

CAMILA FREITAS

ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE
PARTÍCULAS DE BORRACHA PARA APLICAÇÃO COMO MATERIAL DE
REPARO EM SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção de grau de mestre. Programa de Pós-
graduação em Engenharia - PIPE, área de concentração
Engenharia e Ciência dos Materiais. Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Kleber Franke Portella

Curitiba

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

À minha grande e feliz família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por colocar em meu caminho boas oportunidades e me dar força para seguir em frente nos momentos mais difíceis.

À minha família pela educação fornecida. À minha querida mãe, professora Cristina Maria Ayroza, por acreditar em mim e me incentivar de todas as maneiras possíveis. Ao meu pai, Engenheiro Edmur Carlos Freitas, pelo incentivo ao estudo e cobranças necessárias. Aos meus avós, João e Dalila, pelo carinho e sabedoria que sempre transmitiram. Aos meus tios Marcy e Claus Berg por me apoiarem e receberem em sua casa, enfim a toda minha louca família por fazerem de mim tudo o que sou.

Ao meu orientador, Dr. Kleber Franke Portella, pela colaboração, apoio e paciência fornecidos durante a elaboração deste trabalho. Ao Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento (LACTEC) por financiar a pesquisa. À CAPES por me garantir 2 anos de auxílio financeiro.

À Universidade Federal do Paraná, mais especificamente ao PIPE, pelo fomento à educação e condução deste curso de fundamental importância para o desenvolvimento profissional.

Às minhas grandes amigas Marcela e Guadalupe Garcia por me incentivarem e me alegrarem em momentos difíceis, por participarem da pesquisa (mesmo quando estavam muito ocupadas com seus trabalhos), por momentos de descontração e finalmente por serem amigas verdadeiras.

Ao meu querido e amado Mauro que agüentou todo meu mau humor neste período de transformações.

Ao laboratório de materiais e engenharia (LAME) por ceder o laboratório de dosagens, e a seus funcionários (Jeferson, Alex, Aline, Marcelo, Amauri, Felipe, Eustáquio e outros) por executarem uma série de ensaios, necessários para o andamento da pesquisa.

Aos funcionários e bolsistas do LACTEC que colaboraram de alguma maneira: Sergio Weckerlin, Sergio Henke e Laiz Valgas.

Às empresas BSCOLWAY e ITAMBÉ por disponibilizarem os materiais necessários para composição dos traços de concreto estudados.

Ao CNPq pelos subsídios para a importação, constantes da Lei 8010/90, L.I. 06/1020664-5.

Aos professores Vicente Campiteli e José de Almendra Freitas pelo conhecimento adquirido e atenção dedicada ao trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão de mais uma etapa da minha formação profissional.

“A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO	1
1.2. JUSTIFICATIVA E ESCOLHA DO TEMA	1
1.3. CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA	5
1.3.1. Objetivo principal da pesquisa	5
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.3.3. Trabalhos resultantes da pesquisa realizada.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. RESÍDUOS URBANOS E O MEIO AMBIENTE.....	8
2.1.1. Reciclagem na construção civil	9
2.1.2. Adição de borracha em materiais cimentícios	12
2.2. PNEU	17
2.2.1. Composição dos pneus	17
2.2.2. Borracha.....	20
2.2.3. Pneus inservíveis.....	22
2.2.4. Recuperação da borracha.....	24
2.2.5. Reciclagem do pneu	24
2.2.6. Resolução CONAMA 258/99.....	26

2.3. CONCRETO	27
2.3.1. Mecanismos de deterioração do concreto	33
2.3.2. Reparos em obras de concreto	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	42
3.1.1. Cimento.....	42
3.1.2. Agregado miúdo – areia natural	44
3.1.3. Agregado graúdo – brita 1	44
3.1.4. Aditivo	45
3.1.5. Resíduo de Borracha vulcanizada.....	45
3.1.6. Água de amassamento	46
3.2. MÉTODOS	47
3.2.1. Dosagens	47
3.2.2. Propriedades do concreto no estado fresco	49
3.2.3. Moldagem dos CPs	52
3.2.4. Propriedades do concreto no estado endurecido.....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	63
4.1.1. Cimento Portland.....	63
4.1.2. Agregado miúdo – areia natural	64
4.1.3. Agregado graúdo – brita 19 mm.....	66
4.1.4. Aditivo Superplastificante.....	68
4.1.5. Resíduo de borracha Vulcanizada	68
4.1.6. Água de amassamento	71
4.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	71
4.2.1. Trabalhabilidade	72
4.2.2. Massa unitária	75
4.2.3. Teor de ar.....	79
4.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	80

4.3.1.	Resistência à compressão	80
4.3.2.	Resistência à tração	85
4.3.3.	Módulo de deformação estático tangente inicial	89
4.3.4.	Resistência à abrasão pelo método submerso	91
4.3.5.	Resistência de aderência entre CR/CAB.....	96
4.3.6.	Índice de vazios, Massa específica e Absorção.....	99
4.3.7.	Microscopia eletrônica de varredura.....	101
5.	CONCLUSÕES.....	104
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características importantes e aplicações típicas dos elastômeros NR e SBr.....	19
Tabela 2: Características de pneus usados ⁵¹	22
Tabela 3: Prazos e quantidades proporcionais para coleta e destinação final dos pneumáticos inservíveis ^{16,20}	26
Tabela 4: Caracterização química do cimento CP II-Z 32.....	43
Tabela 5: Caracterização física do cimento CP II-Z 32.....	43
Tabela 6: Caracterizações realizadas na areia natural.....	44
Tabela 7: Caracterizações realizadas no agregado graúdo.....	45
Tabela 8: Caracterização física e química da borracha.....	45
Tabela 9: Proporção dos componentes dos concretos estudados na primeira fase.....	48
Tabela 10: Proporção dos componentes dos concretos estudados na segunda fase.....	48
Tabela 11: Carga abrasiva.....	58
Tabela 12: Caracterização físico-química do cimento CP-II Z 32.....	64
Tabela 13: Caracterização física do agregado miúdo – areia natural.....	65
Tabela 14: Granulometria do agregado miúdo.....	66
Tabela 15: Caracterização física do agregado graúdo – brita 1.....	66
Tabela 16: Granulometria do agregado graúdo.....	67
Tabela 17: Propriedades do aditivo utilizado (Sikament pf – 171).....	68
Tabela 18: Granulometria do resíduo de borracha de pneu.....	69
Tabela 19: Propriedades da água de amassamento.....	71
Tabela 20: Propriedades do concreto no estado fresco – primeira fase ⁸⁹	72
Tabela 21: Propriedades do concreto no estado fresco – segunda fase.....	72

Tabela 22: Consumo de materiais para confecção dos traços estudados – segunda fase.....	78
Tabela 23: Propriedades do concreto no estado endurecido aos 28 dias ⁸⁹	80
Tabela 24: Resistência à compressão axial simples ⁸⁹	81
Tabela 25: Resistência à compressão aos 28 dias – segunda fase.....	83
Tabela 26: Relação entre perda de resistência à tração por compressão diametral e à compressão axial simples.....	86
Tabela 27: Perda de massa dos CPs de abrasão.....	91
Tabela 28: Desgaste médio ocorrido nos CPs submetidos à ensaio de abrasão.	92
Tabela 29: Resistência de aderência à tração.	97
Tabela 30: Propriedades físicas dos concretos estudados.	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura básica de um pneu genérico ⁴³	18
Figura 2: Composição média de um pneu radial para automóveis ⁴³	19
Figura 3: Incêndios em depósitos de pneus inservíveis ^{38,14}	23
Figura 4: Processo de remoldagem do pneu ⁵⁵	25
Figura 5: Representação esquemática da estrutura do concreto ²⁹	28
Figura 6: Causas físicas da deterioração do concreto. Desgaste superficial ²⁹ ..	33
Figura 7: Procedimento do ensaio de abatimento de tronco de cone.	50
Figura 8: Procedimento para determinação da massa unitária do concreto.	51
Figura 9: Equipamento para determinação do ar aprisionado por pressurização do sistema	51
Figura 10: Moldagem dos CPs	52
Figura 11: Preenchimento das formas de dimensão (100 x 300) mm	53
Figura 12: Confecção das cavidades a serem preenchidas com CAB	53
Figura 13: CPs cilíndricos com cavidades para preenchimento com CAB	54
Figura 14: CP cilíndrico pronto para os ensaios de abrasão e de arrancamento	55
Figura 15: Fotos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral ..	56
Figura 16: Fotos do ensaio de resistência à tração na flexão	57
Figura 17: Esquema de preenchimento dos CPs de abrasão	58
Figura 18: Equipamento para ensaio de determinação da resistência à abrasão pelo método submerso	59
FIGURA 19: Pontos para medir profundidade das erosões	60
Figura 20: Esquema de preenchimento dos corpos-de-prova de aderência	60
Figura 21: Colagem da placa metálica sobre o MR para ensaio de resistência de aderência à tração.	61

FIGURA 22: Ensaio para determinação da resistência de aderência.	62
Figura 23: Curva granulométrica do agregado miúdo – areia natural.	65
Figura 24: Curva granulométrica do agregado graúdo – brita 1.	67
Figura 25: Espectro FTIR da borracha utilizada na pesquisa.	68
Figura 26: Curva granulométrica da borracha.	69
Figura 27: Fotos da borracha retida nas diferentes peneiras.	70
Figura 28: Consistência do concreto - <i>slump test</i> (primeira fase).	73
Figura 29: Consistência do concreto – “ <i>slump test</i> ” -segunda fase.	74
Figura 30: Abatimento de tronco de cone – segunda fase.	75
Figura 31: Massa unitária do concreto fresco – primeira fase ⁸⁹	76
Figura 32: Massa unitária do concreto fresco – segunda fase.	76
Figura 33: Consumo de cimento para confecção dos traços de concreto estudados: (a) na primeira fase; e, (b) segunda fase ⁸⁹	78
Figura 34: Teor de ar aprisionado ao concreto	79
FIGURA 35: Resistência à compressão axial simples do concreto – primeira fase, dos 3 aos 90 dias.	81
Figura 36: Desenvolvimento da resistência à compressão axial simples em relação à idade.	82
Figura 37: Resistência à compressão aos 28 dias – segunda fase.	83
Figura 38: Gráfico da resistência à tração por compressão diametral.	85
Figura 39: Resistência à tração na flexão.	87
FIGURA 40: Fissuras devido ao carregamento em corpos-de-prova prismáticos.	87
Figura 41: Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões ¹⁰¹	88
Figura 42: Módulo de deformação elástico.	89
Figura 43: Curva tensão x deformação.	90

Figura 44: Erosão causada por abrasão no cp de cr com 60 dias de idade após 72 horas de ensaio.....	93
Figura 45: Erosão causada por abrasão no CP CR/CAB com 21 dias de idade após 72 horas de ensaio.....	94
Figura 46: Erosão causada por abrasão no cp cr/cab (idades 28 dias) após 72 horas de ensaio.....	95
Figura 47: Ruptura do sistema CR/CAB 10.	97
Figura 48: Massa específica aos 28 dias.	99
Figura 49: Absorção de água aos 28 dias.....	100
Figura 50: Índice de vazios aos 28 dias.	101
Figura 51: Micrografias por MEV das superfícies de CPs rompidos.	102
Figura 52. Micrografias por MEV das superfícies de CPs rompidos	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIP	Associação Brasileira da Indústria de Pneumáticos Remoldados
ACI	American Concrete Institute
CAB	Concreto com Adição de Borracha
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP's	Corpos-de-prova
CPII – Z	Cimento Portland composto com Pozolana
CR	Concreto-referência
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
IC	Índice de Consistência
Lactec	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAME	Laboratório de Materiais e Estruturas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Material de Reparo
MS	Massa seca em estufa
Msat	Massa saturada
MI	Massa após imersão
NBR	Norma Brasileira
NR	Borracha Natural
PIPE	Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em engenharia
rpm	Rotações por minuto
SBR	Borracha de Estireno Butadieno
UFPR	Universidade Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Relação entre quantidade de água e quantidade de cimento
D	Desgaste em porcentagem da massa
E	Módulo de deformação elástico
M	Massa de concreto
MPa	Mega Pascal
P_0	Peso do corpo-de-prova no início do ensaio
P_f	Peso do corpo-de-prova no fim do ensaio
Sd	Desvio padrão
UM	Massa unitária do concreto fresco
V	Volume de concreto
ε	Deformação Específica
σ	Tensão aplicada ao concreto

RESUMO

Obras hidráulicas como barragens, construídas para aproveitamento hidrelétrico, consumo d'água e o controle de cheias estão sujeitas ao desgaste superficial permanente por ação da água. Para recuperar as superfícies desgastadas são utilizados materiais de reparo (MR) que devem ser corretamente adequados às características do fenômeno de desgaste, bem como às condições operacionais das estruturas. Com o intuito de indicar um MR alternativo, para utilização em superfícies hidráulicas, foi analisado o desempenho do concreto com adição de borracha (CAB). Inicialmente, foram dosados 5 traços de concreto, um sem adição de borracha vulcanizada utilizado como referência, e outros quatro traços com adições de 5, 10, 15 e 20% do elastômero em substituição a mesma proporção da massa de agregado miúdo. Foram realizados ensaios de compressão axial simples, tração por compressão diametral e na flexão e módulo de elasticidade nos traços dosados. A partir dos resultados foram escolhidos os três traços com adição de borracha de melhor desempenho para estudos de resistência à abrasão, pelo método submerso, e resistência de aderência ao substrato. Os resultados obtidos pelos traços de CAB foram comparados ao do concreto-referência qualificando o compósito como bom material de reparo quanto à aderência e abrasão. A erosão causada no CAB 15 por abrasão foi, em média, de 3,68 mm enquanto o CR apresentou desgaste por erosão, em média, de 8,30 mm.

Palavras-chave: reparos em concreto, abrasão, resíduos de borracha vulcanizada, propriedades mecânicas, aderência

ABSTRACT

Hydraulic structures as barrages constructed for hydroelectric exploration, water consumption and control of flow are subjected to surface permanent consumption because of the action of the water. To recover the consumed surfaces they are used material of repair (MR) that they must correctly be adjusted to the characteristics of the consuming phenomenon and the operational conditions of the structures. With intention to indicate an alternative MR for use in hydraulic surfaces was analyzed the performance of the rubberized concrete (CAB). Firstly, five mixtures of concrete had been produced, one without rubber addition used as reference, and others four mixtures with addition of 5, 10, 15 and 20% of the elastomer in replace of the same proportion of aggregate. Had been carried tests of compressive strength, tensile strength and elasticity modulus in the produced mixtures. From the results chosen the three mixtures with addition of rubber of better performance for studies of resistance to the abrasion and resistance to adherence on substrate. The found results for rubberized concrete were compared with the results of the CR characterizing the composite as good material of repair in surface subjected to the abrasion. The erosion caused in CAB 15 for abrasion was, on average, of 3,68 mm while the CR presented erosion, on average, of 8,30 mm.

Key-words: concrete repair, abrasion, rubber waste, mechanical properties, adherence

1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo foi realizada uma introdução ao trabalho, apresentando-se as características da pesquisa, os objetivos pretendidos e a importância do tema.

1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado em seis capítulos distintos, de maneira a atingir os objetivos propostos.

No segundo capítulo foi feita uma revisão bibliográfica, abrangendo os danos causados ao meio ambiente por resíduos sólidos, os pneus, o papel do concreto na reciclagem de subprodutos de outros setores e características dos materiais de reparo.

A metodologia usada para o desenvolvimento do trabalho, assim como os materiais utilizados foram apresentados no Capítulo 3.

As caracterizações dos materiais e as propriedades mecânicas verificadas nos ensaios são encontradas no Capítulo 4. O mesmo capítulo apresentou ainda justificativas e discussões para os resultados encontrados.

A conclusão do trabalho ficou no Capítulo 5. E, no Capítulo 6, foram apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas.

1.2. JUSTIFICATIVA E ESCOLHA DO TEMA

As estruturas de concreto devem trabalhar dentro das especificações de serviço durante o tempo previsto em projeto. Para isto, devem resistir aos mecanismos de desgaste aos quais estão sujeitas. Em grandes obras é necessário o acompanhamento do desempenho das estruturas e das

condições de serviço, pois podem comprometer a segurança e o bem estar da população. Caso exista alguma imperfeição na estrutura de concreto, esta deve ser reparada antes de comprometer a obra como um todo¹.

Existem obras que estão sujeitas a ações agressivas constantes e por este motivo devem prever reparos ao longo de sua vida útil. Um exemplo destes tipos de obras são as barragens construídas para aproveitamento hidrelétrico, consumo d'água e controle de cheias².

O concreto utilizado em obras hidráulicas está sujeito a desgaste superficial devido à ação da água. As principais causas de desgaste superficial são a abrasão, a cavitação e os ataques químicos. A abrasão é causada pelo impacto de elementos transportados pela água. A cavitação é causada pela formação de bolhas de ar no fluxo de água seguida de sua implosão (devida à mudança de pressão no escoamento), a qual gera grande impacto sobre a superfície de concreto. Os ataques químicos ocorrem devido à penetração de água no concreto³.

Para recuperar as superfícies desgastadas são utilizados materiais de reparo (MR) que devem ser corretamente adequados às características do fenômeno de desgaste, bem como às condições operacionais das estruturas³.

A utilização de um composto como material de reparo é regida por alguns parâmetros. O material de reparo deve possuir melhores qualidades que o concreto original⁴, boa aderência ao concreto endurecido e possuir baixa permeabilidade para diminuir a ação de agentes externos³.

Deve ser verificada, também, a compatibilidade entre o MR e o concreto existente. Se os dois compostos possuírem características muito diferentes o sistema de reparo fica sujeito a novos danos⁴. O concreto convencional é o mais compatível com os artefatos de concreto, no entanto, usá-lo como MR pode ser equivocado, uma vez que se mostrou anteriormente suscetível aos agentes agressivos¹.

Segundo SEGRE (1999)⁵, o uso de recicláveis em materiais à base de cimento não é apenas uma questão ambiental, mas também resulta em modificações ou melhorias de certas propriedades do produto final.

A incorporação de resíduos de borracha ao concreto propicia algumas modificações nas suas propriedades que podem permitir seu uso como MR. Apesar da adição de borracha ao concreto diminuir sua resistência mecânica, aumenta sua capacidade de deformação sem o surgimento de fissuras^{6,7,8,9}. As fibras de borracha atuam como obstáculos para a propagação de fissuras¹⁰, propriedade importante, pois a ruptura de corpos de concreto se dá mediante o surgimento de fissuras que comprometem a sua capacidade de suportar esforços. Segundo RAGHAVAN e HUYNH (1998)¹⁰ o concreto com adição de borracha é capaz de suportar esforços mesmo depois de sua ruptura.

SEGRE (1999)⁵ estudou a resistência à abrasão de pastas de cimento com adição de borracha. Segundo sua pesquisa as pastas de cimento com adição de borracha têm menor resistência à abrasão do que a pasta de cimento convencional. A baixa resistência à abrasão pode inviabilizar o uso do concreto como material de reparo em obras hidráulicas porque este tipo de estrutura está sujeita a permanente ação de abrasão. A resistência à abrasão de argamassas com adição de pó de borracha foi estudada por MENEGUINI e PAULON¹¹ (2004) que concluíram que a adição deste material diminui o desgaste por abrasão em superfícies de argamassa. A resistência à abrasão do concreto com adição de borracha (CAB) foi estudada por MARQUES (2005)¹², concluindo que o desgaste do concreto contendo 10%, em volume, de borracha é o mesmo que para o concreto de mesmo traço sem adição de borracha. Considerando que o CAB possuía menor resistência à compressão é possível que tenha maior resistência à abrasão do que o concreto convencional.

A utilização de resíduos de borracha no concreto é importante, também, do ponto de vista ecológico. O crescimento da população e a maior utilização de materiais descartáveis como embalagens, pneus, garrafas PET, entre outros, têm causado o acúmulo de grandes quantidades de resíduos sólidos, os quais estão levando ao limite a capacidade dos aterros sanitários. Em 2005 na cidade do Rio de Janeiro, os pneus e artefatos de borracha

correspondiam à cerca de 0,5% do lixo urbano, em São Paulo esta quantidade se aproxima de 3%¹³.

O pneu inservível não pode voltar à linha de produção de um novo pneu porque as ligações cruzadas, provenientes da vulcanização, são economicamente irreversíveis. Existem alguns métodos de “desvulcanização”, porém não são totalmente eficientes porque geram uma borracha cara e com uso limitado^{5,12,14}.

Segundo dados do CEMPRE (2005)¹³, o descarte anual de pneus de automóveis é de cerca de 110.000 t, sendo desses, 53% inservíveis (58.300 t)¹³. Alguns setores industriais absorvem parte dos pneus inservíveis, é o caso das cimenteiras que utilizam pneus como combustível em altos-fornos¹⁵. Porém, tais usos não absorvem todo o montante descartado anualmente.

A queima do pneu a céu aberto libera dióxido de enxofre na atmosfera e cerca de 10 l de óleo no solo, contaminando-o e podendo inclusive atingir o lençol freático. O estoque é inviável por acarretar problemas como proliferação de insetos e roedores, risco de incêndio, além de ocuparem muito espaço por serem de difícil compactação. Em aterros sanitários pode acontecer a lixiviação de aditivos de baixo peso molecular do interior da massa de pneu para o ambiente, sendo que esses materiais podem ser nocivos aos microorganismos necessários para o solo¹². O tempo de degradação dos pneus também dificulta a estocagem, uma vez que seria financeiramente inviável estocar um pneu por mais de 150 anos (tempo mínimo para degradação)^{12,13}. Para evitar danos ambientais o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) publicou a resolução 258 em 1999¹⁶, proibindo a disposição inadequada dos pneus inservíveis. Esta resolução credita aos fabricantes e importadores a responsabilidade pelos pneus fora de uso.

A reciclagem do pneu, por meio da recapagem ou da remoldagem, aumenta a vida útil deste em cerca de 40% e diminui o consumo de matéria-prima e energia, no entanto, este processo gera como resíduo as raspas de borracha. O material resultante do processo de raspagem do pneu pode ser

aproveitado como matéria-prima barata pela indústria da construção civil. O concreto é conhecido como um agente reciclador de resíduos, atuando como uma barreira física e química à contaminação do meio ambiente por alguns resíduos¹⁴.

1.3. CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA

Esta dissertação de mestrado foi realizada no Programa interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia (PIPE), vinculado ao setor de tecnologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

1.3.1. Objetivo principal da pesquisa

Os principais objetivos desta pesquisa foram a caracterização das propriedades mecânicas do concreto com incorporação de partículas de borracha vulcanizada, e a verificação da possibilidade de utilização deste compósito como material de reparo em patologias geradas por desgaste superficial (abrasão) em superfícies hidráulicas.

A pesquisa foi realizada em duas etapas, na primeira foram dosados concretos com diferentes teores de borracha, em substituição a mesma proporção de massa de areia, para caracterização das propriedades mecânicas (resistência à tração, à compressão e módulo de elasticidade), na segunda etapa foram escolhidos os traços de melhor desempenho para verificar a possibilidade de utilizá-los como material de reparo.

O mecanismo de erosão escolhido como desgaste superficial foi a abrasão, que segundo KORMANN *et al.* (2001)¹⁷ constitui uma das principais patologias ocorridas em vertedores de usinas hidrelétricas.

A verificação da possibilidade de utilização do CAB como material de reparo, considerou, também, a capacidade de aderência entre o substrato de concreto endurecido e o CAB no estado fresco.

1.3.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar os materiais necessários à realização das misturas;
- determinar o teor máximo para incorporação de borracha ao concreto;
- produzir misturas de CAB tecnicamente viáveis;
- verificar as variações das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, por meio de ensaios tecnológicos;
- correlacionar as características do CAB com as do concreto convencional;
- avaliar o comportamento do CAB em relação à abrasão;
- verificar a aderência do CAB no estado fresco em superfície de concreto convencional endurecido; e,
- aumentar o conhecimento técnico e laboratorial em relação ao concreto com adição de borracha.

1.3.3. Trabalhos resultantes da pesquisa realizada

O desenvolvimento desta pesquisa gerou os seguintes artigos publicados ou em vias de publicação no meio técnico-científico:

- FREITAS, C.; PORTELLA, K. F.; GOMES FILHO, C.; JOUKOSKI, A. **Concreto com adição de borracha para uso na confecção de blocos intertravados**. In; 49^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Bento Gonçalves. Artigo aceito para ser publicado em setembro de 2007.

- SANTI, M. R.; PORTELLA, K. F.; FREITAS, C.; GARCIA, M. I. **Adição de resíduos reciclados em concretos.** In: IV ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. Campo Grande/MS. Artigo aceito para ser publicado em novembro de 2007
- CAMPTTELI, V.; WOZNIK, R.; FREITAS, C.; GARCIA, M. I.; SANTI, M. R.; NIEBEL, P. R. **Influência de adições minerais na trabalhabilidade, porosidade e resistência à compressão axial no concreto.** In; 49^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Bento Gonçalves. Artigo aceito para ser publicado em setembro de 2007.
- SANTI, M. R.; PORTELLA, K. F.; FREITAS, C.; GARCIA, M. I. **Adição de resíduos reciclados em concretos.** In: 49^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Bento Gonçalves. Artigo aceito para ser publicado em setembro de 2007.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a relação entre resíduos urbanos e o meio ambiente, os aspectos da história do desenvolvimento de pneumáticos, o levantamento de estudos existentes relacionados a utilização de borracha em material cimentício, os mecanismos de deterioração do concreto e as características dos materiais de reparo.

2.1. RESÍDUOS URBANOS E O MEIO AMBIENTE

Resíduos são subprodutos gerados por processos econômicos, incluindo atividades extrativistas, produção industrial e de serviços¹⁸. Alguns exemplos de resíduos são: escória de alto forno, cinza volante, pneus inservíveis, lodo de estação de tratamento de esgoto, entulho da construção civil, caco de vidro, tecido, papel usado entre outros.

Segundo GONÇALVES (2003)¹⁸, a produção de lixo é inevitável e inexorável, pois todos os processos geram resíduos, desde o mais elementar processo metabólico de uma célula até o mais complexo processo de produção industrial.

Os resíduos urbanos estão, freqüentemente, associados a tudo que não presta e precisa ser afastado da sociedade. No entanto, o lixo é constituído por uma parcela de 40% de materiais recicláveis. No lixo há valores a serem resgatados¹⁸. Segundo FIGUEIREDO (1994)¹⁹ dentre os resíduos, coletados e transportados aos sistemas de processamento, uma parte apresenta atratividade econômica pelo seu conteúdo energético ou material.

O atendimento às necessidades de um modo de vida predatório, devido ao consumismo desenfreado, acarreta à extração de matéria-prima

para a fabricação de um bem, até o respectivo descarte como resíduo sólido, sem respeitar a capacidade de suporte do meio ambiente²⁰.

Os problemas ambientais ocasionados pelos resíduos sólidos aparecem de formas variadas, desde a escassez de alguns elementos naturais até a poluição generalizada dos ecossistemas terrestres. A biosfera terrestre se comporta como um sistema fechado no qual a movimentação natural dos elementos segue uma dinâmica cíclica. A extração e a utilização maciça de recursos não renováveis segundo um comportamento linear implicam, de um lado, na exaustão de materiais antes concentrados e, de outro, na dispersão e degradação destes ou de novos elementos, acarretando uma instabilidade no sistema global e uma indisponibilidade de recursos às sociedades futuras¹⁹.

A deposição dos resíduos em aterros sanitários acarreta o desperdício, por um tempo indefinido de um recurso limitado: o solo. A concentração de resíduos perigosos nos aterros sanitários sempre está sujeita a acidentes de graves conseqüências²¹. No caso específico do pneu pode ocorrer a lixiviação de seus componentes contaminando o solo e prejudicando microorganismos presentes ou a ruptura da camada impermeabilizante do aterro sanitário devido ao afloramento do pneu na superfície¹⁴.

2.1.1. Reciclagem na construção civil

Reciclagem é o conjunto de atividades que torna possível o reaproveitamento ou utilização dos resíduos sólidos que são considerados lixo²². A reciclagem pode ser uma alternativa viável para minimizar os danos causados pelo consumo das matérias-primas e energia²³.

A consolidação da reciclagem na construção civil como uma prática sustentável é devida à atenuação dos riscos de impactos ambientais e a redução de custos para produção no setor²⁴.

O papel de reciclador, realizado pelo concreto, garante não apenas um destino seguro para subprodutos poluidores, mas também uma economia da energia utilizada nos processos de produção e o aumento da vida útil das fontes naturais de matéria-prima²⁵.

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que a construção civil consuma algo entre 20 e 50% do total de recursos naturais extraídos pela sociedade²⁶. Segundo FRANÇA (2004)²⁷ a construção civil é responsável pelo consumo de 30% dos recursos naturais extraídos, este percentual equivale a 220 milhões de toneladas de agregados naturais por ano.

O esgotamento das reservas naturais próximas aos grandes centros aumenta a distância de transporte das matérias-primas. Na cidade de São Paulo, por exemplo, a areia natural é transportada por distâncias superiores a 100 km, implicando em maior consumo de energia e poluição²¹.

Para que seja viável o uso de determinado resíduo pela indústria da construção civil este deve obedecer a alguns critérios. A quantidade de material disponível deve ser grande o suficiente para que se possa justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte. As distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas em relação aos materiais convencionais. O resíduo não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação na estrutura²¹.

Experiências já comprovaram a eficiência da incorporação de alguns resíduos no concreto, que atingiram objetivos como: aumentar a resistência, colorir o concreto, diminuir o calor de hidratação, reduzir fissuras, aumentar a resistência ao impacto, reduzir custos, etc.^{5,21}.

Atualmente a indústria da construção civil recicla, rotineiramente, resíduos como a escória de alto forno, pozolana, argila calcinada e cinza volante²¹. A reciclagem de outros resíduos pelo setor da construção civil como adição no concreto continua sendo estudada, alguns exemplos são: carpetes, resinas de polietileno tereftalato (PET), resíduos de serragem de

mármore e granito, cinza de bagaço de cana de açúcar, cinza de casca de arroz e resíduos de pneu⁵.

JOHN (2000)²⁸ considera que a reciclagem de resíduos na construção civil pode resultar na oferta de uma maior quantidade de produtos alternativos, além de soluções mais adequadas para situações específicas. Segundo ÂNGULO *et al.* (2001)²⁴ os benefícios da reciclagem são:

- redução no consumo de recursos naturais não renováveis;
- redução de área necessária para aterro, devido à minimização do volume dos resíduos;
- redução do consumo de energia durante o processo de produção; e
- redução da poluição.

As aplicações mais adequadas para a reciclagem são aquelas que, além de minimizar a necessidade de separação, classificação e transformação industrial do produto, minimizam o risco de lixiviação ou volatilização de eventuais materiais e resultam em um produto reciclável com vantagens competitivas sobre os já existentes no mercado²⁸.

Nos Estados Unidos a construção civil representa o segundo maior mercado para a utilização dos pneus inservíveis. Na década de 90 as aplicações na engenharia civil aumentaram de 500 mil para cerca de 40 milhões de pneus por ano¹⁴.

A utilização de resíduos de pneus, como material de construção é uma maneira de diversificar e aumentar a oferta de materiais de construção, viabilizando eventuais reduções de preço¹⁴.

As aplicações mais comuns na engenharia civil incluem: material de enchimento de peso leve; drenagem em campo séptico; aterro em estradas; suporte de base de estradas; sistema de drenagem de gases em aterros sanitários; material para compostagem; estabilizadores de encostas; controle de erosão, diques, barragens; isolante térmico e acústico; drenagem em

aterro sanitário; aditivos para pavimentos asfálticos e pistas esportivas; cobertura de parques infantis e outras¹⁴.

2.1.2. Adição de borracha em materiais cimentícios

As propriedades do concreto podem ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura do material. Ao mudar as propriedades de uma das três fases do concreto muda-se, simultaneamente, as propriedades do concreto produzido²⁹.

A utilização de borracha de pneu moído como agregado foi estudada por ELDIN e SENOUCCI (1993)³⁰, que observaram perdas na resistência mecânica de 25 a 85%. Os autores também notaram que as perdas de resistência são menores quando é realizada a substituição do agregado miúdo.

Em 1995 TOPÇU⁶ estudou a substituição do agregado graúdo do concreto por partículas grandes de borracha, os resultados não foram satisfatórios em relação às propriedades mecânicas. Em relação à capacidade de absorver energia, a adição de borracha ao concreto diminui a capacidade de absorver energia elástica e aumenta a capacidade de absorver energia plástica, o que permite que o material sofra alta deformação antes da ruptura. Ainda, segundo o estudo de TOPÇU (1995)⁶, a utilização de agregado graúdo de borracha é mais prejudicial às propriedades mecânicas do concreto do que a utilização de partículas finas. O mesmo TOPÇU (1997)⁷ estudou ainda o índice de fragilidade do concreto com incorporação de borracha, e constatou um aumento no índice de fragilidade para adição de 15% de borracha e uma tendência de diminuição para incorporação de borracha nas proporções de 30 e 45%. A diminuição do índice de fragilidade significa uma maior deformação do concreto antes da ruptura.

TOUTANJI (1996)³¹ pesquisou a substituição de 25, 50, 75 e 100% dos agregados graúdos do concreto por agregado de borracha. Nesta pesquisa ele observou que a perda na resistência à compressão é o dobro da

perda da resistência à flexão e que o concreto passou a apresentar ruptura dúctil e não mais frágil, passando a ter grande deformação antes da fratura.

Estudos foram realizados com o intuito de verificar o comportamento da borracha em meio alcalino, segundo estes estudos a borracha mantém sua massa e capacidade elástica mesmo após 4 meses de imersão em solução altamente alcalina, o que sugere que a borracha é estável no ambiente existente no interior do concreto³².

RAGHAVAN e HUYNH (1998)¹⁰ demonstraram, por microscopia eletrônica em corpos-de-prova de argamassa rompidos por flexão, que a ruptura ocorreu na interface entre a borracha e a pasta de cimento, ele atribuiu este fato à fraca aderência entre estes materiais. Apesar desta fraca aderência, a borracha incorporada à argamassa foi capaz de evitar a propagação de pequenas fissuras o que permite que o CAB seja capaz de continuar absorvendo carregamento após a ruptura¹⁰.

Para melhorar a adesão entre a pasta de cimento e as partículas de borracha, SEGRE (2000)⁵ sugeriu o tratamento superficial das partículas de borracha com soluções de NaOH (hidróxido de sódio), o que gerou melhoras na aderência dos materiais.

ALBUQUERQUE *et al.* (2006)³³ estudaram três tipos diferentes de tratamento superficial na borracha adicionada ao concreto: aditivo vinílico, aditivo acrílico e aditivo de estireno-butadieno. Os tratamentos mostraram-se eficientes, principalmente, considerando a resistência à tração.

ACCETTI e PINHEIRO (2000)³⁴ estudaram a adição de fibras de borracha ao concreto e constataram que estas atuam como barreira ao desenvolvimento das fissuras. Durante o endurecimento da pasta as fibras de borracha interceptam as microfissuras e impedem sua progressão, evitando desta maneira, o seu surgimento prematuro.

AKASAKI *et al.* (2001)³⁵ sugeriram, em seu artigo “*análise experimental da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de borracha vulcanizada*” que, para não haver perda significativa na

resistência do concreto, a incorporação de fibras de borracha deve ser feita em substituição ao agregado miúdo da mistura.

A granulometria das partículas de borracha influencia as propriedades mecânicas do CAB. NIRSCHL (2002)³⁶ estudou a adição de fibras de borracha de diferentes granulometrias ao concreto e concluiu que as fibras de 0,8 a 2,38 mm proporcionaram propriedades mecânicas com valores superiores ao concreto contendo fibras com tamanho inferior a 0,8 mm.

O concreto de cimento Portland apresenta alguns inconvenientes como fragilidade e sensibilidade a fissuras devido à retração. Para eliminar estas desvantagens costuma-se usar fibras de reforço que impedem a propagação das fissuras. TURATSINZE (2004)⁹ comparou o desempenho das fibras de borracha com o desempenho de fibras de reforço usuais e concluiu que a borracha não é tão eficiente quanto as fibras de aço, mas pode ser utilizada de maneira satisfatória quando é necessário um material de alta resistência ao surgimento de fissuras.

Com o intuito de verificar a variação do índice de consistência (IC) do concreto com adição de fibras de borracha, MARTINS *et al.* (2005)³⁷ dosaram concretos com diferentes proporções deste material e mantiveram constantes a dosagem de aditivo e a relação água-cimento. Os resultados mostraram que a medida que se aumenta a quantidade de fibras o IC diminui. MARTINS *et al.* (2005)³⁷ estudaram, também, a absorção e a resistência à flexão do CAB, constatando que este possui absorção maior do que o concreto convencional e que a resistência à flexão tendeu a diminuir com a adição de fibras de borracha. Quanto à absorção de energia pelo concreto, observaram que o CAB apresentou maior absorção de energia com o aumento da quantidade de fibras, pois os CP's foram capazes de resistir a cargas mesmo após a primeira ruptura para todos os traços contendo fibras médias.

O comportamento do concreto de alto desempenho (CAD) foi comparado com o comportamento do CAD com adição de borracha obtido por MARTINS e AKASAKI (2005)³⁸, eles observaram que substituindo 11,35% do volume de areia pelo elastômero ocorre uma perda de 20% na resistência

à compressão. O CAD adicionado de borracha apresentou um comportamento diferenciado, quanto ao tipo de ruptura, em relação ao CAD convencional. A adição de fibras de borracha induziu a um aumento na ductilidade do CAD com borracha.

A influência da granulometria das partículas de borracha foi verificada por MARTINS (2005)³⁹, o autor estudou a adição de partículas finas, médias e graúdas no concreto, com o resultado verificou que a borracha fina causa menor prejuízo à resistência mecânica do concreto. Neste mesmo estudo verificou que a trabalhabilidade do concreto diminuiu com a adição do resíduo de borracha.

MARQUES *et al.* (2005)⁴⁰ estudaram o uso de borracha de diferentes granulometrias com e sem tratamento superficial a base de hidróxido de cálcio. Os resultados mostraram propriedades mecânicas muito próximas para as partículas com e sem tratamento. Quanto à absorção de água, verificaram que o concreto contendo partículas mais finas absorvia menos água do que o concreto contendo as partículas maiores, independentemente do tratamento.

MOSCA *et al.* (2005)⁴¹ realizaram dosagens de concreto com adição de borracha em substituição de parte da massa dos agregados (miúdo e graúdo) em teores de 1,2,3,4,5 e 6% de borracha vulcanizada, observando perdas para resistência à compressão de 9, 23, 39, 40, 68 e 75%, respectivamente.

A aderência entre o concreto com adição de borracha e barras de aço foi estudada por FRANÇA *et al.* (2005)⁴², para tanto produziram concreto com e sem adição de borracha, moldaram corpos-de-prova com uma barra de aço em seu interior e realizaram ensaios de aderência (teste da tração simétrica e teste de arrancamento). Para barras de aço de 12,5 e 16 mm de diâmetro a aderência entre o CAB e a barra de aço ficou dentro do recomendado pela norma brasileira. Não existiu grande variação entre o CAB e o concreto convencional.

A adição de partículas de borracha, proveniente da indústria de recauchutagem de pneus, ao concreto em substituição de parte do agregado miúdo em peso foi pesquisada por MARQUES (2005)¹² e MARQUES *et al.* (2005)⁴⁰. Estas pesquisas demonstraram que o concreto com adição de borracha tem resistência mecânica inferior ao concreto convencional. Ainda segundo MARQUES *et al.* (2005)⁴⁰ para manter a resistência constante com a adição do elastômero foi necessário aumentar o consumo de cimento, ou seja, diminuir o fator a/c. A mesma pesquisa demonstrou que a quantidade de ar incorporado ao concreto aumentou com a adição do resíduo. A incorporação de ar diminuiu o peso específico e contribuiu para a perda de resistência do concreto. A autora estudou, ainda, o desgaste superficial do CAB por abrasão e concluiu que o desgaste do concreto contendo 10%, em volume, de borracha foi o mesmo que para o concreto de mesmo traço sem adição de borracha. Considerando que o CAB possui menor resistência à compressão, é possível que ele tenha maior resistência à abrasão do que o concreto convencional.

ALBUQUERQUE *et al.* (2006)³³ pesquisaram a adição de borracha ao concreto em três diferentes granulometrias, utilizaram dosagens de 5 a 25% de borracha em substituição de parte do volume de areia. Eles observaram que à medida que se aumentava a quantidade do resíduo no concreto o ar incorporado também aumentava, principalmente, com a utilização de partículas de menor dimensão. O aumento do teor do elastômero diminuiu a trabalhabilidade do concreto aumentando, dessa forma, a demanda de aditivo superplastificante. Quanto às propriedades mecânicas ALBUQUERQUE *et al.* (2006)³³ encontraram valores semelhantes, em comparação ao concreto-referência, para a resistência à compressão para as adições de até 10%, para a resistência à tração indicou a proporção de 5% como sendo a quantidade ótima de borracha.

2.2. PNEU

O pneu é o componente de interface entre o veículo e o solo, ele atua transmitindo e recebendo esforços provenientes de acelerações, desacelerações e de impactos⁴³.

O primeiro pneu foi patenteado por Thomson em 1845, no entanto, só passou a ser utilizado depois de 1888, quando Dunlop aplicou nas rodas de madeira do triciclo de seu filho tubos de borracha dentro de um invólucro de lona com uma banda de borracha⁴⁴.

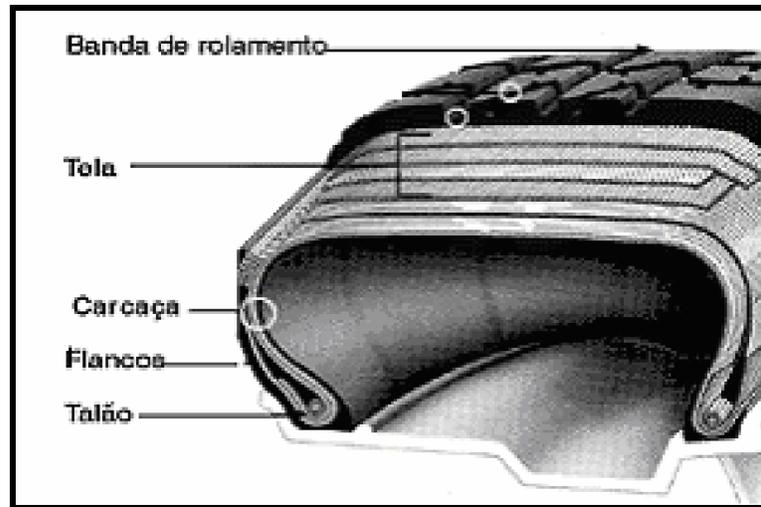
Com o uso em bicicletas, o formato dos pneus evoluiu, e por volta de 1890 o pneu apresentava aro com bordo de retenção saliente e curvo que se ajustava firmemente à roda quando se enchia a câmara de ar⁴⁵.

As primeiras fábricas de pneu surgiram no final do século XIX. Em 1894 começou a produção de pneus para charretes e em 1895 para automóveis. Desde então, o pneu não parou de ser aprimorado devido às pesquisas e desenvolvimento de seus componentes e estrutura. A partir de 1955 o pneu passou a dispensar a câmara de ar sendo então chamado de pneumático⁴⁴.

2.2.1. Composição dos pneus

O pneu é formado por diversos componentes, cada um com uma formulação própria para melhorar seu desempenho específico, ou seja, pode-se encontrar em um único pneumático mais de uma dezena de compostos de borracha⁴⁴. Com o objetivo de propiciar durabilidade ao pneu este é planejado para condições extremas de uso¹⁴.

Basicamente, o pneu é composto de carcaça, flancos, talão e banda de rodagem. Na Figura 1 está ilustrada a estrutura básica de um pneu genérico⁴³.



Estrutura do pneu

FIGURA 1: ESTRUTURA BÁSICA DE UM PNEU GENÉRICO⁴³.

Carcaça: é a estrutura esquelética do pneu, tem a função de reter o ar sob pressão, suportar o peso do veículo e ser resistente ao choque. É constituída por lonas de poliéster, náilon ou aço.

Telas: são constituídas por fios de aço ou de náilon entrelaçados em napa e sobrepostos entre a carcaça e a banda de rolamento.

Flancos: é a parte lateral do pneu, constituído por borracha de alta flexibilidade. Os flancos têm a função de proteger a carcaça.

Talão: é um anel de borracha composto por diversos arames de alta resistência, unidos e recobertos por borracha. A função do talão é acoplar o pneumático ao aro impedindo vazamentos de ar.

Banda de rolamento: é a parte do pneu que entra em contato com a pista de rolamento, é formada por um composto de borracha resistente ao desgaste. A banda de rodagem tem o objetivo de propiciar ao veículo aderência ao solo, tração de aceleração e de frenagem, estabilidade e segurança^{12,14}.

Na Figura 2 está mostrada a composição média de pneus radiais para automóveis.

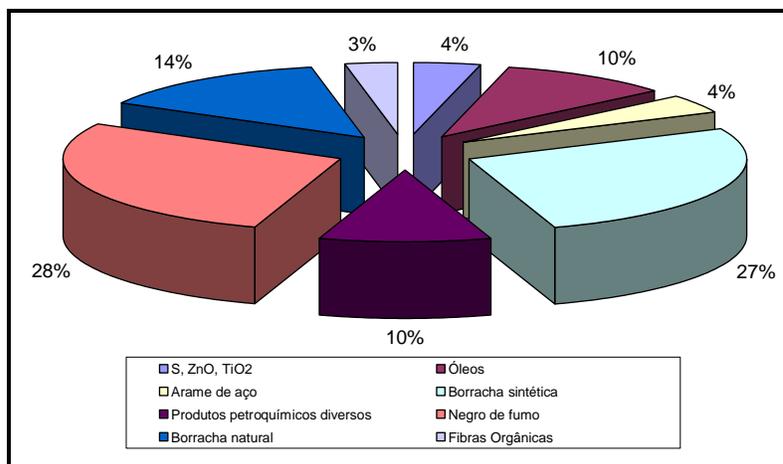


FIGURA 2: COMPOSIÇÃO MÉDIA DE UM PNEU RADIAL PARA AUTOMÓVEIS⁴³.

A componente borracha representa mais de 40% do peso total do pneu. O elastômero utilizado na confecção do pneu pode ser natural, sintético ou uma mistura dos dois tipos. A borracha natural fornece as propriedades elásticas, enquanto que a sintética proporciona a estabilidade térmica do pneumático¹⁴. Na Tabela 1 estão especificadas algumas características importantes das borrachas natural (NR) e de estireno-butadieno (SBR).

TABELA 1: CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES E APLICAÇÕES TÍPICAS DOS ELASTÔMEROS NR E SBR⁴⁶.

Nome Comercial	Tipo químico	Principais características de aplicação	Aplicações típicas
Borracha natural (NR)	Poli-isopreno natural	Excelentes propriedades físicas; boa resistência ao corte ao entalhe e à abrasão; baixa resistência ao calor, ao ozônio e ao óleo; boas propriedades elétricas.	Pneus e tubos; biqueiras e solas; juntas e gaxetas
SBR	Copolímero estireno-butadieno	Boas propriedades físicas; excelente resistência à abrasão; não possui resistência a óleo, ozônio ou ao tempo; boas propriedades elétricas.	

Durante o processamento do pneumático são usados aditivos para melhorar certas propriedades do pneu. O negro de fumo é incorporado para aumentar a resistência mecânica, o enxofre é utilizado no processo de

vulcanização da borracha e a sílica amorfa reduz o atrito do pneu com o pavimento¹⁴.

2.2.2. Borracha

As borrachas (elastômeros) são materiais poliméricos caracterizados pela capacidade de retornar rapidamente à forma e à dimensão originais, quando submetidas a um esforço externo que aumente seu tamanho em até duas vezes⁴⁷.

A borracha natural é originada do processamento do látex da seringueira (*Hevea Brasiliensis*)⁴⁸. Ao promover uma incisão na casca, esta árvore exsuda uma secreção de aspecto leitoso, a borracha é o produto da coagulação deste líquido.

A seringueira é uma árvore originária da América tropical, nesta região os índios utilizavam o látex para produzir artefatos de recreação e para impermeabilizar tecidos e vasilhas para estoque de água⁴⁴.

O velho mundo conheceu a borracha depois do descobrimento da América. Os primeiros estudos científicos sobre a borracha foram realizados por Charles de la Condamine em 1735, pesquisador que foi até o Peru em uma expedição para medição do perímetro terrestre. Seus relatos informam os vários usos que os índios faziam do látex. A primeira fábrica de artefatos de borracha foi criada em 1832, mas não teve sucesso devido às alterações da borracha por influência do frio (tornar-se quebradiça) ou ao ser exposta à luz solar (tornar-se pegajosa)^{44, 45}.

A superação destas deficiências foi descoberta por Charles Goodyear, em 1839. Ele estudava a mistura de borracha e enxofre, quando acidentalmente derramou enxofre numa amostra de borracha que estava sendo aquecida, proporcionando assim, mais resistência e elasticidade à borracha¹⁴.

Charles Goodyear descobriu que misturando enxofre à borracha e aquecendo esta mistura obtém-se um composto de enxofre e borracha com

propriedades superiores à borracha original, tendo maior resistência mecânica pelo aumento do módulo de elasticidade, de sua dureza, de sua resistência à fadiga e à abrasão^{14,44}.

A vulcanização é a conversão da borracha com o auxílio de um processo químico de ligações cruzadas. As cadeias lineares adjacentes são unidas umas às outras em várias posições através de ligações covalentes. A vulcanização é uma reação química irreversível, os átomos de enxofre se ligam com as cadeias principais dos polímeros que se encontram adjacentes formando ligações cruzadas entre elas⁴⁴.

A maior dificuldade para reciclar os resíduos compostos de borracha é devida à irreversibilidade do processo de vulcanização. A ligação química que liga o átomo de enxofre aos polímeros é covalente e para interrompê-la é necessário o uso de grande quantidade de energia⁴⁶. O processo de vulcanização torna a borracha um produto durável e resistente às intempéries.

A tecnologia para fabricar a borracha sintética a partir do petróleo, surgiu na Alemanha após a segunda guerra mundial, no entanto, não apresentava a mesma qualidade da borracha natural⁴⁵.

A participação de borrachas sintéticas no mercado mundial, que era praticamente nula nos anos 40, atingiu seu pico no final da década de 70, sendo responsável por 79% da borracha utilizada⁴⁷.

Uma variedade muito ampla de elastômeros sintéticos foi desenvolvida desde a descoberta do produto. As características e propriedades da borracha a tornam um produto muito amplo sendo empregado em vários setores da economia: automobilístico, calçadista, construção civil, plásticos, materiais hospitalares e outros também de grande importância no dia-dia da sociedade. As borrachas mais utilizadas na produção de pneus são de estireno butadieno e de polibutadieno, a borracha de acrilonitrila-butadieno é usada em menor proporção⁴⁵.

2.2.3. Pneus inservíveis

O Conselho Nacional do meio ambiente (CONAMA) define como pneu inservível “aquele que não mais se presta a processo que permita condição de rodagem adicional”¹⁶. Segundo KAMIMURA (2002)¹⁴, um pneu se torna inservível quando está fisicamente prejudicado, a lona se rompe, ou não pode ser recauchutado. Pneu inservível é aquele que não mais se presta a qualquer tipo de uso como pneu, não sendo possível inclusive reindustrializá-lo (recapagem, recauchutagem ou remoldagem)⁴⁹.

BERTOLLO *et al.* (2000)⁵⁰ estimaram a geração média anual per capita de pneus inservíveis para o estado de São Paulo em 0,15, ou seja, aproximadamente seis milhões de pneus inservíveis por ano. Segundo dados do CEMPRE (2005)¹³ o descarte anual de pneus de automóveis é de cerca de 110.000 toneladas, sendo desses, 53% inservíveis (58.300 toneladas).

SOUZA (2000)⁵¹ apresentou as características listadas na Tabela 2 para os pneus usados.

TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DE PNEUS USADOS⁵¹.

Características	Parâmetros
Pneu tipo transporte	50-60 kg/pneu
Pneu tipo passeio	7-8 kg/pneu
Diâmetro externo máximo	1.140 mm
Largura máxima do pneu	380 mm

Pneumáticos inservíveis dispostos inadequadamente em logradouros públicos ou terrenos baldios, além de constituir passivo ambiental, são expressivos componentes na geração de resíduos urbanos resultando em sério risco à saúde pública, pois podem servir de criadouros para micro e macro vetores, ou ainda serem queimados a céu aberto, liberando carbono, dióxido de enxofre e outros poluentes atmosféricos²⁰.

O pneu inservível é um problema mundial, caso não seja devidamente coletado e destinado pode comprometer o meio e até provocar incêndios, pela ignição de elementos inflamáveis que contém¹⁴. Cada pneu queimado libera cerca de 10 l de óleo que pode percolar o solo e atingir o lençol freático²⁰.

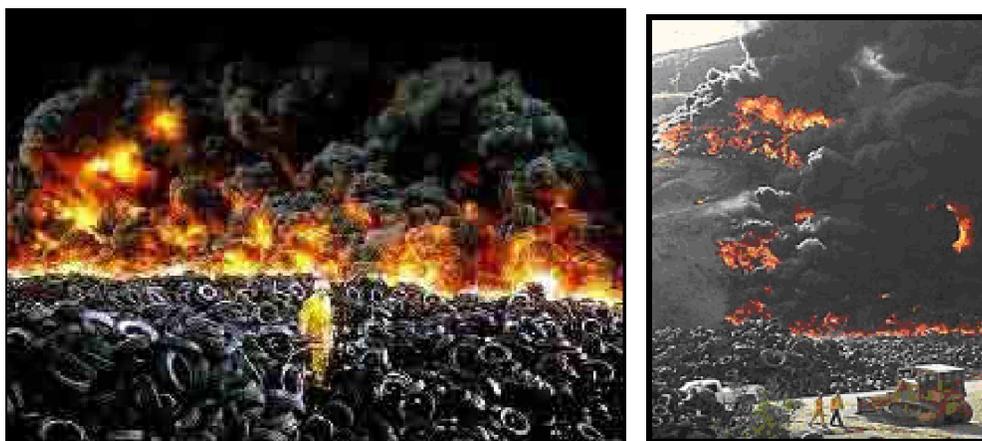


FIGURA 3: INCÊNDIOS EM DEPÓSITOS DE PNEUS INSERVÍVEIS^{38,14}.

O tempo necessário para apagar os incêndios em grandes depósitos de pneus varia de semanas a meses. Há relatos sobre um incêndio que durou 9 meses nos Estados Unidos, durante a queima há a liberação de grandes quantidades de gases tóxicos altamente perigosos¹⁴.

Pelo volume e características, os pneus inservíveis são contra indicados em aterros sanitários⁵², apresentam baixa compressibilidade e reduzem a vida útil dos aterros sanitários, outro inconveniente é que absorvem os gases liberados pela decomposição de resíduos e incham, estourando a cobertura dos aterros²⁰.

Em 1999, segundo estimativas da ABIP (Associação Brasileira da Indústria de Pneumáticos Remoldados), havia cerca de 100 milhões de carcaças de pneus lançadas no território brasileiro⁵².

2.2.4. Recuperação da borracha

A borracha pode ser recuperada por processo químico ou físico. Na recuperação física as ligações tridimensionais do elastômero são quebradas por meio de diferentes fontes de energia. Agentes químicos são utilizados, sob pressão e temperatura elevadas, para reaproveitamento da borracha por processo químico¹⁴.

Antes de iniciar o processo de recuperação propriamente dito é necessário separar a borracha vulcanizada de outros componentes, como fibras de náilon e aço. Após o processo de trituração as lascas são purificadas por peneiramento. O produto passa por processos químicos para desvulcanização. A borracha desvulcanizada é refinada em moinhos até a obtenção de uma manta uniforme, ou extrudada para a obtenção de grânulos de borracha¹². O produto resultante da regeneração é fisicamente inferior com composição indefinida (uma mistura dos compostos presentes nos diferentes componentes do pneu)¹⁴.

O produto regenerado deve ser considerado como matéria-prima para a produção de artefatos como tapetes, pisos industriais, sinalizadores de trânsito, bolas de borracha, solados de calçados e quadras esportivas. A quantidade média de borracha regenerada nestes produtos varia de 5 a 15%, podendo chegar a 100% em produtos como manta e lençóis^{12,14}.

2.2.5. Reciclagem do pneu

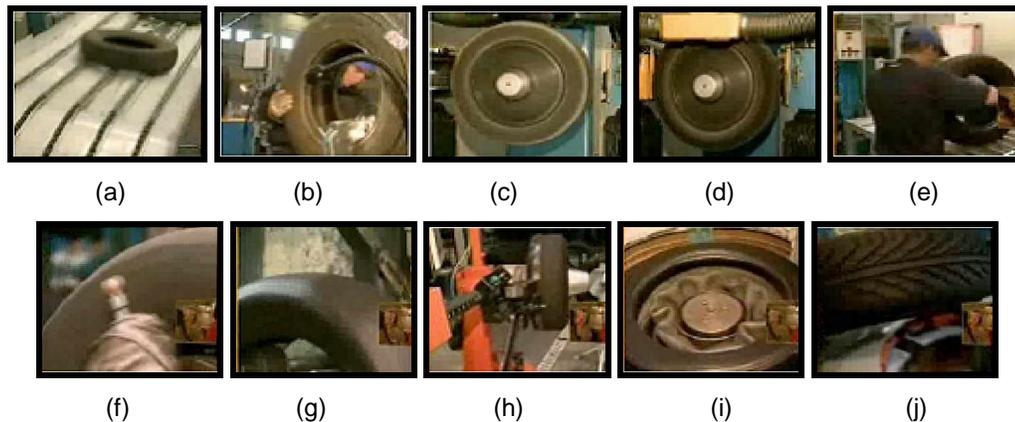
Depois de usada, a borracha do pneu não pode voltar à produção de um novo pneu, no entanto, existem processos que substituem os componentes mais comprometidos do pneu usado e permitem o aumento de sua vida útil.

A recauchutagem e a remoldagem são processos conhecidos de reciclagem de pneus. Segundo dados do CEMPRE (2003)¹³ a frota de carga e de passageiros do Brasil é formada por 70% de pneus recauchutados. Este

processo aumenta a vida útil do pneu em 40%, mas gera resíduos, pois a banda de rodagem é descartada para aplicação de uma nova camada⁵³.

A remoldagem de pneus é uma tecnologia de última geração desenvolvida na Europa, que permite a reciclagem de pneumáticos usados restituindo suas características essenciais, objetivando suprir o mercado consumidor de pneus sem agredir o meio ambiente poupando a extração de borracha "in natura"⁵⁴.

No processo de remoldagem o pneu usado é montado em máquinas que o fazem girar em altíssima velocidade. Nesta etapa a sujeira presa ao pneu se desprende da borracha, a da banda de rodagem e os flancos são retirados por processo mecânico de raspagem. Em seguida, a carcaça recebe nova camada de borracha para posterior vulcanização. A remoldagem de pneumáticos gera economia de 20 l de petróleo para pneus de passeio e de 40 l para pneus de caminhonete⁵⁵.



Legenda: (a) pneu usado; (b) inspeção visual; (c) e (d) raspagem mecânica em alta velocidade; (e) inspeção visual; (f) raspagem manual; (g) emulsão; (h) nova camada de borracha; (i) vulcanização; e, (j) inspeção visual.

FIGURA 4: PROCESSO DE REMOLDAGEM DO PNEU⁵⁵.

A reciclagem do pneu, pela recauchutagem e pela remoldagem, gera economia de energia e matéria-prima, mas origina resíduos poluentes e de difícil degradação, as raspas de borracha.

As raspas de pneu são economicamente mais viáveis para reciclagem, pois dispensam a fase de trituração do pneu. A borracha oriunda da raspagem apresenta poucas impurezas como óleos, fibras de náilon e aço ou devidas ao uso do pneu.

2.2.6. Resolução CONAMA 258/99

No Brasil, desde 1936, início da fabricação de pneus, já foram produzidos cerca de 1 bilhão de unidades, cujo descarte ocorreu, na maioria das vezes, de forma incorreta, por meio de incineração sem controle de emissão de gases ou pelo depósito em áreas livres, rios, etc.¹⁴.

Com o objetivo de minimizar os danos ao meio ambiente, causados pela disposição inadequada dos pneus inservíveis, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) elaborou a resolução 258 em 1999. Tal resolução trata da destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis, dispondo sobre a responsabilidade, tempo e quantidade para a coleta e reciclagem de pneus¹⁶. Desde 2002 as produtoras de pneumáticos são responsáveis pela destinação final adequada das proporções constantes na Tabela 3.

TABELA 3: PRAZOS E QUANTIDADES PROPORCIONAIS PARA COLETA E DESTINAÇÃO FINAL DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS^{16,20}.

Prazos a partir de	Pneus novos		Pneus inservíveis a serem recuperados
	Nacionais	Importados	
1º de janeiro de 2002	4 unidades	4 unidades	1 unidade
1º de janeiro de 2003	2 unidades	2 unidades	1 unidade
1º de janeiro de 2004	1 unidades	1 unidades	1 unidade
1º de janeiro de 2005	4 unidades	4 unidades	5 unidades

Os fabricantes e importadores de pneus terão que comprovar anualmente, junto ao IBAMA, a destinação final dada aos pneumáticos, correspondentes às quantidades fabricadas e importadas, respectivamente¹⁶.

Como consta na Tabela 3, desde 2005, para cada 4 novos pneumáticos colocados no mercado brasileiro 5 devem ter sua destinação final comprovada diante do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

O Brasil foi o primeiro país a ter uma lei que obriga os fabricantes e importadoras de pneus a compensar a produção e a importação dos mesmos com a destruição de grande quantidade de pneus inservíveis ou de carcaças abandonadas¹⁴.

2.3. CONCRETO

O concreto de cimento Portland é um material poroso, com uma estrutura bastante heterogênea e complexa. Segundo MEHTA E MONTEIRO (1994)²⁹ as propriedades de um material têm origem em sua estrutura interna. A estrutura de um material é constituída pelo tipo, tamanho, quantidade, forma e distribuição das fases presentes. O concreto é formado basicamente por três fases distintas:

- meio ligante: geralmente constituído por pasta de cimento Portland, tem por objetivo envolver os agregados, preenchendo os vazios formados e possibilitar ao concreto a capacidade de manuseio quando recém misturado;
- agregados: propriedades do concreto como massa unitária e módulo de elasticidade estão ligadas à densidade e resistência dos agregados. Geralmente são mais resistentes que as outras fases, por isso não afetam diretamente a resistência do concreto; e
- zona de transição: é a região entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, formada pelo acúmulo de água ao redor do agregado. A fase de transição é a mais fraca dos constituintes do concreto, sendo fonte de micro-fissuras, responsáveis pelo

comportamento elasto-plástico do concreto endurecido, assim como pela baixa resistência à tração.



FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DO CONCRETO²⁹.

A pasta de cimento é a mistura de cimento Portland e água. O cimento Portland adquire a propriedade aglomerante ao ser misturado à água, isto porque a hidratação do cimento (reação química com a água) gera produtos com características de pega e endurecimento. Os componentes do cimento reagem, formando produtos cristalinos e outros de aparência gelatinosa, que aderem aos agregados, tornando-se muito duros. Caso a pasta de cimento permaneça úmida, as reações persistem por anos¹.

A relação entre a quantidade de água e a quantidade de cimento (fator a/c) deve ser a mais baixa possível, dentro das características exigidas pelo concreto e pela qualidade dos materiais disponíveis para a sua confecção^{1,29}.

A formação da microestrutura da pasta de cimento depende do processo de cura. O tempo, a umidade e a temperatura são fatores importantes para a cura da pasta e, conseqüentemente, interferem nas propriedades físicas e mecânicas do concreto²⁹.

Admitindo-se que a cura se dê num ambiente úmido e de temperatura normal para um mesmo fator água/cimento, quanto maior o período de cura maior a resistência do concreto. O tempo de cura também é importante para a permeabilidade e durabilidade do material²⁹.

O aumento da temperatura interna durante a hidratação do cimento tem maior influência nas propriedades do concreto do que a temperatura do ambiente em que é realizada a cura²⁹.

Para a faixa de temperatura entre 4°C e 45°C, considerando temperatura de lançamento e cura constante, quanto mais alta a temperatura, mais velozes as reações de hidratação do cimento. Dessa maneira o concreto lançado e curado a temperaturas mais elevadas atinge maior resistência nas primeiras idades, mas leva a uma resistência final inferior à obtida sob cura padronizada⁵. O aumento da temperatura durante a hidratação do cimento é responsável pela variação de volume deste. A variação de volume gera microfissuras na zona de transição^{1,29}.

Os agregados ocupam de 60% a 80% do volume do concreto e geralmente são considerados como material de enchimento inerte²⁹. Os agregados têm papel fundamental na resistência do concreto, caso apresente propriedades indesejáveis podem prejudicar a resistência deste e comprometer sua durabilidade e seu desempenho estrutural¹.

Os agregados podem ser classificados conforme a dimensão das partículas, a massa específica, a origem e quanto às características petrográficas. Quanto à origem podem ser classificados como naturais, encontrados na natureza, ou artificiais, provenientes do britamento de rochas¹.

Com relação ao tamanho dos agregados estes podem ser divididos em miúdos ou graúdos. Os agregados miúdos são os agregados passantes na peneira de abertura 4,8 mm (peneira nº. 4) e os agregados graúdos são os retidos na peneira de abertura 4,8 mm⁵⁶.

Quanto à massa específica podem ser divididos em leves, normais e pesados. Os mais utilizados são os de massa específica normal (2000 a 3000 kg/m³), os concretos produzidos com estes agregados terão massa específica semelhante para um mesmo fator a/c. Os agregados leves (massa específica menor do que 2000 kg/m³) são utilizados para confecção de concreto leve,

para diminuir o peso próprio das estruturas. Ele tem a desvantagem de produzir um concreto de menor resistência.

A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto²⁹. Desta forma, as características mais importantes de um agregado são: a sua massa específica, textura, granulometria e resistência à abrasão.

A massa específica do agregado influi diretamente na massa específica final do concreto¹. A porosidade e a absorção dos agregados influenciam na aderência entre a pasta de cimento hidratada e o agregado, assim como na resistência à abrasão do concreto²⁹.

Os agregados naturais são, geralmente, mais densos e resistentes que o concreto endurecido, desta maneira não são um fator limitante para a resistência final do concreto¹.

Composição granulométrica é a quantificação das partículas de agregado em frações, cada fração contém partículas entre limites definidos que são as aberturas das peneiras padronizadas¹. É comum representar a composição granulométrica graficamente, desta forma fica mais simples verificar se uma amostra se enquadra em determinada especificação, se é muito grossa ou muito fina, ou se é deficiente em determinado tamanho.

A distribuição granulométrica tem efeito sobre a demanda de água no concreto, assim, influência todas as propriedades relacionadas à quantidade de água (trabalhabilidade, densidade, segregação e acabamento). Em geral, é a área superficial do agregado que determina a quantidade de água necessária para molhar e lubrificar a mistura²⁹.

Para minimizar a quantidade de pasta de cimento é necessário usar agregados com granulometria tal que diminua o volume de vazios do concreto. O volume da pasta será mínimo sempre que houver boa quantidade de agregado graúdo, mas com os espaços entre os grãos preenchidos por grãos menores. Uma boa distribuição granulométrica proporciona maior trabalhabilidade à pasta⁵⁷.

Algumas propriedades dos agregados são importantes na determinação de propriedades do concreto no estado fresco. A forma das partículas do agregado miúdo tem influência sobre as propriedades da mistura, partículas mais angulosas exigem mais água para atingir uma mesma trabalhabilidade¹.

O módulo de elasticidade do agregado influencia diretamente as propriedades elásticas do concreto. Segundo NEVILLE (1997)¹ o módulo de elasticidade do concreto é tanto maior quanto maior o módulo de elasticidade do agregado, e o módulo de elasticidade do agregado influencia também a grandeza da fluência e da retração que podem ocorrer no concreto.

A aderência entre a pasta de cimento e os agregados é um fator importante na resistência mecânica do concreto¹. A qualidade da ligação entre a pasta de cimento e os agregados depende das características da superfície das partículas do agregado e da natureza da pasta de cimento hidratada na interface entre os dois materiais²⁹.

Segundo COUTINHO (1999)⁵⁸, a ligação entre o agregado e a pasta de cimento ocorre devido à rugosidade superficial do agregado, devido às propriedades químicas do cimento e do agregado e devido às propriedades eletrostáticas da superfície das partículas. Ainda, segundo COUTINHO (1999)⁵⁸, existem os seguintes tipos de ligação entre a pasta de cimento e os agregados:

- mecânica - ligação macroscópica, ocorre devido à rugosidade superficial do agregado na qual os cristais oriundos da hidratação do cimento envolvem as protuberâncias;
- absorção - o agregado absorve água contendo parte do cimento dissolvido, o qual, se cristaliza dentro do agregado ao mesmo tempo em que o da pasta, ligando-os;
- atração - entre a pasta de cimento e os agregados por forças de Van der Waals;

- aderência - de origem química devida à reação entre os produtos de hidratação do cimento e a superfície do agregado.

A presença de microfissuras é responsável pela baixa resistência na zona de transição, elas tendem a surgir em regiões de grandes vazios capilares com cristais orientados de hidróxido de cálcio⁵⁹.

Materiais pulverulentos na superfície do agregado também podem induzir a uma fraca aderência entre a pasta de cimento e o agregado.

O concreto é constituído originalmente por três materiais: cimento, agregado e água. Para melhorar algumas propriedades do concreto são adicionados à mistura produtos químicos em quantidades pequenas. Esses produtos químicos são chamados de aditivos químicos ou simplesmente aditivos¹.

Os aditivos são substâncias que, adicionadas intencionalmente ao concreto, têm a capacidade de melhorar certas características do concreto no estado fresco ou no estado endurecido²⁹.

Os superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis, formados por longas moléculas de elevada massa molecular. Eles apresentam baixo teor de impurezas de maneira a não provocar efeitos colaterais prejudiciais no concreto¹.

O superplastificante age nas moléculas de cimento, suas longas moléculas envolvem as partículas de cimento, conferindo-lhes uma carga negativa de maneira que elas passam a se repelir¹. Este aditivo age reduzindo a quantidade de água necessária para atingir determinada trabalhabilidade (diminui fator a/c) ou aumentando a trabalhabilidade do concreto (mantendo a proporção original do concreto)¹.

O efeito dispersante do superplastificante provoca uma melhor distribuição das partículas de cimento e, portanto, uma melhor hidratação do mesmo. Em alguns casos o superplastificante pode aumentar a resistência inicial do concreto¹.

2.3.1. Mecanismos de deterioração do concreto

Durabilidade é a capacidade de o concreto resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro tipo de deterioração. ISAIA (2000)⁶⁰ define durabilidade como a capacidade de uma estrutura apresentar o desempenho requerido durante o período de serviço pretendido, sob a influência dos fatores de degradação incidentes.

Por uma variedade de fatores, incluindo parâmetros de projeto e de construção, seleção e qualidade dos materiais, mudanças operacionais, bem como interação com o meio ambiente, as estruturas se danificam³.

O fato de um material ser considerado durável não significa que possui vida indefinida, nem significa suportar qualquer tipo de ação¹. Em muitos casos é necessária uma manutenção de rotina no concreto. As superfícies de canais e tubulações de concreto ficam comprometidas devido à água em movimento^{2,3}.

Segundo MEHTA E GERWICK (1982)ⁱ, *apud* MEHTA e MONTEIRO (1994)²⁹, são duas as causas para deterioração física do concreto: desgaste superficial e fissuração, tal como verificado na Figura 6

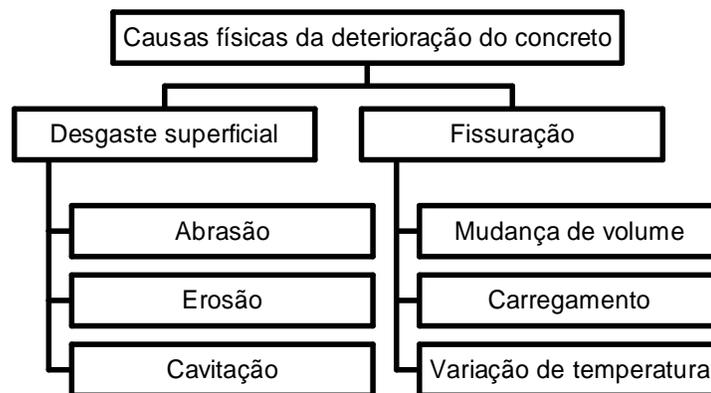


FIGURA 6: CAUSAS FÍSICAS DA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO. DESGASTE SUPERFICIAL²⁹.

ⁱ P. K. MEHTA, B. C. GERWICK JR. Concr. Int., vol. 4, nº 10, p. 45-51, 1982.

O desgaste superficial é a perda progressiva de massa de uma superfície de concreto. Ela pode estar relacionada à abrasão, à erosão e à cavitação. Tanto a abrasão quanto a erosão estão relacionadas ao atrito de sólidos com a superfície de concreto, a diferença entre elas é o meio em que ocorrem. A abrasão ocorre por atrito seco, enquanto a erosão ocorre pela ação abrasiva de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão²⁹. No presente trabalho o termo abrasão abrangerá as ações de desgaste por atrito, tanto abrasão quanto erosão.

Em estruturas hidráulicas de concreto, a abrasão é causada pelo impacto de elementos transportados pela água que entram em choque com a superfície de concreto. Este impacto causa atrito, esfolamento e ranhuras na superfície, causando fissuras e agravando prováveis microfissuras existentes na pasta de cimento¹⁷. Quanto mais turbulentos forem os fluxos, juntamente com as forças de impacto ocasionadas pelos detritos, mais abrangentes serão os danos causados pela abrasão³.

As coberturas de vertedores e túneis hidráulicos são estruturas bastante susceptíveis à abrasão, uma vez que grandes quantidades de fluxo d'água sob alta velocidade passam pelas mesmas³.

Em bacias de dissipação a abrasão pode ocorrer devido a desvios de fluxos ocasionados por estruturas como blocos dissipadores de energia. O desvio ocasiona redemoinhos e descargas não simétricas, que juntamente com os escombros levados pela água, aumentam a deterioração por abrasão³.

A pasta de cimento endurecida não possui alta resistência à abrasão. Em obras sujeitas a ciclos repetidos de abrasão, a vida útil da estrutura de concreto pode ser comprometida caso a pasta de cimento possua alta porosidade ou baixa resistência e não seja protegida por um agregado resistente à abrasão²⁹.

A taxa de deterioração da superfície de concreto dependerá da porosidade deste, e da quantidade, tamanho, forma, massa específica, dureza e velocidade das partículas em movimento^{2, 29}.

Resistência à abrasão é definida como a capacidade do concreto em resistir aos desgastes sob efeitos da fricção e atrito. É influenciada pela quantidade de água e qualidade dos agregados, resistência à compressão dos materiais, tipo e proporção das misturas, cura e tratamento superficial⁶¹.

Um concreto resistente à abrasão precisa usar a relação a/c mais baixa possível e a quantidade máxima de agregado graúdo de elevada dureza. Concretos de alta resistência, acima de 100 MPa (dosados com plastificante e sílica ativa), tendem a possuir maior resistência à abrasão. Concretos com alto teor de pasta de cimento tendem a ter pouca resistência à abrasão. A resistência à abrasão de concretos tratados sob vácuo, concretos poliméricos, concretos impregnados com polímeros é significativamente superior quando comparado ao concreto convencional⁶¹.

O desgaste por abrasão é causado por tensões localizadas de alta intensidade, desta maneira a dureza e a resistência do concreto na região superficial têm grande influência sobre a resistência à abrasão. Concretos com agregados maiores têm menor perda de massa do que argamassas com igual resistência¹.

A cavitação é responsável por uma deterioração rápida e severa em estruturas de concreto. A cavitação acontece quando bolhas de vapor se formam devido a quedas localizadas de pressão a valores abaixo da pressão de vapor. Na correnteza, essas bolhas entram em regiões de alta pressão onde implodem e causam grande impacto. A água, escoando a alta velocidade, ocupa o vazio antes ocupado pela bolha, dando origem a altíssimos impactos sobre áreas pequenas¹⁷. A cavitação é produzida em regiões onde o fluxo de água se separa da superfície do concreto, ou seja, pela mudança brusca de direção, ou pela alta velocidade da água em escoamento^{2,3}.

O processo de cavitação tende a remover os agregados do concreto, por isso não se devem utilizar agregados maiores que 20 mm. A dureza do agregado não interfere na resistência à cavitação, mas é importante que exista boa aderência entre a pasta de cimento e os agregados¹.

Para o concreto apresentar bom desempenho aos efeitos de cavitação deve possuir as seguintes propriedades:

- resistência à tração;
- resistência ao impacto;
- resistência à fadiga; e
- resistência à fissuração³.

Por melhor que seja o concreto, não pode resistir aos efeitos da cavitação indefinidamente. O que pode ser feito é diminuir a cavitação com o uso de superfícies lisas, bem alinhadas e sem irregularidades, permitindo que a água flua sem se desprender da superfície de concreto¹.

Neste projeto de pesquisa será estudado o desgaste superficial das estruturas de concreto, especialmente, o causado por abrasão.

2.3.2. Reparos em obras de concreto

Serviços realizados numa estrutura sem a finalidade de aumentar ou reconstituir a sua capacidade de suporte são denominados trabalhos de recuperação ou reparo da estrutura. Para avaliar a necessidade de sua realização é preciso verificar se o concreto retém sua forma original e condição de serviço e, principalmente, se o meio ambiente circundante está afetando de maneira progressiva a qualidade original da estrutura⁶².

Reparos em obras hidráulicas de concreto, tanto aparentes quanto submersas, devem ser efetuados após a avaliação da real necessidade de intervenção no local, das características da degradação ou deterioração analisadas, durabilidade, desempenho nas idades iniciais e ao longo do tempo, facilidade de aplicação e obtenção e, custo-benefício da aplicação dos materiais selecionados⁶¹.

De acordo com a profundidade dos danos, os serviços de reparo podem ser classificados em rasos ou superficiais, semi-profundos e

profundos, sendo que os reparos rasos, são classificados em pequenas ou grandes áreasⁱⁱ (*apud* KORMANN, 2002³).

- § Reparos rasos são aqueles com profundidade inferior a 2 cm, sendo considerados de pequenas áreas os que forem executados em superfícies de até 15 cm²;
- § Reparos semi-profundos são aqueles cuja profundidade está dentre 2 e 5 cm, normalmente atingindo a armadura; e
- § Reparos profundos são aqueles que atingem profundidades superiores a 5 cm.

Os reparos podem ser realizados com argamassas ou com concreto. As argamassas são utilizadas em reparos superficiais de qualquer tamanho em área, mas apenas para pequenas profundidades. O concreto é utilizado para reparos profundos. Os reparos com utilização de concreto consistem na substituição do material defeituoso ou deteriorado por um outro de boa qualidade e que tenha a maior afinidade possível com o concreto baseⁱⁱ (*apud* KORMANN, 2002³).

Um concreto usado como material de reparo (MR) deve apresentar boa aderência, baixa permeabilidade e alta resistência à compressão à baixa idade; tudo isso dentro das adequadas condições de trabalhabilidade². Os MRs devem ser corretamente adequados às características do fenômeno de desgaste bem como às condições operacionais da estrutura³.

Para a escolha do método de aplicação e do tipo de reparo deve-se levar em conta os seguintes critérios:

ⁱⁱ ACI INTERNATIONAL. 1999 – **Concrete Repair Manual**. 1st ed. Farmington Hills, MI: 1999.

- § escolha do material de reparo que melhor recupere a integridade do projeto original, quanto aos critérios de resistência e durabilidade;
- § escolha da metodologia de aplicação que seja compatível com o local de recuperação; e
- § revisão das propriedades físicas dos materiais escolhidos e da compatibilidade com o método de aplicação dentro dos quesitos da recuperação⁶¹.

Na primeira metade do século XX os reparos consistiam simplesmente em substituir o concreto deteriorado por concreto, graute ou argamassa de cimento Portland. A partir de 1960 surgiu uma abundância de novos materiais e sistemas para reparos de concreto, com grande utilização e maiores dificuldades para a sua seleção e aplicação⁶³.

O concreto convencional, provavelmente, é o material economicamente mais viável e compatível com os concretos aplicados nas estruturas. No entanto, com a necessidade de reparar áreas com materiais que possuam características de desempenho melhores que as do concreto convencional, surge a necessidade da compatibilidade entre materiais³. A relação entre o material de reparo e o substrato existente é uma consideração importante para que o mesmo possa resistir a todas as tensões induzidas por influências tais como a mudança de volume, e efeitos químicos e eletroquímicos⁴.

Para os MRs serem compatíveis com o concreto existente, devem manter algumas propriedades básicas como resistência à compressão axial, coeficiente de dilatação térmica e módulo de deformação e, também, outras relacionadas ao tempo de aplicação e condições ambientais³.

Caso o MR não possua um coeficiente de dilatação térmica similar ao do substrato, existe a possibilidade de um deformar mais que o outro, ocorrendo fadiga e posterior deslocamento entre os materiais. A grande retração do MR possibilita a ocorrência de microfissuras, prejudiciais ao desempenho do MR³.

O módulo de elasticidade é uma das mais importantes propriedades dos MRs. Por isso a sua compatibilidade tem importância no êxito do reparo. Módulos muito distintos podem provocar tensões entre o MR e o substrato de concreto levando o sistema à ruína⁶⁴.

A falha mais provável do material de reparo é devida a incompatibilidade entre o reparo e o concreto do substrato⁴. Diferentes tipos de reparos devem ser considerados para diferentes aplicações⁶³.

Segundo ABU TAIR *et al.* (2000)ⁱⁱⁱ, *apud* MORENO JR (2002)⁶⁵, para assegurar a interação estrutural completa entre o material de reparo e o substrato de concreto, é necessário existir uma boa aderência entre eles.

2.3.2.1. CAB como material de reparo

A qualidade do concreto tem aspecto ambíguo quanto à resistência à abrasão. Um concreto de alta resistência pode resistir por muito tempo a altas velocidades de fluxo, mas não ao impacto e ao lixamento ocasionado pelos sedimentos transportados pela água⁶¹, ou seja, alta resistência à compressão não é garantia de boa resistência à abrasão.

Concretos reforçados com fibras, contendo a mesma relação a/c e tipos de agregados, apresentam bom desempenho quando sujeitos a efeitos abrasivos. A incorporação de fibras no concreto aumenta sua resistência ao impacto, diminuindo o lascamento que pode ocorrer quando escombros são transportados pelo fluxo, e sob alta velocidade, chocam-se na superfície do concreto⁶¹.

Segundo TOPÇÚ (1996)⁷ a adição de borracha ao concreto transforma a ruptura do concreto de frágil para dúctil, o que confere ao concreto maior capacidade de deformar-se antes da ruptura. Esta mudança

ⁱⁱⁱ ABU-TAIR, A. I.; LAVERY, D.; NADJAY, A.; RIGDEN, S. R.; AHMED, T. M. A.; A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening. **Construction and Building Materials**, vol. 14, pp 171-176, 2000.

aumenta a capacidade do concreto de resistir ao surgimento de fissuras, esta propriedade é interessante aos MRs pois aumenta sua durabilidade.

As mudanças volumétricas nas argamassas e concretos de cimento Portland devido à retração constituem um dos maiores causadores de deterioração prematura das estruturas de concreto. Devido às restrições existentes e inevitáveis, estas mudanças provocam tensões de tração que podem ocasionar a fissuração do material. A existência de uma rede de micro-fissuras interconectadas constitui um caminho fácil para agentes agressivos⁶⁶. Como o CAB apresenta maior resistência ao surgimento de fissuras pode vir a ser um bom material de reparo.

RAGHAVAN e HUYNH (1998)¹⁰ estudaram a adição de fibras de borracha em argamassas, segundo sua pesquisa as fibras de borracha permitiram que os corpos-de-prova (CPs) recebessem um carregamento adicional após a ruptura, isso porque a matriz de cimento chega ao colapso mas as fibras de borracha continuam com capacidade de suportar esforços.

MARTINS (2005)³⁹ estudou o comportamento do CAB em relação ao impacto, verificou que o mesmo absorve mais energia antes de apresentar a primeira fissura. Caso a carga de impacto permaneça após o surgimento da fissura o concreto convencional rompe por completo, enquanto que o CAB apresenta um aumento na fissura de no máximo 0,5 mm.

A incorporação de borracha ao concreto aumenta a capacidade deste de absorver impacto^{8,67}. O concreto resistente ao impacto tem bom comportamento quando exposto à abrasão e à cavitação⁶¹, mecanismos estes comumente existentes em obras hidráulicas¹⁷.

MARQUES (2005)¹² estudou o comportamento do CAB quanto a abrasão e o comparou com um concreto referência de mesmo traço, verificou que o CAB com 10% de borracha possui a mesma resistência à abrasão que o concreto referência. O CAB pesquisado possuía resistência à compressão de 16 MPa enquanto o concreto referência 28 MPa, este fato pode indicar que o concreto com adição de borracha possui maior resistência à abrasão que o concreto convencional.

O concreto com adição de fibras de aço foi estudado por KORMANN (2002)³ como material de reparo classificando-o como de desempenho razoável quanto à resistência mecânica, durabilidade e permeabilidade. No entanto, as fibras de aço se oxidam danificando o material de reparo. As fibras de borracha podem gerar benefícios semelhantes aos das fibras de aço sem o inconveniente da oxidação¹⁰.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os materiais utilizados assim como a metodologia de confecção dos concretos e dos ensaios realizados no estudo.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A borracha utilizada na pesquisa foi coletada em uma fábrica de pneus remoldados situada na região metropolitana de Curitiba, o cimento foi doado por empresa local (sendo do tipo comercial) e o restante do material foi adquirido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

3.1.1. Cimento

Utilizou-se cimento CP II-Z 32, o qual foi caracterizado quimicamente segundo as normas apresentadas na Tabela 4. O cimento, comercialmente encontrado na região, foi fornecido em sacos de 50 kg. A função da caracterização química é verificar se o produto está em conformidade com o especificado pelo fabricante e identificar possíveis alterações que possam interferir nas propriedades do concreto.

TABELA 4: CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP II-Z 32.

Determinação	Título	Referência
Perda ao fogo	Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo – Método de ensaio	NBR 5743 (1989) ⁶⁸
Resíduo insolúvel	Cimento Portland – Determinação de resíduo insolúvel – Método de ensaio	NBR 5744 (1989) ⁶⁹
Teor de SO ₃	Cimento Portland – Determinação de anidrido sulfúrico – Método de ensaio	NBR 5745 (1989) ⁷⁰
Teor de Na ₂ O e K ₂ O	Cimento Portland – Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama – Método de ensaio	NBR 5747 (1989) ⁷¹
Teor de CaO livre	Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileglicol – Método de ensaio	NBR 7227(1989) ⁷²
Teores de Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO	Cimento Portland – Análise química por complexometria – Método de ensaio	NBR 9203 (1985) ⁷³
Análise química	Cimento Portland Pozolânico – Análise química – Método de ensaio	NBR 8347 (1992) ⁷⁴

O cimento foi, também, caracterizado fisicamente segundo o especificado na Tabela 5.

TABELA 5: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CP II-Z 32.

Determinação	Título	Referência
Resíduo nas # 200 e 325	Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 mm (n° 200)- Método de ensaio	NBR 11579 (1991) ⁷⁵
Tempo de pega	Cimento Portland – Determinação do tempo de pega – Método de ensaio	NBR 11581 (1991) ⁷⁶
Expansibilidade a quente	Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de L ^ê Chatelier – Método de ensaio	NBR 11582 (1991) ⁷⁷
Massa específica	Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica	NBR NM 23 (2001) ⁷⁸
Finura	Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)	NBR NM 76 (1998) ⁷⁹

3.1.2. Agregado miúdo – areia natural

Para confecção dos concretos foi utilizada areia natural média lavada. Os ensaios realizados para caracterização da areia natural estão descritos na Tabela 6. Estes ensaios tiveram o objetivo de qualificar os materiais, o teor de impurezas, possibilitar as correções de dosagem e o de comparação com o agregado de borracha, substituto de parte do agregado natural.

TABELA 6: CARACTERIZAÇÕES REALIZADAS NA AREIA NATURAL.

Determinação	Título	Referência
Granulometria	Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (2003) ⁸⁰
Teor de argila em torrões	Determinação do teor de argila em torrões no agregados – método de ensaio	NBR 7218 (1974) ⁸¹
Material pulverulento	Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – Método de ensaio	NBR 7219 (1987) ⁸²
Avaliação das impurezas orgânicas	Avaliação das impurezas orgânicas húmicas das areias para concreto – Método de ensaio	NBR 7220 (1976) ⁸³
Massa específica	Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman	NBR 9776 (1977) ⁸⁴
Absorção	Agregado miúdo – Determinação da absorção de água	NBR NM 30 (2001) ⁸⁵

3.1.3. Agregado graúdo – brita 1

Os concretos para estudo foram dosados com brita 1 de diâmetro máximo 19 mm. Os ensaios para caracterização dos agregados graúdos estão descritos na Tabela 7. Estes ensaios tiveram o objetivo de qualificar o material e possibilitar as correções de dosagem.

TABELA 7: CARACTERIZAÇÕES REALIZADAS NO AGREGADO GRAÚDO.

Determinação	Título	Referência
Análise granulométrica	Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (2003) ⁸⁰
Massa Específica absoluta	Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio	NBR 9937 (1987) ⁸⁶
Teor de argila em torrões	Determinação do teor de argila em torrões nos agregados – Método de ensaio	NBR 7219 (1987) ⁸¹
Material Pulverulento	Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218 (1974) ⁸¹

O agregado foi submetido ainda à análise petrográfica para determinação da estrutura e da rocha de origem.

3.1.4. Aditivo

Para propiciar melhor trabalhabilidade para o concreto com adição de borracha utilizou-se o aditivo polifuncional SIKAMENT PF 171. A caracterização do aditivo foi obtida com o fornecedor.

3.1.5. Resíduo de Borracha vulcanizada

Como substituto do agregado miúdo utilizou-se raspas de borracha vulcanizada proveniente da indústria de remoldagem de pneus. Os ensaios para caracterização da borracha estão descritos na Tabela 8. Estes ensaios tiveram o objetivo de qualificar o material e de comparação com o agregado mineral substituído.

TABELA 8: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA BORRACHA.

Determinação	Título	Referência
Granulometria	Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (2003) ⁸⁰
FTIR	Determinação da composição preponderante	-

A borracha utilizada não passou por nenhum tipo de tratamento antes da incorporação no concreto. Esta opção foi tomada com base no estudo de ZORDAN e JOHN (2004)⁸⁷, que propôs minimizar custos e simplificar os métodos para tornar economicamente viável a reciclagem. O peneiramento prévio e o tratamento superficial produziram novos resíduos (partículas de borracha e água de lavagem) e adicionaria duas novas etapas ao processo de produção do concreto. O elastômero utilizado não apresentava impurezas visíveis, como fios de náilon e aço, uma vez que estes materiais não estão presentes na banda de rolamento ou nos flancos do pneu.

A opção de não efetuar tratamento superficial na borracha também foi devido à falta de um consenso na bibliografia pesquisada. Segundo SEGRE (2001)⁵ o tratamento superficial melhora a aderência entre a pasta de cimento e a borracha, porém LI *et al.* (2004)⁸⁸ concluíram que o tratamento não interfere na resistência mecânica do concreto. Depois de estudar as propriedades de argamassas com adição de borracha tratada com hidróxido de sódio MARQUES (2005)¹² não indicou o tratamento para estudos com concreto. ALBUQUERQUE *et al.* (2006)³³ estudaram o tratamento superficial com aditivo vinílico, acrílico e estireno-butadieno concluindo que os tratamentos são eficazes.

A análise granulométrica da borracha foi realizada com 250 g do material, pois possui massa específica menor que a areia. O peneiramento de 1 kg do material seria inviável, pois o volume que esta quantia ocupa é maior que a capacidade das peneiras.

3.1.6. Água de amassamento

Como água de amassamento foi utilizada água potável disponível na rede de abastecimento do laboratório de materiais e engenharia da Universidade Federal do Paraná.

3.2. MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira teve o objetivo de verificar as proporções de borracha a serem adicionadas ao concreto, assim como verificar as propriedades do CAB; a segunda etapa teve o objetivo de estudar o comportamento, em relação à resistência à abrasão e à aderência, dos 3 melhores traços escolhidos na primeira fase do estudo.

3.2.1. Dosagens

O estudo do CAB foi dividido em duas etapas. A primeira realizada para verificar a quantidade máxima de borracha que poderia substituir a areia natural sem prejudicar em demasia a trabalhabilidade do concreto. Foram dosados 5 traços de concreto, um utilizado como concreto-referência (sem adição de borracha) e outros quatro com adição de elastômero nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em substituição a mesma proporção da massa de areia. As propriedades mecânicas dos concretos produzidos foram caracterizadas e os 3 melhores traços com adição de borracha foram escolhidos para realização dos estudos da segunda etapa.

Na segunda fase foram dosados os traços CR, CAB 5, CAB 10 e CAB 15 utilizados na produção dos CPs para os ensaios de resistência ao arrancamento e resistência à abrasão pelo método submerso. Foram produzidos, também, CPs para caracterização física dos traços de concreto e para determinar a resistência à compressão aos 28 dias.

A relação *a/c* (água/cimento) foi mantida constante para todas as dosagens. A consistência dos concretos, expressa pela medida do abatimento de tronco de cone, foi deixada livre, de forma que pudesse ser um dos parâmetros variáveis a serem avaliados em função do teor de partículas de borracha. Os traços dos concretos produzidos na primeira etapa estão listados na Tabela 9.

TABELA 9: PROPORÇÃO DOS COMPONENTES DOS CONCRETOS ESTUDADOS NA PRIMEIRA FASE⁸⁹.

Traço	Insumos					
	Cimento	Areia	Borracha	Brita1	Água	Aditivo
CR	1	2,02	0	2,96	0,50	0
CAB 5	1	1,92	0,10	2,96	0,50	0
CAB 10	1	1,82	0,20	2,96	0,50	0
CAB 15	1	1,72	0,30	2,96	0,50	0,01
CAB 20	1	1,62	0,40	2,96	0,50	0,01

Para melhorar a trabalhabilidade do concreto foi utilizado aditivo polifuncional Sikament SP 171 na proporção de 1% em relação ao peso de cimento, neste teor, o aditivo em questão funciona como superplastificante. Na primeira etapa o aditivo foi utilizado apenas nos concretos contendo 15 e 20% de borracha. Na segunda etapa, o aditivo foi utilizado em todas as dosagens, inclusive no CR. Neste, foi adicionado apenas 0,5% de aditivo para manter a coesão da mistura. Os traços estudados na segunda etapa da pesquisa constam na Tabela 10.

TABELA 10: PROPORÇÃO DOS COMPONENTES DOS CONCRETOS ESTUDADOS NA SEGUNDA FASE

Traço	Insumos					
	Cimento	Areia	Borracha	Brita 1	Água	Aditivo
CR	1	2,02	0	2,96	0,50	0,005
CAB 5	1	1,92	0,10	2,96	0,50	0,01
CAB 10	1	1,82	0,20	2,96	0,50	0,01
CAB 15	1	1,72	0,30	2,96	0,50	0,01

Para a mistura dos componentes utilizou-se uma betoneira com capacidade nominal de 120 l e rotação do tambor de 28 rpm. Os insumos foram pesados em balança digital com precisão de 10 g, e, então colocados na betoneira. Primeiramente, foram adicionados os agregados graúdos, seguido dos miúdos e parte da água. A betoneira foi acionada por 30 s, a fim

de promover a mistura entre a areia e a brita. Em seguida foram adicionados o cimento e o restante da água. Para os traços contendo partículas de borracha esta foi adicionada juntamente com a areia.

O amassamento do concreto se deu em 3 etapas, num total de 8 minutos:

- 3 minutos para mistura inicial;
- 2 minutos para massa descansar; e
- 3 minutos para mistura final.

Ao término deste tempo o concreto foi retirado da betoneira e submetido a ensaios para verificação de suas propriedades no estado fresco. Na seqüência, procedeu-se a moldagem dos corpos-de-prova.

3.2.2. Propriedades do concreto no estado fresco

Ao término das misturas de concreto de cada dosagem executada, foram realizados ensaios para determinação das principais propriedades do concreto fresco.

As propriedades do concreto no estado plástico são muito importantes. Para produzir concretos endurecidos de boa qualidade é preciso garantir a qualidade do concreto no estado fresco. A principal propriedade considerada foi a consistência, visto que o aumento da incorporação de borracha foi baseado na trabalhabilidade do concreto resultante.

3.2.2.1. Trabalhabilidade – “Slump test”

Trabalhabilidade é o esforço necessário para manipular determinada quantidade de concreto fresco com uma mínima perda de homogeneidade¹. A trabalhabilidade depende dos métodos adotados para o transporte, lançamento e adensamento do concreto assim como de sua consistência. A consistência é um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade

do concreto²⁵. O termo consistência está relacionado às características inerentes ao próprio concreto, com a mobilidade da massa e com a coesão entre seus componentes²⁹.

A consistência do concreto foi medida nas duas fases de dosagens. Sendo que na primeira fase a quantidade máxima de borracha incorporada ao concreto foi determinada pela consistência da mistura.

O método utilizado para medir a consistência da mistura foi o de abatimento de tronco de cone “slump test” realizado segundo a NBR NM 67 (1998)⁹⁰. Na Figura 7 está demonstrada a metodologia utilizada para a determinação da consistência dos concretos estudados.



Preenchimento do cone Suspensão lenta do cone Medida de abatimento

FIGURA 7: PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE.

Medir o abatimento de materiais de reparo é fundamental⁶², pois a escolha correta do material de reparo (MR) leva em consideração a sua consistência.

3.2.2.2. Massa unitária

Massa unitária é a quantidade de massa de concreto necessária para preencher a unidade de volume. A massa unitária, ou massa específica do concreto no estado fresco, foi determinada logo após a dosagem, preenchendo completamente um recipiente de volume conhecido com

concreto e pesando o conjunto. O procedimento para determinação da massa unitária do concreto no estado fresco pode ser visualizada na Figura 8.



Adensamento do concreto



Determinação da massa de concreto

FIGURA 8: PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA DO CONCRETO.

3.2.2.3. Teor de ar

O ar aprisionado foi medido por pressurização apenas na segunda fase da pesquisa. O concreto fresco foi moldado em um recipiente e, posteriormente foi aplicada pressão com ar comprimido, o ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR NM 47⁹¹. Dos resultados determinados pela calibração do equipamento com água foi determinado o teor de ar aprisionado no concreto. O equipamento usado para determinação do ar aprisionado está mostrado na Figura 9.



FIGURA 9: EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO AR APRISIONADO POR PRESSURIZAÇÃO DO SISTEMA.

3.2.3. Moldagem dos CPs

Na primeira fase foram moldados corpos-de-prova segundo a NBR 5738 (1994)⁹², para realização dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Na Figura 10 está mostrada a confecção dos CPs.

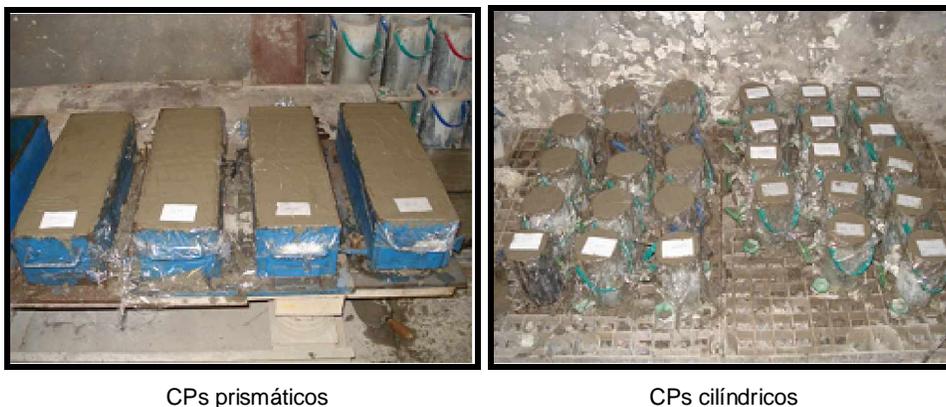


FIGURA 10: MOLDAGEM DOS CPs.

Terminado o adensamento do concreto nas formas, foi realizado o acabamento superficial e, em seguida, as superfícies dos CPs foram protegidas com filme plástico para evitar a evaporação da água.

A desforma foi realizada no dia seguinte à dosagem, em seguida, os CPs foram colocados na câmara úmida onde foram mantidos até a data de ensaio. Os CPs cilíndricos utilizados para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram capeados, antes dos ensaios, com uma mistura de enxofre e quartzo para proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços nas suas superfícies.

Na segunda etapa foram produzidos 6 CPs cilíndricos, segundo a ABNT NBR 5738 (1994)⁹², para caracterização da resistência à compressão aos 28 dias e das propriedades físicas do concreto (índice de vazios, absorção e massa específica). Os CPs utilizados na segunda etapa foram desmoldados após 5 dias de cura ambiente. O objetivo principal da segunda etapa foi a confecção dos CPs para ensaio de resistência à abrasão e ao arrancamento.

3.2.3.1. CP para ensaio de abrasão e resistência de aderência à tração

Para caracterização da resistência à abrasão pelo método submerso e resistência de aderência foram utilizados CPs cilíndricos de (300 x 100) mm. Eles foram moldados apenas na segunda fase da pesquisa.

Os moldes foram preenchidos por completo usando-se CR. O adensamento do concreto foi realizado por vibração de imersão como pode ser verificado na Figura 11.



FIGURA 11: PREENCHIMENTO DAS FORMAS DE DIMENSÃO (100 X 300) MM

Após o acabamento superficial e antes do fim de pega foram feitas 3 cavidades cilíndricas nos CPs, com dimensão média de (50 x 50) mm de profundidade, para posterior preenchimento com concreto incorporado de borracha. A confecção das cavidades nos CPs podem ser visualizadas na Figura 12.



FIGURA 12: CONFECÇÃO DAS CAVIDADES A SEREM PREENCHIDAS COM CAB

A aplicação do concreto, com adição de borracha nas cavidades, foi realizada quando o substrato de CR tinha a idade de 20 dias. Para aplicação

do CAB não foi utilizado nenhum tipo de material adesivo na região vazia, como pode ser visto na Figura 13.



FIGURA 13: CPS CILÍNDRICOS COM CAVIDADES PARA PREENCHIMENTO COM CAB

Antes da aplicação do MR, as superfícies das cavidades foram limpas com água e escova de aço para eliminar impurezas superficiais como escombros ou poeira⁶¹.

No momento da aplicação do reparo com o concreto de borracha o substrato apresentava-se saturado com superfície seca³. O reparo não pode ser aplicado numa amostra seca, pois a água do concreto tende a migrar para o substrato resultando em uma aderência fraca entre o concreto de reparo e o substrato. Para o caso de superfície úmida, o excesso de água aumenta o fator a/c na região de contato tornando o concreto de reparo mais poroso nesta região e comprometendo a durabilidade do reparo⁶⁶.

Os três vazios dos CPs de abrasão foram preenchidos cada um com um tipo de CAB, foram produzidos 3 CPs de abrasão, um apenas com concreto referência e outros dois com CAB 5, CAB 10 e CAB 15. No caso dos CPs de resistência ao arrancamento cada qual teve seus vazios preenchidos com apenas um tipo de concreto. Foram produzidos 4 CPs para este ensaio. O adensamento do CAB foi realizado com o auxílio de haste metálica e mesa vibratória. Na Figura 14 estão mostrados os CPs cilíndricos utilizados nos ensaios de abrasão e de resistência ao arrancamento.



FIGURA 14: CP CILÍNDRICO PRONTO PARA OS ENSAIOS DE ABRASÃO E DE ARRANCAMENTO

3.2.4. Propriedades do concreto no estado endurecido

As propriedades mecânicas do concreto, no estado endurecido, estudadas foram: a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Também, foram estudadas as propriedades físicas (índice de vazios, absorção e massa específica), a resistências à abrasão do concreto e de aderência entre o CAB e o CR.

3.2.4.1. Ensaio de resistência à compressão axial simples

A resistência à compressão é tomada como base para caracterizar a qualidade do concreto. Ela foi medida pelo ensaio de compressão axial simples, no qual, CPs cilíndricos foram carregados até a ruptura.

O procedimento utilizado para o ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo a ABNT NBR 5739 (1994)⁹³ nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias.

Para melhor caracterizar o CAB estudado quanto a resistência à abrasão e ao arrancamento, a resistência a compressão aos 28 dias também foi verificada na segunda fase de estudos.

3.2.4.2. Ensaio de resistência à tração

A resistência à tração pode ser medida por 3 diferentes ensaios normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão. Para caracterizar a resistência à tração do concreto, é comum utilizar apenas os ensaios de compressão diametral e de flexão, uma vez que estes são de fácil execução e pouco sensíveis ao método de ensaio. Nesta pesquisa foram utilizados os ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão.

Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral é o mais utilizado. Para sua realização, um CP cilíndrico foi colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa com o auxílio de duas hastes de madeira, sendo aplicada uma força até sua ruptura por tração indireta.

O ensaio de resistência à tração por compressão foi realizado segundo a ABNT NBR 7222 (1994)⁹⁴. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado no 28º dia de idade em CPs cilíndricos na máquina Emic DL30000N. Partes deste procedimento estão ilustrados na Figura 15.



FIGURA 15: FOTOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo a ABNT NBR 12142 (1992)⁹⁵, quando os CPs tinham a idade de 28 dias. Um

CP de seção prismática apoiado em duas seções é submetido à flexão, com carregamento em duas seções simétricas, até a ruptura na máquina Emic DL3000N. É possível visualizar tal procedimento de ensaio na Figura 16.



FIGURA 16: FOTOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

3.2.4.3. Módulo de deformação estático tangente inicial

O ensaio de determinação do módulo de deformação elástica foi realizado segundo a ABNT NBR 8522 (1984)⁹⁶, aos 28 dias.

3.2.4.4. Ensaio de resistência à abrasão pelo método submerso

Foram realizados ensaios de resistência à abrasão em 3 CPs, um apenas com CR e outros dois com reparos realizados com CAB. Os CPs com reparos foram ensaiados quando estes possuíam 21 e 28 dias de idade e o CP contendo apenas CR aos 60 dias de idade.

Não existe procedimento padronizado, no Brasil, para determinar a resistência à abrasão do concreto. O ensaio de abrasão seguiu os procedimentos da ASTM C 1138 (1997)⁹⁷. O equipamento utilizado para o ensaio de abrasão pelo método submerso consistiu essencialmente de um motor elétrico, uma pá de agitação e um recipiente cilíndrico de aço para

conter o CP a ser ensaiado. A carga abrasiva foi composta por esferas metálicas, o diâmetro, a quantidade e o peso dessas esferas constam na Tabela 11.

TABELA 11: CARGA ABRASIVA.

Diâmetro (mm)	Número de esferas	Peso total (g)
25,00	10	838,10
20,00	35	1157,90
12,50	25	193,80

As cavidades confeccionadas nos CPs de abrasão foram preenchidas cada uma com um traço diferente de CAB, ou seja, cada CP submetido ao ensaio de abrasão possuía em sua composição os 4 traços em estudo. O esquema de preenchimento dos CPs com MRs podem ser visualizados na Figura 17.

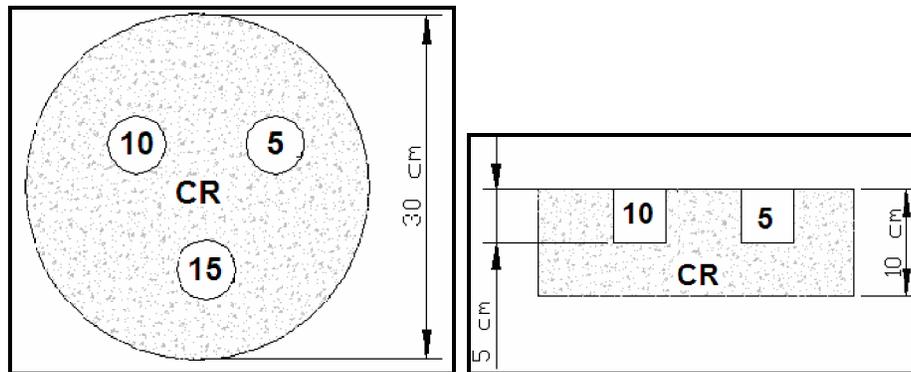


FIGURA 17: ESQUEMA DE PREENCHIMENTO DOS CPS DE ABRASÃO.

O equipamento para ensaio de resistência à abrasão pelo método submerso pode ser visualizado na Figura 18.

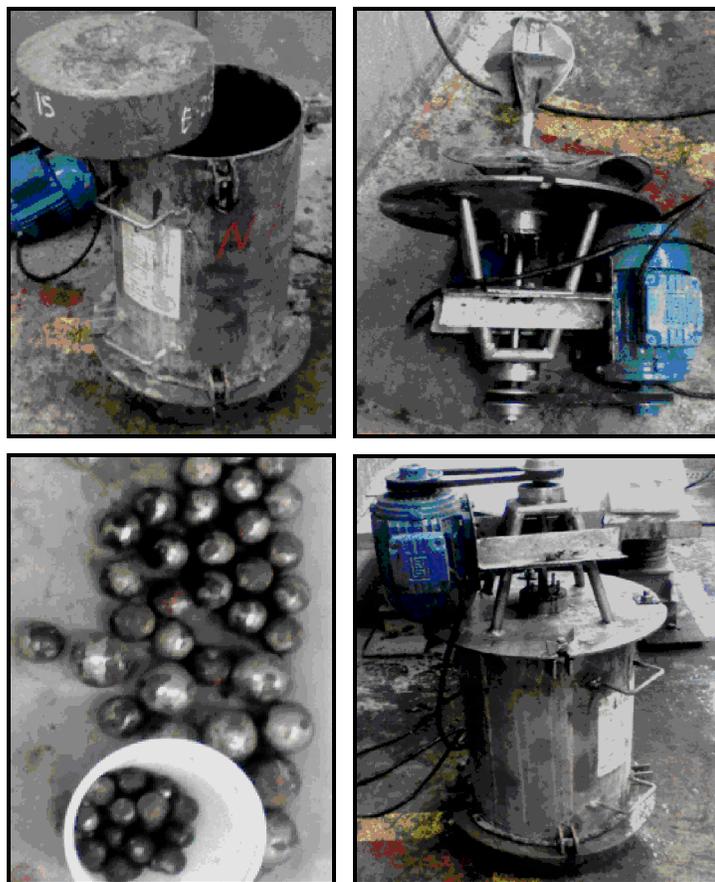


FIGURA 18: EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO PELO MÉTODO SUBMERSO.

Os CPs foram pesados antes do ensaio e após 72 h. O desgaste foi calculado pela perda de massa em termos do peso inicial. A Equação 1 foi utilizada para determinar a perda de massa.

$$D = \left(\frac{P_0 - P_1}{P_0} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

D: Desgaste em %; P_0 : massa do CP no início do ensaio; P_f : massa do CP no final do ensaio.

Para melhor caracterizar o desgaste superficial a profundidade das erosões causadas foram medidas após o ensaio de abrasão. As medidas foram realizadas com o auxílio um paquímetro de precisão e de uma placa de

acrílico com dimensão de (300 x 300 x 2) mm, esta placa possuía perfurações a cada centímetro como especificado na Figura 19.

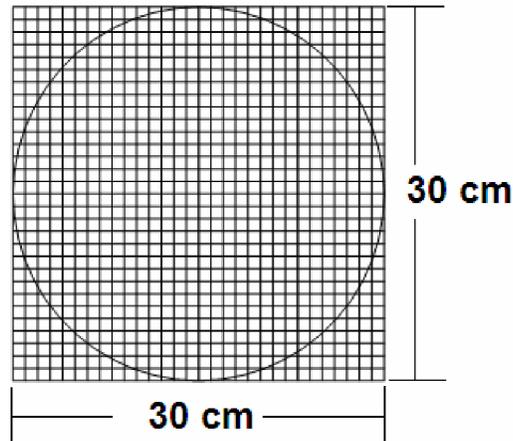


FIGURA 19: PONTOS PARA MEDIR PROFUNDIDADE DAS EROSÕES

3.2.4.5. Resistência de aderência entre CR/CAB

Para o ensaio de resistência de aderência foram utilizados CPs semelhantes aos do ensaio de abrasão produzidos na mesma ocasião. No entanto, o preenchimento das cavidades dos CPs usados para determinar a resistência à aderência foi diferente do preenchimento realizado para o ensaio de abrasão. Para este estudo cada CP possuía apenas 2 traços em análise, sendo que um era o CR e o outro um dos traços de CAB. O esquema de preenchimento pode ser visualizado na Figura 20.

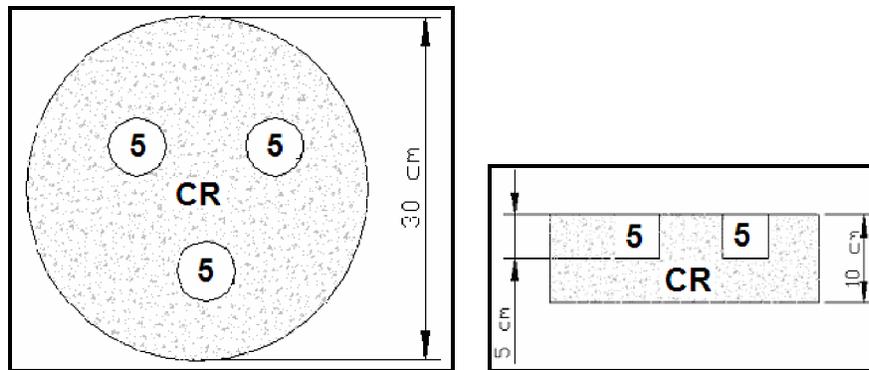


FIGURA 20: ESQUEMA DE PREENCHIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA DE ADERÊNCIA

O CAB foi aplicado ao substrato e submetido à cura. A metodologia utilizada para o ensaio de aderência baseou-se na ABNT NBR 13528 (1995)⁹⁸ e na dissertação de KORMANN (2002)³. Foram feitas adaptações na velocidade de carregamento, no tipo de placa colada na superfície do CP e na sua fixação na máquina de ensaio.

Na ocasião do ensaio foram coladas placas metálicas de 5 cm de diâmetro sobre o MR com o objetivo de acoplar o CP ao dispositivo de ensaio. O material utilizado para colar a placa sobre a superfície do CAB foi a resina epóxi com resistência estimada de 60 MPa aos 3 dias. A velocidade de ensaio utilizada foi de 1 mm/min. A colagem da placa sobre o MR pode ser visualizada na Figura 21.



FIGURA 21: COLAGEM DA PLACA METÁLICA SOBRE O MR PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.

O ensaio foi realizado numa máquina de tração convencional com adaptações no método de ensaio. Na Figura 22 está mostrada a realização do ensaio.



FIGURA 22: ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA.

3.2.4.6. Índice de vazios, massa específica e absorção de água

Na segunda fase da pesquisa foram moldados 3 CPs cilíndricos nas dimensões de (200 x 100) mm para determinação da absorção de água por imersão, da massa específica e do índice de vazios dos concretos endurecidos aos 28 dias, seguindo-se as recomendações da norma ABNT NBR 9778 (1987)⁹⁹.

3.2.4.7. Microscopia eletrônica de varredura

A superfície do concreto rompido por compressão diametral foi submetida ao estudo de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a dispersão das partículas de borracha no corpo de concreto e a aderência entre a pasta de cimento e o agregado de borracha.

Para garantir uma boa qualidade das imagens, as amostras foram metalizadas com um banho de ouro, realizada por evaporação catódica à vácuo em equipamento Baltec SCD 005.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentadas as caracterizações feitas nos materiais utilizados bem como os resultados dos ensaios apresentados na metodologia de trabalho.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são apresentados os resultados da caracterização das matérias-primas utilizadas na fabricação dos traços de concretos estudados.

4.1.1. Cimento Portland

A caracterização do cimento utilizado foi obtida por ensaios físico-químicos e seus resultados encontram-se na Tabela 12.

O teor de equivalente alcalino ultrapassou o limite recomendado pela ABNT NBR 11578 (1991)¹⁰⁰, o valor obtido, no entanto, não é o suficiente para possibilitar reações químicas expansivas álcali-silica, as quais poderiam provocar a deterioração do concreto. O restante dos resultados está dentro dos limites estabelecidos pela norma.

TABELA 12: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO CP-II Z 32.

Análises	Resultados	Limites normalizados NBR 11578/91¹⁰⁰
Ensaio Físicos		
Massa específica (g/cm ³)	2,97	-
Finura Blaine (cm ² /g)	3697	Mín 2600
Expansibilidade a quente (mm)	0,63	Max 5,00
Resíduo na peneira # 200 (%)	1,74	Max 12,00
Resíduo na peneira # 325 (%)	7,91	-
Início de pega (h:min)	2:52	Min 1:00
Fim de pega (h:min)	3:42	Max 10:00
Ensaio Químicos		
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	6,59	-
Dióxido de silício (SiO ₂)	21,93	-
Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	3,29	-
Óxido de cálcio (CaO)	54,26	-
Óxido de magnésio (MgO)	4,02	Max 6,50 (%)
Trióxido de enxofre (SO ₃)	3,00	Max 4,00 (%)
Perda ao fogo	5,13	Max 6,50
Resíduo insolúvel	13,44	Max 16,00
Óxido de cálcio livre	1,59	1,00 a 2,00
Equivalente alcalino (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	0,85	Max 0,60
Resistência à compressão (MPa)		
Idade	Resultado	Mínimo normalizado
3 dias	25,00	10,00
7 dias	31,30	20,00
28 dias	40,20	32,00

4.1.2. Agregado miúdo – areia natural

Os resultados obtidos pelos ensaios físicos realizados no agregado miúdo estão mostrados na Tabela 13.

TABELA 13: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO – AREIA NATURAL.

Análises	Resultados	Limites normalizados NBR 7211/2005 ⁵⁶
Absorção (%)	0,8	-
Massa específica seca (g/cm ³)	2,63	-
Módulo de finura	2,41	1,55 a 3,50
Dmáx (mm)	4,80	4,80
Teor de material pulverulento (%)	1,20	3,00
Teor de argila em torrões (%)	0,10	3,00

Os resultados da caracterização física da areia natural estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (2005)⁵⁶.

A amostra de areia natural utilizada apresenta curva granulométrica média dentro do recomendado pela ABNT NBR 7211 (2005)⁵⁶. A curva correspondente encontra-se na Figura 23, junto com as curvas representativas dos limites inferiores e superiores recomendados na respectiva norma.

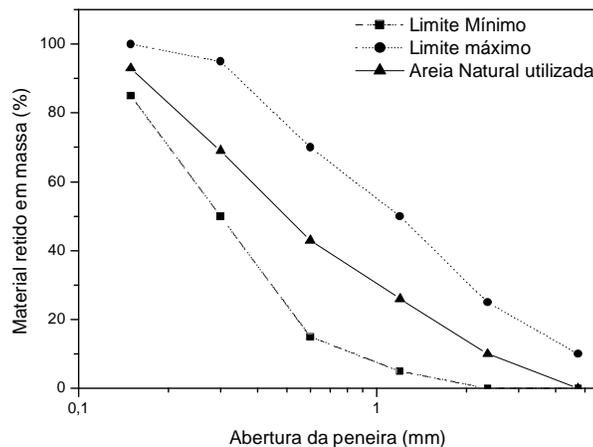


FIGURA 23: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO – AREIA NATURAL.

A granulometria da areia (agregado miúdo) está especificada na Tabela 14.

TABELA 14: GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO.

Peneira	Abertura (mm)	Material retido (%)	Material retido acumulado (%)
4	4,8	0	0
8	2,4	10	10
16	1,2	17	26
30	0,6	16	43
50	0,3	26	69
100	0,15	24	93
Fundo	-	7	100

4.1.3. Agregado graúdo – brita 19 mm

A análise física da brita 1 resultou nos valores expostos na Tabela 15.

TABELA 15: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 1.

Análises	Resultados	Limites normalizados NBR 7211/2005⁵⁶
Absorção (%)	0,70	-
Massa específica seca (g/cm ³)	2,62	-
Módulo de finura	6,37	-
D _{máx} (mm)	19,00	-
Teor de material pulverulento (%)	0,60	1,00
Teor de argila em torrões (%)	0,1	2,00

Os resultados da caracterização física da brita 1 estão dentro dos limites da NBR 7211 (2005)⁵⁶. A distribuição granulométrica média da brita 1 está representada na Figura 24.

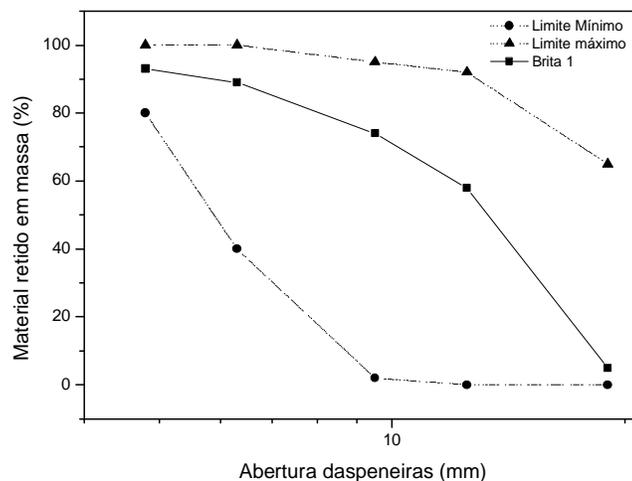


FIGURA 24: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 1.

A granulometria da brita 1 está especificada na Tabela 16.

TABELA 16: GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO.

Peneira	Abertura (mm)	Material retido (%)	Material retido acumulado (%)
¾"	19	5	5
½"	12,5	53	58
3/8"	9,5	16	74
¼"	6,3	15	89
4	4,8	4	93
Fundo	-	7	100

Segundo a análise petrográfica a brita utilizada é um riolito originado de rocha ígnea constituída por uma matriz de quartzo-feldspato de granulação fina com fenocristais (minerais de maior tamanho em relação a matriz) de feldspato potássico e quartzo. A textura é fanerítica inequigranular porfírica e estrutura maciça.

4.1.4. Aditivo Superplastificante

As características do aditivo polifuncional SIKAMENT PF 171 constam na TABELA 17. Esses valores foram fornecidos pelo fabricante.

TABELA 17: PROPRIEDADES DO ADITIVO UTILIZADO (SIKAMENT PF – 171).

Propriedades	Resultado
Ação Principal	Plastificante ou superplastificante de pega normal
Ação secundária	Redutor de água
Composição básica	Sais sulfonados em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho escuro
Densidade a 25 °C	1,2 – 1,26 kg/l
pH	6 – 8

4.1.5. Resíduo de borracha Vulcanizada

A composição da borracha de pneus depende do fabricante e do tipo de pneu, podendo ser composto de SBR, borracha natural, polibutadieno ou uma mistura destes. A composição preponderante do resíduo de pneu utilizado foi caracterizada como borracha de estireno butadieno por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). O espectro de FTIR pode ser visualizado na Figura 25.

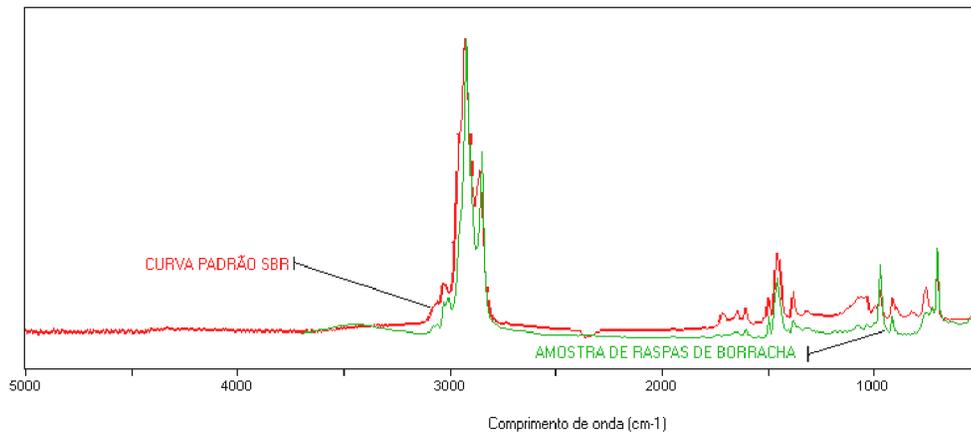


FIGURA 25: ESPECTRO FTIR DA BORRACHA UTILIZADA NA PESQUISA.

A curva granulométrica da borracha utilizada está representada na FIGURA 26.

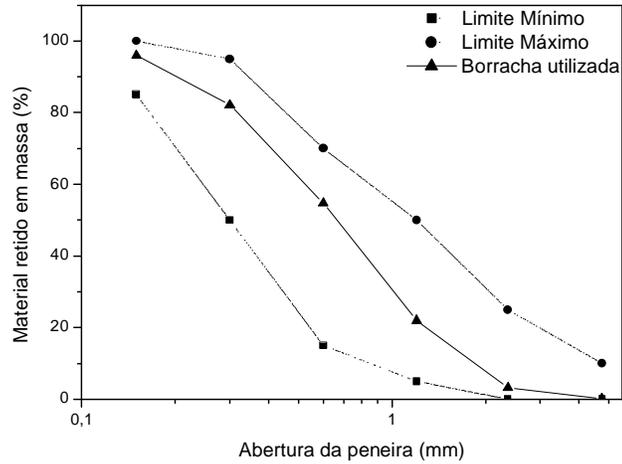


Figura 26: Curva granulométrica da borracha.

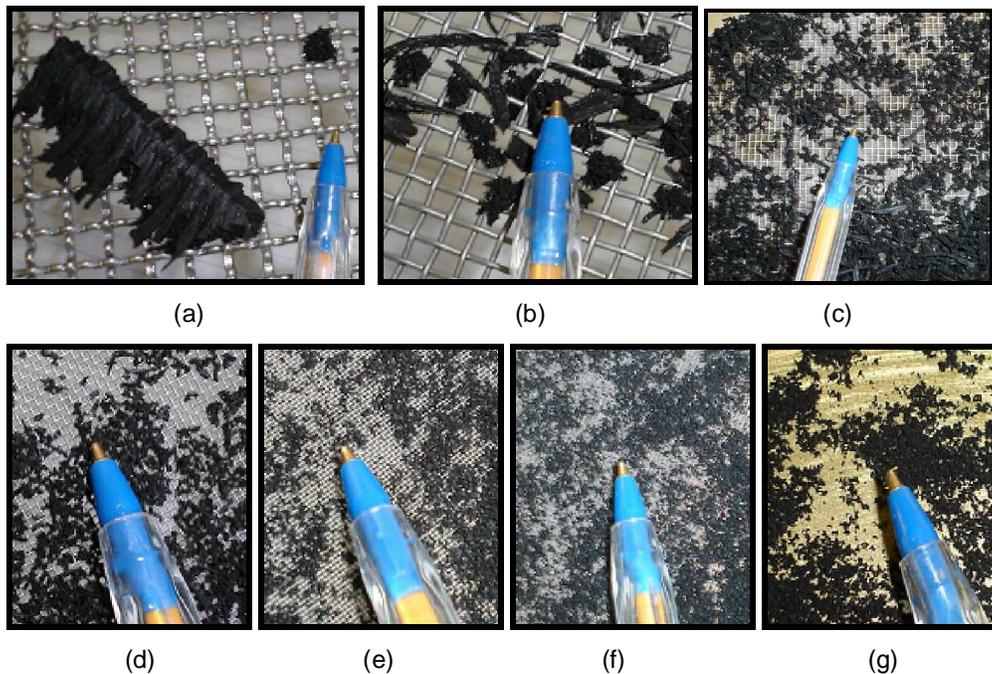
A curva apresentada pela borracha é semelhante à da areia natural. Observando sua granulometria, a borracha utilizada pode ser classificada como agregado miúdo, pois sua curva granulométrica está entre os limites impostos pela ABNT NBR 7211 (2005)⁵⁶. A granulometria da borracha está especificada na Tabela 18.

TABELA 18: GRANULOMETRIA DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU.

Peneira	Abertura	Material retido (%)	Material retido acumulado (%)
4	4,8	0,17	0,17
8	2,4	2,98	3,14
16	1,2	18,84	21,98
30	0,6	32,73	54,71
50	0,3	27,44	82,15
100	0,15	13,88	96,03
Fundo	-	3,97	100,00

O farelo de borracha coletado para o estudo era constituído por diversos tipos de partículas com diferentes formatos e tamanhos. A borracha

retida na peneira de abertura 4,8 mm tem forma variando desde pequenos grânulos até grandes pedaços. Na peneira de abertura 2,4 mm ficou retida a borracha em forma de grãos e, também, na forma de longas fibras. As fibras de borracha prevaleceram na peneira de abertura 1,2 mm, já nas peneiras inferiores foram retidos apenas grãos de borracha com o diâmetro próximo ao da abertura da respectiva peneira. Na FIGURA 27 está mostrado o formato dos resíduos de borracha utilizados na pesquisa.



Legenda: (a) *borracha retida na peneira 4,8 mm*; (b) *borracha retida na peneira 2,4 mm*; (c) *borracha retida na peneira 1,2 mm*; (d) *borracha retida na peneira 0,6 mm*; (e) *borracha retida na peneira 0,3 mm*; (f) *borracha retida na peneira 0,15 mm*; (g) *borracha passante na peneira 0,15 mm*.

Figura 27: Fotos da borracha retida nas diferentes peneiras.

Os resíduos retidos nas peneiras limites não foram descartados para incorporação da borracha no concreto, essa decisão foi tomada justamente para evitar a produção de novos resíduos e eliminar a etapa de peneiramento do processo de produção do CAB.

As fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras. Após a ruptura da matriz de concreto as fibras passam por um processo de arrancamento que demanda uma quantidade extra de energia

para deformação e ruptura do compósito, proporcionando uma maior tenacidade¹⁰¹.

4.1.6. Água de amassamento

As propriedades da água de amassamento constam na Tabela 19. Esses valores foram fornecidos pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná (SANEPAR).

TABELA 19: PROPRIEDADES DA ÁGUA DE AMASSAMENTO.

Propriedades	Unidade	Resultados
Cor aparente	-	2,58
Fluoretos	mg/l	0,70
Turbidez	NTU	0,58
pH	-	6,80
Cloro residual	mg/l	1,40
Alumínio	mg/l	0,004l
Ferro total	mg/l	0,00
Manganês	mg/l	0,00

Segundo PETRUCCI (1998)¹⁰² a quantidade de água adicionada à mistura tem maior influência nas propriedades do concreto do que a qualidade da água em si.

4.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As propriedades consideradas no estado fresco do concreto foram trabalhabilidade, ar aprisionado e massa unitária. Os resultados obtidos para a primeira e para a segunda fase estão apresentados nas Tabela 20 e Tabela 21, respectivamente.

TABELA 20: PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – PRIMEIRA FASE⁸⁹.

Traço	Abatimento (mm)	Massa unitária (kg/m³)
CR	47	2352
CAB 5	37	2255
CAB 10	14	2222
CAB 15	15	2156
CAB 20	3	2157

TABELA 21: PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – SEGUNDA FASE.

Traço	Abatimento (mm)	Massa unitária (kg/m³)	Ar aprisionado (%)
CR	190	2307	5,16
CAB 5	120	2195	11,50
CAB 10	23	2216	13,90
CAB 15	10	2157	13,00

4.2.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto é afetada pelas propriedades dos agregados, as principais propriedades relacionadas com os agregados são as reológicas (propriedades relacionadas à forma e à granulometria das partículas de agregado) e o consumo de água necessária para atingir determinada trabalhabilidade (propriedade relacionada à forma, textura e absorção do agregado)⁵⁸.

Os resultados da trabalhabilidade medida na primeira fase da pesquisa estão apresentados na Tabela 20 e na Figura 28.

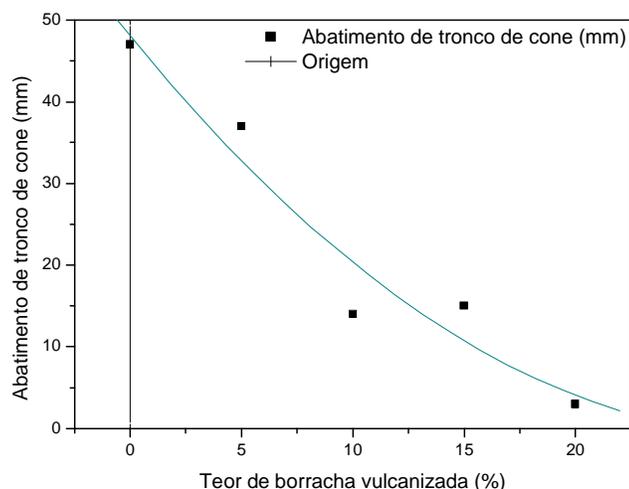


FIGURA 28: CONSISTÊNCIA DO CONCRETO - *SLUMP TEST* (PRIMEIRA FASE).

A trabalhabilidade do traço padrão atingiu o especificado para a dosagem, porém a incorporação do agregado de borracha diminuiu a trabalhabilidade do concreto. O CAB 5 apresentou boa trabalhabilidade já para o CAB 10 o abatimento obtido foi tão baixo que impossibilitou a dosagem dos concretos com adição de 15 e 20% de resíduo. Os traços CAB 5 e CAB 10 apresentaram a melhor coesão entre os 5 traços estudados. O CAB 15 e o CAB 20 resultaram numa baixa coesão, o que dificultou o adensamento do concreto nos moldes.

O CAB 20 apresentou dificuldade de adensamento mesmo com a utilização de vibrador de imersão, em virtude de sua elevada consistência. Neste caso houve necessidade de adensamento em mesa vibratória.

A perda de trabalhabilidade pode ser explicada pela maior área superficial apresentada pelo agregado de borracha em relação à areia substituída. Este comportamento pode ser explicado pela menor massa específica da borracha, o que implica em colocar um volume maior de material seco, portanto, uma área superficial maior para agregado de borracha em comparação com o agregado mineral, aumentando assim a área a ser molhada. Para manter a trabalhabilidade da mistura seria necessário aumentar a relação a/c.

Nos CAB 15 e CAB 20 foi utilizado aditivo polifuncional para ajustar a trabalhabilidade, desta maneira o CAB 15 apresentou um maior abatimento de tronco de cone do que o CAB 10.

O uso de aditivo polifuncional foi ampliado para todos os traços na segunda fase. A dosagem de aditivo para o concreto referência foi de 0,5% e para os concretos com adição de borracha foi de 1%, ambos em relação ao peso de cimento. A trabalhabilidade medida na segunda fase da pesquisa é apresentada na Tabela 22 e na Figura 29.

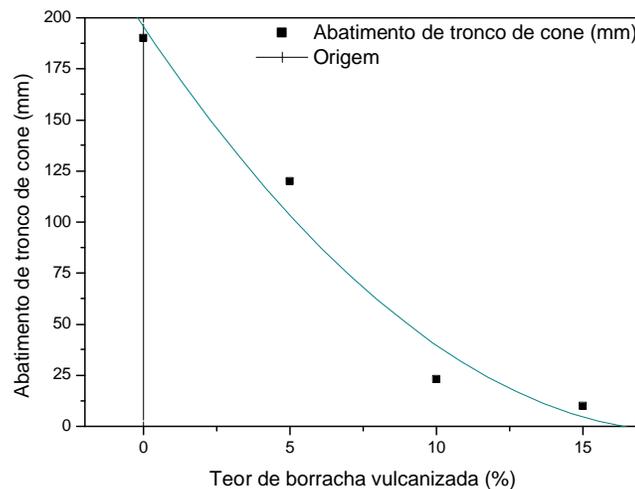


FIGURA 29: CONSISTÊNCIA DO CONCRETO – “SLUMP TEST” -SEGUNDA FASE.

O CR apresentou-se fluido e com tendência à segregação com a utilização do aditivo polifuncional. O CAB 5 apresentou boa trabalhabilidade e coesão, já o CAB 15 apresentou consistência seca e baixa coesão.

Estes dados corroboram com a perda de trabalhabilidade do concreto pela adição de borracha relatada na literatura^{38,40,53,103,104}. Na Figura 30 estão mostrados os ensaios de abatimento de tronco de cone realizados na segunda fase de estudos.

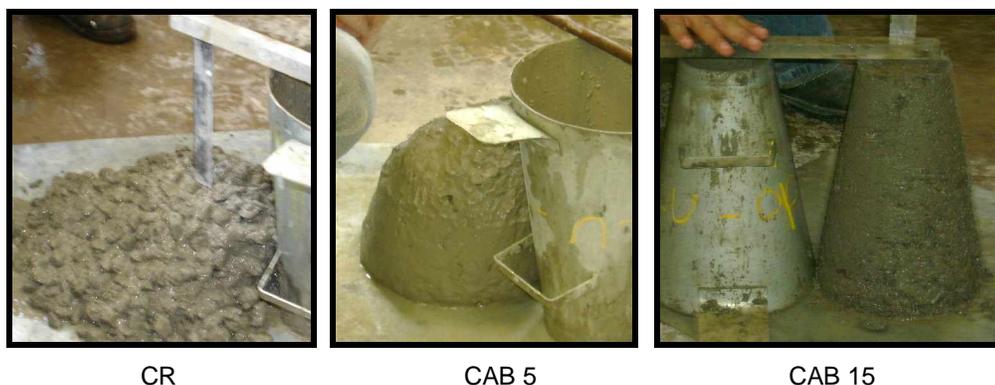


FIGURA 30: ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE – SEGUNDA FASE.

A forma e a textura das partículas de borracha podem ter afetado a trabalhabilidade da mistura, dado que parte da borracha utilizada tinha a forma de fibras, a qual diminui a trabalhabilidade do concreto por dificultar o empacotamento das partículas^{1,29}.

Ao estudar o comportamento do concreto com adição de borracha PAPAKONSTANTONOU e TOBOLSKI (2006)¹⁰⁵ verificaram a perda de trabalhabilidade deste devido à adição de fibras de borracha a mistura, quanto maior a quantidade de fibras menor foi a trabalhabilidade resultante.

A trabalhabilidade está relacionada a fatores internos e externos ao concreto fresco, sendo a consistência um fator importante, mas não preponderante: concretos de alta consistência podem ser considerados satisfatórios dependendo das condições de obra e adensamento desejados²⁹.

4.2.2. Massa unitária

A massa unitária é uma propriedade importante para a aplicabilidade do concreto, é afetada pela qualidade e composição dos agregados. Quanto mais pesado o agregado maior será a massa unitária do concreto. A incorporação de ar à mistura de concreto afeta a sua massa específica, quanto maior o teor de ar incorporado menor será a massa específica¹⁰⁶.

Os resultados da massa unitária da primeira fase estão na Tabela 20⁸⁹ e representados na Figura 31⁸⁹. Houve uma diminuição na massa unitária do concreto com a adição da borracha em substituição à areia.

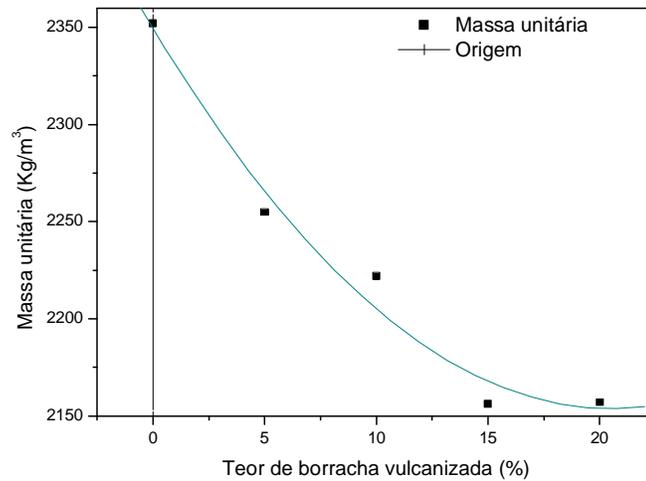


FIGURA 31: MASSA UNITÁRIA DO CONCRETO FRESCO – PRIMEIRA FASE⁸⁹.

A massa unitária do concreto fresco foi medida novamente na segunda fase da pesquisa. Os resultados estão na Tabela 21 e na Figura 32.

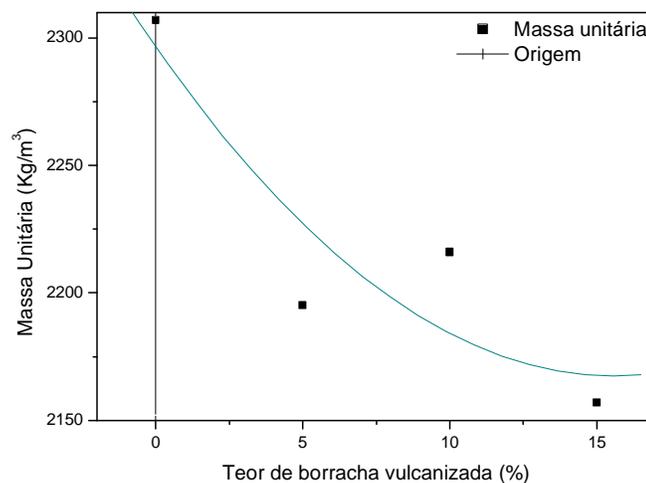


FIGURA 32: MASSA UNITÁRIA DO CONCRETO FRESCO – SEGUNDA FASE.

Em ambas as fases o CR apresentou a maior massa unitária, enquanto que, com a incorporação de borracha existiu uma tendência de diminuição da massa específica. Este fato é atribuído à menor densidade da borracha em relação à densidade da areia. O CAB 5 apresentou massa específica menor que o CAB 10, este fato pode estar relacionado a problemas na realização do ensaio para a determinação da massa unitária, sendo considerado como erro estatístico (< 3%).

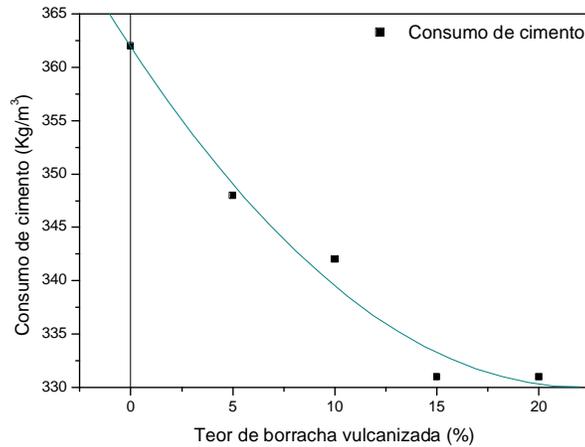
A dificuldade de adensamento do concreto também afeta a massa específica, pois concretos mal adensados possuem vazios internos que diminuem a massa específica¹⁰⁶. Como a trabalhabilidade do concreto diminui devido à adição das fibras de borracha é provável que o adensamento tenha perdido qualidade com a incorporação de borracha.

Em pesquisa sobre adição de borracha ao concreto TOPÇU (1995)⁶ relatou a diminuição da massa específica do concreto. PAPAKONSTANTINOU e TOBOLSKI (2006)¹⁰⁵ também verificaram que o CAB possui menor massa específica que o concreto convencional.

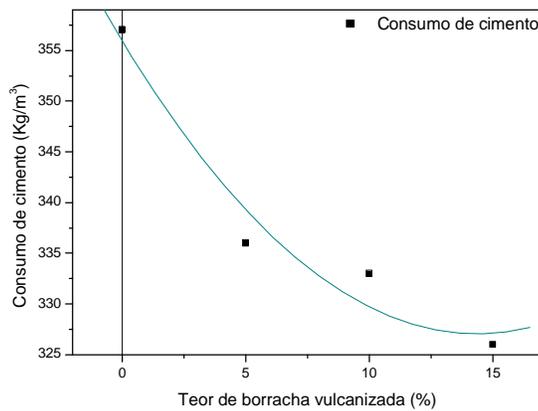
O consumo de cimento necessário para produção do concreto está relacionado com a massa específica dos componentes da mistura e com massa unitária do concreto fresco. Quanto menor a massa específica do concreto fresco menor será o consumo de cimento e, portanto, será mais econômico produzir determinada quantidade de concreto. A relação entre o consumo de cimento e o traço dosado consta na Figura 33⁸⁹.

O menor consumo de cimento torna o concreto mais barato, no entanto, quanto menor a quantidade de cimento menor será a resistência à compressão do concreto. LOPES *et al.* (2005)¹⁰⁷ sugeriram o aumento do consumo de cimento para manter a resistência mecânica do CAB.

O consumo dos agregados naturais, gráudo e miúdo, também diminui com a adição da borracha, pois o volume ocupado pelo resíduo de borracha é maior que o volume ocupado pela areia natural. Na Tabela 22, o consumo dos matérias para produção dos traços estudados é especificado.



(a)



(b)

FIGURA 33: CONSUMO DE CIMENTO PARA CONFECÇÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO ESTUDADOS: (A) NA PRIMEIRA FASE; E, (B) SEGUNDA FASE⁸⁹.

TABELA 22: CONSUMO DE MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DOS TRAÇOS ESTUDADOS – SEGUNDA FASE.

Traço	Insumo (Kg/m³)					
	Cimento	Areia	Brita	Água	Borracha	Aditivo
CR	357	722	1062	179	0	1,78
CAB 5	336	646	1002	169	34	3,36
CAB 10	333	607	993	167	67	3,33
CAB 15	326	521	972	164	98	3,26

4.2.3. Teor de ar

Ar aprisionado são os vazios de ar no interior do concreto, que não foram incorporados propositalmente e que são significativamente maiores (diâmetro > 1 mm) e menos úteis do que aqueles provenientes da incorporação de ar realizada por meio de aditivos incorporadores de ar¹⁰⁶.

Os vazios decorrentes do ar aprisionado podem gerar caminhos de percolação de água, prejudicando, dessa forma, a durabilidade do concreto^{1,29}. A metodologia utilizada para determinar o teor de ar no concreto não diferencia ar aprisionado e ar incorporado, o resultado obtido é a soma dos dois tipos. Os poros formados devido à incorporação de fibras de borracha na mistura de concreto puderam ser visualizados por microscopia eletrônica de varredura, mais detalhes constam no item 3.2.4.7..

O ar aprisionado no concreto foi medido na segunda fase da pesquisa pelo método pressiométrico. Os resultados estão na Tabela 21 e na Figura 34.

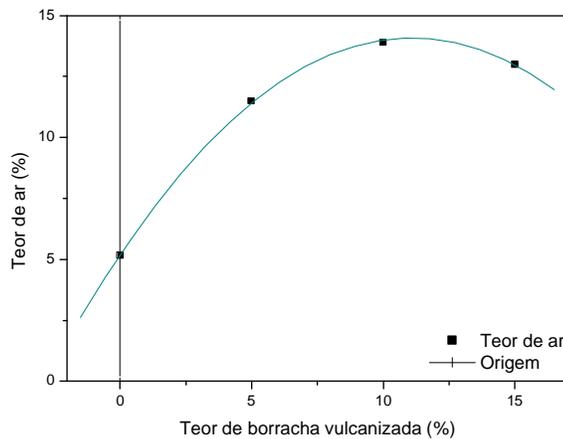


FIGURA 34: TEOR DE AR APRISIONADO AO CONCRETO

A incorporação de fibras de borracha ao concreto aumenta o teor de ar aprisionado à mistura. Para a adição de 5% de borracha o aumento no teor de ar incorporado foi de 122% em relação ao CR. LOPES *et al.* (2005)¹⁰⁷ verificaram o aumento de 227% do ar aprisionado devido à adição de 5% de borracha em substituição à areia, em massa.

A incorporação de borracha ao concreto aumenta a quantidade de ar incorporado à mistura. O aumento de ar no interior do concreto gera vazios que diminuem a capacidade de suporte e a massa específica do concreto resultante^{1,29}.

Caso exista ligação entre os vazios no interior do concreto a absorção de água pelo material será alta, o que permite a infiltração de agentes nocivos ao concreto.

4.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos traços de concretos estudados na primeira fase estão apresentadas na Tabela 23.

TABELA 23: PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO AOS 28 DIAS⁸⁹.

Traço de Concreto	Resistência à Compressão (MPa)	Sd (MPa)	Resistência à Tração (MPa)				Módulo de elasticidade (Gpa)	Sd (MPa)
			Por compressão diametral	sd	Na flexão	sd		
CR	34,6	0,72	2,85	0,12	4,05	0,35	34,28	1,70
CAB 5	27,1	0,85	2,55	0,28	3,25	0,21	28,59	3,51
CAB 10	20,30	0,57	2,25	0,07	2,80	0,00	25,27	1,56
CAB 15	19,20	0,28	2,30	0,14	2,80	0,00	23,28	1,02
CAB 20	15,60	0,35	2,10	0,00	2,90	0,00	19,46	1,07

4.3.1. Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial simples aos 3, 7, 28 e 90 dias podem ser visualizados na Tabela 24, na FIGURA 35 e na Figura 36.

Com a adição de partículas de borracha ao concreto a resistência à compressão tendeu a diminuir, este efeito pode ser verificado na. Trabalhos

encontrados na literatura citam a perda de resistência devido à adição de borracha^{6,10,12,30,31;36,38,40,41,42,53,88,105,108}.

TABELA 24: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES⁸⁹.

Idades de cura (dias)	Resistência à compressão axial simples dos concretos (MPa)									
	CR	sd	CAB 5	Sd	CAB 10	sd	CAB 15	sd	CAB 20	Sd
3	21,30	0,5	16,00	0,21	13,00	0,00	8,90	0	4,4	0,15
7	26,40	0,28	20,10	0,28	16,30	0,28	15,2	0,07	12,2	0,28
28	34,60	0,72	27,10	0,85	20,30	0,57	19,20	0,28	15,6	0,35
90	41,90	1,13	31,50	0,56	26,70	0,12	21,10	0,70	18,00	1,98

Para os CABs 5 e 10, o concreto perdeu 21,7% e 41,3%, respectivamente, da sua resistência à compressão inicial. Para as adições de 15% e 20% o concreto perdeu 45% e 48% da resistência à compressão em relação ao CR.

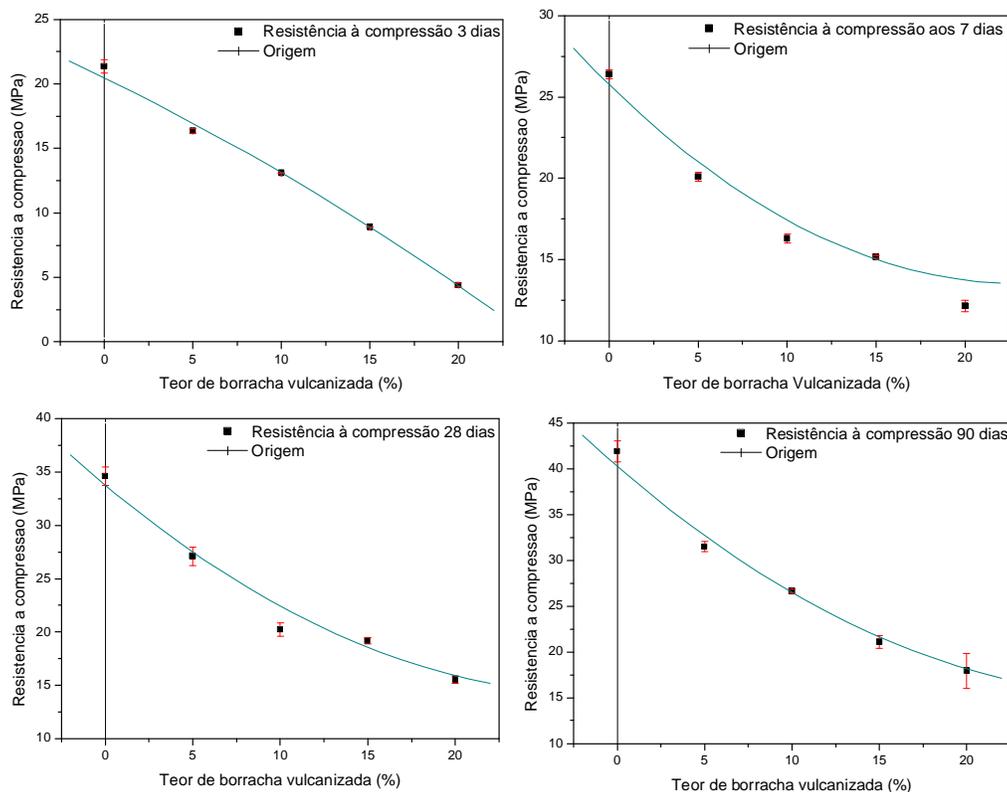


FIGURA 35: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES DO CONCRETO – PRIMEIRA FASE, DOS 3 AOS 90 DIAS.

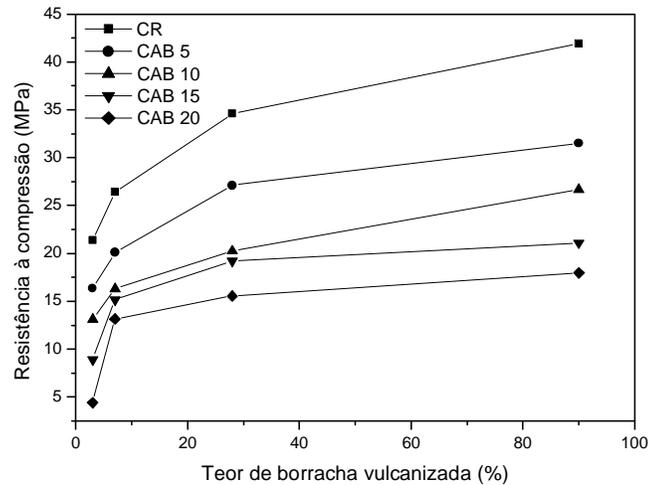


FIGURA 36: DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES EM RELAÇÃO À IDADE

Os CABs 15 e 20 apresentaram maior taxa de desenvolvimento da resistência à compressão dentre os traços para as primeiras idades. O desenvolvimento da resistência entre 7 e 28 dias foi semelhante para todos os concretos dosados. As perdas de resistência apresentadas pelos CAB 5 e CAB 10 permaneceram percentualmente constantes ao longo do tempo. Já os traços CAB 15 e CAB 20 apresentaram grandes perdas aos 3 dias, que posteriormente diminuíram e permaneceram constantes para idades mais avançadas. Segundo SAKAI *et al.* (2005)¹⁰⁹ o uso de aditivo superplastificante interfere na hidratação do cimento, esta interferência está relacionada à estrutura de coagulação das partículas de cimento. Para idades maiores do concreto a influência do superplastificante é mínima. NEVILLE (1997)¹ relatou que o uso de superplastificante pode melhorar a resistência mecânica do concreto.

Na segunda fase da pesquisa a resistência à compressão dos concretos estudados foi medida apenas aos 28 dias, os resultados podem ser visualizados na Tabela 25 e na Figura 37.

TABELA 25: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS – SEGUNDA FASE

Traço Concreto	Resistência à compressão (MPa)	Sd (MPa)
CR	32,70	0,40
CAB 5	22,10	0,61
CAB 10	20,30	0,44
CAB 15	16,90	1,13

A resistência à compressão medida na segunda fase da pesquisa foi menor que a medida na primeira etapa, o único traço que manteve a resistência foi o CAB 10. A tendência de perda de resistência devido ao aumento de borracha incorporada verificada na primeira fase foi confirmada com os resultados obtidos na segunda etapa.

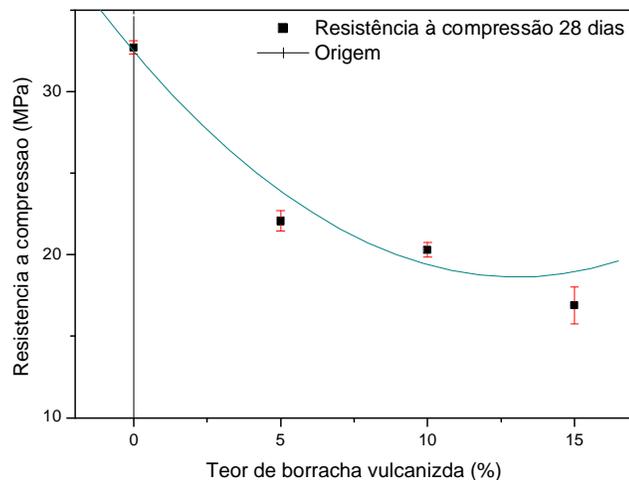


FIGURA 37: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS – SEGUNDA FASE.

A justificativa para perda de resistência da segunda etapa em relação aos resultados obtidos na primeira pode estar fundamentada nas diferentes bateladas de concreto fabricadas e na diferença de tempo ocorrida na cura ambiente. Os CPs da segunda fase foram colocados na câmara úmida após 5 dias de cura ambiente, os traços dosados na primeira etapa foram colocados na câmara úmida após 1 dia de cura ambiente. JAUBERTHIE *et al.* (2002)¹¹⁰

concluíram que a cura úmida aumenta a resistência à compressão de materiais à base de cimento com adição pozolânica.

A perda de resistência verificada com a adição de borracha pode ser atribuída ao menor módulo de deformação elástico das partículas de borracha e à má aderência entre esta e a pasta de cimento^{5,12,107}.

Como a borracha tem maior capacidade de deformação, sua capacidade de resistir aos esforços aplicados fica limitada pela rigidez da matriz de concreto. As partículas de borracha funcionam, na verdade, como vazios no interior da massa de concreto.

A aderência entre a pasta de cimento e os agregados é um fator importante na resistência mecânica do concreto¹. Segundo COUTINHO (1999)⁵⁸ a ligação entre o agregado e a pasta de cimento ocorre devido à rugosidade superficial do agregado, devido às propriedades químicas do cimento e do agregado e às propriedades eletrostáticas da superfície das partículas. No caso da aderência do agregado de borracha vulcanizada devida à absorção de água pelo agregado fica prejudicada pois o elastômero possui absorção praticamente nula.

Para verificar a aderência entre a pasta de cimento e as partículas de borracha foi feito um estudo de MEV.

O formato da borracha utilizada na pesquisa interfere nos resultados da resistência à compressão. Os concretos com adição de fibras de elastômeros geralmente apresentam melhores desempenhos mecânicos do que os concretos com adição de grânulos⁸⁸. LOPES *et al.* (2005)¹⁰⁷ encontraram uma perda de 44% na resistência à compressão com a adição de 5% de massa de borracha na forma de grãos, perda maior que a encontrada no presente estudo de 21,7%. Isto reforça a hipótese de que a adição de fibras acarreta menor prejuízo à resistência mecânica do concreto do que a adição de grãos.

A perda de resistência à compressão está relacionada, também, a outros fatores como o fato do consumo de cimento ter diminuído e o teor de

ar aprisionado ter aumentado com a adição do polímero. Quanto maior o ar aprisionado ao concreto maior a porosidade e menor a sua resistência^{1,29}.

4.3.2. Resistência à tração

A resistência à tração foi medida à flexão e, também, à compressão diametral. Os dados de resistência podem ser vistos na Tabela 23, na Figura 38 e na Figura 39. A resistência à tração diminuiu, podendo tal propriedade estar atribuída às diferenças entre os materiais trabalhados, polímeros e cerâmicos, podendo os primeiros ser considerados defeitos internos à matriz de concreto e, também, à diminuição do consumo de cimento e ao aumento do teor de ar no concreto como explicado anteriormente.

4.3.2.1. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão mostrados na Figura 38.

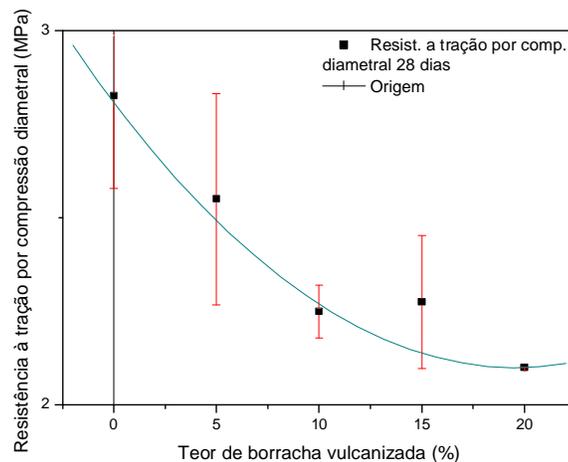


FIGURA 38: GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.

Para os CABs 5 e 10 as perdas de resistência à tração por compressão diametral, em relação ao CR, foram de 10,5% e 21%, respectivamente. Para o CAB 15, com uso de aditivo superplastificante, a

perda diminuiu para 19,3%. O aumento da quantidade de borracha para 20% fez com que a perda de resistência à tração voltasse a aumentar, 26,3%. O aumento da resistência do CAB 15 em relação ao CAB 10 pode estar relacionada à adição de superplastificante já que este pode interferir na hidratação do cimento¹⁰⁹.

A perda de resistência à tração, devido à adição de borracha, é proporcionalmente menor que a perda resistência à compressão. A relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão para os concretos estudados consta na Tabela 26.

TABELA 26: RELAÇÃO ENTRE PERDA DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES.

Traço	Tração (MPa)	Resistência	
		Compressão (MPa)	Relação (%)
CR	2,85	34,60	8,0
CAB 5	2,55	27,10	9,5
CAB 10	2,25	20,30	11,0
CAB 15	2,30	19,00	12,1
CAB 20	2,10	17,7	12,30

Valores de 7 a 8% entre os resultados destas resistências são encontrados na literatura¹⁰⁶.

Após o término do ensaio os CPs do CR apresentaram-se partidos em duas partes, no entanto, os CPs com adição de borracha apresentaram fissuração reduzida, sendo necessária a aplicação de um esforço extra para dividi-los ao meio. As fibras de borracha mantiveram as partes unidas e, também, parte da matriz de concreto apresentava-se intacta. A capacidade de o CAB resistir à propagação de fissuras já foi citada anteriormente por outros autores^{7,8,10,12,39}.

4.3.2.2. Resistência à tração na flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão estão apresentados na Figura 39.

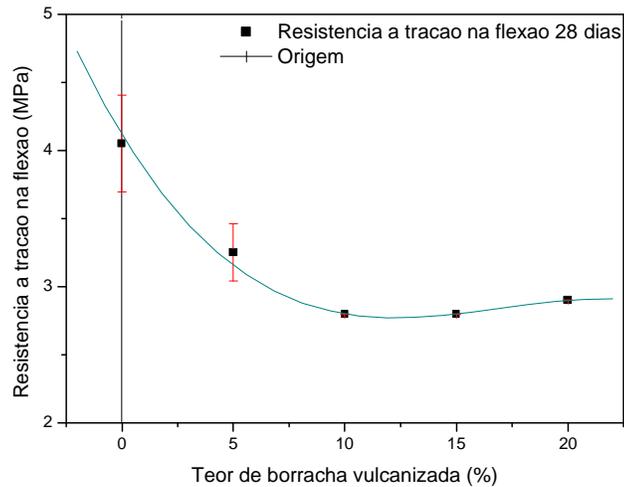


FIGURA 39:RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.

Para o CAB 5 houve uma perda de 19,8% de sua resistência em relação ao CR. As perdas de resistência para o CAB 10 e 15 foram as mesmas, 30,9%. Para o CAB 20 a perda de resistência à tração na flexão diminuiu 28,4%. As fissuras originadas com o carregamento podem ser visualizadas na FIGURA 40.

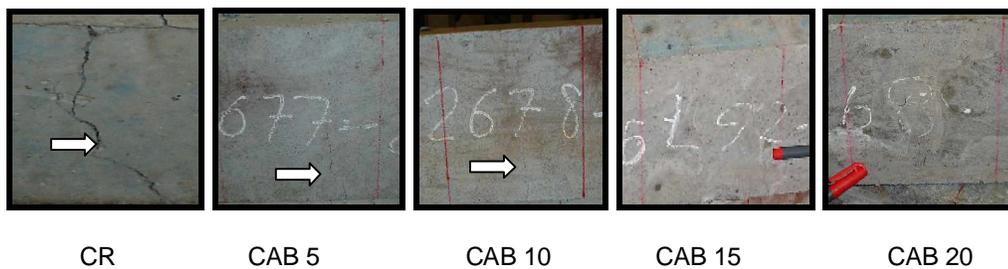


FIGURA 40: FISSURAS DEVIDO AO CARREGAMENTO EM CORPOS-DE-PROVA PRISMÁTICOS.

Como verificado na FIGURA 40 as fissuras diminuíram com a adição de borracha, este comportamento pode estar ligado ao efeito das fibras no interior do concreto, apesar de estas não estarem orientadas. TOUTANJI

(1996)³¹ atribui o menor surgimento de fissuras no CAB devido ao baixo módulo de elasticidade da borracha, sendo que esta se deforma absorvendo parte da carga aplicada após a ruptura. Segundo RAGHAVAN e HUYNH (1998)¹⁰ as fibras de borracha agem como uma ponte de transferência de tensões após a ruptura da matriz de cimento, permitindo que os CPs recebam um carregamento adicional mesmo após a ruptura. Na Figura 41 está mostrado esquematicamente o comportamento das fibras na massa de concreto.

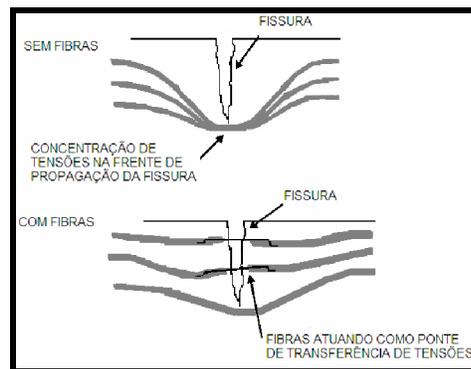


FIGURA 41: MECANISMO DE REFORÇO DAS FIBRAS ATUANDO COMO PONTE DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES¹⁰¹.

Existem dois mecanismos de transferência de tensões para as fibras: o elástico e por atrito. O mecanismo elástico é dominante enquanto não há deslocamento entre a fibra e a matriz de cimento (etapa pré-fissuração). Após a fissuração da matriz, o mecanismo de transferência de tensões passa gradualmente de elástico para o mecanismo por atrito, onde a fibra atua como ponte de transferência de tensão¹⁰¹.

Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral e por flexão apresentaram a mesma tendência com o aumento da incorporação de borracha, a resistência à tração para as adições de 10, 15 e 20% do resíduo de borracha foram praticamente a mesma.

4.3.3. Módulo de deformação estático tangente inicial

O módulo de elasticidade de um concreto depende das características da pasta, dos agregados, das características da zona de interface pasta-agregado e da idade do concreto¹. Os resultados obtidos constam na Tabela 23, na Figura 42 e na Figura 43.

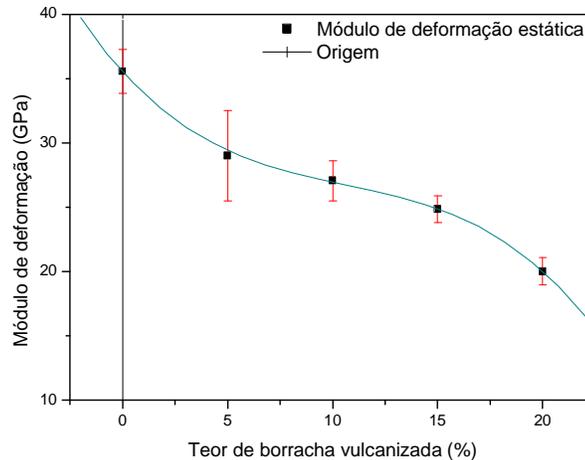


FIGURA 42: MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ELÁSTICO.

No CAB 5 foi observado que o módulo baixou 17% em relação ao CR. Já, o CAB 20 teve uma perda relativa de 56,8% de seu módulo de elasticidade. O aumento no teor de borracha adicionada implicou na diminuição do módulo de elasticidade do concreto. GÜNEYISI *et al.* (2004)¹¹¹ também verificaram que a diminuição no módulo de elasticidade é proporcional à quantidade de borracha incorporada ao concreto.

LI *et al.* (2004)⁸⁸ registraram perda de 25% no módulo de elasticidade de CPs com substituição de 15% do volume de areia por fibras de borracha. A granulometria da borracha interferiu no módulo de elasticidade da mesma maneira que interferiu na resistência à compressão^{36,88}.

A compatibilidade entre CR e o MR será maior para materiais que possuírem módulos aproximados, pois concretos menos resistentes rompem com deformações maiores, apresentando maior capacidade de acomodação plástica. Concretos muito resistentes deformam-se menos para tensões mais

altas, demonstrando serem relativamente frágeis, ou seja, apresentam pouca capacidade de deformação. Estes fatos determinam que os materiais devem possuir comportamentos semelhantes quanto à deformações, fluência e retração, evitando-se "efeitos de borda"³.

Ao substituir o agregado mineral de alto módulo de elasticidade pelo agregado de borracha com um módulo baixo foi observada uma diminuição no módulo do concreto resultante. As curvas tensão x deformação dos traços estudados estão apresentadas na Figura 43.

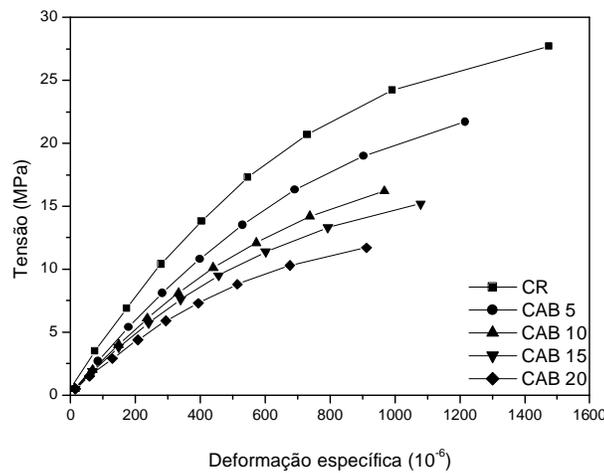


FIGURA 43: CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO.

A taxa de desenvolvimento do módulo de elasticidade manteve-se para todos os traços estudados, embora os traços contendo o resíduo apresentassem módulos menores.

O baixo módulo de elasticidade permitiu que o material tivesse maior deformação antes da ruptura. Para uma tensão de 10 MPa, por exemplo, o CAB 20 teve uma deformação específica de 650×10^{-6} enquanto o CR deformou apenas 275×10^{-6} . Essa maior capacidade de deformação é interessante para os materiais de reparo, pois alivia o surgimento de fissuras e melhora a durabilidade do concreto.

4.3.4. Resistência à abrasão pelo método submerso

A resistência à abrasão é uma característica importante às superfícies sujeitas a movimentação de fluidos abrasivos. A destruição da estrutura do concreto se processa pelo rompimento dos grãos dos agregados ou pelo seu arrancamento¹. Os resultados das perdas de massa, devido ao ensaio de abrasão realizado no sistema CR/CAB, estão apresentados na Tabela 27.

TABELA 27: PERDA DE MASSA DOS CPS DE ABRASÃO.

Concreto	Idade (dias)	Massa Inicial (g)	Massa após 72 h (g)	Perda de massa (%)
CR	60	16055	15285	4,80
CR/MR	21	16521	15673	5,13
CR/MR	28	15945	15001	5,92

No CR o desgaste ocorreu até a superfície dos agregados graúdos, sendo que alguns tiveram arrancamento. Na região preenchida com CAB o desgaste não expôs totalmente a brita, a argamassa envolvia parte da superfície do agregado graúdo após o ensaio.

Nas regiões onde o CAB excedeu a área delimitada pelo orifício de preenchimento, procedimento que foi necessário para dar bom acabamento em alguns CPs, foi perceptível que a argamassa com borracha protegeu a superfície do CR da ação de abrasão.

Não houve descontinuidade no desgaste ocorrido na zona de interface entre o CR e o CAB, indicando boa aderência entre os materiais. Caso os CPs apresentassem desgaste superior na região de interface o uso do CAB como material de reparo seria inviável, já que a presença de depressões em fluxos de água desencadeiam o processo de degradação, principalmente, por cavitação.

O CP contendo apenas CR teve o menor desgaste dentre os 3 CPs submetidos ao ensaio de abrasão, provavelmente porque na data do ensaio

este tinha idade muito superior a dos outros CPs ensaiados. Apesar disto, pode-se comentar que os valores resultantes não foram muito significativos.

Os CPs apresentaram desgaste superior em suas arestas e as áreas preenchidas com CAB foram menos atingidas pela abrasão. As profundidades das erosões foram medidas em 704 pontos de cada CP ensaiado, com esses valores obteve-se a média do desgaste em cada tipo de concreto. Os resultados constam na Tabela 28.

TABELA 28: DESGASTE MÉDIO OCORRIDO NOS CPS SUBMETIDOS À ENSAIO DE ABRASÃO.

Sistema	Concreto	Idade (dias)	Desgaste (mm)
CR	CR	60	5,1
	CR	42	5,4
CR/CAB	CAB 5	21	5,34
	CAB 10	21	4,74
	CAB 15	21	2,8
	CR	49	8,57
CR/CAB	CAB 5	28	8,3
	CAB 10	28	6,22
	CAB 15	28	3,68

No CR a perda de massa média foi generalizada e menor do que 5%.

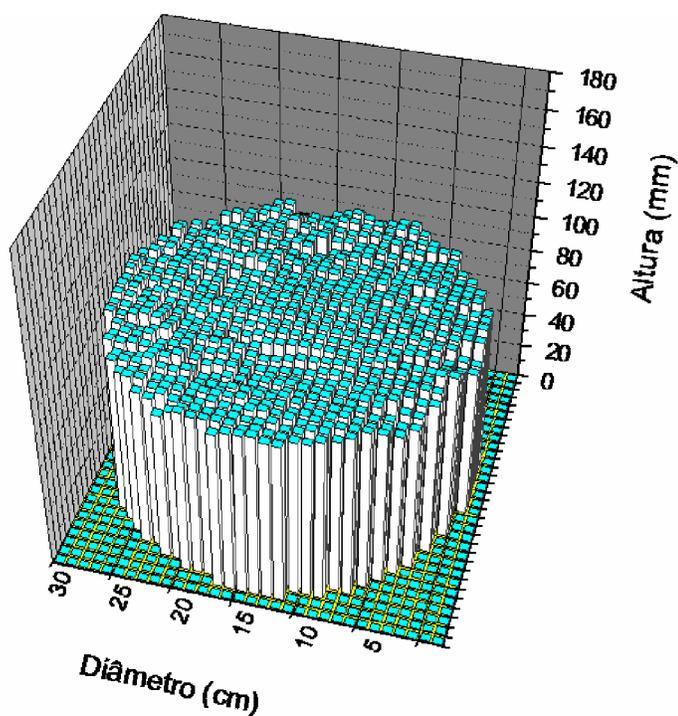
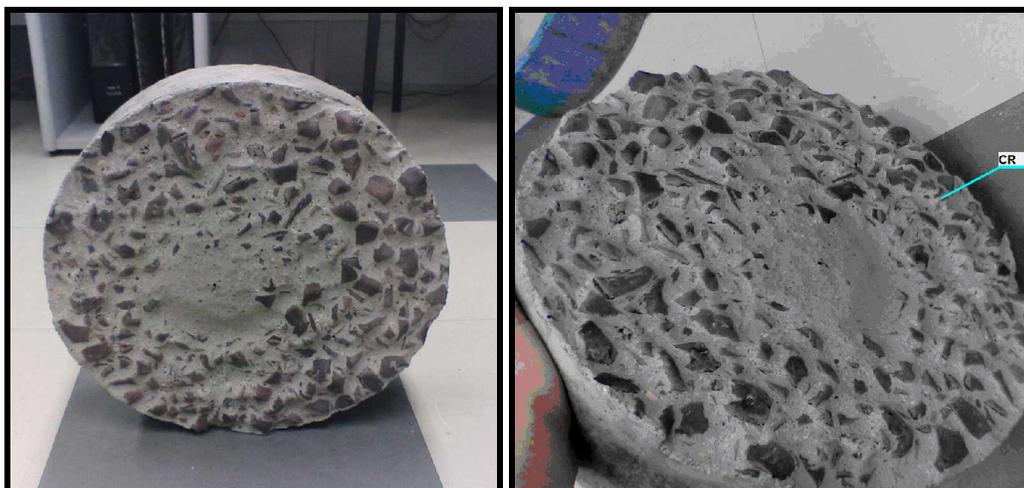


FIGURA 44: EROSIÃO CAUSADA POR ABRASÃO NO CP DE CR COM 60 DIAS DE IDADE APÓS 72 HORAS DE ENSAIO.

A região central do CP foi menos atingida pelo desgaste proveniente da abrasão, justificado pela realização do adensamento com vibrador de imersão no centro do CP, apresentando menor quantidade de agregado graúdo.

O CP com o MR, ensaiado aos 21 dias de idade, pode ser visualizado na Figura 45.

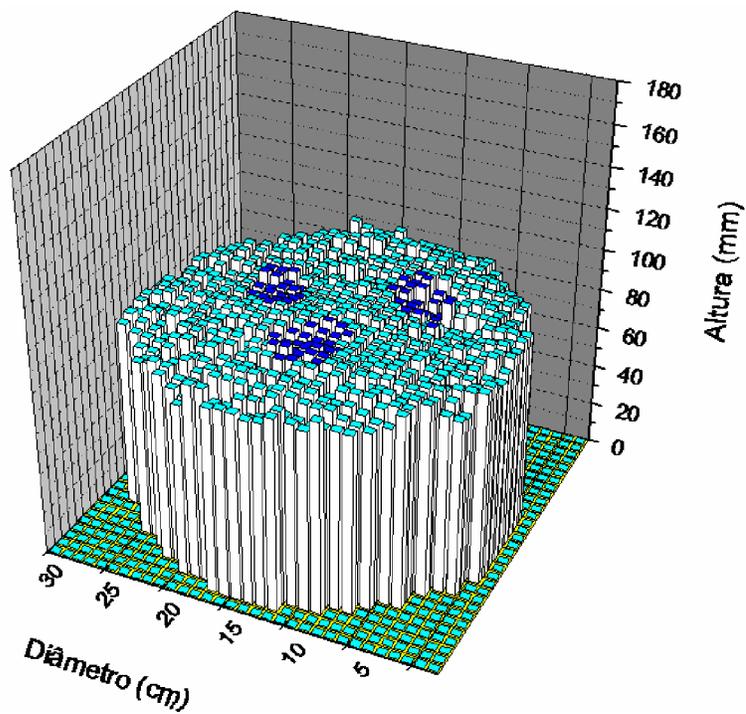
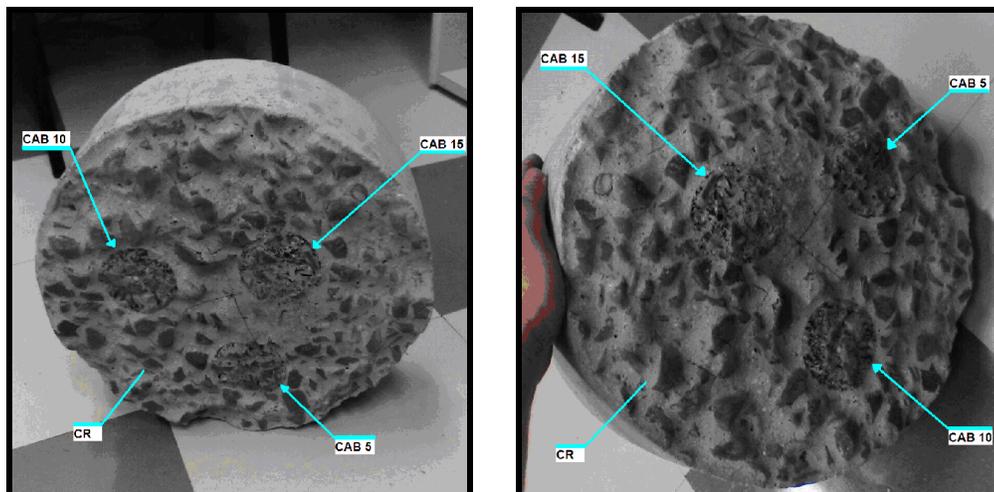


FIGURA 45: EROSIÃO CAUSADA POR ABRASÃO NO CP CR/CAB COM 21 DIAS DE IDADE APÓS 72 HORAS DE ENSAIO.

O CAB 15 apresentou o menor desgaste entre os 4 traços presentes no CP submetido à abrasão, o CAB 5 teve desgaste semelhante ao do CR e o CAB 10 apresentou erosões com profundidades intermediárias entre os CABs 5 e 15.

O CP com o MR ensaiado aos 28 dias pode ser visualizado na Figura 46.

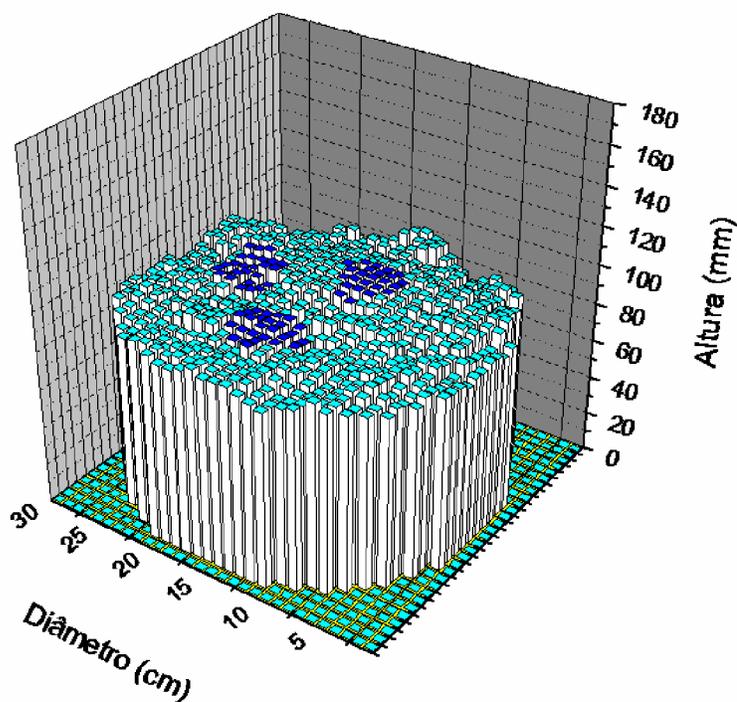
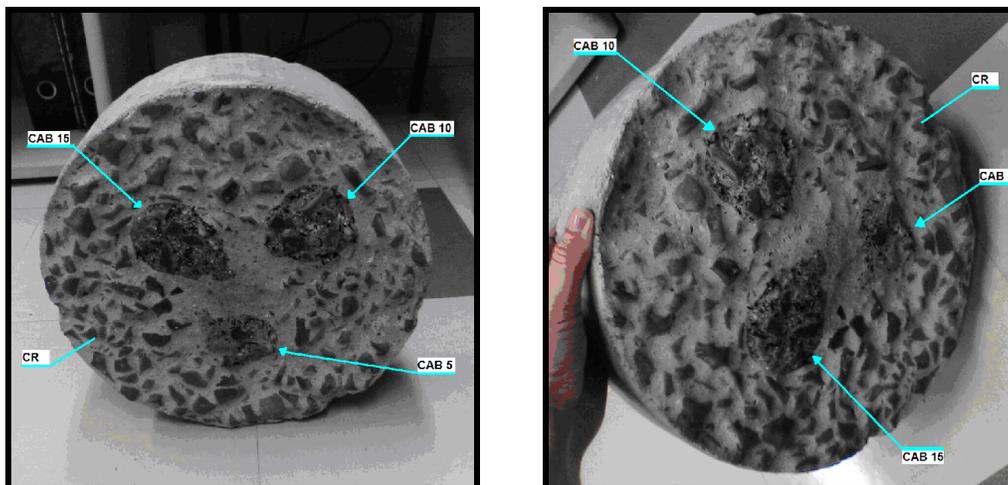


FIGURA 46: EROSÃO CAUSADA POR ABRASÃO NO CP CR/CAB (IDADE 28 DIAS) APÓS 72 HORAS DE ENSAIO.

O CR apresentou maior desgaste do que os traços com adição de borracha, o CAB 15 teve desgaste inferior à metade do ocorrido no CR. No CAB 5 a melhora na resistência à abrasão não foi muito significativa.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994)²⁹ um determinado concreto terá menor desgaste superficial quanto maior a resistência à compressão, menor a permeabilidade e a porosidade. O que foi verificado com os ensaios

realizados é que o concreto com adição de borracha apresentou menos desgaste por abrasão do que o concreto convencional, principalmente, com teores do resíduo superiores a 5%.

Nos 2 CPs preenchidos com CAB, as erosões causadas pela abrasão foram mais amenas na região preenchida com CAB do que no CR, apesar do CAB possuir resistência mecânica inferior ao mesmo.

MARQUES (2005)¹² comparou a resistência à abrasão do concreto convencional com a do CAB (44% menos resistência à compressão) e constatou que apresentaram desgastes semelhantes, apesar do CAB ter menor resistência mecânica.

Segundo VERÇOSA (1983)⁵⁷ o desgaste superficial foi proporcional à resistência à compressão e depende da granulometria do agregados e da coesão do concreto. Segundo NEVILLE (1997)¹ quanto maior a quantidade de agregado graúdo no concreto maior será sua resistência à abrasão. Com a adição de borracha ao concreto o consumo de brita por metro cúbico de concreto diminuiu, afetando a proteção que esta propicia ao material. No entanto, os traços de CAB foram tão ou mais resistentes que o CR.

4.3.5. Resistência de aderência entre CR/CAB

A aderência é atribuída ao processo de adesão entre o concreto endurecido e o concreto no estado fresco. Para um MR ser compatível com o substrato é necessário que exista boa aderência entre estes.

A forma de ruptura do sistema pode ser visualizada na Figura 47.



FIGURA 47: RUPTURA DO SISTEMA CR/CAB 10.

A ruptura se deu numa fina camada da superfície do CAB, não houve ruptura na interface entre o CR e o CAB em nenhum dos ensaios realizados. Portanto pode-se considerar boa aderência ou compatibilidade entre o CR e o CAB.

Os valores da resistência de aderência, obtidos no ensaio, estão resumidos na Tabela 29.

TABELA 29: RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.

Sistema	Força máxima (Kgf)	Tensão (MPa)
CR/CR	898,8	4,49
CR/CAB 5	970,0	4,84
CR/CAB 10	326,5	1,63
CR/CAB 15	374,5	1,87

Segundo o ACI INTERNATIONAL (1999)^{iv}, *apud* KORMANN (2002)³, valores de resistência superiores a 0,9 MPa são aceitáveis. Os valores encontrados no trabalho são maiores, o que indica que houve compatibilidade entre o CAB e o CR.

^{iv} ACI INTERNATIONAL. 1999 – **Concrete Repair Manual**. 1a. Edição. Farmington Hills, MI: 1999.

A aderência dos compostos à base de cimento Portland em substratos porosos dá-se por dois fenômenos, no estado fresco pela adesão inicial, explicada pela teoria de ligação superficial entre sólidos e, no estado endurecido pela penetração da solução aglomerante e posterior precipitação de cristais de portlandita na interface⁶⁶.

FUSCO (1995)^v, *apud* FORTES (2002)¹¹², sugeriu 3 parcelas contribuintes para o fenômeno de aderência:

- por adesão: a existência dessa parcela é verificada pela resistência à separação de dois materiais. Essa parcela é devida a ligações físico-químicas que se estabelecem na interface dos dois materiais durante as reações de pega do cimento;
- por atrito: que é a parcela de resistência devida ao coeficiente de atrito entre os materiais, o qual é função da rugosidade superficial (micro rugosidade);e
- mecânica: que é a decorrente de saliências entre as duas superfícies.

FORTES (2000)¹¹² define adesão como sendo o estado no qual duas superfícies são mantidas unidas por forças interfaciais, as quais podem constituir-se de forças de valência e ação de intertravamento, ou ambas. A adesão é influenciada pela rugosidade superficial, área de agregado exposta na superfície, utilização de agentes de ligação e cuidados na colocação do concreto novo como jateamento e saturação da camada remanescente do substrato.

v FUSCO, P. B.. **Técnica de armar estruturas de concreto**. Editora PINI, São Paulo/SP, 382 p, 1995

4.3.6. Índice de vazios, Massa específica e Absorção

O índice de vazios, a massa específica e a absorção de água dos traços de concreto estudados são apresentados na Tabela 30, na Figura 48, na Figura 49 e na Figura 50.

TABELA 30: PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS ESTUDADOS.

Concreto	Massa específica (Kg/dm ³)			Real	Absorção (%)		Índice de vazios (%)	
	Seca	Após saturação	Após saturação e fervura		Após saturação	Após saturação e fervura	Após saturação	Após saturação e fervura
CR	2,25	2,35	2,36	2,54	4,85	5,10	10,94	11,50
CAB 5	2,19	2,27	2,28	2,41	3,95	4,17	8,70	9,09
CAB 10	2,15	2,20	2,23	2,33	3,02	3,77	6,40	7,95
CAB 15	2,09	2,15	2,16	2,26	2,22	3,45	4,83	7,44

A massa específica do concreto diminuiu com a substituição de parte da areia natural pelo resíduo de borracha. No entanto, mesmo o CAB 15 pode ser considerado como de peso específico normal. A diminuição ocorrida na massa específica pode ser visualizada na Figura 48.

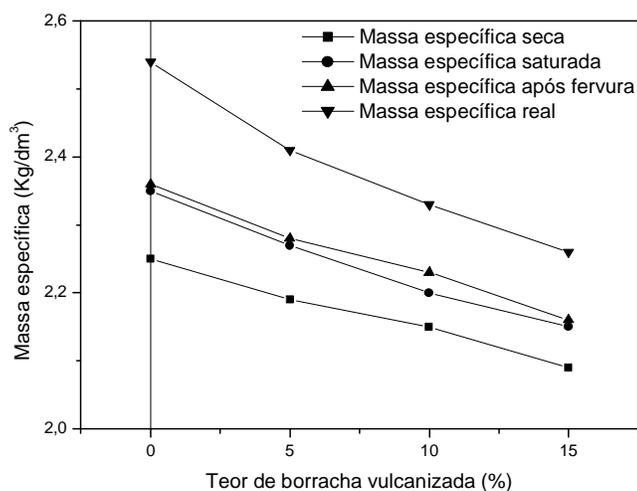


FIGURA 48: MASSA ESPECÍFICA AOS 28 DIAS.

A absorção de água diminuiu com a utilização das fibras de borracha no concreto. O aumento no teor de ar na mistura de concreto fresco devido à adição de borracha não prejudicou a absorção de água, o que indica que os

vazios internos não estão interligados. A condição dos vazios internos poderá ser visualizada por MEV. O gráfico da Figura 49 indica o comportamento dos traços de concreto estudados quanto à absorção.

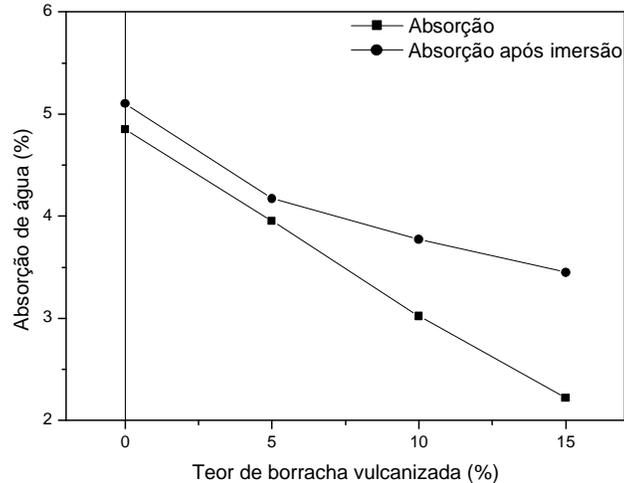


FIGURA 49: ABSORÇÃO DE ÁGUA AOS 28 DIAS.

MARQUES (2005)¹² encontrou valores próximos para absorção de água no concreto convencional e no CAB. AKASAKI (2003)³⁵ também concluiu que a adição de borracha não interferiu na absorção de água do concreto. No entanto, não houve um consenso quanto as mudanças geradas nesta propriedade, segundo FIORITI *et al.* (2002)¹¹³ e SEGRE *et al.* (2004)¹¹⁴ a adição de borracha em materiais cimentícios diminui a absorção de água do compósito. Já, o estudo de LIMA e ROCHA (2004)¹¹⁵ indica que a absorção aumenta com a incorporação do resíduo.

Concretos de boa qualidade apresentam absorção de água inferior a 10%¹, os traços com adição de borracha estudados apresentaram absorção inferior a 5% podendo ser, portanto, considerados de boa qualidade quanto à absorção.

O índice de vazios diminuiu com a adição da borracha ao concreto, como pode ser verificado na Figura 50.

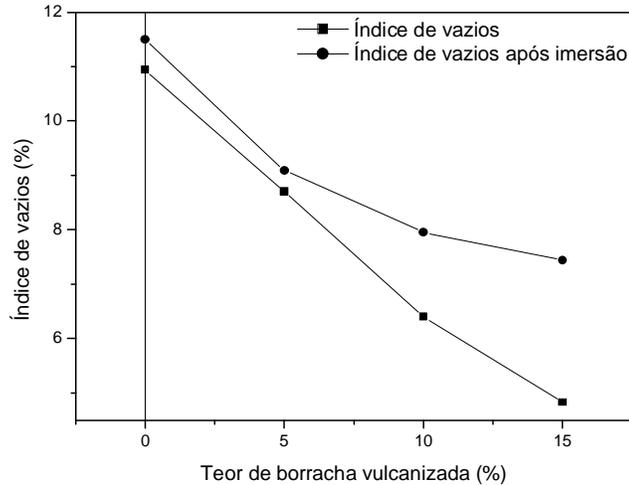


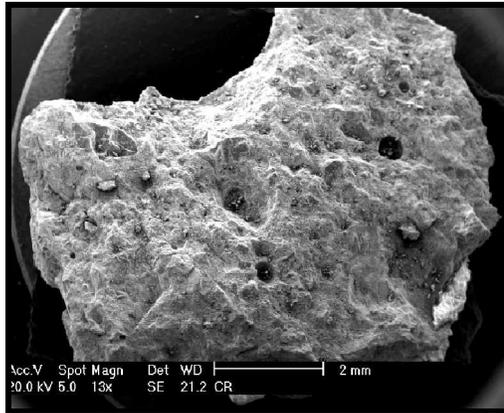
FIGURA 50: ÍNDICE DE VAZIOS AOS 28 DIAS.

A forma e a distribuição dos vazios podem ser verificadas nas micrografias obtidas por MEV.

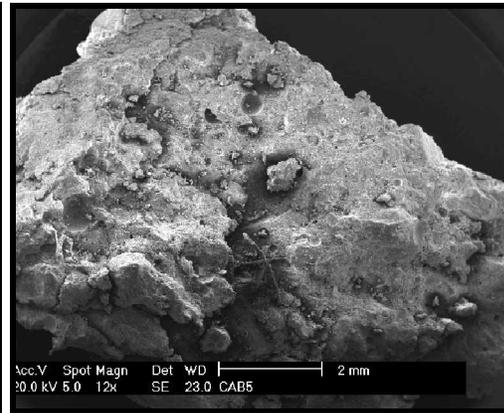
4.3.7. Microscopia eletrônica de varredura

A análise por MEV permite, além de outras identificações, a verificação da porosidade e da aderência entre a pasta de cimento e os agregados. Os poros podem ser visualizados nas micrografias apresentadas na Figura 51, as setas em amarelo indicam os poros grandes e as setas em azul indicam os micro-poros formados pela adição de fibras de borracha.

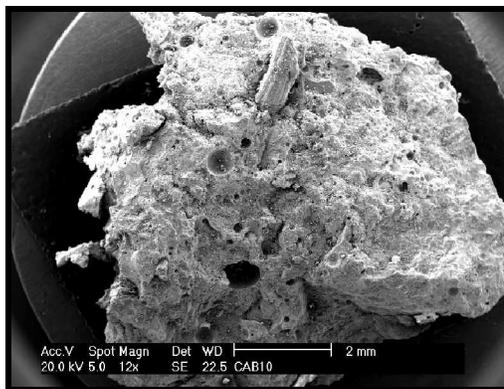
Como pode ser visualizado nas micrografias da Figura 52 com o aumento na adição das fibras de borracha houve um aumento na quantidade de pequenos poros. O ensaio para determinação do teor de ar na mistura acusou aumento na quantidade de ar no concreto, conforme verificado nas micrografias. Também, os poros não são comunicantes dificultando, assim, a percolação de água no interior do material. Esta constatação corrobora com o determinado no ensaio de absorção de água, onde foi verificado que o aumento da adição do resíduo diminuiu a absorção.



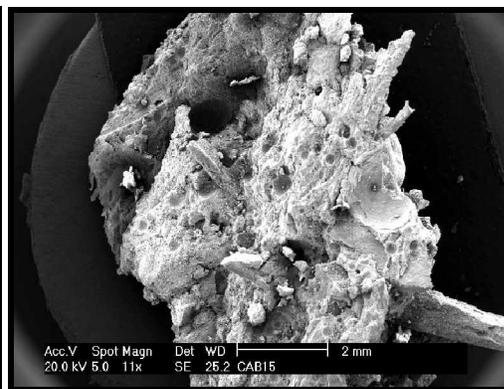
(CR)



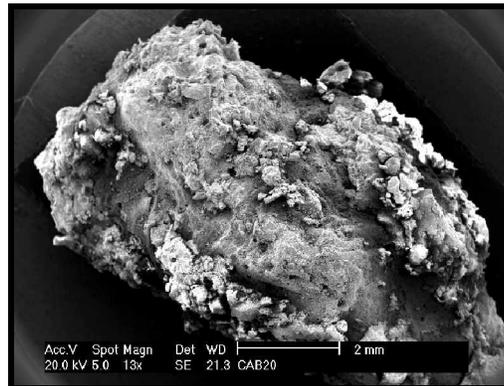
(CAB 5)



CAB 10



CAB 15



CAB 20

FIGURA 51: MICROGRAFIAS POR MEV DAS SUPERFÍCIES DE CPS ROMPIDOS.

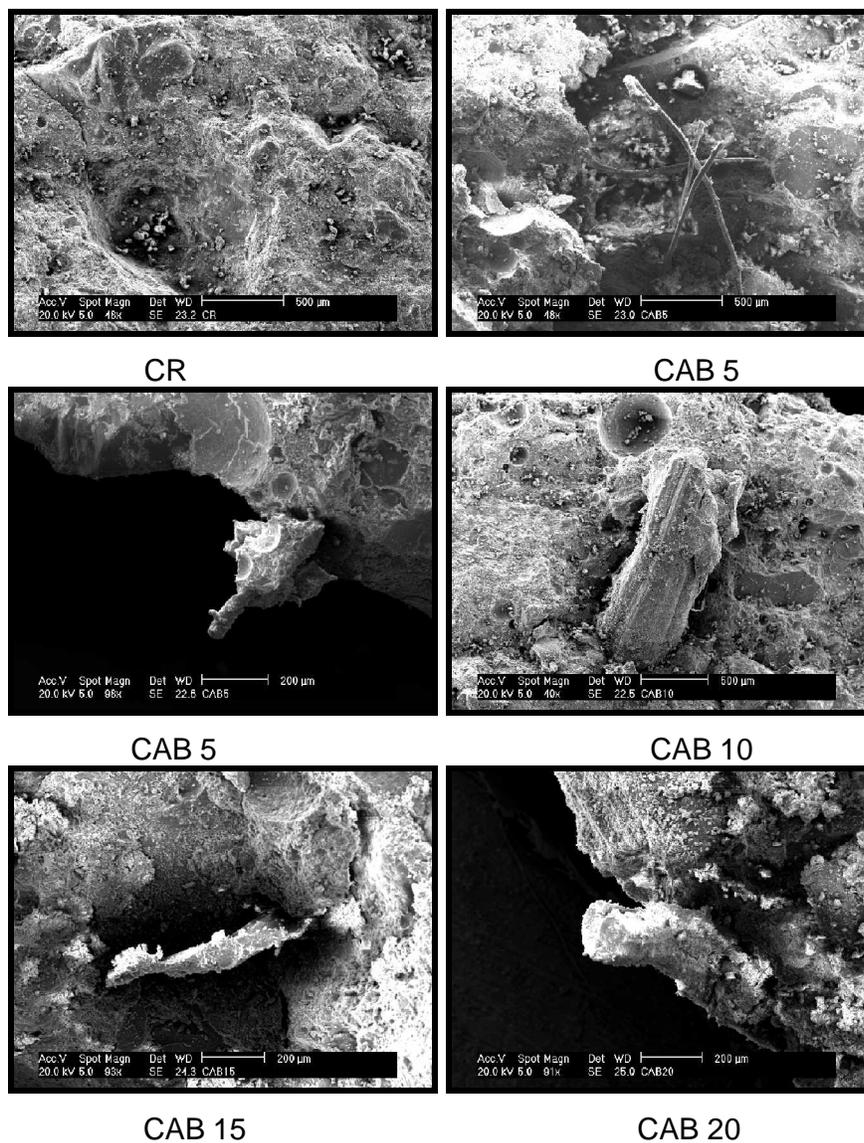


FIGURA 52. MICROGRAFIAS POR MEV DAS SUPERFÍCIES DE CPS ROMPIDOS

As micrografias mostradas, na Figura 52, não demonstram nenhuma interface visível entre o MR e o CR, o que corrobora o resultado dos ensaios mecânicos de que há boa aderência entre estes materiais. Verifica-se, também, que as partículas do resíduo estão totalmente envolvidas pela argamassa.

5. CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados neste estudo sobre concreto com adição de borracha (CAB), conclui-se:

- a adição de resíduo de borracha, em substituição à mesma proporção da massa de areia, diminuiu a trabalhabilidade do concreto, essa perda foi proporcional ao teor de borracha adicionada. Os CABs 5 e 10 apresentaram manuseio aceitável para aplicação como material de reparo (MR) no entanto, a produção do CAB 20, na forma dosada, foi descartada devido à baixa trabalhabilidade da mistura, 3 mm, que dificultou seu adensamento;
- a massa unitária da mistura e o consumo de insumos, para confecção dos traços estudados, diminuíram com a incorporação do resíduo ao concreto;
- o teor de ar na mistura de concreto fresco aumentou devido à adição do elastômero em forma de fibras;
- ocorreram perdas na resistência mecânica do CAB, esta perda foi proporcional ao teor do elastômero na mistura. As perdas foram mais intensas na resistência à compressão;
- o concreto com adição de fibras de borracha apresentou menor quantidade de fissuras após a ruptura, este fato ficou mais evidenciado no ensaio de resistência à tração na flexão, no qual os traços CAB 15 e 20 apresentaram fissuras praticamente imperceptíveis a olho nú;
- a massa específica, o índice de vazios e a absorção de água do concreto endurecido diminuíram com o aumento do teor de fibras adicionadas;

- o desgaste superficial devido à abrasão-erosão se apresentou contínuo mesmo nos CPs preenchidos com CAB. Não houve desgaste diferenciado na região de interface entre o concreto referência e o concreto com adição de borracha, o que garantiu a compatibilidade entre os materiais, permitindo a utilização deste como material de reparo. Nos CPs preenchidos com os MRs em estudo o desgaste superficial foi menor no CAB 15. A resistência à abrasão não foi proporcional à resistência à compressão como acontece em concretos convencionais, o CAB 15 apresentou o menor desgaste (3,67 mm) e a menor resistência à compressão (16,9 MPa aos 28 dias). O CR apresentou a maior resistência (32,70 MPa aos 28 dias) e o maior desgaste superficial por abrasão-erosão;
- a aderência entre o CAB e o CR mostrou-se de boa qualidade, a menor resistência ao arrancamento foi 1,5 MPa obtida pelo CAB 10, resistência superior ao mínimo recomendado pelo ACI (0,90 MPa); e
- nas micrografias, obtidas por MEV, as partículas de borracha vulcanizada apresentaram-se totalmente envolvidas pela pasta de cimento e a região de interface entre os materiais não pôde ser visualizada indicando uma aderência satisfatória entre a pasta de cimento e as raspas de borracha utilizadas.

O estudo de resistência à abrasão realizado nos traços contendo fibras de borracha comprovou que estes desgastaram menos que o CR, comprovando que sua aplicação como material de reparo foi mais apropriada que o uso de concreto convencional. O fato de não existir desgaste diferenciado na zona de transição entre o CAB e o CR foi mais um indicativo que este apresentou um bom desempenho.

A resistência de aderência encontrada entre o CAB e o CR, utilizado como substrato, foi considerada boa, uma vez que foi duas vezes mais elevada que o recomendado pelo ACI internacional.

Os desempenhos dos traços de CAB estudados quanto à abrasão e à aderência com o substrato os habilitam, a sua aplicação fica atrelada a resistência característica existente na estrutura.

Além do limite de aplicação imposto pela resistência à compressão houve também, o inconveniente da trabalhabilidade, teores de borracha superiores a 10% tornaram o concreto muito seco dificultando o adensamento. A alta consistência dos CABs limitou seu uso a locais onde é possível realizar adensamento apropriado.

O CAB de pneu é um material atraente do ponto de vista ecológico, por recuperar resíduos e substituir a areia natural, um recurso limitado na natureza. Do ponto de vista econômico, existe a necessidade de subsídios financeiros para a obtenção e o processamento da matéria-prima⁸⁹. A viabilidade geral da pesquisa se fundamenta nos mais de 100 milhões de unidades de pneus descartados no ambiente e na possibilidade de seu uso como MR em superfícies hidráulicas¹³.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste estudo indicaram que o CAB apresenta qualidades interessantes para sua utilização como material de reparo em superfícies hidráulicas, principalmente considerando a resistência à abrasão. No entanto, recomenda-se a realização de estudos de campo com este compósito para verificar seu comportamento quando exposto às intempéries existentes nas estruturas hidráulicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução engenheiro Salvador E. Giamusso. 2ª. edição, editora PINI, São Paulo, 1997.
- 2 LEONARDO, C. R. T. **Estudo de Concreto de Alto Desempenho, Visando Aplicação em Reparos Estruturais**. Dissertação de mestrado (vinculado ao programa de pós graduação em construção civil da UFPR). Curitiba, 2002, 152p.
- 3 KORMANN, A. C. M. **Estudo do Desempenho de Quatro Tipos de Materiais para Reparo a Serem Utilizados em Superfícies Erodidas de Concreto de Barragens**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós graduação em construção civil da UFPR). Curitiba, 2002, 196p.
- 4 LATORRE, P. E. V. **Estudo de Argamassas para Reparos de Estruturas de Concreto Sujeitas à Abrasão, em Locais com Umidade Elevada**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós graduação em construção civil da UFPR) Curitiba/Pr 2002, 88p.
- 5 SEGRE, N. **Reutilização de Borracha de Pneus Usados como Adição em Pasta de Cimento**. Tese de doutorado (vinculada ao Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas) Campinas/SP 1999, 105 pp.
- 6 TOPÇU, I. B. The properties of rubberized concretes. **Cement and Concrete Research**, vol 25, nº 2, pp. 304-310, 1995
- 7 TOPÇU, I. B. Assesment of the britleness index of rubberized concretes. **Cement and Concrete Research**, vol 27, nº 2, pp. 177-183, 1997.
- 8 TOPÇU, I. B.; AVCULAR, N. Collision bahaviours of rubberized concrete. **Cement and Concrete Research**, vol 27, nº 12, pp. 1893-1898, 1997.

-
- 9 TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J. L. Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. **Building and Environment**, 40, pp. 221-226, 2005.
- 10 RAGHAVAN, D.; HUYNH, H. Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. **Journal of Materials Science** 33. pp. 1745-1752, 1998
- 11 MENEGUINI, E. C. A.; PAULON, V. A. **Comportamento de argamassas com emprego de pó de borracha**. In: 46º. CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2004.
- 12 MARQUES, A. C. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura**. Dissertação de mestrado (Vinculada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da UNESP). Ilha solteira/SP, 114p, 2005.
- 13 CEMPRE: Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Pneus**. Ficha técnica 8, 2005. Disponível em: http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas_pneus.php. Acessado em: 24/11/2006.
- 14 KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. Dissertação de mestrado (Vinculada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da UFSC). Florianópolis/SC, 127p, 2002.
- 15 OWEN, K. C. **Scrap tires: A pricing strategy for a recycling industry**. Corporate Environmental Strategy. 1997.
- 16 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 258/99**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=1999> acessado em 06/05/2005.

-
- 17 KORMANN, A. C. M.; PORTELLA, K. F.; PEREIRA, P. N.; SANTOS, R. P. **Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – mecanismos e recuperação.** In: XXIV Seminário Nacional de grandes barragens. Fortaleza, 2001.
- 18 GONÇALVES, P.. **A Reciclagem Integradora dos Aspectos Ambientais, Sociais e Econômicas.** Rio de Janeiro/RJ, Editora FASE DP & A, 2003.
- 19 FIGUEIREDO, P. J. M., **A Sociedade do Lixo: os Resíduos, a Questão Energética e a Crise Ambiental.** Piracicaba/SP, Editora UNIMEP, 1994.
- 20 CIMINO, M. A.; ZANTA, V. M.. Gerenciamento de pneumáticos inservíveis (GPI): análise crítica de ações institucionais e tecnologias para minimização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol 10, no 4, pp 299-306, 2005.
- 21 JOHN, V. M.. **Desenvolvimento Sustentável, Construção Civil, Reciclagem e Trabalho Multidisciplinar.** <Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm> acessado em: 12/11/2006.
- 22 VALLE, C. E.. **Como se Preparar para as Normas ISO 14000: Qualidade Ambiental – O Desafio de ser Competitivo Protegendo o Meio Ambiente.** São Paulo, editora Pioneira, 2000.
- 23 LEITE, M. B.. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** Tese de doutorado (vinculada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul). Porto Alegre/RS, 236 p., 2001.

24 ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. In: IV SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS RECICLÁVEIS E SUAS APLICAÇÕES, São Paulo/SP, 2001. Disponível em <www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf> acessado no dia 12/11/2006.

25 PORTAL DO CONCRETO. **Concreto – Consistência**. Disponível em: www.portaldoconcreto.com.br/index.php?pagina=slump acessado no dia: 07/10/2006.

26 SJÖSTRÖM, Ch. **Durability and Sustainable Use of Building Materials**. In: SUSTANABLE USE OF MATERIALS. J. W. LIEWELLYN & H. DAVIES EDITORS. Londres: 1992

27 FRANÇA, V. H.. **Aderência Aço-concreto – Uma Análise do Comportamento do Concreto Fabricado com Resíduos de Borracha**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da faculdade de engenharia de Ilha Solteira). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira/SP, 128 p, 2004.

28 JOHN, V. M.. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição à Metodologia de Pesquisa**. Tese de doutorado (livre docência). Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 102 p, 2000.

29 MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2a edição, São Paulo/SP, Editora PINI, 1994.

30 ELDIN, N. N.; SENOUCCI, A. B. Rubber – tire particles as concrete aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**. pp 478-496, 1993.

-
- 31 TOUTANJI, H. A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. **Cement & Concrete Composites** 18. pp 135-139, 1996.
- 32 RAGHAVAN, D.; HUYNH, H. Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments. **Journal of Materials Science** 33, Nova Iorque, 1997.
- 33 ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, W. P.; HASPARYK, N. P.; ANDRADE, M.A.S.; BITENCOURT, R.M. **Adição de Borracha de Pneu ao Concreto Convencional e Compactado com Rolo**. In: ANAIS DO ENTAC.2006.
- 34 ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, I. M. **Tipos de Fibras e Propriedades do Concreto com Fibras**. In: 42º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza/CE, 2000.
- 35 AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F.; NIRSCHL, G. C.. **Análise Experimental da Resistência a Compressão do Concreto com Adição de Fibras de Borracha Vulcanizada**. 43º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu/Pr, 2001.
- 36 NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F. **Estudo de Dosagens de Concreto Contendo Fibras de Borracha Vulcanizada, Provenientes da Indústria da Recauchutagem de Pneus**. In: V CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, Juiz de Fora/MG, 2002.
- 37 AKASAKI, J. L.; SERNA ROS, P.; REYES, B.; TRIGO, A.P.M. **Avaliação da Resistência à Flexão do Concreto com Borracha de Pneu com Relação ao Concreto Convencional**. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Recife/PE, 2005.
- 38 MARTINS, I. R. F.; AKASAKI, J. L. **Avaliação da Adição de Fibras de Borracha de Pneus no Comportamento do CAD**. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, Recife/PE, 2005.

-
- 39 MARTINS, I. R. F. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Estadual Paulista), Ilha solteira/SP, 2005.
- 40 MARQUES, M. L.; MARQUES, A. C.; TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L. **Avaliação do Comportamento da Argamassa Adicionada de Diferentes Granulometrias de Borracha após Tratamento Superficial**. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Recife/PE, 2005.
- 41 MOSCA, A. M. A.; LINTZ, R. C. C.; CARNIO, M. **A Influência da Utilização da Borracha Vulcanizada nas Propriedades Mecânicas do Concreto**. 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. Recife/PE, 2005.
- 42 FRANÇA, V. H.; BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L.; SALLES, F. M. **Analysis of the Adherence Steel-concrete With Incorporation of Residues of Tires**. Disponível em: www.infohab.org.br acessado em 17/01/06.
- 43 NORAUTO. **Pneus: A garantia do melhor preço**. Disponível em: <http://www.norauto.pt/produtos/pneus.htm> Acessado em: 24/01/07.
- 44 PINHEIRO, E. G. **Modelos numéricos aplicados a vulcanização de pneus**. Dissertação de mestrado (vinculada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista), São Paulo/SP, 2001.
- 45 Petroflex. **Produtos e Serviços: A borracha**. Disponível em: <http://www.petroflex.com.br/> Acessado no dia: 24.01.2007.
- 46 CALLISTER JR, W. D.. **Ciência dos Materiais: uma Introdução**. Editora LTC. 5ª edição. Rio de Janeiro/RJ, 2002.
- 47 MONTENEGRO, R. S. P.; PAN, S. S. K. **Panorama do setor de borrachas**. 1998.

-
- 48 WIKIPEDIA. **A enciclopédia Livre: Borracha.** Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Borracha>> Acessado em: 12/10/2006.
- 49 SIMEÃO, F. Entrevista: **BSColway – Comprometimento social.** Disponível em: <http://www.fae.edu/intelligentia/includes/imprimir.asp?InglIdNoticia=15935>, acessado em: 24/01/07.
- 50 BERTOLLO, S. A. M.; FRENANDES JR, J. L.; VILLAVERDE, R. B.; MIGOTTO FILHO, D. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista Limpeza Pública**, n 54. 2000.
- 51 SOUZA, F. a.. **Utilização de Pneus Pós-consumo Como Combustível em Fornos de Cimento.** In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. São Paulo/SP, 2000.
- 52 ABIP. **Crescem as Alternativas para o Reaproveitamento de Pneus.** Disponível em: <http://www.abip.com.br/site/noticias/not_noticias_ler.php?id=418>, acessado no dia 24.01.2007.
- 53 AKASAKI, J. L.; SERNA ROS, P.; REYES, B.; TRIGO, A.P.M. **Avaliação da Resistência à Flexão do Concreto com Borracha de Pneu com Relação ao Concreto Convencional.** In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON. 2003
- 54 MARKETING AMBIENTAL. **Saiba mais Sobre o Processo de Recauchutagem.** Disponível em: <http://www.marketing.com.br/0_ambipneus_02.htm> Acessado em: 24/01/2007.
- 55 BSCOLWAY. **Notícias: Afinal, o que é pneu remoldado?** Disponível em: <http://www.bscolway.com.br/portal/canalbs/can_noticias_ler.php?id=169> Acessado em 24/03/2007.
- 56 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações.** Rio de Janeiro. 11p, 2005.

-
- 57 VERÇOSA, E. J. **Materiais de Concreto**. 3ª. edição, volume 2, Porto Alegre/RS, editora SAGRA, 1983.
- 58 COUTINHO, J S. **Agregados para Argamassas e Betões**. Materiais de Construção 1, Lisboa-Portugal, 1999.
- 59 GOGOLA, G. W. **Concreto de Cimento Portland – Influência das Propriedades dos Agregados no Desempenho**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós-graduação em construção civil da UFPR). Curitiba/Pr, 2003.
- 60 ISAIA, G. C. **Durabilidade do Concreto ou das Estruturas de Concreto? Reflexões Sobre o Tema**. WORKDUR. São José dos Campos/SP, 2000.
- 61 DUKE ENERGY INTERNATIONAL GERAÇÃO PARANAPANEMA/LACTEC. **Desenvolvimento de Metodologia Executiva e Pesquisa de Materiais de Reparos em Estruturas de Concreto (aparentes e submersas) de Barragens**. – MANUAL DE REPAROS. 2001
- 62 SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. Editora PINI, São Paulo/SP, 1998.
- 63 MORGAN, D. R. Compatibility of concrete repair materials and systems. **Construction and Building Materials**, vol 10, no 1, 57-67, 1996.
- 64 SILVA JR, J. Z. R.. **Argamassas para Reparo de Estruturas de Concreto**. Dissertação de mestrado vinculada ao programa de pós graduação em engenharia civil da Universidade de São Paulo), São Paulo/SP, 2001.
- 65 MORENO JR, RAFAEL. **Aderência de Argamassas de Reparo de Estruturas de Concreto**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós graduação em engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), São Paulo/SP, 2002.

-
- 66 PEÑA, M. R. G.. **Estudo da Fissuração Associada à Retração em Argamassas para Reparo em Estruturas de Concreto**. Dissertação de mestrado (vinculada ao programa de pós-graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). São Paulo/SP, 2004.
- 67 PAPAKONSTANTINOU, C. G.; TOBOLSKI, M. J. Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research** 36 pp 1686 – 1691, 2006.
- 68 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5743**: Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1989
- 69 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5744**: Cimento Portland – Determinação de resíduo insolúvel – Método de ensaio Rio de Janeiro/RJ, 1989.
- 70 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5745**: Cimento Portland – Determinação de anidrido sulfúrico – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1989.
- 71 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5747**: Cimento Portland – Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1989.
- 72 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7227**: Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileglicol – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1989.
- 73 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9203**: Cimento Portland – Análise química por complexometria – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1985.
- 74 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8347**: Cimento Portland Pozolânico – Análise química – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1992.

-
- 75 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1579:** Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 mm (no 200)- Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1991.
- 76 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11581:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1991.
- 77 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582:** Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Lê Chatelier – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1991.
- 78 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro/RJ, 2001
- 79 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro/RJ, 1998.
- 80 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 2003.
- 81 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218:** Determinação do teor de argila em torrões nos agregados – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1974.
- 82 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219:** Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1987.
- 83 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7220:** Avaliação das impurezas orgânicas húmicas das areias para concreto – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1976.

-
- 84 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776:** Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro/RJ, 1977.
- 85 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS..**NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro/RJ, 2001.
- 86 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937:** Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1987.
- 87 ZORDAN, S. E.; JOHN, W. M.. **Metodología de Avaliação do Potencial de Reciclagem de Resíduos.** Boletim técnico da escola Politécnica da USP, departamento de engenharia de construção civil. 11 p., São Paulo, 2004.
- 88 LI,G.; GARRICK, G.; EGGERS, J.; ABADIE, C.; STUBBLEFIELD, M. A.; PANG, S.S. Waste tire fiber modified concrete. **COMPOSITES Parte B: Engineering** 35, (2004) p 305-312.
- 89 GOMES FILHO, C. V. **Levantamento do Potencial de Resíduos de Borracha no Brasil e Avaliação de sua Utilização na Indústria da Construção Civil.** Dissertação de Mestrado. LACTEC/PRODETEC, CURITIBA, 2007. 112p
- 90 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento de Tronco de Cone.** Rio de Janeiro/RJ, 1998
- 91 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47:** Concreto – Determinação do Teor de ar em Concreto Fresco – Método Pressiométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- 92 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Moldagem e cura de corpos de prova, cilíndricos ou prismáticos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

-
- 93 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5739**: Ensaio de resistência à compressão axial simples, Rio de Janeiro/RJ, 1994
- 94 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**:. Ensaio de resistência à reação por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro/RJ, 1994.
- 95 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12142**: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro/RJ, 1992.
- 96 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12142**: Determinação do módulo de deformação estático. Rio de Janeiro/RJ. 1992.
- 97 AMERICAN STANDART of TECNOLOGY the MATERIALS. **ASTM C 1138**: Abrasion resistence of concrete (underwater method). West, Conshohocken, 1997.
- 98 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: 1995.
- 99 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão. Rio de Janeiro: 1987.
- 100 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Especificação. Rio de Janeiro: 1991.
- 101 NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influencia do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. São Paulo/SP EPUSP, 18 p – (boletim técnico da escola politécnica da USP, Departamento de engenharia de construção civil), 1998.
- 102 PETRUCCI, E. G. R.. **Concreto de Cimento Portland**. Rio de Janeiro, Globo, 1998.

103 MENEGUINE, E. C. A.; PAULON, V. A.. **Comportamento de Argamassas com o Emprego de Pó de Borracha.** In: 46º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2004.

104 SANTOS, A. C.; BARBOZA, , A. S. R.; GOMES, P. C. C.; LIMA, F. B. **Avaliação do Comportamento do Concreto com Adição de Borracha Obtida a Partir da Reciclagem de Pneus para Aplicação em Elementos Pré-moldados.** In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL e X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, São Paulo/SP, 2004.

105 PAPAKONSTANTONOU, C. G.; TOBOLSKI, M. J.. Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research** 36, 1686 – 1691, 2006.

106 ANDRIOLO, F. R.; SCANDIUZZI, L.. **Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaio.** PINI. São Paulo. 1986.

107 LOPES, M. D.; MARQUES, A. C.; RICCI, E. C.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L. **Estudo de Dosagens para Obter Concretos com Resíduos de Borracha de Pneu.** In: 47º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Recife/PE, 2005.

108 SCUSSEL, A. C. L.; LINTZ, R. C. C.; BRAZ, J. C. R.. **Influência da Utilização da Borracha Vulcanizada na Resistência à Compressão de Argamassas.** In: 47º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Recife/Pe, 2005.

109 SAKAI, E.; KASUGA, T.; SUGIYAMA, T.; ASAGA, K.; DAIMON, M.. Influence of superplasticizers on the hidration of cement and the pore structure of hardened cement. **Cement and Concrete Research**, 36, pp 2049-2053. 2006.

110 JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F.; TAMBA, S.; CISSÉ, I. K.. Properties of cement - rice husk mixture. **Construction and Building Materials**, 17, p 239-243, 2002.

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

112 FORTES, R. M.. **Proposta de Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto para Determinação da Aderência entre duas Camadas**. In: 33a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Florianópolis/SC, 2000.

113 FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; NIRSCHL, G. C.. **Fabricação de Blocos de Alvenaria Utilizando Resíduos de Borracha nos Compósitos de Concreto**. In: / CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL. Juiz de Fora/Mg, 2002.

114 SEGRE, N.; JOEKES, I.; GALVEZ, A. D.; RODRIGUES, J. A.. Rubber-mortar composites: effect of composition on properties. **Journal of Materials Science**, v 39, p. 3319-3327, 2004.

115 LIMA, I. S.; ROCHA, F. S.. **Concreto com Fibras de Borracha Vulcanizada e sua Utilização em Placas Pré-moldadas**. In: 46º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Florianópolis/SC, 2004.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)