



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

“Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e
borracha de pneus em concreto de alto desempenho”

MICHELE BENITI BARBOSA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia, UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para a obtenção do Título de Mestre
em Engenharia Civil.

Ilha Solteira - SP
Agosto/2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

B238u Barbosa, Michele Beniti
Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho / Michele Beniti Barbosa. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006
147 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006

Orientador: Jorge Luís Akasaki
Bibliografia: p. 134-147

1. Concreto de alto desempenho. 2. Cinza de casca de arroz. 3. Borracha de pneu. 4. Materiais alternativos.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Utilização de Resíduos de Cinza de Casca de Arroz e Borracha de Pneu em Concreto de Alto Desempenho

AUTORA: MICHELE BENITI BARBOSA
ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

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

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

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

Prof. Dr. OSNY PELLEGRINO FERREIRA
Departamento de Arquiteutura e Urbanismo - Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/São Carlos

Data da realização: 28 de agosto de 2006.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha *Família*,
fonte inesgotável de apoio e motivação;
pessoas que dão à vida graça e sentido.

Agradecimentos

É com grande satisfação que vejo chegarem ao fim às atividades desta dissertação de mestrado, trabalho árduo, intenso, mas gratificante. Frente à versão completa deste trabalho não há como não pensar nas pessoas e instituições que contribuíram de diferentes maneiras nas várias etapas de sua evolução. O que, hoje, eu posso afirmar e garantir é que toda a colaboração recebida foi imprescindível para a conclusão deste trabalho. Talvez não consiga me expressar tão bem e não agradecer o suficiente perante toda a ajuda recebida ou até mesmo incorrer no erro de, por algum descuido, deixar de citar alguém.

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida, por sua presença de luz e mansidão em situações inesperadas e por bem guiar todos os meus passos.

À minha família, meus amados pais, Élio e Maria e adoráveis irmãos, Rilka e Michel, pela confiança, apoio e incentivo. As palavras são poucas para expressar o quanto eles fizeram e ainda fazem por mim.

Ao meu namorado, João, o meu imenso agradecimento pelo apoio, incentivo, amizade, carinho e compreensão, nesta longa jornada acadêmica.

Ao professor e orientador Dr. Jorge Luís Akasaki, pesquisador competente e de grande discernimento, sou grata pela sua atenção, amizade e orientação em todas as etapas do presente trabalho. Seu entusiasmo e determinação de que os obstáculos não eram intransponíveis constituíam forças que impulsionavam a pesquisa.

Ao professor Dr. Marco Antônio Morais Alcântara pela amizade, atenção e colaboração no processo de finalização deste trabalho.

A CAPES – Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior, pelo apoio financeiro.

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

A toda equipe de profissionais do Laboratório CESP de Engenharia Civil, o amigo Eng. Flávio Moreira Salles e aos técnicos e amigos: Michelan, Iverson, Lana, Chiquinho, Joaquim, Euclides, Branco, Serjão, Jorge, Bertolucci, Pascoalín, Milton (in memoriam) e Anderson.

Aos grandes amigos que aqui fiz que serão lembrados sempre com muito carinho: em especial, o Israel, pela convivência, ajuda, atenção e troca de experiências durante o trabalho; e também ao Everton, Marcos, Mauro, Renato, Eduardo, Maria Lidiane, Bruno, Ana Carolina, Adriana e Fabiana por toda atenção e colaboração.

Da mesma maneira aos técnicos e funcionários do DEC: Ronaldo, Gilson, Mario, Cavazzano, José Carlos, Sandra, Renatinho e Aldir.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS E QUADROS

RESUMO

ABSTRAT

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA	4
2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	5
2.1. HISTÓRICO	5
2.2. SELEÇÃO DOS MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DO CAD	7
2.2.1. Cimento	8
2.2.2. Aditivos Químicos.....	9
2.2.3. Aditivos Minerais	11
2.2.4. Agregados.....	12
2.2.5. Água	14
2.3. MICROESTRUTURA DO CAD	14
2.4. PROPRIEDADES DO CAD	16
2.4.1. Estado Fresco	17
2.4.2. Estado Endurecido.....	18
3. INFLUENCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO.....	23
3.1. DEFINIÇÃO	23
3.2. A CINZA DA CASCA DE ARROZ (CCA).....	24
3.2.1. Considerações Iniciais	24
3.2.2. Características da CCA.....	26
3.3. A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CCA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	32
3.3.1. Resistência à Compressão	33
3.3.2. Outras Propriedades.....	36
4. BORRACHA DE PNEU	38
4.1. BREVE HISTÓRICO	38
4.2. MATERIAIS TÍPICOS DE PNEUS E SUAS GENERALIDADES.....	39

4.3.	INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEU AO CIMENTO PORTLAND	43
4.3.1.	Considerações Iniciais	43
4.3.2.	Trabalhabilidade	43
4.3.3.	Propriedades Mecânicas e Durabilidade.....	44
5.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	50
5.1.	ESCOLHA DO CIMENTO E DO ADITIVO QUÍMICO.....	51
5.2.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	53
5.2.1.	Agregados.....	53
5.2.2.	Cimento	58
5.2.3.	Sílica Ativa	59
5.2.4.	Cinza de Casca de Arroz	61
5.2.5.	Aditivo Químico.....	68
5.2.6.	Água	69
5.3.	METODOLOGIA.....	69
5.3.1.	ESTUDO DA GRANULOMETRIA E PORCENTAGEM IDEAL DE CCA NA ARGAMASSA.....	69
5.3.2.	ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO CAD COM ADIÇÃO DE CCA E BORRACHA DE PNEU	74
6.	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
6.1.	ENSAIOS REALIZADOS EM ARGAMASSA.....	95
6.2.	ENSAIOS DE CAD COM CCA E BORRACHA DE PNEU.....	98
6.2.1.	ESCOLHA DO TRAÇO COM MELHOR TRABALHABILIDADE E ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	98
6.2.2.	ANÁLISE DO CAD COM CCA E BORRACHA DE PNEU NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	102
7.	CONCLUSÃO.....	125
7.1.	CONCLUSÕES	125
7.2.	RECOMENDAÇÕES PARA A CONTINUIDADE DA PESQUISA	128
8.	REFERÊNCIAS	134
<u>ANEXO</u>	129

Lista de Figuras

FIGURA 1. EFEITO FÍLER DA SÍLICA ATIVA.	12
FIGURA 2. ORGANOGAMA DE UTILIDADES DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.	26
FIGURA 3. MICROGRAFIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ - ESTRUTURA ORIGINAL DE SÍLICA AMORFA.	28
FIGURA 4. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E FÍSICAS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ PROVENIENTES DE DIFERENTES PROCESSOS DE QUEIMA.	29
FIGURA 5. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM NA SUPERFÍCIE ESPECIFICA DA CCA.	31
FIGURA 6. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM NA SUPERFÍCIE ESPECIFICA DA CCA.	39
FIGURA 7. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM NA SUPERFÍCIE ESPECIFICA DA CCA.	40
FIGURA 8. REPARO DO PNEU.	40
FIGURA 9. TEMPO DE ESCOAMENTO X TEOR DE SUPERPLASTIFICANTE.	52
FIGURA 10. TEMPO DE ESCOAMENTO X TEOR DE SUPERPLASTIFICANTE.	52
FIGURA 11. CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA.	54
FIGURA 12. CURVA GRANULOMÉTRICA DA BRITA 1.	55
FIGURA 13. CURVA GRANULOMÉTRICA DA BORRACHA DE PNEU IN NATURA.	56
FIGURA 14. BORRACHA MÉDIA.	57
FIGURA 15. CURVA GRANULOMÉTRICA DA BORRACHA MÉDIA.	58
FIGURA 16. CINZA CRISTALINA APÓS A MOAGEM.	61
FIGURA 17. MOINHO DE BOLAS.	62
FIGURA 18. ENSAIO DE DIFRAÇÃO DA CINZA CRISTALINA.	62
FIGURA 19. EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA DA CASCA DE ARROZ.	64
FIGURA 20. CINZA AMORFA APÓS A QUEIMA.	64
FIGURA 21. DIFRATOGRAMA DE RAIO-X DA CCA AMORFA.	65
FIGURA 22. FRASCO DE CHAPMAN, DETERMINAÇÃO DA MASSA.	66
FIGURA 23. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA CCA-CRISTALINA MOÍDA EM 40 MINUTOS.	67
FIGURA 24. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA CCA-AMORFA MOÍDA EM 30 MINUTOS.	67
FIGURA 25. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	71
FIGURA 26. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	71
FIGURA 27. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.	73
FIGURA 28. CORPOS-DE-PROVA APÓS A MOLDAGEM.	73
FIGURA 29. CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS À RUPTURA (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO).	74
FIGURA 30. MISTURA APÓS ADICIONAR TODOS OS MATERIAIS.	82
FIGURA 31. CONCRETO FRESCO APÓS ÚLTIMOS DEZ MINUTOS.	82

FIGURA 32. ENSAIO DE ABATIMENTO DE CONE TRONCO.....	83
FIGURA 33. APARELHO MEDIDOR DE AR.	84
FIGURA 34. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA.	84
FIGURA 35. APÓS MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA (10 X 20 CM).	84
FIGURA 36. MOLDAGEM DO CORPO-DE-PROVA (30 X 10 CM).	85
FIGURA 37. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA (5 X 15 X 30 CM).....	85
FIGURA 38. CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO CAPEAMENTO.	86
FIGURA 39. PRENSA HIDRÁULICA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	87
FIGURA 40. CORPO-DE-PROVA DO TRAÇO COM 5% CCA-C SUBMETIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	87
FIGURA 41. CORPO-DE-PROVA DO TRAÇO COM 5% CCA-A SUBMETIDO A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	88
FIGURA 42. DETALHE DO CORPO-DE-PROVA AJUSTADO PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.	88
FIGURA 43. EQUIPAMENTO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.	89
FIGURA 44. VISUALIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO AJUSTADO.	90
FIGURA 45. CORPO-DE-PROVA ENSAIADO – 5% CCA-A.	90
FIGURA 46. CORPOS-DE-PROVA NA ESTUFA.....	92
FIGURA 47. CORPOS-DE-PROVA IMERSOS EM ÁGUA.	92
FIGURA 48. APARELHO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	93
FIGURA 49. CORPO-DE-PROVA SUBMERSO NO RECIPIENTE DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.	93
FIGURA 50. RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TEMPO DE MOAGEM.	96
FIGURA 51. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CCA-C.	97
FIGURA 52. RESULTADO DO ENSAIO DE ABATIMENTO.....	98
FIGURA 53. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE VÁRIOS TRAÇOS COM CCA-C.	99
FIGURA 54. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	100
FIGURA 55. CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TRAÇO 5% CCA-C.....	101
FIGURA 56. CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TRAÇO CCA-C/BOR.....	101
FIGURA 57. RESULTADO DO ENSAIO DE ABATIMENTO.....	102
FIGURA 58. TERMÔMETRO DIGITAL.	103
FIGURA 59. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	104
FIGURA 60. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - CONTROLE.....	105

FIGURA 61. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CONTROLE/BOR..	105
FIGURA 62. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO –5% CCA-C.....	106
FIGURA 63. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - CCA-C/BOR..	106
FIGURA 64. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 5% CCA-A.....	106
FIGURA 65. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CCA-A/BOR..	106
FIGURA 66. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 5% SÍLICA.	106
FIGURA 67. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – SÍLICA/BOR.....	106
FIGURA 68. EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.	107
FIGURA 69. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - 5%.....	108
FIGURA 70. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.	109
FIGURA 71. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.	109
FIGURA 72. CORPO-DE-PROVA ROMPIDO A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - 5%.....	110
FIGURA 73. EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.	110
FIGURA 74. RELAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E COMPRESSÃO.	112
FIGURA 75. RELAÇÕES ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E COMPRESSÃO.	114
FIGURA 76. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO.	115
FIGURA 77. 1ª FISSURA (0,1 MM) - 5% CCA-A SUBMETIDO A RESISTÊNCIA AO IMPACTO.	118
FIGURA 78. 1ª FISSURA (0,05 MM) - CCA-C/BOR. SUBMETIDO A RESISTÊNCIA AO IMPACTO. ..	119
FIGURA 79. ÚLTIMA FISSURA OBSERVADA (0,8 MM) - 5% CCA-C.	119
FIGURA 80. ÚLTIMA FISSURA OBSERVADA (0,2 MM) - CCA-A/BOR.....	120
FIGURA 81. TRAÇO CONTROLE NO FINAL DO ENSAIO.	120
FIGURA 82. TRAÇO COM CCA-C/BOR. AO FINAL DO ENSAIO.	120
FIGURA 83. CORPO-DE-PROVA DO TRAÇO SÍLICA/BOR. APÓS O TÉRMINO DO ENSAIO.	121
FIGURA 84. RESISTÊNCIA À ABRASÃO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO.....	121
FIGURA 85. RESISTÊNCIA À ABRASÃO –CONTROLE.	123
FIGURA 86. RESISTÊNCIA À ABRASÃO –CONTROLE/BOR.....	123
FIGURA 87. DESGASTE À ABRASÃO –5% CCA-C.....	123
FIGURA 88. DESGASTE À ABRASÃO – CCA-C/BOR.....	123
FIGURA 89. DESGASTE À ABRASÃO – 5% CCA-A.....	123
FIGURA 90. DESGASTE À ABRASÃO - CCA-A/BOR..	123
FIGURA 91. DESGASTE À ABRASÃO – 5% SÍLICA.	124
FIGURA 92. DESGASTE À ABRASÃO – SÍLICA/BOR.	124

Lista de Tabelas e Quadros

TABELA 1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA.	53
TABELA 2. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA BRITA 1.	54
TABELA 3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA BORRACHA DE PNEU IN NATURA.	56
TABELA 4. CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU.	57
TABELA 5. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA BORRACHA MÉDIA.	57
TABELA 6. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO CP II F – 32.	59
TABELA 7. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICA DA SÍLICA ATIVA.	60
TABELA 8. EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA DA CASCA.	63
TABELA 9. DIÂMETRO MÉDIO DAS AMOSTRAS DAS CINZAS DE CASCA DE ARROZ.	66
TABELA 10. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA CCA CRISTALINA E CCA AMORFA.	68
TABELA 11. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA (KG/M ³).	70
TABELA 12. COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS UTILIZADAS NO ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DOS MATERIAIS.	75
TABELA 13. COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS UTILIZADAS NO ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DOS MATERIAIS.	76
TABELA 14. COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS UTILIZADAS NO ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DOS MATERIAIS.	76
TABELA 15. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO 8% CCA-C.	77
TABELA 16. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO CCA-C/BOR..	78
TABELA 17. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO CCA-C/BOR..	79
TABELA 18. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO CONTROLE E CONTROLE/BOR.	79
TABELA 19. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO 5% CCA-C E CCA-C/BOR..	80
TABELA 20. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO 5% CCA-A E CCA-A/BOR.	80
TABELA 21. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO 5% SÍLICA E SÍLICA/BOR.	81
TABELA 22. ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.	95
TABELA 23. ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.	96
TABELA 24. TEOR DE AR INCORPORADO E MASSA ESPECÍFICA.	103
TABELA 25. RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E COMPRESSÃO.	112
TABELA 26. CORRELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE/COMPRESSÃO X IDADE (x1000).	114
TABELA 27. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO (1 ^a FISSURA).	117

TABELA 28. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO (ÚLTIMA FISSURA).....	117
TABELA 29. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA) EM ARGAMASSA (7 DIAS) – PARÂMETRO ESTATÍSTICO.....	130
TABELA 30. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA), EM ARGAMASSA (28 DIAS) – PARÂMETRO ESTATÍSTICO.....	130
TABELA 31. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA) DE CAD – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS. ...	131
TABELA 32. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA) DE CAD COM BORRACHA – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.	131
TABELA 33. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPA) DE CAD – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.	132
TABELA 34. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPA) DE CAD COM BORRACHA – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.	132
TABELA 35. MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPA) DE CAD – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.	133
TABELA 36. MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPA) DE CAD COM BORRACHA– PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.	133
QUADRO 1. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	94
QUADRO 2. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	94

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E BORRACHA DE PNEUS EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

MICHELE BENITI BARBOSA

RESUMO

Esta dissertação aborda a aplicação da tecnologia dos concretos de alto desempenho (CAD) para a produção de concretos com incorporação dos resíduos: a cinza de casca de arroz-CCA (Amorfa e Cristalina), através da substituição em massa de parte do material aglomerante e borracha de pneu em substituição parcial do agregado miúdo em volume, avaliando suas influências sobre as propriedades mecânicas e durabilidade; através da comparação dos resultados com o uso da sílica ativa e borracha e outro sem incorporação mineral e borracha.

Os concretos com incorporação de cinzas (Amorfa e Cristalina) e Borracha apresentaram superioridade das propriedades mecânicas e boa resistência à abrasão e à resistência ao impacto, em relação ao concreto sem incorporação mineral e Borracha.

Quanto à forma de ruptura, os CAD com resíduos de borracha apresentaram comportamentos diferenciados. Baseando-se nos valores da relação entre resistência à tração e resistência à compressão e da relação do módulo unitário, para os concretos CCA-A e Borracha e CCA-C e Borracha, foi possível verificar a redução da fragilidade e aumento da capacidade de absorção de energia.

A incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneu ao CAD demonstraram viabilidade de uso como função estrutural, devido essencialmente ao bom desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica, enfatizando-se mudança de comportamento quanto à forma de ruptura, quando comparados aos concretos de alto desempenho em geral. Os resultados referentes à resistência à abrasão do concreto com os resíduos de cinza de casca de arroz e de borracha de pneu indicam ser atrativo para o uso em pavimentação.

Palavra-chave: Concreto de alto desempenho; Cinza de casca de arroz; Borracha de pneu; Materiais Alternativos; Propriedades Mecânicas; Resistência à Abrasão.

UTILIZATION OF THE RESIDUES OF RICE HUSK ASH AND TIRES RUBBER OF CONCRETE OF HIGH PERFORMANCE

MICHELE BENITI BARBOSA

ABSTRACT

This dissertation broaches the application of high performance concrete (HPC) technology with residue incorporation: the rice husk ash-RHA (Amorphous and Crystalline) through the mass substitution of the gathering material and tire rubber in a partial substitution of the tiny aggregate in volume, evaluating the influence on the mechanic properties and durability through the comparison of the results with using silica fume and rubber and another without mineral incorporation and rubber.

The concrete with ashes incorporation (Amorphous and Crystalline) and rubber presented superiority of mechanic properties and good abrasion by strength and impact strength, in relation to concrete without mineral incorporation and rubber

As regards to rupture form, the high performance concrete with rubber residue presented different behavior. Based on the values of the relation between the splitting tensile strength and compression strength to and the relation of the unitary module, to the concretes RHA-A and rubber and RHA-C and rubber, it was possible to verify the breakability reduction and the increasing of energy absorption capacity.

The incorporation the residues of rice husk ash and of tire rubber he HPC showed the feasibility the use as structure function, essentially due to the good performance of properties related to mechanic strength, emphasizing the changing of behavior on rupture form, when compared to high performance concrete in general. The a concerning results abrasion by strength of concrete the residues of rice husk ash and of tire rubber atractivo indicate for the use in pave.

Keywords: Concrete of high performance; Rice husk ash; Rubber of tire; Alternative Materials; Mechanical strength; Abrasion by Strength.

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O concreto é um material de construção largamente utilizado e oferece boa resistência à compressão, parâmetro significativo enquanto material estrutural. Com aumento das exigências do mercado quanto o desempenho estrutural e juntamente com a necessidade de se produzir concreto com maiores resistências do que o concreto convencional ocorreu uma mudança na produção de concretos. O concreto de alta resistência (CAR) é resultado da evolução tecnológica aplicada à ciência dos materiais, como resposta às exigências estruturais crescentes, de melhores resistências mecânicas e de outras relacionadas com a durabilidade. Justamente por apresentar, em relação ao concreto de convencional, além de elevadas resistências, uma redução na distribuição de poros, este concreto tem sido denominado por um termo mais abrangente, como Concreto de Alto Desempenho (CAD).

Segundo Moraes (2000, p.1) a resistência mecânica está intimamente relacionada à composição do concreto e aos cuidados na seleção e dosagem de materiais. Quanto a sua composição, o seu desempenho estará subordinado à qualidade da pasta, a qual define como será a estrutura dos poros. Esta, por sua vez, é função do tipo de cimento utilizado, da relação água/aglomerante, do grau de hidratação e da presença ou não de adições minerais.

O CAD é caracterizado como aquele que possui resistência à compressão acima de 40 MPa, além de ser necessário maior controle de qualidade e seleção dos materiais constituintes, diferindo sua microestrutura consideravelmente dos concretos convencionais (MEHTA e MONTEIRO, 2001, p.171).

O CAD devido às alterações de sua microestrutura apresenta mudanças quanto à forma de ruptura em relação ao concreto convencional. Portanto quando submetido à

tensão superior a sua resistência máxima apresenta característica de ruptura frágil (PEREIRA NETO, 1994, p.78 e MEHTA e MONTEIRO, 2001, p.175).

O uso de concreto de alto desempenho (CAD) vem crescendo mundialmente, com finalidade estrutural, sendo empregado em pilares de edifícios, em barragens, em pisos industriais, em recuperações de estruturas e peças pré-moldadas, entre outras. Segundo Silva e Libório (2003, p.4) CAD pode proporcionar um ganho de área útil, diminuir o consumo de material, reduzir a carga permanente da estrutura, o tempo de execução pode ser menor e maior tempo para manutenção.

Além da evolução do CAD já desenvolvidas através de pesquisas, e sua aplicação em larga escala, a indústria da construção civil também tem buscado sua inserção nos mercados de ponta, através da utilização de novas tecnologias e materiais alternativos.

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento de descarte de rejeitos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, e isto, vêm impulsionando os estudos sobre o aproveitamento de resíduos industriais como novos materiais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos industriais.

Dentre as variedades de resíduos gerados, tem-se em destaque a cinza de casca de arroz (CCA) e borracha de pneus inservíveis, que visa não somente a redução de custos para as empresas construtoras, como também minimização aos aspectos ambientais e sociais, através da utilização de sistemas de reciclagem e busca da sustentabilidade dos processos de produção.

A incorporação de resíduos industriais ao concreto, tais como a CCA (propriedades pozolânicas altamente reativa), além de ser uma das soluções para o aproveitamento de subprodutos de outros setores como material nobre de substituição de parte do cimento Portland, enriquecendo o desempenho do produto final. É também extremamente significativa para o Brasil, uma vez que o país é um dos maiores produtores mundiais de arroz com uma produção de 11.535.816 de toneladas esperada para safra de 2006 (IBGE, 2006).

A utilização de materiais alternativos, como a escória, a cinza volante, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, bem como suas combinações, podem produzir concretos com melhor desempenho (NEVILLE, 1997, p.101-105).

Quanto aos resíduos de borracha de pneu incorporados ao concreto, estes apresentam soluções alternativas para minimizar a degradação ambiental, reduzir os custos de produtos e melhorar seu desempenho na construção civil.

Os resíduos de borracha adicionados ao concreto podem vir a atuar como obstáculos no desenvolvimento de fissuras, quando interceptam as microfissuras que surgem durante o endurecimento do concreto, impedindo sua progressão (BONNET, 2004, p.248-249). Este fato ocorre devido às propriedades elásticas, resistência ao impacto e à baixa massa específica.

A borracha de pneu pode ser empregada na construção civil como isolante estrutural, impedindo a propagação de tensões, pois apresenta uma capacidade de absorver energia 8.000 vezes maior que os metais (SEGRE, 2000, p.1424).

A incorporação dos resíduos, cinza de casca de arroz e a borracha de pneu ao concreto oferece não só vantagens técnicas, como também benefícios sociais relacionados com a redução de problemas de deposição no meio ambiente, servindo de estímulo ao desenvolvimento de pesquisas que investiguem as potencialidades desses materiais. Deste modo, pretende-se que os resultados obtidos neste trabalho forneçam subsídios ao meio técnico, a fim de que ocorra novos avanços na aplicação desses materiais.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa consiste em se produzir concreto de alto desempenho com a incorporação dos resíduos: cinza de casca de arroz (Cristalina e Amorfa), através da substituição em massa de parte do material aglomerante, e borracha de pneu, em substituição parcial do agregado miúdo em volume, avaliando suas influências sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade (resistência à abrasão, resistência ao impacto e absorção de água por capilaridade), através da comparação dos resultados com o uso da sílica ativa e borracha, e outro sem incorporação mineral e borracha.

1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi dividida em etapas, apresentadas de forma a garantir a compreensão dos assuntos e conceitos abordados, distribuídos em 7 capítulos descritos a seguir.

O primeiro capítulo abrange a introdução ao tema abordado, sua importância, objetivo e estrutura da pesquisa.

O segundo, terceiro e quarto capítulo, abordam a revisão da literatura, compreendendo tópicos de interesse específico desta pesquisa: concreto de alto desempenho, a cinza de casca de arroz (adição mineral) como substituição ao cimento, e a borracha de pneu como substituição parcial do agregado miúdo.

No quinto capítulo consta as atividades experimentais, planejamento e execução dos ensaios para caracterização dos materiais, moldagem dos corpos-de-prova.

A sexto capítulo constitui a apresentação, a análise e a discussão dos resultados obtidos.

O sétimo capítulo aborda as conclusões, apresentações das considerações finais dos resultados obtidos e as propostas para o prosseguimento das pesquisas.

E o oitavo capítulo, consta às referências bibliográficas, que serviu de base para esta pesquisa.

2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.1. HISTÓRICO

O concreto é o material de construção civil largamente utilizado, normalmente definido como mistura de cimento Portland, agregados (gráudo e miúdo) e água. O concreto já vem sendo usado a quase dois séculos, sendo os primeiros edifícios construídos em concreto armado há mais de um século e meio, marcando assim o início da primeira evolução do concreto.

Segundo Helene (1997, p.1-5), a evolução do concreto foi muito lenta no princípio, um século transcorreu para que fosse implementada a utilização de novos componentes adicionais aos inicialmente considerados (água, cimento, agregado miúdo e agregado gráudo). Somente com o surgimento dos primeiros aditivos químicos em 1938 é que foi possível sua incorporação ao concreto modificando suas propriedades mecânicas.

Segundo Aïtcin (2000, p.29) a segunda evolução do concreto ocorreu em 1960, os concretos chegavam a resistência à compressão entre 45 e 60 MPa e em 1970 já se produzia com mais 60 MPa. Ultrapassar esse limite só se tornou possível com o surgimento de novos materiais. O cimento, por exemplo, tinha que apresentar bom desempenho não apenas do ponto de vista mecânico, mas também reológico.

O concreto de alta resistência (CAR) inicialmente desenvolvido foi utilizado como elemento estrutural em pontes e edifícios com grandes alturas. Em tais edifícios o aumento da capacidade de carregamento permite a execução de pilares e vigas de menores dimensões, resultando em maior área útil aos pavimentos, reduzindo a carga permanente da estrutura e conseqüentemente uma redução nos custos das obras (AÏTCIN, 2000, p.36; DAL MOLIN, 1995, p.14; HARTMANN e HELENE, 2003, p.2).

O primeiro edifício alto utilizando concreto de alta resistência, de acordo com Mehta e Monteiro (1994, p.406) foi o Lake Point Tower em Chicago, o qual foi

construído em 1965, com pilares de 53 MPa, e com 70 pavimentos e 197 m de altura. Após 1972 foram erguidos outros edifícios na sua área metropolitana, com resistências características superiores a 63 MPa.

No Brasil existem várias obras com o uso do Concreto de Alto Desempenho (CAD) entre as quais podem ser citadas o MASP (Museu de Arte de São Paulo) com 45 MPa, recorde na época de sua construção em vão livre, exemplo clássico e pioneiro construído em 1960.

No final de 1960 os superplastificantes foram utilizados na Alemanha e Japão. Sua primeira aplicação foi como fluidificante e não como redutor de água. No decorrer de 1980, as dosagens de superplastificante foram aumentadas paulatinamente até se descobrir que, era possível reduzir a relação água/aglomerante para 0,30, e ainda obter um abatimento inicial de 200 mm. Entretanto em 1970, foi possível a redução da relação água/aglomerante para valores tão baixos quanto 0,16, utilizando-se uma dosagem muito alta de superplastificante e um novo e ultra-fino substituto do cimento, a sílica ativa. Desta maneira, concretos com resistências acima de 70 MPa foram produzidos em 1980, e atualmente, concretos acima de 100MPa estão na capacidade de produção, e os constantes avanços na tecnologia do concreto continuam a surpreender a comunidade relacionada a tal material através dos resultados apresentados a cada ano (AİTCIN, 2000, p.31-35).

No Brasil, os autores Hartmann e Helene (2003, p.1-14) desenvolveram o concreto de alto desempenho colorido, com resistência à compressão de 125MPa, representando recorde mundial e mais um marco na engenharia nacional.

No início da evolução desses concretos a característica almejada se resumia em alta resistência à compressão, sendo conhecido como Concreto de Alta Resistência. Com a evolução tecnológica desses concretos, fruto de um trabalho contínuo e a introdução de aditivos minerais e químicos, levou-se ao que se conhece hoje como Concreto de Alto Desempenho (CAD). O CAD apresenta características que diferem do concreto convencional tais como: elevadas resistências, alto módulo de elasticidade e alta trabalhabilidade, mas também engloba outras propriedades associadas à durabilidade, como a baixa permeabilidade e a resistência a ataques químicos.

Mehta e Monteiro (2001, p.171) caracterizaram o CAD basicamente como aquele que possui alta resistência mecânica, superior a 40 MPa, sendo suficiente para

suportar as solicitações de projeto, caracterizando-se pela baixa relação água/aglomerante, maior controle da seleção dos materiais constituintes e de produção.

O CAD é aquele que possui resistência à compressão acima de 40 MPa, sendo necessário controle de qualidade severo e maior cuidado na seleção e na dosagem dos materiais: aditivos, adições minerais, tipo e tamanho de agregados. Ainda ressalta que atualmente, além do CAD poder proporcionar um ganho de área útil, também pode diminuir o consumo de material, reduzir a carga permanente da estrutura, o tempo de execução pode ser menor e maior tempo para manutenção (SILVA E LIBÓRIO, 2003, p.4). Em contrapartida, de acordo com as normas técnicas e trabalhos científicos, define-se o valor da resistência à compressão do concreto de alto desempenho em torno de 50 MPa.

Entretanto esse tipo de concreto não é somente utilizado na execução de edifícios ou pontes. Várias outras possibilidades de aplicação são relatadas na Literatura, entre as quais, pavimentos rodoviários, reparos e recuperação de estruturas, vertedouros, dissipadores de barragem e também pré-moldados, entre outros tipos de construções DAL MOLIN (1995, p.19).

2.2. SELEÇÃO DOS MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DO CAD

A seleção de materiais para produção de concretos de alto desempenho não é simples, pois existem cimentos e agregados com grandes variações nas suas composições e propriedades, e ainda não foi estabelecida, na opinião de Mehta e Aïtcin (1990, p.70-78), uma diretriz clara do tipo de cimento e agregado mais apropriado para utilização em CAD. A situação é agravada pelo fato de que inúmeros aditivos químicos e adições minerais são utilizados simultaneamente, e não existem regras simples que permitam realizar facilmente a escolha dos materiais mais adequados. Ressalta-se que as propriedades mecânicas do CAD dependem das características do cimento, da qualidade dos agregados e da adição da sílica.

Aïtcin (2000, p.229) define a seleção dos materiais e a otimização do concreto de alto desempenho como “mais uma arte do que uma ciência”. Isto demonstra a complexidade desse processo. De qualquer forma, algumas propriedades e características dos constituintes, de maneira geral, afetam benéficamente o

comportamento das misturas e permitem a otimização das propriedades mecânicas do concreto endurecido. Serão apresentadas a seguir algumas considerações em relação aos materiais utilizados na produção de concreto de alto desempenho.

A seleção dos materiais tem dois objetivos fundamentais: o máximo rendimento de todos os componentes da mistura para alcançar a maior resistência ao menor custo e consistência adequada através de materiais que demandem o menor consumo de água possível.

2.2.1. Cimento

Segundo Aïtcin (2000, p.181-184) na produção do CAD, a seleção do tipo de cimento deve ser feita primeira e cuidadosamente, pois a natureza do mesmo influi no processo de hidratação, na consistência, na resistência da pasta e nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Quando se trata de cimento Portland, não há critérios científicos que especifiquem o cimento ideal para produção do CAD, o desempenho do cimento, em termos de reologia e resistência, torna-se um item cada vez mais crítico, proporcional ao aumento da resistência à compressão.

Para Mehta e Aïtcin (1990b, p. 270), a produção de concreto de alto desempenho pode ser realizada utilizando qualquer tipo de cimento portland, sendo utilizado preferencialmente materiais com elevados teores de C_3S e C_2S em sua composição ou cimentos que atendam as condições reológicas para uma boa trabalhabilidade do material.

A consistência inicial também é influenciada pelo consumo de cimento. Segundo Mailvaganam (1979, p.401) o consumo de cimento no concreto influencia a perda de abatimento com o tempo, sendo menor quanto mais elevado for o consumo do mesmo. Em casos onde a produção de concretos requer utilização de relações água/aglomerante muito baixas e a água de amassamento é insuficiente para permitir que se atinja a trabalhabilidade desejada, pode ser necessário aumentar o consumo de cimento além do ideal, para assim elevar-se o teor água e manter-se a mesma relação água/aglomerante. Entretanto, além dos problemas econômicos, pois o custo da estrutura aumenta, a elevação do consumo de cimento pode gerar fissuração, causada pela retração do concreto e elevada liberação de calor durante a hidratação do cimento

(ALAEJOS e CÁNOVAS, 1992, p.989). Pode-se dizer ainda, que em concretos convencionais é usual o termo água/cimento e já no concreto de alto desempenho é comum o termo água/aglomerante.

2.2.2. Aditivos Químicos

O entendimento de que as propriedades do concreto podem ser modificadas com a utilização de certos materiais adicionados ao concreto deram um impulso à indústria de aditivos químicos. Os aditivos são substâncias químicas que, dosados em pequenas proporções (não maior que 5%) na mistura do concreto, melhoram algumas propriedades, tanto no concreto fresco como depois de endurecido, com a finalidade de facilitar seu preparo e a utilização.

Os aditivos químicos geralmente utilizados no CAD são os redutores de água dos tipos plastificante e, principalmente, superplastificante. O uso destes aditivos possibilita a diminuição da relação água/aglomerante, sem que haja perda na consistência, permitindo a obtenção de misturas trabalháveis de arranjo mais denso, provocando um aumento na resistência e na durabilidade.

Segundo Mehta & Monteiro (1994, p.282) os aditivos superplastificantes são capazes de reduzir o conteúdo de água de três a quatro vezes em relação aos aditivos plastificantes sem que haja retardamento no tempo de pega.

Segundo Raeder Filho (2005, p.36) a utilização de aditivo engloba três diferentes propósitos:

- Aumentar a trabalhabilidade sem mudar qualquer componente da mistura;
- Reduzir a demanda de água, diminuindo dessa forma a relação água/aglomerante e aumentando a resistência e durabilidade da mistura;
- Reduzir o consumo de água e cimento e, por conseguinte, o calor de hidratação responsável pela formação de fissuras, retração e tensões térmicas.

Os superplastificantes são classificados em quatro categorias, em função de sua composição química (AİTCIN, 2000, p.191):

- Policondensado de formaldeído e melamina sulfonada, também chamado de melamina sulfonada;
-

- Policondensado de formaldeído e naftaleno sulfonado, também chamado de naftaleno sulfonado;

- Lignossulfonato e poliacrilatos.

Entretanto, atualmente existe uma nova categoria constituída pelos superplastificantes à base de policarboxilatos, denominados de terceira geração. Em sua maioria, os estudos sobre aditivos superplastificantes estiveram voltados aos produtos à base de melanina sulfonada ou naftaleno sulfonado (RAMACHANDRAN, 1983; COLLEPARDI, 1994; HEWLET e RIXON, 1992; apud DAL MOLIN, 1995, p.37-39).

Os aditivos superplastificantes são requeridos para a produção de concreto de alto desempenho. A grande quantidade de partículas de cimento com a baixa quantidade de água de amassamento requer alta dosagem de aditivos redutores de água de amassamento, e requer alta dosagem de aditivos superplastificantes para deflocular e dispersar as partículas de cimento em suspensão. Quando é adicionada adição mineral a estes concretos, aumenta-se consideravelmente o consumo de água, e são necessários os aditivos para manter a baixa relação água/aglomerante e a trabalhabilidade.

Existe uma quantidade muito grande de produtos comerciais e seus efeitos no concreto são descritos pelos fabricantes. A forma de atuação destes produtos ainda não está completamente esclarecida, assim o desempenho dos aditivos superplastificantes, e numa composição com materiais específicos deve ser analisada através de ensaios realizados previamente, para a utilização dos produtos em obras, principalmente em função da compatibilidade aditivo-cimento.

No concreto de alto desempenho usa-se um teor de superplastificante para conseguir uma baixa relação água/aglomerante, sendo fundamental estabelecer uma combinação adequada entre cimento-superplastificante, que proporciona um período maior de retenção da fluidez (NEVILLE, 1997, p.667). Segundo Gutiérrez e Cánovas (1996, p.234) o termo compatibilidade entre o cimento e o superplastificante é um dos principais fatores na escolha do cimento, e, conseqüentemente do superplastificante para o concreto de alto desempenho.

A dosagem necessária pode ser estabelecida junto com a avaliação da compatibilidade. Normalmente determina-se a redução do teor de água para se obter uma mesma trabalhabilidade em comparação a mistura sem aditivo, pelos ensaios de mini-abatimento de Kantro e ou cone de Marsh (AITCIN, 2000, p.197).

2.2.3. Aditivos Minerais

As adições minerais são partículas muito finas que podem ser incorporadas ao concreto, suplementando o cimento, devido às propriedades cimentícias latentes ou substituindo parte dele e contribuindo para a resistência do concreto. Os mais importantes aditivos minerais utilizados na produção do CAD são a sílica ativa, a cinza volante, a cinza de casca de arroz e a escória de alto forno, entre outras.

A sílica ativa – SiO_2 – é um subproduto da fabricação de silício ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodos de arco imerso. As partículas da sílica ativa parecem perfeitamente esféricas, com diâmetro menor de $0,1\mu\text{m}$ (NEVILLE, 1997, p.104-105).

De acordo com Costenaro (2003, p.44) o efeito fíler de sílicas ativas no concreto, ou de qualquer outro tipo de material muito fino, produz um preenchimento de vazios no concreto, resultando num melhor empacotamento entre todas as partículas, o que aumenta a compacidade dos concretos. Esses materiais podem se interpor nos vazios deixados por partículas anidras de cimento, tornando a estrutura muito mais sólida.

Os efeitos benéficos da sílica ativa nas propriedades do concreto são devidos a dois efeitos: o efeito pozolânico e o efeito de fíler. No primeiro, a sílica ativa, por ser praticamente só sílica amorfa, reage com grande rapidez com hidróxido de cálcio (C-H) e produz o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) gerado da hidratação do cimento, aumentando a resistência à compressão e a resistência química. E, no segundo, conforme a Figura 1, diminui a porosidade total formando uma estrutura mais descontínua de poros e as micro esferas desses grãos se alojam nos interstícios da pasta, subdividindo os poros capilares das partículas de cimento em poros de gel. Com a redução na quantidade de poros capilares, obtém-se a diminuição da permeabilidade e da velocidade de penetração de agentes agressivos às estruturas de concreto, tornando-as mais resistentes (AİTCIN, 2000, p.161-164).

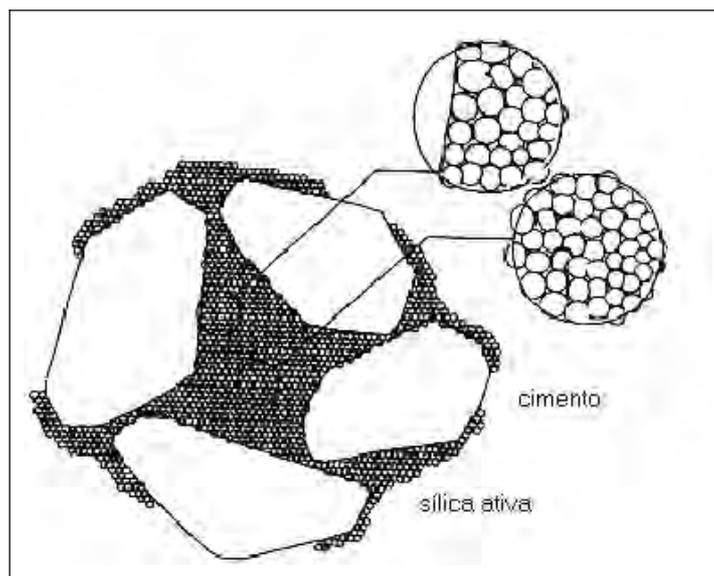


Figura 1. Efeito fíler da sílica ativa.

Fonte. AİTCIN, 2000.

As adições pozolânicas ultrafinas, como a cinza de casca de arroz, sílica da casca de arroz, sílica ativa advinda de produção de ligas metálicas e silício metálico, entre outras, têm-se mostrado mais efetivas no aumento da resistência, pois, além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição (COSTENARO, 2003, p.39).

A sílica ativa, quando substitui parte do cimento, além de conferir alta resistência, também oferece outros benefícios como baixa permeabilidade, maior durabilidade, redução da exsudação e melhor coesão da mistura.

2.2.4. Agregados

2.2.4.1. Agregados Graúdos

A seleção de agregados deve ser feita cuidadosamente à medida que a resistência à compressão aumenta. As propriedades mecânicas dos agregados, a mineralogia, a granulometria, a configuração geométrica, o estado superficial e a estabilidade química são características dos agregados graúdos que exercem influência no CAD. Estas características alteram o nível de tensão, provocando o surgimento de

microfissuras, afetando o módulo de elasticidade, a forma da curva de tensão-deformação, e a resistência à compressão (AÏTCIN, 2000, p.224-229).

Segundo Coutinho, 1973 apud Velasco (2002, p. 10) à medida que o consumo de cimento aumenta, há um aumento na resistência da pasta e a tensão de ruptura do concreto passa a ser dependente da tensão de ruptura do agregado. Isto porque a tensão real nos pontos de contato das partículas individuais do agregado com a argamassa do concreto podem exceder em muito a tensão nominal de compressão aplicada no concreto, devido à diferença de rigidez existente entre as fases do concreto.

Quanto à dimensão máxima do agregado, utilizam-se agregados com menor dimensão máxima característica, possibilitando a redução da concentração de tensões originadas pela incompatibilidade de módulo de deformação entre a pasta e o agregado, reduzindo à microfissuração. Sugere-se o emprego de agregados com dimensão máxima característica entre 10 e 25 mm, apesar de que há dados que comprovem que o uso de partículas com 25 mm prejudicam a resistência e a obtenção de baixa permeabilidade (MEHTA, P. K.; AÏTCIN, 1990a, p.76). Segundo Neville (1997, p.180) e ACI 363 (1992, p.6), costumam limitar a dimensão característica máxima do agregado em 19 mm ou menos.

De acordo com o comitê 363 do ACI (1992, p.6) agregados angulares podem aumentar o consumo de água da mistura e reduzir a trabalhabilidade, caso a angulosidade seja muito acentuada. Já as partículas lamelares devem ser evitadas, pois são frágeis e, além disso, são ásperas e produzem misturas que requerem maiores teores de água e aditivos.

Também são utilizados agregados graúdos com baixo peso específico na produção de CAD, onde tem-se a redução do peso específico do concreto. Estes agregados chamados de leves são porosos e não muito resistentes, mas diminuir a massa unitária de um concreto de 50 a 60 MPa para cerca de 2000 kg/m³ pode representar vantagens econômicas (HOFF, 1990 apud AITCIN, 2000, p.609). Pesquisas recentes vem sendo realizadas tentando otimizar a relação maior resistência e menor massa específica, apresentaram concreto de alto desempenho com massa específica de 1600 kg/m³, atingindo resistência à compressão acima de 50 MPa (ROSSIGNOLO, 2003, p.88).

2.2.4.2. Agregado miúdo

Em comparação com os demais materiais, a escolha do agregado miúdo não interfere significativamente nas propriedades do CAD. Experiências mostram que a graduação da areia não afeta a resistência inicial, podendo provocar uma baixa resistência nas idades mais avançadas, quando comparadas com uma areia bem graduada, devendo-se levar em conta a textura superficial e o formato dos grãos da areia (AITCIN, 2000, p.225; MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.241-243). Os usos de agregados miúdos mais grossos são recomendados na produção do CAD, pois leva pequeno decréscimo na quantidade de água necessária para uma dada trabalhabilidade.

No CAD, utiliza-se agregado miúdo com módulo de finura entre 3 e 3,2, devido ao alto teor de partículas finas. Recomenda-se o agregado miúdo de forma arredondada, com superfície rugosa, tipo grosso e com granulometria contínua, devendo-se evitar agregados moídos artificialmente (NEVILLE, 1997, p.664).

O teor de umidade do agregado miúdo também é outro aspecto importante, devido a diferença da quantidade de água incorporada ao concreto, conduzindo a uma diferença na relação água/aglomerante especificada. Portanto, o material deve ser incorporado ao concreto com umidade controlada e sem variações na sua massa.

2.2.5. Água

Segundo Neville (1997, p.193-195) a água não é apenas um líquido usado na produção de concreto, porém envolve todo o desempenho desse material. Para a produção de concreto de alto desempenho os requisitos de qualidade estabelecidos para a água são os mesmos exigidos na produção de concreto convencional.

2.3. MICROESTRUTURA DO CAD

O concreto pode ser considerado como um material não-homogêneo composto de três fases distintas:

- a pasta de cimento hidratada;
 - a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento hidratada;
 - os agregados.
-

A composição química do cimento Portland é formada basicamente por quatro componentes principais: Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

A hidratação da pasta de cimento começa quando os compostos de silicatos anidros entram em contato com a água, assim a resistência da pasta de cimento hidratada é influenciada pelos silicatos C_2S e o C_3S , através da formação de C-S-H (AITCIN, 2000, p.97).

A relação água/aglomerante e o grau de hidratação são responsáveis pelo volume e o tamanho de vazios capilares, os quais apresentam uma considerável influência no coeficiente de permeabilidade da pasta de cimento e, portanto, na durabilidade a agentes agressivos (COSTENARO, 2003, p.14).

Quando a relação água/aglomerante é reduzida e a quantidade de finos no CAD for relativamente grande, a pasta de cimento terá menor porosidade capilar e menor espaço livre, sendo a pasta bastante homogênea e densa, características que influenciam na resistência à compressão. De acordo com Paulon (1991) apud Costenaro (2003, p.15) as adições minerais são capazes de gerar uma significativa redução da espessura da zona de transição, independente do tipo de agregado, indicando a reação com C-H e o efeito fíler.

Em decorrência de utilização de sílica ativa ocorre praticamente a eliminação ou a minimização dessa zona de interface. Este fato pode ser observado nos resultados referidos na literatura de Mehta e Monteiro (1994, p.18) nos quais verificou que a espessura da zona de transição variou em torno de 50 μm , para os sem adição de sílica, enquanto aos concretos com sílica ativa os valores foram inferiores a 10 μm .

No concreto convencional a interface entre a pasta e os agregados representa o elo fraco da sua microestrutura (caracterizada pela presença de poros) e produtos de hidratação, a partir de onde o colapso mecânico começa a se desenvolver, quando o concreto é submetido ao carregamento. Nos concretos de alto desempenho a zona de transição tem estrutura densa, onde as partículas de C-S-H estão intimamente próximas, aparece poucos poros capilares e hidróxido de cálcio C-H.

Mudanças microestruturais como estas tornam o concreto de alto desempenho mais resistente, com considerável melhoria na aderência entre a pasta e o agregado, e a pasta e a armadura. Com isso, a pasta de cimento e a zona de transição podem deixar de

ser o elo mais fraco do concreto. A forma de ruptura do concreto é alterada, com as fissuras atravessando tanto a pasta de cimento e a zona de transição quanto às partículas dos agregados. Ocorrendo a fissuração a valores elevados aproximados ao limite máximo de resistência e quando acima deste, o CAD apresenta ruptura frágil.

Então ao ensaiar os corpos-de-prova de CAD, estas características são observadas, sendo descritas por vários pesquisadores de CAD. Mehta e Monteiro (2001, p.20) relatam fratura mais frágil e quebradiça, já o autor Pereira Neto (1994, p.78) constatou ruptura frágil.

A produção de concreto convencional não requer a seleção de agregados particularmente resistentes, desde que sejam cumpridas as normas e exigências de desempenho estabelecidas nas mesmas. Todavia, caso as outras fases da mistura sejam mais resistentes, os agregados, principalmente o gráúdo, será o elo fraco da estrutura. Dessa forma, tanto a litologia quanto a granulometria dos agregados pode influenciar a resistência final do concreto (AÏTCIN e NEVILLE, 1993, p.24; AÏTCIN, 2000, p.224).

Segundo Pereira Neto (1994, p.79) com o aumento na resistência da pasta do CAD, se faz necessário uma atenção especial ao agregado gráúdo, pois a ruptura na maioria das vezes é do tipo trans-granular.

2.4. PROPRIEDADES DO CAD

O CAD possui propriedades que o diferencia do concreto de resistência convencional e por muitas vezes, passa ser mais vantajosa a sua utilização. Apresenta alta resistência nas primeiras idades, baixa segregação, tanto no adensamento quanto no lançamento, ausência de exsudação (desde que bem dosado), facilidade de lançamento (mesmo com baixa água/aglomerante). As propriedades de baixa segregação, ausência de exsudação e facilidade de lançamento possibilitam concretagem mais fáceis, onde o acesso de vibradores é um obstáculo, e para estruturas com taxas de armaduras elevadas. Devido às suas propriedades mecânicas de alta resistência à compressão é possível a redução do peso da estrutura e a redução do número de colunas, traduzindo em ganho de área útil. Cabe ressaltar as características de baixa permeabilidade, baixa porosidade, alta resistência à abrasão, maior proteção contra a corrosão, entre outras (AÏTCIN, 2000, p.93-595).

O comportamento do concreto endurecido pode ser caracterizado através das propriedades mecânicas e durabilidade. As propriedades relativas ao comportamento do concreto incluem a resistência à compressão – f_c , a resistência à tração – f_t , e o módulo de elasticidade – E_c , e com a evolução nas propriedades mecânicas do concreto, terá uma evolução quanto à durabilidade, onde todas estas propriedades serão apresentadas a seguir.

2.4.1. Estado Fresco

O processo de produção e comportamento do concreto de alto desempenho no estado fresco frequentemente difere consideravelmente do concreto convencional. Torna-se necessário que o processo de mistura e os parâmetros de avaliação sejam adaptados no sentido de assumirem um novo significado dos indicadores no controle de qualidade.

Enquanto fresco, os principais problemas que podem surgir são: perda de abatimento, retardamento de pega, que atrasará o desenvolvimento da resistência, e segregação elevada da mistura. Segundo Alves (2000, p. 10-15) tais problemas ocorrem por diversos fatores que podem ser drasticamente reduzidos quando algumas propriedades forem controladas, como a massa específica, o abatimento, a trabalhabilidade e o teor de ar incorporado.

Sponholz (1998, p.19-20) trabalhabilidade é a característica mais importante do concreto fresco e que afeta a resistência mecânica e a durabilidade, caso não corresponda às necessidades de produção, tais como, bombeamento, adensamento e acabamento.

O CAD possui massa específica em torno de 2500 kg/m^3 , fato que pode ser explicado pelo alto consumo de cimento e baixa quantidade de água. Como a quantidade de água no concreto de alto desempenho não é suficiente para a hidratação do cimento no traço, torna-se necessário, como já mencionado, a utilização de superplastificantes para uma maior dispersão dos grãos aglomerantes e agregados.

Diferentemente do que ocorre no concreto convencional, o comportamento reológico do CAD possui distinção, pois a quantidade de água empregada não é suficiente na maioria das vezes para completa hidratação de todo o cimento contido no traço, fazendo com a trabalhabilidade dependa dos aditivos químicos. As partículas

cimentantes interagem fisicamente e o superplastificante interage com as partículas de cimento em hidratação fazendo com que o CAD possa exibir uma perda de trabalhabilidade mais acentuada que os concretos de resistência convencional.

A utilização de aditivos superplastificantes permite a obtenção de CAD de alta consistência (abatimento de até 200 ± 20 mm) com coesão adequada para o lançamento e sem risco de segregação. A trabalhabilidade do CAD é determinada através do ensaio do abatimento do tronco de cone, mas a sua avaliação torna-se difícil pelo fato de ser um concreto muito fluido, fazendo com que o cone de concreto entre em colapso (AITCIN, 2000, p.394).

Concretos de alto desempenho geralmente apresentam teores entre 1 a 3% de ar aprisionado, valores que aumentam à medida que a relação água/aglomerante é reduzida. Aïtcin (2000, p.398) menciona que através de combinações de cimento/superplastificante (boa compatibilidade) é possível a obtenção de teores de ar incorporados entre 1% e 1,5% também para relações água/aglomerante de 0,30, ressaltando que este fator também influencia na resistência.

2.4.2. Estado Endurecido

2.4.2.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é a principal propriedade mecânica do concreto, pois além de estar relacionada à estrutura interna do material, proporcionando uma estimativa do desempenho do concreto, indica de forma indireta sua durabilidade (DAL MOLIN, 1995, p.54).

Em concretos convencionais, a relação água/aglomerante é o fator mais importante na determinação da porosidade e conseqüentemente na resistência do concreto. Em CAD não basta ter como referência a relação água/aglomerante para se saber a resistência à compressão; vai depender das propriedades e das proporções de seus materiais constituintes, do grau de hidratação, entre outros fatores.

Como já mencionado, a resistência do CAD pode ser afetada pelas propriedades mecânicas do agregado graúdo, por tornar-se o elo mais fraco dentro do concreto. De acordo com Aïtcin (2000, p.495-498) para os concretos convencionais a resistência à compressão do CAD aumenta à medida que a relação água/aglomerante

diminui. Quando o agregado graúdo torna-se a região mais fraca do concreto, comparado com a resistência da pasta de cimento hidratada, existe um valor crítico da relação água/aglomerante, abaixo do qual qualquer redução adicional desta relação não resulta em aumentos significativos da resistência à compressão. Então, a única maneira de aumentar a resistência à compressão desse concreto seria usando outro tipo de agregado graúdo.

No CAD nota-se uma maior velocidade de ganho de resistência nas primeiras idades. Essa maior cinética pode ser atribuída à proximidade inicial das partículas de cimento no concreto fresco decorrente da baixa relação água/aglomerante, da mistura e, também do efeito fíler, que provoca melhor distribuição dos grãos e, com isso, a diminuição dos vazios.

Os resultados obtidos para concretos de alta resistência submetidos a ensaios de resistência à compressão axial também podem ser influenciados pela capacidade resistente do material utilizado para capeamento. A resistência não será prejudicada quando materiais adequados forem utilizados e possibilitarem uma distribuição de tensões uniforme em toda a seção transversal dos corpos-de-prova.

2.4.2.2. Resistência à Tração

Como mencionado no item anterior, a resistência à compressão do CAD apresenta uma taxa de crescimento alta para as idades iniciais, se comparada à do concreto convencional. Verifica-se essa mesma característica para a resistência à tração.

Autores como De Larrard & Malier citados por Costenaro (2003, p.53) observaram que o concreto atinge o valor máximo de resistência à tração por volta dos 14 dias de idade, ao contrário do valor da resistência à compressão, que mesmo após os 14 dias continua a crescer, podendo ainda aumentar de 10 a 20 % do seu valor.

Os ensaios citados pelo ACI 363 R (1992, p.15) concluíram que, para concreto com baixa resistência, a resistência à tração na compressão diametral pode chegar a 10% da resistência à compressão, mas para resistências maiores (acima de 84 MPa) pode ser reduzido para 5%. A resistência à tração na compressão diametral observada é 8% maior para concreto feito de agregado britado do que feito de seixo rolado. Além disso, a resistência à compressão diametral fica em torno de 70% da resistência à flexão aos 28 dias.

Segundo Dal Molin (1995, p.168-173), o principal fator que afeta a resistência à tração por compressão diametral é a quantidade de sílica ativa empregada na mistura, e quanto ao efeito de cura (úmida e ambiente), este apresenta influência inferior sobre as propriedades mecânicas do concreto. Observa-se que o efeito da sílica ativa (adição de 10% em relação à massa de cimento) provoca um aumento da resistência à tração por compressão diametral de 22,5%, enquanto que a cura úmida possibilitou um aumento de apenas 5% em relação à cura ambiente. Entretanto, o tratamento estatístico analisa essa variação como significativa.

2.4.2.3. Módulo de Elasticidade

Para pastas de cimento com baixas relações água/aglomerante, a ligação interfacial entre agregado e a pasta de cimento é normalmente alta e as propriedades elásticas do agregado se tornam importantes no desempenho do concreto. Almeida (1990) apud Sponholz (1998, p.11) comentam que enquanto alguns pesquisadores indicam que sejam necessários altos módulos de elasticidade para obter CAD, outros recomendam módulo de elasticidade semelhante a pasta do concreto, para não criar diferença de concentrações de tensões ao redor do agregado.

A maioria das normas existentes apresenta formulações que relacionam módulo de deformação com resistência à compressão, cuja validade tem sido comprovada para concretos convencionais. Ao elevar a resistência para patamares superiores a 50 MPa, parece ter um consenso na bibliografia de que as equações não mais podem ser aplicadas, pois superestimam os valores calculados de módulo de deformação (CARRASQUILLO et al., GUTIÉRREZ e ACI 363 R 92 apud DAL MOLIN, 1995, p.62).

Aïtcin (2000, p.539) comenta que a resistência não seja a única propriedade que torna vantajoso o uso do CAD, pode-se estabelecer uma relação direta entre as características da microestrutura da matriz, que determinam a resistência e outras propriedades importantes, tais como a durabilidade.

2.4.2.4. Durabilidade

A durabilidade do concreto é controlada pela sua permeabilidade e porosidade. Com a redução da permeabilidade e da porosidade, o concreto torna-se mais resistente aos ataques dos agentes agressivos. Para isso é preciso que os concretos possuam uma estrutura densa e tão impermeável quanto possível, com um sistema de poros descontínuos, conseguido através de uma baixa relação água/aglomerante.

Além da especificação da baixa relação água/aglomerante para a obtenção de um CAD durável, a cura do concreto também é importante. Tanto que, se ocorrer vibração excessiva, que gera exsudação interna, quanto uma secagem prematura na superfície do concreto, uma rede de capilares poderá aparecer na superfície do concreto, constituindo um caminho fácil à penetração de agentes agressivos (AÏTCIN, 2000, p.544-545).

A permeabilidade quanto ao ingresso de cloretos no concreto talvez seja o fenômeno mais arruinador em estruturas construídas com concretos de resistência normal, pois modificam a microestrutura do concreto e corroem as armaduras. A penetração dos íons cloretos desenvolve-se pelas microfissuras até ocorrer o lascamento do recobrimento do concreto. Em CAD, devido ao refinamento da porosidade capilar, a penetração dos íons cloretos é tão baixa que é quase impossível a corrosão de armaduras de aço não protegidas.

No que se refere à resistência à abrasão, é outra característica extremamente melhorada em relação ao concreto convencional. É diretamente proporcional a resistência à compressão e é influenciada pela natureza do aglomerante e do agregado. Neville (1997, p.517-519) comenta que a boa resistência à abrasão do concreto não é somente devido a alta resistência à compressão do concreto, mas também devido à boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz, que impedem o desgaste da superfície.

Martins (2005, p.104) e Rossignolo (2003, p.114) fizeram um estudo com concreto de alto desempenho um adicionando borracha de pneu e o outro com látex de estireno butadieno (SB) respectivamente, ambos obtiveram valores altos de resistência ao impacto, em relação aqueles sem adição.

Quanto à resistência ao fogo, a baixa permeabilidade do CAD não permite a saída do vapor formado pela água da pasta de cimento hidratada, gerando pressão de vapor que pode conduzir à fragmentação do concreto. Em relação ao CAD com Borracha quanto à resistência ao fogo, pode vir a colaborar para a saída de vapor d'água

e evitar a fragmentação do concreto, todavia é preciso fazer um estudo de toxicidade devido à liberação de enxofre.

3. INFLUENCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO

3.1. DEFINIÇÃO

Segundo a NBR 12653 (1992) e ASTM C 618 (1978), o termo pozolana ou material pozolânico se aplica àqueles com pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, quando finamente divididos e em presença de água, são capazes de reagir com hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação dos minerais – silicatos – que compõem o cimento liberando com ele e fixando-o à temperatura ambiente (SANTOS, 1997, p.7).

As pozolanas desempenham um significativo papel quando empregadas em substituição ao cimento Portland, aumentando a resistência mecânica do concreto, tendo em vista que os mais importantes mecanismos que agem na microestrutura da pasta de cimento são: a mudança na estrutura dos poros em função do refinamento proporcionado pelas reações pozolânicas (atividade pozolânica) e o tamponamento e obstrução dos poros, fissuras e vazios devidos à porção fina dos grãos (efeito fíler) (RIBEIRO et al., 2005, p.208).

De acordo com Silveira (1996, p.27) adições minerais são materiais com propriedades pozolânicas e/ou cimentíceas, adicionados ao concreto, antes ou durante da mistura, em quantidades que variam geralmente entre 5 e 100% do peso do cimento. O seu emprego pode ser feito de duas formas distintas:

- substituição de parte do cimento, visando a redução de custo e;
 - como adição em percentuais variáveis em relação ao peso de cimento, o que na atualidade consiste na forma mais empregada, geralmente com o uso concomitante de aditivos superplastificantes.
-

As pozolanas podem ser classificadas como materiais naturais que não necessitam de tratamentos e que levam a modificações químicas e mineralógicas (rochas vulcânicas, terras diatomáceas, argilas calcinadas), e como materiais artificiais são originadas de transformações químicas (cinza volante, sílica ativa, escória granulada de alto-forno, cinza de casca de arroz).

O termo subprodutos industriais refere-se aqueles materiais que são secundários nas indústrias produtoras e que podem ou não sofrer algum tipo de processamento. Segundo Cincotto (1988) apud Silva (2004, p.6) existe uma distinção entre os termos resíduos e subproduto. A denominação resíduo é circunstancial, referindo-se a um material acumulado, sem destinação; a partir do momento que apresente uma aplicação qualificada, passa a ser um subproduto.

3.2 A CINZA DA CASCA DE ARROZ (CCA)

3.2.1 Considerações Iniciais

A tecnologia moderna está intimamente ligada ao desenvolvimento de materiais alternativos, onde, nos dias atuais, a premissa básica é à busca do desenvolvimento sustentável. A indústria da construção civil depara-se com grande potencial na inserção dos resíduos como materiais de construção, tornando-os como subprodutos, reduzindo problemas relacionados aos aspectos ambientais e sociais, através da utilização de sistemas de reciclagem e da busca da sustentabilidade dos processos de produção. Segundo Prudêncio Jr. et al. (2003, 240-261) a incorporação de resíduos industriais ao concreto, tais como a Cinza de Casca de Arroz (CCA), pode ser uma importante forma de conduzi-la a uma finalidade nobre, ambientalmente correta, tornando uma das soluções para o aproveitamento de subprodutos poluentes.

A cinza de casca de arroz (CCA) é um subproduto das indústrias beneficiadoras de arroz, proveniente da combustão da casca de arroz utilizada como fonte energética para secagem e parboilização dos grãos. Mais recentemente, com a crescente crise de energia, tem sido incentivada a utilização de biomassa como combustível em usina termoeletrica sendo esta uma forma alternativa e eficiente de geração de energia elétrica minimizando a dependência nacional em relação às usinas

hidrelétricas. Principalmente no sul do país, a geração de energia elétrica através de biomassa vem ganhando impulso nos últimos anos. Várias indústrias de beneficiamento de arroz já instalaram usinas termoelétricas que utilizam o subproduto casca de arroz como combustível para geração de vapor e energia. Diante deste contexto, são produzidas CCAs tanto sem controle da temperatura (CCA residual), como com controle da temperatura, sendo considerada um resíduo produzido em grande quantidade e sem destinação pela indústria e cuja deposição final é um grave problema ambiental.

O estado do Rio Grande do Sul é um dos maiores produtores nacionais de arroz e, segundo dados do IBGE (2006), a produção de arroz no país foi estimada em 11.535.816 toneladas. Considerando-se que a casca equivale a 20% do grão em peso, e que após a sua combustão completa, se obtém em média 20% de cinza, estima-se que a quantidade de 461.432 toneladas deste resíduo serão geradas na safra de 2006 no país.

As possibilidades de aproveitamento da casca de arroz e da cinza da casca de arroz vem sendo objeto de estudo, onde trabalhos apontam soluções para a utilização deste subproduto principalmente na indústria da construção.

No Brasil, o aproveitamento da cinza de casca de arroz como material suplementar de cimentos e concretos têm despertado o interesse de vários pesquisadores, destacando-se trabalhos mais recentes como os de Isaia (1995), Silveira (1996), Prudêncio e Santos (1997), Gava (1999), Dafico (2001), Pouey e Dal Molin (2001), Libório (2002), Rêgo et al. (2002), Akasaki e Silva (2004), entre outros.

A Figura 2 Figura 2. **Organograma de utilidades da cinza de casca de arroz.** apresenta um organograma de utilidades da casca de arroz, onde demonstra-se a potencialidade deste produto (DELLA, 2001, p.779).

Similarmente à cinza volante, a cinza da casca de arroz pode ser utilizada na estabilização físico-química de solos arenosos. Em recente trabalho, Basha et al. (2005, p.453) investigaram a influência da substituição parcial de cimento Portland pela cinza da casca de arroz no comportamento de um solo areno-siltoso tratado com cimento Portland. Os resultados evidenciaram que a substituição parcial diminuiu significativamente a perda da resistência com a demora na compactação do solo.

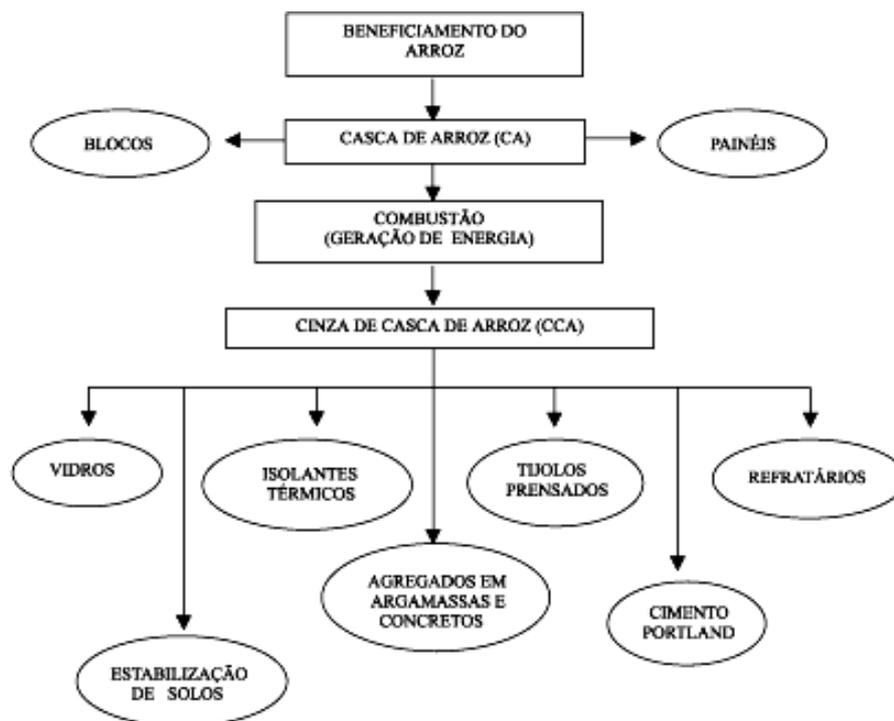


Figura 2. Organograma de utilidades da cinza de casca de arroz.

Fonte. DELLA (2001).

CCA é uma pozolana extremamente atrativa para ser utilizada na confecção de concretos, especialmente quando obtida pela combustão controlada da casca, tendo como característica uma alta atividade pozolânica. Exceto a cinza de casca de arroz, nenhum outro material pozolânico, incluindo-se a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias. Isto abre as portas para o uso de misturas de cinza volante e outras pozolanas normais como a CCA, com a última contribuindo para o ganho de resistência devido o efeito de empacotamento (MEHTA, 1992, p.419-443).

3.2.2 Características da CCA

O arroz é uma das plantas que contém grandes quantidades de silicatos, principalmente na casca. A casca é constituída de aproximadamente 40% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica (MEHTA & PITT, 1974, p.45-56). Aparentemente, a sílica é transportada a partir do solo pela planta como ácido monossílico, o qual concentra-se na casca e no caule da planta por evaporação da água e, finalmente, se

polimeriza para formar a membrana sílico celulósica (HOUSTON, 1972 apud SILVEIRA, 1996, p.39).

A casca de arroz quando sofre a combustão, 20% da casca é convertida em cinza, sendo que a lignina e a celulose podem ser removidas, permanecendo uma estrutura celular, porosa, com alta superfície específica (50 a 100 m²/g), e grande quantidade de sílica (chegando a 95%).

Vários autores citados por Silva (2004, p.11) comentam que após o processo de combustão, a cinza de casca de arroz apresenta uma composição química entre 74 a 97% de sílica, independente do tipo de queima a que foi submetida.

Na verdade o que se observa é que as condições de temperatura e tempo de queima propiciam a formação de proporções relativas de sílica na forma polimórfica (estruturas cristalinas diferentes: quartzo, tridimita e cristobalita) e amorfa (vítrea).

Segundo Della et al. (2001, p.780) quando a temperatura de queima da CCA é baixa ou quando o tempo de exposição da mesma a altas temperaturas é pequeno, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa. Ou seja, quanto menos tempo a cinza ficar exposta a uma elevada temperatura, menos cristalização ocorre.

Diversos autores, entre eles Metha e Pitt (1976) apud Silveira (1996, p.42) diz que quando a combustão ocorre com temperatura entre 450 e 500° C, a sílica é ativa e está na fase amorfa. Com o aumento da temperatura de aproximadamente de 600° C, surge algumas fases cristalinas e quando a temperatura se eleva acima de 800° C produz sílica cristalina.

Costenaro (2003, p.60) relata que produzem cinza de casca de arroz cuja combustão ocorre com temperatura de 300° C, na fase amorfa, num período de 2 horas. Já para a obtenção da sílica de casca de arroz este material é recolocado no forno e queimado a 6 horas, a uma temperatura de 600° C.

A Figura 3 mostra uma micrografia, com ampliação de 1000 vezes, de uma seção transversal da cinza de casca de arroz produzida em laboratório, em combustão controlada (temperatura de 700° C) e com extremo cuidado no manuseio para se preservar a estrutura silicosa da casca (DAFICO, 2001, p.2). Na parte superior da Figura 3, uma epiderme corrugada e densa é claramente visível. Segue-se logo abaixo, uma estrutura em tubos e depois o parênquima, estrutura celular com paredes muito finas.

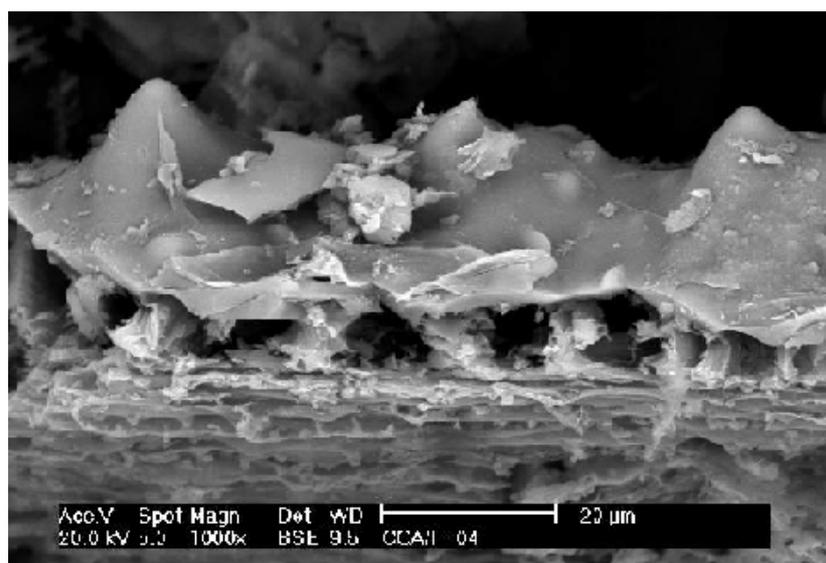


Figura 3. Micrografia da cinza de casca de arroz - estrutura original de sílica amorfa.
Fonte. DAFICO (2001).

A diferença básica entre a CCA residual e a CCA produzida com a temperatura de queima controlada é o teor de material amorfo nas cinzas. Nota-se que praticamente todos os autores pesquisados são unânimes com relação ao aparecimento de fases cristalinas na sílica contida na cinza da casca de arroz queimada a elevadas temperaturas, especialmente acima de 500°C, o que é evidente ao se analisar difratogramas de raios x das amostras analisadas (REGO, 2001 apud REGO, 2005, p.901).

De acordo com os estudos realizados por Pouey & Dal Molin (2002, p.14), a cinza queimada em processo controlado (amorfa) pode ter desempenho no concreto superior à cinza residual - cristalina (sem controle de queima).

As variações nas características morfológicas e físicas das cinzas de casca de arroz provenientes de diferentes processos de queima são mostradas no diagrama da Figura 4, proposto por Hara et al e apresentado por Sensale (2000, p.3).

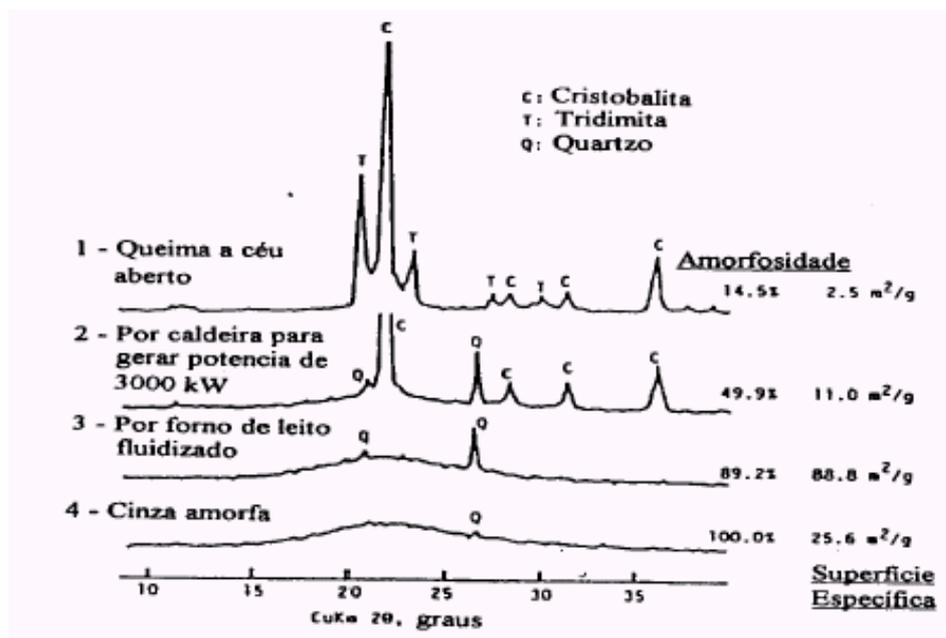


Figura 4. Características morfológicas e físicas da cinza de casca de arroz provenientes de diferentes processos de queima.

Fonte. SENSALÉ (2000).

Existem outros fatores que influenciam a pozzolanicidade da CCA, como o alto conteúdo de sílica, área superficial elevada e diâmetro médio (dependendo do grau de moagem) geralmente inferior a 45 μm .

Quando a cinza é queimada a altas temperaturas possui área superficial pequena. A tendência ao decréscimo da área superficial com o aumento da temperatura está relacionada com o fato das partículas sofrerem fusão e agregarem-se umas as outras. Então, para uma melhor condição de pozzolanicidade da CCA queimada sem controle de temperatura, é necessário que a mesma passe por um processo de moagem para reduzi-la a um material mais fino (SILVA, 2004, p.13).

Um outro fator influente na qualidade da CCA está relacionado com o teor de carbono, os quais também dependem do processo de combustão.

A cinza pode apresentar colorações que variam entre o preto, o cinza e o branco rosado. As mudanças de cor estão associadas com o processo de combustão e com as transformações estruturais que ocorrem no material frente à variação da temperatura. Quanto mais escura maior o teor de carbono, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada. A cor branca é uma indicação de uma completa oxidação do carbono da cinza.

Dafico (2001, p.76) estudou a qualidade da cinza em forno de leito fixo com temperatura limitada a 700° C para se evitar a cristalização, produziu cinzas de casca de arroz com baixos teores de carbono (cinzas brancas) ou reduziu os teores de carbono de cinzas já existentes, obtendo cinzas com médios teores de carbono (material de cor cinza), e com altíssima superfície específica.

Vários autores citados por Isaia (1995) apud Pouey & Dal Molin (2002, p.5), estudaram a questão dos parâmetros de queima:

- Hwang e Wu (1989) apresentaram as propriedades físicas e mecânicas das pastas e argamassas de cimento com cinza de casca de arroz, queimadas entre 400 e 1200 °C;
- Boateng e Skeete (1990) entendem que a temperatura de queima deve manter-se entre 800 e 900°C para a cinza apresentar-se amorfa e reativa;
- Sugita et al. (1993) obtiveram maior atividade pozolânica para temperaturas inferiores a 600 °C e superiores a 500 °C e por tempo não superior a 60 minutos.

Para estes autores, a melhor temperatura de queima encontra-se na faixa entre 400 e 660 °C.

Ferreira (1997, p.100-110) constatou que existe uma significativa influência da temperatura de queima sobre o diâmetro médio, sobre a superfície específica e sobre a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz com o cimento Portland. Avaliando amostras de cinza da casca de arroz queimadas à 800° C e 1100° C e moídas em tempos de 1,5 e 3 horas, a autora observou um crescimento da superfície específica, com o aumento do tempo de moagem e com a diminuição da temperatura de queima.

A Figura 5 mostra a influência do tempo de moagem de cinzas queimadas em distintas temperaturas, na superfície específica, segundo diversos autores. As cinzas obtidas em temperaturas mais baixas (560° C e 700° C) apresentaram teores de carbono de 12% e 1,3%, respectivamente. Nota-se que existe uma tendência do crescimento da superfície específica com o aumento do tempo de moagem e a diminuição da temperatura (SILVEIRA, 1996, p.47).

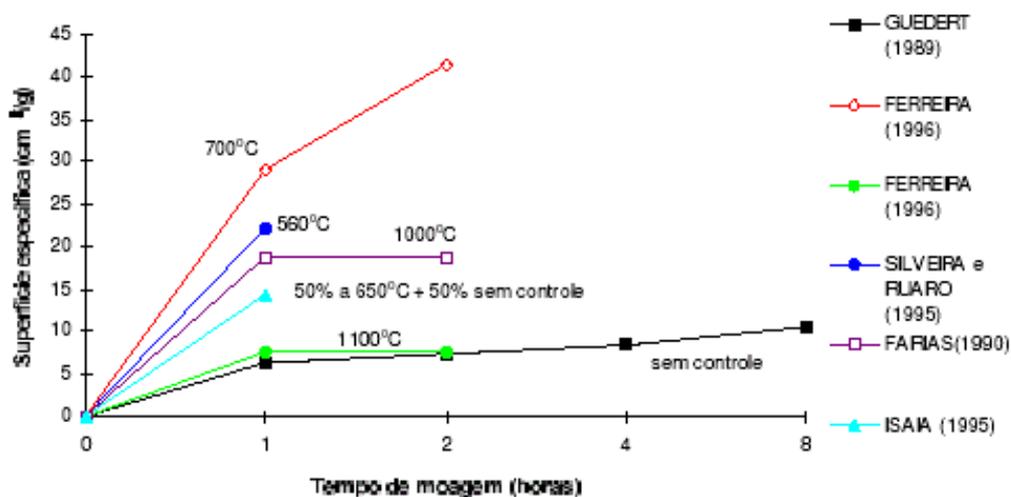


Figura 5. Influência do tempo de moagem na superfície específica da CCA.

Fonte: SILVEIRA (1996).

Santos (1997, p.68) utilizando cinzas de casca de arroz residuais, produzidas por diversos tipos de queima, sem controle de temperatura e tempo de exposição, constatou variações nas características das cinzas; verificou também, que diferentes tempos de moagem levaram a diferentes superfícies específicas do material, concluindo que cada cinza de casca de arroz produzida por um processo de queima possui seu tempo de moagem ótimo para atingir maior pozolanicidade e resistência à compressão (estudo em argamassa). E ainda observaram que aumentando o tempo de moagem da cinza há uma melhora significativa nos resultados dos ensaios e que a resistência à compressão da argamassa é maior com um teor de substituição de 15%.

Silva (2004, p. 71-72) estudou o efeito do tempo de moagem da cinza (amorfa) na resistência à compressão de argamassas. O autor observou que para 30 minutos de moagem há uma melhora significativa nos resultados dos ensaios, e que a resistência à compressão da argamassa é maior com um teor de substituição entre 5% e 10%. O pesquisador também observou que para o tempo de moagem maior ou menor do que 30 minutos há uma redução nos resultados.

O estudo realizado sobre o efeito do tempo de moagem mostrou que após um certo tempo, mesmo com o aumento da superfície específica do material, a resistência à compressão de argamassas começa a diminuir, apresentando melhores resultados nas

amostras de cinza com diâmetro médio das partículas em torno de 7 a 8 microns (PAYÁ et al., 2000).

Em seu estudo, Rêgo et al. (2002, p.13) utilizou uma cinza produzida sem controle de temperatura com diâmetro médio de 15,19 microns, e alcançou um bom índice de pozolanicidade na ordem de 85% e destacou ainda que a finura pode ser tão importante para a reatividade da cinza quanto a sua amorficidade.

Isaia (1995) citado por Gava et al. (1999, p.10-11) estudou os efeitos das combinações isoladas e binárias de cinza volante e cinza de casca de arroz e observou que, além das características físicas das pozolanas, os teores de adição influem de forma decisiva na sua pozolanicidade. Ressaltando, a utilização de um único teor de substituição de pozolana e a possibilidade de variação na relação água/aglomerante no ensaio de pozolanicidade atrapalha a classificação das pozolanas. Os autores sugerem que seria mais interessante avaliar as pozolanas com os materiais, tipos de cimentos que serão utilizados, teores adicionados ou substituídos e forma de cura direcionando os ensaios para a real finalidade do emprego das pozolanas.

Outros autores, como (ANWAR et al., 2000, DAFICO et al., 2000 apud SILVA, 2004, p. 14), também mostraram os benefícios da moagem da cinza residual sobre a resistência mecânica do concreto e também sobre a sua durabilidade, sempre associados a uma certa dosagem de adição ou substituição do cimento.

3.3 A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CCA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Alguns pesquisadores notaram a influência dos teores de adição ou substituição do cimento pela CCA e suas conseqüências nas propriedades de concretos comuns e de elevado desempenho. Os resultados obtidos sobre as propriedades do concreto são normalmente considerados satisfatórios, porém diversos fatores foram analisados pelos pesquisadores para determinar o melhor teor.

Entre as propriedades do concreto beneficiadas com adição de CCA estão as relacionadas com a resistência mecânica e a durabilidade. Tanto o efeito químico da atividade pozolânica como os efeitos físicos, relacionados com o tamanho das partículas favorecem não só a resistência mecânica como também a permeabilidade, o grau de

hidratação, a resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque a sulfatos, que também continuam sendo objeto de pesquisa.

3.3.1. Resistência à Compressão

Hoppe et al. (2005, p.939) estudou a influência do teor CCA sobre resistência à compressão do concreto, nas idades de 28 e 91 dias. Foram investigadas as misturas com as relações a/agl de 0,35, 0,50 e 0,60, com os respectivos teores de 10%, 20% e 30% de CCA. Os pesquisadores observaram que a mistura de referência e relação a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, houve um acréscimo nos valores de resistência à compressão, dos 28 para 91 dias, de 26%, 9% e 27% respectivamente. Da mesma forma, para as amostras compostas com 10% de cinza de casca de arroz, os acréscimos foram de 12%, 32% e 22% e, para os teores de substituição de 20% e 30% de cinza de casca de arroz, esses acréscimos foram de 19%, 20%, 26% e 17%, 30% e 25%, respectivamente.

Tutikian et al. (2005, p.367-370) dosou duas famílias de concretos auto-adensáveis (CAA), sendo uma com fino pozolânico (cinza de casca de arroz) e outra com fino não pozolânico (fíler calcário), comparando a evolução da resistência à compressão e o consumo de cimento. Os autores concluíram que o CAA com fíler calcáreo alcançou valores de resistência à compressão superiores que o CAA com cinza de casca de arroz, em igualdade de relação água/aglomerante, e ainda o CAA com cinza de casca de arroz pode chegar aos mesmos valores de resistência à compressão que o CAA com fíler calcáreo com relação água /aglomerante e consumo de cimento menores.

Ribeiro et al. (2005, p.209-215) estudou a influência da adição de cinza de casca de arroz, produzida sem controle de temperatura, em substituição à parte do cimento, na confecção de concretos para avaliação da resistência à compressão. As relações água/cimento utilizadas foram de 0,4 e 0,5, com os teores de substituição de cimento por cinza em 5% e 10%. Os resultados encontrados mostraram que a adição de CCA aumentou a resistência à compressão conforme os teores e para um fator alto de água/cimento apresentam valores de resistência à compressão satisfatória.

Tashima et al. (2004, p.5-8) utilizou em seu estudo cinza residual amorfa no concreto, em teores de substituição 5, 10 e 15%. Os resultados sobre a resistência à compressão mostram um melhor desempenho para o teor de 5% aos 28 dias, chegando a

um ganho de resistência de 24%. Segundo os autores, a partir de 10% de adição da CCA os valores de resistência à compressão começam a diminuir.

Hasparyk et al. (2003, p.1-17) estudaram a influência dos teores de CCA moída e in natura no concreto sobre a resistência à compressão, nos teores de 8%, 10%, 12%, 16% e 20%. Os resultados mostram que os concretos com CCA moída, em geral, apresentaram resistência à compressão superiores aos de referência e dos concretos contemplando a CCA in natura em idades mais avançadas, sendo que empregadas nos teores de 10% e 16% proporcionaram maiores ganhos de resistência aos 91 dias (14% superior à amostra de referência). Já para os concretos contendo a amostra in natura, houve uma queda em todos os teores quando comparados com o concreto de referência e com adição da CCA moída, chegando até 26% de redução nesta mesma idade. Os autores constataram que, a alta reatividade da CCA amorfa quando moída (diâmetro em torno de 12 mm) bem como as melhorias nas propriedades do concreto - depende do teor de substituição empregado ao cimento, tornando-a uma adição pozolânica atrativa para uso em concreto.

Costenaro (2003, p.84-85) comparou o efeito de adições minerais (sílica de casca de arroz (SCA), sílica de ferro-sílico (SFS), cinza de casca de arroz (CCA)) no concreto em diferentes traços (água/aglomerante = 0,28, 0,38 e 0,48), em dosagens de 10% em substituição ao cimento, além da combinação das duas pozolanas em proporções: 5% SCA + 5% CCA. Entre os resultados obtidos com relação água/aglomerante, o crescimento ocorreu de forma mais lenta nas primeiras idades, continuando o processo de hidratação após os 28 dias, com aumentos de 20% a mais, dos 28 aos 91 dias de idade, comprovando a necessidade de um maior tempo para o desenvolvimento das reações pozolânicas. Já para os concretos de alta resistência, com a/agl mais baixa, a taxa de crescimento da resistência aos 3 dias foi de 70% a mais em relação aos 28 dias, após 28 dias, foi menor que a dos concretos convencionais.

Rêgo (2002, p.14) realizou um estudo com CCA residual sobre ensaio de resistência à compressão do concreto, nos teores de 0, 5, 10 e 20% em substituição ao cimento. Os resultados mostraram um aumento dos valores de resistência à compressão para todos os teores em substituição, em comparação ao concreto de referência, chegando a apresentar valores até aproximadamente 20% maiores para o caso de 10% de substituição, aos 63 dias. Os autores ainda constataram um aumento no índice de

resistência dos concretos com teores de substituição de 10% e 20% em relação aos valores obtidos a 28 dias, comprovando a necessidade de um tempo maior para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

Nascimento et al. (2002, p.9-11) em seu estudo com CCA sob resistência à compressão, em substituições de 5 e 10% ao cimento, também comentam que os concretos com CCA, além de apresentarem superioridade na resistência à compressão em relação ao concreto de referência houve maior perda de massa no concreto com adição de CCA, aumentando conforme se aumenta o teor de cinza na mistura. Os autores comentam que as reações pozolânicas ocorrem geralmente em idades superiores a 28 dias e que a menor quantidade de cimento hidratado não foi compensada pelo efeito microfíler das partículas finas da cinza.

Sensale e Dal Molin (2001, p.12) compararam o efeito da adição de CCA no concreto analisando dois tipos de cinza. Uma cinza amorfa proveniente dos Estados Unidos e uma outra cinza residual proveniente do Uruguai, em teores de substituição de 10 e 20%. Os autores chegaram a resultados diferentes para cada tipo de cinza com mesmo teor de substituição. Para cinza americana (amorfa) o melhor desempenho foi com 20% de substituição do cimento, enquanto que para a cinza residual o aumento de 10 para 20% diminuiu os valores de resistência. Porém, os resultados de ambas as dosagens de cinza residual mostraram um bom desempenho quando comparados ao concreto de referência.

Ainda sobre o estudo de resistência à compressão Moraes et al. (2001, p.10-13) comparou o efeito das adições de CCA e cinza volante (CV) no concreto em dosagens de 12,5, 25 e 50% de substituição do cimento, além de combinações das duas pozolanas em duas proporções: 12,5 CCA +12,5 CV e 25 CCA + 25 CV. Entre os resultados obtidos, os melhores são relacionados à dosagem de CCA em 25%, superiores aos da cinza volante na mesma dosagem e também para a combinação de 12,5% de cada pozolana, em todas as idades. Segundo os autores, o bom desempenho das misturas com relação ao traço de referência justifica maiores estudos de dosagem sobre as combinações de pozolanas.

Um estudo realizado em concreto contendo CCA, além de avaliar os resultados de resistência à compressão, em três dosagens: 10, 15 e 20%, também analisou a influência de diferentes relações água/aglomerante: 0,30, 0,32 e 0,40. Os

resultados se mostraram melhores que os traços de referência, sendo a dosagem maior a mais significativa, especialmente para o traço com menor relação água/aglomerante e maior quantidade de superplastificante (BUI e STROEVEN, 2005, p.360-366).

3.3.2. Outras Propriedades

Santos (1997 p.101-103) comenta que a cinza de casca de arroz, por sua composição, constituição e proporção em cimentos para argamassa e concreto, podem influenciar em tudo: no desenvolvimento da resistência, na exigência e retenção de água, na retração, na fissuração e fluência do concreto. Também influem na durabilidade de concretos e argamassas frente ao ataque de agentes químicos, particularmente sobre o aspecto de corrosão das armaduras. No estudo da reatividade do material deve-se considerar os fatores ligados à composição química, física e mineralógica. Com relação a CCA residual, é necessário uma atenção especial ao processo de queima, temperatura, tempo de exposição e grau de moagem.

O efeito da adição da CCA na pasta de cimento e o concreto sobre a resistência à compressão e zona de transição pasta-agregado, foram objetos de estudo dos pesquisadores (ZHANG et al., 1996, p.963-977). Os resultados obtidos mostram que na pasta a adição de CCA não se traduz em aumento de resistência comparado ao traço de controle. O inverso ocorre no concreto, devido a incorporação da CCA levar a uma redução na porosidade e na formação de $CA(OH)$ na zona interfacial, diminuindo a espessura da mesma. Segundo os autores, a presença da CCA na pasta de cimento diminui a quantidade de partículas de cimento hidratado, possivelmente por causa da aceleração da sua hidratação.

Em relação à durabilidade Sensale (2006, p.160) realizou um estudo com dois tipos de CCA amorfa e cristalina sobre a permeabilidade ao ar do concreto. Em seus resultados a autora conclui que, através do ensaio de permeabilidade o concreto com CCAs possui influência significativa do efeito fíler e das reações pozolânicas, pois o concreto com CCAs apresentaram baixa permeabilidade em relação ao concreto referência. Ressaltando que o concreto com cinza amorfa teve menor permeabilidade em relação ao concreto com cristalina.

Nascimento et al. (2002, p.13-14) estudaram o efeito da cinza de casca de arroz no concreto, sobre o ensaio de resistência à abrasão nas dosagens de 0%, 5% e 10%, e relação água/aglomerante de 0,5 e 0,6. Os autores constataram que em ambos os traços houve um aumento de perda de massa em todos os períodos do ensaio, dos concretos com 5% e 10%, em substituição, em relação às perdas de massa média apresentadas pelo concreto de referência, com 0% de substituição, aumentando à medida que se aumentou o teor de substituição.

Quanto aos efeitos dos teores de CCA no concreto sobre a reação álcali-agregado, através dos resultados obtidos na presença do vidro pirex e cimento com alto teor de álcalis, constataram-se que, para teores de CCA moída acima de 12%, as expansões geradas podem ser reduzidas a níveis aceitáveis de norma quando comparadas com a amostra de referência, sem adição de CCA (HASPARYK, 2003, p.15). Já na amostra in natura, um efeito inverso pode ocorrer, sendo necessários teores mais elevados (20%) para redução das expansões. Resultados similares foram obtidos por (HASPARYK, 1999, p.12).

Venquiaruto et al. (2001, p.12) em seu trabalho obtiveram em ensaios de carbonatação acelerado, resultados não satisfatórios para o emprego da CCA em concretos com relação a carbonatação. Os autores comentam que a adição de CCA aumentou a profundidade de carbonatação em todas as idades pesquisadas e que o aumento do teor de adição de 25 para 50% é mais prejudicial sob este aspecto. Segundo os autores, o concreto sem adição mineral possui uma reserva alcalina maior na estrutura da pasta, com as reações de hidratação produzindo maior quantidade de CH. Outro ponto destacado pelos autores é que, misturas com CCA mais fina produzem uma profundidade de carbonatação maior, devido ao fato de que as partículas mais finas são mais reativas e combinam-se mais rapidamente com o hidróxido de cálcio disponível, reduzindo a reserva alcalina da pasta.

4. BORRACHA DE PNEU

4.1. BREVE HISTÓRICO

A borracha natural é um polímero obtido da seiva da seringueira, conhecido como latex. Depois de sua coagulação e secagem, este material é aquecido e processado com outras substâncias químicas, resultando na borracha.

Criou-se na Alemanha tecnologia, para fabricar artificialmente a borracha sintética derivada do petróleo, apresentando baixa resistência ao calor e rachaduras quando submetida a mudanças rápidas de temperatura.

A borracha apresentava problemas em relação ao seu comportamento, pois tinha um aspecto pegajoso em temperatura ambiente, e plástico ao receber um esforço mecânico, se deformando permanentemente.

O pneus foram inventados em 1845 por Charles Goodyear, este descobriu casualmente o processo de vulcanização, quando deixou cair borracha e enxofre no fogão, solucionando o problema da plasticidade.

A vulcanização é a conversão da borracha através de um processo químico de ligações cruzadas, levando-a de um estado essencialmente plástico para um estado essencialmente elástico. Após o processo de vulcanização houve mudanças nas suas características como: eliminação da plasticidade e a introdução da insolubilidade.

O processo de vulcanização tornou possível a comercialização da borracha, tornando-se assim substitutos das rodas de madeira e ferro, usadas em carroças e carruagens. A borracha além de ser mais resistente e durável, absorve melhor o impacto das rodas com o solo, o que tornou o transporte mais confortável e funcional. Com o desenvolvimento da indústria automobilística no século XX, o consumo de pneus atingiu números gigantescos, tornando-os fundamental e insubstituível em nossa vida diária, tanto no transporte de passageiros quanto no de cargas.

Os pneus é constituído de 10% de borracha natural (látex), 30% de petróleo (borracha sintética) e 60% de tecidos (tipo lona) e aço, servindo para fortalecer a ainda mais a estrutura.

4.2. MATERIAIS TÍPICOS DE PNEUS E SUAS GENERALIDADES

Os pneus, hoje em dia, são feitos para durar sobre condições extremas físicas, químicas e térmicas. As más condições da maioria das estradas brasileiras exigem, cada vez mais, dos pneus e o constante aumento de frota de veículos pesados faz com que sejam cada vez mais resistentes e duráveis. O pneu apresenta uma estrutura complexa, com o objetivo de atribuir as características necessárias ao seu desempenho e segurança, são confeccionados precisamente e projetados para serem indestrutíveis. Um pneu só se torna inservível quando a lona se rompe, se tornando fisicamente prejudicado, ou não pode ser recauchutado (NOVICK e MARTIGNONI apud KAMIMURA, 2002, p.9).

O pneu é constituído de vários componentes fabricados com diversos materiais, tendo funções específicas no desempenho e uso do pneu. Basicamente, o pneu é constituído de uma banda de rodagem, parede lateral ou flanco, carcaça, entre outros (Figura 6).

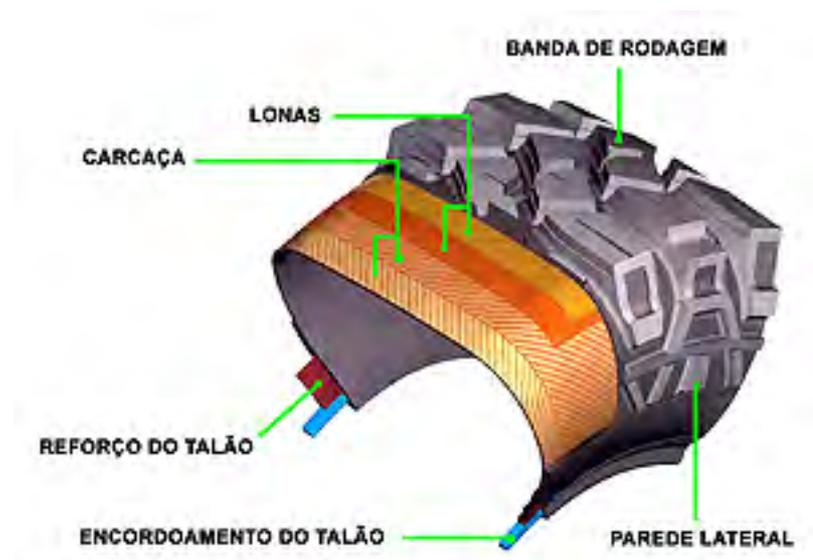


Figura 6. Influência do tempo de moagem na superfície específica da CCA.

Fonte. <http://www.pirelli.com.br/pr/pneumatici/infotck/index.htm> acessado 25/03/2005.

Dentre os tipos de reciclagem do pneu, sabe-se que uma grande parte do resíduo produzido é proveniente do processo de recauchutagem, que representa 70% da frota de transporte de carga e passageiros (CEMPRE, 2005).

Em sua maioria, o processo de recauchutagem é mecânico, realizado pela raspagem das bandas de rodagem dos pneus por intermédio de cilindros ranhurados. A raspagem é realizada para remover a borracha remanescente da banda de rodagem, configurando a carcaça no diâmetro, contorno e textura adequada.

A recauchutagem ou reconstrução de pneus consiste fundamentalmente em aproveitar a estrutura resistente do pneu gasto (liso), desde que esta esteja em boas condições de conservação, e incorporar-lhe nova borracha de piso (banda de rodagem), para que este ganhe outra vida. Neste processo é feita a raspagem mecânica do restante da banda de rodagem velha, como ilustra a Figura 7, o reparo conforme a Figura 8, para a aplicação da nova banda de rodagem, seguido da vulcanização e inspeção final.



Figura 7. Influência do tempo de moagem na superfície específica da CCA.



Figura 8. Reparo do pneu.

Fonte. <http://www.renosul.com.br/rnspro02.htm> acessado 16/05/2006.

Segundo ANIP (2000) cerca de 70% da frota de transporte de carga e passageiros utilizam pneus recauchutados. A recauchutagem de pneus gera grandes quantidades de resíduos (formatos alongados ou granular) e algumas empresas, procuram formas alternativas de reciclagem destes resíduos. A empresa Ecija Comerical Exportadora, por exemplo, exporta 1,2 mil toneladas de raspas de pneus que são utilizados em outros países para a produção de produtos como tapetes de carros, placas de pisos, composição de asfalto, entre outros.

A geração de pneus inservíveis está diretamente relacionada à frota de veículos de cada país. Nos Estados Unidos, existem gigantescos depósitos de pneus, em 2001, foram descartados 281 milhões de pneu, 75 % foram consumidos pelo mercado de resíduos de pneus (RMA, 2005).

Na Europa em 1999, estima-se que 300 milhões de pneus, mais de 2 milhões de toneladas de pneus chegam ao fim de sua vida a cada ano. No Japão, estima-se que 102 milhões de pneus foram descartados, mas atualmente zerou seu passivo ambiental (ANIP, 2000).

No Brasil foram descartados 26 milhões de pneus, sendo que apenas 45% deste material foram reciclados. Sendo sua produção em 2003, de 45 milhões de unidades de pneus (CEMPRE, 2005). Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2000), estima-se que no Brasil 10 milhões de pneus velhos estão espalhados em aterros, terrenos baldios, rios e lagos.

O pneu usado é considerado indesejável e tem se tornado um grande problema para sociedade. Um dos maiores problemas encontrados é a disposição do material não reciclado, quando depositado em lixões, aterros ou outros locais abertos, a carcaça atraem roedores e mosquitos transmissores de doenças. Quando se opta pela queima desses pneus em céu aberto, há formação uma enorme quantidade de fumaça negra e durante a queima os pneus liberam óleo que penetram e contaminam o solo e o lençol freático. Além disso, em aterros pode acontecer a lixiviação de aditivos de baixo peso molecular do interior da massa de pneu para sua superfície e da superfície para o ambiente. E esses materiais podem ser nocivos a bactérias necessárias para o solo.

Diante deste contexto, diversas entidades responsáveis pela preservação do meio ambiente vem implantando Resoluções relacionados à destinação final deste material. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o governo publicou, no Diário Oficial de 02 de dezembro de 1999, a Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que trata da destinação final, de forma ambientalmente correta e segura, dos pneumáticos.

De acordo com a Resolução fica definido que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, a partir de 1º de janeiro de 2005: para cada quatro pneus novos, deverá ser dada destinação final a cinco pneus inservíveis.

Uma das maneiras de reduzir este impacto é a reutilização de pneus, processo denominado de recauchutagem como mencionado anteriormente. Fazio e Oliveira (2000, p.3) comentam que a utilização de pneu como material reciclável surgiu em 1940 nos Estados Unidos; sendo a recuperação de energia e a recauchutagem as primeiras formas de reciclagem de pneus.

Os resíduos de borracha de pneus moídos, também podem ser empregados na fabricação de produtos mais simples, como em solas dos calçados, tubos, tapetes de carros e outros.

A borracha de pneu também pode ser usada como material de base para a indústria, pois a borracha regenerada e o pó de borracha podem ser reutilizados, após tratamentos físico-químicos.

O processo de recuperação da borracha pode ser físico ou químico. O processo físico é submetido a quebra da malha tridimensional de ligação dupla da borracha, sendo transformadas em fragmentos de baixo peso molecular, misturando facilmente com a borracha virgem durante a composição. Estando associado ao tratamento de desvulcanização após os processos termo-mecânicos e crio-mecânicos. O processo químico de recuperação da borracha geralmente envolve temperatura e pressões elevadas (MARQUES, 2005, p.17).

Segundo Sibdique e Naik (2004, p.1-7) as melhores alternativas para a destinação final dos pneus inservíveis são: uso em misturas de concreto asfáltico, incineração e reuso em borracha de pneu triturado em uma série de produtos plásticos ou de borracha. Além dessas opções existem outras maneiras de se aproveitar tal material, seja na forma de combustível para fornos de cimenteiras, como contenção de margens de rios ou recifes artificiais.

Na construção civil estão sendo desenvolvidas pesquisas para que se possa reaproveitar o material e contribuir para o desenvolvimento sustentável, incorporando-o em componentes da construção à base de materiais cimentícios.

4.3. INCORPORAÇÃO DA BORRACHA DE PNEU AO CIMENTO PORTLAND

4.3.1. Considerações Iniciais

Segundo França (2004, p.6) a construção civil é responsável por entre 15 e 50 % do consumo dos recursos naturais extraídos. No Brasil o consumo de agregados naturais somente na produção de concreto e argamassas são de 220 milhões de toneladas/ano. Devido a este elevado consumo os agregados naturais estão cada vez mais escassos. Com isso, os locais para captação destes ficam cada vez mais distantes, elevando seu custo final.

Com a necessidade que novos materiais venham substituir estes agregados, pesquisas estão sendo realizadas com a finalidade de substituir parte do agregado por borracha de pneu, contribuindo para a preservação dos agregados naturais e oferecendo um modo alternativo limpo de reciclagem para a borracha de pneu e busca da sustentabilidade dos processos de produção.

4.3.2. Trabalhabilidade

De modo geral, a adição do resíduo de borracha de pneu em concreto, argamassa, ou pasta de cimento, diminui a trabalhabilidade do material, quando este é comparado à mistura sem o resíduo.

Fattuhi e Clark (1996, p.233-236) comparam o efeito de adições de duas diferentes granulometrias (1-16mm e menores que 5mm) de borracha de pneu no concreto. Os autores afirmam que a trabalhabilidade é influenciada pelas dimensões dos agregados, pois para menores granulometrias apresenta melhor desempenho quando comparadas as granulometrias maiores.

Verifica-se que, no estado fresco, a trabalhabilidade do concreto e da argamassa é diminuída de acordo com o crescente teor de adição de borracha e, com o emprego de partículas de pequena dimensão (HUYNH et al., 1996, p.1-18).

De acordo com Khatib e Bayomy (1999, p.212) em estudo realizado com concreto, eles trabalharam com dois tipos de granulometrias: uma próxima a da areia e

outra com dimensões de 10-50mm. Foram feitos três grupos, no primeiro somente a areia foi substituída (5-100% em volume), no segundo somente o agregado graúdo (5-100% em volume) e no terceiro foi feita uma composição substituindo tanto o agregado miúdo quanto o graúdo. Eles observaram através do ensaio de abatimento do tronco de cone, que a mistura contendo borracha apresenta pior trabalhabilidade que a composição controle. E, que quanto maior a quantidade de borracha adicionada, menor é o abatimento, ressaltando que para 40% de substituição este chega próximo a zero.

Segundo Akasaki et al. (2001, p.1-9) a maior quantidade que permite uma melhor trabalhabilidade do concreto é a utilização de 20% do volume do concreto em borracha. Dessa maneira, estabelece-se uma base de quanto de borracha deve ser utilizado visando um melhor aproveitamento da mesma sem prejudicar demasiadamente sua trabalhabilidade.

No entanto, Güneyisi et al. (2004, p.3) verificaram uma redução do abatimento com o aumento da quantidade de resíduos de borracha de pneu, em concretos com baixa relação água/aglomerante, adicionados ou não de sílica ativa. Os autores mencionam que a forte influência dos resíduos de borracha de pneu sobre a trabalhabilidade do concreto depende da relação água/aglomerante praticada.

4.3.3. Propriedades Mecânicas e Durabilidade

Toutanji (1996, p.137-138) verificou que, substituindo diferentes porcentagens de borracha (25%, 50%, 75% e 100%) pelo volume de agregado graúdo no concreto, houve redução nas resistências à compressão, com o aumento da porcentagem de borracha.

Para que não haja diminuição significativa da resistência à compressão em concretos, a incorporação de fibras de borracha com granulometria na faixa de 2,38 – 0,8 mm, em concretos, deve ser feita em substituição a uma parte do volume total de agregados miúdos da mistura (AKASAKI et al., 2001, p.7).

Benazzouk et al. (2003, p.718-719) enfoca a viabilidade de reuso de vários agregados de borracha na pasta de cimento procurando melhorar a deformabilidade do composto. Um estudo das propriedades físico-mecânicas indicou redução significativa da resistência à compressão para as amostras contendo borracha de 0% a 50%. Os

autores relatam que para o mesmo peso unitário, a resistência à compressão é maior com a borracha expandida do que com a borracha compactada.

Akasaki et al. (2003, p.14-15) analisaram diferentes granulometrias do resíduo e fez substituições tanto no agregado graúdo quanto no agregado miúdo. Em seu estudo avaliaram a resistência à flexão, absorção de água e densidade no estado fresco. Os autores observaram diminuição da densidade e menor absorção de água das misturas contendo borracha. O comportamento dos corpos-de-prova em relação à resistência à flexão também foi de acordo com a literatura, ou seja, embora a resistência tenha sido menor, pode-se observar a maior capacidade de absorção de energia dos corpos-de-prova que possuem borracha de pneu.

Em estudo contendo resíduo de borracha de pneu segundo Pinto et al. (2003, p.722-723), além de avaliar propriedades de resistência à compressão e massa específica, avaliaram pastas de cimento adicionadas de resíduos de borracha quanto a sua porosidade. Utilizaram os seguintes espessuras dos resíduos de aproximadamente 0,4 mm e 1 mm e os pesquisadores concluíram que ao utilizarem 5% de pó de borracha em relação ao cimento e uma relação água/cimento de 0,5, a resistência à compressão não sofre redução significativa e quanto a massa específica tem um decréscimo. Em relação à porosidade, constatou acréscimo da mesma com a adição de pó de borracha.

De acordo com Mosca et al. (2005, p.916) analisaram com concreto com duas frações de resíduos de borracha de pneu (retidas na malha 2,40 mm e outra na malha de 1,20 mm), sendo substituída (1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%) como parte do agregado graúdo e miúdo. Em seu estudo avaliaram os ensaios de resistência à compressão em sete dosagens, resistência à tração por compressão diametral e na flexão (duas dosagens). Os pesquisadores notaram perda de resistência à compressão com o aumento da substituição, respectivamente a 9%, 23%, 39%, 40%, 68% e 75% em relação ao concreto de referência. Estes últimos ensaios os resultados mostraram que as substituições de 5% e 6% variações pequenas.

Estudos com argamassas realizadas por Turatsinze et al. (2005, p.223-225). Foram utilizados agregados com dimensão máxima de 4mm e fibras de aço de 13mm de comprimento para a composição das argamassas. A substituição foi feita em volume de agregados em 20% e 30%, enquanto o uso de fibras metálicas foi feito em 20 e 40 kg/m³. Segundo os autores comentam que, embora ocorra a perda da resistência à

compressão, a adição de borracha retarda o surgimento de fissuras, assim possibilitando maior capacidade de deformação para as argamassas antes da localização das microfissuras, e associados com as fibras metálicas, as argamassas apresentam maior ductilidade. Os autores ainda sugerem que sejam avaliadas argamassas compostas com resíduos de borracha de diferentes granulometrias, cujo principal causa de fissuras em argamassas são provenientes da retração.

Diversos estudos contendo resíduos de borracha de pneu em pastas de cimento, argamassas ou em concretos, comprovam queda nas propriedades mecânicas devido à falta de aderência com a matriz de cimento, alguns autores sugerem o tratamento superficial do resíduo.

Rostami et al. (1993, p.399) utilizaram no tratamento do resíduo várias substâncias tais como: água, uma mistura de água e tetracloreto de carbono (CCl_4) e mistura de água e limpador látex. Os resultados mostraram que o concreto contendo fibras lavadas obteve resistência 16% maior em relação ao concreto com fibras sem tratamento. Os autores comentam que a maior taxa de melhora na resistência à compressão (aproximadamente 57%) foi obtida com o tratamento com CCl_4 .

O tratamento utilizado por Segre e Joekes (2000, p.1423-1424) foi à lavagem da borracha de pneu com solução saturada de hidróxido de sódio realizaram os seguintes ensaios: absorção de água, resistência à flexão, módulo de elasticidade e resistência á abrasão. Os autores concluíram que, o tratamento superficial da borracha de pneu com solução saturada de NaOH aumentou significativamente a aderência entre as partículas e a matriz de cimento. A melhor aderência da borracha tratada com solução de hidróxido de sódio à pasta de cimento. Os pesquisadores relatam que embora tenha sido observada perda na resistência à compressão nas misturas contendo borracha, esta foi menor que a obtida em outros trabalhos, mostrando a eficiência do tratamento. A abrasão dos corpos-de-prova contendo borracha tratada foi equivalente ao sem resíduo e superior em relação aos corpos-de-prova com borracha sem tratamento.

Souza et al. (2004, p.918) analisaram o efeito da fibra de borracha no concreto, nas dosagens 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, substituindo a areia. Os autores observaram que a substituição de areia por resíduo de borracha na faixa de 5% a 25% implicou na diminuição de 1% a 10% do módulo de elasticidade do concreto com idade de 28 dias,

atingindo uma diminuição de valor em torno de 22% para uma porcentagem de resíduo de borracha de 25%.

De acordo com Güneyisi et al. (2004, p.4-5) utilizaram resíduos de borracha de caminhões no concreto, com granulometria na faixa de 4mm e 20mm, em dosagens de 2,5%, 5%, 10%, 15%, 25% e 50% em parte iguais em volume dos agregados, além da sílica ativa. Observaram que o uso de sílica ativa ajudou na redução da perda de resistência apresentada com adição de resíduos de borracha, aumentando em até 43% a resistência dos corpos-de-prova adicionados de borracha, enquanto o módulo aumentou 15%. Foi constatado que o peso específico de até 77% mais baixo que o do concreto controle para substituição de 50%. Os autores comentam que até 25% de substituição do agregado natural pelo resíduo é viável, devido a grande perda na resistência. O comportamento dos corpos-de-prova em relação a resistência à flexão também foi de acordo com a literatura, ou seja, embora a resistência tenha sido menor, pode-se observar a maior capacidade de absorção de energia dos corpos-de-prova que possuem borracha de pneu.

O concreto de alta resistência tem maior tendência de deslocamento explosivo quando submetido a aquecimento rápido, como no caso do fogo. Este comportamento é devido principalmente a sua baixa permeabilidade que resulta em um acúmulo de pressão dentro da pasta de cimento.

Assim Hernandez-Olivares et al. (2004, p.111-116) estudou o comportamento da incorporação de borracha pneu no concreto de elevado desempenho em relação ao fogo, a fim de amenizar algumas de suas características como, por exemplo, a ruptura brusca e ao lascamento. Foram feitas substituições de 3%, 5% e 8% em volume. Entre os resultados obtidos, os autores concluem que a adição do resíduo de borracha além de diminuir a resistência à compressão, diminui também a forma de ruptura frágil do concreto de alta resistência e a ocorrência ao lascamento. Ensaio termogravimétrico também indicam que o aumento da quantidade de borracha diminui a temperatura alcançada a uma certa distância da superfície exposta, podendo dessa forma, ser diminuído o cobrimento da armadura ou maior segurança em elementos estruturais contra fogo.

O modo de ruptura dos corpos-de-prova contendo borracha é mais dúctil quando comparado às amostras controle. Isto, segundo Toutanji (1996, p.137), Taha et

al. (2003, p.5-6) e Siddique et al. (2004, p.4-5) é devido a maior capacidade de absorção de energia do compósito contendo borracha.

Siddique et al. (2004, p.1-7) fez um apanhado geral das pesquisas realizadas nos Estados Unidos para utilização da borracha do pneu na construção civil e observaram que, quando se incorpora a borracha no concreto, há uma diminuição da resistência à compressão e das características mecânicas do concreto. Este comportamento foi observado por todos os pesquisadores que estudam esta incorporação. Foram observadas também algumas características desejáveis, tais como densidade mais baixa, resistência mais elevada ao impacto, ductilidade, realçando ainda uma melhor isolamento acústica e térmica.

Hernandez-Olivares et al. (2002, p.1595) relatam que a adição de fibras de polipropileno e resíduos de borracha de pneu (tipo fibra) em concreto, pode provocar defeitos na estrutura interna, 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 os pesquisadores esta característica pode ser explicada devido a grande diferença na rigidez dos materiais, uma vez que a matriz de cimento possui módulo de elasticidade de 30GPa, valor cerca de 10 vezes superior ao da borracha.

A incorporação de borracha de pneu na composição de materiais a base de cimento além de ajudar no aumento da resistência à fissuração contribuiu ainda na diminuição na absorção por capilaridade, resultando numa maior durabilidade (BONNET, 2004, p.247-250).

Bennazouk et al. (2004, p.28) estudando o comportamento do concreto com borracha em presença de água e examinando as propriedades hidráulicas, determinou que a presença de partículas de borracha reduz a difusividade hidráulica através da diminuição da absorção de água. Da mesma forma, a permeabilidade ao ar foi reduzida consideravelmente. Estes resultados demonstram a importância do uso da borracha para a durabilidade do concreto em ambientes agressivos.

A resistência à abrasão é um dos maiores indicadores de durabilidade, segundo Marques (2005, p.88), seus ensaios demonstraram elevação ao desgaste do concreto contendo borracha de pneu, em relação ao concreto controle.

Meneguini (2003, p.77) desenvolveu ensaio de resistência à abrasão e seus 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 resistência ao impacto realizados em concretos com borracha, observa-se que a metodologia é simples, a qual é baseada em um peso submetido à queda livre, de altura conhecida, revelando dificuldades na quantificação precisa de resistência dos materiais ensaiados, ficando limitada na maioria das vezes a análise comparativa superficial.

Segundo os autores Fattuhi e Clark (1996, p.235) em seu estudo de concreto contendo resíduos de borracha de pneu sobre o ensaio de resistência ao impacto, observaram que a capacidade de resistência ao impacto dos concretos com adição de resíduos de borracha de pneu foi comparável ao concreto de referência.

Ainda sobre resistência ao impacto, em vigas de concreto com adição de fibras industrializadas, baseado na absorção de energia destas quando sujeitas a carregamentos estático, os autores Hughes e Al-Dafiry (1995, p.243-244), determinaram excelentes resultados, necessitando de equipamentos com maior sofisticação, com controle de carregamento e deformação, possibilitando total difusão desta prática.

O próximo capítulo apresenta o programa experimental, onde desenvolveu um estudo sobre o comportamento das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto alto desempenho com incorporação de resíduos CCA e borracha de pneu.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa de ensaios experimentais da presente pesquisa foi considerado com o intuito de avaliar a incorporação da cinza de casca de arroz no concreto de alto desempenho com resíduos de borracha de pneu. Segue o desenvolvimento de forma resumida das etapas do programa experimental:

- Na primeira etapa verificou-se a influência das características físicas da CCA Cristalina sobre a resistência à compressão em argamassa, com o objetivo de se determinar a sua granulometria e faixa ideal de dosagem. E também avaliou-se o índice de consistência, e determinou-se a caracterização físico-química e sua morfologia. Quanto a CCA Amorfa, sua granulometria e faixa ideal de dosagem foram determinadas na pesquisa de SILVA (2004).
 - Na segunda etapa consistiu em avaliar a influência dos resíduos na composição do concreto de alto desempenho, a cinza de casca de arroz (Amorfa e Cristalina) e a borracha de pneu. Para tanto, fez-se um estudo de otimização dos materiais utilizando CCA Cristalina na composição do CAD variando sua porcentagem (0%, 5% e 8%) e por meio da adição de resíduos de borracha de pneu em porcentagens e granulometrias pré-determinadas. Analisou-se tais composições quanto à evolução da resistência à compressão e a trabalhabilidade, quando adicionada CCA Cristalina, selecionando aquela com melhor desenvolvimento para que juntamente com os resíduos de borracha de pneu e a composição de CAD fossem analisadas em outros tipos de ensaios. Após pré-determinar a composição do CAD com adição de cinza Cristalina, repetiu-se a mesma composição do CAD utilizando CCA Amorfa e outra com sílica ativa, alterando o teor de aditivo de 1,0% para 1,2% para essas duas composições; e um outro CAD sem incorporação mineral, reduzindo o teor de aditivo para 0,8%. Assim, partiu-se para a análise dos ensaios tais como: trabalhabilidade, teor de ar incorporado, massa específica,
-

resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão, resistência ao impacto e resistência à abrasão.

5.1. ESCOLHA DO CIMENTO E DO ADITIVO QUÍMICO

A escolha do cimento e do aditivo químico utilizado nesta pesquisa partiu dos mesmos procedimentos utilizados no trabalho de Martins (2005). Visto que este trabalho passou por uma investigação de compatibilidade entre os cimentos, sílica ativa e os aditivos químicos superplastificantes, visando produzir concreto de alto desempenho com elevados valores de resistência e boa trabalhabilidade.

O método aplicado foi do funil de Marsh, normalizado segundo NBR – 7681 – ABNT (1983a) e NBR – 7682 – ABNT (1983b), visando determinar qual combinação cimento/aditivo químico apresentaria melhores propriedades reológicas.

A pré-seleção dos materiais ocorreu da seguinte forma, foram utilizados dois tipos de cimento tais como: cimento CP V-ARI, devido sua alta resistência inicial nas primeiras idades; e o cimento CP II F – 32, por ser um tipo de cimento mais puro em termos de adição de materiais reativos. Foram selecionados também dois tipos de aditivos químicos à base de policarboxilato, denominados de superplastificante Y e superplastificante Z.

Através dos resultados, Martins (2005) relatou que o uso do cimento CP V ARI acarretou uma elevação dos tempos de fluidez das pastas (cone de Marsh), independentemente do superplastificante utilizado.

Portanto, embora o cimento CP V ARI apresenta maior desenvolvimento de cal livre e seria o mais indicado para reagir com a sílica, optou-se em trabalhar com o cimento CP II-F 32, pois apresentou nos dois casos valores bem próximos de fluidez mesmo após uma hora, conforme ilustrado na Figura 9 e Figura 10.

Depois de determinado o tipo de cimento, partiu-se para escolha do superplastificante. Contudo, o Superplastificante Y apresentou ponto de saturação mais baixo que o outro superplastificante (1%), e o Superplastificante Z produziu fluidez compatível neste mesmo teor. Já o superplastificante Z, mesmo com o aumento da dosagem, ainda ocorreu melhorias na fluidez das pastas até que se alcançasse o teor de 1,4%, seu ponto de saturação.

Diante desses resultados e sem levar em conta a viabilidade de custo do aditivo, optou-se pela utilização superplastificante Z.

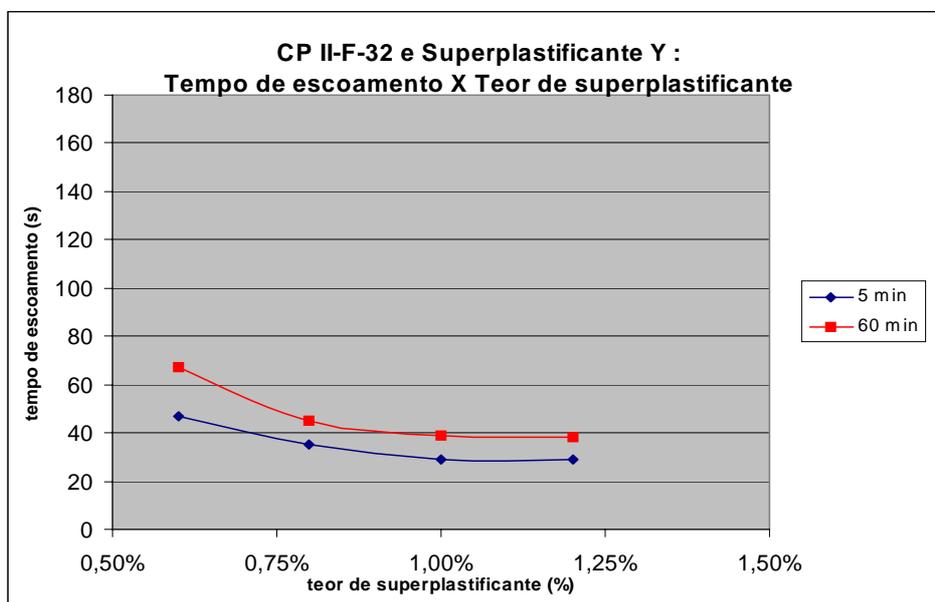


Figura 9. Tempo de escoamento X Teor de superplastificante.
Fonte. MARTINS (2005).

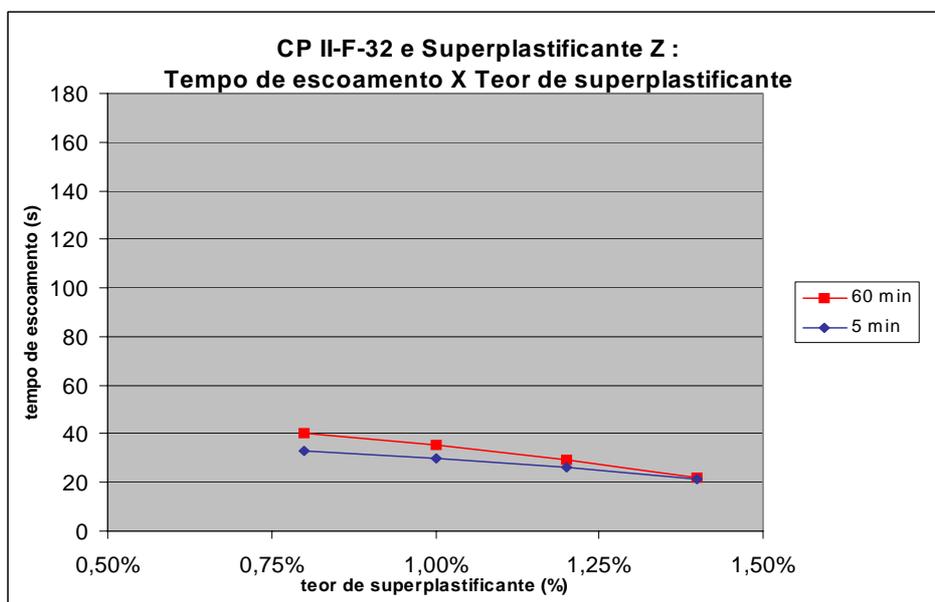


Figura 10. Tempo de escoamento X Teor de superplastificante.
Fonte. MARTINS (2005).

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

5.2.1. Agregados

5.2.1.1. Agregado Miúdo

Utilizou-se a areia natural do Porto São Judas Tadeu. Realizou a caracterização do agregado miúdo segundo as normas da ABNT: a análise granulométrica do agregado miúdo - NBR 7217 (1997), massa específica absoluta - NBR 9776 (1987), massa específica aparente - NBR 7810 (1983), massa específica na condição saturada superfície seca (S. S. S.) e ensaio de absorção - NM 52 (1996), materiais pulverulentos - NBR 7218 (1987) e matéria orgânica - NM 49 (1996). Os resultados são apresentados na Tabela 1. **Composição granulométrica da areia..**

Tabela 1. Composição granulométrica da areia.

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada										
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0
Areia	100,0	91,8	62,4	31,8	18,4	4,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0

f máx. (mm)	Módulo de finura	Massa específica		Massa unitária		absor- ção (%)	pulve- rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm ³)	seca (g/cm ³)	solta (g/cm ³)	solta 4% umid. (g/cm ³)			
2,38	2,09	2,657	2,649	1,584	1,149	0,28	1,00	+ clara

Com os valores da Tabela 1 obteve-se a curva granulométrica na Figura 11.

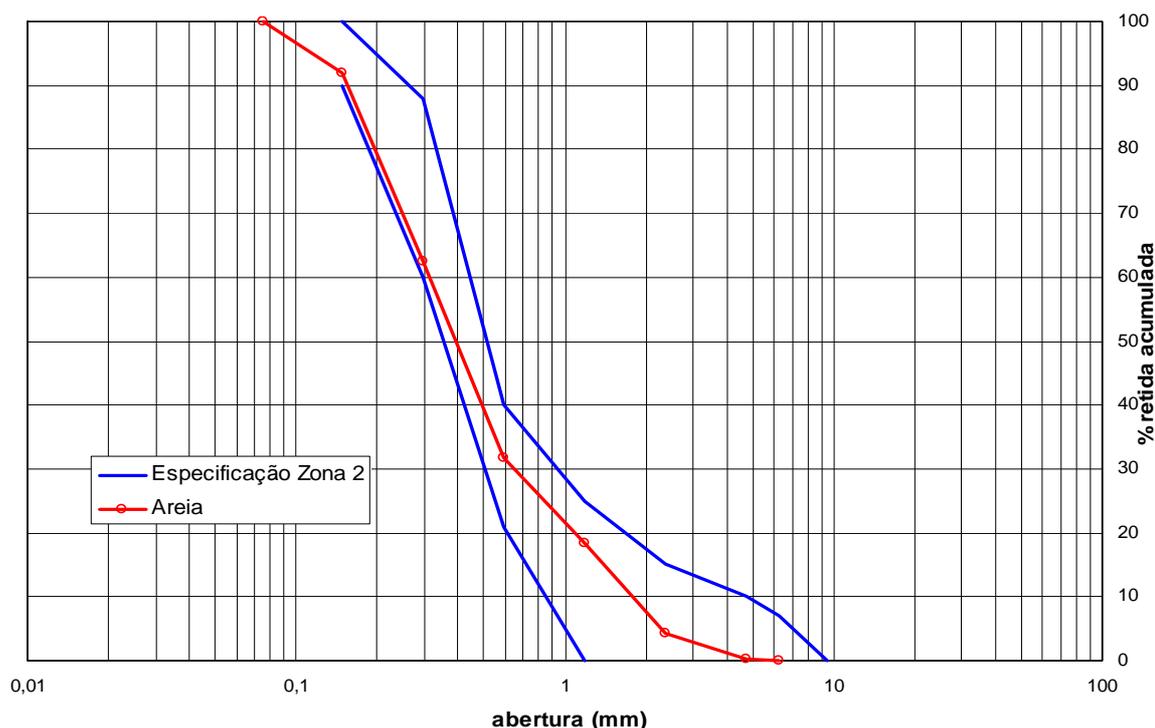


Figura 11. Curva granulométrica da areia.

5.2.1.2. Agregado Graúdo

Utilizou-se o agregado de origem basáltica, da Mineração Grandes Lagos da região de Monções. Cuja caracterização seguiu-se às especificações da ABNT: a análise granulométrica do agregado graúdo – NBR 7217 (1997), massa específica na condição saturada superfície seca (S. S. S.) e ensaio de absorção – NM 52 (1996), a massa específica absoluta – NBR 9937 (1996) e massa específica aparente – NBR 7810 (1983), materiais pulverulentos – NBR 7218 (1987) e matéria orgânica – NM 49 (1996). A composição granulométrica é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição granulométrica da Brita 1.

Peneiras	% Retida Acumulada										
	0,149	0,297	0,595	1,190	2,38	4,76	6,30	9,51	12,70	19,0	25,4
B 1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	93,7	74,4	37,2	15,8	0,0	0,0

Diâm. máx. (mm)	Módulo de finura	Massa específica				absorção (%)	pulverulento (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seco (g/cm³)	aparente (g/cm³)	aparente solta (g/cm³)		
19,0	6,31	2,877	2,837	2,955	1,504	1,88	0,11

A curva granulométrica é apresentada na Figura 12.

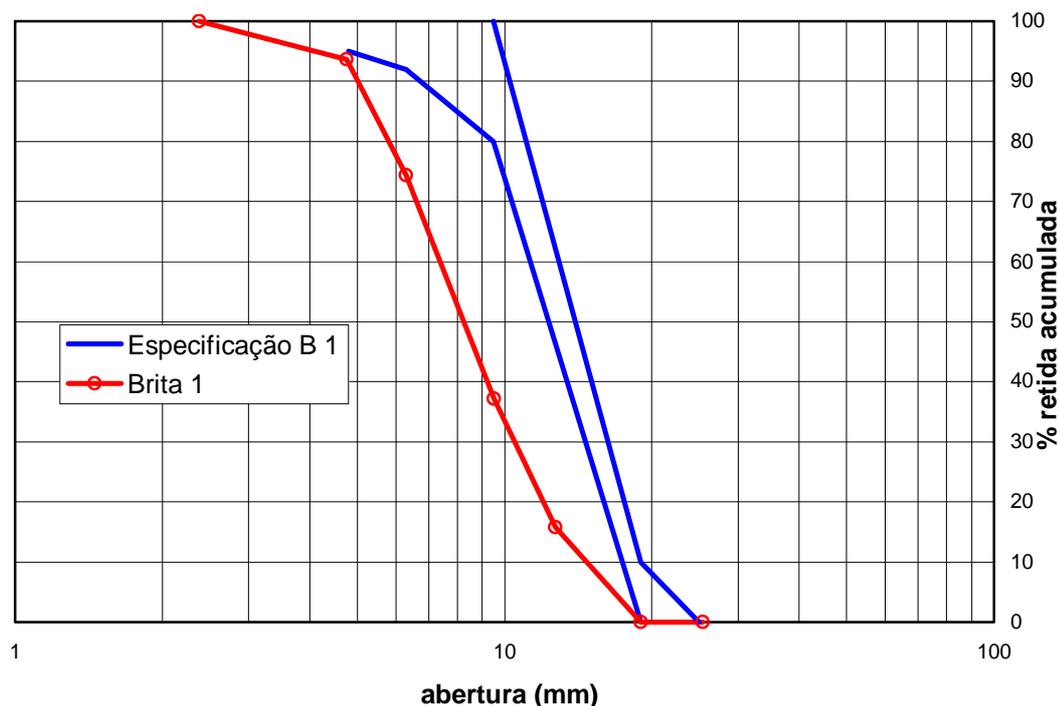


Figura 12. Curva granulométrica da Brita 1.

5.2.1.3. Borracha de Pneu

Utilizou-se a borracha de pneu fornecida pela REGIGANT – Recauchutadora de Pneus, localizada na cidade de Ilha Solteira – SP, a qual faz recauchutagem excepcionalmente em pneus fora de estrada e máquinas pesadas.

Este resíduo de borracha de pneu possui maior parte de suas partículas no formato alongado (tipo fibra) e isto dificulta determinar a sua granulometria, visto que suas partículas não são do tipo granular como para os agregados triviais.

Contudo, foram submetidos à caracterização normal para os agregados segundo as especificações da ABNT: realizou-se a análise granulométrica da borracha denominada “in natura” conforme a NBR 7217 (1987). A massa específica absoluta atendeu as exigências de acordo com NBR NM 23 – ABNT (2001), a massa específica aparente foi determinada conforme a NBR 7810 (1983), e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Ressalta-se, que a determinação da massa específica absoluta da borracha sofreu alterações no ensaio, sendo utilizado o frasco de Chapman cheio de querosene (líquido de menor massa específica que a água). Através da diferença de volume do

frasco de Chapman + querosene e da massa do resíduo determinou-se a massa específica absoluta do resíduo.

Tabela 3. Composição granulométrica da borracha de pneu in natura.

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,5	12,7	19,0	25,4
Areia	100,0	99,5	96,2	89,5	69,1	21,0	2,3	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0

Diâm. máx. (mm)	Módulo de finura	Massa específica				absorção (%)	pulverulento (%)
		s.s.s. (g/cm ³)	seco (g/cm ³)	aparente (g/cm ³)	aparente solta (g/cm ³)		
4,76	3,78	-	1,15	-	-	-	-

A curva granulométrica da borracha in natura é apresentada na Figura 13.

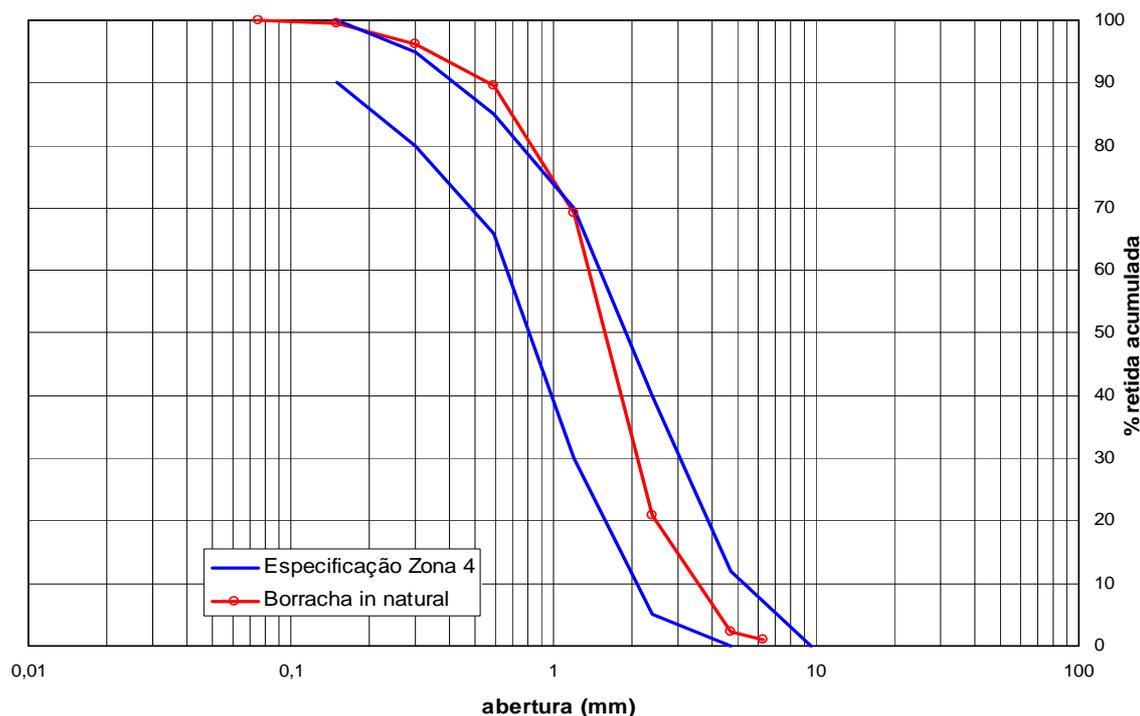


Figura 13. Curva granulométrica da borracha de pneu in natura.

A borracha de pneu passou por um processo de peneiramento e seleção granulométrica, e durante este processo foram classificadas como Fina, Média, Grossa e Muito grossa; cuja granulometria de maior interesse nesta pesquisa foi a Média. A Tabela 4, abaixo apresenta as peneiras utilizadas, as porcentagens obtidas para cada

faixa de resíduo e as suas respectivas denominações, as quais visam apenas simplificar as referências aos resíduos de borracha de pneu específico.

Tabela 4. Classificação do Resíduo de Borracha de Pneu.

Peneiras Normais e Auxiliares		Resíduo de borracha de pneu	
Denominação	Abertura (mm)	% Retida	Denominação
1/4"	6,3	1,9	B. Muito Grossa
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

Baseado nos estudos de Martins (2005), utilizou-se a mesma faixa granulométrica e porcentagem de resíduos de borracha de pneu, ou seja, 3% de borracha Média.

A Borracha Média apresenta a seguinte descrição: possui formato alongado (tipo fibra), comprimento em sua maior parte inferior a 10mm e espessura em torno de 1mm. Estes resíduos são apresentados na Figura 14.



Figura 14. Borracha Média.

Referente a Borracha Média, na Tabela 5 são apresentados os dados da composição granulométrica as normas da ABNT já citadas.

Tabela 5. Composição granulométrica da Borracha Média.

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,5	12,7	16,0	19,0
Areia	100,0	100,0	99,7	99,5	85,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A curva granulométrica da borracha média é apresentada na Figura 15.

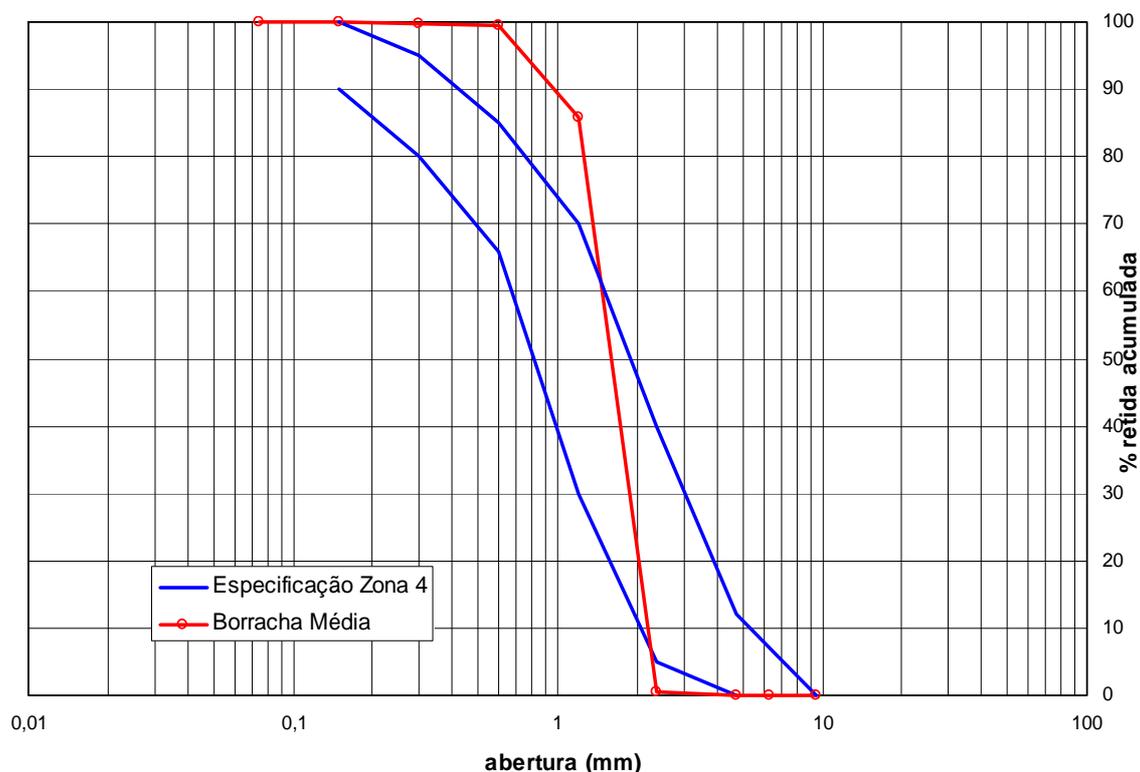


Figura 15. Curva granulométrica da Borracha Média.

5.2.2. Cimento

Empregou-se o cimento Portland tipo CP II F 32 - ITAÚ, cujas características físicas e químicas atenderam as especificações de cimento composto (NBR 11578/1991), através da determinação da finura através de peneiramento NBR 9202 (1985), da finura – Método de Blaine NM 76 (1998), do tempo de pega NM 65 (1996), massa específica aparente NBR 7810 (1983); massa específica absoluta NM 23 (2000) e resistência à compressão do cimento NBR – 7215 (1996).

Realizou-se a caracterização no Laboratório CESP de Engenharia Civil - (LCEC), em Ilha Solteira. Os resultados estão apresentados na Tabela 6 .

Tabela 6. Características físico-química do cimento CP II F – 32.

Referência		22834	Especificações		
Amostra		CP II F	NBR-11578		
Data da coleta /05		18.06	min.	máx.	
Finura Peneira 200	(% retida)	0,24	-	12,0	
Finura Peneira 325	(% retida)	2,22	-	-	
Superf. espec. Blaine	(cm ² /g)	4281	2600	-	
Densidade aparente	(g/cm ³)	0,97	-	-	
Densidade absoluta	(g/cm ³)	3,17	-	-	
Água de consistência	gramas	138	-	-	
da pasta	(%)	27,6	-	-	
Início de pega (h:min)		02:55	01:00	-	
Expansão em auto-clave (%)		0,252	-	-	
Resistên cia a	Consistência	gramas	150	-	-
	argamassa	a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		-	-	-
Compres- são Axial	Tensão (MPa)	03 dias	36,2	10,0	-
		07 dias	37,4	20,0	-
		28 dias	45,1	32,0	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		3,94	-	6,5
	Insolúveis		0,55	-	2,5
	SiO ₂		18,10	-	-
	Fe ₂ O ₃		2,75	-	-
	Al ₂ O ₃		6,23	-	-
	CaO		61,00	-	-
	MgO		4,39	-	6,5
	SO ₃		2,53	-	4,0
	Na ₂ O		0,16	-	-
	K ₂ O		0,86	-	-
	Equiv alcalino Na ₂ O		0,72	-	-
	Cal livre em CaO		1,77	-	-

5.2.3. Sílica Ativa

A sílica ativa tem inúmeras vantagens na produção do concreto de alto desempenho como citada anteriormente na revisão bibliográfica. Seu emprego nesta pesquisa vem a atuar como referencial e verificar se é viável a utilização dos resíduos em questão: cinza de casca arroz e borracha de pneu. Visto que alguns autores tais como Hernández-Baruenga (2004, p.16-17), comentam que ao utilizarem a sílica ativa em concretos com a incorporação de resíduo de borracha de pneu, estes observaram um decréscimo em relação à perda de resistência. Ainda relatam que este fato ocorre devido a melhora da zona de transição entre a pasta de cimento e o resíduo de borracha de pneu.

Utilizou-se a sílica da marca Silmix S/A, cuja caracterização físico-química foram realizadas de acordo a NBR 13956 – ABNT (1997), sendo apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Características físico-química da sílica ativa.

Referência		5486	Especificações	
Amostra		S. A.	NBR-13956	
Data da coleta /05		16.07	min.	máx.
Densidade aparente	(g/cm ³)	0,47	-	-
Densidade absoluta	(g/cm ³)	2,18	-	-
Finura Peneira 325	(% retida)	-	-	34,0
Diâmetro dos grãos (micras)		9,1	-	-
Retração por secagem (%)		-	-	0,050
Umidade da amostra (%)		1,22	-	3,00
Análise Química (%)	Perda ao fogo	4,34	-	6,00
	SiO ₂	91,73	-	-
	Fe ₂ O ₃	0,14	-	-
	Al ₂ O ₃	0,29	-	-
	CaO	0,37	-	-
	MgO	0,36	-	-
	SO ₃	0,54	-	5,00
	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,43	-	-
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	92,16	70,00	-
	Equiv alc. em Na ₂ O (disp.)	0,40	-	-

5.2.4. Cinza de Casca de Arroz

No desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se dois tipos de cinza de casca de arroz, de diferentes composições morfológicas e processo de queima, cujos materiais foram provenientes de beneficiadoras de arroz. A cinza denominada Cristalina foi produzida em forno controlado, enquanto que a cinza denominada Amorfa foi produzida em laboratório por queima não controlada, que serão discutidas logo abaixo.

A cinza Cristalina, foi proveniente da empresa beneficiadora de arroz JOSAPAR S. A., da região de Pelotas/RS, cuja casca utiliza-se como combustível no processo de parboilização dos grãos de arroz.

A queima da casca de arroz se processa, com controle de queima (atinge temperatura de aproximadamente 600° C), em fornalhas com grelhas. O resultado da queima apresentou uma cinza de casca de arroz de cor preta a cinza escuro (Figura 16), ainda possível de se visualizar algumas cinzas com a forma da casca, porém bastante frágil. Após a queima a CCA é transportada para o depósito, a céu aberto, e conseqüentemente levada para os lixões.



Figura 16. Cinza cristalina após a moagem.

Levou-se a cinza para o processo de moagem em um moinho de bolas utilizado para produção de cimentos (Figura 17), localizado no Laboratório CESP de Engenharia Civil, em Ilha Solteira. O peso total de bolas do moinho gira em torno de 52,5 kg, sendo moída 5,5 kg cinza por vez.

O tempo de moagem foi objeto estudo, sendo este concretizado através da moagem da cinza em diferentes granulometria (20, 30, 40, 50 e 60 min) e retirou-se as

amostras a cada 10 minutos. As amostras foram devidamente caracterizadas e utilizadas em estudos de resistência à compressão da argamassa.

Com esse procedimento ficou determinado, a partir do melhor resultado de resistência, o tempo de moagem a ser adotado para o restante da pesquisa.

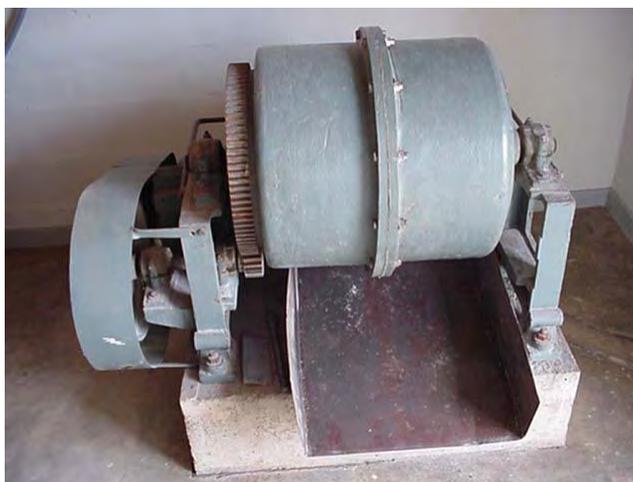


Figura 17. Moinho de bolas.

Realizou-se também o ensaio de difração de raio-X, para a determinação da morfologia da amostra, no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S. A. O ensaio de difração está apresentado na Figura 18, denominando uma cinza Cristalina, com presença de picos que representam cristais.

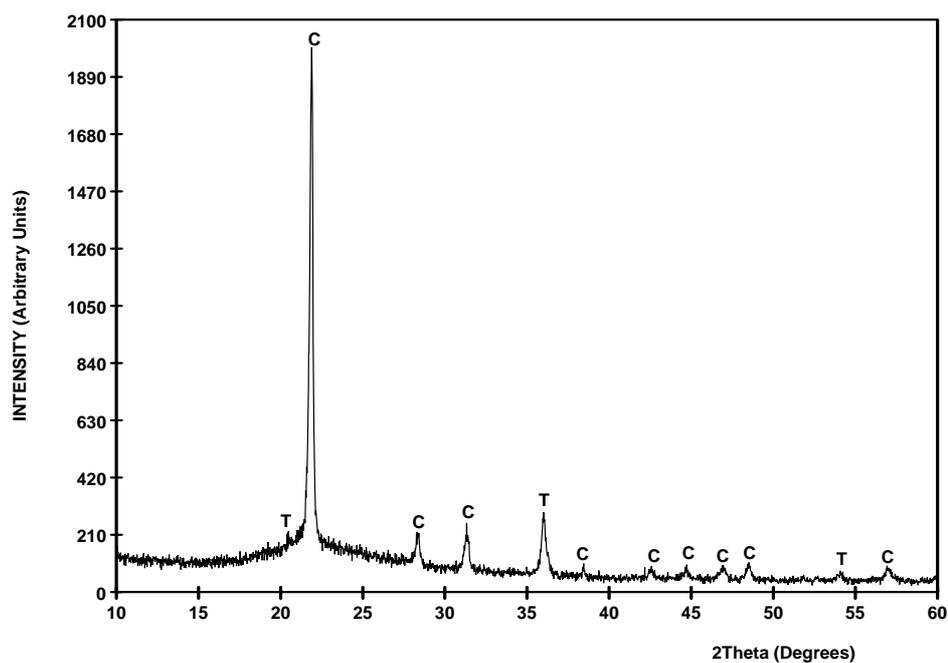


Figura 18. Ensaio de difração da Cinza Cristalina.

Para a obtenção da cinza Amorfa foi utilizado um forno desenvolvido por SILVA (2004), sem controle de temperatura da casca. A casca de arroz foi fornecida pela empresa de beneficiamento de arroz da cidade de Três Lagoas, e sua origem da região de Dourados/MS.

A queima da casca foi por autocombustão e realizada no Laboratório de Engenharia Civil da UNESP. A quantidade de casca queimada por vez foi de aproximadamente 12 Kg, com um rendimento médio de cinza de 10% deste total, ou seja, 1,2 kg.

A queima total do volume de casca ocorreu durante várias horas e retirou a cinza só após o resfriamento da mesma. O tempo médio de queima da casca foi de 36 horas, e a temperatura ao longo deste processo atingiu 850°C, ficando acima dos 600°C durante aproximadamente 18 horas. Tabela 8 e a Figura 19 mostram de forma detalhadas a evolução da temperatura de queima da casca.

Tabela 8. Evolução da temperatura de queima da casca.

Tempo (Horas)	Temperatura (°C)
-	28,8
2 ^a	378,9
4 ^a	576,8
6 ^a	636,7
8 ^a	711,2
10 ^a	755,1
12 ^a	782,3
14 ^a	824,4
16 ^a	847,5
18 ^a	622,3
20 ^a	593,4
22 ^a	517,3
24 ^a	435,2
26 ^a	286,4
28 ^a	135,2
30 ^a	65,1
32 ^a	35,2
34 ^a	31,7
36 ^a	30,4

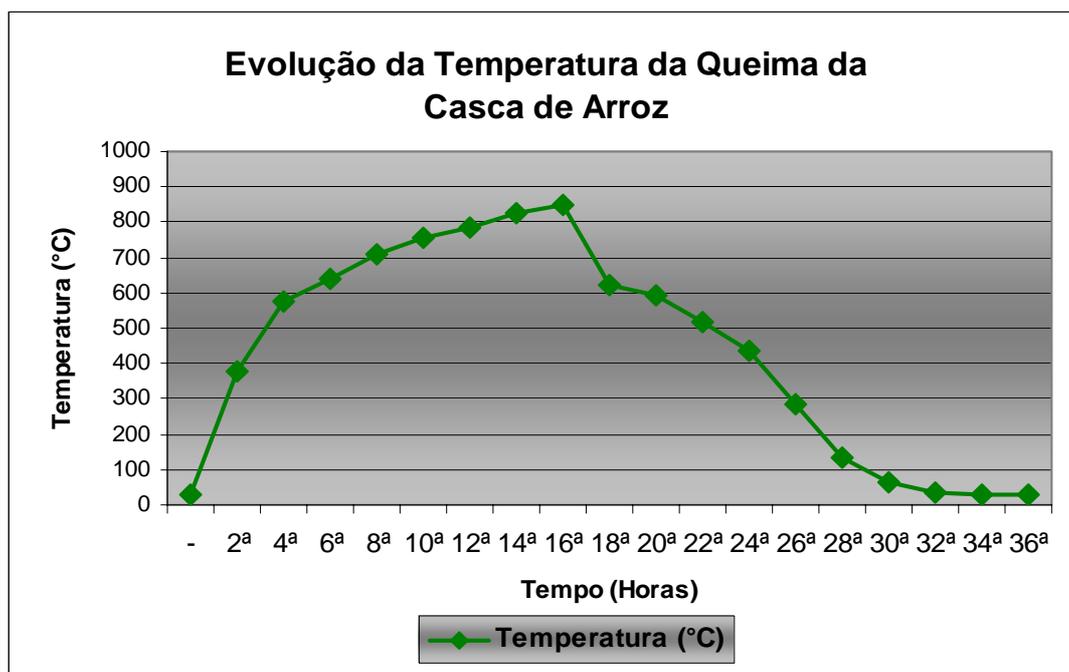


Figura 19. Evolução da temperatura de queima da casca de arroz.
Fonte. SILVA (2004).

O forno produziu cinza de coloração “acinzenta” (Figura 20), e de acordo com a bibliografia, a cinza mais clara tem um percentual de carbono menor num período longo de queima, resultando uma cinza no estado amorfo, portanto mais reativa.



Figura 20. Cinza amorfa após a queima.

Após a produção da cinza, esta foi levada ao moinho para o processo de moagem de 30 minutos. Este tempo de moagem foi pré-determinado por SILVA (2004), conforme mencionado, a que a cinza sofreu o mesmo processo de queima. E então se estabeleceu o mesmo tempo de moagem.

A Figura 21 mostra o resultado do ensaio difração da CCA (ensaio também realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S. A.) produzida em forno sem controle de temperatura e denominada como cinza Amorfa. Quanto ao processo de moagem, seguiram-se os mesmos procedimentos descritos anteriormente.

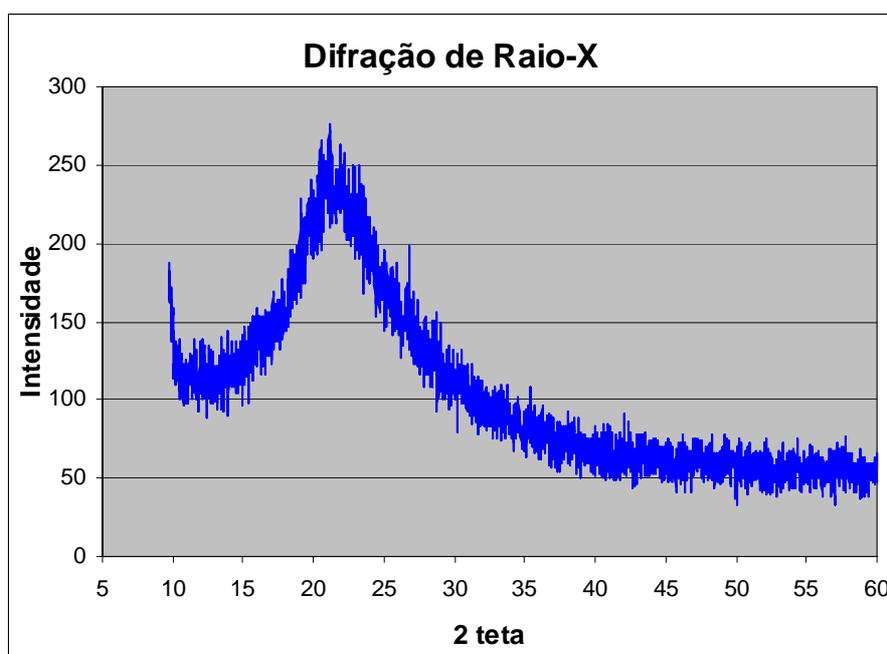


Figura 21. Difratoograma de raio-X da CCA Amorfa.

Depois de estabelecida a moagem ideal das CCA Cristalina (40 minutos) e pré-determinada a CCA Amorfa (30 minutos), iniciou-se a etapa de caracterização, determinado segundo as especificações da (NBR-12653/1992): a superfície específica, densidade aparente e absoluta (NBR NM 23/2001), diâmetro médio das partículas, reatividade com álcalis (NBR 12652/1992), índices de atividade pozolânica com o cimento e a cal (NBR 15751/1992), e composição química (NBR 8347/1991).

Dentre outros equipamentos, destaca-se, na Figura 22 o Frasco de Chapman onde as amostras de CCA foram submetidas ao teste para determinação massa específica.

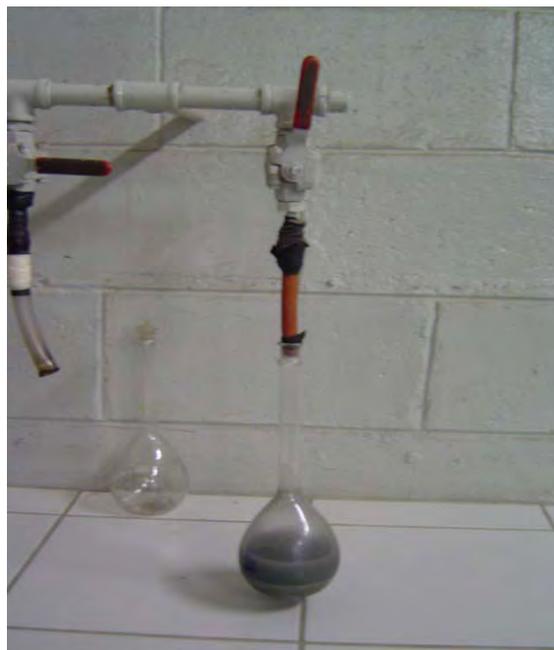


Figura 22. Frasco de Chapman, determinação da massa.

A Tabela 9 mostra como se dá o aumento da superfície específica e a diminuição do diâmetro médio das partículas com o aumento do tempo de moagem (ensaio realizado no Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S. A.).

Tabela 9. Diâmetro médio das amostras das cinzas de casca de arroz.

Tipo de Cinza	Tempo de moagem (min.)	20	30	40	50	60
CCA Cristalina	Diâmetro médio (μm)	41,30	20,13	13,44	12,23	11,29
	Massa específica (g/cm^3)	2,12	2,14	2,18	2,13	2,16
CCA Amorfa	Diâmetro médio (μm)	14,56	12,38	9,19	7,85	7,34
	Superfície específica (g/cm^3)	15.698	17.302	20.894	22.576	23.243

Realizou-se o ensaio de análise granulométrica de ambas as cinzas no Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S. A. A Figura 23 mostra a distribuição granulométrica das partículas de CCA-Cristalina moída em 40 minutos.

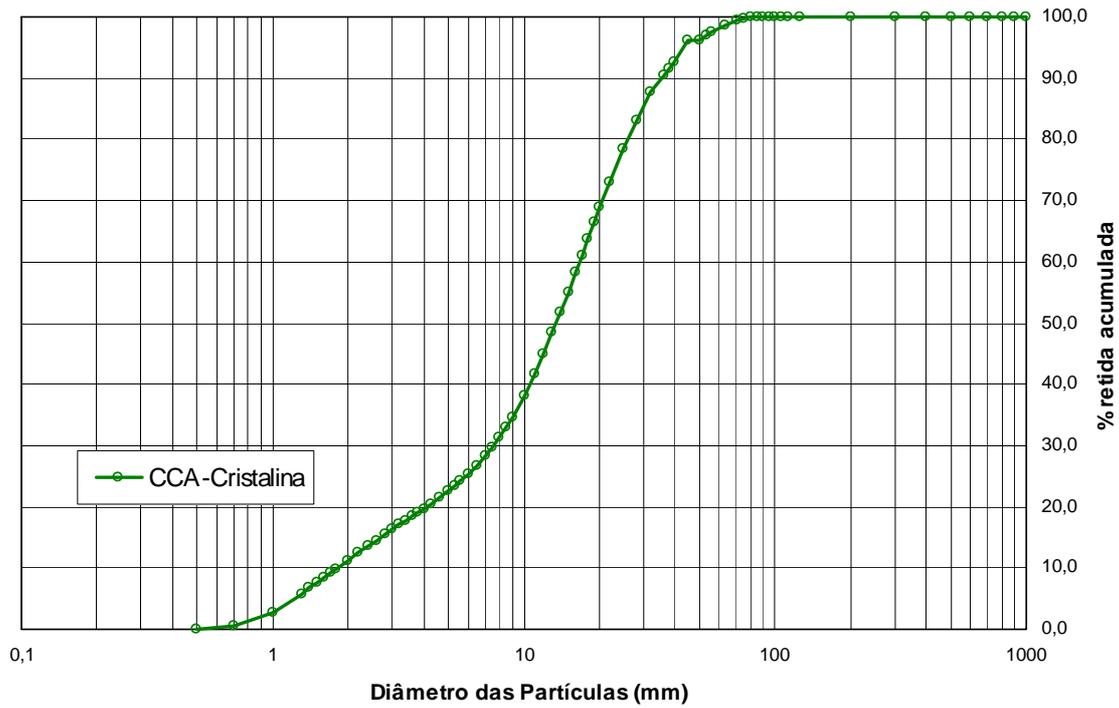


Figura 23. Distribuição granulométrica da CCA-Cristalina moída em 40 minutos.

A Figura 24 mostra a distribuição granulométrica das partículas de CCA-Amorfa moída em 30 minutos.

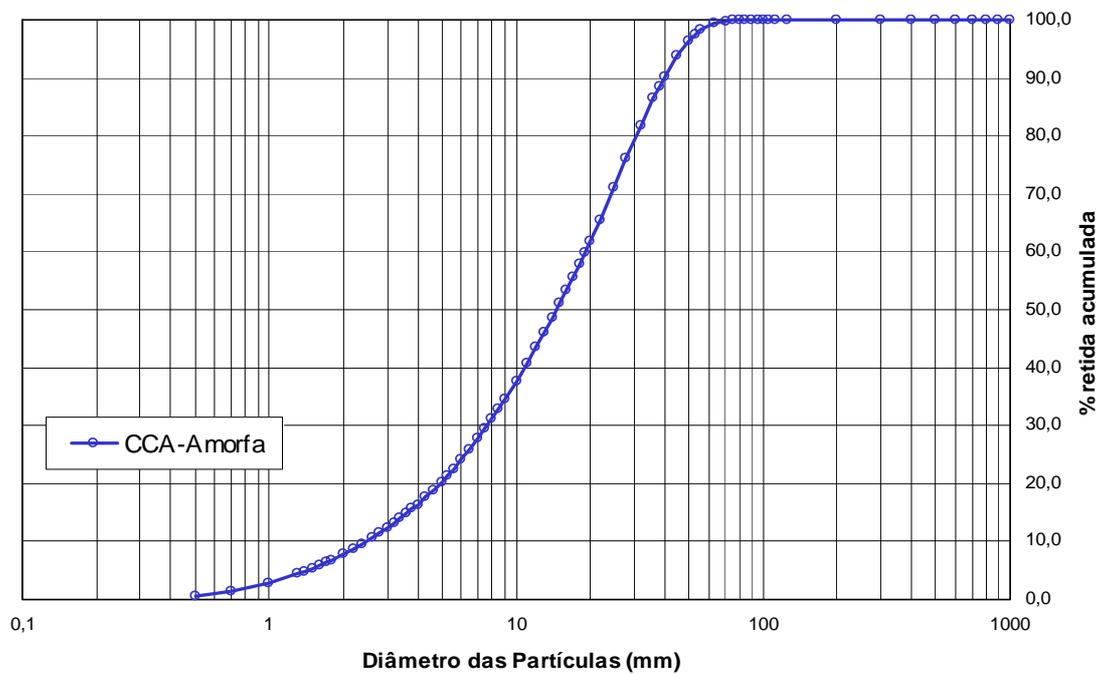


Figura 24. Distribuição granulométrica da CCA-Amorfa moída em 30 minutos.

A tabela a seguir apresenta as características físicas e químicas da amostra de CCA moída em 40 e 30 minutos, e que foi utilizada em toda a pesquisa.

Tabela 10. Características físico-químicas da CCA Cristalina e CCA Amorfa.

Amostra		CCA Cristalina	CCA Amorfa	NBR-12653 (Mat. Pozol.)	
Data da coleta		20.07	06.12	Min.	Máx.
Densidade aparente (g/cm ³)		0,61	0,40	-	-
Densidade absoluta (g/cm ³)		2,18	2,16	-	-
Finura Peneira 325 (% retida)		1,13	3,4	-	-
Diâmetro dos grãos (micras)		13,44	12,38	-	-
Índices atividade pozolânica	Água requerida (%)	100,6	114,6	-	110,0
	com cimento (%)	90,8	60,7	75,0	-
	com cal (MPa)	3,5	4,9	6,0	-
Umidade da amostra (%)		0,70	1,90	-	3,0
Análise Química (%)	Perda ao fogo	6,17	2,36	-	6,0
	SiO ₂	88,55	92,99	-	-
	Fe ₂ O ₃	0,74	0,43	-	-
	Al ₂ O ₃	1,74	0,18	-	-
	CaO	1,11	1,03	-	-
	MgO	0,32	0,35	-	-
	SO ₃	0,03	0,10	-	5,0
	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	2,45	0,61	-	-
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	91,00	93,50	70,0	-
	Equiv alc. em Na ₂ O (disp.)	0,37	0,49	-	-
	Na ₂ O	0,13	0,02	-	-
	K ₂ O	0,36	0,72	-	-

5.2.5. Aditivo Químico

O aditivo utilizado ao concreto é composto de policarboxilato, sendo utilizado nas duas etapas da pesquisa, tanto na argamassa como no concreto, tendo as seguintes características técnicas:

- Função principal: Superplastificante;
- Teor de sólidos: 35%;
- Dosagem máxima: 2% em relação ao peso do cimento;
- pH: $4,3 \pm 0,5$;
- Massa específica: 1,08 kg/l a 20°C.

5.2.6. Água

A água utilizada nos ensaios é a água de abastecimento público da cidade de Ilha Solteira – SP, não necessitando, portanto de uma caracterização mais detalhada.

5.3. METODOLOGIA

5.3.1. ESTUDO DA GRANULOMETRIA E PORCENTAGEM IDEAL DE CCA NA ARGAMASSA

5.3.1.1. Dosagens avaliadas

No estudo da granulometria e porcentagem ideal da cinza de casca de arroz em argamassa, utilizou-se a CCA Cristalina. A escolha do traço utilizado para a composição da argamassa foi realizada, tendo como parâmetro o trabalho de Silva (2004).

O traço ficou definido na seguinte proporção 1:3. Foram adotados teores diferentes de incorporação de CCA Cristalina, e uma outra sem CCA, dadas das seguintes porcentagens: 0%, 5% e 10% todas estas sendo substituída em massa do material cimentante; utilizou-se de cinco granulometrias diferentes, em 20, 30, 40, 50 e 60 minutos, de modo à se obter a granulometria ideal. Fixou-se a relação água/(cimento+cinza) em 0,4 em todos os casos, e determinou-se o índice de consistência para a composição sem incorporação de cinza de 190 mm, procedimento também adotado no trabalho de Silva (2004). Para as demais dosagens não fixou o índice de consistência, fixou-se somente o teor de aditivo.

A adoção do uso do superplastificante teve o intuito de melhorar a trabalhabilidade da argamassa, uma vez que a presença da cinza leva a uma hidratação mais rápida da mistura, conforme observado em trabalhos anteriores. Após os ajustes sua dosagem foi fixada em 0,5% do material cimentante.

Depois de determinado a granulometria ideal, desenvolveu-se um traço com a CCA, variando os teores de cinza de casca de arroz, nas seguintes porcentagens: 5%, 8%, 10% e 15%, verificando-se a porcentagem ideal de cinza.

As composições dos traços de argamassa com diferentes porcentagens de cinza foram chamadas da seguinte forma:

- Sem incorporação de cinza de casca de arroz - **Controle**;
- 5% de cinza de casca de arroz - **5% CCA**;
- 8% de cinza de casca de arroz - **8% CCA**;
- 10% de cinza de casca de arroz - **10% CCA**;
- 15% de cinza de casca de arroz - **15% CCA**.

A Tabela 11 mostra a composição do traço de argamassa para as seguintes porcentagens de CCA.

Tabela 11. Composição do traço de argamassa (kg/m³).

Materiais	Traços				
	0% CCA	5% CCA	8% CCA	10% CCA	15% CCA
Cimento (kg/m ³)	509,3	483,8	468,6	458,4	432,9
Cinza de casca de arroz (kg/m ³)	-	25,5	40,7	50,9	76,4
Areia (kg/m ³)	1527,9	1527,9	1527,9	1527,9	1527,9
Água (kg/m ³)	203,7	203,7	203,7	203,7	203,7
Aditivo (kg/m ³)	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54
a/c+CCA	0,40				

O estudo de granulometria e porcentagem ideal para a CCA Amorfa não foi objeto de estudo desta pesquisa (motivo pela qual se produziu a mesma cinza), pois este estudo já havia sido realizado no trabalho de Silva (2004).

Silva (2004) desenvolveu um estudo em argamassa com diferentes teores de CCA: 5% e 10%, contendo 6 granulometrias diferentes baseados no tempo de moagem (20, 30, 40, 50 e 60 min.), visando descobrir a granulometria ideal, conforme a Figura 25, e utilizou em sua composição o cimento CP V ARI.

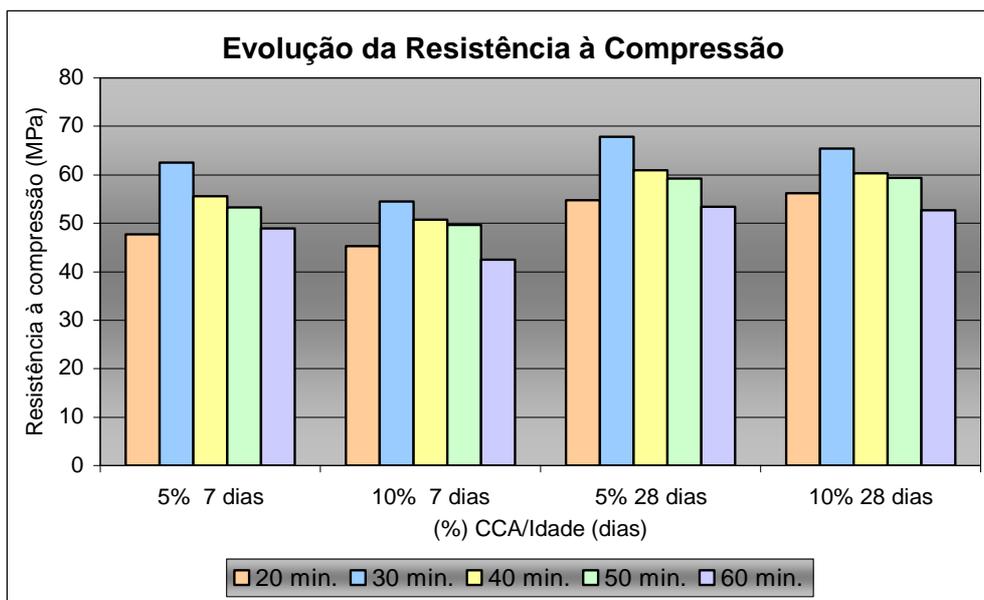


Figura 25. Evolução da resistência à compressão.
Fonte. SILVA (2004).

Através dos resultados de resistência à compressão ele relatou que a cinza teve melhor desempenho nas duas idades, indicando que a granulometria ideal foi aquela com o tempo de moagem de 30 minutos.

Depois de determinado a granulometria ideal, realizou-se um estudo também sobre resistência à compressão de diferentes porcentagens (0%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15%), como mostra a Figura 26.

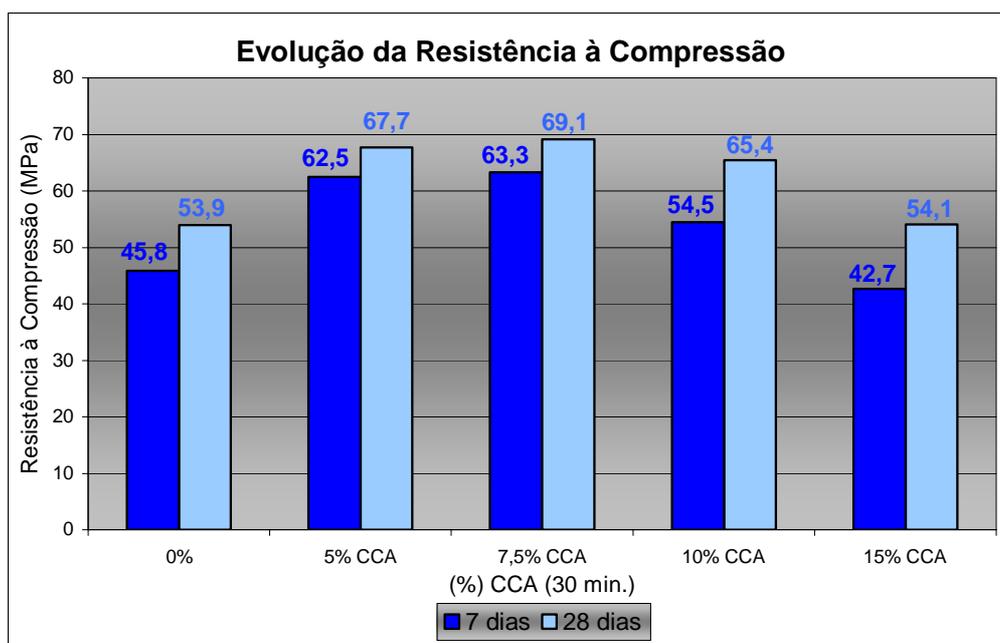


Figura 26. Evolução da resistência à compressão.
Fonte. SILVA (2004).

Conforme mostra a Figura 26, as dosagens com melhores resultados de ganhos resistência estão entre 5 e 10%, apresentando um ganho de resistência de 20% aos 28 dias. Ressaltando-se que, baseado nos estudos em argamassa de SILVA (2004), no decorrer desta pesquisa utilizou-se a mesma granulometria.

5.3.1.2. Produção e confecção dos corpos-de-prova

A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira foi realizada da seguinte maneira:

- 1°. 100% do Cimento e da água (80%), homogenizou-se por trinta segundos em velocidade baixa;
- 2°. 100% Agregado miúdo (argamassadeira ligada), homogenizou-se por mais trinta segundos em velocidade baixa. Em seguida aumentou-se a velocidade (alta) da argamassadeira, homogenizando por mais trinta segundos;
- 3°. com a argamassadeira desligada, removeu-se o excesso de material aderido na parede do recipiente durante quinze segundos e deixou em descanso por mais um minuto e quinze segundos;
- 4°. Aditivo mais o restante da água (argamassadeira ligada) homogenizou-se por mais um minuto.

A ordem de colocação dos materiais entre traço sem CCA e os que contêm CCA diferiu-se quanto à adição de resíduo, juntamente ao cimento.

5.3.1.2.1. Argamassa no estado fresco

Transcorrido o período de mistura, avaliou-se a característica do índice de consistência, conforme ilustrado na Figura 27.



Figura 27. Determinação do índice de consistência.

Verificou-se a influência da granulometria e porcentagem da cinza através do ensaio de resistência à compressão em argamassa e moldou-se (NBR 5738/2003 a) 15 corpos-de-prova de dimensões 5x10 cm, em formas cilíndricas metálicas, e seu adensamento foi realizado manualmente. Após 24 horas os corpos-de-prova foram desmoldados e mantidos em câmara úmida até o respectivo ensaio (7 e 28 dias), sendo 5 corpos-de-prova para cada idade. A Figura 28 apresenta os corpos-de-prova após a moldagem.



Figura 28. Corpos-de-prova após a moldagem.

5.3.1.2.2. Argamassa no estado endurecido

Os corpos-de-prova foram submetidos somente ao ensaio de resistência à compressão (Figura 29), sendo capeados com enxofre e pozolana, o resultado final representa à média aritmética dos resultados obtidos.



Figura 29. Corpos-de-prova submetidos à ruptura (resistência à compressão).

5.3.2. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO CAD COM ADIÇÃO DE CCA E BORRACHA DE PNEU

5.3.2.1. Dosagens avaliadas

Na presente pesquisa, utilizou-se a incorporação dos resíduos, a CCA (Amorfa e Cristalina) e a borracha de pneu na composição do concreto. O procedimento utilizado para a composição dos traços de CAD foi proposto pelo pesquisador canadense AÏTCIN (2000), denominado “Método Aïtcin”. Este método é específico para o CAD e simples, cujos parâmetros deste são aprimorados através resultados empíricos baseando-se no critério de valor absoluto.

O procedimento do método iniciou-se pela seleção de diferentes características do traço:

- Relação água/aglomerante: relações propostas entre água/aglomerante e a resistência;
 - Teor de água: baseado no ponto de saturação;
 - Teor de agregado graúdo: em função da forma típica das partículas;
 - Teor de ar incorporado: por meio de estimativa inicial sugerida (1,5%).
-

Em seguida fez-se uma correlação entre a relação água/aglomerante e teor de água, determinando-se a quantidade de aglomerante a ser empregada no traço, e o volume restante a ser preenchido em um metro cúbico é completado com agregado miúdo. Ressalta-se que os teores de argamassa e agregado graúdo foram avaliados pelo método adotado por Helene e Terzian (1993).

No início do estudo experimental, utilizou-se a CCA Cristalina e desenvolveu-se o traço de CAD, possuindo a seguinte composição: relação água/aglomerante de 0,30, consumo de cimento de 466 kg/m³, e 140 litros/m³ de água (trabalhabilidade superior de 20 cm).

Devido a algumas dificuldades presenciadas em laboratório, e experiências adquiridas, houve a necessidade de se realizar um estudo de otimização dos materiais sobre a porcentagem ideal de CCA, visando-se atingir uma boa trabalhabilidade e conseqüentemente boa resistência à compressão.

O teor de superplastificante empregado foi então feito tomando em consideração a água + teor de sólidos em relação à massa do cimento, considerando-se a água contida no superplastificante como parte da água de amassamento. O teor de superplastificante, fixado em relação à consistência desejada, resultou em 1% quando em substituição da CCA Cristalina, sofrendo alterações aos demais traços (em substituição de outros materiais), sendo adicionado em relação à quantidade de material cimentante.

Esse procedimento e/ou otimização dos materiais de concreto de alto desempenho foi realizado para as seguintes situações:

- Concreto sem (0%) adição mineral - **Controle**;
- Concreto com 5% de Cinza de Casca de Arroz Cristalina – **5% CCA-C**;
- Concreto com 8% de Cinza de Casca de Arroz Cristalina – **8% CCA-C**.

A Tabela 12 fornece o resumo das composições dos traços, utilizadas no estudo de otimização dos materiais:

Tabela 12. Composições dos traços utilizadas no estudo de otimização dos materiais.

a/agl	Consumo de Água (l/m ³)	Adições (%)	Teor de Aditivo (%)
0,30	140,0	Controle	0,8
0,30	140,0	5% CCA/C	1,0
0,30	140,0	8% CCA/C	1,0

A Tabela 13 apresenta a composição do traço Controle utilizado no estudo de otimização dos materiais.

Tabela 13. Composições dos traços utilizadas no estudo de otimização dos materiais.

Materiais	Quantidade
Cimento (kg/m ³)	466,67
CCA (kg/m ³)	-
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	811,62
Água (kg/m ³)	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30
Aditivo (kg/m ³)	4,45
% Superplastificante/cimento (massa)	1,0%
% Teor de argamassa	54,0%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,6

Na seqüência, a Tabela 14 fornece a composição do traço com 5% CCA-C utilizada no estudo de otimização dos materiais.

Tabela 14. Composições dos traços utilizadas no estudo de otimização dos materiais.

Material	Quantidade
Cimento (kg/m ³)	443,33
CCA (kg/m ³)	23,33
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,0
Agregado miúdo (kg/m ³)	802,91
Água (kg/m ³)	140,0
Água/aglomerante (a/agl)	0,30
Aditivo (kg/m ³)	4,45
% Superplastificante/cimento (massa)	1,0%
Teor de argamassa	54,0%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,41

A Tabela 15 mostra a composição do traço com 8% CCA-C utilizada no estudo de otimização dos materiais.

Tabela 15. Composição do traço 8% CCA-C.

Materiais	Quantidade
Cimento (kg/m^3)	429,33
CCA (kg/m^3)	37,33
Agregado graúdo (kg/m^3)	1125,00
Agregado miúdo (kg/m^3)	797,69
Água (kg/m^3)	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30
Aditivo (kg/m^3)	4,45
% Superplastificante/cimento (massa)	1,0%
% Teor de argamassa	54,0%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,6

Dando continuidade ao estudo de otimização dos materiais, após a escolha do traço com melhor desempenho em relação à trabalhabilidade e resistência à compressão, fez-se um traço de CAD contendo os resíduos a cinza de casca de arroz Cristalina e borracha de pneu, para verificar a sua trabalhabilidade e a ordem grandeza quanto a facilidade de manuseio e acabamento enquanto disposto no estado fresco. Assim mencionou-se ao concreto com resíduos de cinza de casca de arroz Cristalina e Borracha de pneu como CCA-C/Bor..

A Tabela 16 mostra a composição do traço CCA-C/Bor. contendo 3% de borracha de pneu “Média”.

Tabela 16. Composição do traço CCA-C/Bor..

Materiais	Quantidade
Cimento (kg/m ³)	443,33
CCA (kg/m ³)	23,33
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	723,20
Borracha de pneu (kg/m ³)	34,5
Água (kg/m ³)	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30
Aditivo (kg/m ³)	4,45
% Superplastificante/cimento (massa)	1,0%
% CCA (massa)	5%
% borracha no m ³ (volume)	3%
% borracha/miúdo (volume)	11,02%
% borracha/graúdo (volume)	7,70%
% borracha/total agregados (volume)	4,50%

Após ter definido o traço com a porcentagem ideal de CCA Cristalina, no estudo otimização dos materiais, partiu-se para a composição do concreto final, para posteriores investigações. Manteve-se a mesma composição do traço contendo CCA Cristalina para os demais traços, fixando o abatimento, sem modificar o proporcionamento dos demais materiais. Para o concreto com CCA Amorfa e com Sílica ativa, alterou-se o teor de aditivo de 1,0% para 1,2%, e para o concreto sem incorporação mineral reduziu-se o teor de aditivo para 0,8%.

Para melhor esclarecimento, os concretos a serem estudados nesta pesquisa foram classificados de acordo com as seguintes situações:

- Concreto sem (0%) incorporação mineral - **Controle**;
- Concreto sem (0%) incorporação mineral e 3% de Borracha de pneu – **Controle/Bor**;
- Concreto com 5% de Cinza de Casca de Arroz Cristalina – **5% CCA-C**;
- Concreto com 5% de Cinza de Casca de Arroz Cristalina e 3% de Borracha de pneu – **CCA-C/Bor**;
- Concreto com 5% de Cinza de Casca de Arroz Amorfa – **5% CCA-A**;

- Concreto com 5% de Cinza de Casca de Arroz Amorfa e 3% de Borracha de pneu – **CCA-A/Bor**;
- Concreto com 5% de Sílica Ativa – **5% Sílica**;
- Concreto com 5% Sílica Ativa e 3% de Borracha de pneu – **Sílica/Bor**.

A Tabela 17 fornece o resumo das composições dos traços finais utilizadas nesta pesquisa:

Tabela 17. Composição do traço CCA-C/Bor..

a/agl	Consumo de Água (l/m ³)	Adições (%)	Teor de Aditivo (%)
0,30	140,0	Controle	0,8
0,30	140,0	Controle/Bor.	0,8
0,30	140,0	5% CCA-C	1,0
0,30	140,0	CCA-C/Bor.	1,0
0,30	140,0	5% CCA-A	1,2
0,30	140,0	CCA-A/Bor.	1,2
0,30	140,0	5% Sílica	1,2
0,30	140,0	Sílica/Bor.	1,2

A Tabela 18 apresenta composições dos traços Controle e Controle/Bor..

Tabela 18. Composição do traço Controle e Controle/Bor.

Materiais	Controle	Controle/Bor.
Cimento (kg/m ³)	466,67	466,67
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,00	1125,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	812,31	732,60
Borracha de pneu (kg/m ³)	-	34,5
Água (kg/m ³)	140,00	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30	0,30
Aditivo (kg/m ³)	3,74	3,74
% Superplastificante/cimento (massa)	0,8%	0,8%
% Teor de argamassa	54,0%	52%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,12	58,65
% borracha no m ³ (volume)	-	3%
% borracha/miúdo (volume)	-	10,88%
% borracha/graúdo (volume)	-	7,67%

A Tabela 19 apresenta as composições dos traços com 5% CCA-C e CCA-C/Bor..

Tabela 19. Composição do traço 5% CCA-C e CCA-C/Bor..

Materiais	5% CCA-C	CCA-C/Bor.
Cimento (kg/m ³)	443,33	443,33
CCA (kg/m ³)	23,33	23,33
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,0	1125,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	802,91	723,20
Borracha de pneu (kg/m ³)	-	34,5
Água (kg/m ³)	140,0	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30	0,30
Aditivo (kg/m ³)	4,45	4,45
% Superplastificante/cimento (massa)	1,0%	1,0%
% CCA (massa)	5%	5%
% Teor de argamassa	54,0%	52%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,41	58,92
% borracha no m ³ (volume)	-	3%
% borracha/miúdo (volume)	-	11,02%
% borracha/grauído (volume)	-	7,67%

A Tabela 20 apresenta as composições dos traços 5% CCA-A e CCA-A/Bor..

Tabela 20. Composição do traço 5% CCA-A e CCA-A/Bor..

Materiais	5% CCA-A	CCA-A/Bor.
Cimento (kg/m ³)	443,33	443,33
CCA (kg/m ³)	23,33	23,33
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,0	1125,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	801,99	722,28
Borracha de pneu (kg/m ³)	-	34,5
Água (kg/m ³)	140,0	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30	0,30
Aditivo (kg/m ³)	5,35	5,35
% Superplastificante/cimento (massa)	1,2%	1,2%
% CCA (massa)	5%	5%
% Teor de argamassa	54,0%	54,0%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,44%	58,99%
% borracha no m ³ (volume)	-	3%
% borracha/miúdo (volume)	-	11,04%
% borracha/grauído (volume)	-	7,67%

A Tabela 21 mostra as composições dos traços com 5% Sílica e Sílica/Bor. contendo 3% de borracha de pneu “Média.

Tabela 21. Composição do traço 5% Sílica e Sílica/Bor..

Materiais	5% Sílica	Sílica/Bor.
Cimento (kg/m ³)	443,33	443,33
CCA (kg/m ³)	23,33	23,33
Agregado graúdo (kg/m ³)	1125,0	1125,00
Agregado miúdo (kg/m ³)	801,27	722,56
Borracha de pneu (kg/m ³)	-	34,5
Água (kg/m ³)	140,0	140,00
Água/aglomerante (a/agl)	0,30	0,30
Aditivo (kg/m ³)	5,35	5,35
% Superplastificante/cimento (massa)	1,2%	1,2%
% CCA (massa)	5%	5%
% Teor de argamassa	54,0%	52,0%
Agregado graúdo em relação ao miúdo	56,44%	58,99%
% borracha no m ³ (volume)	-	3%
% borracha/miúdo (volume)	-	11,04%
% borracha/gráúdo (volume)	-	7,67%

5.3.2.2. Produção dos concretos e preparo dos corpos-de-prova

Determinada a quantificação dos materiais, passou-se à produção dos concretos e preparos dos corpos-de-prova. Os concretos foram produzidos, segundo a NBR 12821 – ABNT (1993b), em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 240 e 360 litros, alternando a mesma de acordo com quantidade (em volume) de concreto.

Manteve-se a mesma ordem de colocação dos materiais na betoneira em movimento para todas as composições, sendo a ordem de colocação dos materiais usual a vários autores de CAD:

- 1°. Brita de graduação 1, CCAs e sílica ativa e 80% de água, os quais foram homogenizados durante 1 minuto;
- 2°. Posteriormente o cimento e a areia, misturado-os por mais dois minutos;
- 3°. Por último adicionou-se o aditivo e o restante da água.

Após a homogeneização de todos os materiais, a mistura permaneceu na betoneira em movimento por mais dez minutos, finalizando o ciclo de amassamento.

A Figura 30 apresenta a mistura do concreto após a mistura de todos os materiais citados acima, e a Figura 31 mostra a mistura após o ciclo de amassamento de dez minutos. Em concretos onde a relação água/aglomerante é baixa, torna-se comum o acréscimo no tempo da mistura.



Figura 30. Mistura após adicionar todos os materiais.



Figura 31. Concreto fresco após últimos dez minutos.

Para o traço de concreto contendo borracha de pneu, a ordem de colocação dos materiais permaneceu a mesma; colocou-se a Borracha juntamente com a brita, CCAs e sílica ativa e a água. A incorporação de borracha de pneu foi colocada nessa ordem, juntamente com CCA e a sílica ativa, para melhorar a adesão do mesmo à pasta de cimento, visando possíveis resultados com maiores ganho de resistência à compressão.

5.3.2.2.1. Concreto no estado fresco

Transcorrido o período de mistura, foi avaliada a característica do concreto fresco: consistência pelo abatimento (NBR 7223/1992), conforme a Figura 32.



Figura 32. Ensaio de abatimento de cone tronco.

Para a determinação do ar incorporado nos concretos utilizou-se um aparelho medidor do tipo de pressão (Figura 33), em acordo com a NBR NM 47 –ABNT (2002). Quanto à massa específica dos concretos, foi concebida através da NBR 9833 – ABNT (1987b), apresentada na Figura 34.



Figura 33. Aparelho medidor de ar.

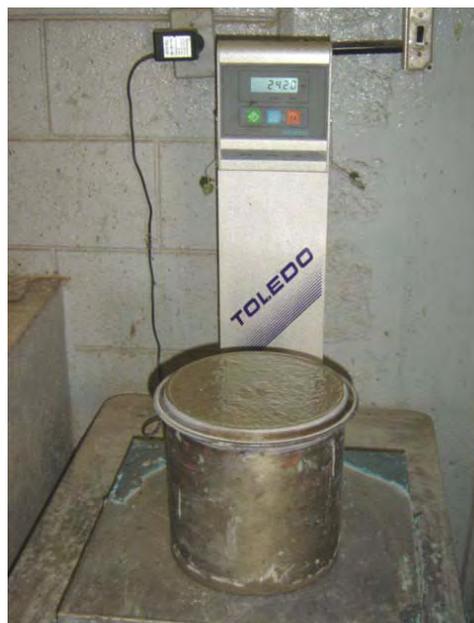


Figura 34. Determinação da massa específica.

Moldou-se corpos-de-prova cilíndricos, conforme sugerido pela NBR 5738 (2003 a) e todos os corpos-de-prova foram adensados com o auxílio de mesa vibratória. Foram moldados os seguintes corpos-de-prova:

→ **Corpos-de-prova cilíndricos:** 10 x 20 cm (diâmetro x altura), para realização dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão. A Figura 35 mostra os corpos-de-prova após a moldagem;



Figura 35. Após moldagem dos corpos-de-prova (10 x 20 cm).

→ **Corpos-de-prova cilíndricos:** 30 x 10 cm (diâmetro x altura), destinado ao ensaio de abrasão, sendo apresentados na Figura 36, durante a moldagem.



Figura 36. Moldagem do corpo-de-prova (30 x 10 cm).

→ **Corpos-de-prova prismáticos (placas):** 5 cm x 15 cm x 30 cm, para ensaios de resistência ao impacto, apresentada pela Figura 37.



Figura 37. Moldagem dos corpos-de-prova (5 x 15 x 30 cm).

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente 24 horas. Ao retirar as fôrmas, colocou-se os corpos-de-prova em câmara úmida, segundo a NBR 5738 (2003a), até os respectivos ensaios.

Realizou-se os ensaios de resistência à compressão do estudo de otimização dos materiais, para as idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Entretanto os ensaios finais de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, foram feitos nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias. Os ensaios de resistência ao impacto e absorção de água por imersão realizou-se nas idades 7 e 28 dias e o ensaio submetido a resistência à abrasão foi realizado aos 28 dias de idade. O resultado final dos respectivos ensaios é a média aritmética de três valores.

5.3.2.2.2. Concreto no Estado Endurecido

5.3.2.2.2.1. Propriedades Mecânicas

Ensaiou-se as propriedades mecânicas segundo as especificações: resistência à compressão simples - NBR 5739 (1994), resistência à tração por compressão diametral - NBR 7222 – ABNT (1994b) e módulo de elasticidade, a NBR 8522 – ABNT (2003b).

Antes dos corpos-de-prova serem submetidos aos respectivos ensaios (resistência à compressão e módulo de elasticidade), todos estes foram capeados com uma mistura composta por enxofre e pozolana e pode ser visualizado na Figura 38.



Figura 38. Corpos-de-prova submetidos ao capeamento.

As propriedades mecânicas dos concretos de alto desempenho foram realizadas em prensa hidráulica com capacidade máxima de 100 toneladas (resistência à compressão), apresentada na Figura 39.



Figura 39. Prensa hidráulica para realização dos ensaios.

A Figura 40 abaixo, mostra os corpos-de-prova submetidos a resistência à compressão na prensa hidráulica.



Figura 40. Corpo-de-prova do traço com 5% CCA-C submetido a resistência à compressão.

Logo após o corpo-de-prova ser submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o mesmo partiu ao meio como mostra a Figura 41.



Figura 41. Corpo-de-prova do traço com 5% CCA-A submetido a resistência à tração.

Realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade em prensa hidráulica mecânica e manualmente, sendo adaptado no corpo-de-prova dois relógios comparadores para obtenção das leituras conforme o andamento do carregamento (Figura 42). O limite de carregamento a ser lançado no ensaio de módulo de elasticidade correspondeu a 30% da carga de resistência à compressão.



Figura 42. Detalhe do corpo-de-prova ajustado para a realização do ensaio do módulo de elasticidade.

Quanto à determinação da resistência ao impacto dos concretos de alto desempenho, seguiu-se as especificações da NBR 9454 - ABNT (1993).

O método utilizado baseou-se na queda livre de uma esfera com massa conhecida sobre o centro de um corpo-de-prova prismático de concreto colocado na caixa de areia.

O equipamento do ensaio da resistência ao impacto é composto por um tubo de comprimento de 2,20 m fixado na parede, por uma esfera metálica ligada a um barbante no interior do tubo com peso de 0,5 kg, passando por uma roldana e uma caixa metálica contendo areia situada abaixo do tubo, onde colocou-se o corpo-de-prova, sendo visualizado na Figura 43.



Figura 43. Equipamento para o ensaio de resistência ao impacto.

O equipamento possui perfurações transversais de 10 em 10 cm até uma altura de 2,20 m, sendo a primeira perfuração situada a 0,20 m do corpo-de-prova, mostrado na Figura 44. Colocou-se e nivelou-se o corpo-de-prova na caixa metálica de areia. Quanto ao ensaio, realizou-se em queda livre, auxiliado com a introdução e retirada do pino metálico determinando a altura de queda.



Figura 44. Visualização do equipamento ajustado.

Prosseguiu-se o ensaio da seguinte maneira: iniciou a aplicação de cargas de impacto a partir da primeira perfuração (0,20 m) com a queda da esfera metálica. No decorrer destas repetições notou-se o surgimento da primeira fissura e assim sucessivamente à superfície (superior) do corpo-de-prova, e com auxílio de uma lupa graduada (mm) foi possível medir a espessura dessas fissuras. Esse ensaio possui 21 impactos, contando da primeira altura de 0,20 m até a última de 2,20 m. A Figura 45 apresenta o corpo-de-prova após o termino do ensaio de resistência ao impacto, seja a última fissura.



Figura 45. Corpo-de-prova ensaiado – 5% CCA-A.

A partir deste método para determinação da resistência ao impacto a mesma é determinada em função da energia necessária para gerar a primeira fissura na face

superior e/ou ruptura do corpo-de-prova. A Equação 1 utilizada por Rossignolo (2003) e por Martins (2005), apresenta a relação entre Resistência ao Impacto (Ri), em Joules (J), a massa da esfera (m), e a altura de queda (h) necessária para gerar a primeira fissura na face superior e/ou ruptura do corpo-de-prova.

$$E_i = h * m * a$$

Equação 1

Sendo:

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).

Portanto determinou-se a resistência ao impacto através do somatório de energia para o surgimento da primeira fissura na face superior e/ou ruptura do corpo-de-prova.

5.3.2.2.2.2. Propriedades relacionadas à durabilidade

Quanto aos ensaios relacionados à durabilidade dos concretos em vigor, destacam-se absorção de água por imersão, segundo as especificações NBR 9778 – ABNT (1987a), e a resistência à abrasão, onde o procedimento utilizado para o ensaio desenvolveu-se no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), baseado no método do U. S. Corps of Engineers intitulado “Abrasion – Erosion Resistance of Concrete” (LCEC, 1983).

As Figuras 46 e 47 apresentam os corpos-de-prova submetidos pelo ensaio de absorção de água, de acordo com especificações, passando primeiramente pela estufa e em seguida imersos no tanque d’água.



Figura 46. Corpos-de-prova na estufa.



Figura 47. Corpos-de-prova imersos em água.

Utilizou-se um aparelho no ensaio de resistência à abrasão que consiste essencialmente de um motor elétrico, uma pá de agitação, e um recipiente cilíndrico de aço para conter o corpo-de-prova submerso a ser ensaiado, e sobre sua superfície são adicionados as esferas de aço. As Figuras 48 e 49 mostram o aparelho para o ensaio de resistência à abrasão e o corpo-de-prova submerso no recipiente do ensaio de resistência à abrasão.



Figura 48. Aparelho para o ensaio de resistência à abrasão.



Figura 49. Corpo-de-prova submerso no recipiente do ensaio de resistência à abrasão.

O sistema motor, correia e roldanas são dimensionados para manter a pá de agitação, a água é mantida em movimento circular constante, ao qual se transmite para as esferas. O desgaste do corpo-de-prova é verificado através do atrito das esferas na superfície deste, causando sua abrasão. O desgaste é calculado através da porcentagem da massa inicial do corpo-de-prova, no decorrer de 71 horas de ensaio, sendo pesado antes de iniciar o ensaio e após 10, 24, 48 e 71 horas.

Vale ressaltar que visando mencionar a ordem de grandeza do ensaio de resistência à abrasão, e tendo como parâmetros para analisar os resultados obtidos em vigor são mostrados nos Quadros 5.1 e 5.2, alguns resultados obtidos pelo Laboratório

CESP de Engenharia Civil (LCEC) e por Martins (2005), para possíveis comparações com os resultados da pesquisa.

Quadro 1. Resultados de Resistência à Abrasão.
Fonte. LCEC (1990).

DEFINIÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DESGASTE À ABRASÃO APÓS 71 HORAS (%)	CORPO-DE-PROVA APÓS O ENSAIO DE 71 HORAS
Concreto de Alta Resistência	64,6	3,19	
Concreto de Alta Resistência com 10% de sílica ativa	74,2	2,48	

Quadro 2. Resultados de Resistência à Abrasão.
Fonte. MARTINS (2005)

DEFINIÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DESGASTE À ABRASÃO APÓS 71 HORAS (%)	CORPO-DE-PROVA APÓS O ENSAIO DE 71 HORAS
Concreto de Alto Desempenho com 8% de sílica ativa	86,2	0,61	
Concreto de Alto Desempenho com 8% de sílica ativa e borracha de pneu	72,3	0,80	

6. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. ENSAIOS REALIZADOS EM ARGAMASSA

A Tabela 22 apresenta os resultados do ensaio de índice de consistência para cada tempo de moagem e porcentagem de CCA Cristalina.

Tabela 22. Ensaio de índice de consistência.

Tempo de moagem	Porcentagem de CCA	Flow (mm)
-	Controle	170,0
20 min.	5%	160,5
	10%	150,3
30 min.	5%	160,8
	10%	150,0
40 min.	5%	160,5
	8%	155,6
	10%	150,2
	15%	140,3
50 min.	5%	160,7
	10%	150,5
60 min.	5%	160,4
	10%	150,4

Analisando a Tabela 22, percebeu-se uma redução no índice de consistência da argamassa, com o aumento da porcentagem de CCA e independente da granulometria de CCA, quando comparado ao traço Controle. Tal fato acontece devido à quantidade finos, pois quanto maior a quantidade de CCA, maior o consumo de água empregado no traço.

A Tabela 23 e a Figura 50 mostram os resultados sobre o estudo de argamassa submetido ao ensaio de resistência à compressão (Tabela 29 e 30, ANEXO), em relação ao tempo de moagem da CCA Cristalina.

Tabela 23. Ensaio de índice de consistência.

Tempo de Moagem (min.)	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)		
		5% CCA	10% CCA	15% CCA
20	7	46,9	48,5	47,8
	28	55,0	55,6	54,4
30	7	50,3	51,2	48,7
	28	57,8	57,3	55,5
40	7	53,9	53,9	51,9
	28	58,1	59,4	56,0
50	7	51,5	52,6	51,8
	28	56,8	56,6	55,8
60	7	48,6	49,4	48,8
	28	55,5	55,8	56,6

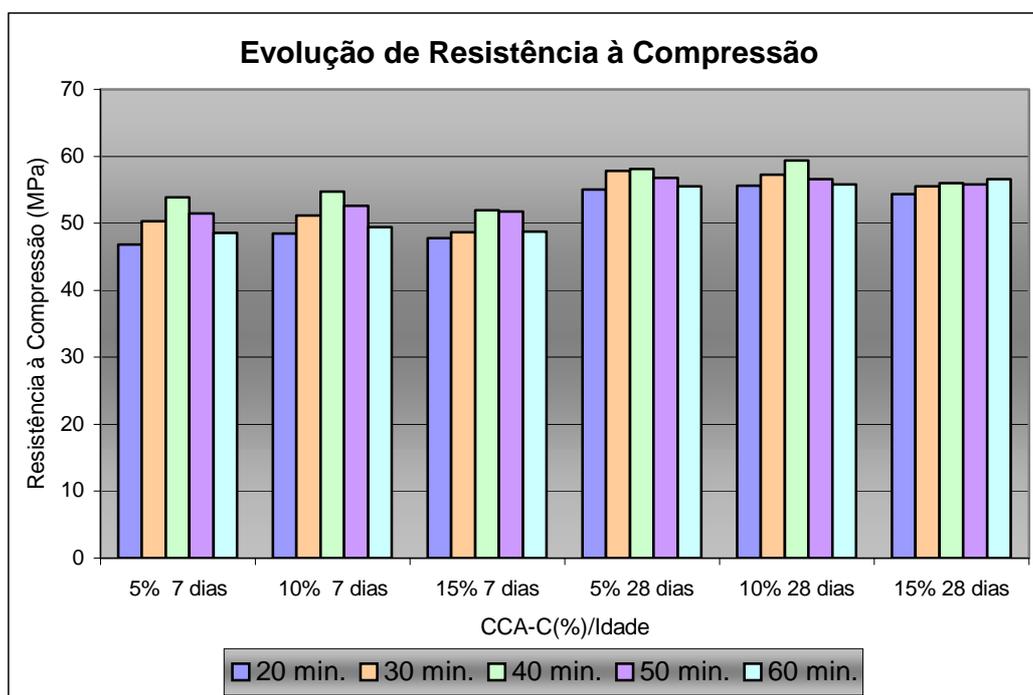


Figura 50. Relação entre resistência à compressão e tempo de moagem.

De acordo com a Figura 50, observou-se que o traço com maior ganho de resistência à compressão, nas idades analisadas, foi àquele obtido com 40 minutos de

moagem, indicando ser a melhor granulometria, independente da porcentagem de CCA. Notou-se também que, os traços com 15% de CCA-C mostraram uma evolução de resistência à compressão nas idades analisadas e apresentou valores próximos de resistência à compressão aos 28 dias, independente da granulometria.

Contudo, ficou determinado o tempo de moagem da CCA Cristalina em 40 minutos, para posteriores estudos.

A Figura 51, mostra a evolução da resistência á compressão da argamassa com a granulometria de 40 minutos, em diferentes porcentagens de CCA.

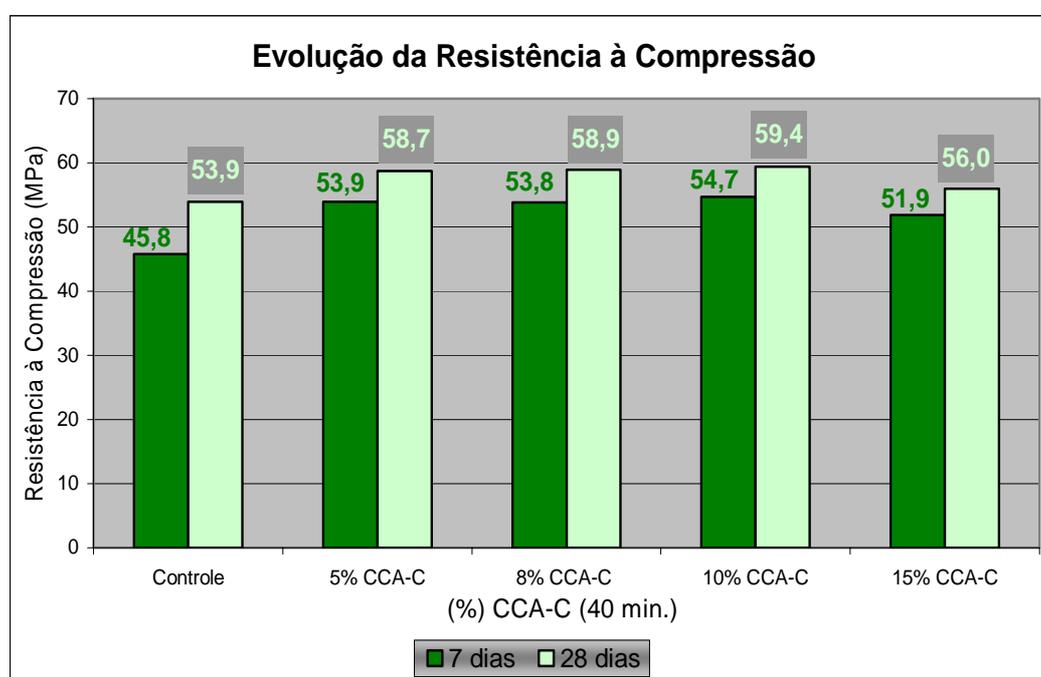


Figura 51. Evolução da resistência à compressão – CCA-C.

Através dos resultados da Figura 51, percebeu-se um maior ganho de resistência à compressão, para o traço com 10% de CCA, quando comparado ao traço Controle, girando em torno de 9%, aos 28 dias de idade.

Notou-se que os traços de argamassa entre 5% e 10% de CCA mostraram uma evolução de resistência à compressão, em relação ao Controle, nas idades analisadas. Enquanto que o traço contendo 15% de CCA mostrou um decréscimo de resistência à compressão, quando comparado aos demais traços com CCA, sendo considerado com bom desempenho.

Num contexto geral, todos os traços tiveram uma evolução na resistência ao incorporar CCA Cristalina. Portanto, as porcentagens com melhor ganho de resistência à compressão estão na faixa entre 5 e 10%.

Diante dos resultados apresentados, as cinzas utilizadas na produção de CAD foram fixadas com o respectivo tempo de moagem: CCA Amorfa – 30 minutos e CCA Cristalina – 40 minutos.

6.2. ENSAIOS DE CAD COM CCA E BORRACHA DE PNEU

6.2.1. ESCOLHA DO TRAÇO COM MELHOR TRABALHABILIDADE E ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

6.2.1.1. Trabalhabilidade

Através do ensaio de abatimento, foi possível obter a trabalhabilidade dos traços do estudo de otimização dos materiais, conforme a Figura 52:

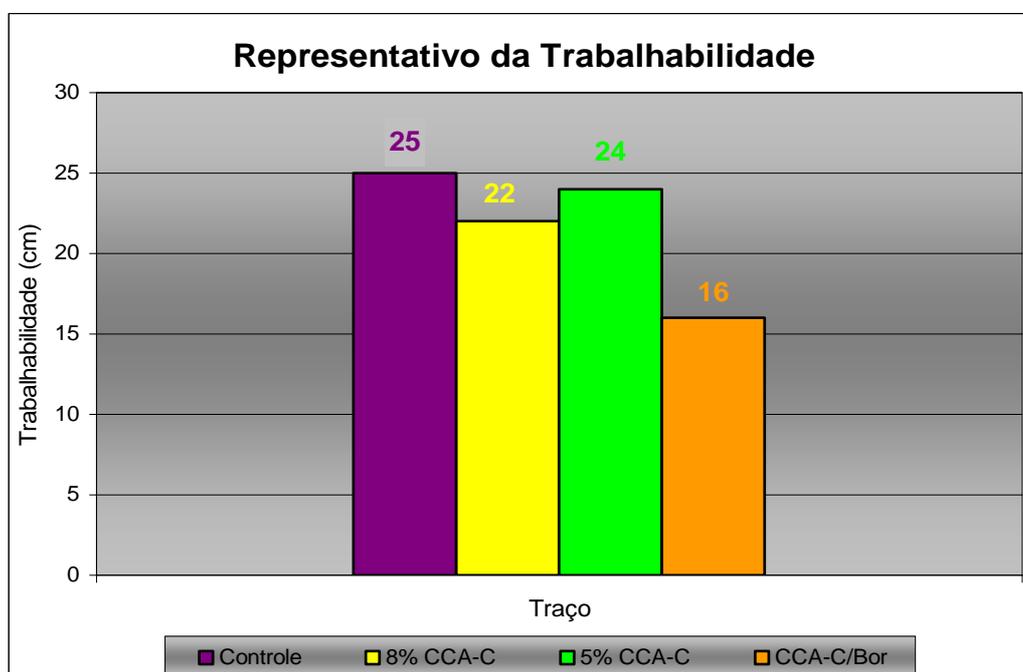


Figura 52. Resultado do ensaio de abatimento.

Analisando os resultados da trabalhabilidade apresentada na Figura 52, constatou-se que o CAD pertencente ao traço Controle atingiu a trabalhabilidade

esperada. Entretanto, com a incorporação da cinza notou-se que tal propriedade foi afetada com o aumento de porcentagem de CCA. Isso provavelmente se deve à incorporação de material fino aos concretos, no caso a CCA Cristalina, aumentando a área de molhagem devido a maior superfície específica dos grãos, assim diminuindo a trabalhabilidade do concreto.

Contudo, entre os traços com a incorporação de cinza, o traço com 5% de CCA-C apresentou melhor trabalhabilidade e facilidade em manusear o concreto no estado fresco, em relação ao traço com 8% de CCA-C. Pois este último traço, embora apresentou a trabalhabilidade esperada, mostrou dificuldades em manusear enquanto no estado fresco.

Já o concreto com incorporação de borracha de pneu ocorreu o esperado, uma redução da trabalhabilidade, em torno de 33%.

6.2.1.2. Ensaio de resistência à compressão

A Figura 53 mostra os resultados dos CAD pertencentes aos traços do estudo de otimização dos materiais sob o ensaio de resistência à compressão, cujo valor de cada ponto representa a média aritmética de três corpos-de-prova.

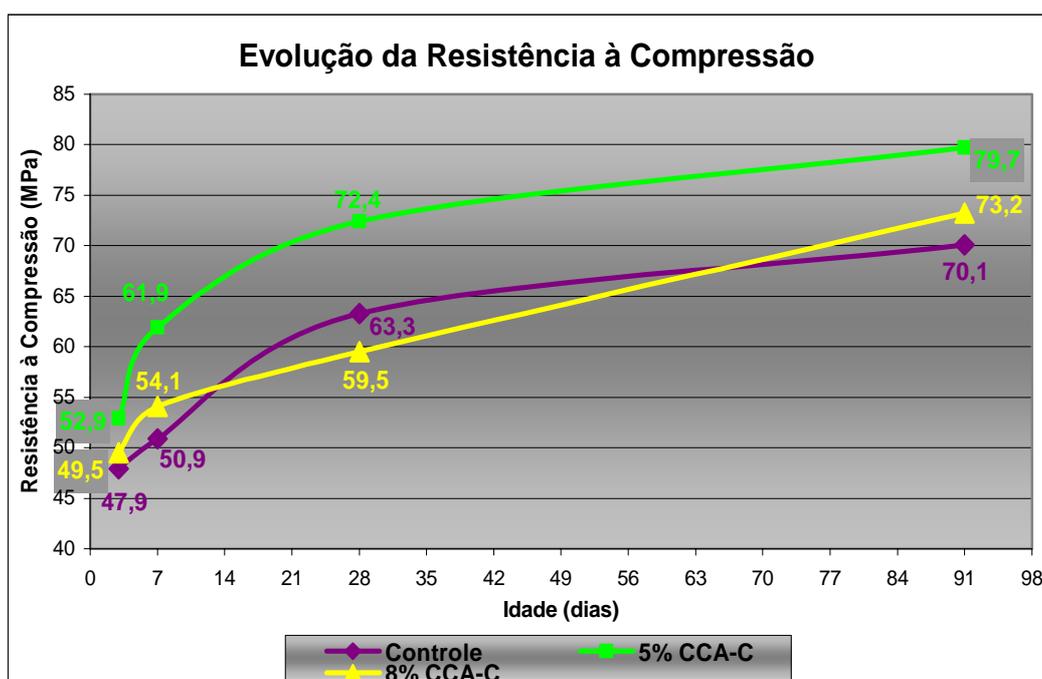


Figura 53. Evolução da resistência à compressão de vários traços com CCA-C.

Através da Figura 53, observou-se que todos os traços atingiram uma evolução de resistência à compressão a patamares elevados aos 28 dias de idade, ou seja, resistência acima de 50 MPa.

Os CAD com 8% de CCA-C e 5% de CCA-C a incorporação de cinza, mostraram um maior ganho de resistência à compressão, em torno de 5% e 14% respectivamente, quando comparado ao traço Controle, ao 91 dias.

Num contexto geral, o concreto de alto de desempenho pertencente ao traço com 5% de CCA-C além de demonstrar maior facilidade de manusear enquanto fresco, apresentou melhor desempenho no que se refere a resistência à compressão, quando comparado ao traço 8% de CCA-C. Diante disso, optou-se em trabalhar com a porcentagem de 5% de incorporação de cinza, para posteriores investigações que remetem estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade.

A Figura 54 mostra a evolução da resistência à compressão dos concretos de alto desempenho contendo 5% de CCA-C e outro com CCA-C e Borracha de pneu, cujos valores apontados representam média aritmética de três corpos-de-prova.

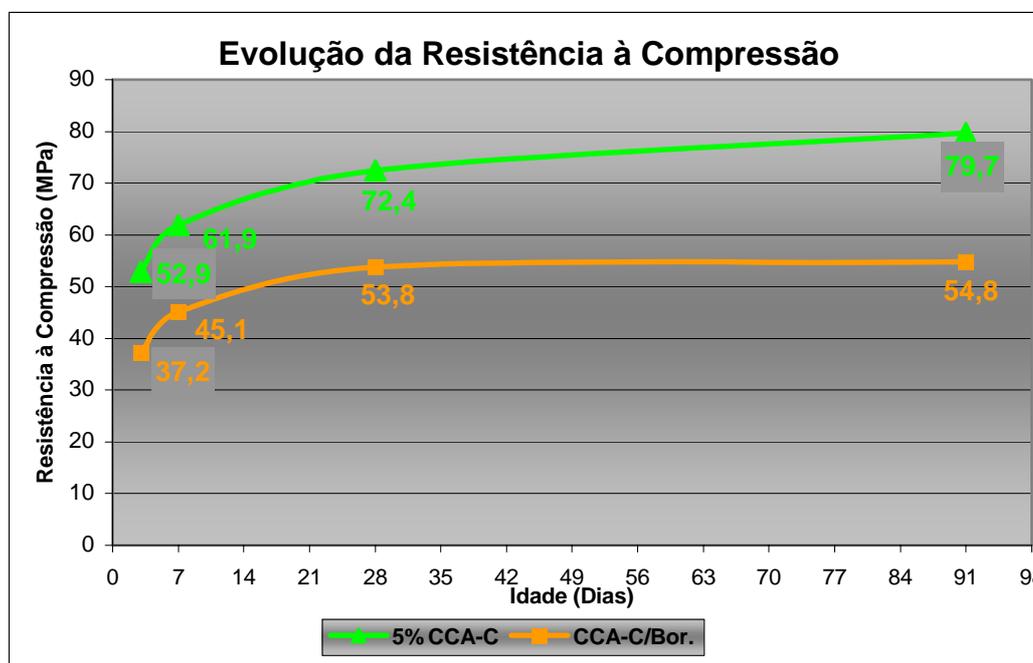


Figura 54. Evolução da resistência à compressão.

Analisando os resultados da Figura 54, notou-se que no CAD com Borracha ocorreu redução da resistência à compressão, em relação ao traço com 5% de CCA-C,

girando em torno de 25 a 31%, nas idades analisadas. Pode-se dizer ainda que taxa de evolução da resistência à compressão, entre 3 e 91 dias de idade, foi menor para o traço com CCA-C e Bor. (47%), tendo como parâmetro a evolução do traço 5% de CCA-C (50,7%). Contudo tais valores de resistência à compressão são pertencentes ao grupo de concreto de alto desempenho.

Em concreto de alto desempenho é freqüente os autores relatarem que a ruptura dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão ocorrem de maneira brusca. No traço com 5% de CCA-C também observou-se este tipo de comportamento de ruptura. Em compensação, o traço com 5% CCA-C e Bor. se por um lado apresentou redução de resistência à compressão, em contrapartida observou-se mudança no comportamento de ruptura, apresentando redução da fragilidade.

As Figuras 55 e 56 apresentam os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão, dos CAD com 5% de CCA-C e com CCA-C e Borracha., mostrando a diferenciação no comportamento de ruptura.



Figura 55. Corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão do traço 5% CCA-C.



Figura 56. Corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão do traço CCA-C/Bor..

Após definir os traços no estudo de otimização dos materiais, fixou-se este traço para os demais traços em questão, dando-se continuidade às atividades desta pesquisa.

6.2.2. ANÁLISE DO CAD COM CCA E BORRACHA DE PNEU NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

6.2.2.1. Trabalhabilidade, teor de ar e massa específica

Através dos resultados do ensaio de abatimento pode-se avaliar a trabalhabilidade dos concretos de alto desempenho, onde os respectivos abatimentos estão apresentados na Figura 57.

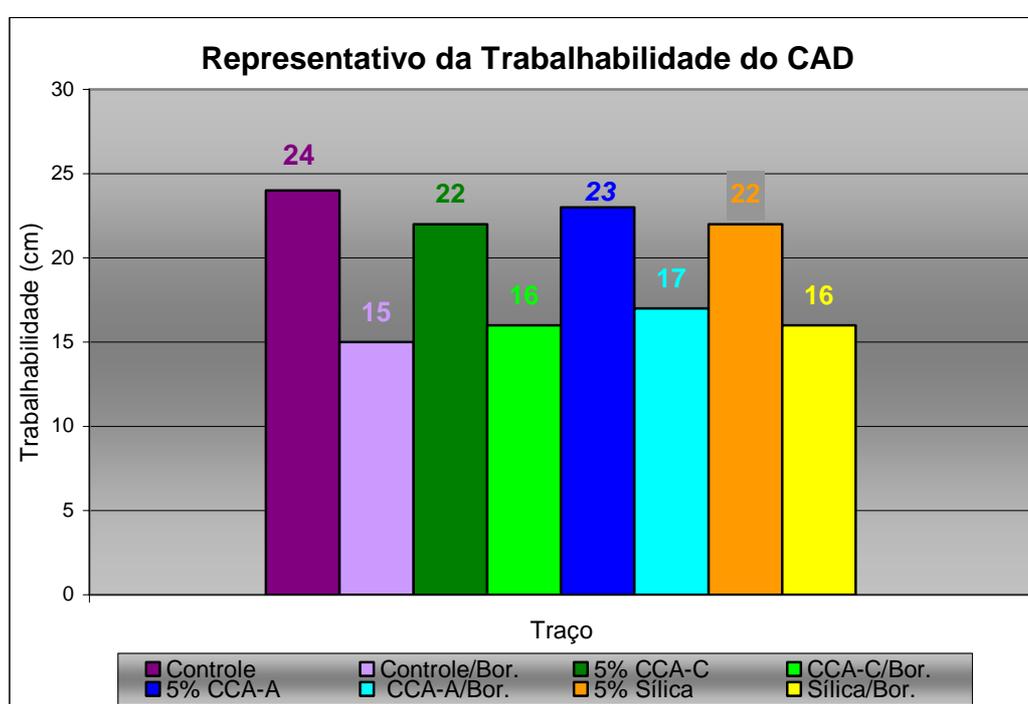


Figura 57. Resultado do ensaio de abatimento.

Observou-se que, independentemente do tipo de incorporação mineral, ocorreu uma pequena redução da trabalhabilidade em comparação ao traço Controle, indicando-se que os traços com a incorporação de borracha de pneu apresentaram redução da trabalhabilidade, em relação aos CAD com incorporação mineral e sem incorporação.

A temperatura dos CAD foi medida após o amassamento em um termômetro digital, cujos valores da temperatura variaram entre 25,2 a 31,5° C, como mostra a Figura 58.

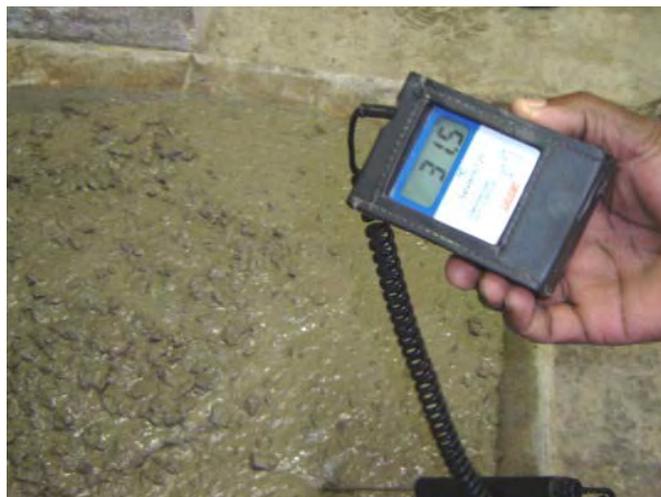


Figura 58. Termômetro digital.

A Tabela 24 apresenta a porcentagem de ar incorporado e a massa específica dos respectivos traços de CAD.

Tabela 24. Teor de ar incorporado e massa específica.

Traço	Teor de ar incorporado (%)	Massa específica (kg/m³)
Controle	2,90	2520
Controle/Bor.	3,40	2460
5% CCA-C	2,90	2530
CCA-C/Bor.	2,40	2470
5% CCA-A	2,00	2580
CCA-A/Bor.	2,00	2500
5% Sílica	2,90	2503
Sílica/Bor	2,90	2488

6.2.2.2. Resistência à Compressão

A evolução da resistência à compressão de cada traço analisado de concreto de alto desempenho é apresentada na Figura 59 e na Tabela 31 e 32 em ANEXO, cujos valores de cada ponto representam a média aritmética de três corpos-de-prova.

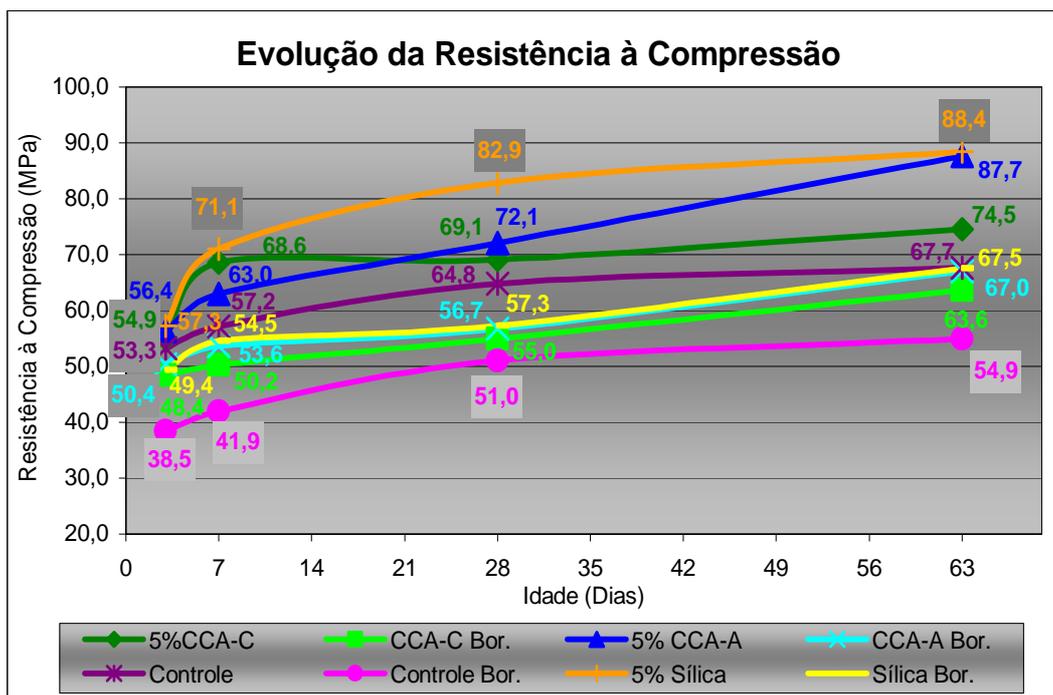


Figura 59. Evolução da resistência à compressão.

Percebeu-se, através dos valores contidos na Figura 59, que os fatores idade e tipo de incorporação mineral têm influência direta sobre os resultados de resistência à compressão. De maneira geral, os traços com incorporação mineral apresentaram elevação dos valores médios, independentemente do tipo de incorporação mineral, comparativamente com traço o Controle, ao aumentar a idade. Fato explicado pela ação do efeito microfiller (importante ação das CCAs e Sílica ativa no concreto desde as primeiras idades) juntamente com as reações pozolânicas (também uma importante ação das CCAs e sílica ativa no concreto, que ocorre em idades de aproximadamente, 28 dias) das CCAs e Sílica ativa.

Analisando os dados experimentais, observou-se que a taxa de crescimento de resistência variou de acordo com o tipo de incorporação mineral, e evoluiu com o tempo mais rapidamente do que o concreto Controle, por se processarem as reações pozolânicas. Os traços com incorporação mineral, mostraram maior parcela de ganho de resistência nas primeiras idades, chegando a 20%, dos 3 aos 7 dias de idade. Notou-se também que os traços com 5% de CCA-A e 5% de CCA-C apresentaram um acréscimo de resistência, aos 63 dias idade, em torno de 29% e 10%, respectivamente, em relação ao traço Controle. Pode-se dizer ainda, que os traços com cinzas apresentaram valores

próximos de resistência à compressão, em relação ao traço com 5% de Sílica nas primeiras idades, diferindo com o aumento da idade, efeito proporcionado pelas reações pozolânicas de cada material. E também que, o traço com 5% de CCA-A atingiu valor próximo de resistência á compressão aos 63 dias de idade, quando comparado ao traço com 5% de Sílica.

Quanto aos Concretos de Alto Desempenho com Borracha, independentemente do tipo de incorporação mineral e sem incorporação, verificou-se inferioridade na resistência à compressão, quando comparados aos CAD sem Borracha. Porém, os CAD com incorporação mineral e Borracha mostraram uma parcela de ganho de resistência à compressão, em relação ao concreto Controle e Borracha, mostrando uma superioridade de 22%, aos 63 dias de idade.

Os concretos de alto desempenho com Borracha apresentaram as seguintes porcentagens de redução da resistência, em relação aos respectivos concretos sem Borracha cerca de 23% para o traço Controle e Borracha, 30% para o traço com CCA-A e Borracha, 17% para o traço com CCA-C e Borracha, e 30% para o traço com Sílica e Borracha, aos 63 dias de idade.

As Figuras 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 e 67 ilustram os corpos-de-prova rompidos após o ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, mostrando o seu comportamento de ruptura característico do CAD com Borracha.



Figura 60. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão - Controle.



Figura 61. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão – Controle/Bor..



Figura 62. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão –5% CCA-C.



Figura 63. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão - CCA-C/Bor..



Figura 64. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão – 5% CCA-A.



Figura 65. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão – CCA-A/Bor..



Figura 66. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão – 5% Sílica.



Figura 67. Corpo-de-prova rompido a resistência à compressão – Sílica/Bor..

Num contexto geral, quanto ao comportamento de ruptura, notou-se que independentemente do tipo de incorporação mineral e sem incorporação, os corpos-de-prova não apresentaram diferença quanto ao comportamento de ruptura, diferenciando apenas quando incorporado a Borracha de pneu.

A ruptura dos corpos-de-prova com incorporação mineral e sem incorporação, apresentaram ruptura frágil, se fragmentando em pedaços, fato característico do CAD. Já para os corpos-de-prova com Borracha este fato não ocorreu, apesar dos corpos-de-prova de terem sido rompidos com tensões menores; mostraram maior dilatação volumétrica, mantendo quase que sua configuração inicial.

6.2.2.3. Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 68 pode ser visualizado o resultado obtido para a resistência à tração por compressão diametral (Tabela 33 e 34, ANEXO) de CAD, onde cada ponto do gráfico representa a média de três corpos-de-prova.

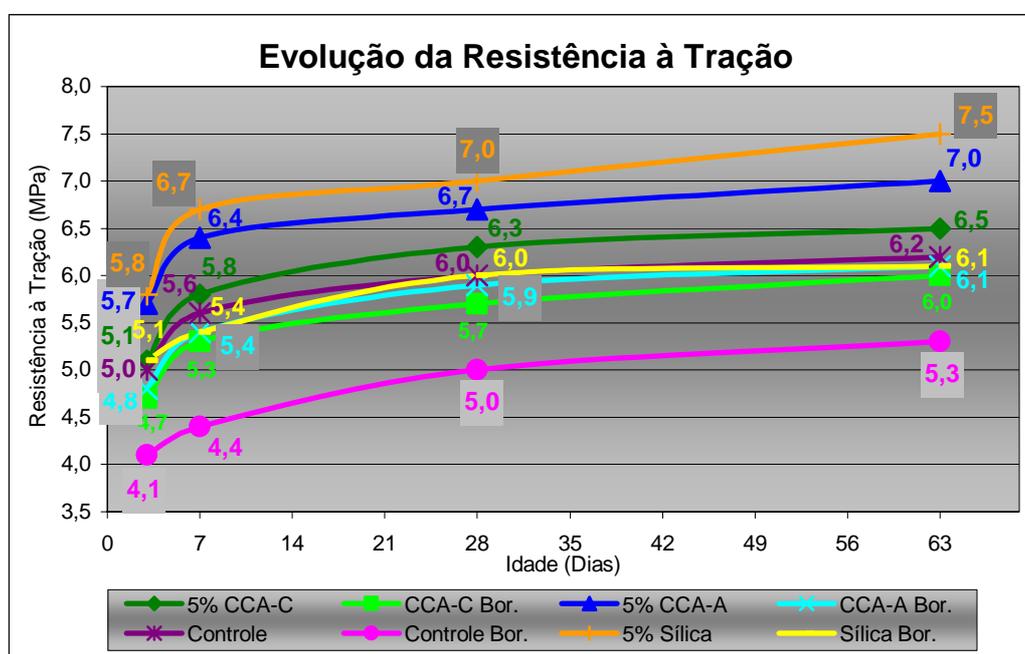


Figura 68. Evolução da resistência à tração por compressão diametral.

Com base nos resultados da Figura 68, constatou-se que os traços de CAD apresentaram elevações dos valores médios obtidos ao incorporar CCAs e Sílica ativa,

em relação ao traço Controle, independente da idade. Fato explicado pela ação do efeito microfíler juntamente com as reações pozolânicas das CCAs e sílica ativa

Os concretos com Sílica ativa e cinza Amorfa apresentaram os melhores resultados, havendo um maior ganho de resistência à tração aos 63 dias de idade, em relação ao traço Controle, girando em torno de 16%. O concreto com cinza Cristalina mostrou um acréscimo de resistência à tração de 5%, nessa mesma idade.

Quanto aos concretos de alto desempenho com Borracha ambos os traços também mostraram um decréscimo de resistência à tração, na faixa de 14%, 23%, 8% e 17%, aos 63 dias idade, para os respectivos traços com CCA-A e Borracha, com Sílica e Borracha, com CCA-C e Borracha, e com Controle e Borracha.

Notou-se também que os concretos com incorporação mineral e Borracha tiveram no mesmo patamar de resistência.

As Figuras 69, 70 e 71 apresentam os corpos-de-prova após o ensaio de resistência à tração, aos 28 dias de idade. Observou-se que após a ruptura dos CAD sem Borracha, os corpos-de-prova se separaram, independentemente do tipo de incorporação mineral e sem incorporação. No entanto, os corpos-de-prova do CAD com Borracha, ao fim do ensaio apesar de atribuir deformações não se separaram.

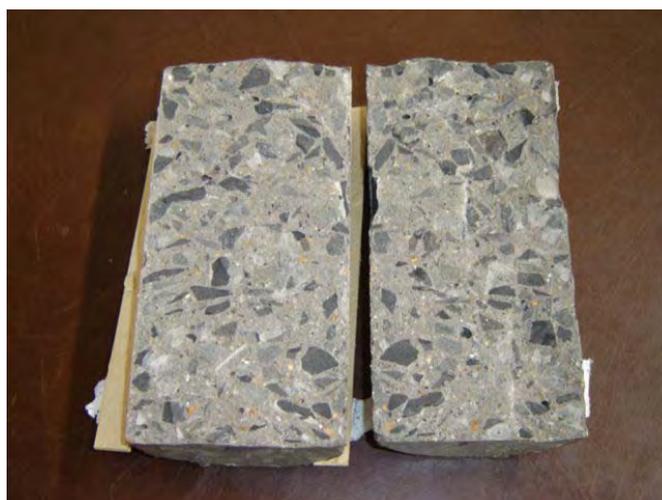


Figura 69. Corpo-de-prova rompido a resistência à tração - 5%.



Figura 70. Corpo-de-prova rompido a resistência à tração.



Figura 71. Corpo-de-prova rompido a resistência à tração.

A Figura 72 mostra um corpo-de-prova de CAD, com CCA e Borracha aberto, mostrando o detalhamento da Borracha.

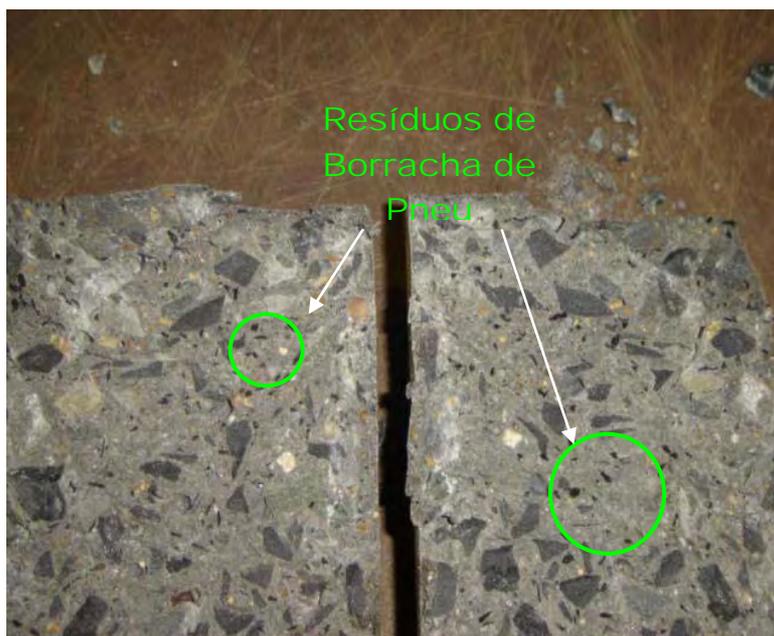


Figura 72. Corpo-de-prova rompido a resistência à tração - 5%.

6.2.2.4. Módulo de elasticidade

A Figura 73 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade (Tabela 35 e 36, ANEXO) de cada traço nas respectivas idades, onde o valor de cada ponto corresponde à média de três corpos-de-prova.

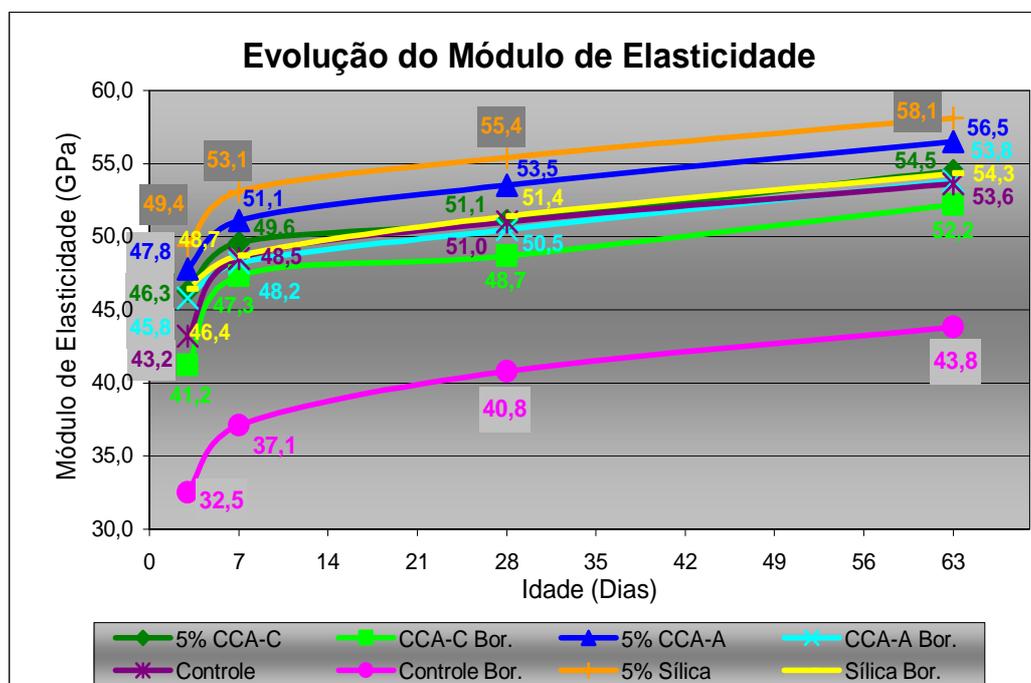


Figura 73. Evolução do módulo de elasticidade.

Analisando a Figura 73, percebeu-se, de maneira geral, que os traços com a incorporação mineral apresentaram elevações dos valores médios obtidos ao aumentar-se à idade e independentemente do tipo de incorporação mineral. Os resultados mostraram que o traço com 5% de CCA-A excelente comportamento, apresentando um acréscimo do módulo de elasticidade de 5%, aos 63 dias de idade, em relação ao traço Controle. Enquanto o traço com 5% de CCA-C apresentou o mesmo valor de módulo comparativamente com o traço Controle nesta mesma idade. O traço com 5% de Sílica Ativa mostrou um acréscimo de 8% no módulo de elasticidade, em relação ao traço Controle, aos 63 dias de idade.

Para fins comparativo, Costenaro (2003, p.87) comenta que em seus resultados ocorreu um acréscimo do módulo de elasticidade para os CAD com adição (substituição volumétrica) de cinza de casca de arroz amorfa e sílica ativa, em torno de 2% e 14%, respectivamente após 28 dias.

Contudo, verificou-se que a taxa de crescimento do módulo de elasticidade foi na mesma ordem grandeza, tanto para o traço com 5% de CCA-A como para o traço com 5% de CCA-C, em torno de 18%, ao longo das idades analisadas. Os traços Controle e 5% de Sílica apresentaram essa taxa de crescimento do módulo de elasticidade na faixa de 24% e 20% respectivamente.

Em relação aos CAD com Borracha, percebeu-se que ambos os traços apresentaram uma pequena redução do módulo de elasticidade, quando comparados os CAD sem Borracha, estando na ordem de 5% e 4%, respectivamente para os traços com 5% de CCA-A e Borracha, e com 5% de CCA-C e Borracha, aos 63 dias de idade. Porém os traços com Sílica e Borracha, e Controle e Borracha mostraram redução do mesmo, na ordem de 7% e 20%, aos 63 dias de idade. Ressaltando-se que o traço Controle e Borracha tiveram as maiores queda do módulo de elasticidade, em todas as idades.

Para fins comparativo, Martins (2005, p.101) apresentou em seus resultados uma redução de 12% no módulo de elasticidade.

6.2.2.5. Relações entre as propriedades mecânicas

6.2.2.5.1. Relação entre resistência Tração e Resistência à Compressão

A Tabela 25 e a Figura 74 mostram os resultados da relação entre resistência à tração e a resistência à compressão do CAD com cinzas e borracha.

Tabela 25. Relação entre resistência à tração e compressão.

Traço	Idade (dias)			
	3	7	28	63
5%CCA C	0,092	0,084	0,091	0,087
5% CCA A	0,100	0,091	0,092	0,078
5% Sílica	0,101	0,094	0,084	0,084
Controle	0,095	0,097	0,093	0,092
CCA-C/Bor.	0,097	0,105	0,103	0,094
CCA-A/Bor.	0,095	0,100	0,104	0,091
Sílica/Bor.	0,103	0,099	0,104	0,090
Controle/Bor	0,106	0,105	0,104	0,096

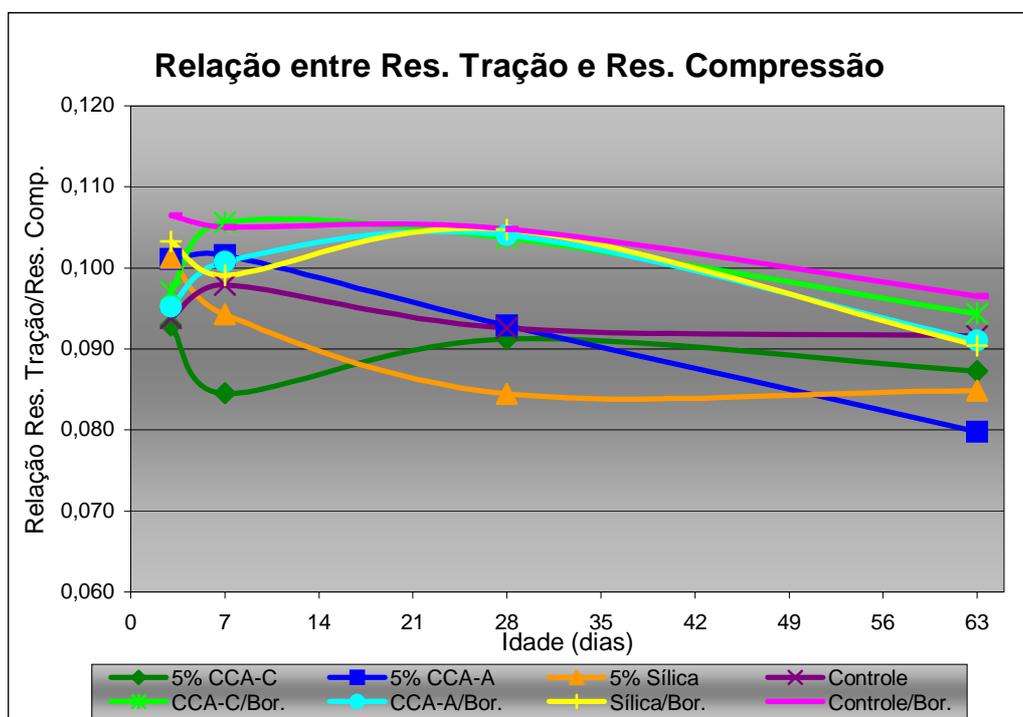


Figura 74. Relações entre resistência à tração e compressão.

Observando a Figura 74, percebeu-se que nos concretos de alto desempenho com e sem borracha, a evolução a resistência à tração não acompanhou a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. Assim admite-se que, para concreto convencionais a resistência à tração varia linearmente em função da resistência à compressão, fato comprovado por Alcântara (2004, p.15). Para o concreto de alto desempenho como a resistência à compressão é alta e a resistência à tração é baixa, a curva tende a ser curvilínea, em função exponencial inferior a 1, fato este que pode ser evidenciado na Figura 74.

Os traços com incorporação mineral apresentaram inferioridade dos valores da relação entre resistência à tração e resistência compressão, ao longo das idades analisadas, comparativamente ao traço Controle, mostrando ser um material mais frágil.

Quanto aos concretos de alto desempenho com Borracha, constatou-se superioridade dos valores da relação entre resistência à tração e resistência à compressão, em relação aos CAD sem Borracha, demonstrando maior ductilidade.

Aos 7 dias de idade, os traços com CCA-A e Borracha, e CCA-C e Borracha, demonstraram superioridade dos valores da relação entre resistência à tração e resistência à compressão, de 14% e 7%, em relação aos traços com 5% de CCA-A e 5% de CCA-C, aos 63 dias de idade.

O traço Controle e Borracha apresentou valores da relação entre resistência à tração e resistência à compressão, superior aos demais traços com Borracha, idades analisadas, demonstraram ser menos frágil.

Os traços com incorporação mineral e Borracha, aos 28 dias de idades, apresentaram praticamente a mesma relação entre resistência à tração e resistência à compressão.

6.2.2.5.2. Relação entre o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão – Módulo Unitário

A Tabela 26 e a Figura 75 mostram os resultados da relação entre módulo de elasticidade e a resistência à compressão, para os respectivos traços de CAD.

Tabela 26. Correlação entre módulo de elasticidade/compressão x idade (x1000).

Traço	Idade (dias)			
	3	7	28	63
5% CCA-C	0,843	0,723	0,739	0,731
5% CCA-A	0,844	0,731	0,742	0,636
5% Sílica	0,862	0,746	0,668	0,657
Controle	0,829	0,847	0,787	0,791
CCA-C Bor.	0,851	0,942	0,885	0,820
CCA-A Bor.	0,908	0,899	0,890	0,802
Sílica/Bor.	0,939	0,893	0,897	0,804
Controle/Bor.	0,844	0,885	0,855	0,797

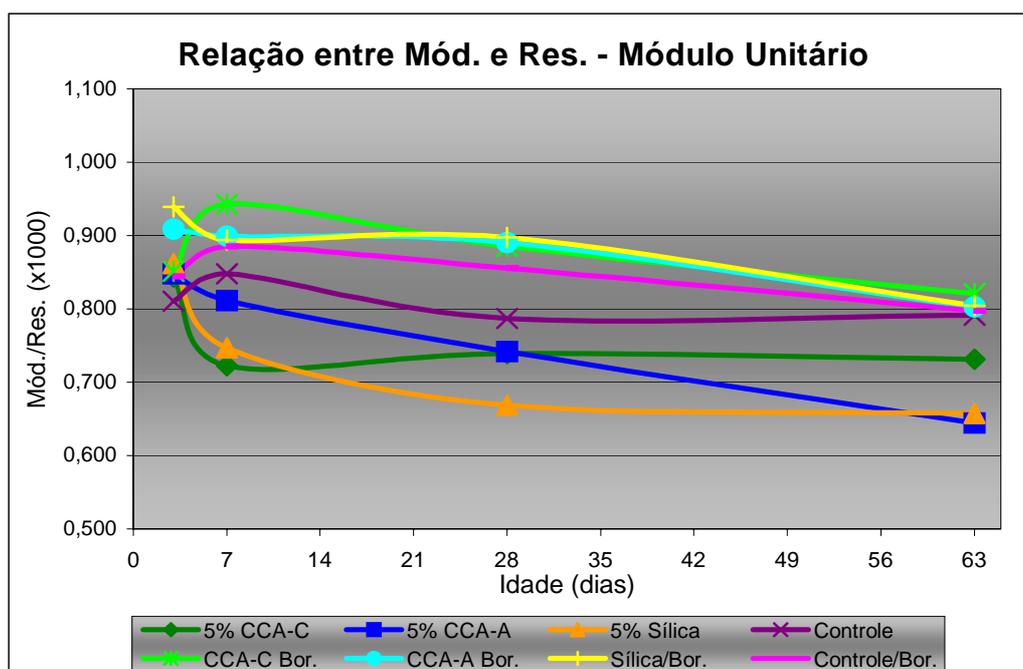


Figura 75. Relações entre módulo de elasticidade e compressão.

Diante dos resultados apresentados na Figura 75, notou-se superioridade dos valores dos módulos unitários para os concretos de alto desempenho com Borracha, quando comparados aos CAD sem Borracha, verificando maior tenacidade, ou seja, capacidade de absorção de energia, nos concretos com Borracha. Isto está de acordo com o encontrado por Martins (2005, p. 101).

Observou-se que os valores dos módulos unitários para os concretos de alto desempenho com incorporação mineral foram próximos nas primeiras idades, em relação ao traço Controle.

Para os CAD com incorporação mineral e Borracha, percebeu-se que os valores dos módulos unitário foram superiores comparativamente ao traço Controle e Borracha, em todas as idades. Contudo, os CAD com CCA-A e Borracha, e CCA-C e Borracha apresentaram um acréscimo nos valores do módulo unitário, aos 7 dias de idade, em relação aos CAD com 5% de CCA-A e 5% de CCA-C, respectivamente 30% e 23%.

6.2.2.5. Absorção de água por imersão

Após prosseguir a metodologia do ensaio de absorção de água por imersão dos concretos de alto desempenho, a Figura 76 resume os resultados da média de três corpos-de-prova, nas respectivas idades.

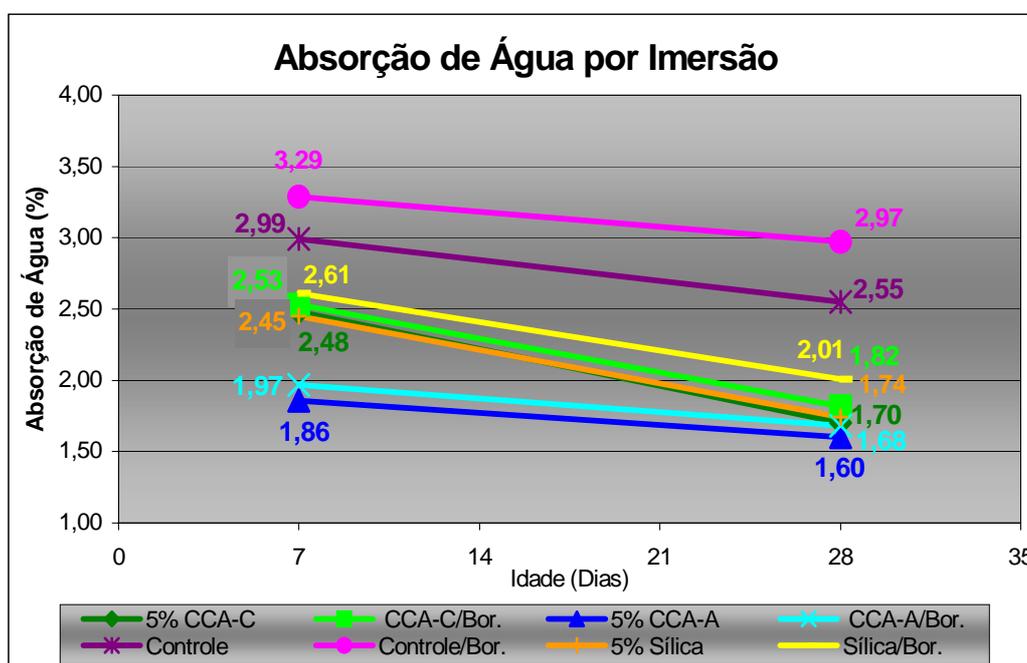


Figura 76. Absorção de água por imersão dos concretos de alto desempenho.

De acordo com a Figura 76, os CAD com incorporação mineral mostraram valores percentuais inferiores, comparativamente ao traço Controle. Como uma das principais ações da CCA e Sílica ativa no concreto se dão pelo efeito microfíler, as

partículas da mesma preenchem os poros do concreto para fechar o caminho de penetração da água, e conseqüentemente diminui a absorção destes concretos.

O traço com 5% de CCA-A registrou valores inferiores de absorção em relação ao traço com 5% de Sílica, obtendo valores próximos aos 28 dias de idade. Ainda, os traços contendo 5% de Sílica e 5% de CCA-C mostraram valores iguais de absorção, em ambas as idades.

Em relação aos CAD com Borracha, percebeu-se que estes tiveram praticamente a mesma ordem grandeza de absorção quando relacionados aos CAD sem Borracha, principalmente os CAD com incorporação mineral. Isto comprova que as partículas das CCAs e Sílica ativa preenchem os poros do concreto assim diminuindo a absorção de água, assim ressalvando que a Borracha de pneu nesse caso pouco influenciou no ensaio. Notou-se que o traço com Controle e Bor. apresentou maior absorção em relação aos demais traços.

6.2.2.6. Resistência ao impacto

A Tabela 27 e Tabela 28 apresentam os resultados de resistência ao impacto dos concretos de alto desempenho, cujos valores correspondem a média de três corpos-de-prova.

Tabela 27. Resultados de resistência ao impacto dos concretos de alto desempenho (1ª Fissura).

1ª Fissura Observada						
Traço	Altura de Queda (m)		Resistência ao Impacto (J)		Espessura (mm)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Controle	1,5	1,6	59,5	67,5	0,3	0,3
Controle/Bor.	1,6	1,7	67,5	76,0	0,05	0,05
5% CCA-C	1,6	1,7	67,5	76,0	0,3	0,2
CCA-C/Bor.	1,8	1,9	85,0	94,5	0,05	0,05
5% CCA-A	1,8	1,9	85,0	94,5	0,1	0,1
CCA-A/Bor.	1,9	2,0	94,5	104,5	0,05	0,05
5% Sílica	1,8	1,9	85,0	94,5	0,1	0,05
Sílica/Bor.	1,9	2,0	94,5	104,5	0,05	0,05

Tabela 28. Resultados de resistência ao impacto dos concretos de alto desempenho (Última Fissura).

Última Fissura Observada							
Traço	Altura de Queda (m)		Resistência ao Impacto (J)		Espessura (mm)		Observações
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	
Controle	1,7	1,8	76,0	85,0	0,5	0,5	Seccionou totalmente
Controle/Bor.	1,8	1,9	94,5	94,5	0,2	0,5	ñ seccionou
5% CCA-C	1,8	1,9	85,0	94,5	0,8	0,5	Seccionou totalmente
CCA-C/Bor.	2,0	2,1	104,5	115,0	0,2	0,2	ñ seccionou
5% CCA-A	2,0	2,1	104,5	115,0	0,5	0,5	Seccionou totalmente
CCA-A/Bor.	2,1	2,2	115,0	126,0	0,2	0,2	ñ seccionou
5% Sílica	2,0	2,1	104,5	115,0	0,7	0,5	Seccionou totalmente
Sílica/Bor.	2,1	2,2	115,0	126,0	0,2	0,2	ñ seccionou

Constatou-se, através dos valores contidos nas Tabelas 6.6 e 6.7, que para os CAD com incorporação mineral e sem incorporação, foram necessários menores números de impacto (menor energia), para o surgimento da primeira fissura (Figura 77), quando comparados à primeira fissura aos CAD com Borracha (Figura 78), independente da idade.

Percebeu-se, que os concretos de alto desempenho com incorporação mineral tiveram resistência ao impacto superiores, quando comparados ao traço Controle, independentemente do tipo de incorporação mineral, da idade, e ordem de observação das fissuras (1ª e última fissura). Este fato também ocorreu para os CAD com incorporação mineral e Borracha.

Em relação aos CAD com incorporação mineral e Borracha, verificou-se uma parcela de ganho de resistência ao impacto na última fissura, cujos valores variaram de 9 a 20%, aos 28 dias de idade, comparativamente aos CAD somente com incorporação mineral. Enquanto o traço Controle/Bor. apresentou um acréscimo redução de 10% de resistência ao impacto, nesta mesma idade.

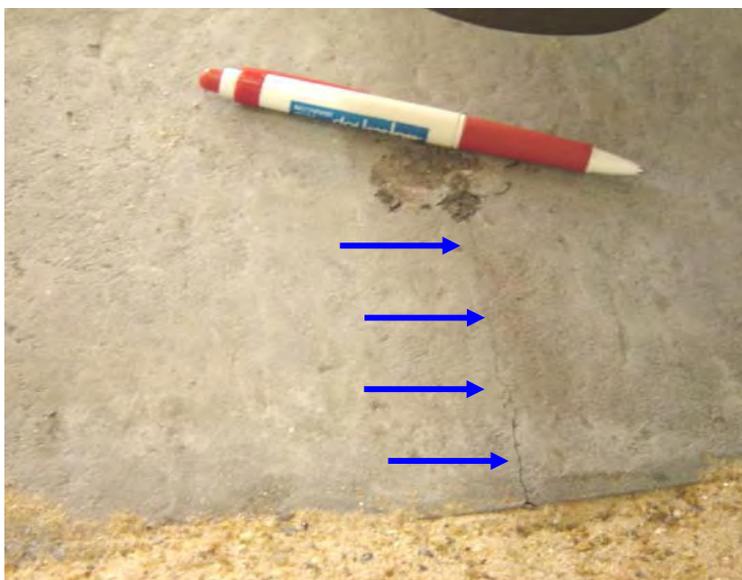


Figura 77. 1ª fissura (0,1 mm) - 5% CCA-A submetido a resistência ao impacto.



Figura 78. 1ª fissura (0,05 mm) - CCA-C/Bor. submetido a resistência ao impacto.

Após a aplicação subsequente de impacto em relação á primeira fissura, determinou-se a última fissura, apresentando espessura entre 0,2 a 0,8 para os CAD com incorporação mineral e sem incorporação mineral, havendo o seccionamento total dos corpos-de-prova (placa). Os CAD com Borracha apresentaram uma espessura de até 0,5 mm, chegando a uma altura máxima de queda de até 2,20 m, não ocorrendo o seccionamento total dos corpos-de-prova.

As Figuras 79, 80, 81, 82 e 83 mostram respectivamente os corpos-de-prova (placas) ao final do ensaio de resistência ao impacto.



Figura 79. Última fissura observada (0,8 mm) - 5% CCA-C.



Figura 80. Última fissura observada (0,2 mm) - CCA-A/Bor..



Figura 81. Traço Controle no final do ensaio.



Figura 82. Traço com CCA-C/Bor. ao final do ensaio.



Figura 83. Corpo-de-prova do traço Sílica/Bor. após o término do ensaio.

6.2.2.7. Resistência à Abrasão

Na Figura 84 abaixo, pode ser visualizado os resultados de resistência à abrasão dos concretos de alto desempenho, aos 28 dias de idade, obtidos pelas porcentagens de perda massa, através do desgaste à abrasão, cujo ensaio é compreendido de um único corpo-de-prova, para cada tipo concreto de alto desempenho moldado.

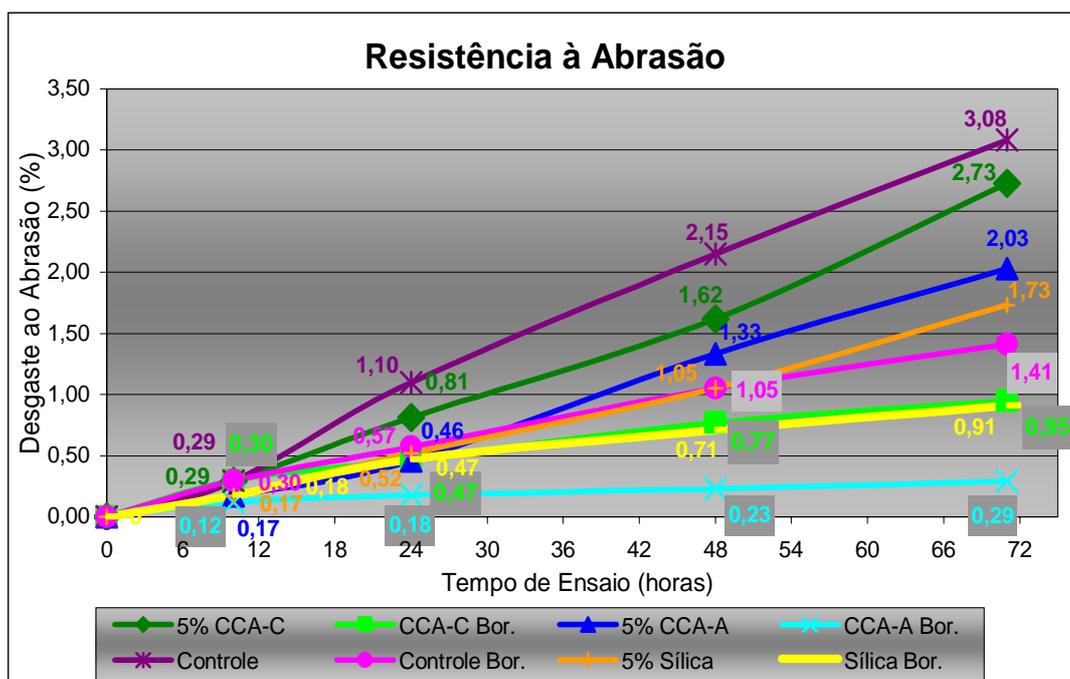


Figura 84. Resistência à abrasão dos concretos de alto desempenho.

Observando a Figura 84, percebeu-se que houve uma diminuição na perda de massa, em todos os períodos de ensaio, dos CAD com incorporação mineral, em relação às perdas de massa apresentadas no CAD Controle. A perda de massa, em 71 horas, foi de 56%, 34% e 11% menor respectivamente para os traços com 5% de Sílica, 5% de CCA-A e 5% de CCA-C, em relação ao CAD Controle. Isto pode ser explicado pelo fato de que a menor quantidade de cimento hidratado nos CAD com incorporação mineral, foram compensadas pelas ações do efeito microfíler juntamente com as reações pozolânicas das CCAs e Sílica ativa, no que tange resistência à abrasão.

Em relação aos CAD com Borracha, todos os traços apresentaram resultados de perda de massa menores, quando comparados aos CAD sem Borracha. Este fato pode também ser explicado pela ação do efeito do microfíler juntamente com as reações pozolânicas das CCAs e Sílica ativa, melhorando a resistência à abrasão dos CAD com incorporação mineral e Borracha.

Comparando-se a porcentagem de desgaste final do traço Controle e Borracha, submetido ao ensaio de abrasão, 1,41%, com os resultados dos traços com CCA-A e Borracha, e com CCA-C e Borracha, em 0,29% e 0,95%, pode-se dizer que os concretos com CCA e Borracha apresentaram elevada resistência à abrasão.

Analisando a Figura 84 e tendo como parâmetro os Quadros 5.1 e 5.2, pode-se dizer que os concretos com CCA e Borracha, mostraram excelente desempenho de durabilidade quando submetidos ao desgaste à abrasão.

Através das Figuras 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91 e 92 pode-se visualizar os corpos-de-prova ao fim do ensaio de resistência à abrasão, ao fim de 71 horas.

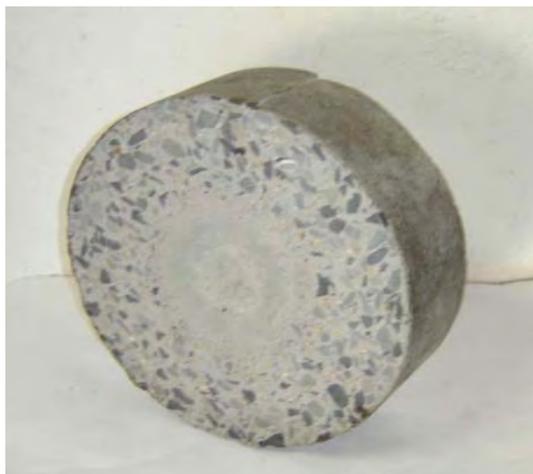


Figura 85. Resistência à abrasão – Controle.



Figura 86. Resistência à abrasão – Controle/Bor.



Figura 87. Desgaste à abrasão – 5% CCA-C



Figura 88. Desgaste à abrasão – CCA-C/Bor.



Figura 89. Desgaste à abrasão – 5% CCA-A.



Figura 90. Desgaste à abrasão - CCA-A/Bor..



Figura 91. Desgaste à abrasão – 5% Sílica.



Figura 92. Desgaste à abrasão – Sílica/Bor.

7. CONCLUSÃO

7.1. CONCLUSÕES

As considerações finais sobre a análise de todos os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados a seguir.

A incorporação de cinza de casca de arroz Cristalina em argamassa mostrou-se satisfatória do ponto de vista de ganho de resistência à compressão, chegando a percentuais de até de 9%, para o tempo de moagem de 40 minutos, em argamassa, aos 28 dias de idade. Os traços estudados apresentaram os melhores resultados na faixa entre 5% e 10%. O traço com 15% de CCA-C, além de apresentar menores ganhos de resistência comparados aos demais, também mostrou bom desempenho.

A análise do ensaio de índice de consistência mostrou que a adição da CCA-C diminui a trabalhabilidade do composto.

Quanto ao estudo de otimização dos materiais em concreto, com uma relação água/aglomerante de 0,30, apresentou resultados também satisfatórios em termos da evolução da resistência à compressão, a percentuais de 14% aos 28 dias, com 5% de CCA-C e a patamares de 70MPa. Ainda, a incorporação de borracha de pneu no CAD com CCA-C resultou na queda de resistência, em torno 25% aos 28 dias de idade, em níveis de 50 MPa.

Notou-se redução da trabalhabilidade independentemente do tipo incorporação mineral, em relação ao concreto sem incorporação mineral, e significativa redução da trabalhabilidade, quando incorporado os resíduos de borracha de pneu.

Quanto ao teor de ar incorporado, notou-se alteração variando de acordo com o tipo de material utilizado. Quando incorporados os resíduos de borracha de pneu ao CAD, os traços com cinza Amorfa e Sílica ativa não acarretaram alteração do teor de ar incorporado, em relação aos concretos sem Borracha.

As alterações da massa específica entre os CAD com e sem incorporação mineral, não foram significativas. Ocorreu a diminuição para os CAD com Borracha em relação aos demais.

Os traços avaliados com incorporação mineral apresentaram elevações dos valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão, quando comparados aos valores obtidos com o concreto Controle, ao longo das idades. Contudo, os traços contendo cinza Amorfa e Cristalina, mostraram resultados de resistência à compressão a níveis de 70 MPa.

Quanto aos Concretos de Alto Desempenho com Borracha, verificou-se inferioridade na resistência à compressão, independentemente do tipo de incorporação mineral e sem incorporação, em comparação aos CAD sem borracha. Porém, os CAD com cinzas (Amorfa e Cristalina) e Borracha mostraram superioridade dos valores de resistências à compressão, em relação ao concreto Controle com Borracha.

Ocorreu um decréscimo de resistência à tração em ambos os concretos de alto desempenho com Borracha, na faixa de 14% e 8%, sendo os respectivos traços CCA-A e Borracha e com CCA-C e Borracha, aos 63 dias idade.

Com relação à análise do módulo de elasticidade, os concretos de alto desempenho avaliados com incorporação mineral e Borracha apresentaram-se valores inferiores àqueles obtidos sem Borracha, mas em níveis elevados. Contudo, verificou um decréscimo, na ordem de 5% e 4%, respectivamente para os traços com 5% de CCA-A e Borracha e com 5% de CCA-C e Borracha, aos 63 dias de idade.

Os CAD com resíduos de borracha apresentaram comportamentos diferenciados quanto a forma de ruptura. Baseando-se na superioridade dos valores da relação entre resistência à tração e resistência à compressão para os concretos CCA-A e Borracha e CCA-C e Borracha, de 14% e 7% respectivamente, em relação aos concretos com 5% de CCA-A e 5% de CCA-C (aos 63 dias), ficou evidente a redução da fragilidade e um aumento da ductilidade dos concretos com Borracha. Com relação à análise do módulo unitário notou-se que os concretos de alto desempenho com CCA-A e Borracha, e CCA-C e Borracha apresentaram superioridade dos valores dos módulos unitário de 30% e 23% aos 7 dias respectivamente, quando comparados aos CAD com 5% de CCA-A e 5% de CCA-C, verificando maior tenacidade nos concretos com Borracha.

Os concretos de alto desempenho com incorporação mineral e Borracha de pneu mostraram valores de absorção na mesma ordem grandeza da absorção dos CAD sem Borracha. Além disso, os CAD com cinzas (Amorfa e Cristalina) e Borracha, mostraram baixos índices de absorção de água por imersão, em relação ao concreto Controle e Borracha.

Com relação ao ensaio de impacto, os concretos com cinzas (Amorfa e Cristalina) e Borracha apresentaram desempenho superior ao traço Controle e Borracha. Em relação ao concreto com Sílica, pode-se dizer que o concreto com cinza Cristalina apresentou desempenho inferior.

Os resultados do ensaio de abrasão nos concretos contendo cinzas (Amorfa e Cristalina) e Borracha apresentaram perda de massa inferior aos concretos sem Borracha e ao concreto Controle e Borracha.

Num contexto geral, com relação aos tipos de cinzas estudados, observou-se que os concretos com incorporação de cinza Cristalina, além de apresentar resultados inferiores aqueles com cinza Amorfa, em relação às propriedades aqui estudadas, mostrou bom desempenho, por ser um material menos reativo. Os resultados obtidos mostraram a viabilidade de utilização destes resíduos, como material cimentício suplementar aos concretos.

Quanto ao comportamento de ruptura dos CAD com incorporação mineral, e sem incorporação e Borracha, em relação aos concretos sem Borracha, observaram-se significativas mudanças de comportamento, quando submetidos ao ensaio de compressão, tração e impacto. Ficou evidente a redução da fragilidade e o aumento da capacidade de absorção de energia, devido à incorporação de borracha de pneu no CAD.

A incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz e Borracha de pneu ao CAD demonstraram viabilidade de uso como função estrutural, devido essencialmente ao bom desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica. Para tanto, é imprescindível que sejam feitos ensaios quanto à toxicidade dos gases liberados quando estes elementos são submetidos a temperaturas elevadas. Além disso, os resultados referentes à resistência à abrasão indicam que os resíduos cinza de casca de arroz e Borracha de pneu são viáveis no uso de blocos de pavimentação.

Contudo, espera-se que estes resíduos venham realmente representar uma alternativa tecnológica e ecológica para a produção de concretos na construção civil.

7.2. RECOMENDAÇÕES PARA A CONTINUIDADE DA PESQUISA

É importante continuar o estudo do comportamento de concretos de alto desempenho com o emprego de Cinza de Casca de Arroz e Borracha a fim de vir a somar e contribuir aos dados apresentados nesta pesquisa.

Sugere-se a realização de uma análise da microestrutura (porosimetria por intrusão de mercúrio, microscopia eletrônica de varredura) de pastas com incorporação de cinza de casca de arroz e borracha de pneu, composição utilizada nos concretos para ensaios mecânicos.

Dentre as investigações de CAD com CCA e Borracha, pode-se citar o estudo sobre o comportamento das propriedades mecânicas ao longo do tempo, bem como a quantificação da tenacidade, através de ensaios com aplicação de carga e deformação controlada.

Recomenda-se, o uso de CAD com CCA e Borracha com função estrutural, sendo imprescindível a avaliação da toxicidade dos gases liberados após o aquecimento do concreto com borracha.

Seria adequada a realização de ensaios adicionais, como, por exemplo, resistência ao fogo, estudo de fluência, condutividade térmica, carbonatação, ataques aos sulfatos, permeabilidade, etc.

Após todas essas investigações, sugere-se também a investigação do CAD com o cimento CP V ARI-Plus.

ANEXO

Resultados dos ensaios mecânicos de argamassa e concreto

Tabela 29. Resultados de resistência à compressão (MPa) em argamassa (7 dias) – Parâmetro Estatístico.

Traço	Controle	Tempo de moagem (min.)				
		20 min.	30 min.	40 min.	50 min.	60 min.
0% CCA	Média: 45,8 Dv. P.: 1,0 CV: 2,19%	-	-	-	-	-
5% CCA	-	Média: 46,8 Dv. P.:1,04 CV: 2,23%	Média: 50,3 Dv. P.:1,01 CV: 2,01%	Média: 53,9 Dv. P.: 1,52 CV: 2,82%	Média: 51,5 Dv. P.: 1,60 CV: 3,10%	Média: 48,6 Dv. P.: 1,30 CV: 2,68%
10% CCA	-	Média: 48,5 Dv. P.: 1,97 CV: 4,05%	Média: 51,2 Dv. P.:0,30 CV: 0,59%	Média: 53,9 Dv. P.: 0,76 CV: 1,40%	Média: 52,6 Dv. P.: 2,74 CV: 5,21%	Média: 49,4 Dv. P.: 1,05 CV: 2,13%
15% CCA	-	Média: 47,8 Dv. P.: 2,75 CV: 5,77%	Média: 48,7 Dv. P.: 0,90 CV: 1,85%	Média: 51,9 Dv. P.: 0,93 CV: 1,79%	Média: 51,8 Dv. P.: 0,90 CV: 1,74%	Média: 48,8 Dv. P. 0,42: CV: 0,85%

Tabela 30. Resultados de resistência à compressão (MPa), em argamassa (28 dias) – Parâmetro Estatístico

Traço	Controle	Tempo de moagem (min.)				
		20 min.	30 min.	40 min.	50 min.	60 min.
0% CCA	Média: 53,9 Dv. P.: 0,88 CV: 1,64%	-	-	-	-	-
5% CCA	-	Média: 55,0 Dv. P.: 1,43 CV: 2,59%	Média: 57,8 Dv. P.: 1,18 CV: 2,04%	Média: 58,1 Dv. P.: 0,30 CV: 0,52%	Média: 56,8 Dv. P.: 0,93 CV: 1,63%	Média: 55,5 Dv. P.: 2,35 CV: 4,24%
10% CCA	-	Média: 55,6 Dv. P.: 0,83 CV: 1,49%	Média: 57,3 Dv. P.: 0,42 CV: 0,73%	Média: 59,4 Dv. P.: 0,41 CV: 0,69%	Média: 56,6 Dv. P.: 0,25 CV: 0,44%	Média: 55,8 Dv. P.: 0,88 CV: 1,57%
15% CCA	-	Média: 54,4 Dv. P.: 0,40 CV: 1,74%	Média: 55,5 Dv. P.: 1,30 CV: 2,34%	Média: 56,0 Dv. P.: 1,59 CV: 2,85%	Média: 55,8 Dv. P.: 0,10 CV: 0,18%	Média: 56,6 Dv. P.: 1,38 CV: 2,43%

Tabela 31. Resistência à compressão (MPa) de CAD – Parâmetros Estatísticos.

	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias
5% CCA-C	Média: 54,9 Desv. Pad.: 0,96 CV: 1,75%	Média: 68,6 Desv. Pad.: 2,10 CV: 3,07%	Média: 69,1 Desv. Pad.: 1,02 CV: 1,48%	Média: 74,5 Desv. Pad.: 1,25 CV: 1,68%
5% CCA-A	Média: 56,4 Desv. Pad.: 0,41 CV: 0,73%	Média: 63,0 Desv. Pad.: 1,51 CV: 2,40%	Média: 72,1 Desv. Pad.: 2,31 CV: 3,25%	Média: 87,4 Desv. Pad.: 0,65 CV: 0,75%
5% Sílica	Média: 57,3 Desv. Pad.: 0,19 CV: 0,34%	Média: 71,1 Desv. Pad.: 0,45 CV: 0,63%	Média: 82,9 Desv. Pad.: 0,64 CV: 0,77%	Média: 88,4 Desv. Pad.: 0,63 CV: 0,71%
Controle	Média: 83,3 Desv. Pad.: 1,15 CV: 2,16%	Média: 57,2 Desv. Pad.: 1,34 CV: 2,35%	Média: 64,8 Desv. Pad.: 1,90 CV: 2,94%	Média: 67,7 Desv. Pad.: 0,38 CV: 0,56%

Tabela 32. Resistência à compressão (MPa) de CAD com Borracha – Parâmetros Estatísticos.

	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias
CCA-C/Bor.	Média: 48,4 Desv. Pad.: 1,66 CV: 3,43%	Média: 50,2 Desv. Pad.: 1,66 CV: 3,32%	Média: 55,0 Desv. Pad.: 3,03 CV: 5,50%	Média: 63,6 Desv. Pad.: 1,42 CV: 2,24%
CCA-A/Bor.	Média: 50,4 Desv. Pad.: 0,57 CV: 1,14%	Média: 53,6 Desv. Pad.: 1,72 CV: 3,21%	Média: 56,7 Desv. Pad.: 1,46 CV: 2,58%	Média: 67,0 Desv. Pad.: 0,58 CV: 0,87%
Sílica/Bor.	Média: 49,4 Desv. Pad.: 0,15 CV: 0,31%	Média: 54,5 Desv. Pad.: 0,32 CV: 0,59%	Média: 57,3 Desv. Pad.: 1,27 CV: 2,23%	Média: 67,5 Desv. Pad.: 0,70 CV: 1,04%
Controle/Bor.	Média: 38,5 Desv. Pad.: 0,89 CV: 2,32%	Média: 41,9 Desv. Pad.: 1,45 CV: 3,45%	Média: 51,0 Desv. Pad.: 0,45 CV: 0,87%	Média: 54,9 Desv. Pad.: 1,00 CV: 1,83

Tabela 33. Resistência à tração (MPa) de CAD – Parâmetros Estatísticos.

	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias
5% CCA-C	Média: 5,1 Desv. Pad.: 0,21 CV: 4,06%	Média: 5,8 Desv. Pad.: 0,20 CV: 3,49%	Média: 6,3 Desv. Pad.: 0,21 CV: 3,39%	Média: 6,5 Desv. Pad.: 0,17 CV: 2,65%
5% CCA-A	Média: 5,7 Desv. Pad.: 0,12 CV: 2,11%	Média: 6,4 Desv. Pad.: 0,10 CV: 1,56%	Média: 6,7 Desv. Pad.: 0,14 CV: 2,11%	Média: 7,0 Desv. Pad.: 0,07 CV: 1,02%
5% Sílica	Média: 5,8 Desv. Pad.: 0,13 CV: 2,27%	Média: 6,7 Desv. Pad.: 0,28 CV: 4,16%	Média: 7,0 Desv. Pad.: 0,22 CV: 3,19%	Média: 7,5 Desv. Pad.: 0,11 CV: 1,47%
Controle	Média: 5,0 Desv. Pad.: 0,07 CV: 1,33%	Média: 5,6 Desv. Pad.: 0,09 CV: 1,52%	Média: 6,0 Desv. Pad.: 0,10 CV: 1,67%	Média: 6,2 Desv. Pad.: 0,19 CV: 3,12%

Tabela 34. Resistência à tração (MPa) de CAD com Borracha – Parâmetros Estatísticos.

	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias
CCA-C/Bor.	Média: 4,7 Desv. Pad.: 0,15 CV: 3,27%	Média: 5,3 Desv. Pad.: 0,21 CV: 3,24%	Média: 5,7 Desv. Pad.: 0,24 CV: 4,24%	Média: 6,0 Desv. Pad.: 0,10 CV: 1,67%
CCA-A/Bor.	Média: 4,8 Desv. Pad.: 0,10 CV: 2,13%	Média: 5,3 Desv. Pad.: 0,09 CV: 1,72%	Média: 5,9 Desv. Pad.: 0,04 CV: 0,67%	Média: 6,1 Desv. Pad.: 0,16 CV: 2,62%
Sílica/Bor.	Média: 5,1 Desv. Pad.: 0,11 CV: 1,47%	Média: 5,4 Desv. Pad.: 0,15 CV: 2,85%	Média: 5,7 Desv. Pad.: 0,15 CV: 2,54%	Média: 6,1 Desv. Pad.: 0,11 CV: 1,83%
Controle/Bor.	Média: 4,1 Desv. Pad.: 0,09 CV: 2,11%	Média: 4,4 Desv. Pad.: 0,08 CV: 1,92%	Média: 5,0 Desv. Pad.: 0,10 CV: 2,00%	Média: 5,3 Desv. Pad.: 0,16 CV: 2,96%

Tabela 35. Módulo de Elasticidade (GPa) de CAD – Parâmetros Estatísticos.

	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias
5% CCA-C	Média: 46,3 Desv. Pad.: 1,84 CV: 3,97%	Média: 47,3 Desv. Pad.: 0,85 CV: 1,79%	Média: 48,7 Desv. Pad.: 0,40 CV: 0,82%	Média: 52,1 Desv. Pad.: 1,76 CV: 3,38%
5% CCA-A	Média: 47,8 Desv. Pad.: 0,13 CV: 0,27%	Média: 51,1 Desv. Pad.: 0,38 CV: 0,74%	Média: 53,5 Desv. Pad.: 1,03 CV: 1,92%	Média: 56,5 Desv. Pad.: 2,48 CV: 4,39%
5% Sílica	Média: 49,4 Desv. Pad.: 0,56 CV: 1,13%	Média: 53,1 Desv. Pad.: 0,50 CV: 0,95%	Média: 55,4 Desv. Pad.: 1,76 CV: 3,17%	Média: 58,1 Desv. Pad.: 0,40 CV: 0,68%
Controle	Média: 43,2 Desv. Pad.: 0,47 CV: 1,08%	Média: 48,5 Desv. Pad.: 0,20 CV: 0,41%	Média: 51,0 Desv. Pad.: 0,15 CV: 0,30%	Média: 53,6 Desv. Pad.: 0,26 CV: 0,49%

Tabela 36. Módulo de Elasticidade (GPa) de CAD com Borracha– Parâmetros Estatísticos.

	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias
CCA-C/Bor.	Média: 41,3 Desv. Pad.: 1,74 CV: 4,20%	Média: 47,5 Desv. Pad.: 0,50 CV: 1,05%	Média: 48,7 Desv. Pad.: 0,40 CV: 0,83%	Média: 52,2 Desv. Pad.: 0,58 CV: 1,11%
CCA-A/Bor.	Média: 45,8 Desv. Pad.: 2,97 CV: 6,49%	Média: 48,2 Desv. Pad.: 1,11 CV: 2,29%	Média: 50,5 Desv. Pad.: 0,95 CV: 1,89%	Média: 53,8 Desv. Pad.: 0,51 CV: 0,95%
Sílica/Bor.	Média: 46,4 Desv. Pad.: 1,74 CV: 3,76%	Média: 48,7 Desv. Pad.: 0,21 CV: 0,43%	Média: 51,4 Desv. Pad.: 1,41 CV: 2,75%	Média: 54,3 Desv. Pad.: 1,99 CV: 3,67%
Controle/Bor.	Média: 32,5 Desv. Pad.: 0,51 CV: 1,58%	Média: 37,1 Desv. Pad.: 0,65 CV: 1,76%	Média: 40,8 Desv. Pad.: 0,90 CV: 2,21%	Média: 43,8 Desv. Pad.: 1,14 CV: 2,61%

8. REFERÊNCIAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: materiais pozolânicos – índice de atividade pozolânica com cimento e cal – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

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 7223**: concreto – ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810**: agregado em estado compacto e seco – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8347**: cimento portland pozolânico – método de ensaio – análise química. Rio de Janeiro, 1991.

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 9202**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325). Rio de Janeiro, 1985.

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 9776**: agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman. Rio de Janeiro, 1987.

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, 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 9937**: agregados – determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12652**: materiais pozolânicos – determinação do teor de álcalis disponíveis – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: preparação

de concreto em laboratório; especificação. Rio de Janeiro, 1993b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 23:** cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

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. **NM 49:** agregado miúdo – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52:** agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 65:** cimento portland – determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 1996.

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

ALCANTARA, M.A.M. **Bétons auto-plaçants et fibrages hybrides: Composition, rhéologie et comportement mécanique.** Toulouse, 2004, INSA, 192f. (thèse.)

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho.** São Paulo: PINI, 2000.

AITCIN, P. C.; NEVILLE, A. M. High: performance concrete demystified. **Concrete International**, Detroit, v.15, n.1, p. 21- 26, 1993.

ALAEJOS GUTIERREZ, P.; CANOVAS, M. F. Composición y dosificación de hormigones de alta resistência. **Cemento y Hormigón**, Barcelona, n.709, p. 971-990, 1992.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistencia.** Porto Alegre, 2000. 140p. Dissertação (Mestrado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande Sul.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. **Coleta e reciclagem de pneus**. ANIP, 2000. 23p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE – ACI. **State of the art report on high strength concrete 363**. Detroit: ACI, 1992. p.55. (363 R-92)

AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F.; NIRSCHL, G. C. Análise experimental da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de borracha vulcanizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2001. (CD ROM).

AKASAKI, J. L.; SERNAROS, P.; REYES, B.; TRIGO, A. P.M. Avaliação da resistência à flexão do concreto com borracha de pneu com relação ao concreto convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Espírito Santo. **Anais...** Espírito Santo: Arte Interativa, 2003. (CD ROM).

BASHA E.A.; HASHIM R.; MAHMUD H.B.; MUNTOHAR A.S. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 19, p.448–453, 2005.

BAUER, R. J. F.; TOKUDOME, S.; GADRET, A. D. Estudo de Concreto com Pneu Moído. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2001. (CD ROM).

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

BENAZZOUK, A.; MEZREB, K.; DOYEN, G.; GOULLIEUX, A.; QUÉNEUDEDEC, M. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behavior of cement-rubber composites – influence of the alveolar texture of rubber aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v.25, p. 711-720, 2003.

BONNET, S. **Materiaux cimentaires a haute deformabilite par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usages**. Tese (Doutorado) - Universite Toulouse III – Paul Sabatier, 2004, 280f.

BUI D. D.; HU J.; STROEVEN P. Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v.27, p. 357-366, 2005.

CEMPRE. Fichas técnicas. pneus. Disponível em: < http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas_pneus.php >. Acesso em: 08 mar. 2006.

COSTENARO, F. L. **Desenvolvimento de concreto de alto desempenho com adições de sílica de casca de arroz**. São Paulo, 2003. 151f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

COUTINHO, A S. **Fabrico e propriedades do Betão**. Lisboa: LNEC, 1973. v.1 642p.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANTAC, 2002. (CD-ROM).

DAFICO, D.A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. Florianópolis, 2001. 191f. Tese (Doutorado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. São Paulo, 1995. 286f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para o uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, São Paulo, v.24, n.6, p.778-782, 2001.

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

FAZIO, J. A.; OLIVEIRA, S. A. G. Utilização do pó de borracha de pneu reciclado em misturas betuminosas para pavimentação urbana e rodoviária. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, 2000, Salvador. **Anais...** Salvador, 2000. CD-ROM.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto:** uma análise do comportamento do concreto fabricado de resíduos de borracha. Ilha Solteira, 2004. 144f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FERREIRA, A.A. **Estudo sobre a porosidade de concretos de alto desempenho com adições da cinza da casca de arroz.** Porto Alegre, 1997. 191f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; CASALI, J. M.. Comparação entre diferentes metodologias utilizadas no Brasil para avaliação da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 5, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 1999. (CD ROM).

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

GUTÉRREZ P. A.; CÁNOVAS M. F. High-Performance Concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 93, n.3, p.233-241, 1996.

GÜNEYISI, E.; GESÖGLU, M.; ÖZTURAN, T. Properties of rubberized concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.34, p.1-9, 2004.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P.R.L. Avaliação do uso de aditivos superplastificantes com base de policarboxilatos na produção de concretos de alta resistência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: Ibracon, 2003. (CD-ROM).

HARTMANN, C. T.; HELENE, P.R.L. Recorde mundial em concreto de alto desempenho colorido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003,

Vitória. **Anais...** Vitória: Ibracon, 2003. (CD-ROM).

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; CARASEK, H.. Efeito da cinza de casca de arroz e sílica ativa na reação álcali-agregado. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais...** Salvador:Ibracon, 1999. (CD ROM).

HASPARYK, N. P. et al.. Estudo da influência da cinza de casca de arroz amorfa nas propriedades do concreto. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Espírito Santo. **Anais...** Espírito Santo: Ibracon, 2003. (CD ROM).

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

HELENE, P. R. L. **Concreto de elevado desempenho: o material para construção das obras nos anos 2000: concreto de alto desempenho**. São Paulo: ABCP, 1997. (CD-ROM).

HERNANDÉZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G.; BOLLATI, M.; WITOSZEK, B. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.32, p.1587-1596, 2002.

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

HOPPE T. F.; GASTALDINI A. L. G.; ISAIA G. C.; MISSAU F.; SACIOTO A. P. Influência do teor de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Ibracon, 2005. (CD ROM).

HOWARD, N. L.; LEATHAM, D. M. The production and delivery of high-strength concrete. **Concrete International**, Detroit, v.11, n.4, p.26-30, 1989.

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**, Guildford, v.9, p.239-244, 1995.

HUYNH, H.; RAGHAVAN, D.; FERRARIS, C. F. **Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials**. Advn cem bas mat/Department of Chemistry, 1996. 18p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS - IBGE. Ficha técnica. Indicadores conjunturais – produção agrícola. Disponível em : <<http://www.ibge.gov.br>>. acesso em: 18 maio 2006.

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 microssilica**. Ilha Solteira, 1990. n. LEC-CM-07/90. (relatório não publicado).

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M., Rubberized portland cement concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, p.206-213, 1999.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha pneus pela indústria da construção civil**. Florianópolis, 2002. 143f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MARQUES A. C. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura**. Ilha Solteira, 2005. 117f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MARTINS. I. R. F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. Ilha Solteira, 2005. 144f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MAILVAGANAM, N, P. Factors influencing slump loss in flowing concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERPLASTICIZERS ON CONCRETE, 1 1978, Ottawa, Canada. **Symposium...** Detroit: American Concrete Institute, 1979. p. 389-403. (ACI Special Publication, 62).

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, c2001. 231p.

MEHTA, P.K. Rice husk ash: a unique supplementary cementing material. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, 1992, Athens, 1992. **Proceedings...**Ontario: CANMET, p.419-443, 1992.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. Principles underlying production of high performance concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, Philadelphia, v.12, n.2, p.70-78, 1990a.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. **Microestrutural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete**. HSC International Symposium On Utilization On High Strength Concrete, 2nd, ACI SP 121. 1990b, p. 265-286.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; PITT, N. A new process of rice husk utilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RICE BY PRODUCTS UTILIZATION, 4,1974, Valencia. **Proceedings...** Valencia: Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos – Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1974. p.45-58.

MENEGUINI, E. A. C. **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha**. 2003, 85p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 258. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 10 fev. 2006.

MOSCA, A. M. A.; LINTZ, R. C. C.; CARNIO, M. A. Influência da utilização da borracha vulcanizada nas propriedades mecânicas do concreto. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Ibracon, 2005. (CD ROM).

MORAES, R. C.; ISAIA, G. C. ; GASTALDINI, A. L. G.; GUERRA, A. L. Efeitos da cinza volante, cinza de casca de arroz e filler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Ibracon, 2000. (CD ROM).

MORAES, R. G.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI. Influência das adições minerais sobre as ações físicas e químicas intervenientes na resistência mecânica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2001. (CD ROM).

NASCIMENTO, W. N. et al. Adição de cinza de casca de arroz (CCA) no concreto, sob o aspecto da durabilidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Ibracon, 2002. (CD ROM).

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: PINI, 1997.

PAYÁ, J. ;WOOLLEY, G. R. ; GOUMANS, J. J. J. M. ; WAINWRIGHT, P. J. **Studies on crystalline rice husk ashes and the activation of their pozzolanic properties**. Waste materials in construction wascon 2000. Amsterdam: Pergamon, 2000. p. 493-503. (Waste Management Series, 1).

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

PIRELLI BRAZIL. Fichas técnicas > Pneus. Disponível em: <<http://www.pirelli.com.br/pr/pneumatici/infotck/index.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2005.

PINTO, C. A.; JOSÉ, C. L. V.; VIANNA, M. M. G. R.; KOZIEVITCH, V. F. J.; HAMASSAKI, L. T.; WIEBECK, H. BÜCHLER, P. M.; VELENZUELA DIAZ, F. R. Study of the mechanical performance of composites of rubber powder and cement. **Materials Science Fórum**, Aedermannsdorf, v.416/418, p.720-724, 2003.

POUEY, M. T. ; DAL MOLIN, D. Estudo comparativo da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO IBRACON, 44, 2002, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: Ibracon, 2002. (CD ROM).

PRUDÊNCIO JR., L. R. et al. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Cinza de Casca de Arroz. Coletânea HABITARE, vol.4, n.8, p.240-261, 2003.

RAEDER FILHO, M. **Caracterização do cimento aluminoso e sua aplicação em concretos de alta resistência (CAR)**. Curitiba, 2005 174f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

RENOSUL. Ficha técnica > recauchutagem. Disponível em: <<http://www.renosul.com.br/rnspro02.htm>>. Acesso em: 16 maio 2006.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A..A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, 2002, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: Ibracon, 2002. (CD ROM).

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; VIEIRA F. L.; LOPES A. N. M.. Estudo de aglomerantes compostos por cimento portland comum (CP I) e as cinzas de casca de arroz (cca) Amorfa e cristalina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Ibracon, 2004. (CD Rom).

RIBEIRO F. H. M.; ARANTE J.; CASSOL V. Avaliação da influência da cinza de casca de arroz produzida no estado do Tocantins nas propriedades do concreto nos estados plástico e endurecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Ibracon, 2005. (CD ROM).

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

RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION - RMA. Energy recovery from scrap tires. May, 2002. Disponível em: <<http://www.rma.org/scrap tires/Energy.html>>. Acesso em: 18 nov. 2005.

ROSTAMI, H.; LEPORE, J.; SILVESTIM, T.; ZANDI, I. Use of Recycled Rubber Tires in Concrete. In: Proc. Int. Conf. Concrete 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence University of Dundee, UK 1993, v.2, p. 391-399,1993.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** Florianópolis, 1997, 130f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

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

SENSALE, R. G. P. ; DAL MOLIN, D.C.C. Estudio comparativo entre las propiedades mecánicas de hormigones de alta resistencia y convencionales com ceniza de cáscara de arroz. In: XXIX Jornadas Sudamericanas de ingeniería Estructural, Punta del Este, Uruguay, Nov. 2000, 20 p., CD-Rom

SENSALE, G. R. B. Strength development of concrete with rice-husk ash. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.28, p.158-160, 2006.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2001. (CD ROM).

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

SILVA, C. A. R. **Estudo da influência da incorporação da cinza de casca de arroz no concreto.** Ilha Solteira, 2004. 96f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SILVA, F. G.; LIBORIO J. B. L. Análise das propriedades mecânicas de concretos com agregados de $D_{máx} < 6,3$ mm e com diferentes tipos e teores de sílica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: Ibracon, 2003. (CD-ROM).

SILVEIRA, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Porto Alegre, 1996. 155f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SOUZA, A.; FRANÇA, V. H.; SOUSA, D. A.; GARCIA, J. R.; REIS, J. F. A. Estudo do comportamento de misturas de concreto com fibras de borracha, visando a sua utilização em estacas do tipo broca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Ibracon, 2004. (CD ROM).

SPONHOLZ, I. **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água em concreto de alto desempenho.** Florianópolis, 1998. 204f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

TAHA, M. M. R.; EL-DIEB, A. S.; ABDEL-WAHAB, M. M. Fracture Toughness of Concrete Incorporating Rubber Tire Particles. In: ICPCM – A New Era of Building, 2003, Cairo, **Anais...** Cairo: ICPCM, 2003.

TASHIMA, M. M. et al. Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DA INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31, 2004, Mendoza. **Jornadas...** Mendoza : IMERIS/Universidad Nacional de Cuyo/ASAE, 2004. 10p. (CD ROM).

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

TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J-L. Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. **Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities**, v.40, p.221-226, 2005.

TUTIKIAN, B. F.; KUHN R. O.; BRESCOVIT, S. J.; DAL MOLIN, D. C. C.; CREMONINI, R. A. Comparação da evolução da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 63 dias, do consumo de cimento e penetração íons de cloretos dos concretos auto-adensáveis com finos pozolânicos e não pozolânicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Ibracon, 2005. (CD ROM).

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas**. Rio de Janeiro, 2002. 200f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ZHANG, M.H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M.. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement Concrete and Research**, Elmsford, v.26, p.963-977, 1996.