uma árdua campanha, a qual visava a utilização de quantidades significativas de concretos de alta resistência à compressão em estruturas importantes. Inicialmente o uso destes concretos experimentais era limitado tão somente a alguns dos pilares da estrutura e tinham seu valor de resistência à compressão elevado da ordem de 10 a 15MPa acima daquela comumente especificada no projeto de edifícios altos da época.

Esta conduta, inicialmente modesta mas contínua, possibilitou o domínio gradativo da produção de concretos com resistência à compressão cada vez maior e sua extensão a um número maior de elementos estruturais. O implemento destes concretos foi facilitado com os resultados vantajosos apresentados aos empreendedores, dentre eles, o aumento de área útil dos escritórios e garagens devido à diminuição das seções dos pilares, o que proporcionou uma considerável redução dos custos das obras.

Assim a cidade de Chicago foi pioneira no uso de concretos de alta resistência, onde Mehta e Monteiro (1994, p.406) destacam os edifícios, Lake Point Tower o qual foi construído em 1965 com pilares de 53MPa e o Water Tower Place em 1976, com a adoção de diferentes resistências à compressão ao longo da sua estrutura de 79 pavimentos, sendo os pilares até o vigésimo quinto andar de resistência característica à compressão igual a 63MPa, a qual foi progressivamente reduzida, nos pavimentos superiores, de 53MPa a 28MPa.

Desde o início da sucessiva implementação do aumento da resistência à compressão contou-se com o auxílio indispensável dos aditivos químicos, em primeiro plano, redutores de água à base de lignossulfonatos. Através do desenvolvimento de diversas formulações os aditivos químicos passaram por grande evolução técnica e, segundo Aïtcin (2000, p.32), importantes mudanças conceituais quanto ao seu uso, no que diz respeito aos teores e tipos para dada aplicação. Assim com o aumento dos teores dos aditivos superplastificantes possibilitou-se a prática de relações água/aglomerante ainda mais reduzidas, concomitantemente com a garantia da manutenção da trabalhabilidade necessária.

À medida que as relações água/aglomerante desses concretos foram sendo ainda mais reduzidas, fizeram-se observar uma série de outras melhorias além dos altos valores de resistência à compressão, onde aos poucos se destacou a elevação dos fatores contribuintes à sua durabilidade, o que resultou então na apreciação de um material de especificações mais amplas, ou seja, no concreto de alto desempenho.

Outro importante advento ao aumento da performance dos concretos de alto desempenho foi a sílica ativa, a qual é um subproduto oriundo da produção de silício e ferro silício. Foi durante anos tida como estorvo, sendo que primeiramente estas finíssimas partículas eram lançadas na atmosfera, e depois com as fortes regulamentações ambientalistas nos países desenvolvidos obrigando à instalação de filtros para o controle e redução da poluição, e passaram, então, a ser acumuladas em grande quantidade.

Embora, de acordo com Aïtcin (2000, p.34), a primeira utilização prática da sílica ativa tenha ocorrido em 1952, por um pesquisador norueguês, é no final da década de 70 do século XX, que esta começou a ser utilizada como material cimentício suplementar em concretos na Escandinávia, região de grande produção de silício e por conseguinte com alto potencial de sílica ativa.

O uso da sílica ativa possibilitou a execução de concretos de alto desempenho com resistência à compressão acima dos 100MPa, e as inúmeras vantagens de sua incorporação foram reconhecidas rapidamente. A partir de 1980 a sílica ativa começou a ser usada na América do Norte e foi também difundida em todo o mundo, inclusive no Brasil.

Por volta de 1990, vários programas específicos sobre CAD foram desenvolvidos em diversos países, os quais possibilitaram vencer o desafio de produzir e utilizar o

concreto de alto desempenho, disseminando seu uso em diversas obras de impacto internacional no cenário da engenharia civil.

Segundo Shah e Ahmad (1994, p.2), para concretos acima do valor de 42MPa, além de ser necessário maior controle de qualidade para sua produção e seleção dos materiais constituintes, sua microestrutura difere consideravelmente de concretos convencionais. Em anuência a esta citação, o valor de resistência à compressão a partir do qual diversas normas e trabalhos científicos definem um concreto, como sendo de alto desempenho, está em torno de 50MPa.

No início do desenvolvimento da melhoria destes concretos, a característica percussora desejada resumia-se a uma alta resistência à compressão tendo sido assim denominados como concreto de alta resistência. Nos dias de hoje, a expressão, concreto de alto desempenho é cada vez mais utilizada, pois além da alta resistência à compressão outras características são almejadas, como a baixa porosidade e uma alta durabilidade.

Neste foco, Libório (2004a, p.78) afirma que na atualidade a opção do uso do CAD baseia-se não só na necessidade de altas resistências, mas também no aumento da durabilidade dos patrimônios. Isaia (2005, p24), inclui ainda a diminuição das secções estruturais e a maior velocidade de construção como principais atrativos na crescente escolha e utilização do CAD por parte das construtoras.

A todo esse conjunto de vantagens do CAD está somada a redução do custo final da estrutura. Djanikian e Trindade (2001, p.14) obtiveram uma redução de 15% no custo do m<sup>3</sup> do concreto na estrutura do edifício GEF em São Paulo. Campos (2000, p.27-34) demonstra reduções de até 20% no custo da estrutura do edifício Solar da Serra em São Paulo, definindo ainda o uso do CAD como um “grande negócio”.

O uso de concretos de alto desempenho não é limitado a edifícios altos, Baweja (2002, p.1) cita o emprego do CAD em estruturas marítimas, onde devido ao ambiente agressivo seu desempenho quanto à durabilidade é fundamental.

O concreto de alto desempenho foi extensivamente usado também na construção de varias plataformas submarinas na Noruega, dentre as quais, Amaral Filho (1992, p.42) destaca a Ekofisk, que utilizou CAD, com adição de sílica ativa, e resistência à compressão de 69MPa, o qual apresenta, dentre outras características, alta resistência à erosão.

O CAD ainda é objeto de estudo de pesquisadores de diversos países, dentre os quais o Brasil ocupa lugar de destaque. Hartmann e Helene (2003, p.1-14) descrevem a conquista do recorde mundial de concreto de alto desempenho colorido, com resistência média a compressão de 125MPa, configurando mais um marco à engenharia nacional.

## 2.2 ESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto de cimento Portland possui num nível macroscópico duas fases distintas, a pasta de cimento e a fase dos agregados, também definida como esqueleto granular.

Em nível microscópico observa-se uma terceira fase, denominada zona de transição e localizada na interface entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento.

As três fases supracitadas, e detalhadas na Figura 1, são heterogêneas o que explica, segundo Mehta e Monteiro (1994, p.19), a dificuldade de previsão do comportamento do concreto através de modelos teóricos de relação estrutura/propriedades.

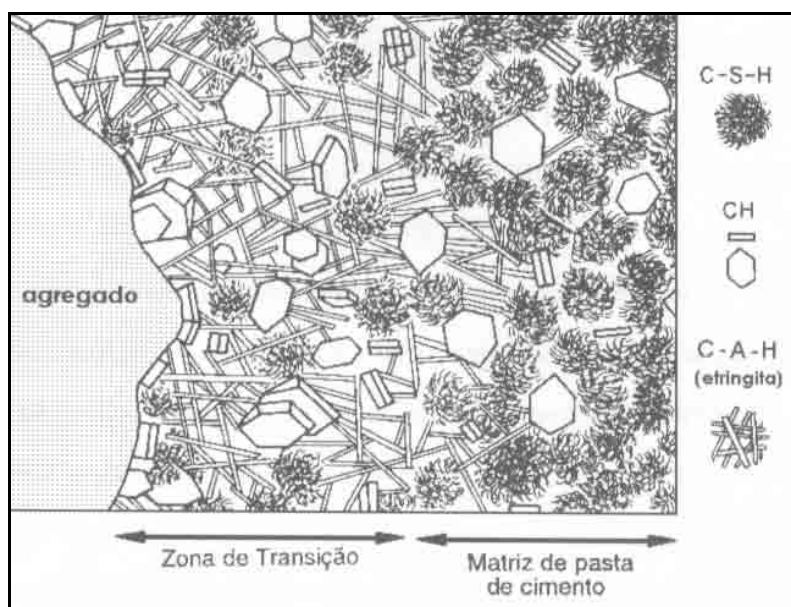


Figura 1: Representação esquemática do agregado, da zona de transição e da matriz de pasta de cimento  
Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994, p.38)

A pasta de cimento hidratada, resultado da mistura de cimento com água, tem suas propriedades determinadas essencialmente pela interação da água com os quatro componentes básicos do cimento Portland: silicato dicálcico ( $C_2S$ ), silicato tricálcico ( $C_3S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ).

O  $C_2S$  e o  $C_3S$  são os principais componentes responsáveis pela resistência da pasta, através da formação do silicato de cálcio hidratado (CSH), o qual constitui, segundo Mehta e Monteiro (1994, p.24), de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland hidratado.

No concreto convencional a zona de transição difere de maneira significativa da pasta de cimento, apresentando grande volume de vazios capilares e microfissuras. Já no CAD, segundo Aïtcin (2000, p.105), com a diminuição da relação água/aglomerante e o uso da sílica ativa a espessura e a debilidade da zona de transição são reduzidas.

Devido às baixas relações água/aglomerante praticadas e a grande quantidade de finos presentes no CAD, sua pasta de cimento é bastante homogênea e pouco porosa, fatores estes que contribuem a sua capacidade de resistência à compressão.

Por ser um material mais homogêneo e uniforme o CAD apresenta uma menor porosidade e, conseqüentemente, é menos permeável a agentes agressivos resultando então numa maior durabilidade. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1999), o CAD chega a ter um coeficiente de permeabilidade 10.000 vezes menor que concretos convencionais, possuindo assim reduzida carbonatação e difusão de cloretos.

Entretanto, devido aos avanços ocorridos nas fases componentes da estrutura do CAD, seu processo de desenvolvimento de fissuração inicia-se de forma tardia, isto é, em patamares muito próximos ao seu limite de resistência. Assim, quando submetido acima do seu valor limite de resistência, o CAD apresenta característica de ruptura frágil e de reduzida tenacidade.

Estas características são comumente observada ao ensaiar-se corpos-de-prova de CAD, sendo descritas de forma particular por diversos pesquisadores, como por exemplo: Pereira Neto (1994, p.78) “ruptura frágil, com comportamento explosivo”; Mehta e Monteiro (1994, p.403) “modo mais frágil de fratura e uma menor dilatação volumétrica” e também Nilson apud Silva (1995, p.26) relatou rupturas “de maneira brusca e frágil”.

Tendo analisado concretos de várias faixas de resistências, inclusive os de alto desempenho, Guinea et al. (2002, p.1969), concluíram que a qualidade da zona de transição influencia de forma categórica no mecanismo de fratura dos concretos estudados.

Assim, devido às melhorias ocorridas tanto na pasta quanto na zona de transição, a microestrutura do concreto de alto desempenho tem comportamento diferenciado em



relação ao concreto convencional, isto é, existe no CAD uma maior transferência de cargas entre a pasta de cimento e os agregados graúdos, reduzindo-se então as tensões interfaciais.

Devido a este aumento de transferência de carga, no CAD existe também uma grande preocupação com o agregado graúdo, pois quando solicitado, por esforços externos, sua ruptura é geralmente do tipo transgranular, ou seja, o agregado torna-se o elo menos resistente.

Segundo Akçaoglu, Tokyay e Çelik (2002, p.828), a fase do agregado exerce influência nas propriedades do concreto, principalmente por suas características físicas, tais como volume, tamanho, porosidade, forma e textura.

No item subsequente serão apresentados os materiais constituintes do CAD, onde é possível observar quais requisitos devem ser exigidos na seleção de determinados materiais visando à produção de concretos de alto desempenho.

## **2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES**

O concreto de alto desempenho prima pela utilização de alguns materiais constituintes com certas propriedades específicas, sendo necessária uma cuidadosa seleção.

A indústria da construção civil tem investido continuamente no desenvolvimento de novas tecnologias, assim atualmente o mercado dispõe de uma infinidade de produtos. Visando contribuir para a melhor performance do conjunto, na seqüência serão feitas explanações sobre cada um dos materiais constituintes do CAD.

### **2.3.1 Cimento**

A princípio qualquer cimento Portland pode ser empregado na produção de um CAD, mas preferencialmente utilizam-se os cimentos Portland com elevados teores de silicato dicálcico ( $C_2S$ ) e silicato tricálcico ( $C_3S$ ). Existe ainda, segundo Aïtcin (2000, p.186), o anseio de uma baixa quantidade de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), a fim de facilitar o controle da reologia do cimento.

Quanto à finura, um alto “Blaine” (superfície específica) poderá contribuir para o desenvolvimento de elevadas resistências já nas primeiras idades. No entanto, Almeida (2005, p.1168), ressalta que, em idades avançadas, “esta tendência se anula”.

Devido as faixas de variações permitidas pelas normas quanto a composição e finura, mesmo considerando-se um único tipo de cimento, podemos ter diferentes

características de desenvolvimento de resistência. Sendo indispensável, como cita Pereira Neto (1994, p.14), uma constante indicação da uniformidade do cimento utilizado ao longo do tempo.

## **2.3.2 Agregados**

### **2.3.2.1 Agregado miúdo**

No CAD devido a grande quantidade da presença de partículas finas (materiais cimentícios) não se dispensa grande atenção aos agregados miúdos. Sendo normalmente utilizado a areia natural como agregado miúdo, a qual pode variar dentro de toda a sua faixa granulométrica.

Entretanto, Blick apud Silva (1995, p.10) constatou que determinada areia, com módulo de finura inferior a 2,5 proporcionou ao concreto uma consistência viscosa, tornando-o difícil de compactar. Já para uma areia com um módulo de finura em torno de 3,0 foi obtida uma melhor trabalhabilidade e maior resistência à compressão.

Assim as areias mais grossas são recomendadas na produção do CAD, com o intuito de um pequeno decréscimo na quantidade de água necessária para uma dada trabalhabilidade.

### **2.3.2.2 Agregado graúdo**

Segundo a National Crashed Stone Association apud ACI 363 – American Concrete Institute – ACI (1992, p.6), o agregado ideal deveria ser limpo, cúbico, anguloso, 100% de agregado britado e com o mínimo de partículas lameares e alongadas.

Para se obter resistência à compressão ótimas no CAD a Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado graúdo, segundo o ACI 363 – ACI (1992, p.6), deve ser mantida entre 9,5mm e 12,5mm. Sendo que dimensões máximas de 19mm também tem sido usados com sucesso, segundo Mehta e Monteiro (1993, p.401).

Agregados de menor dimensão diminuem a probabilidade de partículas lameares, evitando acúmulo de água de amassamento em seu redor, resultando em modificações benéficas na microestrutura da zona de transição pasta-agregado.

O aumento de resistência dos concretos, quando do uso de agregados graúdos de menores dimensões (maiores áreas superficiais), de acordo com Cordon e Gillott apud

Pereira Neto (1994, p.54), também pode ser justificado pela redução da concentração de tensões nas interfaces, causada por diferenças do módulo de elasticidade da pasta e do agregado.

Questões sobre concentrações de tensões e influência do agregado graúdo no módulo de elasticidade do CAD serão abordadas com mais profundidade em subitem específico no item propriedades mecânicas no estado endurecido.

Outro fator que reforça a utilização de agregados graúdos com menor granulometria na produção de CAD está ligado ao chamado efeito escala, um conceito da mecânica das rochas citado por Pereira Neto (1994, p.54), através do qual as partículas menores, derivadas da rocha mãe, isentam-se de defeitos apresentando assim maiores resistências mecânicas.

O efeito escala ocorre durante os processos de redução de dimensão das partículas de rocha (por exemplo, a britagem) onde são eliminados os defeitos internos das mesmas, pois quando solicitadas desagregam-se pela ruptura de planos internos de menor resistências, resultantes de microfissuras, poros e inclusões de minerais macios, que estão presentes nos pedaços maiores das rochas.

Ao contrário ao efeito escala, alguns processos de redução da dimensão de agregados, a partir de equipamentos defeituosos, podem impor um estado de microfissuração no agregado, isto é, a formação de microfissuras devido ao impacto promovido no desmonte da rocha, fato que de acordo com Akçaoglu, Tokyay e Çelik (2002, p.832), afetará negativamente a resistência mecânica do concreto.

Assim do ponto de vista da forma e da resistência, Aïtcin (2000, p.226), reconhece os cascalhos glaciais como os melhores agregados para o CAD, pois tiveram suas dimensões reduzidas pela ação da natureza, possuem alta resistência mecânica e superfície áspera.

Infelizmente não é o que ocorre com os cascalhos fluviais, apesar de mais abundantes, possuem superfície lisa, devido à ação polidora dos siltes quando transportados nos fundos dos rios, resultando numa aderência ruim pasta-agregado.

Agregados rugosos e de maior angulosidade propiciam maior aderência mecânica, entretanto a angulosidade acentuada deve ser evitada, por causa da alta necessidade de água dada a reduzida trabalhabilidade.

A utilização de agregados graúdos com baixo peso específico na produção de CAD também é empregada, embora suas propriedades estruturais sejam inferiores as do concreto de alto desempenho com agregados de peso específico normal, a redução do peso próprio torna-se um interessante atrativo. Utilizando agregados leves Rossignolo, Agnesini e Moraes (2003, p.77-82) apresentaram concretos de alto desempenho com peso específico em torno de 1600kg/m<sup>3</sup>.

No CAD a otimização do esqueleto granular, ou seja, composição selecionada da granulometria da fase agregado também é utilizada, sendo teoria de embasamento para diversos métodos de dosagem.

Os métodos de dosagem consagrados para concretos são divididos em dois grupos: os baseados no critério do volume absoluto e aqueles baseados na otimização do esqueleto granular.

Nos métodos que constituem o primeiro grupo, as quantidades dos componentes são calculadas de acordo com os procedimentos das metodologias adotadas, e ao fim, o volume de um metro cúbico de concreto é fechado pelo agregado miúdo.

Os métodos pertencentes ao segundo grupo, como o próprio nome diz, baseiam-se na melhoria da composição do agregado graúdo utilizado, quanto a sua granulometria, podendo ser uma composição garimpada dentre diversas britas com materiais retidos em diferentes peneiras, o que muitas vezes é inviável para produção em grande escala ou uma otimização mais simples, provinda, por exemplo, da composição entre duas britas de granulometria comercial à proporção ótima.

Utilizando três britas com diferente granulometria, Carneiro et al. (2003, p.1-15), a partir da equação do somatório de uma progressão geométrica, compôs novas combinações granulométricas, observando, em alguns casos, a diminuição no consumo de cimento para uma mesma resistência à compressão desejada.

### **2.3.3 Adições Minerai**s

Adições minerai

s, segundo Mehta e Monteiro (1994, p.290), são materiais silicosos finamente moídos, adicionado em quantidades relativamente grandes à massa de cimento Portland. As adições minerais podem ser cimentantes (escória granulada de alto forno) e/ou

pozolânicos (sílica ativa), e apresentam ainda ganhos de resistência aos concretos atribuídos ao efeito “filler” (preenchimento de vazios), devido suas características físicas.

Dentre os mais difundidos aditivos minerais utilizados na produção de CAD, tem-se: sílica ativa, escória de alto-forno, cinza volante, cinza de casca de arroz, entre outros.

A reação pozolânica, isto é, a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), tem três aspectos importantes: baixa taxa de liberação de calor, consumo do óxido de cálcio ao invés de produzi-lo, além de contribuírem no preenchimento dos poros.

Além das pozolanas naturais, diversos subprodutos possuem características pozolânicas, os quais por razões econômicas são os mais utilizados. Na redução de quartzo a silício, a sílica ativa é o subproduto dos fornos elétricos de fusão, do tipo arco-voltaico, das indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício.

As adições pozolânicas ultrafinas, como a sílica ativa, são descritas por Dal Molin (1995, p.53) como as mais indicadas na produção do CAD, pois além do efeito químico, atuam fisicamente, densificando a matriz e a zona de transição.

Segundo Libório (2004b), a sílica ativa propicia um efeito de “envelopamento” nos agregados, isto é, quando proporcionado a sua mistura previa com a água e o agregado, uma espécie de “nata” envolve o agregado possibilitando o preenchimento de possíveis falhas existentes em sua superfície e melhorando assim seu desempenho.

Vários pesquisadores confirmam que a porcentagem de sílica ativa ótima, levando em conta custo e benefício gira em torno de 10% da massa do cimento utilizado.

### **2.3.4 Aditivos Químicos**

Segundo Ramachandran (1995, p.137), aditivos químicos são materiais solúveis em água, adicionados à mistura em pequenas quantidades, os quais podem propiciar o aceleração ou retardamento da pega, redução da quantidade de água, o aumento da trabalhabilidade, ganhos de resistência, durabilidade, etc.

Dentre vários tipos de aditivos existentes os superplastificantes são indispensáveis na produção do CAD, pois com as baixas relações água/aglomerante praticadas não seria possível propiciar e manter a trabalhabilidade desejada.

Os aditivos superplastificantes atuam no concreto dispersando as partículas de cimento, as quais apresentam grande tendência a flocular quando em contato com a água de amassamento.

O efeito dos superplastificantes nos concretos com adição de sílica ativa é ainda mais imprescindível, pois como afirma Dal Molin (1995, p.91), estes concretos possuem um alto grau de coesão.

Os aditivos superplastificantes podem ser, quanto à sua composição química a base de: lignosulfonatos, naftalenos, melamínicos e policarboxilatos.

Os lignosulfonatos foram pioneiramente utilizados apenas como aditivos redutores de água. Somente com a diminuição dos efeitos secundários decorrentes de impurezas do seu processo de fabricação, segundo Aïtcin (2000, p.194-195), é que foi possível seu uso como superplastificante. Devido ao seu baixo desempenho, quando utilizados são combinados com superplastificantes de outras bases, ou seja os melamínicos e os naftalenos.

Nas décadas de 70 e 80 do século XX os superplastificantes mais utilizados foram os melamínicos e os naftalenos. Os superplastificantes a base de melamina podem apresentar tendência a retardar a pega do cimento e a incorporação de ar. Quanto aos superplastificantes a base de naftaleno são mais concentrados ou seja, possuem teores de sólidos mais elevados resultando em menores dosagens percentuais.

Os superplastificantes à base de policarboxilato são também denominados como de terceira geração. Estes possuem a maior capacidade de ação na dispersão dos materiais aglomerantes, sendo na atualidade os mais indicados para a produção de CAD.

Entretanto, são muitos os aditivos superplastificantes disponíveis no mercado, e lembrando ainda, que apesar dos cimentos serem classificados em tipos normalizados, é permitida uma grande faixa de variação das suas composições químicas. Sendo procedente uma investigação da compatibilidade entre o superplastificante e material aglomerante utilizado.

Aïtcin (2000, p.183) comenta que determinada combinação pode levar a elevados resultados de resistência à compressão, mas não com as propriedades reológicas desejadas, ou vice-versa. A análise do desempenho da interação de aglomerantes e superplastificantes

é comumente baseada na fluidez e manutenção da trabalhabilidade de pastas de cimento, utilizando-se por exemplo um funil de Marsh e definindo ainda teores ótimos de dosagem.

### **2.3.5 Água**

De acordo com o ACI 363 – ACI (1992, p.6) a água utilizada na produção do CAD segue os mesmos requisitos necessários ao concreto convencional.

No CAD, como mencionado anteriormente, é prática corrente a utilização de outros materiais aglomerantes além do cimento. Assim é corriqueira a referência da relação água/aglomerante (a/agl) ao invés da relação água/cimento (a/c).

## **2.4 PROPRIEDADES DO CAD**

### **2.4.1 Propriedades no Estado Fresco**

Para a determinação das propriedades do CAD no estado fresco empregam-se os mesmos procedimentos e equipamentos utilizados para o concreto convencional, dentre àqueles mais corriqueiros tem-se as seguintes determinações: massa específica, abatimento do tronco de cone e teor de ar. Contudo, estes ensaios são bastante vantajosos, pois além de corriqueiros fornecem precocemente indicativos de possíveis problemas ou de plena conformidade.

O CAD apresenta uma massa específica em torno de  $2500\text{kg/m}^3$ . Este ligeiro acréscimo de massa específica em relação ao concreto convencional pode ser explicado pelo maior consumo de cimento e concomitantemente menores quantidades de água praticadas, dado que a massa específica do cimento é cerca de três vezes maior do que a da água.

A quantidade de água empregada nos concretos de alto desempenho não é suficiente muitas vezes nem para a completa hidratação de todo o cimento contido no traço, assim o comportamento reológico do CAD possui grande diferenciação, em relação ao concreto convencional, uma vez que sua trabalhabilidade depende de forma contundente do efeito dos aditivos químicos, em especial os superplastificantes.

Entretanto, devido sua simplicidade e globalização, o método mais utilizado na caracterização da consistência do CAD também é o ensaio de abatimento do tronco de cone, apresentado na NBRNM 67 – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT

(1998), ou ainda denominado de “slump test” (terminologia internacional), de acordo com o ACI 166R-00 – ACI (2000, p.60).

Aïtcin (2000, p.394) menciona certa dificuldade na medição propriamente dita do abatimento do tronco de cone para o CAD, devido ao mesmo ser progressivo, mas afirma que nenhum outro ensaio de consistência possui uma metodologia de tão fácil reprodução também no campo. Devido ao alto grau de coesão do CAD no estado fresco se fazem comuns valores de abatimentos no tronco de cone de no mínimo 10cm, chegando a até o abatimento total, por volta dos 25cm.

Quanto ao teor de ar incorporado no CAD, sem utilização de incorporadores de ar, esta em torno de 1% a 3%, sendo que quanto mais baixas as relações água/aglomerante aumenta-se a tendência de incorporação de ar. No entanto Aïtcin (2000, p.398), afirma que através de combinações de cimento/superplastificante com ótima compatibilidade é possível a obtenção de teores de ar incorporados entre 1% e 1,5% também para relações água/aglomerante baixas (0,30), ressaltando ainda a importância da diminuição do teor de ar incorporado para evitar possíveis perdas na resistência.

## **2.4.2 Propriedades no Estado Endurecido**

A superioridade do CAD, em relação ao concreto convencional, é notada em vários aspectos, mas não em mesmo grau de evolução, ou seja, a melhoria de suas propriedades não se dá com uma mesma proporcionalidade. A título de ordem de grandeza o CAD em linhas gerais possui, em comparação ao concreto convencional, um coeficiente de permeabilidade superior da ordem de 10.000. Além disso, sua resistência à compressão pode ser até 4 vezes maior. Seu módulo de elasticidade é também superior, porém não ultrapassa o dobro dos valores do concreto convencional.

O presente item irá focar sobretudo as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho que serão estudadas no programa experimental desta pesquisa.

### **2.4.2.1 Resistência à compressão**

O CAD é um material com resistência à compressão superior a dos concretos convencionais, proporcionando uma redução, nas seções transversais dos elementos



estruturais, permitindo assim elaboração de projetos com áreas úteis mais amplas, especialmente nos térreos e subsolos de edifícios.

Os valores de resistência à compressão são obtidos através do ensaio de corpos-de-prova normalizados em diferentes tamanhos e formatos. No Brasil e Estados Unidos adota-se cilindros com dimensões de 15 x 30cm ou 10 x 20cm, os quais segundo Aïtcin (2000, p.457) produzem o mesmo grau de confiabilidade. Na Alemanha e Noruega são utilizados corpos-de-prova cúbicos com dimensões de 14 x 14 x 14cm e 10 x 10 x 10cm, respectivamente.

Para o CAD é comum, em nível internacional, a opção pelos corpos-de-prova de menor dimensão, e assim conseqüentemente com menor área de contato destinada à aplicação do carregamento de compressão, em função da capacidade das prensas utilizadas. Deve ser sempre respeitada, no caso dos corpos-de-prova cilíndricos, a relação entre o diâmetro ( $d$ ) e a altura  $2d$ , onde o diâmetro do corpo-de-prova deve ser maior ou igual a três vezes o DMC dos agregados graúdos empregados

A resistência à compressão do concreto está relacionada com a estrutura interna do material sendo um importante parâmetro do seu desempenho em termos mecânicos e indiretamente, a outros atributos.

Contudo, como exposto anteriormente, as diferenciações na estrutura do CAD resultam muitas vezes em correlações distintas àquelas já consagradas para o concreto convencional, existindo assim dificuldades em estimar novas formulações.

#### 2.4.2.2 Módulo de elasticidade

Quando as estruturas de concreto são projetadas é fundamental o conhecimento do seu módulo de elasticidade, permitindo assim que as deformações dos elementos estruturais sejam compatibilizadas. A relação entre o incremento de tensão e o incremento de deformação é chamada de módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade é uma propriedade importante no dimensionamento de estruturas de concreto armado e protendido, principalmente, segundo Gutierrez e Canovas (1995, p.559), em estruturas que necessitam de um controle rigoroso em relação às deformações e os deslocamentos. Lydon e Iacovou (1995, p.1246) recomendam ainda uma

atenção especial à determinação do módulo de elasticidade do CAD, onde as deformações são extremamente importantes, devido a esbelteza propiciada aos elementos estruturais.

O concreto de alto desempenho por possuir uma microestrutura mais densa, com menos água disponível e maior refinamento dos poros, segundo Kalintzis (2000, p.103), apresenta um comportamento com relação às deformações diferente dos concretos convencionais.

Segundo o CEB-FIP 197 apud Simplicio (2004, p.6), os gráficos tensão-deformação do CAD, quando comparados aos respectivos gráficos dos concretos convencionais, são mais lineares para valores de resistência à compressão mais elevados, possuem maior deformação relativa à tensão máxima e uma deformação última reduzida; características as quais são ressaltadas na Figura 2.

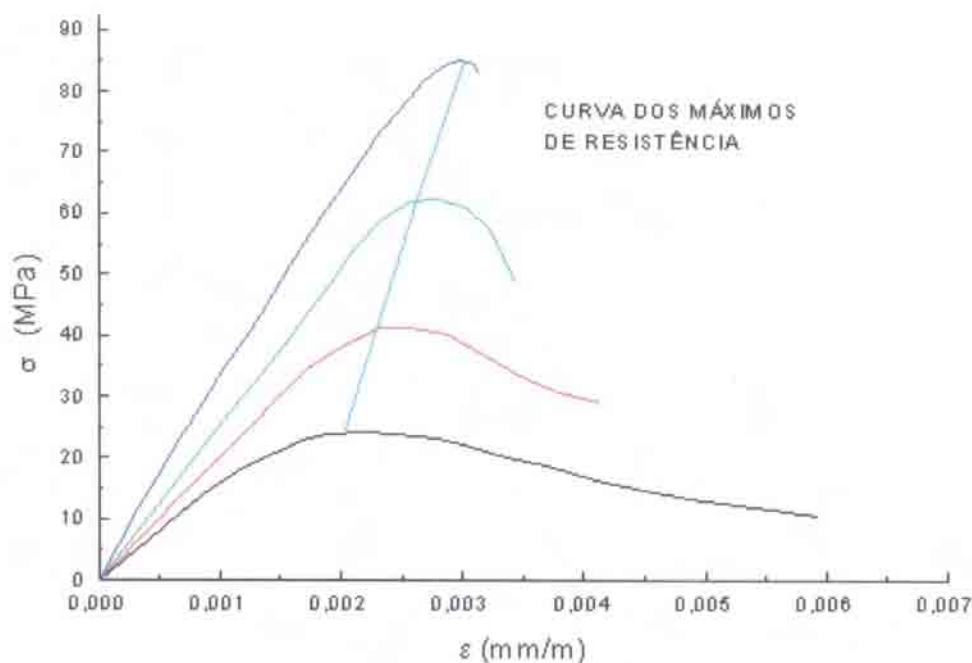


Figura 2: Curvas tensão-deformação para várias resistências de concreto  
Fonte: SIMPLICIO (2004, p.6)

O módulo de elasticidade do CAD, de acordo com Zhou, Lydon e Barr (1994, p.185); Persson (1996, p.107); Beshr, Almusallam e Maslehuddin (2003, p.103) entre outros, é fortemente influenciado pelas propriedades elásticas dos agregados graúdos,

resultado da eficiente transferência de tensões entre a pasta de cimento e os agregados graúdos.

As características mineralógicas dos agregados graúdos afetam significativamente o módulo de elasticidade do CAD. Através da simples mudança do tipo do agregado, conforme Gutierrez e Canovas (1995, p.567), é possível chegar a uma variação de 30% no módulo do concreto de alto desempenho.

Entretanto, nem sempre os agregados graúdos que proporcionam um CAD com maior resistência à compressão são aqueles que resultam num maior módulo de elasticidade. Este comportamento de certa forma contraditório foi explicado por Neville (1997a, p.74), pelo fato de que quando os agregados e a matriz de cimento apresentam módulos de elasticidade similares, tem-se uma menor, e menos nociva, concentração de tensão nas interfaces, o que eleva o módulo de elasticidade.

#### 2.4.2.3 Resistência à tração

O valor da resistência à tração do concreto pode ser obtido através de três tipos de ensaio: resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e resistência à tração direta. Segundo Oluokun, Burdette e Deatherage (1991, p.116), a melhor maneira para prever o comportamento do CAD quando submetido à tração é determiná-la através do ensaio experimental por compressão diametral, o qual devido sua praticidade é bastante difundido e possibilita a execução de grande número de ensaios num curto espaço de tempo.

Principalmente nas primeiras idades, as taxas de evolução da resistência à compressão e a tração dos concretos de alto desempenho são superiores quando comparadas aos concretos convencionais.

A medida do aumento da resistência à compressão dos concretos, Price apud Mehta e Monteiro (1994, p.70) observa uma diminuição no quociente da relação resistência à tração e resistência à compressão, fato também comprovado por Dal Molin (1995, p.233).

O valor de 4 MPa de resistência à tração é o máximo admitido na previsão empírica dada pela norma norueguesa NS 3473 – NORWEGIAN STANDARDS apud Dal Molin (1995, p.61), a qual é válida para concretos de até 80 MPa de resistência à compressão. Zain et al. (2002, p.1255) sugere fórmulas que relacionam a resistência à tração do CAD

com a resistência à compressão, fator água/aglomerante ou sua idade, com precisão satisfatória.

#### 2.4.2.4 Outras propriedades

Segundo Kaszynska (2002, p.260), o aumento de temperatura do concreto, resultante do calor liberado nas reações de hidratação, depende da quantidade de cimento hidratado e não da quantidade total presente na mistura. Assim no CAD, apesar dos elevados consumos de cimento praticados, não ocorre um desprendimento muito maior de calor, pois a baixa quantidade de água empregada não propicia a total hidratação do cimento, reduzindo então parte do calor liberado e colaborando para o não aparecimento fissuras de origem térmica.

A abrasão é um desgaste causado por repetições de fricção, polimento ou até ainda raspagem; grandeza a qual muitas vezes pode indicar a durabilidade de determinado material.

Segundo Silva (2000, p.78), não existe ainda nenhum critério uniformemente aceito para a avaliação da abrasão em concretos em geral, contudo tal grandeza esta diretamente ligada com sua resistência à compressão, implicando assim que o CAD apresente ótima resistência à abrasão.

Devido a menor quantidade de água disponível e a melhoria conseguida na qualidade da pasta, onde, segundo Kalintzis (2000, p.104-105), ocorre efetivamente a fluência, a retração por secagem (uma das principais causas de fissuração) e as deformações lentas ocasionadas pela fluência (responsáveis, por exemplo, pelo aumento das deformações em elementos estruturais), são menores no CAD comparadas as dos concretos convencionais. Entretanto, o CAD apresenta grande deformação autógena em relação aos concretos convencionais, o que é ocasionado devido a maior quantidade de cimento por volume de pasta.

A absorção de um concreto e a facilidade com a qual um fluido penetra no concreto não tem, necessariamente, um comportamento regular, assim a absorção, segundo Neville (1997b, p.486), não pode ser uma medida de qualidade do concreto, entretanto ele ressalta que concretos de boa qualidade têm absorção bastante inferior a 10%. No CAD devido sua

baixa permeabilidade, devido à descontinuidade de capilares, seus índices de absorção de água são ainda mais reduzidos.

A não existência de metodologia difundida e padronizada para a avaliação da resistência ao impacto do material concreto faz com que esta abordagem não seja trivial, entretanto sua determinação pode ser interessante à comparação qualitativa para certos fins investigatórios.

Comumente as metodologias empregadas, com certas variações, baseiam-se na queda livre de um peso conhecido, de uma ou mais alturas pré-determinadas, sobre corpos-de-prova prismáticos assentados numa camada de areia, através da altura de queda e do peso utilizado calcula-se a resistência ao impacto em função da energia necessária à fissuração do concreto. Rossignolo (2003, p.157), observou maiores valores de resistência ao impacto para os concretos de alto desempenho modificados com um tipo de látex, em relação àqueles não modificados.

#### 2.4.2.5 Aspectos de instrumentação sobre a avaliação da resistência mecânica

Para os ensaios mecânicos, nos quais os corpos-de-prova de concreto são submetidos à compressão axial, é imprescindível a correção das imperfeições dos topos dos corpos-de-prova a fim de tornar suas faces planas e paralelas, isentando-os assim de possível excentricidade quando da aplicação do carregamento.

No caso do concreto convencional esta regularização é realizada tradicionalmente através de capeamento aderente à base de enxofre. No entanto para os concretos de alto desempenho, onde se faz necessário à sua experimentação a aplicação de tensões de elevada grandeza, segundo Shah e Ahmad (1994, p.21), além de compostos de capeamento aderente de alta resistência outras soluções tem sido também utilizadas e avaliadas pela comunidade técnica-científica, dentre as quais sistemas de capeamento não aderentes e a retificação dos topos dos corpos-de-prova.

Os compostos de capeamento de alta resistência, segundo Aïtcin (2000, p.450), apresentam resistência à compressão de 55MPa a 60MPa quando ensaiados em corpos-de-prova cúbicos de 50mm. Portanto, numa comparação direta, estes valores ainda seriam inferiores a resistência à compressão apresentada pela maioria dos concretos de alto desempenho, fato que resulta em apreensão quanto a possibilidade de ruptura do

capeamento antes mesmo do CAD, prejudicando assim uma efetiva transmissão de esforços.

Entretanto, devido a esbeltez da espessura dos capeamentos aderentes e o efeito de confinamento sobre a mesma durante a aplicação do carregamento, sua capacidade de resistência aumenta consideravelmente. Deste modo os compostos de capeamento de alta resistência, ainda segundo Aïtcin (2000, p.450), podem ser utilizados para ensaiar concretos de alta resistência de até 130MPa, obedecendo-se a espessura máxima de 2mm para o capeamento e o paralelismo das faces.

Contudo, Vadakan, Carino e Mullings (1998, p.234) concluíram que as performances dos materiais utilizados para capeamento seriam avaliadas de melhor forma com base nos respectivos valores de módulo de elasticidade ao invés das suas resistências à compressão. Afirmando ainda que para o capeamento ser eficaz seu módulo de elasticidade deveria ser igual ou maior à metade do valor do módulo do concreto em questão.

Quanto aos sistemas de capeamento não aderente, são constituídos usualmente por bases de poliuretano ou neoprene e anéis de alumínio onde as mesmas são inseridas, como elucidado na Figura 3. De acordo com Carrasquillo e Carrasquillo apud Shah e Ahmad (1994, p.22), estes sistemas são válidos para concretos com resistência à compressão de até 70MPa, contudo após este patamar os resultados são superestimados devido a grande restrição provocada pelo sistema nas extremidades do corpo-de-prova.



Figura 3: Sistema de capeamento não aderente constituído por bases de neoprene e anéis de alumínio

O sistema de retificação de materiais, uso corrente da indústria mecânica, resume-se ao desgaste de imperfeições de qualquer superfície desejada, por meio de um disco abrasivo (rebolo), com precisão capaz de torná-la plana. As retíficas são máquinas operatrizes constituídas basicamente por um sistema de fixação da peça a ser retificada, rebolo rotativo e aparato destinado a aproximação do rebolo à peça, ou o reverso, com disponibilidade de diversos recursos de avanço e retrocesso com elevada exatidão.

A indústria mecânica possui, em linhas gerais, dois tipos de retífica: uma denominada de máquina retificadora com mesa móvel, tipo utilizado por Pereira Neto (1994, p.76-77) e exemplificada na Figura 4; e outra a qual é um acessório acoplado a um torno mecânico, sendo conhecida como retifica de torno, tipo atualmente utilizado pelo Laboratório de Concreto FURNAS, e ilustrado na Figura 5.

Pereira Neto (1994, p.90) ao determinar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de corpos-de-prova de CAD com topos regularizados com capeamento a base de enxofre ou retificados, observou que, de modo geral, os resultados foram maiores quando determinados em corpos-de-prova retificados.



Figura 4: Máquina retificadora com mesa móvel  
Fonte: MITUTOYO (2005)



Figura 5: Retífica acoplada em torno mecânico

O ACI 363 – ACI (1992, p.19) afirma que o procedimento mais indicado à correção das imperfeições dos topos dos corpos-de-prova de CAD é a retificação, no entanto ressalta sua demorada preparação, a qual não demonstra praticidade para quantidades elevadas de corpos-de-prova a serem ensaiados, e assim como Shah e Ahmad (1994, p.21); De Marco, Reginatto e Jacoski (2003, p.6) citam também o problema do alto custo dos equipamentos envolvidos na retificação dos corpos-de-prova.

Dessa forma surgiram no mercado máquinas retificadoras de corpos-de-prova, as quais sofreram simplificações em específico para servir ao ramo do controle tecnológico do concreto, mas certamente possuem menos recursos e durabilidade que as retíficas voltadas para os setores da indústria mecânica, onde é comum a precisão de centésimos de milímetros. Tal precisão é realmente demasiada para a indústria do concreto, entretanto é cômoda ao controle tecnológico do CAD, no que diz respeito à regularização das superfícies dos corpos-de-prova.

Nas retíficas específicas para corpos-de-prova de concreto, exemplificada na Figura 6, devido o ângulo-de-aproximação, entre o rebolo e o corpo-de-prova, ser fixo ( $0^\circ$ ) e o posicionamento do corpo-de-prova ser baseado apenas num gabarito desprovido de escala mensurada, é comum a retificação de uma espessura maior do que a desejada e/ou a quebra de parte das bordas do corpo-de-prova, resultando no comprometimento do formato e área efetiva da sua superfície, o que invalida o ensaio deste corpo-de-prova.





Figura 6: Máquina retificadora de corpos-de-prova de concreto  
Fonte: MARTINS et al. (2004)

Após as ponderações precedentes, conclui-se que quando disponível uma retífica de boa performance o melhor método para preparar os corpos-de-prova de CAD será através de sistema de retificação, todavia podem ser utilizados os compostos de capeamento de alta resistência obedecendo-se os preceitos citados anteriormente.

## 3. RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU

### 3.1 HISTÓRICO

A utilização primitiva da borracha se faz anterior ao ano de 1500, onde os índios Latino-Americanos, dentre outras aplicações, já elaboravam de forma rudimentar, bolas destinadas a brincadeiras e seringas para armazenamento de líquidos. Estas seringas mais tarde deram origem ao nome popular de seringueiras às árvores da espécie *Hevea Brasilienses*, as quais quando submetidas a incisões na sua casca segregam o látex, um líquido branco e denso que depois de coagulado resulta na borracha natural.

Com o descobrimento das Américas os europeus foram tomando conhecimento deste material único para a época, uma vez que apresentavam em conjunto as propriedades de flexibilidade e impermeabilidade, assim, com os relatos de expedicionários e pesquisadores determinados, a borracha foi ganhando diversas aplicações no Velho Mundo.

Entretanto, apesar de intensas as buscas por processos que excluíssem da borracha a sensibilidade à temperatura e sua característica pegajosa, foi de maneira acidental, ao deixar cair um pouco de enxofre na mistura de borracha quando ao fogo, que em 1839 o americano Charles Goodyear descobriu o processo de vulcanização, o qual eleva as propriedades de resistência e elasticidade da borracha, e assim tornou-a versátil à manufatura e desenvolvimento de milhares de produtos.

Dentre outros produtos essenciais à base de borracha vulcanizada destaca-se o pneu, tendo sido inventado em 1845 por Robert Willian Thomson foi testado em carruagens, mas devido às dificuldades de produção por mais de 40 anos foi ignorado. Segundo Pinheiro (2001, p.4), somente em paralelo ao surgimento das bicicletas o pneu encontrou seu nicho, e então, sofrendo evoluções, chega-se, em 1895, aos primeiros pneus destinados a automóveis, os quais foram produzidos pelos franceses André e Édouard Michelin.

A intensa propulsão da indústria automobilística, desde o início do século XX, levou conseqüentemente ao agigantamento de diversos setores industriais destinados a seu suprimento, tendo especial destaque às empresas produtoras de pneus.

Com o intuito de auxiliar no abastecimento das necessidades do mercado mundial de borracha, através de investimentos em pesquisas, foram desenvolvidas as borrachas

sintéticas, contudo, ainda hoje, na produção de pneus são empregadas borrachas naturais e sintéticas.

Ao longo dos tempos e aos milhões, os pneus foram, e ainda são, produzidos, utilizados e descartados. A necessidade da produção e utilização dos pneus pela humanidade se faz um fato consumado, no entanto, é o descarte, seja por abandono ou por disposição inadequada, que resulta no acúmulo destes pneus inservíveis e causa apreensão à sociedade.

Desse modo, na atualidade, devido a grande proporção alcançada por essa problemática se faz imperativo o desenvolvimento de técnicas que visem contribuir, das mais variadas formas, com a diminuição do acúmulo de pneus descartados.

### ***3.2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE***

A qualidade de vida da população mundial dependerá, ao longo do tempo, cada vez mais da eficiência dos processos de reutilização de materiais descartados, tornando-os energeticamente mais eficientes e menos poluentes, e também do uso racional dos materiais primários, contribuindo assim com a diminuição do acúmulo de “lixo” no globo terrestre.

Assim no mundo contemporâneo, onde muitos problemas são globalizados, existe grande comprometimento em aliar a propulsão do desenvolvimento com a preservação do meio ambiente, ocorrendo um real e sadio interesse pela reciclagem de manufaturados que assolam o globo.

Nos últimos anos a comunidade da construção civil vem demonstrando grande preocupação em contribuir para o desenvolvimento sustentável global, sendo constante os estudos referentes ao reaproveitamento de materiais tidos como inservíveis, visando observar as possíveis vantagens no uso destes resíduos e de maneira geral colaborando com a preservação do meio ambiente.

Estes materiais estudados podem ser oriundos de processos da área da construção civil ou, muitas vezes, descartes de outros setores produtivos, promovendo neste caso a interação entre cadeias produtivas. Assim, colaborando para a sustentabilidade universal, uma determinada cadeia produtiva X ao aproveitar o resíduo de outra cadeia Y contribui para a otimização do processo de Y e muitas vezes poupa parte dos recursos tradicionalmente utilizados no processo de X.

Dentro deste enfoque o descarte de materiais poliméricos, devido sua demorada decomposição, em especial dos pneus é destacada por Adhikari, De e Maiti (2000, p.910) como um dos grandes problemas do século XXI a ser argüido pela humanidade.

O colossal número de toneladas de pneus inservíveis que anualmente são acumulados ao redor do mundo gera contundente impacto ambiental ao meio ambiente de maneira geral.

Este problema mundial do descarte de pneus inservíveis se faz notório, de forma não menos que atemorizante, através da simples exposição dos dados alusivos à quantidade de pneus descartados somente nos Estados Unidos. Segundo Jang et al (1998, p.1), 279 milhões de pneus são descartados anualmente e somados aos então 2 bilhões de pneus acumulados por todo o território americano.

De acordo com CEMPRE (2005), a estimativa é de que o Brasil descarte 260 mil toneladas de pneus inservíveis anualmente, em média considerando-se dez quilos por pneus, perfazem o total de 26 milhões de pneus. Sendo sua produção em 2002, 41 milhões de unidades de pneus e em 2003, 45 milhões.

As áreas em que ocorrem o acúmulo de pneus, exemplificada pela Figura 7, constituem imensos potenciais para a procriação de mosquitos vetores de doenças e também são de difícil controle de incêndio, como representado na Figura 8, infortúnio este que pode levar a contaminações do ar, solo e lençol freático.



Figura 7: Acúmulo de pneus inservíveis  
Fonte: ADEME (2005)



Figura 8: Incêndio em áreas com acúmulo de pneus inservíveis  
Fonte: KIDDE BRASIL (2005)

Deste modo, diversos órgãos ligados à preservação do meio ambiente em vários países do mundo estão tornando as leis ambientais cada vez mais rígidas. Assim, várias determinações legais foram instauradas para combater em especial este impacto ambiental, dentre outras é possível citar as resoluções brasileiras 258 e 301 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (1999) e a diretiva da comunidade européia 99/31/CE – CONSIGLIO DELL UNIONE EUROPEA (1999), que, em síntese, proíbem a deposição desordenada dos pneus inservíveis e transferem grande parte do problema aos fabricantes destes pneus, daí uma maior necessidade e interesse em propostas para este resíduo.

Assim, a borracha provinda de pneu inservível tem sido objeto de estudo de inúmeras pesquisas, dentro das mais diferentes áreas de interesse, onde cada setor visa aproveitar parte desse enorme potencial em inúmeras aplicações.

No decorrer deste capítulo serão abordadas algumas possibilidades de aplicação da borracha de pneu inservível, com destaque ao uso de resíduos desta borracha na produção de materiais a base de cimento Portland, uma vez que este se correlaciona à parte do âmbito experimental desta pesquisa.

### 3.3 ORIGEM

Para a melhor compreensão das diferentes fases transpostas pelo pneu, desde quando novo até ser considerado inservível, e das possíveis intervenções ao longo deste período visando à otimização do seu uso e dos processos de reaproveitamento, a seguir, serão expostos alguns conceitos.

Na Figura 9, é possível observar um pneu em corte onde são expostas as diversas partes constituintes do mesmo, ressaltam-se os termos: banda de rodagem, parede lateral ou flanco, carcaça, entre outros.

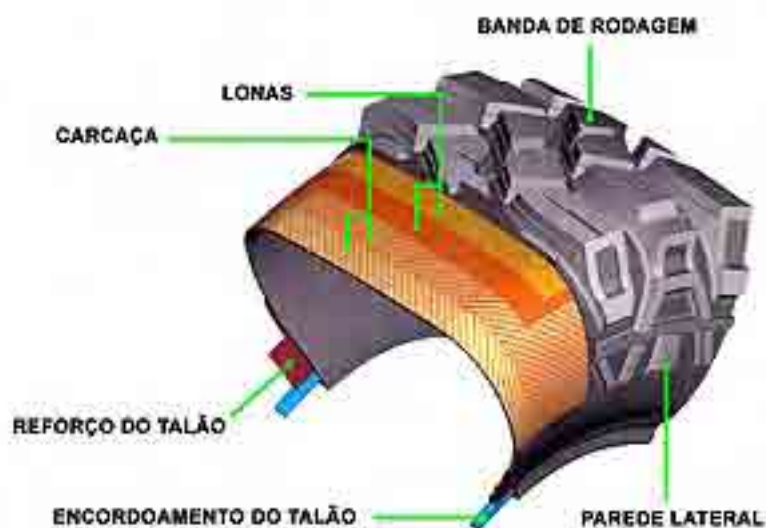


Figura 9: Esquema de um pneu em corte  
Fonte: BRAZILTIREES (2005)

De maneira geral, a necessidade de trocas dos pneus dos veículos ocorrem após o desgaste acentuado das suas bandas de rodagem, sendo este também um parâmetro geral para classificar um pneu de velho ou novo.

O ponto ideal para troca de pneus, ao menos aos leigos, é discutível, uma vez que envolve fatores de segurança e custo ao usuário. Assim, o aproveitamento máximo do pneu quanto à durabilidade pode ser afetado negativamente por decisão de uma troca prematura, contribuindo para o maior consumo de pneus.

Em muitos países, onde os invernos são hostis, submetidos a períodos relativamente longos sob incidência de neve, as trocas de pneus, variando entre apropriados para neve ou

pavimento habitual, são feitas quase que periodicamente em acordo com as mudanças das estações climáticas de maior contraste. Assim estas ocorrências podem ser consideradas como sérios agravantes ao acúmulo de pneus descartados.

Em ocorrida a troca, os pneus retirados do veículo podem ter diversos destinos, dentre os quais destacam-se quando:

- A. forem simplesmente descartados;
- B. submetidos a processos de recauchutagem, retornando ao uso em veículos;
- C. direcionados a diferentes tipos de reaproveitamento.

No caso dos pneus serem simplesmente descartados, (A), então estarão aumentando diretamente o acúmulo de pneus inservíveis, e assim as adversidades relacionadas a este fato.

Quanto aos pneus submetidos ao processo de recauchutagem, (B), serão novamente utilizados em veículos. Neste processo é feita a raspagem mecânica do restante da banda de rodagem velha, como ilustra a Figura 10, Figura 11 e a Figura 12, para que a carcaça do pneu fique apta a sofrer efetivamente o processo de recauchutagem (aderência de uma nova banda de rodagem) e então retorne ao uso, tecnicamente como novo.



Figura 10: Operação de raspagem do pneu à ser recauchutado



Figura 11: Detalhe da raspagem do pneu à ser recauchutado



Figura 12: Detalhe da ferramenta rotativa de raspagem de pneus

Segundo Santos apud Sugimoto (2004, p.11) a vida útil dos pneus tem aumentado nas últimas décadas, sendo nos dias atuais a recauchutagem uma prática em 70% da frota de transporte de cargas e passageiros no Brasil.

É válido ressaltar que normalmente cada carcaça é apta a sofrer apenas duas vezes o processo de recauchutagem, onde somando o ciclo de vida inicial até o primeiro desgaste



acentuado, de sua banda de rodagem, cada pneu teria seu potencial estendido a três ciclos. Assim, quando submetido ao processo de recauchutagem um pneu inapto, este poderá ser simplesmente descartado, destino (A), ou ainda ser direcionado a diferentes tipos de reaproveitamento, (C).

A raspagem mecânica, ora citada, faz com que o restante da banda de rodagem velha transforme-se em pequenas partículas de diversa granulometria, com formatos variando de alongados (tipo fibra) a granular (tipo pó), sendo denominados de forma geral como resíduos de borracha de pneu. Estes resíduos de borracha de pneu também podem ser levados simplesmente ao descarte, (A), ou ainda serem encaminhados a diferentes tipos de reaproveitamento, destino (C), o qual é abordado a seguir.

Em linhas gerais, os pneus que foram acertadamente direcionados a diferentes tipos de reaproveitamento, (C), podem ser diretamente utilizados com a sua configuração usual ou passar por processos modulados de redução de tamanho, através de corte ou trituração, o que além de reduzir o espaço de acondicionamento, multiplica as possibilidades de reaproveitamento

Lembrando ainda que, uma vez iniciado o processo de redução de tamanho do pneu, este não tem a necessidade de ser reduzido até a menor fração e sim a mais interessante à aplicação a qual se destina.

Normalmente parte-se da divisão do pneu ao meio (no sentido transversal), em seguida estas metades são reduzidas à quarta parte e então são submetidos a processos de cortes aleatórios e seqüenciais, resultando então em partículas com grande diversidade de granulometria e diversos formatos, dentre os quais, tem-se pedaços maiores (tipo placa), alongados (tipo fibra) e granular (tipo pó), sendo denominados, também de forma geral, como resíduos de borracha de pneu.

Entretanto, existem outras configurações mais específicas de divisão, como por exemplo, a simples separação, também através de corte, das duas paredes do pneu do restante de sua carcaça, a qual pode ser transformada em uma única tira.

Além dos processos de redução de tamanho dos pneus inservíveis à temperatura ambiente, alguns processos usam a criogenia, ou seja, o congelamento da borracha através do emprego de nitrogênio, com o intuito de facilitar o fracionamento dos resíduos. Tal

processo tem como característica a produção de resíduos de borracha de reduzida granulometria e com planos de superfície bem definidos.

Quanto aos resíduos de borracha de pneu oriundos do processo de recauchutagem e direcionados a diferentes tipos de reaproveitamentos, (C), podem ser misturados ou não, aos resíduos provenientes diretamente do corte do pneu para serem reaproveitados.

### **3.4 APLICAÇÕES GERAIS**

A seguir serão expostas algumas aplicações gerais da borracha de pneu inservível, seja a partir do pneu em sua conformação completa ou fracionada.

Uma das grandes contribuições à reciclagem dos pneus inservíveis vem dos processos industriais que utilizam grandes fornos de altas temperaturas. O alto valor calorífico dos pneus inservíveis é utilizado, por exemplo nos fornos destinados à produção de cimentos.

Segundo CEMPRE (2005) os percentuais dos pneus inservíveis, gerados a cada ano no Brasil e nos Estados Unidos, que tem como destino os fornos das cimenteiras são em torno de 57% e 73%, respectivamente. Contudo, ressalta-se que as parcelas complementares de tais percentuais ainda representam quantidades extraordinárias.

Outro processo de reciclagem denominado de pirólise, baseia-se na degradação térmica de um determinado resíduo da qual resultam subprodutos, os quais podem ser de mais fácil reaproveitamento. No caso dos pneus quando submetidos a pirólise, segundo Chen e Qian (2003, p.463); Williams (2004, p.69), dão origem a óleos, gases, carbono sólido residual e carcaças metálicas dos próprios pneus, os quais possuem certa aptidão para serem reciclado.

Outra aplicação para pneus inservíveis é apresentada, dentre outros, por Collins et al. (2002, p.243-249), onde diferentes configurações de pneus, ilustradas na Figura 13, estão sendo monitorados e utilizadas como recifes artificiais. Neste trabalho são feitas referências a diversas utilizações de pneus inservíveis em construções marítimas, dentre as quais destaca-se a remota informação, exposta por Stone et al. apud Collins et al. (2002, p.243), quanto à existência, já no ano de 1975, de mais de quarenta conjuntos de recifes artificiais na costa leste americana, totalizando o representativo número de 700.000 pneus.



Figura 13: Configurações de pneus velhos utilizadas como recifes artificiais  
Fonte: COLLINS et al (2002, p.245)

A partir de um fracionamento simples de pneus inservíveis, e então, através da combinação das bandas de rodagem e as laterais de pneus descartados, visualizada na Figura 14, Yoon, Cheon e Kang (2004, p.1-15) desenvolveram espécie de uma malha, a qual, quando empregada em solos arenosos, demonstrou aumentar sua capacidade de suporte de cargas.

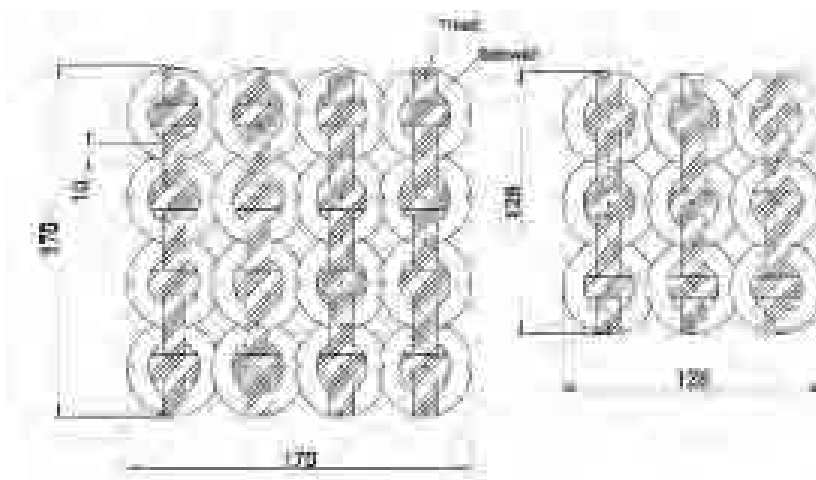


Figura 14: Combinação de laterais e banda de rodagem de pneus descartados  
Fonte: YOON, CHEON e KANG (2004, p.3)

São estudados também processos de desvulcanização a serem aplicados nos resíduos de borracha de pneu, visando o reaproveitamento destes na produção de novos pneus. Embora Fukumori et al. (2002 p.261-264), já apresentem testes de pneus produzidos com adição de 10% de borracha de pneu velho, após terem sido desvulcanizadas, a desodorização do processo ainda é problemática.

Os resíduos de borracha de pneu moídos, segundo Jang (1998, p.6), são reaproveitados também na fabricação de produtos mais simples de borracha e de plásticos. Através de sua mistura com outros materiais são elaborados: tapetes, solas de sapato, paletes, sinalizadores de tráfego, etc.

Na área de pavimentação o uso de resíduos de borracha de pneu em misturas asfálticas já foi consolidado. Segundo Adhikari, De e Maiti (2000, p.939), dentre outras vantagens destacam-se o aumento de resistência a variações de temperatura e capacidade de drenagem.

Pierce e Blackwell (2003, p.197) afirmam que resíduos de borracha de pneu podem ser utilizados com sucesso também em misturas de solo-cimento destinadas a estabilização de aterros, preenchimento de valas, cabeceiras de pontes, etc.

As argamassas poliméricas possuem ótima performance e versatilidade, destacando-se dentre suas inúmeras qualidades as altas resistências já nas primeiras idades. Com o intuito de agregar características ecológicas e possíveis reduções de custo Bignozzi, Saccani e Sandrolini (2000, p.97), investigam a produção destas argamassas com o emprego de borracha reciclada.

Baseando-se nas informações ora expostas, nota-se que aliado ao anseio da reciclagem de pneus inservíveis, existem diferentes possibilidades, em fase de pesquisa e já também em aplicação, que buscam mitigar o problema.

### ***3.5 APLICAÇÕES EM MATERIAIS DE CIMENTO PORTLAND***

#### **3.5.1 Generalidades**

O uso de resíduos de borracha de pneu na produção de materiais a base de cimento é definido por Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.6) como uma grande oportunidade de contribuir para a preservação do meio ambiente, à medida que se amplie a reciclagem dos pneus inservíveis descartados em todo o mundo.

Como exposto anteriormente, segundo Bignozzi e Sandrolini (2004, p.78), os estudos da utilização de resíduos de borracha de pneu em concretos de cimento Portland existem à cerca de uma década. Assim, são vários trabalhos que visam além das contribuições ao meio ambiente, proporcionar enriquecimento de diferentes propriedades aos materiais de cimento Portland, sejam pastas, argamassas ou concretos.

A substituição parcial de agregados naturais por resíduos de borracha de pneu colabora duplamente com o meio ambiente, pois além de reciclar tal resíduo está poupando as reservas finitas de agregados naturais e contribuindo com a qualidade ambiental.

Nos materiais cimentícios são empregados, sem distinção, tanto os resíduos de borracha provenientes do fracionamento dos pneus inservíveis quanto àqueles oriundos dos processos de recauchutagem. Estes resíduos são disponibilizados em diversas granulometrias, as quais normalmente estão compreendidas dentro das faixas granulométricas dos agregados naturais, miúdos e graúdos, comumente utilizados na produção de argamassas e concretos.

### **3.5.2 Caracterização dos Resíduos e Manipulação**

Para Fattuhi e Clark (1996, p.236) os concretos com adição de resíduos de borracha de pneu de granulometria fina (até 5 mm) apresentaram valores de resistência à compressão menor do que àqueles adicionados de resíduos, de mesma natureza, com maiores granulometrias (até 16mm), tendo ainda ressaltado que tal observação é similar ao exposto por alguns pesquisadores e contrário à outros.

Prosseguindo o debate, motivados por certas constatações nas investigações de concretos com adição de resíduos de borracha de pneu serem controversas, Fattuhi e Clark (1996, p.236), destacam a necessidade de uma abrangente caracterização do resíduo utilizado, quanto a sua origem, tamanho, formato, granulometria, densidade, quantidade e tipo presente; sendo este um ponto crucial para evitar pseudocomparações.

Ainda nesta questão, com o intuito de facilitar a comparação de diferentes estudos de concretos com adição de resíduos de borracha de pneu inservível, se faz coerente referenciar a quantidade de resíduo implementada em relação ao metro cúbico de concreto, e não em relação a outros parâmetros variáveis como porcentagens de areia e/ou agregado graúdo, pois assim quando analisados diversos concretos torna-se maçante os múltiplos cálculos auxiliares para a comparação da quantidade efetiva de resíduo de borracha de pneu adicionado em cada estudo.

### **3.5.3 Influência na Resistência e na Microestrutura**

Noutro norte, ressalta-se que o incremento dos resíduos de borracha de pneu nos materiais à base de cimento resulta na diminuição da resistência a compressão e na ligeira

redução na resistência à flexão, entretanto ocorrem melhorias em outras propriedades. Toutanji (1996, p.137), verificou que as reduções de resistência à compressão e à flexão, para concretos implementados de resíduos de borracha de pneu não ocorrem de forma linear, sendo que para concretos com 25% de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo, estas reduções foram em torno de 37,5% e 7,9%, respectivamente e no entanto nos concretos implementados com 75% destes resíduos obteve-se 68,7% de redução no valor da resistência à compressão e 26,3% no valor de resistência à flexão.

Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.6) ao estudarem a microestrutura de concretos com resíduos de borracha de pneu, caracterizada pela Figura 15, observaram uma zona de transição pasta de cimento-borracha fraca quando comparada com a pasta de cimento-areia. Estes autores afirmam ainda que essa microestrutura em particular seria um fator adicional para a ocorrência da diminuição da resistência à compressão dos concretos quando adicionados de borracha.



Figura 15: Zona de transição entre a pasta de cimento-borracha e pasta de cimento-areia  
Fonte: TURATSINZE, BONNET e GRANJU (2004, p.6)

### 3.5.4 Aspectos da Aderência

Diversos estudos de adição de resíduos de borracha de pneu em pastas de cimento, argamassas ou em concretos promovem o tratamento superficial da borracha, utilizando uma solução de NaOH, com o intuito de melhorar sua adesão com a matriz de cimento.

Os resultados obtidos em pastas de cimento com adição de borracha de pneu após o tratamento superficial com NaOH, apresentados em Segre e Jokes (2000, p.1424); Segre, Monteiro e Sposito (2002, p.521-522), indicaram aumentos em diversas propriedades mecânicas.

Contudo este procedimento pode ser visto como mais um obstáculo a ser transposto na utilização deste resíduo em larga escala, uma vez que o resíduo de borracha de pneu deixaria de estar pronto ao uso e então seriam necessários grandes volumes de água para o processo de tratamento de superfície e na seqüência para a remoção da solução utilizada.

Somado ainda que Li et al. (2004, p.7), concluíram que, quando aplicado à produção de concretos, o tratamento superficial não funciona para resíduos de borracha de pneu com granulometrias superiores àquelas de tipo granular.

Neste enfoque ressalta-se também que a utilização de resíduos de borracha de pneu do tipo granular se faz limitada na adição em concretos devido ao seu custo elevado em relação aos resíduos de maior granulometria. Pois como exposto por Owen (1996, p.47); Sunthonpagasit e Duffey (2004, p.284), tais resíduos possuem um grande potencial para fabricação de produtos de maior valor agregado (artefatos de borracha e plásticos através de processos de injeção e estamparia).

### **3.5.5 Aspectos da Trabalhabilidade**

Quanto à trabalhabilidade, Albuquerque et al. (2002, p.14), cita o fato de que, quando baseada no abatimento do tronco de cone, esta propriedade diminui com o incremento do resíduo de borracha de pneu, contudo quando mensurada com o teste VeBe a trabalhabilidade dos concretos com certos teores de borracha apresentam-se ligeiramente superiores ao concreto controle.

No entanto, ao analisarem o efeito de resíduos de borracha de pneu na trabalhabilidade de concretos convencionais Li et al. (2004, p.4) observaram nos valores dos abatimentos apenas alterações mínimas; enquanto, Güneyisi, Gesoglu e Özturan (2004, p.2311), verificaram uma representativa redução do abatimento com o aumento da quantidade de resíduos de borracha de pneu implementados em concretos com baixa relação água/aglomerante, adicionados ou não de sílica ativa. Assim pode-se notar que a

forte influência dos resíduos de borracha de pneu sobre a trabalhabilidade do concreto está condicionada à relação água/aglomerante praticada.

Para Khatib e Bayomy apud Meneghini (2003, p.15) ao testarem a trabalhabilidade de concretos com resíduos de borracha de pneu com diferentes granulometrias constataram ainda que os resíduos de menor granulometria davam origem a argamassas menos trabalháveis.

### **3.5.6 Comportamento como Fibras e Tenacidade**

Aprofundando-se na questão dos formatos dos resíduos de borracha de pneu utilizados em concretos, Albuquerque et al. (2002, p.15), observaram, em relação ao desenvolvimento das propriedades mecânicas, um melhor desempenho daquelas em forma de fibras ao invés daquelas do tipo granular. Ao comparar concretos adicionados de resíduos de borracha de pneu dos tipos fibras e placas, Li et al. (2004, p.7), também observaram a superioridade das propriedades mecânicas dos concretos com resíduos tipo fibra.

Segundo Wang, Wu e Li (2000, p.314) a utilização de diferentes tipos de fibras industrializadas para o reforço do material concreto vem sendo estudada ao longo dos tempos, obtendo-se efetivos aumentos de tenacidade, resistência à retração e características de durabilidade. Assim, de maneira geral, as fibras recicladas, categoria que parte dos resíduos de borracha de pneu se enquadram, além da contribuição ao meio ambiente, podem resultar em vantagens ao material concreto.

Olivares et al. (2002, p.1595) destacam que a adição de fibras de polipropileno e resíduos de borracha de pneu (tipo fibra) em materiais compósitos, no caso o concreto, podem provocar heterogeneidade, aumento das interfaces, porosidade, etc, acarretando reduções na capacidade de resistência. Entretanto, após a resistência última ser extrapolada, as fibras colaboram com o concreto, combatendo a propagação das fissuras e assim aumentando a tenacidade do material e o trabalho de fratura. Ainda segundo Olivares et al. (2002, p. 1595), esta característica pode ser explicada pela grande diferença na rigidez dos materiais, uma vez que a matriz de cimento possui módulo de elasticidade no patamar dos 30GPa, valor cerca de 10 vezes superior ao da borracha.



A partir de quantidades consideradas pequenas, cerca de 10% de resíduos de borracha de pneu em substituição a areia, de acordo com Albuquerque et al. (2002, p.15), pode-se obter no concreto com borracha valores de tenacidade superiores aos encontrados nos concretos convencionais.

Segundo Li et al. (2004, p.4) os concretos com adição de resíduos de borracha de pneu apresentaram, em relação àqueles sem adição, um aumento considerável na sua tenacidade (área sob a curva), como pode ser visualizado na Figura 16, o que proporciona uma melhoria na capacidade de absorção de cargas dinâmicas e na resistência à propagação de fissuras.

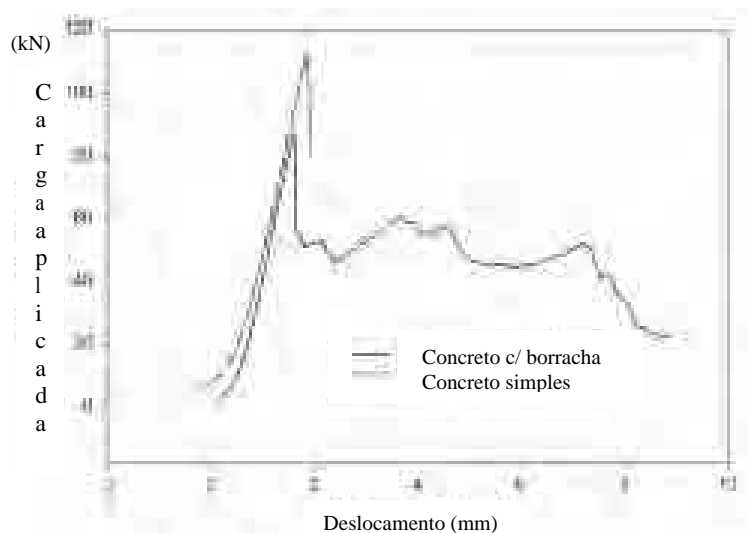


Figura 16: Curvas tensão-deformação controladas  
Fonte: LI et al. (2004, p.4)

Akasaki et al. (2003, p.15) ao submeterem corpos-de-prova de concreto com e sem borracha de pneu à flexão observaram a diminuição da capacidade de resistência à flexão nos concretos com borracha, entretanto os mesmos apresentaram capacidade de resistência residual após a ruptura.

Considerando o efeito da adição de resíduos de borracha de pneu no aumento da tenacidade do concreto, de acordo com Taha, Dieb e Wahab (2003, p.9), deveriam ser levados em conta como uma prevenção à probabilidade de fissuração a qual é relativamente alta do concreto.

Do mesmo modo que o aumento da capacidade de deformação somado aos maiores valores de resistência à flexão obtida, em especial, nas pastas de cimento com resíduos de borracha de pneu, segundo Benazzouk et al. (2003, p.719-720), expande as possibilidades de aplicação deste resíduo, abordando inclusive contribuições à ampliação da segurança das estruturas.

### **3.5.7 A Problemática da Determinação do Módulo de Elasticidade**

Considerando o concreto com adição de borracha de pneu um material compósito de três fases (argamassa, agregados e borracha), Topçu e Avcular (1997, p.1137) conseguiram calibrar um modelo teórico para a determinação do módulo de elasticidade destes concretos.

Contudo, apesar da utilidade dos modelos teóricos quanto à compreensão dos vários parâmetros ligados a determinação do módulo de elasticidade, de acordo com Aïtcin (2000, p.512-513), devido à necessidade prévia dos valores de módulo de cada fase, então a complexidade da medição do módulo de elasticidade aumenta ainda mais; tornando a determinação experimental desta grandeza, diretamente para o concreto, uma solução mais viável.

### **3.5.8 Durabilidade**

A durabilidade dos compósitos de cimento está diretamente ligada à sua própria capacidade de impermeabilidade frente a líquidos e gases. Benazzouk, Douzane e Quéneudec (2004, p.28) investigaram o transporte de fluídos através de pastas de cimento, no estado endurecido, quando adicionadas de resíduos de borracha industrial, as quais em comparação com a pasta sem adição desta borracha apresentaram redução de capilaridade e da difusividade hidráulica, fatores que por sua vez contribuem para a diminuição da absorção.

Abordando outro enfoque, tem-se segundo Raghavan, Huynh e Ferraris (1998, p.1751), que as argamassas com adição de resíduos de borracha de pneu apresentam bons resultados quanto à fissuração por retração plástica em relação à argamassa sem adição. Em acordo com Bonnet (2003, p.59) a implementação de borracha na composição de materiais à base de cimento contribui para o aumento da resistência à micro-fissuração, resultando numa ampliação da durabilidade.

Tendo ainda a resistência à abrasão como mais um indicador de durabilidade, segundo Meneghini (2003, p.80), ensaios demonstraram a superioridade ao desgaste das argamassas com adição de borracha de pneu, do tipo granular, em relação às argamassas sem esta adição.

Quanto à durabilidade dos próprios resíduos de borracha de pneu quando inerente ao material concreto, Huynh e Raghavan (1997, p.142), após terem mantido os resíduos em meio altamente alcalino durante um período de quatro meses, observaram que as propriedades iniciais dos mesmos foram conservadas e dessa forma concluíram que esta adição não afetará a durabilidade dos concretos. Entretanto ressalta-se a necessidade da realização de ensaios de maior período de duração.

De acordo com Fattuhi e Clark (1996, p.235), testes de resistência ao fogo mostraram uma grande redução na inflamabilidade da borracha de pneu, quando material constituinte de concretos, devido à presença da pasta de cimento e dos agregados.

Considerando-se a necessidade de avaliar os concretos com fibras, em geral, também em relação à resistência ao impacto, observa-se que os simples métodos da maioria dos ensaios de resistência ao impacto, os quais são baseados num peso submetido à queda livre, de altura conhecida, revela dificuldades na quantificação precisa da performance dos materiais ensaiados, limitando-se muitas vezes a análise comparativa superficial, como afirmam também Mehta e Monteiro (1994, p.445).

Assim Fattuhi e Clark (1996, p.236), observaram que a capacidade de resistência ao impacto dos concretos com adição de resíduos de borracha de pneu foi comparável ao concreto de referência.

Hughes e Al-Dafiry (1995, p.240), estudaram a determinação da resistência ao impacto, em vigas de concreto com adição de fibras industrializadas, baseando-se na absorção de energia destas quando sujeitas a carregamento estático, visando condições de ensaio mais definidas. Contudo, apesar de obterem excelentes resultados, a necessidade de equipamentos de maior sofisticação, com controle de carregamento e deformação, não contribuem para a total difusão desta prática.

A respeito da redução de peso específico nos concretos com adição de borracha de pneu, muitas vezes não se mostra como um grande atrativo, devido à proporcionalidade de redução de resistência à compressão. Fattuhi e Clark (1996, p.236) conseguiram obter

reduções de 20% na massa específica à medida que elevaram a adição de borracha, entretanto ocorreu uma abrupta redução da resistência a compressão, cerca de 70%.

### 3.5.9 Atualidades

É válido ressaltar ainda que ocorrem também investigações experimentais abordando adições híbridas ao material concreto. Dentre outras composições Bonnet (2003, p.60) e Li et al. (2004, p.3), utilizaram concomitantemente aos resíduos de borracha de pneu, fibras de aço e fibras de polipropileno, respectivamente.

Da mesma forma que, estudos estão sendo desenvolvidos a partir da utilização da cinza de borracha de pneu, como por exemplo na produção de argamassas, tendo sido investigada por Al-Akhras e Smadi (2003, p.6), onde observaram um acréscimo na capacidade de resistência à compressão e à flexão com o aumento da quantidade de cinza na mistura, o que foi atribuído ao efeito “filler” da cinza em questão, sendo notadas também maiores resistências ao congelamento e a penetração de íons de cloreto das argamassas com cinza, em relação àquelas sem adição. Contudo, Siddique e Naik (2004, p.6) indicam a necessidade de um maior número de pesquisas abordando o uso da cinza de borracha de pneu em concretos e argamassas.

Recentemente, dentro do tema da adição de resíduos de borracha de pneu em materiais cimentícios, iniciando outra linha de pesquisa, diferenciada da já promissora adição destes resíduos à concretos convencionais, Olivares e Barluenga (2004, p.111) estudaram a adição de resíduos de borracha de pneu no comportamento de concretos de alta resistência. Tendo inovado quanto aos patamares de resistência à compressão alcançada, uma vez que até então os concretos com resíduos de borracha de pneu caracterizam-se pelo desenvolvimento de modestos patamares de resistência à compressão, em torno de 25 MPa, contudo interessantes.

Segundo, Olivares e Barluenga (2004, p.116), com a presença do resíduo de borracha de pneu ocorreram reduções nos valores de resistência à compressão, entretanto para o menor teor de adição obteve-se 80MPa. Em analisando suas performances ao fogo, constataram um avanço na capacidade de resistência ao fogo do concreto de alta resistência devido a adição da borracha, tendo observado a redução do deslocamento causado pelas altas temperaturas.

Diante desta nova vertente deu-se início ao programa experimental constante do próximo capítulo, o qual foi desenvolvido para proporcionar parâmetros para análise do comportamento de concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu.

## **4. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### ***4.1 DESENVOLVIMENTO***

Este programa experimental foi concebido com o intuito de embasar a investigação da adição de resíduos de borracha de pneu nas propriedades do concreto de alto desempenho. Na seqüência, será apresentado de forma resumida o desenvolvimento das etapas constantes deste capítulo:

Inicialmente foram feitas verificações quanto à compatibilidade entre cimentos e superplastificantes, definindo assim o melhor binário. Em seguida, elegeu-se os outros materiais a serem utilizados nas composições e então, realizou-se as caracterizações dos mesmos.

Através de desenvolvimento de metodologia aplicada foi definida uma composição de CAD, e por meio da adição de resíduos de borracha de pneu em diferentes porcentagens e granulometrias, obteve-se uma série de variações.

Avaliando tais composições quanto à evolução dos valores de resistência à compressão e trabalhabilidade, selecionou-se, dentre as adicionadas de resíduo de borracha de pneu, àquela de melhor performance, para que, junto da composição de CAD, fossem submetidas à avaliação de outros ensaios.

Dentre as propriedades, então avaliadas, tem-se: trabalhabilidade, teor de ar incorporado, massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, resistência ao impacto, absorção de água por imersão e resistência à abrasão.

### ***4.2 INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR QUANTO À ESCOLHA DO CIMENTO E ADITIVO QUÍMICO***

#### **4.2.1 Introdução**

Visando produzir concretos de alto desempenho de elevados patamares de resistência à compressão e boa trabalhabilidade, optou-se por uma investigação preliminar sobre a compatibilidade entre aditivos químicos superplastificantes e cimentos.

Para determinar qual combinação cimento/superplastificante apresentaria melhores propriedades reológicas, baseou-se no método do funil de Marsh, procedimento normalizado, no Brasil, pela NBR 7681 – ABNT (1983a) e NBR 7682 – ABNT (1983b).

A princípio este método baseia-se na preparação das pastas de cimento e então na obtenção dos tempos necessários para que uma quantidade conhecida de pasta, em períodos pré-determinados, escoe através do funil de Marsh, o qual é apresentado na Figura 17, possibilitando assim a avaliação da fluidez, manutenção de trabalhabilidade e ainda dos teores ótimos dos aditivos químicos.



Figura 17: Funil de Marsh

#### 4.2.2 Pré-Seleção de Materiais, Mistura e Procedimento

A pré-seleção dos materiais ocorreu da seguinte maneira, dentre os cimentos Portland disponíveis no Brasil foram escolhidos dois tipos, um CP V-ARI, visando exatamente à eficiência oferecida por este tipo de cimento quanto a atingir altas resistências logo nas primeiras idades; e outro CP II-F-32, justamente por ser um tipo de cimento mais puro em termos de adição de materiais reativos; ressaltando-se ainda que seria feito o uso de sílica ativa em todos os traços. Foram também selecionados dois aditivos químicos superplastificante à base de policarboxilato, aqui denominados de Superplastificante Y e

Superplastificante Z, pertencentes à terceira geração de superplastificantes. Assim a combinação dos materiais disponíveis resultou em quatro composições diferentes.

Mesmo com a certeza de que seria utilizada uma relação água/aglomerante ainda menor na produção do CAD, elegeu-se para a elaboração das pastas a relação água/aglomerante de 0,35, a qual é indicada por Aïtcin (2000, p.202) como mínima necessária para o teste em questão. Utilizou-se em todas as composições água gelada e também adição de sílica ativa na porcentagem de 8% da massa total de material aglomerante.

Para cada uma das quatro composições foram feitas diversas variações quanto à porcentagem de superplastificantes empregada, iniciando-se com 1% e 1,2% em relação a massa de cimento. Então as demais porcentagens necessárias às outras variações de cada composição, eram separadamente definidas, com base na tendência de cada segmento de curva, traçados com auxílio dos tempos de escoamento e porcentagens de superplastificante das pastas já ensaiadas, sendo que o passo da alteração foi sempre de 0,2%.

Na Tabela 1, são visualizadas as quatro composições de pastas de cimento diferenciadas quanto a combinação do tipo de cimento e superplastificante empregado, assim como as respectivas variações quanto ao teor de superplastificante.

Tabela 1: Composições e suas variações quanto ao teor de superplastificante

<b>Composições e Suas Variações Quanto ao Teor de Superplastificante</b>			
Composições	Cimento	Superplastificante	Variações dos Teores de Superplastificante (%)
1	CP V-ARI	Y	1%; 1,2%; 1,4%
2	CP V-ARI	Z	1%; 1,2%; 1,4%
3	CP II-F-32	Y	0,6%; 0,8%; 1%; 1,2%
4	CP II-F32	Z	0,8%, 1%; 1,2%; 1,4%

Os ensaios ocorreram em ambiente climatizado e a mistura dos materiais contou com o auxílio de um misturador, apresentado pela Figura 18, onde foram preparados três litros de cada pasta ensaiada, volume este suficiente ao preenchimento dos dois litros do funil utilizado e ainda à repor as eventuais perdas, considerando-se que foram realizados procedimentos de leitura aos 5, 30, 60 e 90 minutos posteriores ao contato do cimento com a água.





Figura 18: Misturador

Na produção das pastas, posteriormente a homogeneização manual do cimento e da sílica ativa, foi adotada à seguinte seqüência de colocação dos materiais no misturador: foram introduzidos a água e o superplastificante, e então, depois de ligar o misturador à velocidade constante de 1500 rpm, o cimento e a sílica ativa foram sendo colocados, onde tal procedimento levava cerca de 1 minuto e 30 segundos, quando se realizava uma parada de 15 segundos para limpeza das paredes internas do recipiente, retomando a mistura por mais 2 minutos e posteriormente mais 1 minuto, tendo sido intercalados por mais um procedimento de limpeza.

Ao final do ciclo de 5 minutos, a pasta seguia diretamente ao primeiro ensaio no cone de Marsh, onde com a extremidade inferior do funil fechada e logo abaixo desta uma proveta graduada servindo de aparador, como pode ser visualizado na Figura 19, era introduzida a pasta até uma linha demarcatória interna do funil, e então ao liberar o fluxo pela extremidade inferior, com o início do preenchimento da proveta, ocorria a marcação do tempo em cronômetro digital até a pasta perfazer o volume de dois litros.



Figura 19: Visualização geral do procedimento básico de ensaio

### 4.2.3 Resultados Preliminares

Dentre diferentes possibilidades de elaboração de curvas com os dados obtidos pelo ensaio do funil de Marsh, devido à quantidade e qualidade de informação reunidas em um só gráfico, optou-se pelas curvas dos tempos de escoamento, obtidos a 5 e 60 minutos, em relação ao teor de superplastificante praticado.

A seguir na Figura 20, são apresentados os resultados obtidos para as pastas compostas por cimento CPV ARI e Superplastificante Y.

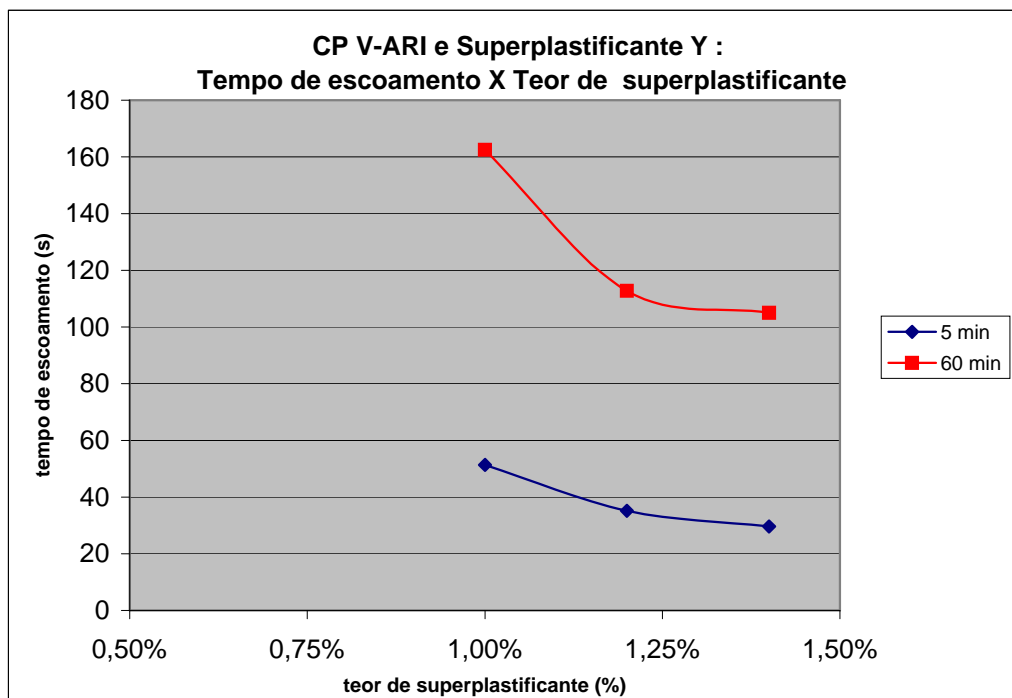


Figura 20: CP V-ARI e Superplastificante Y - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante

Na Figura 21, pode-se observar os resultados obtidos para as pastas compostas por cimento CPV ARI e Superplastificante Z.

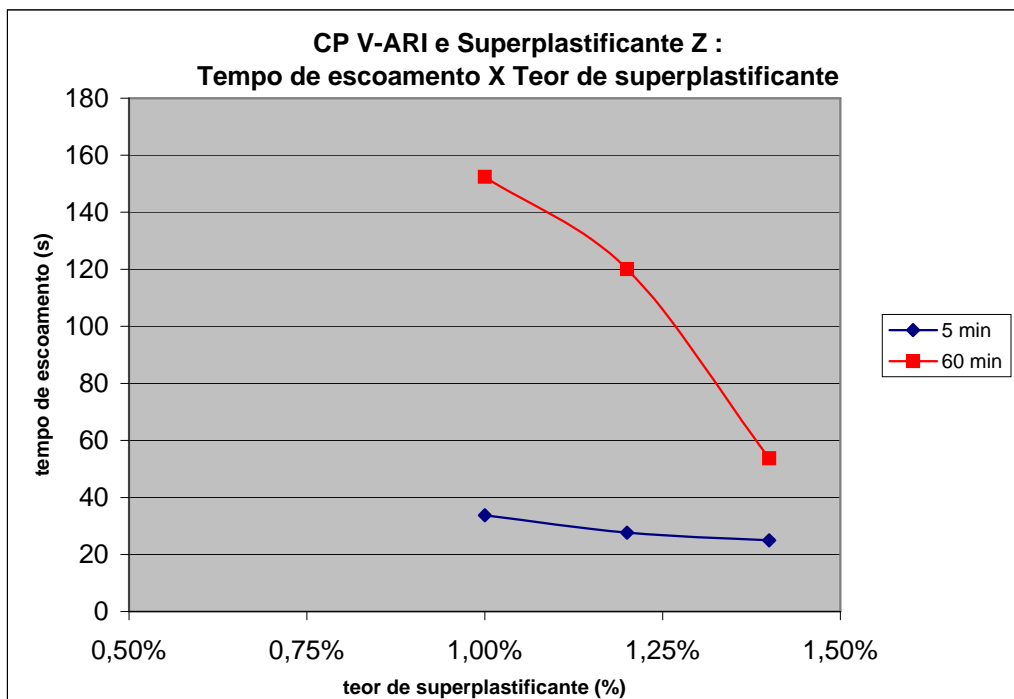


Figura 21: CP V-ARI e Superplastificante Z - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante

Os resultados referentes às pastas compostas por cimento CP II-F-32 e Superplastificante Y, são ilustrados na Figura 22.

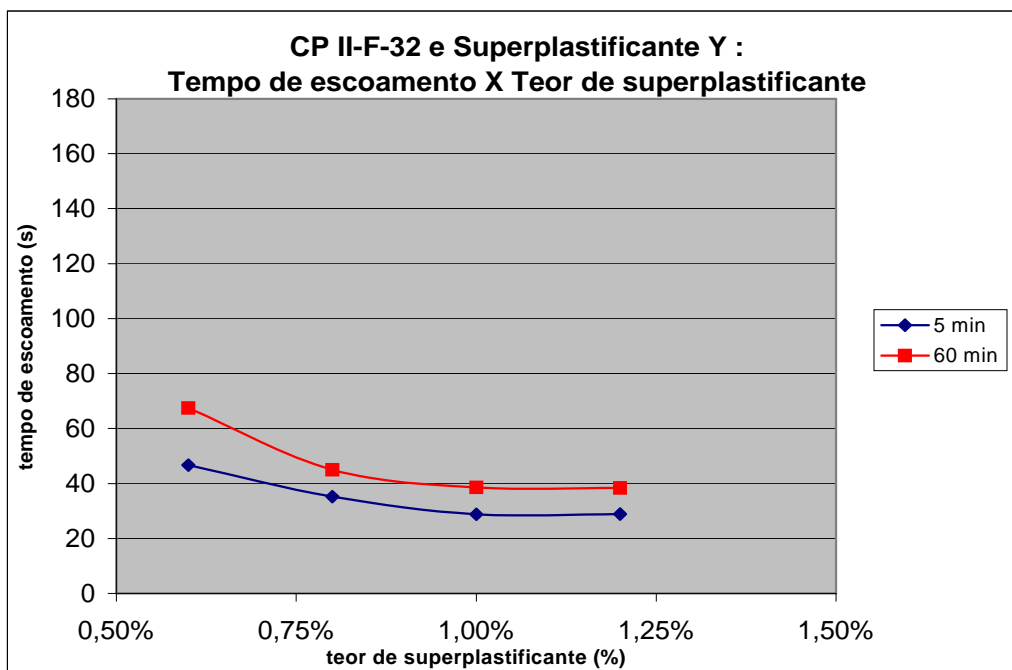


Figura 22: CP II-F-32 e Superplastificante Y - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante

Na Figura 23, são representados os resultados alusivos as pastas compostas por cimento CP II-F-32 e Superplastificante Z.

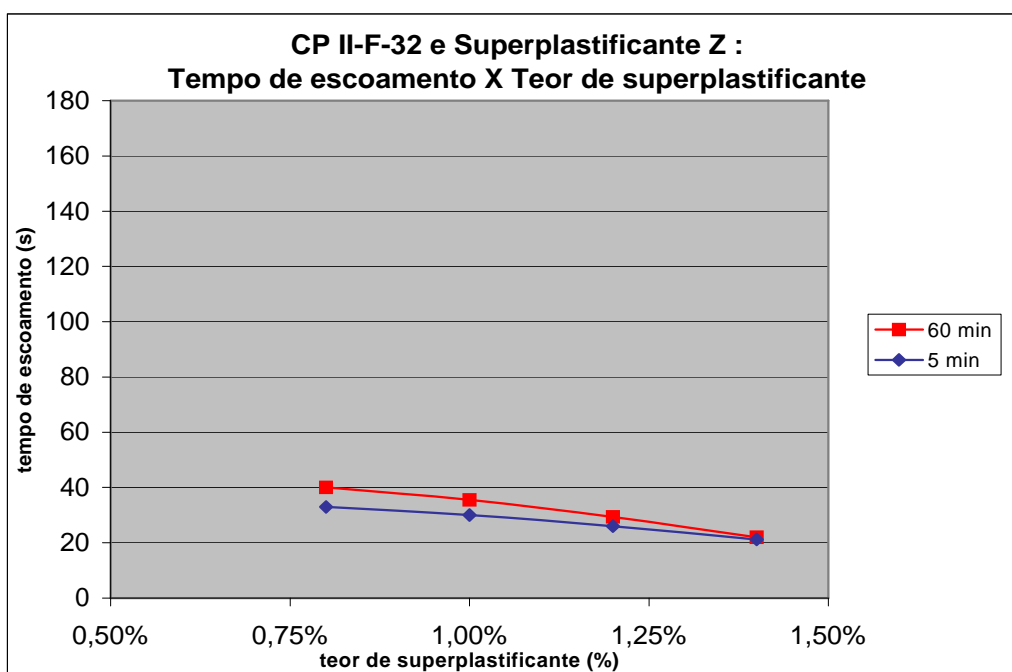


Figura 23: CP II-F-32 e Superplastificante Z - Tempo de escoamento X Teor de superplastificante

#### 4.2.4 Análise dos Resultados Preliminares

Em analisando as curvas tempo de escoamento versus teor de superplastificante, observa-se que independentemente do superplastificante utilizado, o uso do cimento CP V-ARI acarreta na drástica elevação dos tempos de fluidez das pastas. Dentre outras justificativas ao ocorrido ressalta-se a propensão de altas taxas iniciais de hidratação deste tipo de cimento, o que de certa forma é um atrativo devido a produção também de elevadas taxas iniciais de resistência.

Entretanto, primando pelo bom comportamento reológico, e considerando o emprego de sílica ativa então foi feita a opção pelo cimento CP II-F-32.

Quanto à interação dos dois superplastificantes com o cimento escolhido, apresentada pela Figura 22 e Figura 23, destaca-se que nos dois casos o aumento de fluidez é mantido em patamares próximos aos iniciais mesmo após transcorrido uma hora.

Apesar do Superplastificante Y apresentar ponto de saturação mais baixo que o outro superplastificante, cerca de 1%, o Superplastificante Z produz fluidez compatível neste mesmo teor. Contudo com o aumento da dosagem do Superplastificante Z, ainda ocorrem melhorias na fluidez das pastas até que o teor de 1,4%, seu ponto de saturação, seja atingido.

Assim, uma vez que este estudo não aborda questões ligadas ao custo dos referidos aditivos químicos, aspirando-se apenas o melhor comportamento reológico do concreto no estado fresco então é feita a opção pelo Superplastificante Z.

Ressalta-se ainda, que ao observar a Figura 20, verificando a grande diferença de altura entre as curvas de 5 e 60 minutos e a indicação de um ponto de saturação relativamente alto, é possível notar a incompatibilidade entre o cimento CP V ARI e o Superplastificante Y.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.3.1 Aglomerantes

##### 4.3.1.1 Cimento

Como exposto anteriormente, o cimento Portland utilizado foi do tipo CP II-F-32, em acordo com a NBR 11578 – ABNT (1991), sendo suas características físicas e químicas apresentadas na Tabela 2.

Dentre outros equipamentos, destaca-se na Figura 24 e Figura 25 respectivamente, o espectrofotômetro de absorção atômica utilizado na análise química para a determinação de alguns dos óxidos presentes no cimento e o aparelho de Blaine necessário à determinação física de sua superfície específica.

Tabela 2: Análise físico-química do cimento CP II-F-32

Análise Físico-Química do Cimento CP II-F-32		Índices Obtidos	Especificações NBR-11578		
			min.	máx.	
Finura Peneira 200 (% retida)		0,14	-	12,0	
Finura Peneira 325 (% retida)		1,4	-	-	
Superfície específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4786	2600	-	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )		1,04	-	-	
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		3,15	-	-	
Água de consistência da pasta	gramas	135	-	-	
	(%)	27,0	-	-	
Início de pega (h:min)		02:28	01:00	-	
Expansão em auto-clave (%)		0,042	-	-	
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	36,1	10,0	-
		07 dias	39,5	20,0	-
		28 dias	47,4	32,0	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		4,19	-	6,5
	Insolúveis		1,30	-	2,5
	SiO <sub>2</sub>		17,88	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,63	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6,01	-	-
	CaO		62,01	-	-
	MgO		4,30	-	6,5
	SO <sub>3</sub>		1,31	-	4,0
	Na <sub>2</sub> O		0,25	-	-
	K <sub>2</sub> O		0,77	-	-
	Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O		0,76	-	-
	Cal livre em CaO		1,09	-	-



Figura 24: Espectrofotômetro de absorção atômica



Figura 25: Aparelho de Blaine

#### 4.3.1.2 Sílica ativa

Além dos inúmeros benefícios da sílica ativa na produção dos concretos de alto desempenho, sua escolha, nesta pesquisa, está ligada com a ambição de obter-se uma melhoria da zona de transição entre a matriz de cimento e o resíduo de borracha de pneus.

Toutanji (1996, p.139) sugere que mais pesquisas sejam desenvolvidas para a maximização das misturas de concretos com adição de borracha, aliando-se ainda

incorporações de adições minerais visando o aumento da resistência. Nesta linha tem-se, dentre outros, Güneyisi, Mehmet e Özturam (2004, p.2316), que ao utilizarem sílica ativa em concretos com adição resíduos de borracha de pneu obtiveram a diminuição da relação de perda de resistência devido à implementação de tal resíduo.

As características químicas e físicas analisadas, em acordo com a NBR 13956 – ABNT (1997), são apresentadas pela Tabela 3, ressalta-se ainda que, de acordo com dados fornecidos pelo fabricante, sua superfície específica no estado não densificado é de 20.000m<sup>2</sup>/Kg.

Tabela 3: Análise físico-química da Sílica Ativa

Análise Físico-Química da Sílica Ativa		Índices Obtidos	Especificações NBR-13956
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		2,18	-
Análise Química (%)	Umidade da amostra (%)	0,61	≤ 3,0
	Perda ao fogo (%)	2,26	≤ 6,0
	SiO <sub>2</sub> (%)	95,38	/ 85,0
	Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O (%)	0,39	≤ 1,5

### 4.3.2 Agregados

#### 4.3.2.1 Resíduos de borracha de pneu

Seguindo a tendência de otimização do uso dos pneus, segundo Jang (1998, p.4), o percentual de pneus submetidos a processos que elevam sua vida útil, dentre os quais tem-se a recauchutagem, tendem a aumentar. Então, da mesma forma que a reciclagem do pneu propriamente dito, o aproveitamento dos resíduos de borracha de pneu provindos do processo de recauchutagem se faz prioritário.

Ressaltando ainda, a maior facilidade da obtenção dos resíduos de borracha de pneu gerados no processo de recauchutagem, dado às inúmeras empresas de médio porte espalhadas estrategicamente a fim de atender a crescente demanda por pneus recauchutados. Assim foi definido que seriam empregados nesta pesquisa resíduos de borracha de pneu proveniente de processo de recauchutagem.

Tais resíduos foram fornecidos por uma empresa recauchutadora, também situada na cidade de Ilha Solteira, a qual faz recauchutagem exclusivamente em pneus para caminhões fora de estrada e máquinas pesadas. Entretanto, através da comparação das



caracterizações deste resíduo em especial, e os valores obtidos para resíduos provindos de uma empresa recauchutadora de pneus em geral, os quais foram utilizados por Martins e Akasaki (2005a, p.1-8); Martins e Akasaki (2005b, p.193-205), constatou-se que tais resíduos eram análogos.

Sendo a densidade dos resíduos de borracha de pneu muito baixa em relação aos agregados usuais, então, como ilustrado pela Figura 26, os resíduos utilizados foram submetidos a teste para a determinação de sua massa específica tendo-se como base a NBR NM 23 – ABNT (2001), assim através da diferença de volume, observada em frasco Chapman repleto de querosene (líquido de menor massa específica que a água), gerada pela introdução de massa conhecida do resíduo em questão, se pôde constatar o valor de  $1,15\text{g/cm}^3$ . Quanto à massa unitária solta foi determinada normalmente segundo a NBR 7251 (ABNT, 1982), resultando no valor de  $0,32\text{g/cm}^3$ .



Figura 26: Frasco Chapman com querosene e resíduos de borracha de pneu

Quanto à caracterização granulométrica, devido grande parte deste resíduo de borracha de pneu apresentar formato alongado (tipo fibra), fica difícil determinar a sua granulometria como ocorre para os agregados usuais uma vez que suas partículas não são na totalidade de tipo granular, contudo submetidos à análise granulométrica tradicional, segundo a NBR 7217 – ABNT (1993a), tem-se a Tabela 4, a qual possibilitou a confecção

da curva apresentada pela Figura 27 e a obtenção dos valores referente ao diâmetro máximo, 4,76mm, e ao módulo de finura, igual a 3,78.

Tabela 4: Análise granulométrica do resíduo de borracha de pneu

Análise Granulométrica do Resíduo de Borracha de Pneu		
Peneiras Normais e Auxiliares		Material
Denominação	Abertura (mm)	% Retida Acumulada
1"	25,4	0,0
3/4"	19	0,0
5/8"	16	0,0
1/2"	12,7	0,0
3/8"	9,51	0,3
1/4"	6,3	0,9
N.º 4	4,76	2,3
N.º 8	2,38	21,0
N.º 16	1,19	69,1
N.º 30	0,595	89,5
N.º 50	0,297	96,2
N.º 100	0,149	99,5
fundo	0,075	100

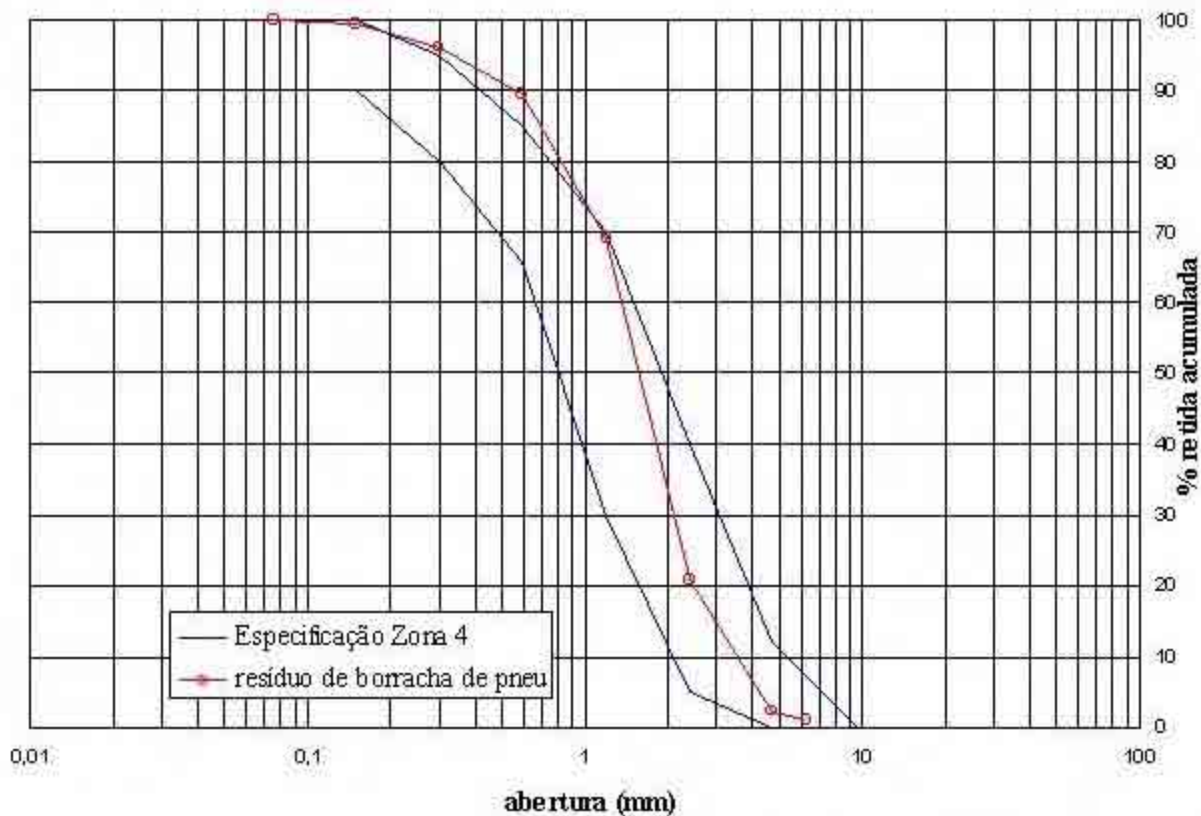


Figura 27: Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneu

Então visando observar a influência da granulometria destes resíduos no comportamento do CAD, foi definido que os mesmos seriam submetidos a um processo de peneiramento classificatório. Assim, determinou-se um jogo de peneiras de modo a separar os resíduos de borracha de pneus em faixas granulométricas bem definidas, apresentando inclusive fácil distinção visual.

A Tabela 5, apresenta o jogo de peneiras utilizado, as porcentagens obtidas para cada faixa de resíduo e suas respectivas denominações, as quais visam apenas simplificar as referências aos resíduos de borracha de pneu de diferentes faixas granulométricas, assim no decorrer deste trabalho tais resíduos serão chamados também de borrachas muito grossa, grossa, média ou fina.

Tabela 5: Classificação granulométrica do resíduo de borracha de pneu

<b>Classificação Granulométrica do Resíduo de Borracha de Pneu</b>				
Peneiras Normais e Auxiliares		Resíduo de borracha de pneu		
Denominação	Abertura (mm)	% Retida	Denominação	Obs.
1/4"	6,3	1,9	B. Muito Grossa	não utilizado
N.º 8	2,38	45,9	Borracha Grossa	-
N.º 16	1,19	27,2	Borracha Média	-
Fundo	0,075	25,0	Borracha Fina	-

Os resíduos denominados de “borracha muito grossa” eram pedaços grandes de pneu em comparação ao restante do material e representavam apenas 1,9% do total, sendo assim excluídos deste estudo.

Quanto aos 98,1% dos resíduos de borracha de pneu utilizados, de acordo com cada denominação dada, tem-se, a partir da simples observação visual, a seguinte descrição:

- Borracha Grossa: possuem forma alongada (tipo fibra), apresentando comprimentos máximos por volta de até 30mm e espessura de 2 a 3mm. Sendo visualizadas na Figura 28.



Figura 28: Borracha grossa

- Borracha Média: também de formato alongado (tipo fibra), contudo com comprimento, de maneira geral, em sua maioria inferior a 10mm e espessura em torno de 1mm. Estes resíduos são apresentados na Figura 29.



Figura 29: Borracha média

- Borracha Fina: apresentam forma granular, (tipo pó). Os quais podem ser visualizados na Figura 30.



Figura 30: Borracha fina

Na seqüência, são apresentados os dados referentes às análises granulométricas segundo a NBR 7217 – ABNT (1993a), de cada borracha em separado.

Referente a borracha grossa, tem-se a Tabela 6, a qual gerou a curva da Figura 31 e ainda o diâmetro máximo de 6,30mm, e o módulo de finura, igual a 4,68.

Tabela 6: Análise granulométrica da borracha grossa

<b>Análise Granulométrica da Borracha Grossa</b>		
Peneiras Normais e Auxiliares		Material
Denominação	Abertura (mm)	% Retida Acumulada
1"	25,4	0,0
3/4"	19	0,0
5/8"	16	0,0
1/2"	12,7	0,0
3/8"	9,51	0,0
1/4"	6,3	0,0
N.º 4	4,76	8,0
N.º 8	2,38	63,2
N.º 16	1,19	97,3
N.º 30	0,595	99,6
N.º 50	0,297	99,7
N.º 100	0,149	99,9
fundo	0,075	100



Figura 31: Curva granulométrica da borracha grossa

A seguir, relativo a borracha média, tem-se a Tabela 7, a qual possibilitou a confecção da curva apresentada pela Figura 32 e a obtenção dos valores referente ao diâmetro máximo, 2,38mm, e ao módulo de finura, igual a 3,86.

Tabela 7: Análise granulométrica da borracha média

<b>Análise Granulométrica da Borracha Média</b>		
Peneiras Normais e Auxiliares		Material
Denominação	Abertura (mm)	% Retida Acumulada
1"	25,4	0,0
3/4"	19	0,0
5/8"	16	0,0
1/2"	12,7	0,0
3/8"	9,51	0,0
1/4"	6,3	0,0
N.º 4	4,76	0,0
N.º 8	2,38	0,6
N.º 16	1,19	85,8
N.º 30	0,595	99,5
N.º 50	0,297	99,7
N.º 100	0,149	100
fundo	0,075	100

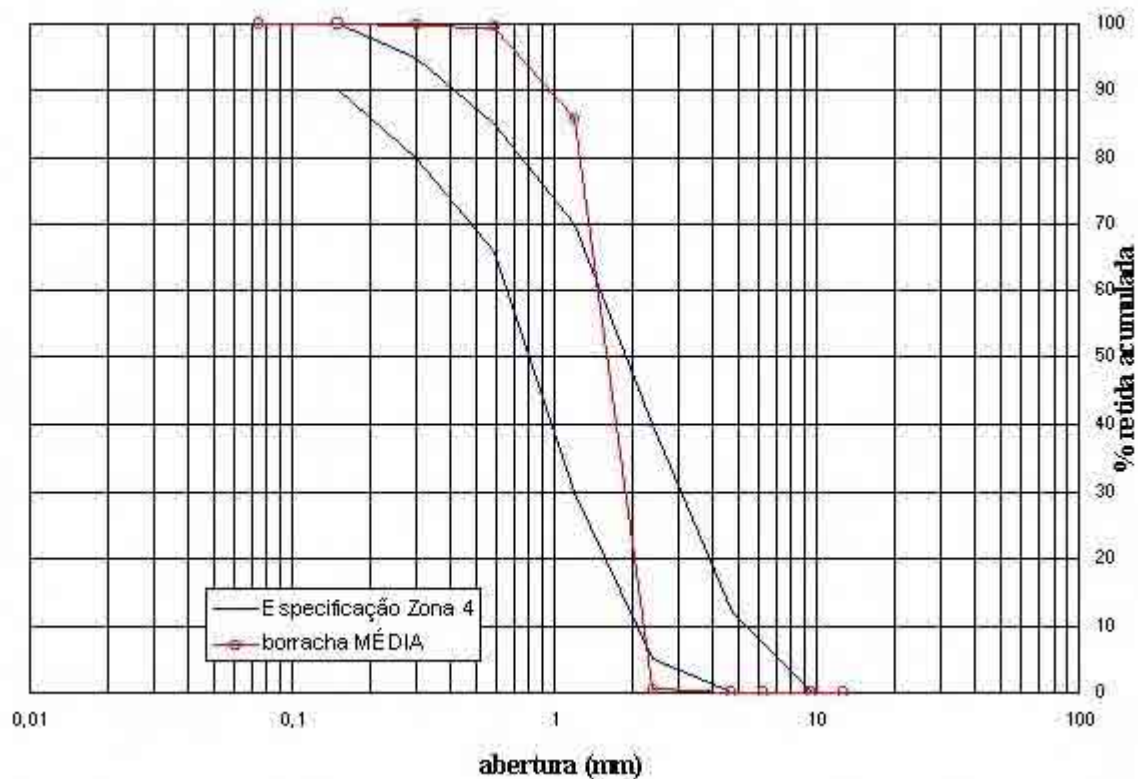


Figura 32: Curva granulométrica da borracha média

A caracterização granulométrica da borracha fina esta apresentada na Tabela 8, e representada na Figura 33. O valor do diâmetro máximo obtido foi de 1,19mm, quanto ao módulo de finura foi de 2,51.

Tabela 8: Análise granulométrica da borracha fina

<b>Análise Granulométrica da Borracha Fina</b>		
Peneiras Normais e Auxiliares		Material
Denominação	Abertura (mm)	% Retida Acumulada
1"	25,4	0,0
3/4"	19	0,0
5/8"	16	0,0
1/2"	12,7	0,0
3/8"	9,51	0,0
1/4"	6,3	0,0
N.º 4	4,76	0,0
N.º 8	2,38	0,0
N.º 16	1,19	4,4
N.º 30	0,595	60,4
N.º 50	0,297	88,1
N.º 100	0,149	98,2
fundo	0,075	100

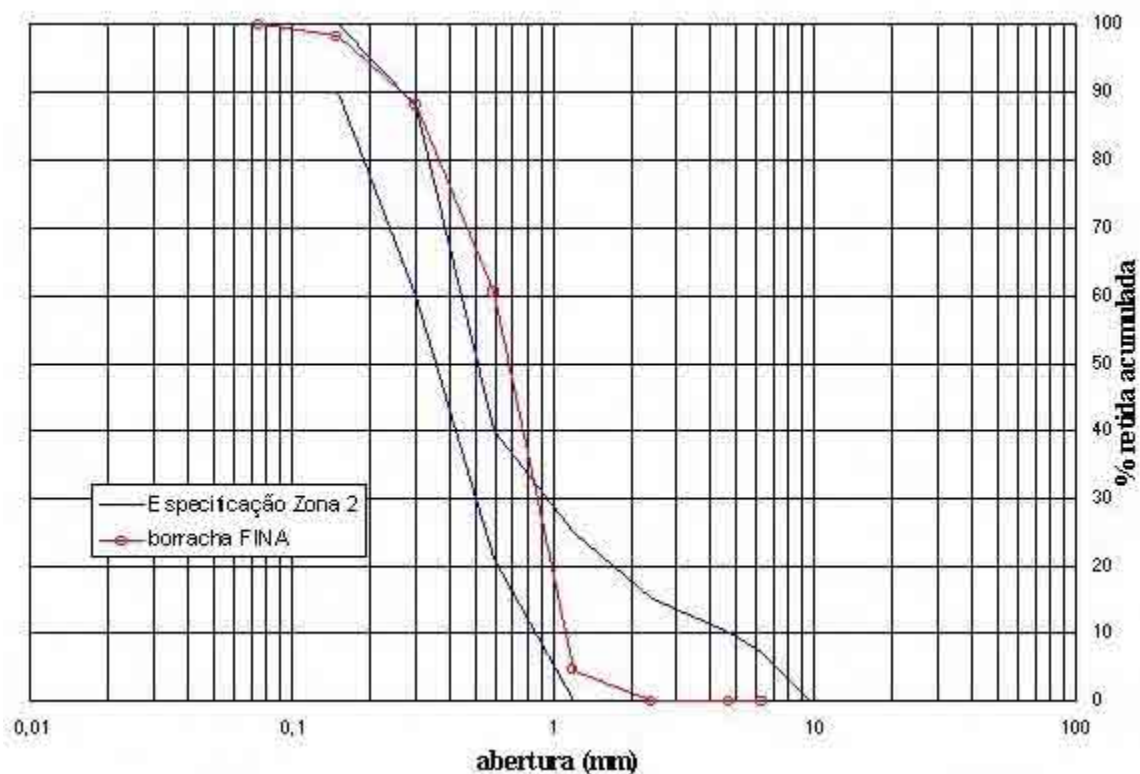


Figura 33: Curva granulométrica da borracha fina

#### 4.3.2.2 Areia

Foi utilizado areia natural proveniente do rio Paraná, a qual teve sua granulometria determinada segundo a NBR 7217 – ABNT (1993a). Assim na Tabela 9 e na Figura 34 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 9: Análise granulométrica da areia

<b>Análise Granulométrica da Areia</b>		
Peneiras Normais e Auxiliares		Material
Denominação	Abertura (mm)	% Retida Acumulada
1"	25,4	0,0
3/4"	19	0,0
5/8"	16	0,0
1/2"	12,7	0,0
3/8"	9,51	0,0
1/4"	6,3	0,0
N.º 4	4,76	0,4
N.º 8	2,38	4,3
N.º 16	1,19	18,4
N.º 30	0,595	31,8
N.º 50	0,297	62,4
N.º 100	0,149	91,8
fundo	0,075	100



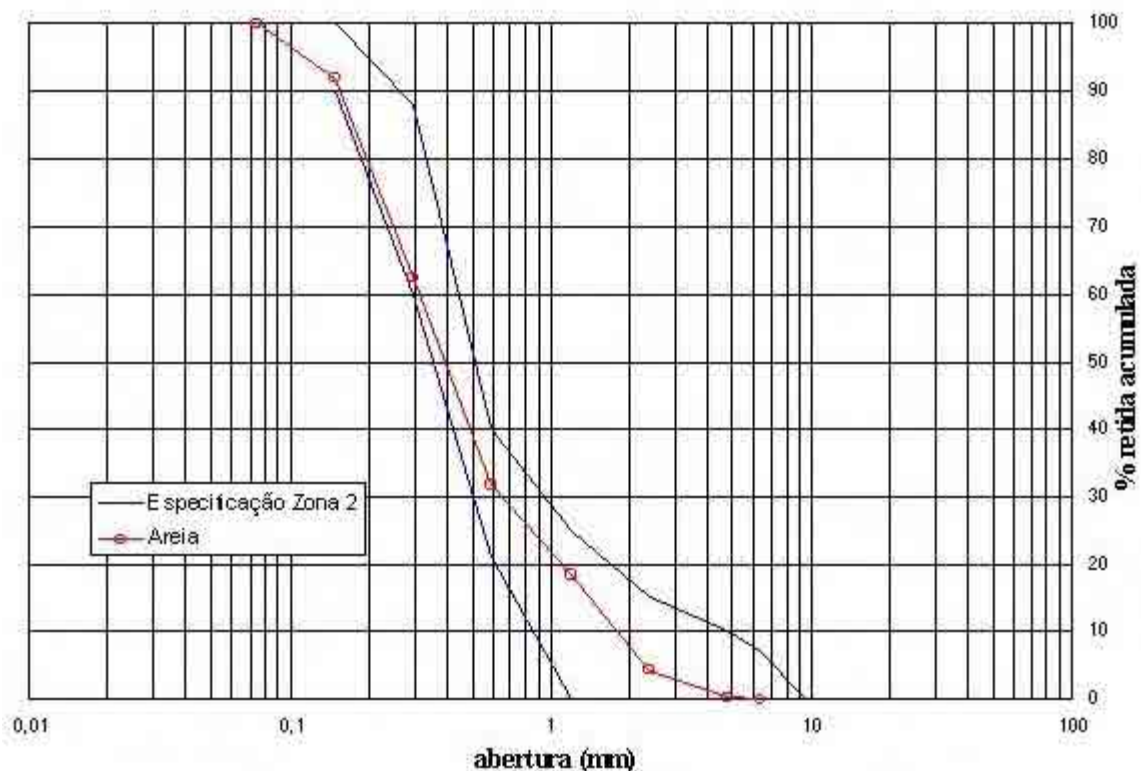


Figura 34: Curva granulométrica da areia

As demais características obtidas da areia em questão são apresentadas a seguir na Tabela 10.

Tabela 10: Demais características da areia

<b>Demais Características da Areia</b>			
<b>Determinações</b>		<b>Valores Obtidos</b>	<b>Método de ensaio</b>
& Máximo (mm)		2,38	NBR 7217
Módulo de Finura		2,09	NBR 7217
Massa Específica	S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2,657	NBR 9776
	Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,649	NBR 9776
Massa Unitária	Solta (g/cm <sup>3</sup> )	1,584	NBR 7251
	Solta 4%	1,149	NBR 7251
	Umidade (g/cm <sup>3</sup> )		
Absorção (%)		0,28	NBR NM 30
Pulverulento (%)		1,00	NBR 7219
Matéria Orgânica		+ clara	NBR NM 49

4.3.2.3 Brita

O agregado graúdo escolhido foi uma brita de origem basáltica na granulometria comercial denominada de brita 1. Então os dados da análise granulométrica, em acordo com a NBR 7217 – ABNT (1993a), são expostos na Tabela 11 e Figura 35.

Tabela 11: Análise granulométrica brita

<b>Análise Granulométrica da Brita</b>		
Peneiras Normais e Auxiliares		Material
Denominação	Abertura (mm)	% Retida Acumulada
1"	25,4	0,0
3/4"	19	0,0
5/8"	16	0,0
1/2"	12,7	15,8
3/8"	9,51	37,2
1/4"	6,3	74,4
N.º 4	4,76	93,7
N.º 8	2,38	100
N.º 16	1,19	100
N.º 30	0,595	100
N.º 50	0,297	100
N.º 100	0,149	100
fundo	0,075	100

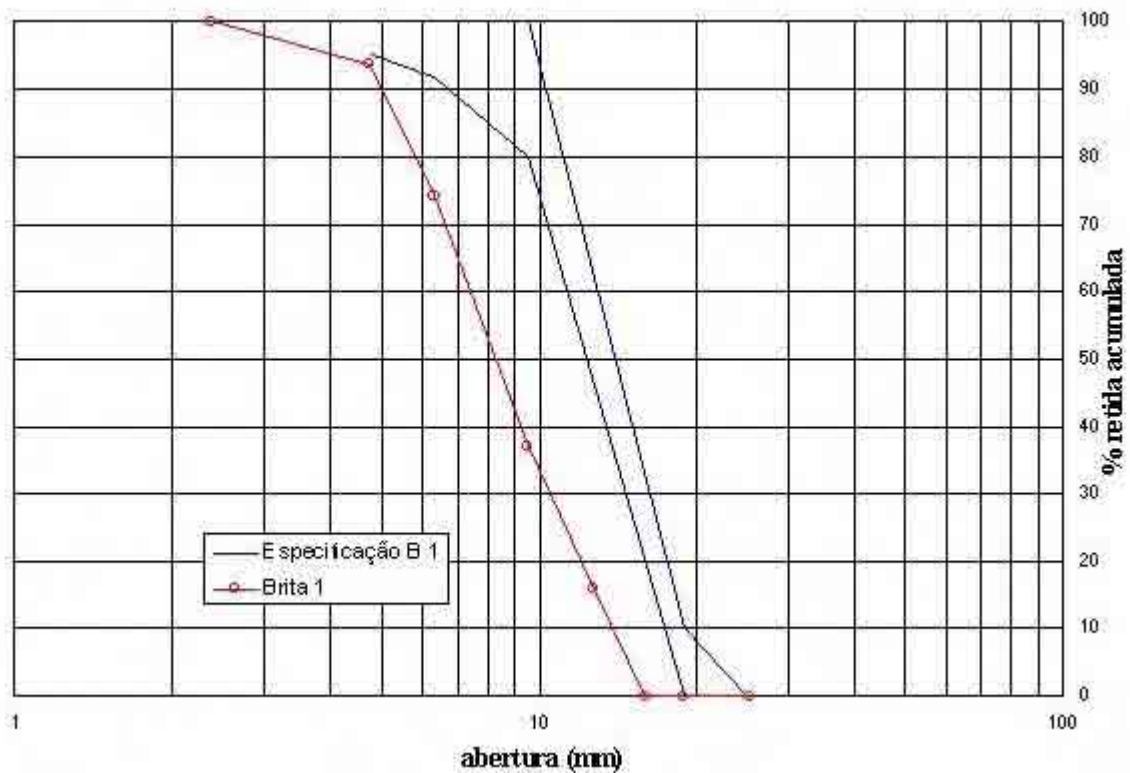


Figura 35: Curva granulométrica da brita

A Tabela 12 apresenta outras características determinadas para a brita abordada.

Tabela 12: Demais características da brita

<b>Demais Características da Brita</b>			
<b>Determinações</b>		<b>Valores Obtidos</b>	<b>Método de ensaio</b>
& Máximo (mm)		19,0	NBR 7217
Módulo de Finura		6,31	NBR 7217
Massa Específica	S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2,877	NBR NM 53
	Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,837	NBR NM 53
	Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,955	NBR NM 53
Massa Unitária	Solta (g/cm <sup>3</sup> )	1,504	NBR 7251
Absorção (%)		1,88	NBR NM 53
Pulverulento (%)		0,11	NBR 7219

### 4.3.3 Aditivo Químico

#### 4.3.3.1 Superplastificante

Como já justificado, foi empregado um superplastificante à base de policarboxilato, denominado de Superplastificante Z, que segundo dados fornecidos pelo fabricante possui massa específica de 1,08g/cm<sup>3</sup>, teor de sólidos de 35% e dosagem máxima de 2% em relação ao peso de cimento.

#### 4.3.4 Água

Utilizou-se água potável proveniente da rede de tratamento público da cidade de Ilha Solteira.

## 4.4 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os métodos, a serem utilizados no estudo das propriedades do CAD com adição de borracha, foram desenvolvidos em acordo com diversas normas brasileiras, internacionais e bibliografia científica consultada.

#### 4.4.1 Método de Dosagem

O método de dosagem utilizado foi proposto pelo pesquisador canadense Pierre-Claude Aïtcin, sendo denominado cientificamente de “método Aïtcin”, o qual é elucidado em AÏTCIN (2000, p.265-293), dentre outras publicações.

Trata-se de um método específico para CAD e com metodologia de fácil e rápida aplicação, uma vez que esta é parametrizada em resultados empíricos. Dentre outras características destacam-se, em especial, o proporcionamento bastante criterioso dos aditivos, uma vez que se baseia no percentual de peso de sólidos dos aditivos químicos e então leva em conta a água presente nos mesmos como parte da água contida na mistura.

Em linhas gerais o procedimento de dosagem pelo método citado inicia-se pela seleção dos seguintes parâmetros do traço:

1. Relação água/aglomerante (a/agl) – dentre relações propostas entre tal parâmetro e valores de resistência à compressão a serem alcançados;
2. Teor de água e a dosagem de superplastificante – com base no conceito de ponto de saturação do superplastificante;
3. Quantidade de agregado graúdo – de acordo com a forma típica das partículas;
4. Teor de ar – através de estimativa inicial sugerida, e posteriormente calibrado por meio de ensaio.

Assim depois de determinados os procedimentos ora citados, tem-se, por simples correlação entre a relação a/agl e o teor de água, a quantidade de aglomerante a ser empregada no traço. Então, uma vez que este método baseia-se no critério do volume absoluto, o volume restante a interar um metro cúbico será preenchido pelo agregado miúdo.

Estando completa a composição parte-se para a experimentação, onde se necessário serão realizados ajustes e/ou modificações. Assim os concretos produzidos, foram avaliados visualmente pela metodologia apresentada por HELENE e TERZIAN (1993, p.242-258), visando dessa maneira obter uma boa proporcionalidade quanto aos teores de argamassa e agregado graúdo.

A Figura 36, apresenta ainda um fluxograma simplificado baseado no desenvolvimento do método Aïtcin.

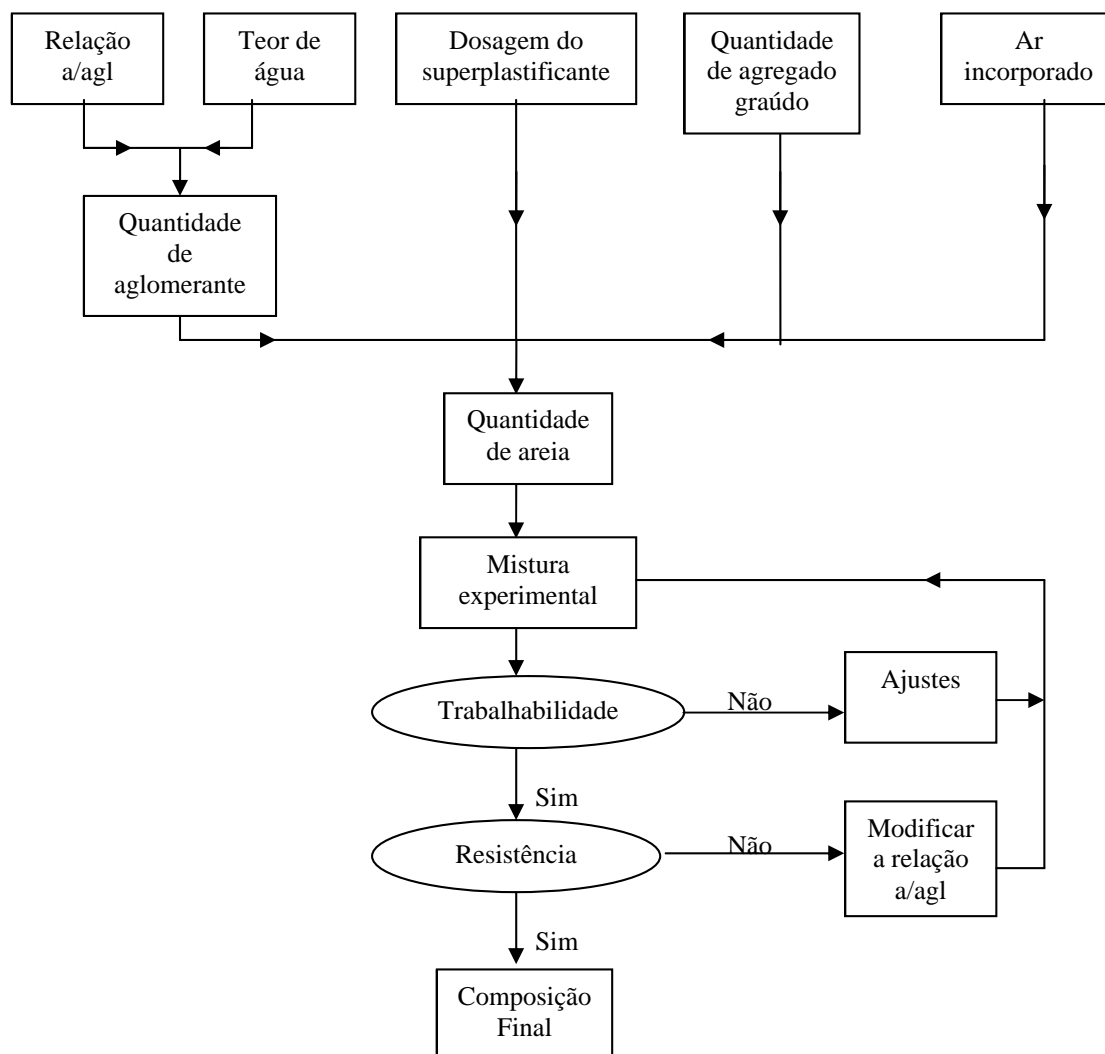


Figura 36: Fluxograma do método de dosagem proposto

Fonte: AÏTCIN (2000, p.266)

## 4.4.2 Produção dos Concretos

### 4.4.2.1 Amassamento

Os concretos foram produzidos, em acordo com a NBR 12821 – ABNT (1993b), em betoneiras de eixo inclinado com capacidade para 120 e 360 litros, as quais constam da Figura 37 e Figura 38, variando-se a escolha destas de acordo com o volume a ser amassado.



Figura 37: Betoneira com capacidade de 120 litros



Figura 38: Betoneira com capacidade de 360 litros

Na produção de concretos com adição de resíduos de borracha de pneus diversos autores, dentre estes Fioriti (2002, p.31), adotaram à seqüência de colocação dos materiais constituintes na betoneira a partir da introdução primeiramente dos materiais secos, inclusive a borracha, objetivando uma melhor condição de amassamento.

Contudo, na produção dos concretos de alto desempenho primando pelo usual à vários pesquisadores que trabalham com CAD, adotou-se a seguinte ordem de colocação dos materiais na betoneira: primeiramente foi introduzido o agregado graúdo juntamente

com a água e a sílica ativa, os quais foram misturados por um minuto; posteriormente o cimento e a areia, sendo que após dois minutos de batida foi introduzido o superplastificante e então após todos os materiais constarem na betoneira o último ciclo de amassamento resultou em mais dez minutos.

A adoção de tempos de amassamento elevados em concretos de baixa relação água/aglomerante e adicionados de resíduos de borracha pode ser considerada prática comum. Olivares e Barluenga (2004, p.112), ao elaborarem concretos com estas características, adotaram um ciclo de amassamento constante de quinze minutos, excluindo-se ainda o tempo destinado a algumas batidas preliminares para a introdução dos materiais na betoneira.

No entanto, ressalta-se que, existindo a necessidade de produção de maiores quantidades destes concretos de alto desempenho, a partir da utilização de betoneiras industriais, com maior poder de homogeneização, os tempos de amassamento serão certamente reduzidos.

Nos traços com adição de borracha, esta foi introduzida no primeiro momento juntamente com o agregado graúdo, a água e a sílica. Onde o contato direto da “calda” de sílica ativa, tanto com a borracha quanto com o agregado graúdo, contribui para uma melhor condição de adesão destes à matriz da pasta de cimento, resultando em maiores valores de resistência à compressão.

#### 4.4.2.2 Moldagem e cura

Os corpos-de-prova foram moldados e curados em conformidade com a NBR 5738 – ABNT (2003a), sendo que, exceto os corpos-de-prova prismáticos, todos contaram com auxílio de mesa vibratória. Dentre os corpos-de-prova utilizados tem-se:

- Corpos-de-prova prismáticos: em formato de placas com 25cm X 35cm X 5cm, foram destinados aos ensaios de resistência ao impacto e sua moldagem é visualizada na Figura 39.



Figura 39: Moldagem dos corpos-de-prova para ensaio de resistência à impacto

- Corpos-de-prova cilíndricos: com 30cm de diâmetro por 10cm de altura, em especial, para os ensaios de resistência à abrasão, e com 10cm X 20cm para os demais ensaios realizados. Sendo apresentados nas Figura 40 e Figura 41, durante as respectivas moldagens.



Figura 40: Moldagem do corpo-de-prova para ensaio de resistência à abrasão





Figura 41: Moldagem dos corpos-de-prova de 10cm X 20cm

Posteriormente a desmoldagem os corpos-de-prova foram encaminhados à câmara úmida com umidade e temperatura controladas, a qual é apresentada na Figura 42, até as idades de 3, 7, 28 e 91 dias para a realização dos respectivos ensaios.



Figura 42: Câmara úmida para cura dos corpos-de-prova

### 4.4.3 Ensaio

#### 4.4.3.1 Estado fresco

A consistência dos concretos foi verificada pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 – ABNT (1998), como ilustra a Figura 43.



Figura 43: Ensaio de Abatimento do tronco de cone

Para a determinação do ar incorporado nos concretos utilizou-se um aparelho medidor do tipo de pressão, visualizado na Figura 44, de acordo com a NBR NM 47 – ABNT (2002).



Figura 44: Aparelho para a medição do teor de ar

Quanto à massa específica dos concretos foi verificada a partir da NBR 9833 – ABNT (1987b), com auxílio da balança e recipiente visualizado na Figura 45.



Figura 45: Balança e recipiente utilizados na determinação da massa específica

As temperaturas dos concretos frescos foram avaliadas com termômetro digital como mostra a Figura 46.



Figura 46: Termômetro digital para determinação da temperatura

#### 4.4.3.2 Estado endurecido

##### 4.4.3.2.1 *Propriedades mecânicas*

As seguintes propriedades mecânicas foram ensaiadas: resistência à compressão, segundo a NBR 5739 – ABNT (1994a); resistência à tração por compressão diametral, de

acordo com a NBR 7222 – ABNT (1994b) e módulo de elasticidade, obedecendo a NBR 8522 – ABNT (2003b) sob plano de carga tipo I, sendo utilizados três corpos-de-prova, em cada idade, para cada tipo de ensaio mencionado.

Na avaliação dos concretos de alto desempenho quanto a resistência à compressão utilizou-se uma prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas, a qual pode ser visualizada na Figura 47.



Figura 47: Prensa hidráulica com capacidade de 100t

Os ensaios de módulo de elasticidade estático foram realizados em prensa hidráulica informatizada, a qual é apresentada pela Figura 48, com capacidade de 200 toneladas e equipada com dois transdutores de deslocamento, visualizados na Figura 49, denominados em inglês pela sigla LVDT (“linear variable differential transformer”).



Figura 48: Prensa informatizada com capacidade de 200 toneladas



Figura 49: Par de LVDT fixados no corpo-de-prova

A partir do programa computacional utilizado pôde-se acompanhar em tempo real a execução dos diagramas tensão-deformação na tela do computador, como visualizado na Figura 50, então após os sucessivos carregamentos obtém-se diretamente o módulo de elasticidade secante.

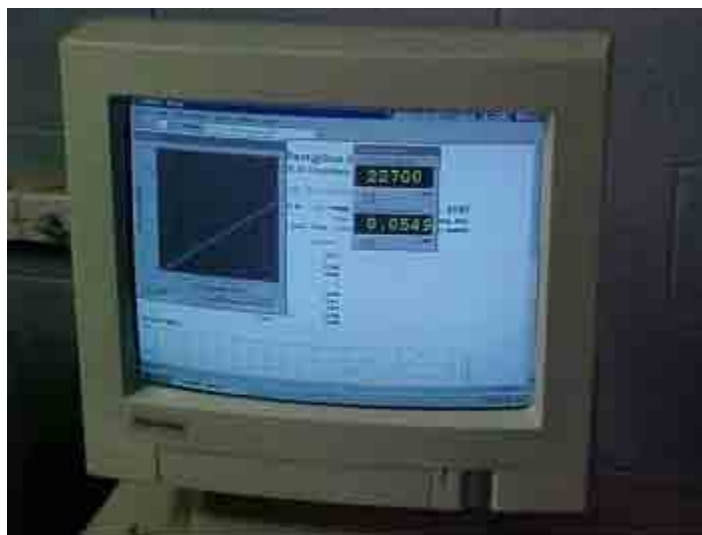


Figura 50: Configuração de tela durante o ensaio de módulo de elasticidade

Anteriormente ao ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade os corpos-de-prova foram capeados com composto de enxofre de alta resistência, como apresentado na Figura 51, a fim de tornar suas faces planas e paralelas, e assim isentando-os de possível excentricidade quando da aplicação do carregamento. A resistência média à compressão do referido capeamento, quando medida em corpos-de-prova cúbicos de 5cm X 5cm X 5cm, visualizados na Figura 52, foi de 55,2MPa.



Figura 51: Corpo-de-prova sendo capeado



Figura 52: Corpos-de-prova de composto de enxofre de alta resistência

Devido à carência de normalizações para a avaliação da resistência ao impacto de concretos, os ensaios foram realizados com apoio da extinta NBR 9454 – ABNT (1986), e auxílio do aparato visualizado na Figura 53.



Figura 53: Aparato para ensaio de resistência ao impacto

O procedimento empregado no ensaio da resistência ao impacto inicia-se com o nivelamento e contenção do corpo-de-prova na caixa de areia colocada abaixo do tubo guia, como pode ser visualizado na Figura 54. No interior do tubo guia, tem-se uma esfera metálica ligada a um barbante, o qual por sua vez apóia-se a uma roldana possibilitando que a esfera possa ser suspensa.



Figura 54: Detalhe do ajuste do corpo-de-prova

O tubo guia possui perfurações transversais ao longo do seu eixo distanciadas de 10 cm, onde por meio da introdução ou retirada de um pino metálico pré-determina-se à altura, e restringi-se ou induz-se a queda livre da esfera, sendo que depois de regulado, a primeira perfuração inferior totalizou 0,20m até a superfície do corpo-de-prova e a última perfuração distanciava-se de 2,20 m.

Assim inicia-se a aplicação de carregamentos de impacto com a primeira queda da esfera metálica, a qual possui 0,5 Kg, à altura de 0,20m da superfície do corpo-de-prova, sendo as demais incrementadas sempre por 0,10m até a altura limite de 2,20m. Ao longo destas repetições observou-se na superfície do corpo-de-prova, com auxílio de lupas graduadas de até 0,1mm, o surgimento da primeira fissura e sua propagação.

A utilização de uma esfera relativamente leve está correlacionada com o intuito de aplicar energias de impacto a uma pequena taxa de incremento, para a observação de fissuras da ordem de 0,1mm de espessura na superfície das placas.

Quanto à observação de fissuras foram limitadas à face superior da placa, pois, considerando a forma e peso das placas, todas as diferentes maneiras de retirá-las e reassentá-las, manualmente após cada impacto, seriam baseadas no apoio em dois pontos extremos da mesma, causando assim mesmo que involuntariamente certa flexão, a qual poderia induzir à fissuração, descartando-se ainda questões ligadas a variações quanto à locação, nivelamento, apoio, etc. Ressaltando-se ainda que a contenção do corpo-de-prova, propiciada pela areia, foi suficiente para que durante todo o ensaio não ocorresse o seu deslocamento.

Então, a partir deste método, o qual resume-se ao impacto gerado por um determinado peso submetido à queda livre em alturas pré-fixadas, e a Equação 1, utilizada também por Rossignolo (2003, p.64), tornou-se possível o cálculo da energia de cada impacto aplicado.

$$E_i = h \cdot m \cdot a$$

Equação 1

Onde:

$E_i$  = Energia de impacto (N.m ou J);



$h$  = altura de queda (m);  
 $m$  = massa da esfera (Kg);  
 $a$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

Desse modo determinou-se a resistência ao impacto através do somatório de energia necessário ao surgimento da primeira fissura na face superior da placa. Na seqüência foi dado prosseguimento ao ensaio, o qual foi interrompido apenas após a observação da primeira fissura /1mm de espessura, juntamente com a determinação do seu somatório de energia total necessário, ou ao atingir o somatório de energia igual a 123,5J, valor do somatório geral de 21 impactos, a contar da 1ª altura de queda igual a 0,20m até a última de 2,20m.

#### 4.4.3.2.2 *Propriedades que remetem à durabilidade*

Quanto à verificação de outras propriedades, que remetem à durabilidade, dos concretos de alto desempenho produzidos, tem-se a absorção de água por imersão; realizada de acordo com a NBR 9778 – ABNT (1987a) e com o auxílio da estufa apresentada na Figura 55; e a resistência à abrasão, determinada através de ensaio desenvolvido pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), com base no método utilizado pelo “Corps of Engineers”, (LCEC, 1983, p.1-6).



Figura 55: Estufa utilizada na secagem dos corpos-de-prova

O aparelho utilizado no ensaio de resistência à abrasão é apresentado na Figura 56, o qual consiste numa câmara cilíndrica, onde o corpo-de-prova é colocado submerso e sobre sua superfície deposita-se certo número de esferas de aço, como visualizado na Figura 57.

Então por meio de uma pá agitadora (rotor) a água entra em constante movimento circular que por sua vez é propagado às tais esferas. O atrito das esferas na superfície do corpo-de-prova poderá causar sua possível abrasão, a qual é verificada por meio do desgaste percentual da massa inicial do corpo-de-prova, ao longo das 71 horas do ensaio, sendo as pesagens realizadas ao fim de 10, 24, 48 e 71 horas.



Figura 56: Aparelho de abrasão



Figura 57: Corpo-de-prova submerso no interior do aparelho de abrasão e esferas de aço

A seguir apresenta-se na Figura 58, o esquema em corte do aparelho utilizado.

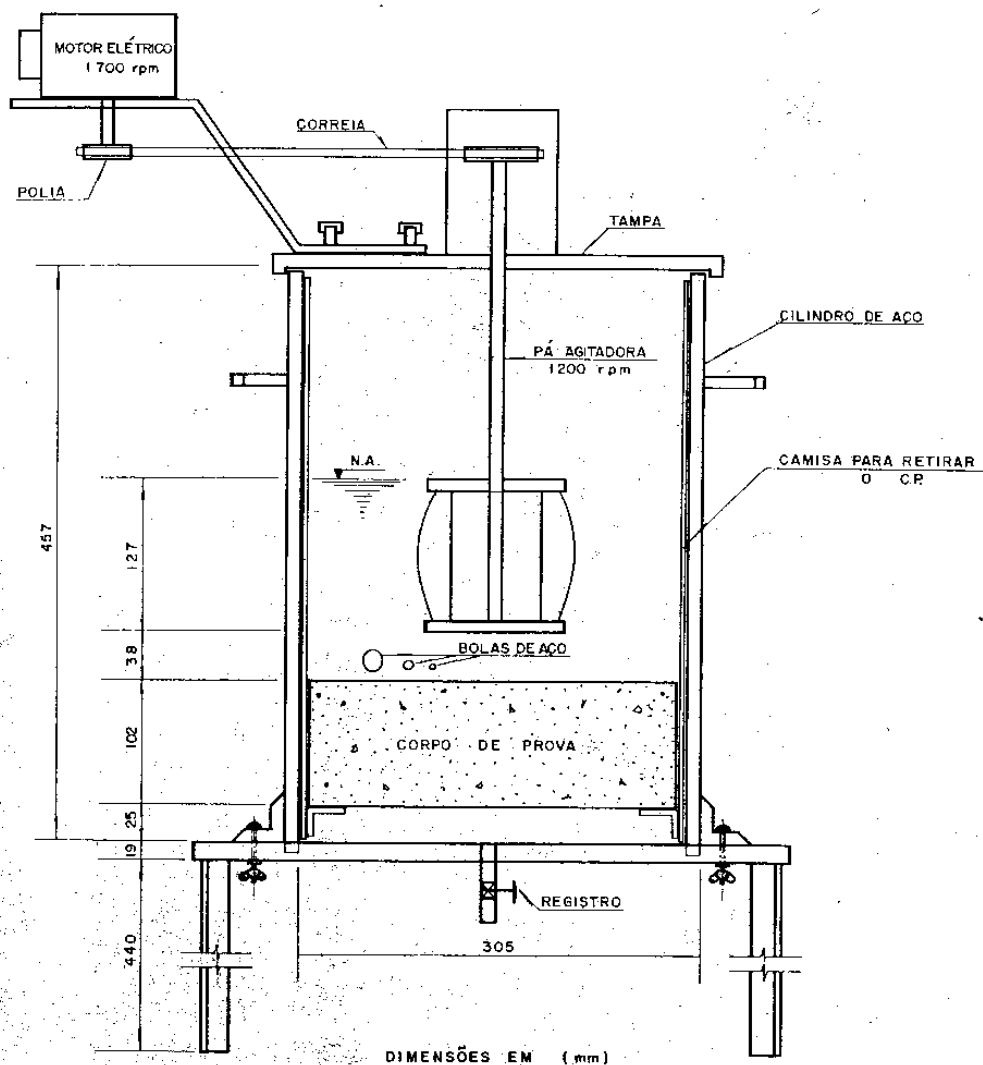


Figura 58: Corte do aparelho para ensaio de abrasão do concreto  
Fonte: LCEC (1983, p.6)

## 4.5 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Visando obter um CAD com resistência à compressão, aos 28 dias de idade, acima de 80MPa, patamar tido como conveniente, considerando-se a esbeltez e as deformações limitantes dos elementos estruturais; e de trabalhabilidade superior a 20cm de abatimento

no tronco de cone, no intuito de possibilitar concretagens futuras através de bombeamento, prosseguiu-se com o desenvolvimento da metodologia de dosagem anteriormente definida.

Devido à diversidade de eficácia dos diferentes materiais aglomerantes, o método Aïtcin apresenta uma larga faixa de valores de relação água/aglomerante para uma mesma resistência, onde o limite mais conservador desta faixa para a obtenção de um concreto de 80MPa esta em torno de 0,27.

Entretanto, devido ao contato anterior com outras investigações experimentais envolvendo este método de dosagem, dentre outras Martins et al. (2004, p.1381-1395), é possível afirmar que mesmo tais relações mais conservadoras, dependendo dos materiais utilizados, ainda estão aquém do necessário à obtenção das suas correspondentes resistências, assim optou-se pela relação água/aglomerante de 0,25.

A sílica ativa na forma densificada foi empregada em todos os traços como parte do material aglomerante, sendo adicionada na porcentagem de 8% da massa total do material aglomerante, teor o qual esta dentro da faixa usual de utilização e apresenta boa relação custo/benefício.

Ressalvando-se ainda que apesar da quantidade de superplastificante, nos cálculos matemáticos deste método, basear-se em porcentagem do teor de sólidos a ser empregada, neste trabalho optou-se pela menção mais trivial, fundamentada na porcentagem da massa total do superplastificante (água + teor de sólidos) em relação à massa do cimento, no entanto, considerou-se a água contida no superplastificante como parte da água de amassamento.

Na seqüência baseando-se na indicação de Aïtcin (2000, p.212), determinou-se à dosagem do superplastificante por volta 80% do seu ponto de saturação, o que resultou em 1,2% do peso do cimento. Então, pôde-se admitir uma quantidade de água de 130 litros/m<sup>3</sup>.

Foi considerado inicialmente 1,5% de ar incorporado e posteriormente este teor foi confirmado por meio de ensaio, empregou-se no princípio 1100kg/m<sup>3</sup> de brita, e então foram feitas misturas experimentais visando correções nos teores de argamassa e agregado graúdo, resultando então na composição apresentada na Tabela 13, sendo denominada de composição PADRÃO.

Tabela 13: Composição PADRÃO

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade</b>
Água	130,0 kg/m <sup>3</sup>
Cimento	478,4 kg/m <sup>3</sup>
Sílica Ativa	41,6 kg/m <sup>3</sup>
Areia	774,3 kg/m <sup>3</sup>
Brita	1125,0 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo Superplastificante	5,74 kg/m <sup>3</sup>
<b>Algumas Relações</b>	<b>Índices</b>
Água/aglomerante (massa)	0,25
% Sílica Ativa/aglomerante (massa)	8,0 %
% Superplastificante/cimento (massa)	1,2 %
% gráúdo/miúdo (volume)	57,3 %
% Argamassa (massa)	54,0 %

Seguindo a proposta deste programa experimental iniciou-se a implementação de resíduos de borracha de pneu na composição padrão, os quais foram anteriormente classificados e denominados de borracha fina, média e grossa.

Segundo Bignozzi e Sandrolini (2004, p.79), os resíduos de borracha de pneu devem ser empregados em substituição ao tipo de agregado que tenha uma curva granulométrica de maior semelhança com a sua respectiva curva. Assim, uma vez que as análises granulométricas dos resíduos ora utilizados são mais próximos a granulometria dos agregados miúdos, determinou-se à adição das borrachas estudados em substituição volumétrica à parte da areia da composição padrão.

Visando observar a influência da granulometria dos resíduos de borracha de pneu também na trabalhabilidade do CAD, a porcentagem de superplastificante foi fixada no mesmo teor da composição padrão.

Tendo como base às porcentagens de adição de resíduos de borracha de pneu utilizadas por Olivares e Barluenga (2004, p.111), na implementação de traços de concreto de alta resistência, as quais são 3%, 5% e 8% em relação ao metro cúbico, realizaram-se ensaios preliminares. Os quais indicaram a viabilidade da incorporação de resíduos de borracha de pneu na composição padrão nas porcentagens de 3% e 5%, sem a necessidade de grandes alterações.

Entretanto, constatou-se que para os concretos com 8% de resíduos de borracha faltava argamassa para envolver o esqueleto granular, assim visando analisar composições de características em sua maioria idênticas tal porcentagem foi excluída desta pesquisa.

Então, as composições com adição de borracha foram nomeadas de composições modificadas, variando quanto aos teores de borracha implementada e para cada teor distinguindo-se na classificação granulométrica da borracha utilizada, como exemplo “modificada X% classificação da borracha”.

A seguir a Tabela 14, apresenta a composição MODIFICADA 3%, independentemente da granulometria de borracha utilizada.

Tabela 14: Composição MODIFICADA 3%

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade</b>
Água	130,0 kg/m <sup>3</sup>
Cimento	478,4 kg/m <sup>3</sup>
Sílica Ativa	41,6 kg/m <sup>3</sup>
Areia	694,6 kg/m <sup>3</sup>
Borracha	34,5 kg/m <sup>3</sup>
Brita	1125,0 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo Superplastificante	5,74 kg/m <sup>3</sup>
<b>Algumas Relações</b>	<b>Índices</b>
Água/aglomerante (massa)	0,25
% Sílica Ativa/aglomerante (massa)	8,0 %
% Superplastificante/cimento (massa)	1,2 %
% borracha no m <sup>3</sup> (volume)	3 %
% borracha/areia (volume)	11,5%
% borracha/graúdo (volume)	7,7%
% borracha/total agregados (volume)	4,6%

Na seqüência, a composição MODIFICADA 5%, a qual também é válida para todas as granulometrias de borracha ora abordadas, é visualizada na Tabela 15.

Tabela 15: Composição MODIFICADA 5%

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade</b>
Água	130,0 kg/m <sup>3</sup>
Cimento	478,4 kg/m <sup>3</sup>
Sílica Ativa	41,6 kg/m <sup>3</sup>
Areia	641,5 kg/m <sup>3</sup>
Borracha	57,5 kg/m <sup>3</sup>
Brita	1125,0 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo Superplastificante	5,74 kg/m <sup>3</sup>
<b>Algumas Relações</b>	<b>Índices</b>
Água/aglomerante (massa)	0,25
% Sílica Ativa/aglomerante (massa)	8,0 %
% Superplastificante/cimento (massa)	1,2 %
% borracha no m <sup>3</sup> (volume)	5 %
% borracha/areia (volume)	20,7%
% borracha/graúdo (volume)	12,8%
% borracha/total agregados (volume)	7,9%

Isto posto, definiu-se os traços de concretos de alto desempenho a serem elaborados e avaliados quanto ao desempenho de resistência à compressão, como segue:

- Traço composição PADRÃO;
- Traço composição MODIFICADA 3 % borracha FINA;
- Traço composição MODIFICADA 3 % borracha MÉDIA;
- Traço composição MODIFICADA 3 % borracha GROSSA;
- Traço composição MODIFICADA 5 % borracha FINA;
- Traço composição MODIFICADA 5 % borracha MÉDIA;
- Traço composição MODIFICADA 5 % borracha GROSSA.

Com o intuito de enriquecer tal investigação determinou-se também a execução de mais um traço denominado de ESPECIAL 3% borracha TOTAL, sendo destinado a seguinte abordagem:

- Traço ESPECIAL 3% borracha TOTAL – verificar o comportamento do resíduo de borracha de pneus em sua composição granulométrica total (98,1%), excluindo-se apenas a parcela denominada de “muito grossa” (1,9%).

Para tal, as modificações deste traço especial em relação aos demais será explicitada a seguir:

- Traço ESPECIAL 3% borracha TOTAL – utilizou-se o resíduo de borracha de pneu total (98,1%), excluindo-se apenas a parcela denominada de “muito grossa” (1,9%), sendo feita à adição deste resíduo em substituição volumétrica parcial, em igual proporção na areia e na brita.

Dessa forma, será indicada a composição do traço especial 3% borracha TOTAL, na Tabela 16.

Tabela 16: Traço ESPECIAL 3% borracha TOTAL

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade</b>
Água	130,0 kg/m <sup>3</sup>
Cimento	478,4 kg/m <sup>3</sup>
Sílica Ativa	41,6 kg/m <sup>3</sup>
Areia	734,5 kg/m <sup>3</sup>
Borracha	34,5 kg/m <sup>3</sup>
Brita	1081,8 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo Superplastificante	5,74 kg/m <sup>3</sup>
<b>Algumas Relações</b>	<b>Índices</b>
Água/aglomerante (massa)	0,25
% Sílica Ativa/aglomerante (massa)	8,0 %
% Superplastificante/cimento (massa)	1,2 %
% borracha no m <sup>3</sup> (volume)	3 %
% borracha/areia (volume)	10,8%
% borracha/gráudo (volume)	8,0%
% borracha/total agregados (volume)	4,6%

Na seqüência apresentam-se as performances e análises, quanto a trabalhabilidade e resistência à compressão, do conjunto de traços determinados anteriormente, visando dentre outras constatações a definição da melhor composição com borracha para posterior investigação de maior magnitude juntamente com o traço padrão.



## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 PERFORMANCE, QUANTO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRABALHABILIDADE DOS TRAÇOS

#### 5.1.1 Resistência à Compressão

Visando proporcionar uma melhor condição de comparação visual entre os diversos traços elaborados a Figura 59, apresenta em conjunto a evolução da resistência à compressão para todos os traços, sendo que cada valor apontado é resultado da média de três corpos-de-prova..

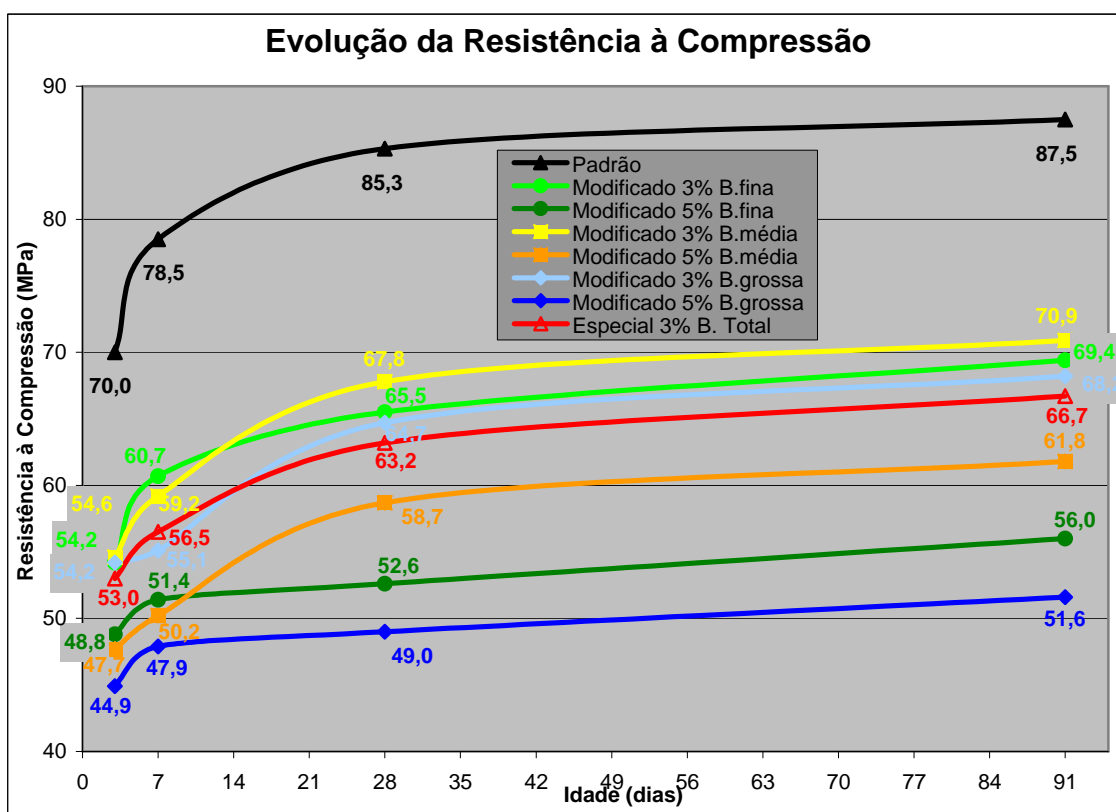


Figura 59: Evolução da resistência à compressão de diversos traços elaborados

Observando a Figura 59, pode-se notar que:

- O traço padrão atendeu à expectativa de dosagem quanto à elaboração de um CAD que extrapolasse os 80 MPa de resistência à compressão aos 28 dias;

- Como era previsto pela revisão bibliográfica ocorreu a diminuição da resistência à compressão com a implementação da borracha, haja visto que os traços com adição de 5% de borracha apresentaram menores valores de resistência à compressão em comparação aos valores obtidos para os traços com 3% de adição, os quais por sua vez foram inferiores àqueles do traço padrão;
- De modo geral, a porcentagem de redução de resistência à compressão observada na nos traços com adição de 3% de borracha em relação ao traço padrão, está em torno de 20% a 25%. Entretanto os valores indicativos da resistência à compressão para tais traços são sem dúvidas pertencentes ao grupo de concretos de alto desempenho;
- Em contrapartida a esta redução de resistência à compressão, logo em primeiro plano, foi possível observar , em relação ao traço padrão, a redução da fragilidade no comportamento de ruptura em todos os traços do grupo modificado ou especial, ou seja, com adição de borracha. Visando ilustrar tal fato a Figura 60 apresenta um corpo-de-prova típico do traço padrão após ter sido ensaiado à compressão, enquanto um outro corpo-de-prova, visualizado na Figura 61, representa de forma característica as rupturas obtidas para os traços com adição de borracha, no caso 3%;



Figura 60: Típico corpo-de-prova do traço padrão rompido à compressão (7dias)



Figura 61: Típico corpo-de-prova dos traços com adição de borracha rompido à compressão (7dias)

- Para todos os traços elaborados as rupturas foram do tipo transgranular, ou seja, a ruptura atravessou os agregados graúdos;
- Os concretos de alto desempenho pertencentes aos traços denominados de modificado 3%, apresentaram valores de resistência à compressão bastante próximos, independentemente da granulometria de borracha empregada;
- Quanto aos concretos de alto desempenho pertencentes aos traços denominados de modificado 5%, demonstraram uma maior tendência de distinção devido a granulometria de borracha empregada;
- Contudo, tanto os traços das composições modificada 3% quanto àqueles da modificada 5%, apresentam a mesma seqüência, considerando-se a ordem crescente de valores médios de resistência à compressão, quanto as granulometrias das borrachas: grossa, fina e média;
- Destaca-se dentre os traços com adição de 5% de borracha, àquele com borracha média, o qual foi o único a apresentar um significativo aumento de resistência à compressão, em especial, entre o sétimo e o vigésimo oitavo dia;
- Baseando-se nos resultados referentes ao traço especial 3% borracha total, apesar de inferiores aos traços modificado 3%, demonstram a viabilidade da

utilização do resíduo de borracha de pneus, quase que integralmente, ou seja 98,1%.

Todos os traços apresentaram experimentalmente teor de ar incorporado de 1,5%, valor igual ao admitido no procedimento de dosagem inicial, assim não houve a necessidade de nenhum ajuste nas composições anteriormente apresentadas.

### 5.1.2 Trabalhabilidade

Na seqüência a Figura 62 apresenta em conjunto os abatimentos de tronco de cone para os respectivos traços da Figura 59.

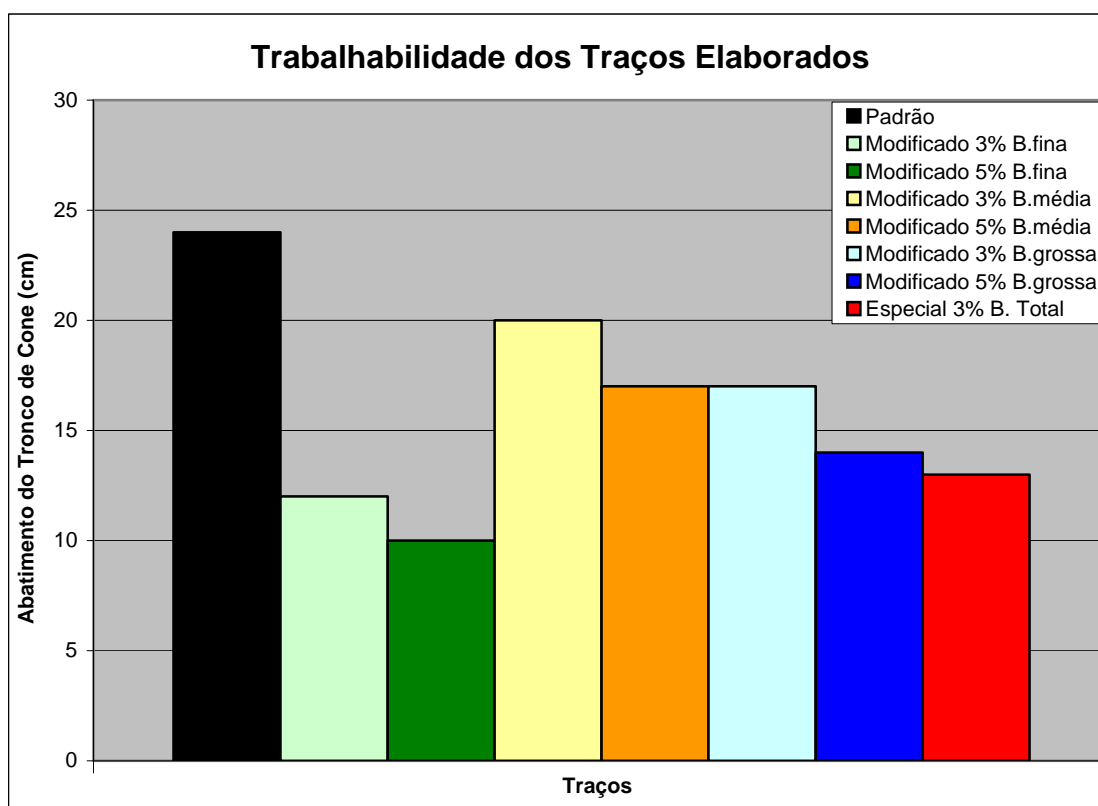


Figura 62: Trabalhabilidade de diversos traços elaborados

Analisando a Figura 62, é possível constatar que:

- A trabalhabilidade do traço padrão atingiu com excelência o nível almejado anteriormente ao processo de dosagem. Entretanto, tal propriedade mostrou-

se afetada devido à implementação de borracha, observando-se ainda grande influência da granulometria da borracha empregada;

- Assim, dentre as diferentes granulometrias de borracha os traços com a borracha média apresentaram a diminuição de trabalhabilidade de forma menos pronunciada. Destacando-se que além do traço modificado 3% com borracha média ter apresentar a melhor trabalhabilidade, dentre os demais traços com adição de borracha, o traço modificado 5% de borracha média, não foi superado, quanto a trabalhabilidade, por nenhum outro traço com borracha de outra granulometria, inclusive àqueles com teores de 3%;
- Os traços que apresentaram a menor trabalhabilidade foram àqueles com adição de borracha fina, considerando-se inclusive o traço especial 3% com borracha Total;
- Quanto aos traços com borracha grossa, foi observado certa dificuldade no acabamento final da superfície do corpo-de-prova justamente devido a presença de tal borracha.

### **5.1.3 Escolha do Traço com Borracha de Melhor Performance**

Assim exposto, considerando-se as performances de resistência à compressão e trabalhabilidade, procedeu-se à escolha do melhor traço de concreto de alto desempenho com adição de borracha:

- A observação da redução da fragilidade no comportamento de ruptura em todos os traços com adição de borracha, em relação ao traço padrão, não têm a capacidade de determinar uma medida quantitativa da extensão de tal redução. Analisando-se apenas qualitativamente, ou seja, de maneira relativa ao traço padrão, a diminuição do comportamento frágil nos concretos de alto desempenho com adição de borracha, ocorreu indiferentemente para os concretos adicionados em 3% ou 5% de borracha. Assim devido as maiores resistências à compressão optou-se pelos concretos com 3% de borracha;
- Dentre os traços de concretos de alto desempenho adicionados de 3% de borracha, àquele constituído pela borracha média demonstrou superioridade

quanto sua trabalhabilidade, e ainda excelentes evoluções de resistência à compressão independentemente da porcentagem analisada, assim definiu-se então a escolha do traço modificado 3% com borracha média, o qual juntamente com o traço padrão será novamente elaborado, agora em maior volume, para uma investigação de maior abrangência.

Entretanto, uma vez que a dosagem do superplastificante utilizada já está próxima do ponto de saturação, é válido lembrar que dentre outras possibilidades ao combate da má trabalhabilidade, observado para alguns tipos de granulometria de borracha, poderiam ser experimentados ligeiros aumentos na relação água/aglomerante, como por exemplo sua elevação a 0,28 ou 0,30, contudo, verificando sempre o desempenho quanto à resistência à compressão.

Com o intuito único de simplificar a menção ao traço padrão e ao traço modificado 3% borracha média, no decorrer da apresentação dos demais resultados, estes serão referenciados como CAD e CAD com Borracha. Ressalta-se ainda a opção pela exposição novamente dos resultados dos ensaios no estado fresco e de resistência à compressão, referentes as betonadas subseqüentes, visando demonstrar a reprodutibilidade dos traços executados.

## ***5.2 AVALIAÇÃO DO CAD E CAD COM BORRACHA NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO***

### **5.2.1 Propriedades no Estado Fresco**

O abatimento do tronco de cone foi de 24cm para o CAD, e de 20cm para o CAD com Borracha. Assim tem-se atendidos os anseios quanto ao bom comportamento reológico do concreto fresco.

Os valores de ar incorporados encontrados, tanto para o CAD quanto para o CAD com Borracha, foram iguais a 1,5%.

Os valores de massa específica no estado fresco foram de 2547Kg/m<sup>3</sup> para o CAD e de 2498Kg/m<sup>3</sup> para o CAD com Borracha. A redução de apenas 2% da massa específica do

CAD com Borracha, em relação ao CAD, esta ligada ao relativamente pequeno teor de borracha empregada, somente 3% do metro cúbico.

Os valores de temperatura dos concretos de alto desempenho após o amassamento resultaram em 28,2°C e 27,8°C, respectivamente, para o CAD e para o CAD com Borracha.

Ainda quanto à performance no estado fresco, o aspecto de teor de argamassa e a facilidade de acabamento da superfície, tanto para o CAD quanto para o CAD com Borracha, mostraram-se em níveis ótimos.

### 5.2.2 Resistência à Compressão

A evolução da resistência à compressão para o CAD e do CAD com Borracha pode ser visualizada na Figura 63, onde cada valor representa a média de três corpos-de-prova.

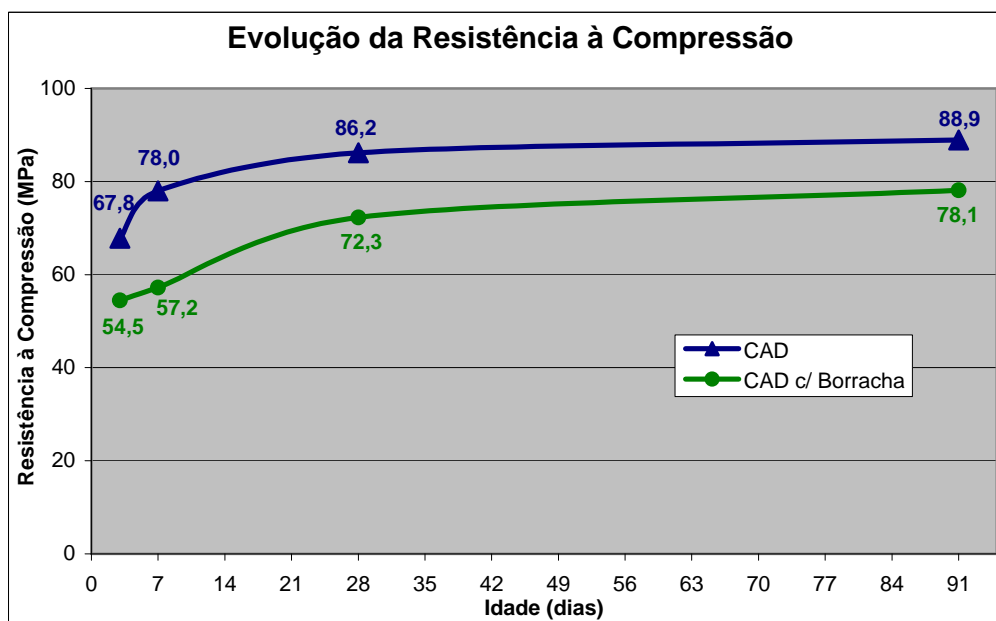


Figura 63: Evolução da resistência à compressão do CAD e do CAD com Borracha

Analisando a Figura 63, verifica-se a superioridade dos valores de resistência à compressão do CAD em relação ao CAD com Borracha, contudo, destaca-se a ascendente taxa de aumento de resistência à compressão do CAD com Borracha, contribuindo assim para reduzir o gradiente entre os valores de resistência à compressão, destes concretos de alto desempenho, para 12%, aos 91 dias de idade.

Na seqüência apresentam-se, corpos-de-prova de CAD e do CAD com Borracha, após serem submetidos a ensaio de resistência à compressão, respectivamente ,na Figura 64 e na Figura 65 aos 3 dias, na Figura 66 e Figura 67 aos 7 dias, na Figura 68 e Figura 69 aos 28 dias e na Figura 70 e Figura 71 aos 91 dias de idade. Observando estas figuras tem-se uma idéia do comportamento característico de ruptura apresentado pelo CAD e pelo CAD com Borracha.



Figura 64: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (3 dias)



Figura 65: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (3 dias)





Figura 66: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (7 dias)



Figura 67: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (7 dias)



Figura 68: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (28 dias)



Figura 69: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (28 dias)



Figura 70: Corpo-de-prova de CAD rompido à compressão (91 dias)



Figura 71: Corpo-de-prova de CAD com Borracha rompido à compressão (91 dias)

De maneira geral ao observar a coletânea de figuras referentes às rupturas apresentadas pelo CAD e CAD com Borracha (Figura 64 a Figura 71), ressalta-se a configuração dos corpos-de-prova de CAD com Borracha, que apesar de rompidos à

tensões menos elevadas tiveram uma maior dilatação volumétrica e mantiveram quase toda sua integridade, como se estivessem sob efeito de “confinamento”.

A ruptura do CAD com Borracha é comparável à ruptura de corpos-de-prova de concretos convencionais, os quais apesar de terem menores capacidades de resistência à compressão não apresentam ruptura frágil como os concretos de alto desempenho, a qual pode ser notada também nos corpos-de-prova de CAD rompidos, ora expostos.

Em especial cita-se o contraste entre o corpo-de-prova de CAD, apresentado na Figura 66, o qual praticamente “explodiu” fragmentando-se em “n” pedaços, e o corpo-de-prova de CAD com Borracha, constante da Figura 71, o qual preservou em parte seu contorno inicial; lembrando ainda que apesar de serem ensaiados em diferentes idades apresentaram um mesmo patamar de resistência à compressão, cerca de 78MPa; este comportamento indica uma maior capacidade de absorção de energia por parte do CAD com Borracha.

### 5.2.3 Módulo de Elasticidade

Observa-se na Figura 72, a evolução do módulo de elasticidade do CAD e do CAD com Borracha, onde cada valor apontado é resultado da média de três corpos-de-prova.

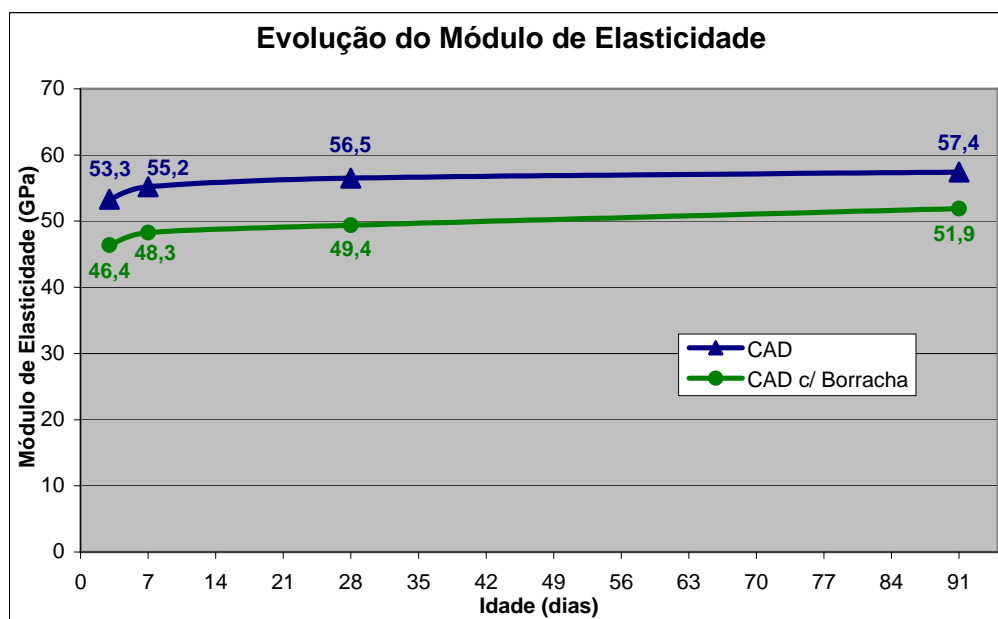


Figura 72: Módulo de elasticidade do CAD e do CAD com Borracha

Analisando os resultados expostos na Figura 72, verifica-se que a taxa de crescimento do módulo de elasticidade foi da mesma ordem tanto para o CAD quanto para o CAD com Borracha, ao longo das idades avaliadas, onde os valores obtidos para o CAD com borracha foram reduzidos da ordem de 12%.

#### 5.2.4 Módulo Unitário

Na Figura 73 encontram-se os módulos unitário do CAD e do CAD com Borracha, sendo tal grandeza a relação entre os módulos de elasticidade e as respectivas resistências à compressão.

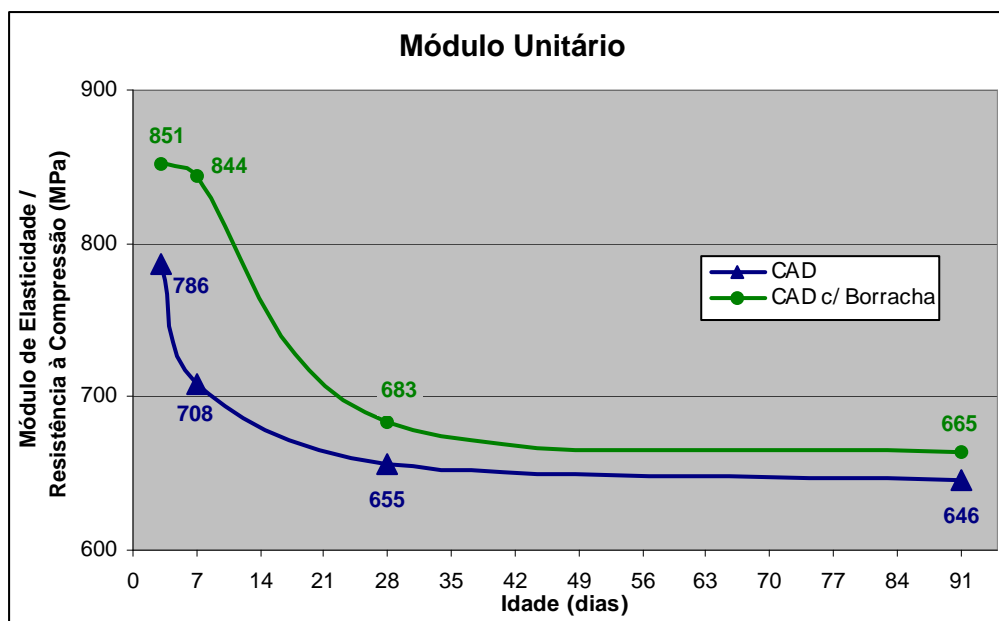


Figura 73: Módulo unitário do CAD e do CAD com Borracha

Através da análise da Figura 73 é possível constatar a superioridade dos valores dos módulos unitário para o CAD com Borracha, em relação ao CAD, o que demonstra a maior capacidade de absorção de energia, ou seja tenacidade, do CAD com Borracha.

Analisando a idade de 7 dias, onde se nota o maior contraste entre os valores de módulo unitário do CAD com Borracha em relação do CAD, sua superioridade chega a 20%.

### 5.2.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados de tração por compressão diametral do CAD e do CAD com Borracha são apresentados na Figura 74, onde cada valor condiz com a média de três corpos-de-prova.

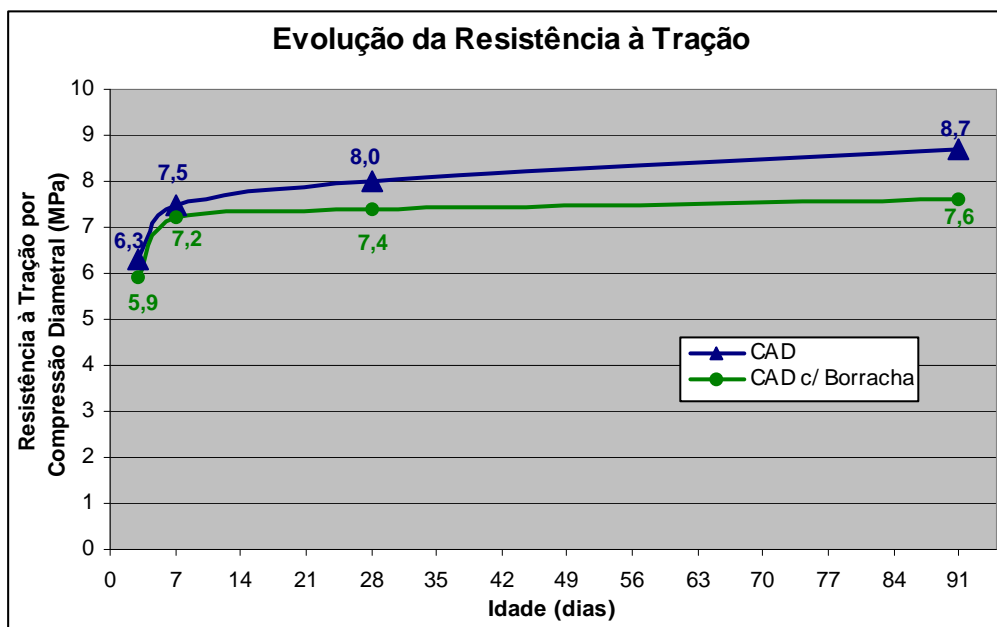


Figura 74: Resistência à tração do CAD e do CAD com Borracha

Analisando a Figura 74, nota-se que a resistência à tração do CAD em relação a sua resistência à compressão é sempre inferior aos 10%, entretanto para o CAD com Borracha esta relação varia de 9,7% a 12,6%. Ressalta-se ainda, que nas primeiras idades, as quais por muitas vezes são as mais críticas, a diferença entre os valores de resistência a tração do CAD com Borracha e de CAD gira em torno de 6,3% a 4%.

Os corpos-de-prova de CAD, como é comum após o término do ensaio de tração por compressão axial, apresentaram-se repartidos ao meio, como ilustra a Figura 75. Contudo, os corpos-de-prova de CAD com Borracha, ao fim do ensaio, apresentaram uma fissuração reduzida, sendo necessário o uso de uma cunha e martelo para propiciar sua efetiva divisão, como pode ser notado na Figura 76.



Figura 75: Corpo-de-prova de CAD após o ensaio de tração



Figura 76: Corpo-de-prova de CAD com Borracha após o ensaio de tração

Na seqüência destaca-se na Figura 77, que apesar de uma considerável deformação ter sido imposta ao corpo-de-prova de CAD com Borracha, este ainda não está totalmente separado. Li et al (2004, p.308) ao observar este comportamento, em concretos convencionais com adição de resíduos de borracha de pneus e resistência à compressão inferior a 25 MPa, já destaca o grande potencial destes na elaboração de estruturas de

absorção de impactos, barreiras sonoras, muros de contenção e pavimentos estruturais, desde que a resistência seja apropriada, questão a qual está sendo investigada no CAD com Borracha ora estudado.



Figura 77: Detalhe do procedimento de abertura do corpo-de-prova de CAD com Borracha

Então a Figura 78, mostra em detalhe os resíduos de borracha de pneu que efetivamente estavam contribuindo para a integridade do corpo-de-prova, onde estão demarcados alguns dos resíduos os quais foram rompidos ou arrancados.



Figura 78: Corpo-de-prova de CAD com Borracha após abertura

### 5.2.6 Resistência ao Impacto

Os resultados obtidos de resistência ao impacto do CAD e do CAD com Borracha podem ser visualizados na Tabela 17, onde os valores apresentados são provenientes da média de quatro corpos-de-prova.



Tabela 17: Análise dos resultados de resistência ao impacto

Análise dos Resultados de Resistência ao Impacto do CAD e do CAD com Borracha										
Traço	Idade (dias)	1º Fissura Observada				Última Fissura Observada				Observações
		Impacto N°	Altura de queda (m)	Resistência ao Impacto (J)	Largura (mm)	Impacto N°	Altura de queda (m)	Somatório de energia (J)	Largura (mm)	
CAD	7	15	1,60	66,2	0,1	16	1,70	74,5	2	Seccionamento total
CAD c/ Borracha	7	17	1,80	83,3	0,1	21	2,20	123,5	0,5	Não seccionou
CAD	28	17	1,80	83,3	0,1	18	1,9	92,6	1	Seccionamento total
CAD c/ Borracha	28	18	1,90	92,6	0,1	21	2,20	123,5	0,5	Não seccionou

Analisando os dados expostos na Tabela 17, verifica-se que foram necessários menor número de impactos, e conseqüentemente menor energia, para a observação da primeira fissura do CAD, ilustrada na Figura 79, em relação à fissura inicial do CAD com Borracha, apresentada na Figura 80.



Figura 79: 1º fissura (0,1mm) em uma das placas de CAD

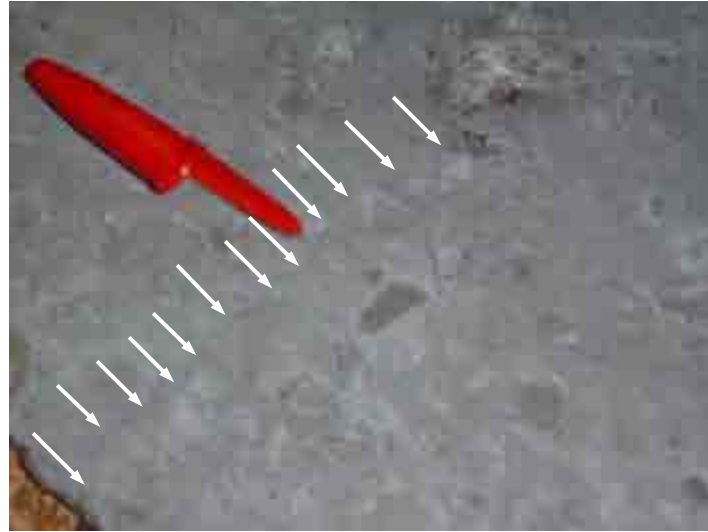


Figura 80: 1ª fissura (0,1mm) em uma das placas de CAD com Borracha

Destaca-se ainda que a resistência ao impacto, energia necessária para obter-se a primeira fissura, no caso do CAD com Borracha foi de 11% a 26% maior, variando de acordo com a idade do ensaio, do que àquelas necessárias aos corpos-de-prova de CAD.

Noutro enfoque, destaca-se ainda que ao examinar a evolução da primeira fissura até a última observada pôde-se constatar em todos os casos que:

- para o CAD à aplicação de um único impacto subsequente à primeira fissura determinou o aumento da abertura desta à no mínimo 1mm, como pode ser visualizado na Figura 81, e resultou ainda no seccionamento total do corpo-de-prova, apresentado na Figura 82;



Figura 81: Última fissura observada (1mm) em uma das placas de CAD



Figura 82: Placa de CAD ao fim do ensaio

- para o CAD com Borracha à aplicação de alguns impactos subseqüentes à primeira fissura, até o limite estipulado pela altura de 2,20m, resultou tão somente no aumento da abertura da fissura à no máximo 0,5mm, representada na Figura 83, e além disso não acarretou no seccionamento do corpo-de-prova, o qual pode ser visualizado na Figura 84 e Figura 85;



Figura 83: Última fissura observada (0,5mm) em uma das placas de CAD com Borracha



Figura 84: Placa de CAD com Borracha ao fim do ensaio, face superior



Figura 85: Placa de CAD com Borracha ao fim do ensaio, face inferior

Ressalta-se que o somatório de energia final aplicado aos corpos-de-prova de CAD com Borracha, o qual foi incapaz de promover a abertura de fissura superior a 0,5mm, foi de 33% a 66% maior, de acordo com a idade do ensaio, em relação aos somatórios de energia necessários ao seccionamento dos corpos-de-prova do CAD.

Na Figura 86, observa-se em detalhe o quadro de fissuração induzida manualmente no corpo-de-prova de CAD com Borracha, onde são destacados alguns dos resíduos que ainda estavam contribuindo para a integridade do corpo-de-prova.



Figura 86: Placa de CAD com Borracha sendo separado manualmente

Uma observação semelhante a está foi ressaltada anteriormente por, Raghavan, Huynh e Ferraris (1998, p.1748) que ao ensaiarem corpos-de-prova de argamassa com adição de resíduos de borracha de pneu à flexão relatam: “é possível verificar que após a falha da matriz da argamassa os pedaços de borracha suportam a fissuração e previnem a falha catastrófica do corpo-de-prova”.

### 5.2.7 Absorção de Água por Imersão

Os resultados da absorção de água por imersão dos concretos de alto desempenho deram origem a Figura 87, onde cada valor apontado é a média de três corpos-de-prova.

É válido lembrar que a absorção de um concreto, segundo Neville (1997b, p.486), não pode ser uma medida de qualidade do concreto, entretanto ele ressalta que concretos de boa qualidade têm absorção bastante inferior a 10%.

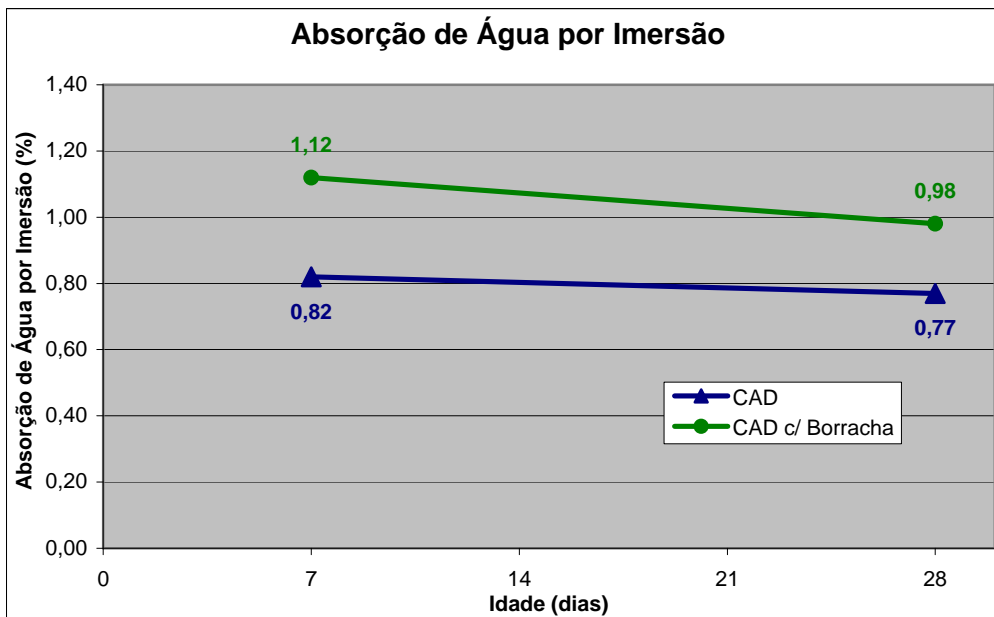





Figura 87: Absorção de água por imersão do CAD e do CAD com Borracha

Observando-se a Figura 87, nota-se que o CAD apresentou porcentagens de absorção menores que o CAD com Borracha, entretanto os resultados obtidos para estes dois concretos estão em níveis bastante reduzidos.

### 5.2.8 Resistência à Abrasão

De modo geral a avaliação da resistência à abrasão dos concretos não ocorre de forma corriqueira, e quando é abordada poderá ser baseada em processos de variada capacidade de abrasão, assim visando explicitar a ordem de grandeza da abrasão do ensaio utilizado e apresentar parâmetros para a interpretação dos resultados obtidos, são apresentados no Quadro 1, alguns resultados obtidos pelo LCEC ao longo dos anos de realização deste ensaio.

Quadro 1: Resultados de resistência à abrasão  
Fontes: LCEC (1986, p.1-13); LCEC (1990, p.1-48)

Descrição	Resistência à Compressão – 28 dias (MPa)	Desgaste a Abrasão ao Fim das 71 horas (%)	Corpo-de-prova ao Fim das 71 horas de Ensaio
Concreto Convencional	32,0	16,20	
Concreto de Alta Resistência	64,6	3,19	
Concreto de Alta Resistência c/ 10 % de Sílica Ativa	74,2	2,48	

A seguir na Figura 88, são apresentados os resultados de resistência à abrasão do CAD e do CAD com Borracha, através das porcentagens de perda de massa, devido ao desgaste por abrasão, obtidas ao longo do período de ensaio, estes valores são referentes a um único corpo-de-prova de cada concreto de alto desempenho ensaiado.

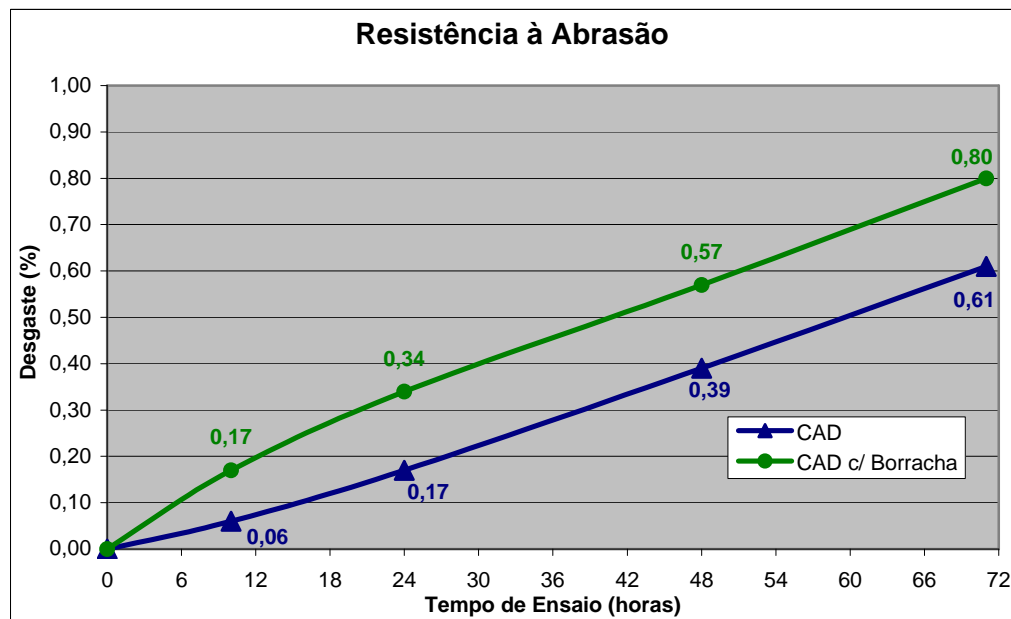


Figura 88: Resistência à abrasão do CAD e do CAD com Borracha

Os corpos-de-prova de CAD e CAD com Borracha ao fim das 71 horas de ensaio de abrasão são apresentados respectivamente na Figura 89 e Figura 90.



Figura 89: Corpo-de-prova de CAD ao fim das 71 horas de ensaio de abrasão





Figura 90: Corpo-de-prova de CAD com Borracha ao fim das 71 horas de ensaio de abrasão

Baseando-se nos parâmetros citados anteriormente, Quadro 1, pode-se observar, tanto através do aspecto visual dos corpos-de-prova ao fim do ensaio quanto com base nas porcentagens de desgaste final obtidas, 0,61% para o CAD e 0,80% para o CAD com Borracha, que estes concretos demonstraram excelente potencial de durabilidade quando submetidos à abrasão.

Em especial observando o concreto de alta resistência com 10% de sílica ativa, exposto no Quadro 1, o qual possui o melhor índice de desgaste por abrasão do referido quadro e mesma faixa de resistência à compressão do CAD com Borracha, ora apresentado, destaca-se a relevante superioridade da resistência à abrasão do CAD com Borracha, onde seu desgaste foi três vezes menor em relação ao concreto de alta resistência citado.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade da utilização de resíduos de borracha de pneu na produção de concretos de alto desempenho, almejando-se elevados níveis de resistência à compressão, e abordando ainda suas performances quanto à trabalhabilidade, teor de ar incorporado, massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, tenacidade, resistência à tração por compressão diametral, resistência ao impacto, absorção de água por imersão e resistência à abrasão. Com base nas performances obtidas visou-se contribuir ao desenvolvimento sustentável e ao aprimoramento do concreto de alto desempenho.

As conclusões expostas, a seguir, mostram-se embasadas no programa experimental realizado. Contudo, tais conclusões não abordam as inúmeras possibilidades de combinações de tipos, quantidades e qualidades de materiais, e técnicas de execução. Assim se faz necessário que mais pesquisas venham ser desenvolvidas com o intuito de enriquecer os conhecimentos sobre este “novo material”.

### 6.1 CONCLUSÕES

A escolha do cimento e superplastificante com base na fluidez da sua pasta demonstrou ótima correlação com a trabalhabilidade obtida na composição padrão de CAD.

As correlações propostas pelo método de dosagem utilizado, entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão não estão devidamente calibradas aos materiais ora empregados, contudo a adoção da relação água/aglomerante 0,25, ao invés de 0,27, se fez suficiente à produção de CAD com resistência à compressão, aos 28 dias, no patamar dos 80 MPa para o traço padrão (referência).

A implementação de resíduos de borracha de pneu resulta na diminuição da resistência à compressão do CAD. Entretanto, os valores de resistência à compressão para concretos de alto desempenho adicionados de baixas porcentagens destes resíduos mantiveram-se em significativos patamares dentre os concretos de alto desempenho, variando de 50MPa a 70MPa;

Tendo como base os valores de resistência à compressão, obtidos para os concretos de alto desempenho com 3% e 5% de adição de resíduos de borracha de pneu, em linhas

gerais 50MPa e 70MPa, respectivamente, a implementação máxima destes resíduos na produção de CAD estaria por volta de 8% do volume de um metro cúbico, pois além desta porcentagem a faixa de valores de resistência à compressão mínima para CAD seria de difícil obtenção.

Quanto a porcentagem de redução de resistência à compressão observada no traço de CAD com adição de 3% de borracha, está foi de apenas 12% aos 91 dias de idade.

Com a elevação da porcentagem de resíduos de borracha de pneu no CAD, de 3% para 5%, nota-se a influência da granulometria do resíduo de borracha empregado, nos valores de resistência à compressão. Sendo que, entre o CAD com adição de 3% de borracha média e o CAD com adição de 3% de borracha fina, aos 91 dias, observou-se uma redução de 2,1% nos valores de resistência à compressão, no entanto para os respectivos CAD com adição de 5% de borracha a redução foi de 9,4%.

A utilização de resíduos de borracha de pneu pertencentes a uma faixa granulométrica mais extensa, como àquela utilizada no traço especial 3% borracha total (todo material passante na peneira 6,3mm até o retido no fundo do peneirador), ao invés de granulometrias mais seletas, também se mostrou viável à produção de CAD, resultando em valor de resistência à compressão superior a 60MPa, aos 28 dias, e assim amplia-se a possibilidade de um maior aproveitamento percentual destes resíduos, uma vez que a granulometria em questão representa 98,1% do total do resíduo de borracha estudado.

A trabalhabilidade de concretos de alto desempenho foi afetada devido à implementação de resíduos de borracha de pneu, e ainda sofreu significativa influência quanto a granulometria deste resíduo. Assim em concretos de alto desempenho os resíduos de formato granular, designados neste estudo de borracha fina, resultaram numa trabalhabilidade significativamente menor, alterando o abatimento no tronco de cone de 24cm para 11cm, então neste enfoque deve-se evitar o seu uso, principalmente em separado.

A diminuição da massa específica do CAD devido à adição de resíduos de borracha de pneu, nos teores estudados, não se fez representativa.

Os resíduos de borracha de pneu quando adicionados no CAD, não acarretaram na alteração do teor de ar incorporado.

Os valores de módulo de elasticidade dos concretos de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu foram reduzidos da ordem de 12% àqueles obtidos para o CAD, no entanto podem ser considerados elevados, tendo variado de 46,4GPa a 51,9GPa, de acordo com as idades em que foram avaliados.

O comportamento de ruptura do CAD com adição de resíduos de borracha de pneu é diferenciado, no que diz respeito a fragilidade apresentada pelos concretos de alto desempenho de maneira geral. Com base na superioridade dos valores do módulo unitário para o CAD com Borracha, até 20% maior, em relação ao CAD, demonstrou-se a maior tenacidade do CAD com Borracha.

A resistência à tração do CAD com resíduos de borracha de pneu, em relação a sua resistência à compressão variou de 9,7% a 12,6%, no entanto a resistência à tração do CAD, em relação a sua resistência à compressão, foi sempre inferior aos 10%.

Baseando-se no parâmetro, exposto por Neville (1997b, p.486), de que concretos de boa qualidade têm absorção bastante inferior a 10% é possível afirmar que os concretos de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu apresentaram índices de absorção de água por imersão significativamente baixos, perfazendo 0,98% aos 28 dias de idade.

Comparando-se a porcentagem de desgaste final do CAD com Borracha, quando submetidos ao ensaio de abrasão, 0,80%, com os resultados expostos no Quadro 1, em especial os 2,48% referentes a um concreto de alta resistência, ressalta-se a elevada resistência à abrasão dos concretos de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu, o que remete à sua elevada durabilidade.

De modo geral, analisando o comportamento de ruptura dos corpos-de-prova de CAD com adição de resíduos de borracha de pneu, em relação àqueles de CAD, quando submetidos à compressão, tração ou à impacto, notam-se significativas alterações. Estas alterações demonstram a efetiva participação física dos resíduos de borracha de pneu na contenção da falha global dos corpos-de-prova. Onde também se faz notório o aumento da capacidade de absorção de energia, devido à adição de borracha de pneu no CAD.

Enfim, todas as propriedades mecânicas e àqueles relacionadas com a durabilidade, as quais foram avaliadas atestam a viabilidade da produção de concretos de alto desempenho com a adição de resíduos de borracha de pneu e assim concomitantemente

desencadeia-se mais uma possibilidade real de contribuir à preservação do meio ambiente através do aproveitamento deste resíduo.

## ***6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS***

Devida à escassez de pesquisas que enfoquem a adição de resíduos de borracha de pneu, em especial, em concretos de alto desempenho, se faz imprescindível tal abordagem para enumerar uma maior quantidade de dados que possam complementar os dados obtidos.

Seriam de grande valia a quantificação da tenacidade dos concretos de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu, através da realização de ensaios com aplicação de carga e deformação controlada.

Dentre outras investigações necessárias é imperativo a abordagem das propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de borracha de pneu à longo prazo. Neste enfoque deveriam ser realizados ensaios que remetessem à sua durabilidade, quando submetido a, por exemplo, ataque de sulfato e cloretos.

O estudo de concretos de alto desempenho com adição de borracha de pneu com patamares médios de resistência à compressão de 50Mpa, dentre outras finalidades de aplicação, podem ser bastante interessantes na elaboração de estruturas de absorção de impactos e pavimentos.

Verificação da possibilidade de uso de outros aditivos minerais na elaboração de concretos de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu.

Dentre inúmeras sugestões de contribuição ao meio científico, finaliza-se este texto ressaltando a necessidade da reunião e discussão de diversos procedimentos práticos que visam avaliar os concretos, de maneira geral, quanto à sua resistência ao impacto, para a árdua missão da elaboração de uma norma brasileira.

## 7. BIBLIOGRAFIA

### 7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEME. Acúmulo de Pneus inservíveis / ADEME – giles meriodeau. Disponível em: < <http://www.ademe.fr/.../dechets/dechet.asp?ID=17> >. Acesso em: 21 set. 2005.

ADHIKARI, B.; DE, D.; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in polymer science*, v.25, p.908-948, 2000.

AITCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. 1ºed. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

AKASAKI, J. L. et al. Avaliação da resistência à flexão do concreto com borracha de pneu com relação ao concreto convencional. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 45º, 2003, Vitória. *Anais...* Vitória: Ibracon, 2003. CD-ROM, Trabalho nº VI-004.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELIK, T. Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression. *Materials Letters*, v.57, p.828-833, 2002.

AL-AKHRAS, N. M.; SMADI, M. M. Properties of tire rubber ash mortar. In: *TRB Annual Meeting*, 2003. CD-ROM, Paper nº 03-2660.

ALBUQUERQUE, A. C. et al. Concreto com borracha de pneu: uma revisão bibliográfica. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 44º, 2002, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Ibracon, 2002. CD-ROM.

ALMEIDA, I. R. Concretos de alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1º Ed. São Paulo: IBRACON, 2005. v.2, p.1159-1193.

AMARAL FILHO, E. M. Concreto de alta resistência – 1º parte. *Revista IBRACON*, n.4, p.40-49, Jun/1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI Committee 116 Cement and Concrete Terminology. Publication ACI 116R-00, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI Committee 363 State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. Publication ACI 363R-92, 1992.

ANDRADE, W. P. et al. *Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: ABCP, 1999. (CD-ROM)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 1994a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7217: agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1993a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos; procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1994b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7251: agregado em estado solto – Determinação da Massa Unitária*. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7681: calda de cimento para injeção*. Rio de Janeiro: ABNT, 1983a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7682: calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez; procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1983b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva de tensão-deformação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9454*: Determinação da resistência ao impacto de piso cerâmico. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. (norma extinta).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778*: argamassa de concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica; especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9833*: concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 1987b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11578*: cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12821*: preparação de concreto em laboratório; especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1993b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13956*: sílica ativa para uso em cimento Portland, concretos, argamassas e pasta de cimento Portland; Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23*: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 47*: determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico; procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67*: concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone; procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

BAWEJA, D. Brains versus brawn?, 2002. Disponível em: < <http://www.infolink.com.au/articles/3a/0c009e3a.asp> >. Acesso em: 04 Ago. 2004.



BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; QUÉNEUDEK, M. Transport of fluids in cement–rubber composites. *Cement & Concrete Composites*, v.26, p.21-29, 2004.

BENAZZOUK, A. et al. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement–rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v.25, p.711-720, 2003.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, v.17, p.97-103, 2003.

BIGNOZZI, M. C.; SACCANI, A.; SANDROLINI, F. New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microstructure and mechanical properties. *Composites, Part A: applied science and manufacturing*, v. part A 31, p.97-106, 2000.

BIGNOZZI, M. C.; SANDROLINI, F. Recycling tire rubber in building materials. In: *International Conference Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities*, 2004, Inglaterra. Anais... Inglaterra: Kingston, 2004.

BONNET, S. Effet de l'incorporation des granulats caoutchouc sur la résistance à la fissuration des mortiers. In: *XXI Rencontres universitaires de genie civil*, p 59-70, 2003.

BRAZILTIRES. Esquema de um pneu em corte / M8090 CREEPY CRAWLER. Disponível em: < <http://www.braziltires.com.br/pneustec.html> >. Acesso em: 21 set. 2005.

CÂMARA, E.; PINTO, R. C. A. Avaliação da ductilidade do concreto confinado com barras helicoidais. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: IBRACON, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0178.

CAMPOS, F. G. V. CAD: mais que durável, um grande negócio. *Revista Ibracon*, v24, p.27-34, Ago-Fev 2000.

CARNEIRO, A. M. P. et al. Análise das curvas de resistência à compressão de concretos produzidos com agregados com curvas de distribuição granulométricas otimizada. In:

*Congresso Brasileiro do Concreto, 45º, 2003, Vitória. Anais...* Vitória: Ibracon, 2003. CD-ROM, Trabalho III003.

CEMPRE. Fichas técnicas > pneus. Disponível em: < [http://www.cempre.org.br/fichas\\_tecnicas\\_pneus.php](http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas_pneus.php) >. Acesso em: 21 set. 2005.

CHEN, F.; QIAN, J. Studies of the thermal degradation of waste rubber. *Waste management*, v.23, p.463-467, 2003.

COLLINS, K. J. et al. Environmental impact assessment of a scrap tyre artificial reef. *ICES Journal of marine science*, v.59, p. S243-S249, 2002.

CONSIGLIO DELL UNIONE EUROPEA. *Direttiva del Consiglio 99/31/CE*, del 26 aprile 1999, relativa alle discariche di rifiuti.

DAL MOLIN, P. M. *Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica*, São Paulo, 1995. 286 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

De MARCO, F. F.; REGINATTO, G. M.; JACOSKI, C. A. Estudo comparativo entre capeamento de neoprene, enxofre e pasta de cimento para corpos-de-prova cilíndricos de concreto. In: *Congresso Brasileiro do Concreto, 45º, 2003, Vitória. Anais...* Vitória: Ibracon, 2003. CD-ROM, Trabalho nº I-037.

DESCARTES, R. *Discours de la méthode de bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences; plus la dioptrique, les météores et la géométrie, qui sont des essais de cette méthode*. Leyden, 1637. Existem várias traduções em português, o texto citado foi extraído de NETO, SCARMINIO e BRUNS (2002)

DJANIKIAN, J. G. TRINDADE, O. A. Medida do módulo de elasticidade do concreto “in situ”. In: *Congresso Brasileiro do Concreto, 43º, 2001, Foz do Iguaçu. Anais...* Foz do Iguaçu: Ibracon, 2001.

FATTUHI, N. I.; CLARK, L.A. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials*, v.10, p.229-236, 1996.

FIORITI, C. F. *Avaliação de Compósitos de Concreto com Resíduos de Borracha na Produção de Blocos para Alvenaria*. Ilha Solteira, 2002. 134 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

FUKUMORI, K. et al. Recycling technology of tire rubber. *JSAE Review – Society of automotives engineers of Japan*, v.23, p.259-264, 2002.

GUINEA, G. V. et al. The effect of the bond between the matrix and the aggregates on cracking and fracture parameters of concrete. *Cement Concrete and Research*, v.32, p.1961-1970, 2002.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ÖZTURAN, T. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*. v 34, p 2309-2317, 2004.

GUTIERREZ, P. A.; CANOVAS, M. F. The modulus of high performance concrete. *Materials and Structures*, v.28, p.559-568, 1995.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P.R.L. Recorde mundial em concreto de alto desempenho colorido. In: *Congresso Brasileiro do Concreto, 45º*, 2003, Vitória. *Anais...* Vitória: Ibracon, 2003. CD-ROM, Trabalho III-031.

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. 1ºed. São Paulo: PINI, 1993. 349 p.

HUGHES, B. P.; AL-DAFIRY H. Impact energy absorption at contact zone and supports of reinforced plain and fibrous concrete beams. *Construction and Building Materials*, v.9, p.239-244, 1995.

HUYNH, H.; RAGHAVAN, D. Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments. *Advn cem bas mat*, v.6, p.138-143, 1997.

ISAIA, G. C. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: \_\_\_\_.(Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1º Ed. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1, p.1-44.

JAMET, D. et al. Toughness of fiber-reinforced high-strength concrete from notched beam tests. In: STEVENS, D.J. et al. *Testing of fiber reinforced concrete*. SP-155, American Concrete Institute, Detroit, USA, 1995. p.23-39.

JANG, J. W. et al. Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea. *Resources, conservation and recycling*, v.22, p.1-14, 1998.

KALINTZIS, C. A. A. *Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho*. São Paulo, 2000. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KASZYNSKA, M. Early age properties of high-strength/high-performance concrete. *Cement & Concrete Composites*, v.24, p.253-261, 2002.

KIDDE BRASIL. Incêndio em áreas com acúmulo de pneus / Incêndio em pneus. Disponível em: < [http://www.resmat.com.br/affa\\_f](http://www.resmat.com.br/affa_f) >. Acesso em: 21 set. 2005.

LIBÓRIO, J. Concreto de alto desempenho – uma tecnologia simples para estruturas duráveis. *Revista Concreto*, p.78-87, Jun/2004a.

LIBÓRIO, J. Palestra: Concreto. In: *Workshop – Concreto: Durabilidade, Qualidade e Novas Tecnologias*. Ilha Solteira: UNESP, 2004b. (CD ROM).

LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL (LCEC). *Aproveitamento múltiplo de três irmãos avaliação da resistência a abrasão de superfícies de concreto submersas*. Ilha Solteira, 1983. n. C-38/83. (relatório não publicado).

LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL (LCEC). *Aproveitamento múltiplo de três irmãos avaliação da resistência a abrasão de superfícies de concreto submersas – complementação do relatório C-38/83 final*. Ilha Solteira, 1986. n. LEC-CM-08/86. (relatório não publicado).

LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL (LCEC). *Concretos e argamassas de alta resistência feitos com microsilica*. Ilha Solteira, 1990. n. LEC-CM-07/90. (relatório não publicado).

LI, G. et al. Development of waste tire modified concrete. *Composites, Part B: engineering*, v.x, p.1-7, 2004.

LIMA JUNIOR, H. C.; GIONGO, J. S. Aumento da ductilidade dos pilares com concretos de alta resistência por meio de adição de fibras metálicas . In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: IBRACON, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0363.

LYDON, F. D.; IACOVU, M. Some factors affecting the dynamic modulus of elasticity of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, v.25, p.1246-1256, 1995.

MARTINS, I. R. F. et al. Otimização dos materiais para a composição do concreto de alto desempenho. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: IBRACON, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0164.

MARTINS, I. R. F.; AKASAKI, J. L. Study of compressive strength of high performance concrete added with tire rubber. In: *Materiales Compuestos 05*, 2005a, Valencia. *Anais...* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2005a. CD-ROM, Trabalho 12.5(93).

MARTINS, I. R. F.; AKASAKI, J. L. Avaliação da adição de fibras de borracha de pneus no comportamento do CAD. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 47°, 2005b, Recife. *Anais...* Recife: IBRACON, 2005b. CD-ROM, Trabalho 47CBC0209.

MENEGHINI, E. C. A. *Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha*, Campinas, 2003. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1°ed. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MITUTOYO. Máquina retificadora / Linha do tempo. Disponível em: < <http://www.mitutoyo.com.br/perfil/linha.html> >. Acesso em: 21 set. 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Resolução CONAMA N° 258*, de 26 de agosto de 1999. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama> >. Acesso em: 02 fev. 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Resolução CONAMA N° 301*, de 21 de março de 2002. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama> >. Acesso em: 02 fev. 2005.

NEVILLE, A. M. Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. *ACI Materials Journal*, p.71-74, January-February 1997a.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997b. 828p.

OLIVARES, F.H.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 34, p. 109-117, 2004.

OLIVARES, F. H. et al. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and Concrete Research*, v.32, p. 1587-1596, 2002.

OLUOKUN, F. A; BURDETTE, E. G.; DEATHERAGE, J. H. Splitting tensile and compressive strength relationship at early ages. *ACI Materials Journal*, p.115-121, March-April 1991.

OWEN, K. C. Scrap Tires: A pricing strategy for a recycling industry. In: \_\_\_\_\_. *Corporate environmental strategy*. 1° Ed. EUA, 1996. Executive summary, V5N2, p.42-50.

PEREIRA NETO, P. M. *O efeito do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microssílica*, São Paulo, 1994. 173 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PIERCE, C. E.; BLACKWELL M. C. Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill. *Waste management*, v.23, p.197-208, 2003.

PINHEIRO, E. G. *Modelos numéricos aplicados à vulcanização de pneus*, São Paulo, 2001. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RAGHAVAN, D.; HUYNH, H; FERRARIS, C. F. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementations composite. *Journal of materials science*, v.33, p.1745-1752, 1998.

RAMACHANDRAN, V.S.; MALHOTRA, V.M. Chemical admixtures – Recent Developments. In: RAMACHANDRAN, V.S. (Ed.). *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. 2ªed. Park Ridge: Noyes Publications, 1995. p.137-177.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C.; MORAIS, J. A. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v.25, p.77-82, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura*. São Carlos, 2003. 211 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SEGRE, N.; JOEKES, I. Use of tire rubber particles as addition cement paste. *Cement Concrete and Research*, v.30, p.1421-1425, 2000.

SEGRE, N.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix. *Journal of colloid and interface science*, v.248, p.521-523, 2002.

SHAH, S. P.; AHMAD, S. H. (Eds.). *High performance concretes and applications*. London: Edward Arnold, 1994. 403p.

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Waste management*, p.1-7, 2004.

SILVA, I. S. *Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento*. São Carlos, 1995. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, I. J. *Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura*. São Carlos, 2000. 278 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SIMPLICIO, M. A. S. Propriedades e características do concreto de alto desempenho. <  
<http://www.altodesempenho.faithweb.com>>. Acesso em: 14 Jul. 2004.

SUGIMOTO, L. Tese propõe metodologia para descarte de pneus. *Jornal da Unicamp*, v.244, p.11, 2004.

SUNTHONPAGASIT, N.; DUFFEY, M. R. Scrap tires to crumb rubber: feasibility analysis for processing facilities. *Resource conservation & recycling*, v.40, p.281-299, 2004.

TAHA, M. M. R.; DIEB, A. S. E.; WAHAB, M. M. A. Fracture toughness of concrete incorporating of tire particles. In: *ICPCM – A new era of building*, 2003, Cairo. Anais... Cairo: ICPCM, 2003.

TOPÇU, I. B.; AVCULAR, N. Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement Concrete and Research*, v. 27, p.1135-1139, 1997.

TOUTANJI, H. A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v.18, p.135-139, 1996.

TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J. L. Mechanical characterisation of cement based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and environment*, p.1-6, 2004.

VADAKAN, W. V.; CARINO, N. J.; MULLINGS, G. M. Effect of elastic modulus of capping material on measured strength of high-strength concrete cylinders. *Cement Concrete and Aggregates*, p.227-234, 1998.

WANG, Y.; WU, H. C.; LI, V. C. Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of materials in civil engineering*, v. 12, p.314-319, 2000.

WILLIAMS, P. T. Pyrolysis; an environmentally attractive recycling route for used tyres. In: *International Conference Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities*, 2004, Inglaterra. Anais... Inglaterra: Kingston, 2004.



YOON, Y. W.; CHEON, S. H.; KANG, D. S. Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands. *Geotextiles and geomembranes*, p.1-15, 2004.

ZHOU, F.P.; LYDON, F. D.; BARR, B. I. G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement Concrete and Research*, v. 25, p.177-186, 1995.

## **7.2 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

ALVES, M. F. *Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência*. Porto Alegre, 2000. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ALVES, R. R.; HELENE, P. Aditivos superfluidificantes. *Revista Ibracon*, p.31-37, Jun/Jul1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: projeto e execução de obras em concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215*: cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7219*: agregados – Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8953*: concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência; Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9202*: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (Número 325). Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9776*: agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 30*: agregado miúdo – Determinação da absorção. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 49*: agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 53*: agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 65*: cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 76*: cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. A influência da sílica ativa sobre a determinação do teor ótimo de aditivo superplastificante em pastas de cimento no estado fresco. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46º, 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: IBRACON, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0185.

BAALBAKI, W. et al. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, p.499-503, September-October 1991.

BAALBAKI, W.; AITCIN, P. C.; BALLIVY, G. On predicting modulus of elastic in high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, p.517-520, September-October 1992.

FERREIRA et. al. Avaliação da resistência à compressão, módulo de deformação e absorção de água de concretos contendo adições minerais. In: *Congresso Brasileiro do*

*Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: Ibracon, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0318.

FLITER, E. G. Qualidade da fundação e da estrutura garante uma maior durabilidade. *Revista Ibracon*, v23, p.06-16, Dez/1998-Jul1999.

FRANCINETE JUNIOR, P. et al. *Influência dos agregados graúdos do estado de Goiás no módulo de deformação do concreto*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, 2002.

GHAZAVI, M. Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber. *Geotechnical and geological engineering*, v.22, p.401-416, 2004.

Laboratório de Concreto FURNAS – FURNAS. *Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto 2002*. Goiânia, 2003 (relatório não publicado).

Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento. (LMABC) – SET-EESC-USP. *Concreto Colloquio 2003*, Escola de Engenharia de São Carlos – USP. CD ROM - (2003).

LI, G. et al. Waste tire fiber modified concrete. *Composites, part B: engineering*, v. pat B 35, p.305-312, 2004.

LOBO, A. V. L. et al. Verificação do desempenho de aditivos polifuncionais em concretos produzidos com cimento portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: IBRACON, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC01767.

MEEKS, K. W.; CARINO, N. J. *Curing of high-performance concrete: report of state-of-the-art*. NISTIR 6295, 1999.

MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação comparativa de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: IBRACON, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0469.

PEREIRA NETO, P. M.; DJANIKIAN, J. G. Concretos de alta resistência. *Revista Ibracon*, v.12, p.29-35, 1996.

PINTO, R. O.; GEYER, A. L. B.; LOPES, A. N. M. Aplicação dos métodos de dosagem específicos para concretos de alto desempenho (CAD). In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 45°, 2003, Vitória. *Anais...* Vitória: Ibracon, 2003.

ROJAS, A. M. T.; PINTO, R. C. A. Comparação entre critérios de normas internacionais aplicáveis ao concreto de alto desempenho. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46°, 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: Ibracon, 2004. CD-ROM, Trabalho CBC0015.

THOMAZ, E. Qualidade no Projeto e Execução de Edifícios. In: \_\_\_\_\_. *Tecnologia, gerenciamento e qualidade na construção*. 1° Ed. São Paulo: PINI, 2001. Capítulo III, p.140-154.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSO, S. E. O misterioso módulo de elasticidade. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 40°, 1998, Recife. *Anais...* Recife: Ibracon, 1998. CD-ROM, Trabalho n° 90.

VASCONCELOS, A. C. *Máquinas da natureza: um estudo da interface entre biologia e engenharia*. 1°ed. São Paulo: Ed. do Autor, 2004. 344p.

YANG, H. S. et al. Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresource technology*, p.1-5, 2004.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.