

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo das propriedades de concreto massa com adição de
partículas de borracha de pneu**

Albéria Cavalcanti de Albuquerque

Porto Alegre
2009

ALBÉRIA CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE
CONCRETO MASSA COM ADIÇÃO DE
PARTÍCULAS DE BORRACHA DE PNEU**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre

2009

A345e Albuquerque, Albéria Cavalcanti de
Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de
borracha de pneu / Albéria Cavalcanti de Albuquerque. – 2009.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de
Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre,
BR-RS, 2009.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Co-orientador: Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

1. Pneus – Reciclagem. 2. Materiais compósitos. 3. Concreto – Propriedades.
I. Silva Filho, Luiz Carlos Pinto da, orient. II. Gama, João Luiz Calmon
Nogueira da, co-orient. III. Título.

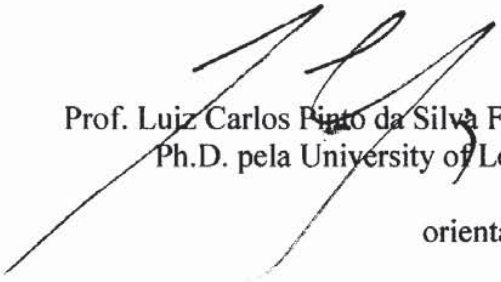
CDU-691.32(043)

ALBÉRIA CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE
CONCRETO MASSA COM ADIÇÃO DE
PARTÍCULAS DE BORRACHA DE PNEU**

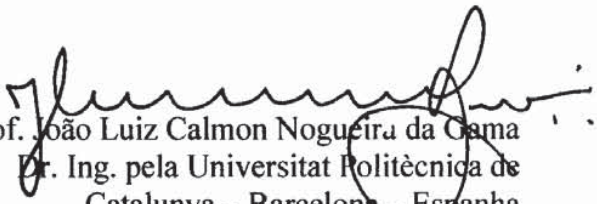
Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Concentração Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de fevereiro de 2009



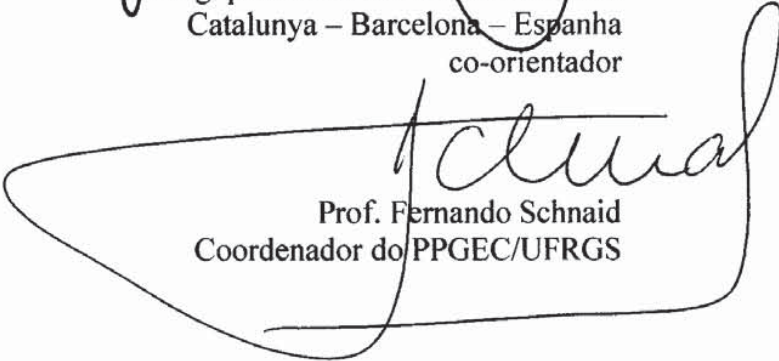
Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. pela University of Leeds

orientador



Prof. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Dr. Ing. pela Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona – Espanha

co-orientador



Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vladimir Antonio Paulon
(UNICAMP)
Ph.D. pela University of California at Berkeley

Profa. Rejane Maria Candiota Tubino
(UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Washington Peres Nuñez
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Walton Pacelli de Andrade
(ENGECONSOL)
Eng. pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora

Esse trabalho é dedicado a minha filha Mariana,
que transformou o improvável em fato.

AGRADECIMENTOS

Muito temos a agradecer, a muitas pessoas, em muitas etapas de nossas vidas.

Essa etapa da minha vida começou com uma entrevista com o engenheiro Newton, a quem sou imensamente grata por ter me encaminhado ao Laboratório mais completo da América do Sul em engenharia civil, o Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas, em Goiânia.

Tive a honra de ter como líder o engenheiro Walton Pacelli, um entusiasta da tecnologia do concreto, com quem aprendi muitas lições técnicas e de vida e a quem agradeço por ter me confiado o desenvolvimento desse projeto.

Sendo engenheira de materiais e mestre em engenharia mecânica, não teria ido muito longe sem o generoso ensinamento dos engenheiros Maurice, Zé Francisco, Moacir, Anne, João Bosco, a quem agradeço pelas orientações na prática da dosagem de concreto e dos ensaios de caracterização.

A viabilização desse projeto veio com a aprovação deste pelo CNPq e em seguida pela ANEEL que proveram, respectivamente, os recursos para bolsas de iniciação científica (CNPq/RHAE) e para aquisição de equipamentos e serviços, agradeço a essas entidades pelo importante suporte financeiro.

Agradeço a FURNAS por viabilizar o intercâmbio com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e assim possibilitar a concretização desse doutoramento, que foi abrilhantado pela participação dos professores Campagnolo, Denise Dal Molin e Paulo Monteiro, mentes iluminadas e generosas em seus ensinamentos.

Durante o desenvolvimento do projeto pude contar com a inestimável dedicação de todos os colegas do laboratório de FURNAS a quem serei eternamente grata e aqui vou citar alguns: à Nicole Hasparyk, pela paciência e importante contribuição na realização e análises das microscopias eletrônicas; aos engenheiros Ricardo Barbosa e Alexandre Castro, meu agradecimento pela elucidação do software para as análises estatísticas; ao engenheiro Sérgio Botassi a inestimável contribuição na análise do comportamento termomecânico; às engenheiras Luciana e Francesca pelo apoio profissional e emocional; aos bolsistas de iniciação científica e aos técnicos do Laboratório de Furnas, pela dedicação na realização dos ensaios.

A todos os colegas da Pós-Graduação da UFRGS, em especial à Luciane, Ângela e Liliani, pela constante alegria e boa vontade com que me auxiliaram nos momentos em que precisei.

Aos meus mestres, Luiz Carlos e Calmon, exemplos de entusiasmo e dedicação, agradeço imensamente pela confiança que em mim depositaram, pelas valiosas orientações e pelo precioso incentivo nos momentos de desânimo.

A toda minha família, mãe, pai, irmãos, tios, primas que estiveram sempre torcendo e orando por mim.

A minha filha Mariana, que se comportou tão bem acompanhando quietinha do seu berço a redação deste trabalho.

E como não poderia, jamais, deixar de agradecer ao meu companheiro de todas as horas, Alceu, sempre me incentivando com seu otimismo, confiança, alegria, carinho e amor.

Agradeço a Deus por todas as graças que tem derramado em minha vida, entre elas pessoas tão especiais como as que me ajudaram profissional ou emocionalmente para a conclusão deste trabalho, que Ele as abençoe igualmente.

"Loucura? Sonho? Tudo é loucura ou sonho no começo.
Nada do que o homem fez no mundo teve início de
outra maneira – mas já tantos sonhos se realizaram que
não temos o direito de duvidar de nenhum."

Monteiro Lobato

RESUMO

ALBUQUERQUE, A. C. Estudo das Propriedades de Concreto Massa com Adição de Partículas de Borracha de Pneu. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O aproveitamento de partículas de pneus inservíveis no concreto tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, pois se justifica como uma alternativa atraente de disposição desses resíduos ao mesmo tempo em que resulta em modificações das propriedades do concreto que podem ser benéficas para certas aplicações, que requerem características específicas, tais como maior capacidade de deformação e comportamento à fratura menos frágil do que o concreto convencional. Essas características do concreto com borracha de pneu (CBP) podem ser interessantes para a redução do risco de fissuração de concretos submetidos a variações volumétricas, caso típico dos concretos massa. Nesta pesquisa se buscou averiguar como a adição de partículas de pneu afeta as propriedades mecânicas, térmicas e viscoelásticas do concreto massa, com o intuito de verificar se era possível obter um compósito menos suscetível aos riscos de fissuração devido a efeitos térmicos. As dosagens de concreto massa com borracha de pneu estudadas foram analisadas em função do teor, da granulometria e do tratamento superficial aplicado às partículas de borracha de pneu. O programa experimental foi desenvolvido em três etapas. A primeira delas envolveu uma ampla faixa de teores de borracha, sendo realizados ensaios básicos para identificar a eficácia dos tratamentos superficiais em proporcionar uma boa interface borracha/matriz do concreto e o maior teor de substituição das partículas de borracha sem prejuízo das propriedades mecânicas. Nessa etapa foram também selecionadas amostras para análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura, a fim de correlacionar a qualidade da interface borracha/matriz do concreto com as características mecânicas. Na segunda etapa foram selecionados os parâmetros que resultaram em melhor desempenho dentre as variáveis analisadas na primeira etapa e buscou-se avaliar o efeito da adição de partículas de pneu nas propriedades referentes à tenacidade e à permeabilidade do concreto. Para o desenvolvimento da terceira etapa do estudo foram selecionadas duas composições mais promissoras dentre aquelas utilizadas na primeira e na segunda etapas, a fim de analisar o efeito da borracha de pneu nas propriedades térmicas, elásticas e viscoelásticas do concreto, bem como o comportamento termomecânico. Adicionalmente, algumas amostras foram submetidas a ensaios com vistas à avaliação de características referentes à durabilidade. Os resultados indicaram que o máximo aproveitamento da borracha de pneu no concreto, sem prejuízo considerável das propriedades mecânicas, ocorre para o teor de 10% de partículas de borracha de 1,5mm e 4,8mm em substituição parcial do volume de areia. Teores mais elevados e partículas de menor dimensão levaram a uma contínua redução das propriedades mecânicas e aumento do teor de ar aprisionado. Não houve diferença significativa de propriedades nem na microestrutura das amostras contendo partículas com e sem tratamento superficial. As análises termomecânicas indicaram que o uso de concretos com borracha de pneu pode ser uma alternativa eficiente para minimizar o risco de fissuras de origem térmica, quando comparados a um concreto convencional. Com base nos resultados obtidos até a idade de 2 anos, verifica-se que o consumo de 29 kg/m³ de borracha de pneu no concreto não prejudica as características de durabilidade do material.

Palavras-chave: concreto massa; reciclagem de borracha de pneu; materiais compósitos; propriedades térmicas; construção sustentável; durabilidade.

ABSTRACT

ALBUQUERQUE, A. C. Study of the Properties of Mass Concrete with the Addition of Tire Rubber Particles. 2009. Doctoral Thesis – Civil Engineering Post Graduation Program, UFRGS, Porto Alegre.

The use of waste tire rubber particles in concrete has been studied by several researchers, because it constitute both an attractive alternative for the final disposition of these residues and offers a possibility to modify certain concrete properties that might contribute for a better performance in certain applications that require specific characteristics, such as increased deformation capacity and more ductile behavior than conventional concrete. These characteristics of rubberized concretes might be interesting because they reduce the risk of cracking when concrete is subjected to volumetric changes, as occurs with mass concretes. In this research, it was studied how the introduction of rubber particles would affect the mechanical, viscoelastic and thermal properties of mass concretes, with the aim to check if it is possible to obtain a composite less susceptible to cracking due to thermal effects. The mixtures were analyzed based on the following features: rubber content, granulometry and surface treatment applied to the tire rubber particles. The experimental program was performed in three stages. The first one involved a wide range of mixtures, with varying rubber contents. At this stage, basic tests were carried out in order to identify how effective surface treatments were in generating a good tire rubber/matrix interface as well as how much high tire rubber contents would impact the mechanical properties of the concrete. Samples were selected for microanalysis through scanning electron microscopy to correlate the quality of the rubber/matrix interface with mechanical characteristics. In the second stage, the mixtures that resulted in the best performance in the first stage were further studied. The effects of the addition of tire rubber particles on the properties related to tenacity and permeability of concrete were evaluated. During the third stage, the best two mixtures used in the first and second stages were selected in order to analyze the effect of the addition of rubber particles in the thermal, elastic and viscoelastic properties of concrete, as well as in the thermo mechanical behavior of structures made with this material. Additionally, some samples were subjected to tests for the assessment of features related to the durability of concrete. The results indicated that the best use of tire rubber on concrete, without reducing the mechanical properties, occurs for a 10% content of rubber particles of 1.5mm and 4.8mm, used in partial replacement of the river sand. Higher contents and smaller particles led to greater reductions of the mechanical properties and an increase in the trapped air content. There was no significant difference either in the microstructure or in the properties of the samples containing particles with and without surface treatment. The thermo mechanical analysis indicated that the use of concrete with tire rubber can be an efficient alternative to minimize the risk of cracking due to thermal effects, compared with a conventional concrete. Based on the results obtained until the age of 2 years, the consumption of 29 kg/m³ of tire rubber on concrete did not seem to affect the durability characteristics of the material.

Key words: mass concrete; tire rubber recycle; composite materials; thermal properties; green construction; durability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	26
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	26
1.2. DELINEAMENTO DA ESTRATÉGIA DE ESTUDO	27
1.3. DEFINIÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA	28
1.4. HIPÓTESES	29
1.5. OBJETIVOS	29
1.6. VARIÁVEIS DA PESQUISA	30
1.6.1. Variáveis dependentes	30
1.6.2. Variáveis independentes	31
1.6.3. Variáveis de controle	31
1.7. ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2. O CONCRETO MASSA E O PROBLEMA TÉRMICO	33
2.1. PRINCÍPIOS DE CONCRETO MASSA	33
2.1.1. Exemplos de estruturas em concreto massa	35
2.1.2. O mecanismo de fissuração de origem térmica	38
2.1.3. Análise termomecânica do concreto	39

3. A PROBLEMÁTICA DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS.....	44
3.1. DESCARTE DE PNEUS INSERVÍVEIS	44
3.2. REGULAMENTAÇÃO PARA DISPOSIÇÃO DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS.....	47
3.3. COMPOSIÇÃO DA BORRACHA DE PNEU.....	49
3.4. POSSÍVEIS DESTINAÇÕES AMBIENTALMENTE ADEQUADAS PARA OS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS.....	52
3.5. POSSÍVEIS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	54
4. REVISÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM BORRACHA DE PNEU	56
4.1. PRODUÇÃO DAS PARTÍCULAS DE PNEU.....	57
4.2. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA DE PNEU NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA NO ESTADO FRESCO..	59
4.3. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA DE PNEU NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA NO ESTADO ENDURECIDO.....	64
4.3.1. Resistência à compressão	65
4.3.2. Resistência à tração.....	70
4.3.3. Propriedades elásticas.....	72
4.3.4. Propriedades referentes à durabilidade	76
4.3.5. Propriedades referentes ao conforto térmico e acústico	81

5. MATERIAIS E MÉTODOS	83
5.1. MATERIAIS.....	83
5.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	87
5.3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	89
5.4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	91
5.4.1. Análise de variância.....	92
5.4.2. Teste de Tukey.....	93
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS RESULTADOS – ETAPA 1	95
6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	96
6.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	99
6.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	102
6.4. MASSA ESPECÍFICA.....	105
6.5. AR APRISIONADO.....	108
6.6. ANÁLISE MICROESTRUTURAL	110
6.7. ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS DA ETAPA 1	115
6.7.1. Efeito da granulometria e do teor de borracha nas propriedades do concreto.....	115
6.7.2. Efeito do tratamento superficial da borracha nas propriedades do concreto.....	119

6.7.3. Estimativa da resistência à compressão do concreto com borracha de pneu.	120
6.7.4. Estimativa do módulo de elasticidade do concreto com borracha de pneu.	122
6.7.5. Conclusões Gerais da Etapa 1.	125

7. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS - ETAPA 2 127

7.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	128
7.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	130
7.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	132
7.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SIMPLES	134
7.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	137
7.6. TENACIDADE.....	139
7.7. PERMEABILIDADE	141
7.8. MASSA ESPECÍFICA.....	142
7.9. ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS DA ETAPA 2.....	145
7.9.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	145
7.9.2. Resistência à tração.....	147
7.9.3. Tenacidade.....	151
7.9.4. Massa específica e permeabilidade.....	153
7.9.5. Conclusões Gerais da Etapa 2.....	154

8. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS - ETAPA 3	158
8.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	159
8.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE	161
8.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	164
8.4. CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO	165
8.5. FLUÊNCIA	171
8.6. RETRAÇÃO AUTÓGENA	173
8.7. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA	176
8.8. CONDUTIVIDADE TÉRMICA	178
8.9. DIFUSIVIDADE TÉRMICA	179
8.10. CALOR ESPECÍFICO	180
8.11. ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DA TEMPERATURA	182
8.12. COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO COM BORRACHA DE PNEU	184
8.12.1. Metodologia utilizada na análise termomecânica	185
8.12.2. Análise térmica	189
8.12.3. Análise das tensões	192
8.13. ASPECTOS REFERENTES À DURABILIDADE	196
8.13.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade	196
8.13.2. Permeabilidade	197
8.13.3. Massa específica, índice de vazios e absorção	199

8.13.4. Aspecto visual das amostras de concreto.....	204
8.13.5. Análise microestrutural.....	207
9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	210
9.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS: RESUMO DAS TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO OBSERVADAS.....	210
9.1.1. Quanto à granulometria e ao teor de borracha de pneu.....	210
9.1.2. Quanto ao tratamento superficial.....	211
9.1.3. Quanto ao comportamento termomecânico.....	211
9.1.4. Quanto à durabilidade.....	212
9.1.5. Quanto ao custo e ao meio ambiente.....	212
9.2. CONCLUSÕES	213
9.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	214
REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	216
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	220
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	231
ANEXO A - RESOLUÇÃO CONAMA 258/2002.....	235
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	239
APÊNDICE B – DOSAGENS DE CONCRETO – ETAPA 1	241
APÊNDICE C – DOSAGENS DE CONCRETO – ETAPA 2.....	248
APÊNDICE D – DOSAGENS DE CONCRETO – ETAPA 3.....	253

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ponte Juscelino Kubistchek – Brasília.....	35
Figura 2: Bloco de fundação da Ponte Juscelino Kubistchek. (a) Preparação do bloco para concretagem com instalação das armaduras, (b) serpentinas de resfriamento e termômetro elétrico para monitoramento da temperatura.....	35
Figura 3: Concretagem do Bloco 3 da Estação Faria Lima – Linha 4 Amarela em São Paulo.	36
Figura 4: Vista da Casa de Força -Tomada d'água à jusante.....	37
Figura 5: Barragem em CCR no leito do rio.....	38
Figura 6: Fatores que influem na resposta termomecânica do concreto e, conseqüentemente, no risco de fissuração de estruturas massivas de concreto.....	40
Figura 7: Ábaco de coeficientes de restrição conforme ACI Committee 207.....	41
Figura 8: Incêndio em depósito de pneus em Oranienburg, Alemanha.....	46
Figura 9: Depósito de pneus inservíveis a céu aberto.....	46
Figura 10: Composição típica de pneus radiais para automóveis.....	51
Figura 11: Cadeia de reposição dos pneus.....	52
Figura 12: Raspagem da banda de rodagem de pneu para recauchutagem.....	57
Figura 13: Processo de trituração e separação de pneus inservíveis.....	57
Figura 14: Abatimento x %Borracha.....	59
Figura 15: Trabalhabilidade medida pelo teste VeBe.....	60
Figura 16: Corpo-de-prova ilustrando a segregação das partículas de borracha. A caneta indica a região de segregação que, na moldagem, era o topo do corpo-de-prova.	61
Figura 17: Teor de ar incorporado x %Borracha.....	62
Figura 18: Massa específica x %Borracha.....	63
Figura 19: Massa específica (91 dias) x Massa Específica Vebe.....	63
Figura 20: Resistência à Compressão (91 dias) x Massa Específica Vebe.....	64
Figura 21: Resistência à compressão relativa em função da fração volumétrica de borracha de pneu no concreto.....	65

Figura 22: Resistência à compressão relativa em função do volume de borracha no concreto comparada ao modelo proposto por Popovics.....	67
Figura 23: Resistência à compressão relativa em função do volume de borracha no concreto comparada ao modelo SRF proposto por KHATIB e BAYOMY.....	67
Figura 24: Efeito do tratamento superficial das partículas de borracha na resistência do concreto.....	68
Figura 25 – Interface pasta de cimento (a) com a partícula de borracha sem tratamento e (b) com a borracha tratada com NaOH.....	69
Figura 26: Efeito da adição de borracha de pneu nas propriedades mecânicas do concreto.....	71
Figura 27: Resistência à tração por compressão diametral x % borracha de pneu.....	71
Figura 28: Módulo de elasticidade secante em função do tipo de borracha de pneu.....	72
Figura 29: Diagrama tensão x deformação para determinação da tenacidade.....	74
Figura 30: Resistência à abrasão da pasta de cimento com partículas de pneu.....	78
Figura 31 – Evidência da área carbonatada de amostras de argamassa na idade de 1 ano (a) sem borracha de pneu e (b) com 30% de borracha de pneu em substituição ao agregado.....	78
Figura 32: Superfície das placas de concreto expostas ao fogo. (a) referência (sem borracha de pneu) e (b) contendo 3% de borracha de pneu.....	80
Figura 33: Granulometria das partículas de borracha de pneu – D _{máx} 0,42 mm.....	85
Figura 34: Granulometria das partículas de borracha de pneu – D _{máx} 1,5 mm.....	86
Figura 35: Granulometria das raspas/fibras de borracha de pneu (comprimento nominal = 10 mm) – Classificação granulométrica com D _{máx} de 4,8 mm.....	86
Figura 36: Morfologia dos grânulos de borracha de pneu.....	86
Figura 37: Morfologia das fibras (raspas) de borracha de pneu.....	86
Figura 38: Dosagens e propriedades analisadas em cada etapa do programa experimental.....	88
Figura 39: Resistência à compressão dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.....	97
Figura 40: Agrupamento de resultados homogêneos de resistência à compressão conforme teste de Tukey em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.....	98

Figura 41: Módulo de elasticidade dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.....	100
Figura 42: Agrupamento de resultados homogêneos de módulo de elasticidade conforme teste de Tukey, em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.....	101
Figura 43: Resistência à tração por compressão diametral nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.....	103
Figura 44: Agrupamento de resultados homogêneos de resistência à tração por compressão diametral conforme teste de Tukey em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.....	104
Figura 45: Massa específica dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.	106
Figura 46: Agrupamento de resultados homogêneos de massa específica do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) da granulometria da borracha, b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.....	107
Figura 47: Teor de ar aprisionado no concreto fresco em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.....	108
Figura 48: Agrupamento de resultados homogêneos do teor de ar aprisionado no concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha e (c) do tratamento superficial.....	109
Figura 49: Espectro de raios-X gerado pela microanálise de uma partícula de borracha.	111
Figura 50: REF. Aspecto geral do concreto de referência. Ar aprisionado = 3,8%.....	112
Figura 51: REF. Região de interface agregado/matriz.....	112
Figura 52: 0,42N10. Aspecto geral da amostra. Grande incidência de bolhas de ar em menor tamanho. Ar aprisionado = 4,0%.....	112
Figura 53: 0,42N10. Interface agregado/pasta de cimento e região de fraca aderência na interface borracha/pasta de cimento.....	112
Figura 54: 0,42T10. Aspecto geral da amostra. Grande incidência de bolhas de ar. Ar aprisionado = 4,6%.....	112
Figura 55: 0,42T10. Interface borracha/pasta de cimento. Boa aderência à direita e fraca aderência à esquerda da partícula de borracha.....	112
Figura 56: 1,5N10. Nas amostras são encontradas partículas com boa e má aderência. Ar aprisionado = 2,8%.....	113

Figura 57: 1,5N10. Detalhe de uma interface. Boa aderência à esquerda e fraca aderência à direita da partícula de borracha.....	113
Figura 58: 1,5T10. Aspecto geral da amostra. Observam-se vazios no contorno da partícula de borracha. Ar aprisionado = 3,2%.....	113
Figura 59: 1,5T10. Região de interface exibindo boa interação borracha/matriz de cimento. Rugosidade sobre a superfície da partícula.....	113
Figura 60: 4,8N10. Vista geral do concreto. Ar aprisionado = 2,1%.....	114
Figura 61: 4,8N10. Partícula de borracha parece ter sido rompida durante o ensaio. O contorno na interface denota fraca aderência.	114
Figura 62: 4,8T10. Aspecto geral da amostra. Bolhas de ar maiores e com menor incidência. Ar aprisionado = 1,9%.....	114
Figura 63: 4,8T10. Região de interface exibindo boa aderência.....	114
Figura 64: 4,8T10. Aspecto geral da amostra exibindo vazios formados pelo “descolamento/ arrancamento” de partículas de borracha durante o ensaio de tração por compressão diametral.....	114
Figura 65: Resistência à compressão relativa das diversas dosagens de CBP em relação à referência.	116
Figura 66: Resistência à compressão relativa média desta pesquisa em relação aos resultados de outros pesquisadores.....	116
Figura 67: Resistência à tração por compressão diametral das diversas dosagens de CBP em relação à referência.	117
Figura 68: Módulo de elasticidade relativo das diversas dosagens de CBP em relação à referência.	118
Figura 69: Massa específica relativa das diversas dosagens de CBP em relação à referência.	119
Figura 70: Regressões não-lineares para predição da resistência à compressão do concreto com borracha de pneu em função das relações volumétricas água/cimento e ar incorporado/cimento.....	122
Figura 71: Resultados dos módulos de elasticidade determinados nesta pesquisa em função de modelos teóricos para previsão do módulo de elasticidade.....	123
Figura 72: Módulo de elasticidade calculado a partir dos modelos normalizados em comparação com os módulos de elasticidade calculados a partir das regressões não-lineares.....	125
Figura 73: Resistência à compressão dos concretos nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.	128

Figura 74: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à compressão, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	129
Figura 75: Módulo de elasticidade dos concretos nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	130
Figura 76: Agrupamento de resultados homogêneos do módulo de elasticidade, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	131
Figura 77: Resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	132
Figura 78: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração por compressão diametral, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	133
Figura 79: Resistência à tração simples nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	135
Figura 80: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração simples, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	136
Figura 81: Resistência à tração na flexão nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	137
Figura 82: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração na flexão, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	138
Figura 83: Tenacidade nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	139
Figura 84: Agrupamento de resultados homogêneos da tenacidade do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	140
Figura 85: Permeabilidade à água sob pressão na idade de 60 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	141
Figura 86: Agrupamento de resultados homogêneos da permeabilidade à água sob pressão, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha e (b) do tratamento superficial.....	142
Figura 87: Massa específica nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.....	143
Figura 88: Agrupamento de resultados homogêneos da massa específica do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.....	144

Figura 89: Resistência à compressão e módulo de elasticidade relativo das diversas dosagens de CBP em relação à referência.	146
Figura 90: Resistência à compressão relativa em função do volume de borracha na areia, comparada ao modelo proposto na Equação 24.	147
Figura 91: Resistência à tração relativa das diversas dosagens de CBP em relação à referência.	148
Figura 92: Resistência à tração relativa em função do volume de borracha na areia, comparada ao modelo proposto na Equação 24.	148
Figura 93: Resistência à tração direta do concreto com borracha de pneu em função: (a) da resistência à tração por compressão diametral; (b) da resistência à tração na flexão; e (c) da resistência à compressão axial.	150
Figura 94: Curvas de tenacidade em função do teor da borracha na idade de 91 dias para amostras de concreto contendo partículas de pneu de 1,5 mm sem tratamento superficial.	152
Figura 95: Curvas de tenacidade em função do teor da borracha na idade de 91 dias para amostras de concreto contendo partículas de pneu de 1,5 mm com tratamento superficial.	152
Figura 96: Região de interface pasta/agregado natural.	155
Figura 97: Região de interface pasta/partícula de pneu sem tratamento superficial.	155
Figura 98: Região de interface pasta/partícula de pneu com tratamento superficial.	156
Figura 99: Argamassa modificada com 5% de polímero estireno-butadieno em relação à massa de cimento. Formação de filme polimérico.	157
Figura 100: Argamassa modificada com 20% de polímero estireno-butadieno em relação à massa de cimento. Filme polimérico interconectado à matriz cimentícia.	157
Figura 101: Resistência à compressão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.	159
Figura 102: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à compressão do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	160
Figura 103: Módulo de elasticidade em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.	161
Figura 104: Agrupamento de resultados homogêneos do módulo de elasticidade do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	163

Figura 105: Módulo de Elasticidade (sem os resultados aos 364 dias): (a) Análise de variância e (b) agrupamento de resultados homogêneos conforme teste de Tukey.....	163
Figura 106: Resistência à tração na flexão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.....	164
Figura 107: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração na flexão, conforme teste de Tukey, em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.....	165
Figura 108: Capacidade de deformação média em função da tensão e do tipo de borracha de pneu, nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.	147
Figura 109: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, das deformações a 95% da carga de ruptura na face tracionada do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	169
Figura 110: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, das deformações a 95% da carga de ruptura na face comprimida do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	169
Figura 111: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do módulo de elasticidade na face tracionada do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	170
Figura 112: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do módulo de elasticidade na face comprimida do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	170
Figura 113: Evolução da fluência específica em função do tempo e do tipo de borracha de pneu, a partir das idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.	172
Figura 114: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da fluência específica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	173
Figura 115: Retração autógena do concreto após (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias de cura.....	175
Figura 116: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da variação autógena do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	176
Figura 117: Coeficiente de dilatação térmica em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.....	177
Figura 118: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do coeficiente de dilatação térmica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	178
Figura 119: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da condutividade térmica do concreto em função do tipo de borracha.....	179

Figura 120: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da difusividade do concreto em função do tipo de borracha.	180
Figura 121: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do calor específico do concreto em função do tipo de borracha.	181
Figura 122: Evolução da elevação adiabática da temperatura em função do tipo de borracha de pneu durante o período de ensaio: (a) até 24 horas e (b) até 28 dias.	182
Figura 123: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da fluência específica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	183
Figura 124: Módulo de elasticidade em função do tempo.	186
Figura 125: Resistência à tração na flexão em função do tempo.	186
Figura 126: Fluência específica em função do tempo.	186
Figura 127: Seção transversal e malha de elementos finitos da estrutura de concreto analisada.	187
Figura 128: Isotermas exibindo o gradiente de temperatura da superfície ao núcleo do (a) concreto de referência (CC) após 144h, (b) do concreto com grânulos de pneu (CG) após 128h e (c) do concreto com fibras de pneu (CF) após 144h.	189
Figura 129: Evolução da temperatura na interface concreto-rocha (nó 273).	191
Figura 130: Evolução da temperatura no núcleo dos concretos (nó 279).	191
Figura 131: Evolução da temperatura na superfície dos concretos (nó 321).	191
Figura 132: Evolução das tensões de tração na interface concreto-rocha (Elemento 530)	193
Figura 133: Evolução das tensões de tração no núcleo dos concretos (Elemento 427).	193
Figura 134: Evolução das tensões de tração na superfície dos concretos (Elemento 511)	193
Figura 135: Concreto de referência (CC): Evolução das tensões de origem térmica x resistência à tração do concreto (Elemento 427).	195
Figura 136: Concreto com fibras de pneu (CF): Evolução das tensões de origem térmica x resistência à tração do concreto (Elemento 427).	195
Figura 137: Concreto com grânulos de pneu (CG): Evolução das tensões de origem térmica x resistência à tração do concreto (Elemento 427).	195
Figura 138: Permeabilidade à água sob pressão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.	198
Figura 139: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da permeabilidade do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	199

Figura 140: Absorção por imersão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.....	200
Figura 141: Índice de vazios em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.....	200
Figura 142: Massa específica em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.....	200
Figura 143: Absorção por capilaridade em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.....	201
Figura 144: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da absorção por imersão do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	202
Figura 145: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do índice de vazios do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	203
Figura 146: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da massa específica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	203
Figura 147: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da absorção por capilaridade do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.	204
Figura 148: Aspecto geral dos corpos-de-prova aos 364 e 728 dias de idade. (a) Dosagem de referência; (b) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por grânulos de borracha de pneu; (c) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por fibras de pneu.	205
Figura 149: Aspecto interno dos corpos-de-prova aos 364 e 728 dias de idade. (a) Dosagem de referência; (b) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por grânulos de borracha de pneu; (c) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por fibras de pneu.	206
Figura 150: Micrografias da microestrutura dos concretos aos 91 e 728 dias de idade. (a) Referência; (b) Substituição de 10% do volume areia por grânulos de borracha de pneu; (c) Substituição de 10% do volume areia por fibras de pneu.	208
Figura 151: Aspecto superficial de partículas de pneu: (a) antes da incorporação ao concreto; (b) após 91 dias de incorporação ao concreto; (c) após 728 dias de incorporação ao concreto.....	209

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades nominais da borracha de pneu.....	58
Tabela 2: Valores de tenacidade conforme regiões A, A1 e A2 da Figura 28.....	75
Tabela 3: Absorção de água por imersão e perda de massa por ataque de HCl.....	77
Tabela 4: Características básicas dos materiais empregados na pesquisa.....	85
Tabela 5: Procedimentos realizados para caracterização dos materiais.....	89
Tabela 6: Procedimentos realizados para caracterização dos concretos.....	90
Tabela 7: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à compressão.....	98
Tabela 8: Análise da variância aplicada aos resultados de módulo de elasticidade.....	101
Tabela 9: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	104
Tabela 10: Análise da variância aplicada aos resultados de massa específica.....	107
Tabela 11: Análise da variância aplicada aos resultados de ar aprisionado.....	109
Tabela 12: Amostras selecionadas para análise microestrutural.....	111
Tabela 13: Modelos normalizados e equações obtidas a partir de regressões não-lineares, para predição do módulo de elasticidade a partir da resistência efetiva do concreto.....	123
Tabela 14: Valores do módulo de elasticidade calculados a partir dos modelos normalizados e dos modelos obtidos das análises de regressão não-linear.....	124
Tabela 15: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à compressão.....	129
Tabela 16: Análise da variância aplicada aos resultados de módulo de elasticidade.....	131
Tabela 17: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	133
Tabela 18: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração simples.....	135
Tabela 19: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão.....	138
Tabela 20: Análise da variância aplicada aos resultados de tenacidade a 1,5 mm de deslocamento.....	140
Tabela 21: Análise da variância aplicada aos resultados de permeabilidade à água sob pressão.....	142
Tabela 22: Análise da variância aplicada aos resultados de massa específica.....	144

Tabela 23: Identificação e descrição das amostras testadas na segunda fase da pesquisa.	153
Tabela 24: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à compressão.....	160
Tabela 25: Análise da variância aplicada aos resultados de módulo de elasticidade.....	162
Tabela 26: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão.	164
Tabela 27: Análise da variância – Capacidade de deformação na face tracionada.....	168
Tabela 28: Análise da variância – Capacidade de deformação na face comprimida.....	168
Tabela 29: Análise da variância – Módulo de elasticidade na face tracionada.....	168
Tabela 30: Análise da variância – Módulo de elasticidade na face comprimida.....	168
Tabela 31: Análise da variância aplicada aos resultados de fluência específica.....	173
Tabela 32: Análise da variância - Retração autógena.	176
Tabela 33: Análise da variância - Coeficiente de dilatação térmica.....	177
Tabela 34: Análise da variância – Condutividade térmica.....	179
Tabela 35: Análise da variância - Difusividade térmica.....	180
Tabela 36: Análise da variância - Calor específico.....	181
Tabela 37: Análise da variância - Elevação adiabática da temperatura.....	183
Tabela 38: Resultados médios de ensaio das propriedades térmicas.....	185
Tabela 39: Resultados médios de ensaio das propriedades mecânicas.....	185
Tabela 40: Condições executivas.....	188
Tabela 41: Análise da variância aplicada aos resultados da permeabilidade.....	198
Tabela 42: Análise da variância aplicada aos resultados da absorção por imersão.....	201
Tabela 43: Análise da variância aplicada aos resultados do índice de vazios.....	201
Tabela 44: Análise da variância aplicada aos resultados da massa específica.....	202
Tabela 45: Análise da variância aplicada aos resultados da absorção por capilaridade....	202

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial será realizada uma breve apresentação do problema de pesquisa que constitui o cerne deste trabalho, que se relaciona com as questões de *prevenção da fissuração em concretos massa e definição de uma alternativa adequada para disposição final de pneus inservíveis*, sendo estes temas discutidos mais detalhadamente nos capítulos subsequentes. Serão também apresentados, neste capítulo, os questionamentos a serem respondidos pela pesquisa, as hipóteses formuladas e a estratégia desenvolvida para testar as hipóteses e responder os questionamentos.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas obras que utilizam grandes massas de concreto, um dos principais problemas enfrentados é o controle da *fissuração de origem térmica*, resultante das variações volumétricas do concreto, que ocorrem em função do calor gerado pela hidratação do cimento sob determinadas condições de restrição à deformação. A solução desse problema requer a seleção de materiais e/ou processos que impliquem na redução do calor de hidratação do cimento e das tensões geradas durante o resfriamento, ou no aumento da capacidade de deformação do concreto. O incremento da capacidade de deformação pode traduzir bem o conceito de extensibilidade, apresentado por Mehta e Monteiro (1994), para quem um concreto com risco mínimo de fissuração deve ter um *alto grau de extensibilidade*, ou seja, baixo módulo de deformação, alta fluência e alta resistência à tração.

O aproveitamento de partículas de *pneus inservíveis* no concreto tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, pois se justifica em uma alternativa de disposição desses resíduos e modificação das propriedades do concreto para atendimento a requisitos específicos de algumas aplicações em que o isolamento térmico e acústico e a tenacidade do material são propriedades relevantes. Apesar das pesquisas indicarem que o Concreto com Borracha de Pneu (CBP) apresenta menor resistência à compressão e à tração, o mesmo apresenta maior

capacidade de deformação e comportamento à fratura menos frágil, indicando uma maior capacidade de absorção de energia quando comparado ao concreto convencional (LI *et al.*, 1998; KHATIB e BAYOMY, 1999; TOPÇU, 1995; TOUTANJI 1996). Esse comportamento foi atribuído à aptidão da borracha, atuando como agregado, de suportar grande deformação elástica antes da fratura do concreto. Essa característica do concreto com borracha de pneu pode ser interessante para a redução do risco de fissuração de concretos submetidos a variações volumétricas, como é o caso dos *concretos massa*.

Além do viés técnico de controle da fissuração térmica, um aspecto de grande relevância para justificar a utilização da borracha de pneu no concreto são os benefícios ecológicos que podem ser obtidos pela minimização dos problemas ambientais e sociais gerados pela estocagem de pneus inservíveis e pela redução do uso de agregados naturais. A verificação da viabilidade de obter estes ganhos pela incorporação de partículas de borracha extraída de pneus em traços de concreto massa foi a principal motivação da presente pesquisa. Cabe salientar que a pesquisa de doutorado proposta está inserida num projeto de maior âmbito¹, cujo objetivo é estudar as características de concretos com borracha de pneu com vistas à aplicação em estruturas massivas, buscando identificar e caracterizar as alterações em suas propriedades térmicas, elásticas e viscoelásticas, em comparação a um concreto sem borracha.

1.2. DELINEAMENTO DA ESTRATÉGIA DE ESTUDO

A estratégia de estudo adotada para desenvolver o trabalho proposto consistiu, em primeiro lugar, na realização de uma intensa revisão bibliográfica referente ao uso de partículas de pneu em materiais cimentícios, de modo a conhecer o estado da arte e, a partir deste, identificar as linhas de pesquisa mais promissoras. Este levantamento subsidiou, ainda, a definição das diretrizes a respeito de tipos, formas e granulometrias das partículas de pneu, bem como o processo mais adequado de incorporação destas ao concreto.

Tendo revisado os parâmetros associados ao problema de fissuração de origem térmica do concreto massa e conhecendo o estado da arte do uso das partículas de pneu no concreto foi possível elaborar os questionamentos e hipóteses a serem respondidos pela pesquisa e definir os objetivos gerais e específicos do programa experimental, apresentados nos próximos itens.

¹ Esse projeto contou com o apoio do CNPq e da ANEEL que proveram, respectivamente, os recursos para bolsas de iniciação científica (CNPq/RHAE) e para ensaios de laboratório e aquisição de equipamentos, tendo como entidade executora Furnas Centrais Elétricas S/A.

Com base no número e tipo de variáveis a serem testadas, bem como no tempo e custo dos ensaios a serem realizados, foi estabelecido um programa experimental constituído de três fases, descrito detalhadamente no Capítulo 5. Resumidamente, a estratégia adotada na ETAPA 1 foi estudar um maior número de variáveis independentes, avaliando seu impacto nas características básicas dos concretos resultantes. A partir da análise destes dados iniciais foram selecionadas, para a ETAPA 2, as variáveis independentes que surtiram efeito significativo e positivo com relação às hipóteses formuladas, sendo então as mesmas estudadas em maior detalhe, com maior variação nos seus níveis. Por fim, foram eleitos os fatores mais promissores e avaliados os seus efeitos nas características de desempenho mais impactantes para o concreto massa (ETAPA 3). Os resultados experimentais foram submetidos a testes estatísticos de análise de variância (ANOVA) e de comparação múltipla entre as médias (TUKEY) para determinar o nível de significância da influência das variáveis independentes sobre as propriedades analisadas. Adicionalmente, simulações de estruturas reais foram executadas para estimar qual o efeito potencial do emprego de concretos massa com incorporação de borracha. Estas análises combinadas subsidiaram o estabelecimento das conclusões da pesquisa.

1.3. DEFINIÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA

Após a realização da pesquisa bibliográfica e tendo como referência a estratégia acima apresentada, os seguintes questionamentos foram propostos para esta tese:

- a) qual a quantidade e a granulometria de borracha a ser utilizada no concreto, para maximizar o aproveitamento do resíduo e minimizar o prejuízo nas propriedades mecânicas?
- b) o concreto com borracha de pneu resiste melhor às variações volumétricas de origem térmica do que o concreto sem borracha?
- c) cabe tratar superficialmente a borracha a fim de proporcionar melhor aderência possível entre esta e a matriz do concreto?
- d) existe correlação entre a qualidade da interface borracha / matriz do concreto e as características mecânicas do Concreto com Borracha de Pneu (CBP)?
- e) a presença da borracha de pneu no concreto prejudica as características de durabilidade desse material?

1.4. HIPÓTESES

Com o objetivo de responder aos questionamentos apresentados e de traçar as diretrizes para o programa experimental, as seguintes hipóteses de trabalho foram formuladas:

- a) é possível determinar um teor e uma granulometria para as partículas de borracha de pneu a serem incorporadas ao concreto que proporcione aumento da deformabilidade, sem prejuízo considerável da resistência mecânica;
- b) o uso de borracha de pneu no concreto massa aumenta seu grau de extensibilidade e, conseqüentemente, reduz os riscos de fissuração de origem térmica;
- c) existem substâncias que podem atuar como agente de acoplamento, melhorando a qualidade da ligação interfacial borracha/matriz do concreto;
- d) a presença da borracha de pneu no concreto não interfere na durabilidade desse material.

1.5. OBJETIVOS

O objetivo principal proposto para o presente trabalho foi:

Identificar a quantidade e a granulometria de borracha de pneu ideal a ser utilizada para confecção de concretos massa com comportamento termomecânico superior aos concretos existentes.

Como objetivos específicos definiram-se:

- a) Avaliar o efeito da variação dos teores e granulometria das partículas de borracha, e a eficiência de eventuais tratamentos superficiais das mesmas, por meio de ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, tração e tenacidade;
- b) Verificar a eficiência de diferentes tipos de tratamentos superficiais aplicados na borracha antes da incorporação ao concreto;
- c) Analisar e classificar a qualidade da interface borracha/matriz do concreto por meio de microscopia eletrônica de varredura;

- d) Avaliar o efeito da borracha de pneu nas propriedades de capacidade de deformação, fluência e propriedades térmicas do concreto;
- e) Avaliar a durabilidade do CBP por meio de testes de permeabilidade à água sob pressão, absorção por imersão e absorção por capilaridade.

1.6. VARIÁVEIS DA PESQUISA

Para facilitar o entendimento do trabalho, dada a complexidade do programa experimental, são apresentadas a seguir todas as variáveis de estudo adotadas ao longo das diferentes etapas do trabalho. A seleção das mesmas foi efetuada levando em consideração:

- as características do concreto (variáveis dependentes ou de resposta), que se relacionam ou influenciam os questionamentos e hipóteses a serem testados;
- os fatores de estudo que poderiam interferir nas características acima (variáveis independentes ou de entrada), sobre os quais se desejava incrementar o conhecimento;
- os fatores que sabidamente intervêm nas propriedades do concreto e que precisaram ser controlados (variáveis de controle) ao longo do desenvolvimento experimental.

1.6.1. Variáveis dependentes

- a) resistência à compressão;
- b) módulo de elasticidade;
- c) resistência à tração por compressão diametral;
- d) resistência à tração simples;
- e) resistência à tração na flexão;
- f) tenacidade;
- g) capacidade de deformação sob carregamento rápido;
- h) fluência;
- i) retração autógena;
- j) coeficiente de expansão térmica;
- k) condutividade;

- l) difusividade;
- m) calor específico;
- n) elevação adiabática da temperatura;
- o) permeabilidade;
- p) absorção;
- q) massa específica;
- r) índice de vazios.

1.6.2. Variáveis independentes

- a) granulometria da borracha;
- b) tipo de tratamento superficial da borracha de pneu;
- c) teor de borracha;
- d) idade de ensaio;
- e) tipo de borracha (procedente de recauchutagem ou trituração de pneus de caminhão e ônibus);

1.6.3. Variáveis de controle

- a) relação água/cimento;
- b) temperatura;
- c) umidade.

1.7. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em nove capítulos, conforme descrito a seguir:

No *Capítulo 1* é realizada uma breve contextualização e apresentada a estratégia da pesquisa, os objetivos, hipóteses e variáveis de estudo, bem como a estrutura do trabalho.

No *Capítulo 2* é feita uma introdução ao concreto massa e ao problema de fissuração de origem térmica, bem como revisados os critérios utilizados na análise termomecânica do concreto. São descritas, também, algumas práticas de execução empregadas para minimizar a elevação da temperatura, além de apresentados alguns exemplos de estruturas em concreto massa.

No *Capítulo 3* é discutido o problema da disposição inadequada dos pneus inservíveis, seu impacto ao meio ambiente e à saúde pública, sendo apresentadas a legislação pertinente e algumas alternativas de destinação ambientalmente adequadas para esses pneumáticos.

O *Capítulo 4* contém um resumo do estado da arte relativo aos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu, enfatizando as propriedades físicas e mecânicas dos materiais no estado fresco e endurecido, as características referentes à durabilidade e descrição das tentativas de melhoria de aderência das partículas de pneu à matriz cimentícia.

No *Capítulo 5* os materiais e o desenvolvimento experimental são detalhados, bem como são apresentados os métodos estatísticos empregados para a análise dos resultados. Adicionalmente, são listadas as metodologias de ensaio para avaliação dos materiais e dos concretos.

Nos *Capítulos 6 a 8* são apresentados os resultados e análises das Etapas 1, 2 e 3 do programa experimental, respectivamente, e os critérios de seleção de variáveis na evolução de uma etapa para outra.

No *Capítulo 9* estão as considerações finais e conclusões extraídas dos resultados obtidos, bem como sugestões de pesquisas futuras abordando variáveis que podem complementar os resultados obtidos neste trabalho.

2. O CONCRETO MASSA E O PROBLEMA TÉRMICO

Um dos problemas mais importantes associados à confecção de concretos massa é a análise térmica, que envolve a avaliação da possibilidade de fissuração devido ao desenvolvimento de temperaturas diferenciadas entre a superfície do concreto e o seu interior, dando origem a tensões de tração que podem superar a capacidade resistente do material, especialmente em baixas idades. Esse capítulo revisa este assunto, iniciando com a apresentação de algumas aplicações do concreto massa, explicando o mecanismo de fissuração e descrevendo as práticas de prevenção, com ênfase na análise termomecânica para avaliação do risco de fissuração.

2.1. PRINCÍPIOS DE CONCRETO MASSA

Concreto massa é qualquer volume de concreto com dimensões grandes o suficiente que requeiram medidas de controle do calor gerado na hidratação do cimento e das mudanças de volume dela decorrentes, de modo a minimizar o risco de fissuração. O projeto das estruturas de concreto massa é, geralmente, baseado na estabilidade, durabilidade, economia e comportamento térmico, sendo a resistência frequentemente um requisito secundário (ACI, 2005), dado o grande volume do material, que permite a obtenção de tensões de trabalho reduzidas.

Normalmente, o controle do gradiente de temperatura no concreto massa é efetuado por meio da seleção dos materiais, da otimização da mistura e da adoção de algumas práticas de execução especiais.

Quanto à seleção de materiais, recomenda-se o uso de adições minerais em substituição parcial do volume de cimento. A presença das adições reduz o calor gerado nas idades iniciais, uma vez que a quantidade de clínquer presente na mistura é menor e boa parte das reações de hidratação passa a ocorrer em idades mais avançadas (NEVILLE, 1997). As adições mais utilizadas são a sílica ativa, num teor de 8 a 10%, em relação ao peso de

cimento; as pozolanas naturais ou de argila calcinada, em teores de 12 a 40%, e a escória de alto-forno, na faixa de 30 a 70% (DIAS *et al.* 1990; TAM *et al.* 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996; FURNAS, 1997; LIDUÁRIO, 2003). Porém, outros minerais, tais como metacaulim, cinzas volantes e cinza de casca de arroz, também têm sido utilizados com resultados promissores (CALLEJA, 1969; ELETROBRÁS, 1989; ROY, 1989; KHAYAT e AİTCIN, 1993; SABIR *et al.*, 2001; VIEIRA *et al.*, 2005; LIDUÁRIO, 2006).

Alternativamente, é possível tentar reduzir o consumo de aglomerantes com uso de aditivos incorporadores de ar e/ou plastificantes, e emprego de agregados com dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$) de até 152mm, embora nos últimos anos a prática em barragens tenha requerido concretos com $D_{m\acute{a}x}$ de 38mm ou 50mm (FURNAS, 1997). O uso desses materiais permite obter um menor consumo de água, permitindo o uso de uma relação água/cimento mais baixa e, conseqüentemente, um menor consumo de cimento para uma dada resistência (RAMACHANDRAN *et al.*, 1995; AİTCIN, 2000).

Além da seleção dos materiais, algumas práticas de construção podem ser adotadas para ajudar a controlar o gradiente de temperatura gerado durante a hidratação, tais como o pré e o pós-resfriamento. O pré-resfriamento consiste no rebaixamento da temperatura de lançamento do concreto pelo uso da água de amassamento gelada ou na forma de gelo, o que permite obter temperaturas de lançamento de até 4°C. Em conjunto, pode-se também resfriar os agregados para obter maior eficiência. O pós-resfriamento, por sua vez, é realizado por meio da circulação de água gelada através de serpentinas de aço mergulhadas no concreto. Mehta e Monteiro (1994) salientam que se deve tomar cuidado com a taxa de remoção de calor, que pode ser alta nas primeiras idades, mas que, com o aumento da rigidez do concreto, deve ser tão lenta quanto possível, a fim de permitir a relaxação de tensões por fluência.

Além das práticas citadas acima, uma outra tecnologia utilizada é o concreto compactado com rolo (CCR). Esse se diferencia do concreto massa convencional por apresentar consistência seca (*no slump*), consumo de cimento muito baixo e, conseqüentemente, menor elevação da temperatura, com a vantagem de resultar num custo de transporte e compactação mais baixo. Mas o concreto massa convencional ainda é bastante aplicado no Brasil, como demonstrado pelos exemplos apresentados a seguir.

2.1.1. Exemplos de estruturas em concreto massa

A Ponte Juscelino Kubistchek (Figura 1) está localizada sobre uma falha geológica onde corria o Rio Gama, hoje lago Paranoá, ligando o Setor Habitacional Individual Sul ao Centro do Plano Piloto, em Brasília - DF. Segundo a ABCEM (2003), os blocos das fundações foram implantados abaixo da linha d'água, provocando a sensação de que a estrutura apóia-se sobre o espelho d'água. Os blocos de fundação medem 23 x 30 x 3,50 metros e foram feitos através de um caixão de concreto (Figura 2a), executado fora da água, que foi posteriormente submerso, até alcançar 80 cm abaixo da cota básica do Lago. Os blocos são suportados por estacas com diâmetro de 1,20m, cravadas a 50 metros de profundidade. Para a concretagem desses blocos de concreto massa foi necessário adotar pré-refrigeração, com substituição de parte da água por gelo em escamas, e pós-refrigeração, como indicado na Figura 2b.



Figura 1: Ponte Juscelino Kubistchek – Brasília (ABCEM, 2003).

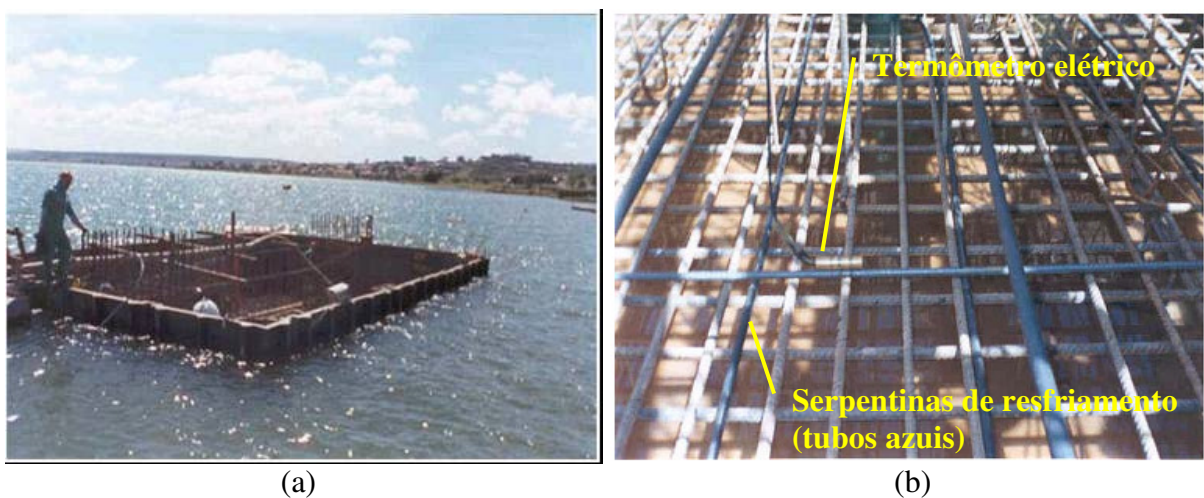


Figura 2: Bloco de fundação da Ponte Juscelino Kubistchek. (a) Preparação do bloco para concretagem com instalação das armaduras, (b) serpentinas de resfriamento e termômetro elétrico para monitoramento da temperatura (GAMBALE *et al.* 2002).

Já a Estação Faria Lima faz parte da Linha 4 (Amarela), que interliga por subterrâneo a Vila Sônia, na zona Sudoeste, ao bairro da Luz, no centro de São Paulo. Segundo o Metrô (2006), a concretagem do Bloco 3, a maior realizada da história do Metrô (3.700 m³), ocorreu no final do mês de setembro de 2006 (Figura 3).

Na concretagem deste bloco, a exemplo das anteriores, utilizou-se um concreto massa resfriado com gelo, para que as peças não sofressem fissuração térmica. A laje de piso da estação tem uma espessura que varia entre 2,5 e 2,8 metros, necessária para suportar todas as cargas previstas, inclusive a sub-pressão do lençol freático.



Figura 3: Concretagem do Bloco 3 da Estação Faria Lima – Linha 4 Amarela em São Paulo (METRÔ, 2006).

O concreto massa convencional também é muito utilizado na construção de barragens, que demandam a execução de estruturas de diferente e variados portes e dimensões, nas quais são utilizados concretos de diversos tipos e com consumos de cimento distintos, conforme o especificado pelos projetistas para cada estrutura, considerando as demandas específicas de resistência e durabilidade.

Em estruturas densamente armadas, mesmo concretos com elevado consumo de cimento podem não requerer medidas preventivas quanto à fissuração térmica, uma vez que as armaduras restringem as deformações durante a expansão do concreto e absorvem as tensões de tração geradas durante o resfriamento (Figura 4). Essa condição, entretanto, depende da restrição existente, ou seja, das dimensões do bloco, da altura da camada a ser concretada, da distância desta à fundação, do intervalo de lançamento entre as camadas e do tipo de forma utilizado.



Figura 4: Vista da Casa de Força -Tomada d'água à Jusante (Arquivo FURNAS).

Cabe notar que, embora o concreto compactado com rolo (CCR) envolva baixos consumos de cimento, o mesmo é aplicado em grandes volumes e sem a presença de armaduras (Figura 5). Essa condição muitas vezes exige medidas para a redução da temperatura do concreto nas primeiras idades, para evitar problemas de fissuração, tais como a refrigeração zoneada, o resfriamento dos agregados com água, a instalação de nebulizadores próximo às formas e a utilização de gelo em escamas em substituição a uma parte da água da dosagem (BATISTA, 2004). Ou seja, também neste caso poder-se-ia utilizar a tecnologia a ser estudada neste trabalho, se a mesma se demonstrar como eficiente. A seguir se discute em maior detalhe o mecanismo de fissuração de origem térmica, foco de interesse da pesquisa.



Figura 5 – Barragem em CCR no Leito do Rio (Arquivo FURNAS).

2.1.2. O mecanismo de fissuração de origem térmica

O calor gerado pela hidratação do cimento é um dos principais fatores que respondem pelas variações volumétricas que ocorrem no concreto desde seu estágio inicial de cura até o final do seu endurecimento. Durante a hidratação do cimento, o calor gerado que não se dissipa para o meio ambiente é absorvido pelo concreto, causando aumento da temperatura e, conseqüentemente, uma expansão do material, o que é agravado pela sua baixa condutividade térmica, que evita uma rápida dissipação do calor, especialmente em estruturas mais espessas (IBRACON, 2005).

Nas primeiras idades a expansão do concreto é proporcional ao seu coeficiente de dilatação térmica linear e ocorre sem que haja praticamente nenhuma restrição, uma vez que o concreto encontra-se no estado plástico. Com o aumento da idade o concreto passa ao estado viscoelástico e iniciam-se as restrições, gerando tensões de compressão à medida que o concreto se expande até que a temperatura máxima seja atingida. Com o resfriamento, inicia-se o fenômeno de retração térmica: o concreto começa a se contrair, o que resulta em redução das tensões de compressão. Caso as tensões de compressão sejam anuladas e o resfriamento continue, tensões de tração serão geradas. Se essas ultrapassarem a resistência à tração do concreto, um quadro de fissuração de origem térmica se instalará na estrutura (CALMON, 1995).

A retração térmica, entretanto, não se limita somente a estruturas massivas. Ela pode atuar também em estruturas mais esbeltas, com consumo de cimento elevado, como é o caso de

concretos de alta resistência. Depois de atingida a temperatura máxima pode ocorrer uma acentuada queda de temperatura, uma vez que a superfície de exposição à perda de calor para o ambiente é maior, ou seja, a relação volume-superfície, em relação aos concretos massa, é menor (CALMON *et al.* 2005).

A norma NBR 6118 “*Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento*” (ABNT, 2007) identifica as variações térmicas como uma das ações de carregamento a que uma estrutura de concreto pode estar sujeita. Essas variações de temperatura ocorrem em função do local da construção e das dimensões dos elementos estruturais que a compõem. Segundo esta norma, para peças estruturais cuja menor dimensão for inferior a 70 cm, as variações térmicas podem ser consideradas como sendo uniformes no interior da estrutura de concreto. Para peças de dimensões maiores do que 70 cm, a norma recomenda que deva ser considerada a variação não-linear das temperaturas, como normalmente é feito para estruturas massivas.

O mecanismo de retração térmica envolve um complexo fenômeno que ocorre em paralelo a outros, tais como a retração por secagem, a retração autógena e a retração devido à fluência. Além disso, sofre interveniência de diversas características térmicas, mecânicas e viscoelásticas do concreto e dos materiais a sua volta.

Para verificar a possibilidade de fissuração normalmente se conduz uma análise termomecânica do concreto ao longo das primeiras idades, como explicado a seguir.

2.1.3. Análise termomecânica do concreto

Para se avaliar a segurança da estrutura contra a fissuração de origem térmica, é necessária a realização de análises das tensões e/ou deformações atuantes, de forma a que se possa comparar a capacidade resistente demandada com a resistência à tração do concreto. Essas análises requerem o conhecimento da evolução da temperatura e da sua distribuição, do comportamento mecânico e das condições de vinculação da estrutura de concreto.

Quanto à evolução das temperaturas, os seguintes fatores são relevantes: dimensões e geometria da estrutura; propriedades térmicas do concreto; condições de execução (temperatura do concreto, tipo de forma, refrigeração, etc.); condições ambientais (temperatura ambiente, radiação solar, temperatura das estruturas adjacentes, etc.) (CALMON, 1995; SANTOS, 2004).

Quanto ao comportamento mecânico do concreto, as seguintes propriedades influem na análise das tensões de origem térmica: deformações diferenciais do concreto (fluência e retração); desenvolvimento da resistência e do módulo de deformação; coeficiente de dilatação térmica (CALMON, 1995; SANTOS, 2004).

Na Figura 6 apresenta-se, de maneira geral, as linhas de influência existentes entre os fatores que intervêm na análise termomecânica das estruturas massivas de concreto.

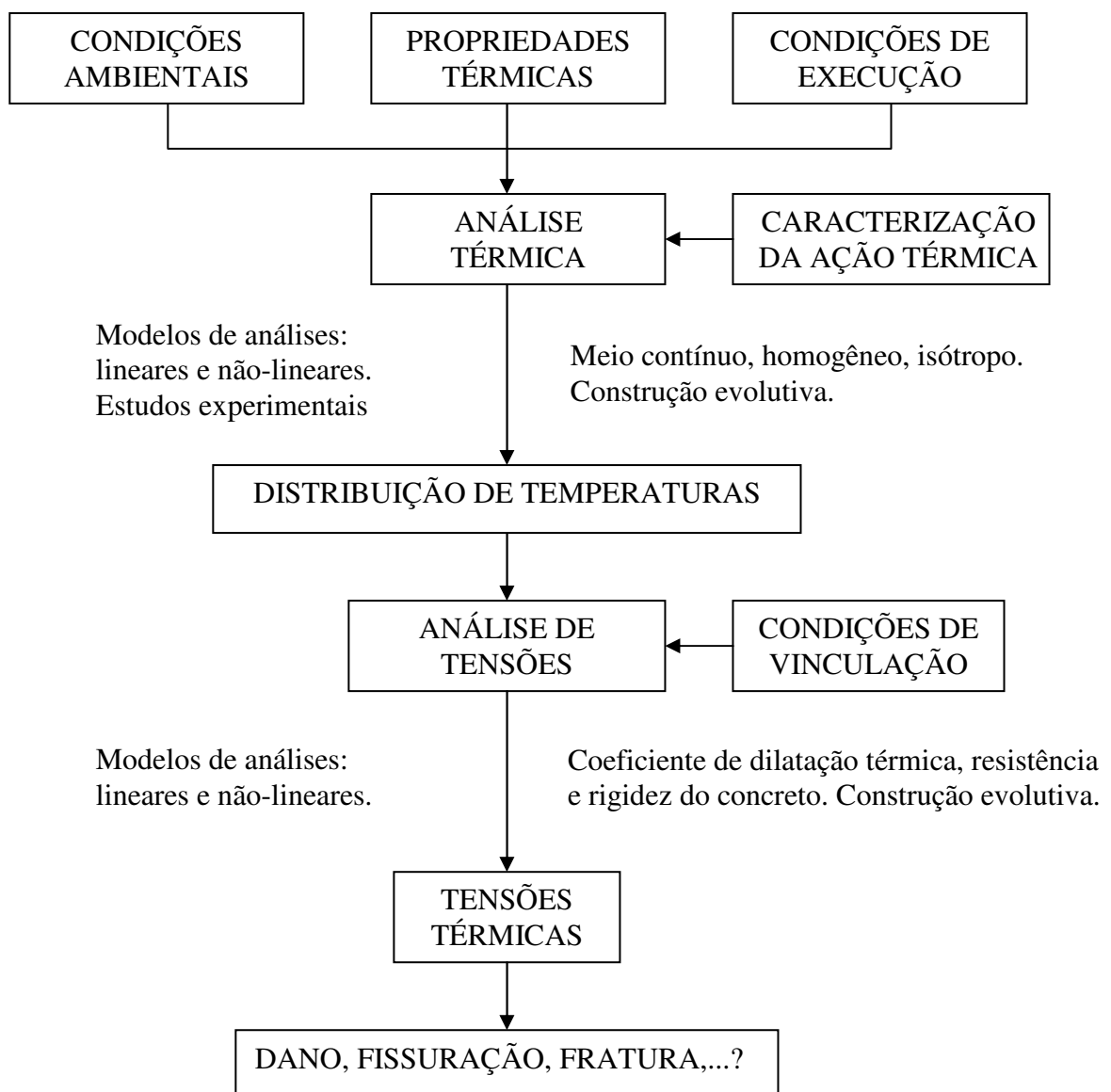


Figura 6: Fatores que influem na resposta termomecânica do concreto e, conseqüentemente, no risco de fissuração de estruturas massivas de concreto. (baseado em Aguado *et al.* (1995) *apud* CALMON, 1995).

Se as estruturas de concreto tivessem total liberdade para se deformar quando sujeitas a uma variação de temperatura, o concreto não seria submetido a nenhum esforço interno, sofrendo apenas variações em suas dimensões, proporcionais ao gradiente térmico aplicado. No entanto, sempre existem restrições externas e/ou internas às deformações do concreto, resultantes da ligação das estruturas com suas fundações ou com outras estruturas, da ligação do concreto com as armaduras (no caso de concreto armado) e, também, da coesão interna do próprio concreto (GAMBALE *et al.*, 2002). Tais restrições provocam o surgimento de esforços no interior da estrutura, que podem levá-la à fissuração, caso sejam superiores à sua capacidade de resisti-los. Portanto, a avaliação do grau de restrição, presente em cada parte da estrutura é de grande importância na determinação das deformações e das tensões de origem térmica atuantes. Embora o grau de restrição (K_r) a ser adotado em cada caso deva ser objeto de análise específica, o Comitê 207 do ACI (American Concrete Institute) apresenta um critério geral que pode ser útil na definição de tal parâmetro (ACI, 1991). Na Figura 7 apresenta-se um ábaco construído de acordo com equações propostas pelo ACI Committee 207 para o cálculo do coeficiente de restrição, onde:

L = comprimento da estrutura

H = altura da estrutura

h = altura proporcional (posição onde está sendo calculada a tensão).

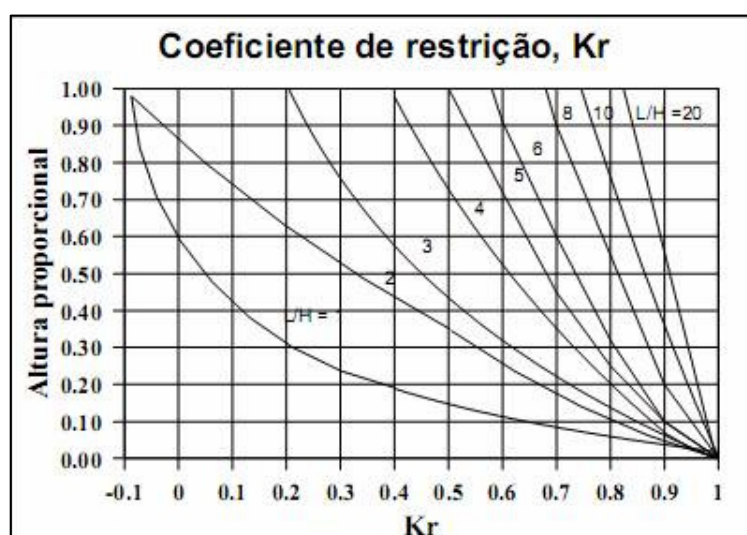


Figura 7: Ábaco de valores estimados para os coeficientes de restrição, conforme o ACI Committee 207 (ACI, 1991).

Conhecendo-se as propriedades térmicas, mecânicas e viscoelásticas do concreto, além do grau de restrição a que o mesmo está submetido, é possível prever o comportamento termomecânico da estrutura, a partir de hipóteses de execução da concretagem. Essas hipóteses podem simular a concretagem da estrutura, considerando:

- a) a temperatura de lançamento do concreto (pré-refrigeração com água gelada ou gelo em escamas, em substituição a uma parte da água de amassamento);
- b) pós-refrigeração do concreto através de circulação de água, gelada ou não, por tubulações (serpentinhas) deixadas na massa do concreto;
- c) a altura das camadas de concreto;
- d) intervalo de lançamento entre camadas;
- e) tipo de concreto (uso de cimentos com baixo calor de hidratação, uso de adições minerais e pozolânicas ou uso de materiais alternativos).

As análises de tensões e /ou deformações são realizadas a partir dos resultados dos cálculos de temperaturas efetuados para cada condição de lançamento estudada. Para cada hipótese, determinam-se as tensões e/ou deformações resultantes do gradiente térmico atuante na estrutura, as quais resultarão em esforços de tração que terão que ser suportados pelo concreto.

Diversos modelos de resolução do problema termomecânico têm sido desenvolvidos a fim de prever a distribuição de temperaturas e de tensões durante o processo de construção de estruturas maciças, ou qualquer outra que o problema térmico é considerável, utilizando ferramentas numéricas, tais como o método das diferenças finitas (MDF) e dos elementos finitos (MEF).

Os métodos de Schmidt e de Carlson utilizam o método das diferenças finitas. O método de Schmidt consiste em dividir a estrutura de concreto em pequenos elementos de volume e em seguida se calculam as temperaturas em cada elemento para diferentes intervalos de tempo a partir da equação de Fourier. O método de Carlson, semelhante ao método de Schmit, é utilizado para problemas de fluxo unidirecional de calor. Este método consiste em dividir o concreto em intervalos de espaço e calcular a temperatura após a decorrência de um intervalo de tempo, depois outro e assim sucessivamente. Maiores detalhes sobre esses métodos podem ser encontrados em Calmon (1995) e Santos (2004).

O método dos elementos finitos (MEF) é um processo de cálculo das temperaturas em estruturas de concreto mais preciso que os métodos de Schmidt e de Carlson. Segundo FURNAS (1997), atualmente, o processo de cálculo mais empregado é o MEF. Neste método, os cálculos são realizados por meio de programas de computador que permitem facilmente a consideração de fluxo bidirecional e tridirecional de calor. Para tanto, é conveniente, mesmo para estruturas de grandes dimensões a utilização de fluxo bidirecional, no mínimo para algumas hipóteses de cálculo, uma vez que esta alternativa permite simular com fidelidade as trocas de calor através das superfícies das estruturas.

Ao se analisar uma estrutura, esta deve ser colocada na forma de uma ou mais malhas de elementos finitos, dependendo das alturas de camadas de concretagem a serem estudadas. As malhas devem representar a geometria da estrutura, bem como permitir a diferenciação dos materiais envolvidos nas trocas de calor (rocha de fundação e as dosagens empregadas em cada local da estrutura) e a representação das diferentes alturas de camadas de concretagem a serem estudadas. Para cada hipótese a ser estudada, devem ser estabelecidas as condições de transmissão de calor no contorno da estrutura e da fundação, através da fixação da temperatura ou de coeficientes de transmissão superficial de calor, caso seja possível.

Os cálculos de temperaturas pelo MEF se processam a partir da consideração do equilíbrio térmico em cada nó da malha de elementos finitos. Tais equilíbrios podem ser descritos, sob a forma matricial, como um sistema de equações diferenciais de primeira ordem (SANTOS, 2004).

Exemplos de cálculos realizados pelo método dos elementos finitos podem ser encontrados em (YAMAZAKI *et al.*, 1985; MACHIDA e UEHARA, 1987; MAJORANA *et al.*, 1990; GAMBALE *et al.*, 1991; MIRAMBELL e PUJOL, 1990; ISHIKAWA, 1991; CALMON, 1995; SILVOSO, 2003; SANTOS, 2004).

Com a previsão aproximada das temperaturas e tensões de origem térmica pode-se, antes mesmo que a estrutura seja concretada, dentre outras coisas, avaliar mais criteriosamente os cenários construtivos, em função da possibilidade de ocorrência de fissuras de origem térmica (SANTOS e CALMON, 2004).

3. A PROBLEMÁTICA DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS

Esse capítulo trata do impacto ambiental e das conseqüências danosas à saúde pública derivadas da disposição inadequada de pneus inservíveis. O mesmo contém um resumo da legislação que regulamenta as responsabilidades de governo e fabricantes quanto à disposição ambientalmente adequada deste tipo de material, seja pela reciclagem, reuso ou aproveitamento em processos industriais diversos. São apresentadas, também, algumas alternativas que têm sido pesquisadas e praticadas para aproveitamento dos pneumáticos inservíveis em diversas áreas.

3.1. DESCARTE DE PNEUS INSERVÍVEIS

A reciclagem de resíduos industriais é hoje uma necessidade para a redução do passivo ambiental, preservação dos recursos naturais e redução de custos do produto final. A reciclagem desses materiais permite aumentar a vida útil dos aterros sanitários, evita a poluição de córregos, rios e florestas, reduz a extração de recursos naturais para fabricação de novos produtos e reduz o custo de produção por ser uma matéria-prima de menor custo do que um material virgem. Dentre os passivos ambientais característicos das sociedades modernas, o descarte inadequado de pneus inservíveis utilizados em veículos constitui um dos mais graves.

No mundo são descartados, anualmente, aproximadamente 1 bilhão de pneus inservíveis. Só nos Estados Unidos são gerados aproximadamente 242 milhões de carcaças de pneu por ano, representando aproximadamente 1 pneu por pessoa por ano (XI *et al.* 2003).

Como a frota de veículos mundial vem aumentando, a geração de pneus inservíveis vem crescendo a uma taxa de cerca de 5% ao ano, em média. Verifica-se, portanto, que o problema tende a se agravar, se não forem encontradas alternativas de destinação final adequada para este material. No Brasil entram no mercado, anualmente, cerca de 45 milhões de novos pneus, 33% por cento dos quais são importados, segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP (KAMIMURA, 2002). Ao mesmo tempo, estima-se que são

descartados mais de 35 milhões de pneus por ano, sendo estimado que cerca de 100 milhões de pneus já se encontram abandonados no meio ambiente (ARAÚJO NETO *et al.*, 2006).

Os números da ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos) referentes à reciclagem de pneus em 2004 indicam uma melhoria significativa no balanço do setor. O programa da ANIP ocorre por meio de parcerias com distribuidores, revendedores e prefeituras. Cerca de 80 municípios já aderiram com a implantação de centros de recepção de pneus inservíveis – os "ecopontos" – que são abastecidos pelo serviço de limpeza pública, além de borracheiros, mecânicos e sucateiros. Na operacionalização, a ANIP oferece apoio técnico para as prefeituras construírem as instalações dos postos de coleta, transporta os pneus até as empresas de trituração e direciona os pneus triturados para destinação final (como combustível nas fábricas de cimento, na construção civil, solado de sapato, borracha de vedação, piso industrial e tapete para carro) (GARCIA e FURTADO, 2008).

Um recente estudo do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) para a ANIP revela que, dos cerca de 22 milhões de pneus trocados anualmente no Brasil, 53,2% são inservíveis (não podem mais rodar em veículos automotivos) e 46,8% podem ser reformados mediante avaliação (GARCIA e FURTADO, 2008). Vale lembrar que o Brasil ainda tem uma grande quantidade de pneus acumulados. Aos poucos, eles estão sendo coletados e reciclados devido à existência de programas voltados à correta destinação desses produtos.

O Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis da ANIP estimulou os fabricantes de pneus novos a formar, em março de 2006, uma entidade que arca com os custos de coleta e destinação de pneus no Brasil, a Reciclanip. Seu objetivo é intensificar parcerias com as prefeituras para a criação de novos ecopontos e incentivar a participação da iniciativa privada (sobretudo da rede de revendedores e reformadores), do poder público e da sociedade como um todo na coleta e destinação de pneus (GARCIA e FURTADO, 2008).

A disposição inadequada dos pneus inservíveis traz sérias conseqüências para o meio ambiente e para a saúde humana. Os pneus descartados sem critério geralmente terminam em aterros sanitários, lixões, estoques a céu aberto, beiras de estradas e rios, entre outros locais abertos (vide figuras 8 e 9). Esses tipos de armazenamento acarretam graves problemas, na medida em que os pneus ocupam muito espaço, são de difícil compactação e acumulam água de chuva em seu interior, servindo de local onde os mosquitos transmissores de doenças, como a dengue e a febre amarela, colocam seus ovos.



Figura 8: Incêndio em depósito de pneus em Oranienburg, Alemanha (CIMINO, 2004).

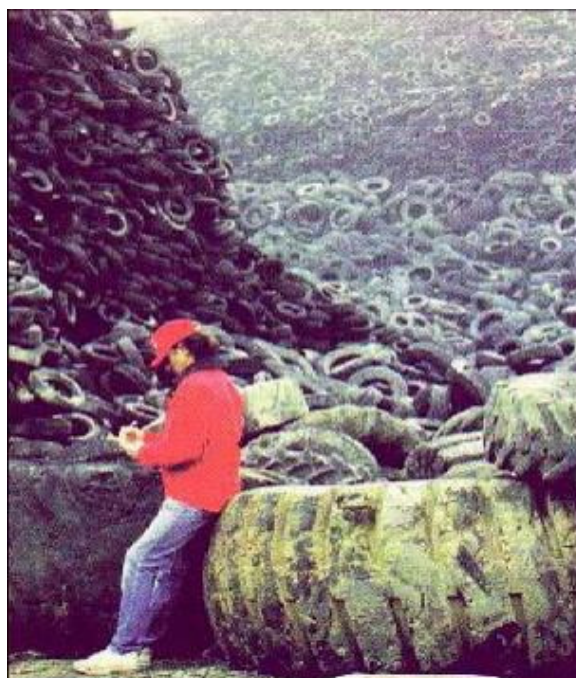


Figura 9: Depósito de pneus inservíveis a céu aberto (XI *et al.* 2003).

Estudos realizados por Cimino (2004) e Silva (2004) examinaram as alternativas adotadas por vários países para gerenciar os pneus inservíveis, comparando-as com a realidade brasileira. Os autores constataram que os pneus inservíveis representam um alto passivo ambiental, ou seja, se queimados liberam gases tóxicos na atmosfera e, se não estiverem acondicionados adequadamente, podem ser focos de transmissores de doenças (Figuras 8 e 9).

Atentando para o problema, as autoridades brasileiras vêm introduzindo um corpo normativo e legal, que vai discutido em maior detalhe no próximo item, para regulamentar o assunto e fomentar um melhor gerenciamento do processo de destinação final deste tipo de resíduo. Respondendo a este estímulo, as indústrias de pneumáticos vêm buscando formas de se adaptar ao cumprimento da resolução 258 do CONAMA (BRASIL, 2002a) que disserta sobre o tema, colocando sobre os fabricantes e revendedores a responsabilidade de prover uma destinação final adequada para os pneus descartados.

Meneses (2005) salienta que a principal forma de descarte de pneus continua sendo a queima para obtenção de energia calorífica em fornos de indústria cimenteiras. Esta, entretanto, não é uma alternativa nobre, uma vez que a queima gera grande quantidade de gases poluentes.

Embora não haja, ainda, incentivos financeiros para mitigação do passivo ambiental, a implantação de legislação vem estimulando a adoção de alternativas tecnológicas mais adequadas e o desenvolvimento de pesquisas de caráter experimental acerca do reaproveitamento ou reciclagem de pneumáticos inservíveis, tanto por parte de Municípios, quanto de empresas e instituições de ensino superior.

Nesse contexto, Silva (2004) considera que especial atenção deve ser dada à criação de incentivos que ampliem o ciclo de vida útil dos pneus e priorizem, na etapa pós-consumo, a reutilização e a reciclagem. Cimino (2004) destaca que faltam políticas públicas nos vários níveis de governo para estimular o desenvolvimento de soluções apropriadas para eliminar o passivo ambiental existente de forma eficaz e promover a prevenção e a minimização de resíduos sólidos especiais.

Com relação à política interna, cabe salientar que a liberação das importações de pneus recauchutados de outros países vem aumentando a quantidade de pneus inservíveis e contribuindo para agravar o problema.

3.2. REGULAMENTAÇÃO PARA DISPOSIÇÃO DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS

No Brasil, as primeiras iniciativas legislativas para a definição de diretrizes voltadas aos resíduos sólidos surgiram no final da década de 80. Desde então, foram elaborados mais de 100 projetos de lei, os quais, por força de dispositivos do Regimento Interno da Câmara dos

Deputados, encontram-se apensados ao Projeto de Lei nº 203, de 1991 (PROJETO DE..., 1991), que dispõe sobre acondicionamento, coleta, tratamento, transporte e destinação dos resíduos de serviços de saúde, estando pendentes de apreciação.

Atualmente tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei 1991 com o objetivo de instituir a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PROJETO DE ..., 2007). Esse projeto foi encaminhado pelo Ministério do Meio Ambiente e teve a contribuição dos Ministérios das Cidades, da Saúde, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, do Planejamento, Orçamento e Gestão, do Desenvolvimento Social e Combate à Fome e da Fazenda.

No Brasil, o órgão responsável pela regulamentação, controle e fiscalização do gerenciamento dos pneus usados e inservíveis é o Ministério do Meio Ambiente, que atua por meio do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA e do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA.

A resolução CONAMA nº 258/2002 define *pneumático inservível* como “... aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional...” (BRASIL, 2002a) (Anexo A). Essa resolução trata da destinação final dos pneus inservíveis e determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Segundo a resolução, em seu Art. 3º, Inciso IV, a partir de janeiro de 2005:

- a. Para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;
- b. Para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis (BRASIL, 2002a).

Compete ao IBAMA, o controle, a fiscalização e a edição dos atos normativos pertinentes à Resolução 258/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002a). A Instrução Normativa nº 8 do IBAMA define que *destinadores de pneumáticos inservíveis* são aqueles que fornecem uma destinação ambientalmente adequada para pneumáticos inservíveis, inteiros ou processados e que *destinação ambientalmente adequada de pneumáticos inservíveis* é qualquer

procedimento ou técnica, devidamente licenciada pelos órgãos competentes, no qual o pneumático é descaracterizado por meio físico ou químico, podendo haver reciclagem de seus elementos originais ou de seu conteúdo energético (BRASIL, 2002b).

De acordo com a classificação proposta pela NBR 10.004 – “*Classificação de Resíduos Sólidos*” (ABNT, 2004), o rejeito da borracha seria enquadrado como um *resíduo classe II B (inerte)*, por não conter metais pesados, não sofrer lixiviação e não ser solúvel em água. Apesar disso, a resolução CONAMA nº 23/96, que regulamenta a importação e uso de resíduos perigosos, proíbe a importação de pneumáticos usados, ao estabelecer, em seu artigo 4º, que os resíduos inertes não estão sujeitos a restrições de importação, à exceção dos pneumáticos usados, cuja importação é proibida (BRASIL, 1996).

Discussões mais aprofundadas sobre o tema podem ser encontradas em Kamimura (2002), Cimino (2004) e Motta (2008).

3.3. COMPOSIÇÃO DA BORRACHA DE PNEU

Para poder discutir melhor como reaproveitar os pneus é interessante revisar sua constituição. A borracha de pneu é composta basicamente por um polímero elastomérico, que foi submetido a diversos processos termoquímicos até adquirir as características desejáveis de resistência e durabilidade requeridas para sua aplicação final.

Os materiais poliméricos são compostos por moléculas muito grandes, formadas por cadeias de átomos de carbono, às quais vários átomos ou radicais estão lateralmente ligados. Considera-se que essas macromoléculas são compostas por moléculas simples, ou meros, entidades estruturais menores que se repetem ao longo da cadeia (VAN VLACK, 1970).

Muitos polímeros possuem a característica de, sob tensão, desenvolverem excepcional deformação e retornarem elasticamente à condição original quando a tensão é retirada. Esses polímeros são denominados *elastômeros*. Uma característica obrigatória para o comportamento elastomérico é que a estrutura molecular seja provida de ligações cruzadas (VAN VLACK, 1970).

O processo de formação de ligações cruzadas nos elastômeros que formam a borracha é conhecido como *vulcanização*, tratamento através do qual compostos de enxofre se ligam com as cadeias principais do polímero que se encontram adjacentes, formando pontes entre elas.

A vulcanização aumenta o módulo de elasticidade, o limite de resistência à tração, a resistência à abrasão e a resistência à degradação por oxidação. Essas propriedades são diretamente proporcionais à densidade de ligações cruzadas e podem ser melhoradas pela adição de uma carga mineral conhecida como *negro de fumo*. O negro de fumo consiste em partículas muito pequenas e essencialmente esféricas de carbono, produzidas pela combustão de gás natural ou óleo. Os pneus de automóveis possuem de 15% a 30% em volume de negro de fumo e 3 a 5% de enxofre (CALLISTER Jr., 2002).

As borrachas utilizadas na fabricação de pneus são blendas poliméricas, ou seja, uma mistura monofásica, de elastômeros naturais (látex - homopolímero de isopreno) e sintéticos (copolímero aleatório de estireno e butadieno ou homopolímero de butadieno). Os pneus radiais para caminhões e ônibus usam uma maior proporção de borracha natural do que os pneus de automóveis, sendo os teores respectivos de aproximadamente 40% e 15% em peso do total (BNDES, 1998). Essa mistura é carregada com negro de fumo e posteriormente submetida ao processo de vulcanização, a fim de adquirir as propriedades de resistência e rigidez requeridas para aplicação em pneumáticos.

Na Figura 10 está representada uma composição típica, em peso, de pneus radiais para automóveis. Com base nessa figura pode-se dizer que a borracha de pneu, em sua totalidade, representa aproximadamente 85% do peso do pneu, uma vez que os produtos químicos (entre eles o enxofre), o negro de fumo e o óleo (extender oil) são incorporados à borracha durante seu processamento. Portanto, a composição final da *borracha de pneu* tem, aproximadamente, 50% de cargas minerais.

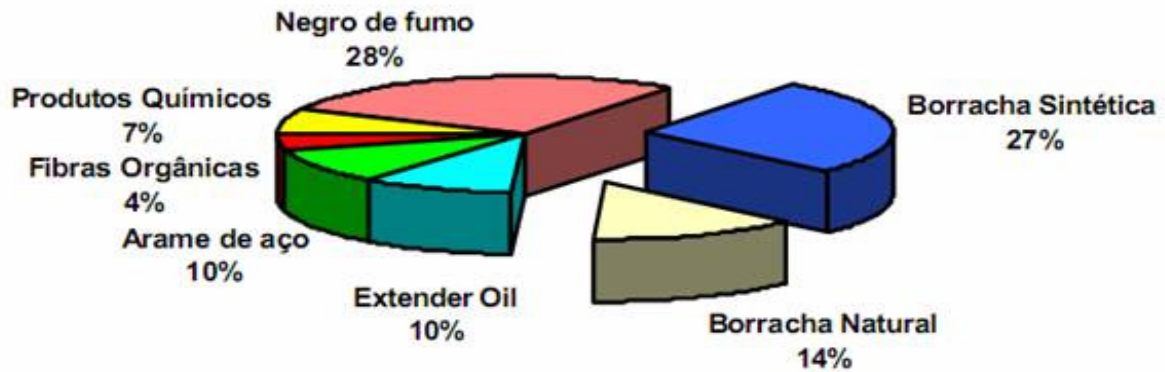


Figura 10: Composição típica de pneus radiais para automóveis (BNDES, 1998).

No processo de reciclagem de pneus só é viável efetuar uma separação das partes metálicas e fibras. Os demais produtos incorporados à borracha permanecem. Segundo Souza (2000) os pneus tipo passeio e tipo transporte pesam, respectivamente, 8 kg e 60 kg, aproximadamente. A reciclagem de cada tipo pode resultar no reaproveitamento de 6,8 kg e 51 kg de borracha de pneu (incluindo todas as cargas minerais), aproximadamente. Entretanto, esse rendimento dependerá do nível de redução no tamanho das partículas. As perdas podem ser de 5% para pneus cortados em pedaços de 50mm a 300mm, de 30% para a redução em partículas de 7mm a 12mm, e de até 60% para grânulos menores que 1 mm (LA SAPIENZA, 2007).

A cadeia de destinação dos pneus usados se inicia com a necessidade do consumidor de reposição dos pneus de veículos motorizados e bicicletas. A partir desta necessidade, o pneu pode percorrer diversos caminhos até sua deposição final. Motta (2008) apresentou um fluxograma que representa uma cadeia de destinação ambientalmente correta para os pneumáticos (vide Figura 11).

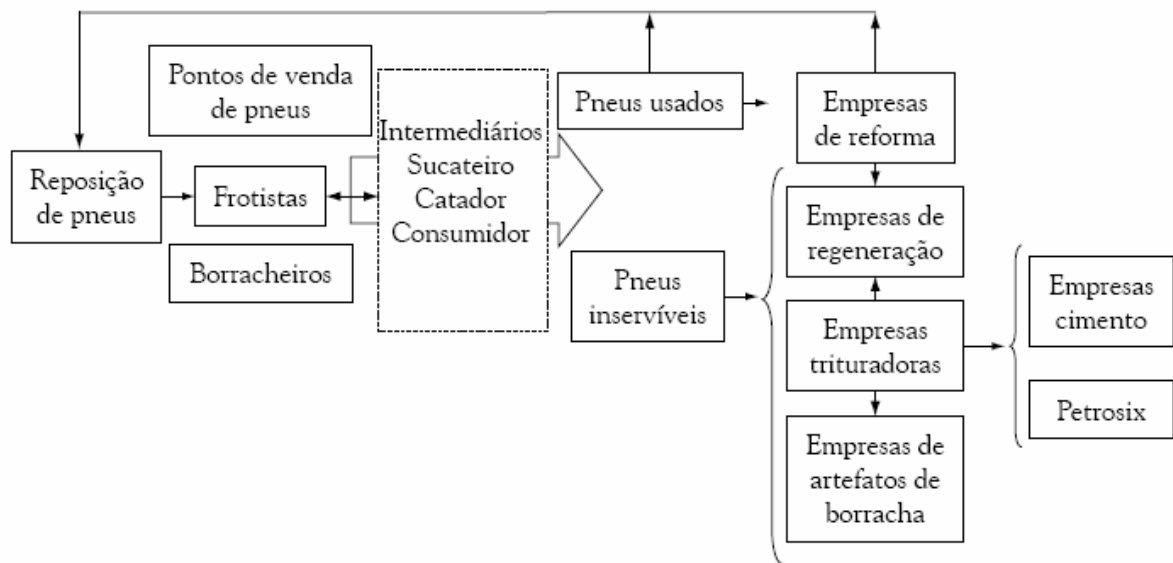


Figura 11: Cadeia de reposição dos pneus (MOTTA, 2008).

A seguir são apresentadas algumas alternativas de destinação ambientalmente adequadas para os pneumáticos inservíveis.

3.4. POSSÍVEIS DESTINAÇÕES AMBIENTALMENTE ADEQUADAS PARA OS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS

Face ao disposto nas regulamentações discutidas no item 3.2, organizações não governamentais e entidades de pesquisa estão investindo em novas alternativas para reaproveitamento de pneus. A seguir apresenta-se um resumo das principais alternativas de utilização dos pneus inservíveis encontradas na bibliografia e/ou já aplicadas na prática (KAMIMURA, 2002; CIMINO, 2004; NENDI e KHAN, 2004; SPECHT, 2004; SILVA, 2005; TORTUM *et al.*, 2005; ALBUQUERQUE NETO *et al.*, 2006; ALBUQUERQUE *et al.*, 2007; LA SAPIENZA, 2007):

- a) pavimentos para estradas – o pó gerado pela recauchutagem e os restos de pneus moídos podem ser misturados ao asfalto, aumentando sua elasticidade e durabilidade. Esta alternativa tem sido bastante estudada, com bons resultados. Já existem várias aplicações práticas que se mostraram tecnicamente exitosas;

- b) drenagem e contenção de erosão do solo – pneus inteiros são usados para acomodação de tubos ou dispostos aleatoriamente para dar sustentação às raízes de plantas;
- c) combustível para produção de cimento, cal, papel e celulose – o pneu é muito combustível e um potente gerador de energia. Seu poder calorífico é de cerca de 12 a 16 mil BTUs por quilo, superior ao do carvão;
- d) o pneu moído pode ser aproveitado em conjunto com o xisto, para a geração de óleo combustível e derivados;
- e) regeneração – após moagem e separação das partes metálicas e fibras, as partículas de borracha de pneu passam por um processo de desvulcanização e adição de óleos aromáticos. O material elastomérico resultante pode ser remoldado para fabricação de pisos industriais, solados de sapato, tapetes, borrachas de vedação, ou mesmo em misturas para fabricação de novos pneus e de capas para recauchutagem;
- f) equipamentos para playground – os pneus inteiros ou cortados são usados como obstáculos, balanços ou amortecedores para amenizar as quedas e evitar acidentes;
- g) esportes - usado em corridas de cavalo, de automóveis ou outros eventos que necessitem de uma limitação do território a percorrer ou barreiras de amortização de impacto;
- h) sinalização rodoviária e pára-choques de carros - pneus inteiros podem ser usados na fabricação de postes para sinalização rodoviária e pára-choques, reduzindo-se as despesas com manutenção;
- i) compostagem - o pneu não pode ser transformado em adubo, mas a borracha cortada em pequenos pedaços pode servir para aeração de compostos orgânicos;
- j) reprodução de animais marinhos – pneus inteiros podem ser usados como estruturas para criação de recifes artificiais no mar, com o intuito de gerar um ambiente adequado para reprodução de certos animais marinhos;

- k) na construção civil já se tem alguns registros de aplicação de fragmentos de borracha de pneu na construção de casas populares e em blocos de defensas para rodovias, como destacado a seguir.

3.5. POSSÍVEIS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Nos últimos anos, diversos pesquisadores das áreas de ciência dos materiais e engenharia civil vêm estudando o comportamento e a viabilidade da utilização da borracha de pneu em concretos e argamassas, o que representaria uma nova alternativa de aproveitamento deste material. Possíveis aplicações na construção civil incluem (ELDIN e SENOUCI, 1992; TOPÇU, 1995; LIMA *et al.*, 2000; AKAZAKI *et al.*, 2001; BAUER *et al.*, 2001; ALBUQUERQUE *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2004; MACEDO, 2005a):

- a) pavimento de concreto;
- b) utilização como paredes e coberturas, telhas de concreto, blocos de alvenaria e painéis para fins de isolamento térmico e acústico;
- c) emprego no envelopamento de dutos em valas, confecção de passeio público, rodovias, pisos, revestimentos e concretos de baixa exigência estrutural;
- d) concreto para utilização em estacas de fundação tipo broca;
- e) locais onde são exigidas maior resistência ao impacto e alta absorção de energia, como barreiras de proteção, quebra mar, recifes, postes, elementos de sinalização de trânsito e outras aplicações;
- f) aplicação em concretos de paredes de eclusas, visando maior absorção de impacto.

Dentre as aplicações possíveis na construção civil, o aproveitamento da borracha de pneu no concreto pode trazer as seguintes vantagens:

- a) otimização da vida útil dos aterros sanitários;
- b) redução do consumo das fontes naturais de agregados;
- c) redução de emissão de poluentes na atmosférica;
- d) redução dos riscos à saúde pública e à degradação ambiental;

e) redução de sobrecarga em edificações.

Ou seja, existem várias alternativas de utilização de pneus ou fragmentos de pneus na construção civil. Dados os grandes volumes de produção deste setor, isto pode representar uma contribuição importante para resolução do passivo ambiental ligado ao descarte de pneus inservíveis. Como explicam Akasaki *et al.* (2001), o uso de partículas de borracha de pneu no concreto pode contribuir para que esse resíduo deixe de ser um problema ambiental e de saúde pública, e passe a ser uma fonte de material alternativo a ser empregado com sucesso na construção civil.

Como destacado no capítulo 1, o presente trabalho se foca no estudo da aplicação de fragmentos de borracha no concreto massa para barragens, a fim de aumentar a capacidade de deformação e minimizar as fissurações de origem térmica. Esta é uma área inovadora, na qual ainda não foram desenvolvidos trabalhos de investigação. Para subsidiar esta investigação, no próximo capítulo é apresentada uma revisão do comportamento de compósitos de matriz cimentícia reforçados com a incorporação de partículas de borracha.

4. REVISÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM BORRACHA DE PNEU

Diversas são as pesquisas realizadas em todo o mundo sobre a incorporação de partículas de pneu nos compósitos de matriz cimentícia. Esse capítulo apresenta um resumo dos principais resultados obtidos acerca das propriedades físicas e mecânicas desses compósitos.

A incorporação das partículas de pneus na matriz cimentícia é realizada na fase de mistura dos materiais. A mesma pode ser feita por simples adição ou ser decorrente da substituição parcial da areia, da brita ou do agregado total.

Em geral tem sido observado nos estudos que o principal problema decorrente da combinação desses materiais consiste na fraca aderência entre a matriz do concreto e a borracha de pneu. Uma zona de transição mais fraca pode afetar a formação e coalescência de micro-fissuras, afetando a resistência do compósito, tendência que tende a se agravar à medida que se aumenta a quantidade de borracha incorporada ao concreto.

Há que se alertar para o cuidado na comparação entre os estudos, uma vez que distintos autores utilizam diferentes tipos, dimensões e métodos de incorporação da borracha de pneu à matriz cimentícia. Entretanto, algumas diretrizes gerais podem ser identificadas pela análise da literatura disponível:

- geralmente, são usadas partículas de pneu na forma de fibras (procedentes do processo de recauchutagem) ou de grânulos (procedentes da trituração de pneus inservíveis);
- as partículas usadas tendem a ter dimensão característica menor que 4,8mm;
- as partículas de pneu geralmente substituem frações volumétricas dos agregados;
- os valores de consumo de cimento e a relação água/cimento são mantidos fixos;
- o controle das alterações de trabalhabilidade é feito por meio de aditivos plastificantes.

4.1. PRODUÇÃO DAS PARTÍCULAS DE PNEU

Para formação de compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu são normalmente utilizadas partículas de diferentes dimensões. Essas partículas podem ser enquadradas em dois tipos básicos: *raspas(ou fibras)* procedentes do processo de raspagem das bandas de rodagem, derivadas do processo de *recauchutagem* (Figura 12); ou partículas *granulares* com granulometria similar à da areia ou da brita procedentes da *trituração mecânica* de pneus inservíveis inteiros, com segregação das partes metálicas e fibras têxteis do pneu (Figura 13).



Figura 12: Processo de raspagem da banda de rodagem de pneu para recauchutagem (MACEDO, 2005).

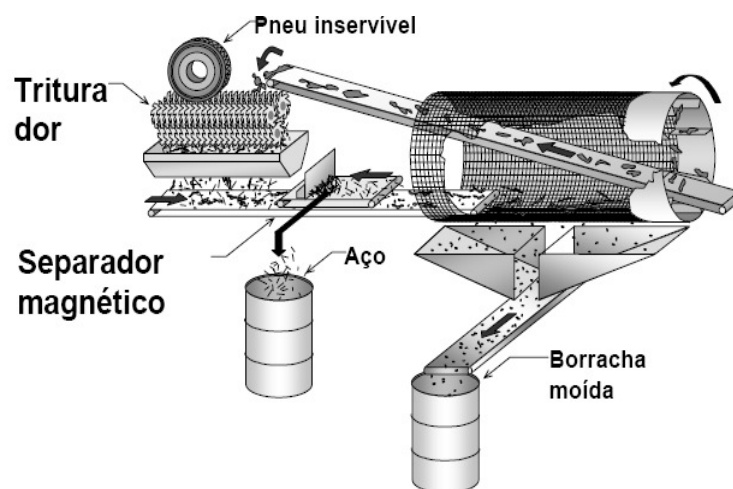


Figura 13: Processo de trituração e separação de pneus inservíveis (PACHECO, 2004).

Quando o processo de trituração é realizado à temperatura ambiente obtêm-se partículas de superfície rugosa e irregular. Já quando se usam líquidos refrigerantes para resfriar a borracha abaixo da sua temperatura de transição vítrea, o resultado são partículas de superfície lisa. Para aplicação em compósitos de matriz cimentícia, a maior rugosidade superficial das partículas do primeiro tipo traz a vantagem potencial de proporcionar melhor aderência mecânica com a matriz, mesmo que não aconteça uma interação química.

Segundo La Sapienza (2007), as partículas resultantes do processo de trituração podem ser classificadas em função do seu tamanho como fragmentos (quando se obtém pedaços irregulares de 50 a 300 mm); lascas (quando a trituração mecânica produz pedaços de borracha de 10 a 50 mm); grânulos (quando a borracha dos pneus é reduzida a partículas de 1 a 10 mm); e pó (quando o processamento da borracha dos pneus origina partículas finas, menores do que 1 mm).

A granulometria das partículas de pneu interfere diretamente nas propriedades dos compósitos de matriz cimentícia, no estado fresco e endurecido, como poderá ser constatado nas discussões apresentadas nos itens 4.2 e 4.3, respectivamente.

Assim como a granulometria, as propriedades mecânicas da borracha de pneu também afetam as propriedades finais do compósito. Na Tabela 1 estão apresentadas alguns valores característicos das principais propriedades mecânicas da borracha de pneu. Observa-se, na tabela, que o módulo de elasticidade é relativamente baixo, enquanto a resistência à tração, a resiliência e a capacidade de alongamento são bastante elevadas.

Tabela 1: Propriedades nominais da borracha de pneu (WADDELL e EVANS, 1996 *apud* HERNANDEZ-OLIVARES *et al.*, 2007).

Módulo de elasticidade	a 100% de deformação	2 MPa
	a 300% de deformação	10 MPa
	a 500% de deformação	22 MPa
Resistência à tração		28 MPa
Alongamento		590%
Resiliência	a 23°C	44%
	a 75°C	55%
Massa específica		1,2 g/cm ³

4.2. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA DE PNEU NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA NO ESTADO FRESCO

A incorporação de partículas de pneu nos compósitos de matriz cimentícia pode alterar seu comportamento quanto à fluidez e, conseqüentemente, interferir no processo de moldagem do material. As principais propriedades de interesse no estado fresco são a trabalhabilidade, o teor de ar incorporado e a massa específica. A seguir se discute alguns dos dados encontrados na literatura acerca da influência da adição de partículas de borracha nas mesmas.

Uma revisão de uma série de estudos (ELDIN e SENOUCI, 1993a; KHATIB e BAYOMY, 1999; ALBANO *et al.*, 2005; ALBUQUERQUE *et al.*, 2005; BARROS DA PENHA *et al.*, 2006; BIGNOZZI e SANDROLINI, 2006) para a avaliação da trabalhabilidade de compósitos com adição de borracha pelo método do abatimento do tronco de cone (slump test) indicaram que ocorre uma redução da fluidez do concreto com o aumento do teor e do tamanho das partículas de borracha de pneu, embora a mistura apresente um aspecto homogêneo e de fácil adensamento. A redução da fluidez é atribuída ao aumento da fração de agregados de densidade muito baixa.

Na Figura 14 são apresentados alguns resultados de variação do abatimento em função do teor e tipo de borracha. A forte redução dos valores do slump test observada em alguns casos implica em menor trabalhabilidade e maiores dificuldades de concretagem.

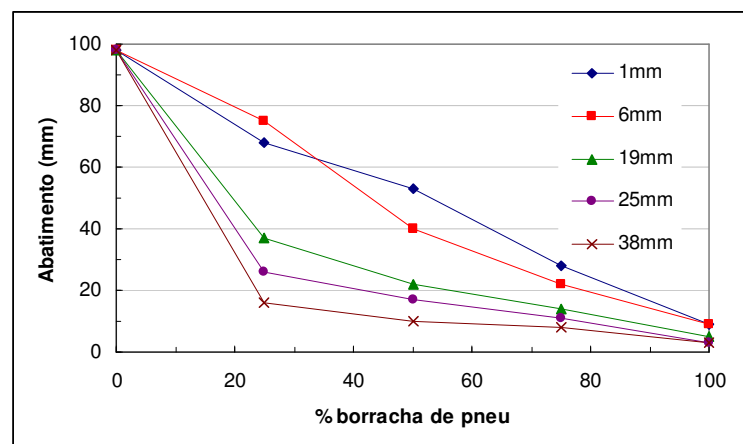


Figura 14: Abatimento x %Borracha (baseado em ELDIN e SENOUCI, 1993a).

A influência da borracha de pneu na trabalhabilidade de compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu também foi avaliada por meio do teste VeBe. No caso de argamassas, observou-se um aumento da trabalhabilidade em relação à amostra de referência, como pode ser observado na Figura 15, onde menores tempos de vibração implicam em maior trabalhabilidade (HUYNH e RAGHAVAN, 1997; BONNET, 2004). No caso de concretos, entretanto, alguns autores relataram redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de borracha (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004a; HERNANDEZ-OLIVARES e BARLUENGA, 2004; SUKONTASUKKUL e CHAIKAEW, 2006).

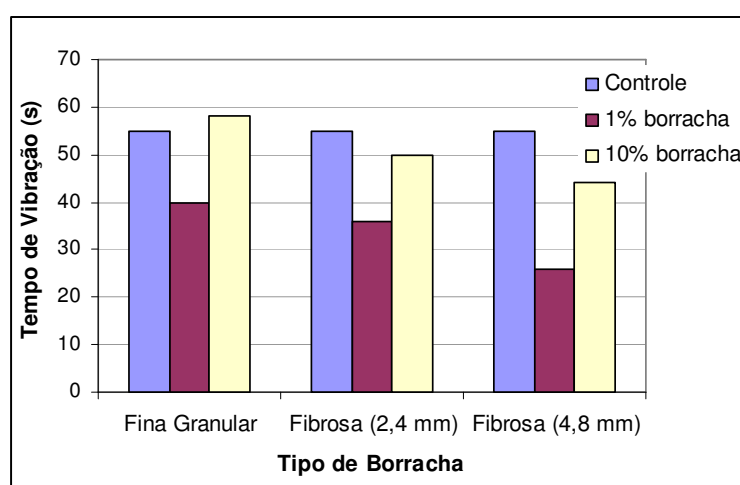


Figura 15: Trabalhabilidade medida pelo teste VeBe (baseado em HUYNH e RAGHAVAN, 1997)

Em amostras de concreto compactado com rolo (CCR), observou-se um aumento do tempo de vibração necessário com o aumento do teor de borracha e com a redução do tamanho das partículas. Partículas de 0,42mm, 1,5mm e 4,8 mm reduziram a trabalhabilidade a partir de 15%, 20% e 25% de substituição do volume de areia, respectivamente (ALBUQUERQUE *et al.* 2004a). Durante a realização das dosagens observou-se a necessidade de uma crescente quantidade de aditivo plastificante à medida que se aumentava o teor de borracha e diminuía-se o tamanho das partículas, a fim de manter a trabalhabilidade na faixa especificada.

Observou-se, também, que o método de compactação em mesa vibratória favorece a segregação das partículas de borracha, que tendem a sobrenadar durante o adensamento, se concentrando no topo dos corpos-de-prova (Figura 16) (ALBUQUERQUE *et al.* 2004a, BONNET 2004).



Figura 16: Corpo-de-prova ilustrando a segregação das partículas de borracha. A caneta indica a região de segregação que, na moldagem, era o topo do corpo-de-prova (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004a).

Os resultados destes estudos alertam para o fato de que o método de mensuração (abatimento de tronco de cone, vebe, etc) e o tipo de material gerado (argamassa ou concreto) podem interferir sobre as conclusões acerca da trabalhabilidade para um dado teor de borracha. Ou seja, o concreto ou argamassa podem estar com a fluidez suficiente para a moldagem, mas apresentarem um resultado de baixa trabalhabilidade no ensaio de slump tradicional.

A trabalhabilidade de argamassas e concretos é também afetada pelo teor de ar aprisionado na mistura. Os estudos revisados indicam que o uso de partículas de pneu tende a promover o aprisionamento de ar. Esse efeito é mais forte quanto menor for o tamanho da partícula de pneu e quanto maior for a quantidade de borracha de pneu utilizada (KHATIB e BAYOMY, 1999; ALBUQUERQUE *et al.*, 2004b; ALBANO *et al.*, 2005; ALBUQUERQUE *et al.*, 2005; LOPES *et al.*, 2005).

No caso dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu, a despeito do aumento do teor de ar, nem sempre se observa um respectivo aumento na trabalhabilidade do concreto. Na Figura 17 o gráfico ilustra a influência do incremento na quantidade de partículas de pneu no teor de ar aprisionado na mistura. Observa-se que a geometria das fibras só começa a se tornar um fator diferenciador quando os teores de borracha incorporada ultrapassam 20%.

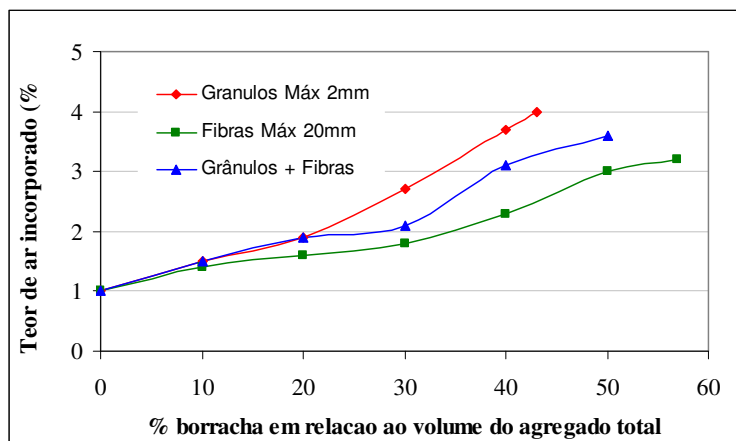


Figura 17: Teor de ar incorporado x %Borracha (baseado em KHATIB e BAYOMY 1999).

A massa específica dos materiais compósitos é uma função das massas específicas de seus materiais constituintes. No caso dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu, portanto, é esperado que a massa específica seja reduzida com o aumento do teor de borracha, uma vez que as partículas de borracha são adicionadas, geralmente, em substituição à areia, cuja massa específica é aproximadamente o dobro da massa específica da borracha.

Além disto, como evidenciado na figura 15, as partículas de borracha de pneu provocam um aumento no teor de ar aprisionado, o que também afeta a massa específica dos compósitos gerados.

Dessa forma, os estudos na área (ROSTAMI *et al.*, 1993; LI *et al.*, 1998; KHATIB e BAYOMY, 1999; AKAZAKI *et al.*, 2003; ALBANO *et al.*, 2005; ALBUQUERQUE *et al.*, 2008a) indicam que a massa específica dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu tende a sofrer uma drástica redução com o aumento do teor de partículas de borracha, em função da combinação destes dois fatores: diferenças entre as massas específicas dos materiais constituintes e aumento do teor de ar aprisionado.

O gráfico da figura 18 ilustra este comportamento, mostrando o forte decréscimo da massa específica do concreto no estado fresco registrado com o aumento do teor das partículas de borracha. Novamente, observa-se que os efeitos da geometria das partículas só começam a se tornar mais sensíveis a partir de teores de 10 a 15%.

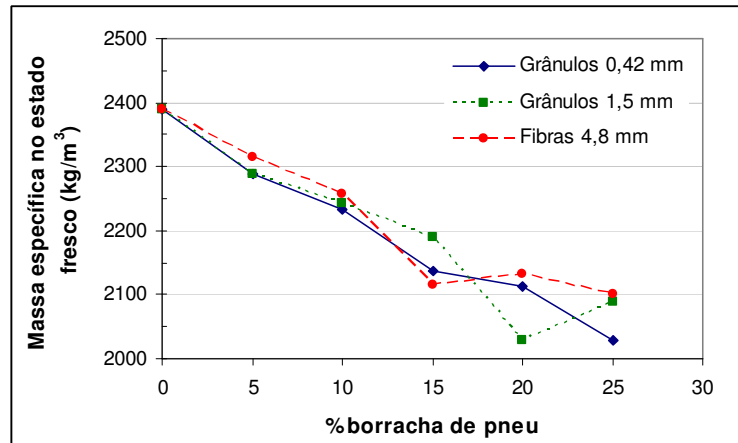


Figura 18: Massa específica x %Borracha (baseado em ALBUQUERQUE *et al.* 2008a)

A massa específica do concreto no estado fresco pode ser um importante indicador das características que este apresentará no estado endurecido. Por este motivo, ALBUQUERQUE *et al.* (2008a) buscaram efetuar regressões não lineares com seus resultados, a fim de definir modelos de predição da massa específica e da resistência à compressão no estado endurecido, em função da massa específica no estado fresco de concretos com borracha de pneu. Nas Figuras 19 e 20 os gráficos mostram as correlações obtidas por estes autores. Os resultados são referentes a amostras de CCR contendo 5, 10, 15, 20 e 25% de partículas de pneu, com diferentes granulometrias, incorporadas em substituição parcial do volume de areia.

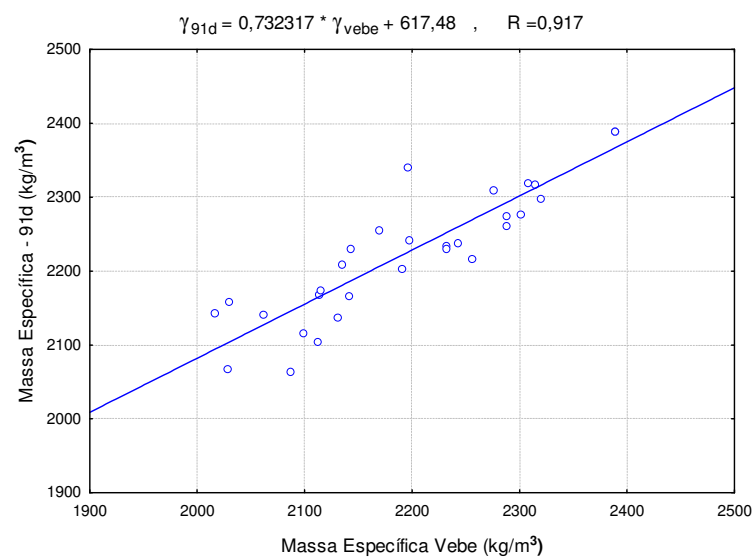


FIGURA 19: Correlação entre a massa específica (91 dias) no estado endurecido e a massa específica Vebe no estado fresco (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008a).

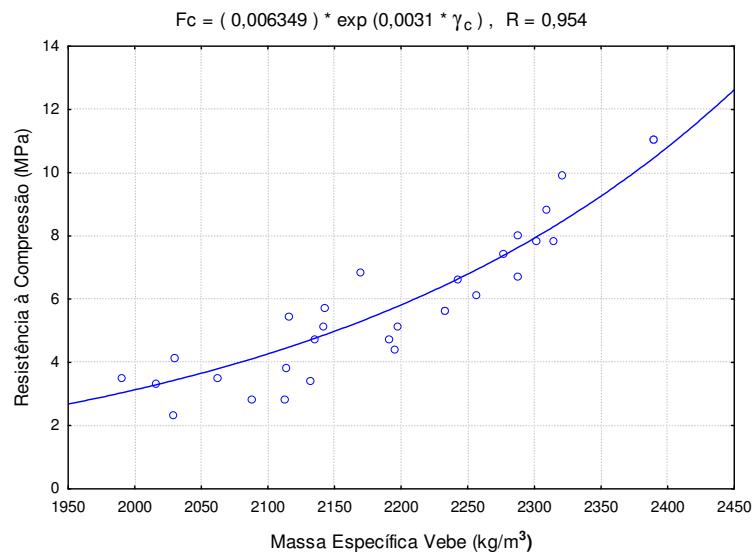


FIGURA 20: Correlação entre a resistência à compressão no estado endurecido (91 dias) e a massa específica Vebe no estado fresco (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008a).

Analisando os gráficos, observa-se que a massa específica no estado fresco, medida no ensaio VeBe, é um indicador razoável das características do concreto endurecido a 91 dias. Esta é uma importante constatação, pois subsidia a adoção de um sistema de controle de produção baseado na medição de características do concreto no estado fresco.

4.3. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA DE PNEU NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA NO ESTADO ENDURECIDO

Como se sabe, os concretos de matriz cimentícia evoluem com o passar do tempo e o avanço da hidratação. Após o endurecimento, os mesmos adquirem características de rigidez e, gradualmente, aumentam sua capacidade de suporte de cargas. A introdução de materiais alternativos nas matrizes cimentícias requer a avaliação do impacto desta mudança no comportamento dessas características ao longo do tempo, a fim de identificar as possíveis alterações de desempenho e avaliar a aplicabilidade do material composto resultante. Nos itens a seguir são apresentados os principais resultados obtidos por pesquisadores quanto ao comportamento mecânico, térmico e características de durabilidade dos compostos de matriz cimentícia com borracha de pneu.

4.3.1. Resistência à compressão

O valor da resistência à compressão é normalmente tido como um índice geral da resistência do concreto, sendo por isso um item analisado em quase todos os trabalhos revisados pela autora (ELDIN e SENOUCI, 1993b; TOPÇU, 1995; KHATIB e BAYOMY, 1999; Li *et al.*, 2004; BIGNOZZI e SANDROLINI, 2006). Em geral, os dados obtidos pelos pesquisadores da área indicam que a resistência à compressão diminui com o aumento da quantidade de borracha incorporada ao concreto, sendo que, quanto maior for o tamanho das partículas, mais significativa é essa redução. A utilização de partículas de borracha muito pequenas ($\varnothing < 1$ mm), entretanto, também pode ser deletéria às propriedades mecânicas, possivelmente devido à maior superfície específica e maior impacto sobre a trabalhabilidade deste tipo de partícula (ALBANO *et al.* 2005; ALBUQUERQUE *et al.* 2005).

Os estudos analisados envolveram substituições crescentes, em volume ou em massa, do agregado miúdo, do agregado graúdo ou do agregado total por partículas de borracha de pneu de diferentes granulometrias. Para uma comparação efetiva dos resultados, no gráfico da Figura 21, foi utilizado como referência a resistência à compressão relativa (S_{CBP}/S_{REF}) – obtida dividindo a resistência do concreto de controle (S_{REF}) pela resistência do concreto com borracha de pneu (S_{CBP}), em função da fração volumétrica de borracha de pneu adicionada, em relação ao volume total de concreto.

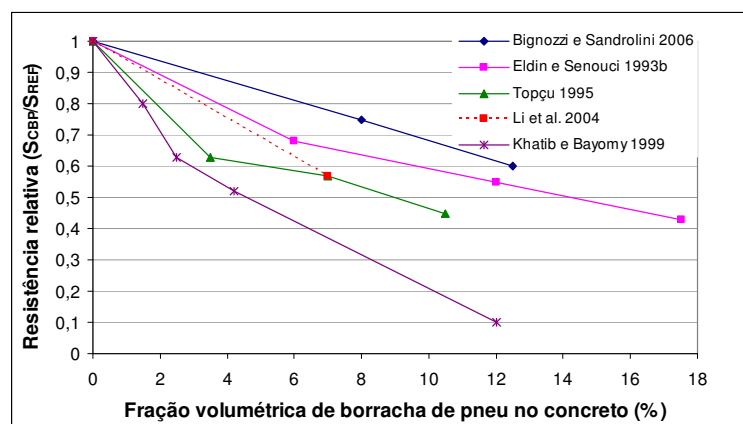


Figura 21: Resistência à compressão relativa em função da fração volumétrica de borracha de pneu no concreto (baseado em BIGNOZZI e SANDROLINI, 2006).

Analisando o gráfico fica evidente a tendência de redução da resistência à compressão do concreto com o aumento da fração volumétrica de borracha de pneu. Os estudos realizados indicam que a intensidade desta redução vai depender da granulometria, da forma de substituição, do método de mistura e do teor de ar incorporado pelas partículas de borracha, entre outros.

Alguns autores propuseram modelos matemáticos para representar a queda nas propriedades mecânicas do concreto com a incorporação de borracha de pneu. O modelo proposto por Popovics (POPOVICS, 1987 *apud* ELDIN e SENOUCI, 1993b) se baseia na análise dos efeitos da macro-porosidade (ar incorporado e grandes poros) na resistência do concreto, considerando que a concentração de tensões em volta dos vazios causa uma redução na resistência (Equação 1). As partículas de borracha, devido ao seu baixíssimo módulo de elasticidade, foram consideradas como grandes poros no concreto. Na Figura 22 estão representados os dados experimentais e a curva obtida pela aplicação da Equação 1 que, devidamente ajustada, originou a Equação 2 (ELDIN e SENOUCI, 1993b), que usa como parâmetro a tensão resistente a compressão do concreto de referência (σ_0).

$$f_{rcl} = \left(1 - \frac{a}{a_{cr}}\right) \cdot 10 \exp\left(-\delta \cdot \frac{a}{a_{cr}}\right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde f_{rcl} = é a resistência relativa em relação a um concreto livre de poros;

a = volume relativo de macroporosidades no concreto;

a_{cr} = volume crítico da macroporosidade (quando a resistência torna-se igual a zero);

δ = parâmetro experimental que depende do campo de tensões na amostra.

$$f_{rcl} = \left(1 - \frac{a}{a_{cr}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_0}{0,007}\right) \cdot \exp\left(0,20 \cdot \frac{a}{a_{cr}}\right) \quad (\text{Equação 2})$$

Khatib e Bayomy (1999) utilizaram uma função matemática para simular a redução na resistência e determinar os parâmetros dessa função por meio de uma análise de regressão não-linear. Na Figura 23 estão representados os dados experimentais e a curva obtida pela aplicação da função proposta (Equação 3). Definindo SRF (*strength reduction factor*) como a razão entre a resistência do concreto com borracha e a do concreto de controle, encontra-se a seguinte relação:

$$SRF = a + b \times (1 - R)^m \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, R = fração volumétrica de borracha de pneu em relação ao agregado total;
 $a = 1 - b$; b e m são parâmetros determinados para cada grupo de dados.

Cabe ressaltar que ambos os trabalhos apresentaram funções condizentes com os dados experimentais e os modelos matemáticos propostos foram estendidos para as propriedades de resistência à tração e resistência à flexão.

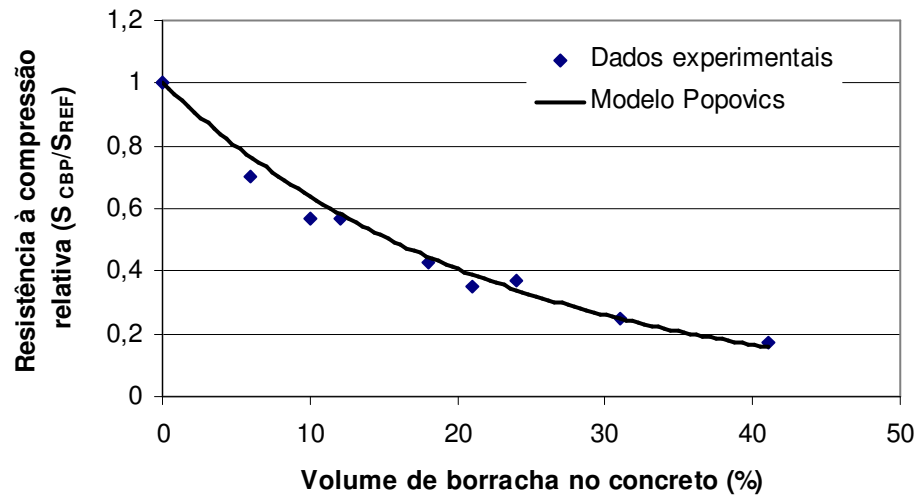


Figura 22: Resistência à compressão relativa em função do volume de borracha no concreto comparada ao modelo proposto por Popovics (baseado em ELDIN e SENOUCI, 1993b).

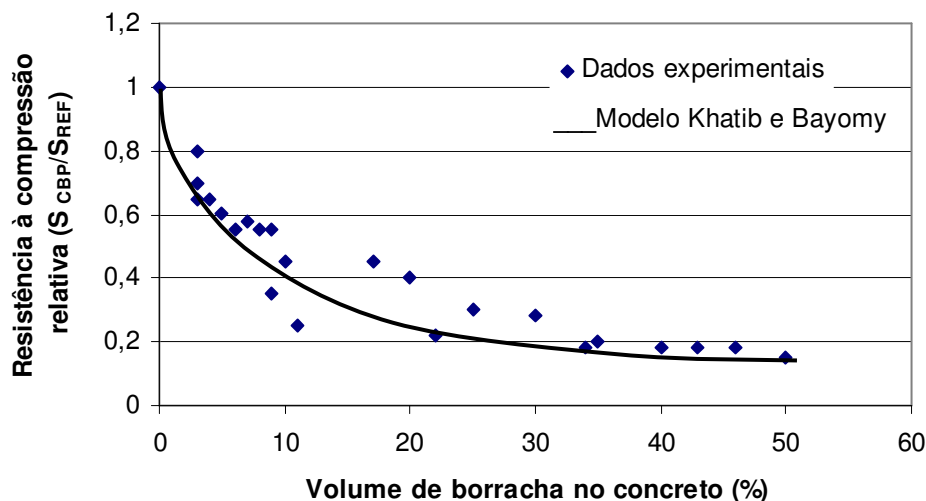


Figura 23: Resistência à compressão relativa em função do volume de borracha no agregado total, comparada ao modelo proposto por KHATIB e BAYOMY (1999).

A redução na resistência do concreto em função da incorporação de partículas de pneu foi atribuída por diversos autores à fraca adesão entre as partículas de borracha de pneu e a matriz de cimento. Segundo Segre (1999), a borracha de pneu é um material de baixa hidrofiliabilidade e, portanto, não cria ligações com a pasta de cimento fresca, gerando uma interface sem aderência à matriz cimentícia. Desse modo, os espaços ocupados pelas partículas de pneu funcionam como vazios e afetam diretamente a resistência mecânica do material.

Alguns estudos foram conduzidos a fim de testar a eficácia de diversos tratamentos superficiais, aplicados às partículas de borracha, em melhorar a aderência borracha/matriz cimentícia e, conseqüentemente, minimizar a redução da resistência decorrente da presença do agregado (ROSTAMI *et al.*, 1993; LI *et al.*, 1998; SEGRE, 1999; ALBUQUERQUE *et al.*, 2004b; ALBANO *et al.*, 2005). Os tratamentos consistem no uso de substâncias que podem atuar como agentes de acoplamento entre a borracha e a matriz cimentícia, ou em substâncias que atacam a superfície da borracha, aumentando sua rugosidade e favorecendo a reatividade.

Na Figura 24 observa-se o efeito de alguns desses tratamentos na resistência à compressão de concretos. São mostrados dados de concretos com partículas de borracha de pneu na condição *sem tratamento superficial* e *tratadas* com água, tetracloreto de carbono (CCl_4) e látex. Os tratamentos químicos parecem proporcionar uma leve melhora de desempenho das misturas contendo partículas de borracha tratadas, que é atribuído à atuação dessas substâncias como agentes de acoplamento entre a borracha e a matriz de cimento (ROSTAMI *et al.*, 1993).

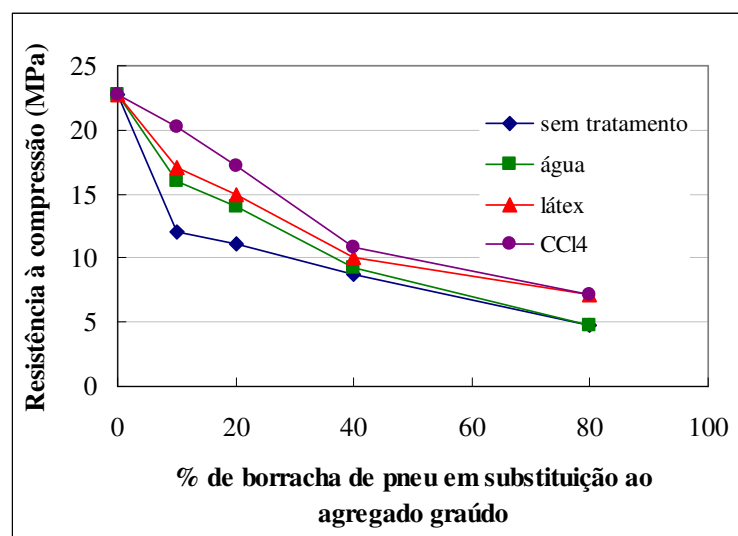


Figura 24: Efeito do tratamento superficial das partículas de borracha na resistência do concreto (ROSTAMI *et al.*, 1993).

Numa outra tentativa de melhorar a aderência borracha/matriz cimentícia com agentes de acoplamento, LI *et al.* (1998) realizaram o pré-revestimento da borracha com METHOCEL (solução polimérica derivada da celulose) e com pasta de cimento. Porém, os dados obtidos indicaram que as substâncias empregadas não surtiram efeitos satisfatórios pois os concretos com borracha tratada apresentaram comportamento igual ou inferior ao concreto com borracha sem tratamento.

Os efeitos de tratamentos superficiais com ácidos e bases foram avaliados em alguns estudos (SEGRE, 1999) por meio de testes de resistência à abrasão e da observação da interface borracha/matriz cimentícia por microscopia eletrônica de varredura.

Na figura 25 observa-se uma comparação entre a interface da matriz de cimento com partículas de borracha, sem tratamento e tratadas com solução de hidróxido de sódio 1N, respectivamente. No caso do tratamento com hidróxido de sódio, a melhor aderência foi atribuída à remoção do estearato de zinco da superfície da borracha, o que leva a um aumento da energia livre da superfície e, conseqüentemente, a uma melhor interação química com outras substâncias, tal como, no caso, a pasta de cimento (SEGRE *et al.*, 2002). Cabe salientar, todavia, que o mesmo tipo de tratamento superficial foi conduzido por outros pesquisadores, não sendo identificada melhoria na interface borracha matriz de cimento (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004b; ALBANO *et al.*, 2005; MACEDO, 2005).

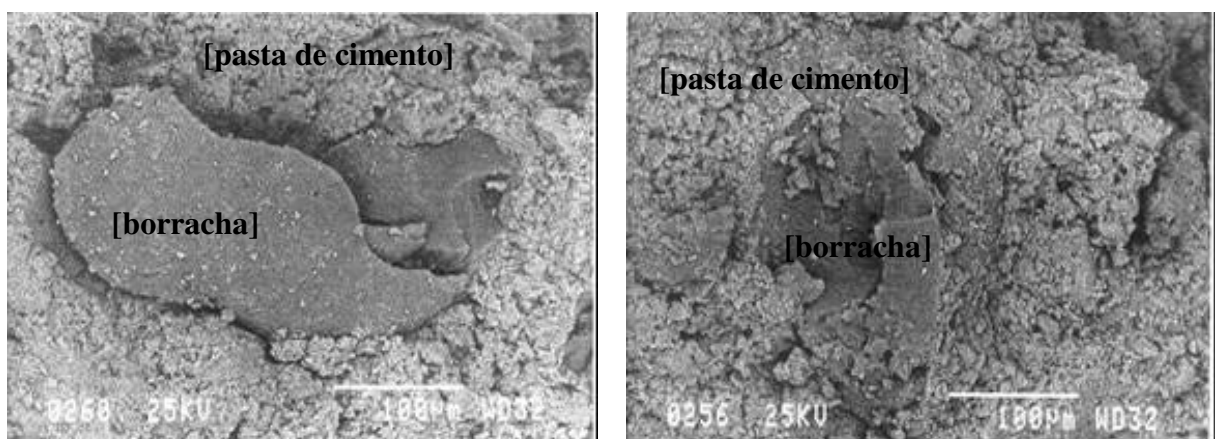


Figura 25: Interface pasta de cimento (a) com a partícula de borracha sem tratamento e (b) com a borracha tratada com NaOH (SEGRE, 1999).

Albano *et al.* (2005) propuseram que a avaliação do efeito de tratamentos superficiais fosse efetuada por meio de medidas de variação da velocidade de pulso ultra sônico. Através deste método, os mesmos não constataram melhorias na interação entre a borracha e a matriz cimentícia com os tratamentos superficiais com hidróxido de sódio e silanos, uma vez que a variação na velocidade de pulso ultra-sônico não foi significativa entre concretos contendo partículas de borracha com e sem tratamento.

De forma geral, analisando os resultados registrados na literatura, constata-se que os diversos tratamentos superficiais realizados, até agora, não apresentaram desempenho significativo o suficiente para justificar o aumento dos custos do material resultante, seja pelo preço das substâncias utilizadas, seja pelo custo de introduzir mais uma etapa no processo de geração dos compósitos.

4.3.2. Resistência à tração

A resistência à tração de compósitos de matriz cimentícia é comumente avaliada por meio de testes de tração por compressão diametral e de flexão em quatro pontos. Esses métodos têm sido usados por diversos pesquisadores para determinar a resistência à tração de argamassas e concretos com borracha de pneu e avaliar o impacto do uso de partículas de pneu nessa propriedade (ELDIN e SENOUCI, 1993a; TOPÇU, 1995; KHATIB e BAYOMY, 1999; BAUER *et al.*, 2001; ALBANO *et al.*, 2005).

Os resultados mostraram que o valor da resistência à tração, assim como o da resistência à compressão, sofre uma diminuição com a adição de borracha de pneu, mas que a taxa de redução é menos intensa do que no caso da compressão, como se pode observar na Figura 26. Além disto, como ocorre na resistência à compressão, a resistência à tração diminui à medida que se aumenta o tamanho e a proporção de partículas de pneu no compósito (Figura 27).

Os comportamentos são semelhantes tanto para o ensaio de compressão diametral quanto para o de flexão. No caso do método de flexão em quatro pontos, apesar do compósito com borracha de pneu apresentar uma menor resistência à tração, foi possível observar uma maior deformação dos corpos-de-prova e um comportamento na fratura mais dúctil, indicando uma maior absorção de energia quando comparado ao concreto de controle (TOPÇU, 1995; TOUTANJI, 1996; LI *et al.*, 1998; KHATIB e BAYOMY, 1999; AKAZAKI *et al.*, 2003).

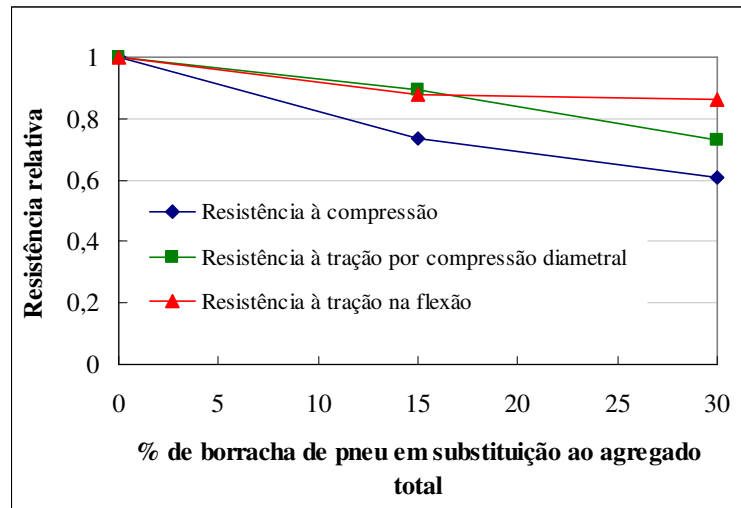


Figura 26: Efeito da adição de borracha de pneu nas propriedades mecânicas do concreto (baseado em BAUER *et al.*, 2001).

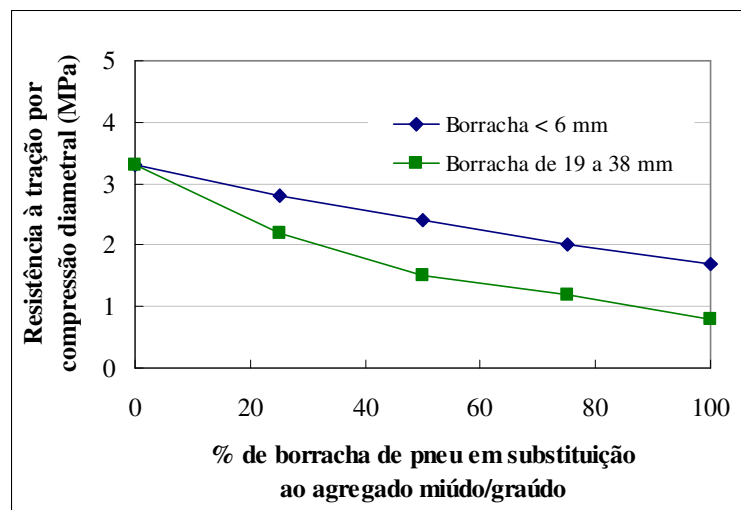


Figura 27: Resistência à tração por compressão diametral x % borracha de pneu (baseado em ELDIN e SENOUCI, 1993a).

Nos ensaios à flexão, os corpos-de-prova de concreto foram capazes de resistir a cargas residuais após a fratura e sofreram considerável deslocamento, caracterizando uma ruptura menos frágil. Esse comportamento foi atribuído à capacidade da borracha, como agregado, sofrer grande deformação elástica antes da fratura do concreto, mostrando-se mais eficaz para o caso de partículas na forma de fibras do que na forma de grânulos, e para fibras médias mais do que para fibras finas (HUYNH *et al.*, 1996; AKAZAKI *et al.*, 2003).

Pesquisadores indicam que, apesar das consideráveis perdas de resistência mecânica com a incorporação de partículas de borracha de pneu, o uso do compósito pode ser tecnicamente viável para utilização em paredes e isolamento térmico para fins de cobertura (LIMA *et al.*, 2000) e no envelopamento de dutos em valas (BAUER *et al.*, 2001), por exemplo.

4.3.3. Propriedades elásticas

Muitos autores baseiam-se nas propriedades elásticas do CBP ao se referirem às suas principais aplicações. De fato o concreto com adição de borracha de pneu, em geral, apresenta maior capacidade de absorção de energia do que o concreto convencional, se constituindo em uma alternativa real para aplicações onde o material estará sujeito a efeitos de impacto e que requerem grande resistência mecânica, tais como barreiras de proteção em rodovias, calçadas, revestimentos e concretos de baixa exigência estrutural (BAUER *et al.*, 2001; ELDIN e SENOUCI, 1993b; TOPÇU, 1995; HERNANDEZ-OLIVARES *et al.*, 2002).

Pesquisas desenvolvidas até então apresentaram uma significativa diminuição do módulo de elasticidade do concreto com a inclusão da borracha em substituição ao agregado, o que significa uma maior possibilidade de deformação do material sob determinada carga (TOPÇU e AVCULAR, 1997a; RIBEIRO *et al.*, 2002). Na Figura 28 tem-se um exemplo do comportamento de deformação típico de compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu. Observa-se que, para uma mesma tensão, maiores níveis de deformação são alcançados em relação à amostra de controle, principalmente quando se utilizam partículas de pneu na forma de fibras.

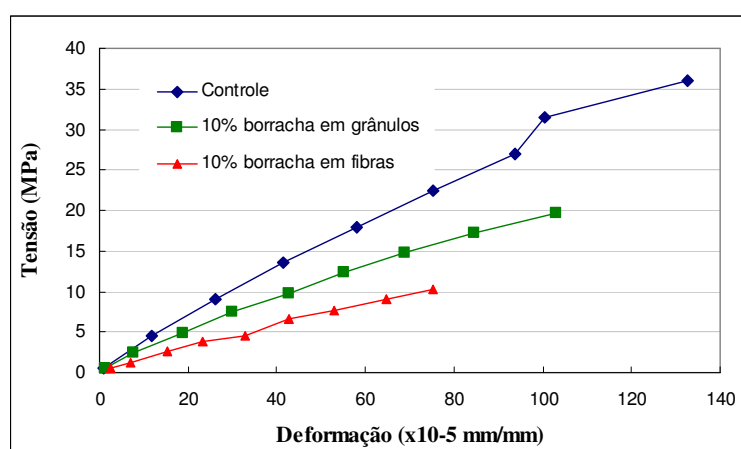


Figura 28: Módulo de elasticidade secante em função do tipo de borracha de pneu (baseado em RIBEIRO *et al.*, 2002).

A introdução de um comportamento mais dúctil se baseia no fato de que, no concreto, o agregado é um dos principais elementos que restringem a deformação. A inclusão de borracha, em substituição parcial do agregado, atenua essa restrição, dando ao concreto uma maior deformabilidade. A contribuição da borracha de pneu para a modificação da deformabilidade do concreto pode ser estimada considerando-se o CBP um material compósito de três fases, sendo que a argamassa forma a matriz; enquanto os agregados graúdos e a borracha são as fases dispersas. As propriedades finais do material compósito vão ser resultado da combinação das propriedades individuais de seus constituintes e das suas respectivas frações volumétricas. Como a borracha possui um módulo de elasticidade cerca de 100 vezes menor do que o do agregado, a sua influência dependerá da fração volumétrica utilizada e da forma de substituição, se pelo agregado miúdo ou graúdo. Baseados nos modelos de análise de células unitárias dos compósitos com fases dispersas em paralelo (Equação 4), em série (Equação 5) e distribuídas (Equação 6), TOPÇU e AVCULAR (1997a) chegaram a uma equação para previsão do módulo de elasticidade do CBP (Equação 7), avaliando o mesmo como um compósito de fase distribuída.

$$E_{CBP} = E_m \cdot V_m + E_b \cdot V_b \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{1}{E_{CBP}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_b}{E_b} \quad (\text{Equação 5})$$

$$E_{CBP} = E_m \frac{1 + 2V_{ar} \cdot \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 2)}}{1 - 2V_{ar} \cdot \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 2)}}, \quad \alpha = \frac{E_{ar}}{E_m} \quad (\text{Equação 6})$$

$$E_{CBP} = k \cdot E_m \frac{1 + 2V_{ar} \cdot \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 2)}}{1 - 2V_{ar} \cdot \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 2)}}, \quad \alpha = \frac{E_{ar}}{E_m} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

E_{CBP} , E_m e E_b são os módulos de elasticidade do compósito, da matriz e da borracha, respectivamente;

V_m e V_b são as frações volumétricas da matriz e da borracha, respectivamente;

k é um coeficiente de ajuste utilizado para compensar discrepâncias entre resultados experimentais e teóricos.

Os resultados da equação 7 foram comparados com resultados experimentais, sendo a mesma considerada válida dentro dos limites superiores (Equação 4) e inferiores (Equação 5) determinados para o coeficiente k em caso de substituição do agregado graúdo ou miúdo.

Outra abordagem para a modificação de comportamento resultante da adição de partículas de borracha pode ser baseada no fato de que o módulo de elasticidade e a resistência à compressão são duas propriedades ligadas entre si. Assim sendo, analisando sob outro aspecto, a redução do valor do módulo de elasticidade do concreto com borracha de pneu (CBP) pode ser atribuída não somente à elasticidade da borracha, mas também à redução da resistência do compósito. Por essa razão, torna-se mais adequado analisar o comportamento do CBP em termos de absorção de energia, através de sua tenacidade.

Para determinar a tenacidade de um material se mede a área sob a curva tensão x deformação, resultante de um carregamento estático, a qual indica a energia absorvida pela amostra até o momento da ruptura. A tenacidade pode ser avaliada de duas maneiras distintas, como uma propriedade plástica, ou como propriedade elástica, quando também é chamada de resiliência. Quanto maior a tenacidade do material, maior é a energia necessária para levá-lo à ruptura. Na figura 29, a área sob a curva tensão x deformação representa a tenacidade: $A1$ representa a energia consumida durante a deformação plástica, ou permanente, até a ruptura, e será tanto maior quanto mais dúctil for o material. Já $A2$ representa a energia da deformação elástica, ou resiliência, que é devolvida pela recuperação da deformação no momento da ruptura.

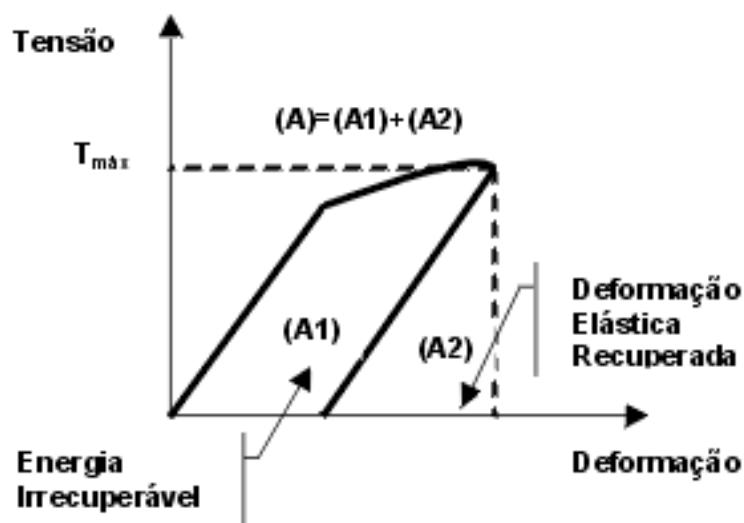


Figura 29: Diagrama tensão x deformação para determinação da tenacidade (baseado em ELDIN e SENOUCI, 1993b).

Um conceito relacionado ao de tenacidade é o índice de fragilidade (IF), que consiste na relação entre a energia elástica e a energia plástica do material ($IF = A2/A1$). Quando há maior proporção de deformação plástica, a relação $A2/A1$ tende a zero e a recuperação da energia do sistema torna-se irreversível. Quando há maior proporção de deformação elástica, a relação $A2/A1$ tende ao infinito e a energia do sistema torna-se completamente reversível. À medida que o índice de fragilidade diminui é possível identificar uma transição no material de uma condição frágil para dúctil (TOPÇU, 1997).

O concreto é considerado um material frágil, que se rompe de maneira abrupta e suporta apenas pequenas deformações. Para um material tenaz, a maior parte da energia absorvida até a ruptura é plástica, enquanto que, para um material frágil, a maior parte da energia total é elástica. Portanto, pode-se diminuir a fragilidade do concreto (caracterizada por uma ruptura instantânea e brusca) aumentando sua energia plástica, ou seja, elevando sua capacidade de absorver a energia de ruptura através de uma maior deformação. Estudos indicaram que a adição de 10% de borracha no concreto aumenta a tenacidade em 23%, comparada ao concreto de referência, apesar de resultar em uma redução de 65% da resistência à compressão. Ou seja, a redução observada na resistência é compensada por uma grande capacidade de deformação do CBP, de tal maneira que a energia necessária para levá-lo à ruptura torna-se maior do que a de um concreto convencional (ELDIN e SENOUCI, 1993b; TOPÇU e ÖZÇELIKÖRS, 1991; ESER, 1995 *apud* TOPÇU, 1997).

Na Tabela 2 tem-se um exemplo da variação da tenacidade e da resiliência de concretos com borracha de pneu em relação a um concreto de controle, a partir de dados obtidos por Eldin e Senouci (1993b). Observa-se que, quanto menor for o tamanho da partícula, maior é a capacidade de deformação plástica do CBP.

Tabela 2: Valores de tenacidade conforme regiões A, A1 e A2 da Figura 29 (baseado em ELDIN e SENOUCI, 1993b).

% de borracha	Ø máx das partículas de borracha (mm)	A (MPa)	A1 (energia plástica em relação a A)	A2 (energia elástica em relação a A)	Índice de Fragilidade (A2/A1)
100	25	0,0041	92%	8%	9%
	19	0,0041	83%	17%	20%
	6	0,0041	88%	12%	14%
	1	0,0207	80%	20%	25%
0	---	0,0496	15%	85%	567%

Na tabela são apresentados, ainda, os índices de fragilidade de concretos com borracha de pneu em relação a um concreto de controle. Observa-se que, quanto menor o tamanho da partícula, maior é o índice de fragilidade do CBP, embora pareça haver uma fase de transição de comportamento entre as partículas de 1mm e 19 mm.

A tenacidade de um material também pode ser avaliada por meio da energia absorvida pela amostra no momento do impacto resultante de um carregamento dinâmico. Testes de impacto foram realizados em amostras de concreto com e sem borracha de pneu, simulando condições de colisão de automóveis em barreiras de proteção e considerando que, no momento do impacto, a energia cinética do veículo é convertida em deformação do concreto. Observou-se que a resistência ao impacto do concreto é reduzida pela presença das partículas de borracha e com a redução do tamanho das partículas. Esses resultados, quando comparados à resistência ao impacto do aço, resultam em taxas menores do que as do concreto de controle e representam menor dano após colisão, pois indicam maior capacidade de absorção de energia (TOPÇU e AVCULAR, 1997b).

4.3.4. Propriedades referentes à durabilidade

Para um bom desempenho de uma estrutura de concreto é fundamental que ela atenda às exigências mecânicas e que seja durável, sendo, portanto, a durabilidade uma característica tão importante quanto a resistência. Para a aplicação de um material na engenharia é de suma importância conhecer suas características de durabilidade, sua suscetibilidade aos agentes agressivos e a forma de neutralizá-los (NEVILLE, 1997).

A estabilidade química da borracha de pneu foi avaliada por Huyhn e Raghavan (1997), através de testes em ambientes altamente alcalinos, como é o caso do concreto ($\text{pH} \cong 12,5$). Para os fins do estudo, a borracha foi submetida a soluções de NaOH ($\text{pH} = 10$), Ca(OH)_2 ($\text{pH} = 12,5$), cimento ($\text{pH} \cong 13$) e água ($\text{pH} = 7$) por um período de 4 meses. Nesse período foram realizados ensaios de perda de massa, resistência à tração, análise micro-estrutural e determinação da variação do pH das soluções com borracha de pneu em imersão. Não foi verificada nenhuma variação considerável das propriedades da borracha após a exposição. No ensaio de variação do pH das soluções, foi observado que houve redução do pH das soluções com o aumento do tempo de imersão. Esse fato pode ser atribuído à reação das hidroxilas com o dióxido de carbono da atmosfera, uma vez que uma solução teste, contendo somente NaOH, apresentou a mesma variação de pH.

A estabilidade da pasta de cimento modificada com partículas de pneu sem tratamento e tratadas com soluções de NaOH, H₂SO₄ e silicato de sódio também foi avaliada (SEGRE 1999). Para tanto, foram realizados testes de absorção por imersão e por capilaridade, resistência ao ataque ácido e resistência à abrasão. Observou-se que as amostras contendo borracha tratada com NaOH apresentaram menor absorção de água do que aquelas contendo borrachas submetidas a outros tipos de tratamento, e que a inclusão de borracha na pasta de cimento dificultou a ação do ataque por ácido clorídrico, devido à grande resistência química da borracha (vide resultados apresentados na Tabela 3). Outros pesquisadores observaram resultados semelhantes quanto à redução da absorção do concreto quando da adição da borracha de pneu, em relação à amostra de controle, mesmo utilizando partículas de borracha sem tratamento superficial (MACEDO *et al.*, 2005b; BONNET, 2004; MENEGUINI e PAULON, 2002; FIORITI *et al.*, 2002).

Tabela 3: Absorção de água por imersão e perda de massa por ataque de HCl (SEGRE, 1999).

Amostra	Absorção de água (%)	Perda de massa devido ao ataque por HCl (%)
Controle	13,47 ± 0,34	22,1 ± 1,9
10% borracha tratada com H ₂ SO ₄ (Solução 1M)	14,40 ± 0,49	17,6 ± 0,3
5% borracha tratada com H ₂ SO ₄ (Solução 1M)	16,01 ± 0,34	9,7 ± 0,5
10% borracha tratada com NaOH (Solução 1M)	13,19 ± 0,29	11,1 ± 1,5
5% borracha tratada com NaOH (Solução 1M)	15,48 ± 0,16	11,2 ± 0,6
10% borracha tratada com água (imersão)	14,11 ± 0,37	13,1 ± 0,4
5% borracha tratada com água (imersão)	15,20 ± 0,14	13,2 ± 1,0
10% borracha tratada com NaOH (Sol. Saturada)	12,41 ± 0,30	---

A resistência à abrasão da pasta de cimento contendo borracha tratada com NaOH também foi avaliada (SEGRE, 1999) e os resultados mostraram-se satisfatórios, uma vez que foi registrado apenas um pequeno aumento da perda de massa, com relação à amostra de controle (Figura 30).

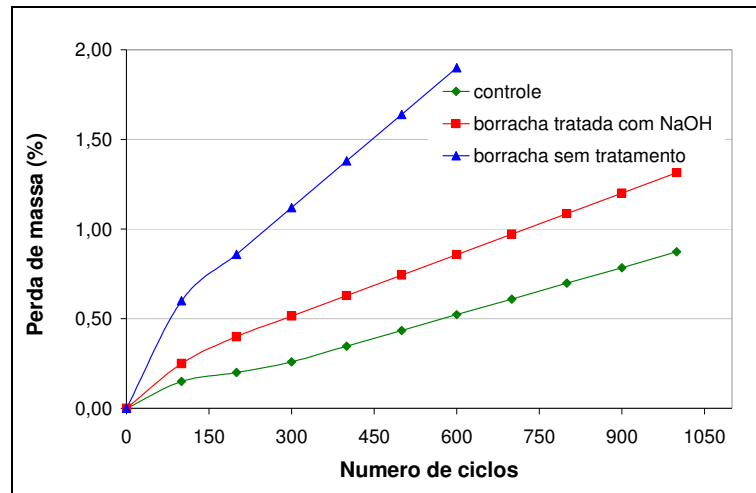


Figura 30: Resistência à abrasão da pasta de cimento com partículas de pneu (SEGRE, 1999).

A durabilidade de argamassas e concretos com borracha de pneu foi avaliada também por meio de testes de carbonatação (BONNET, 2004; MACEDO *et al.*, 2005b). Os resultados indicaram que as partículas de borracha contribuem para a redução da área carbonatada, como se pode verificar na figura 31, onde se observa que a amostra de CBP apresenta uma maior alcalinidade na periferia, especialmente em torno de algumas partículas de borracha.

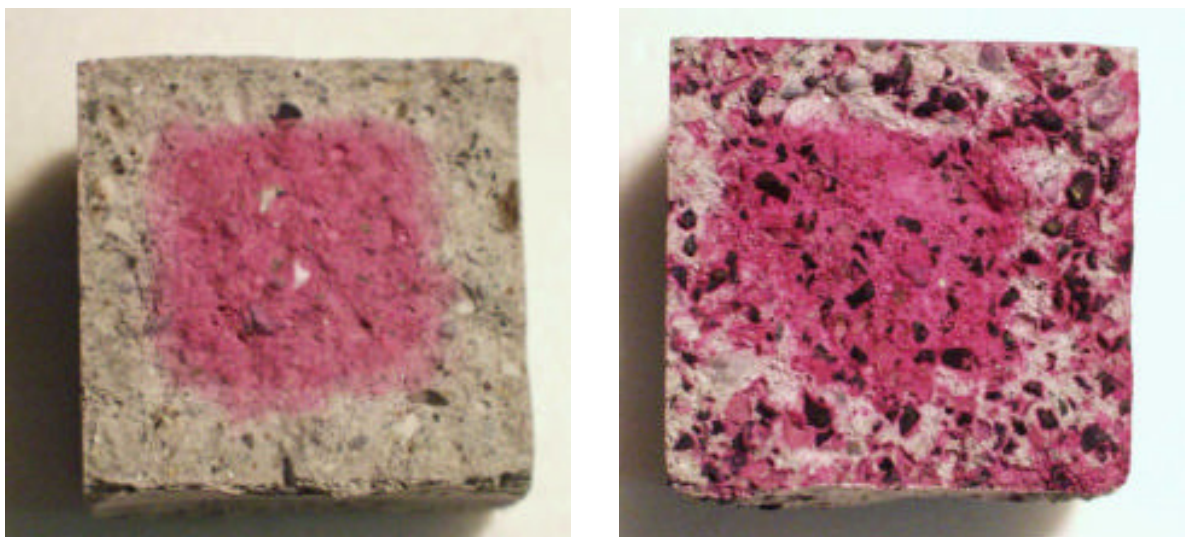


Figura 31: Evidência da área carbonatada de amostras de argamassa na idade de 1 ano (a) sem borracha de pneu e (b) com 30% de borracha de pneu em substituição ao agregado (BONNET, 2004).

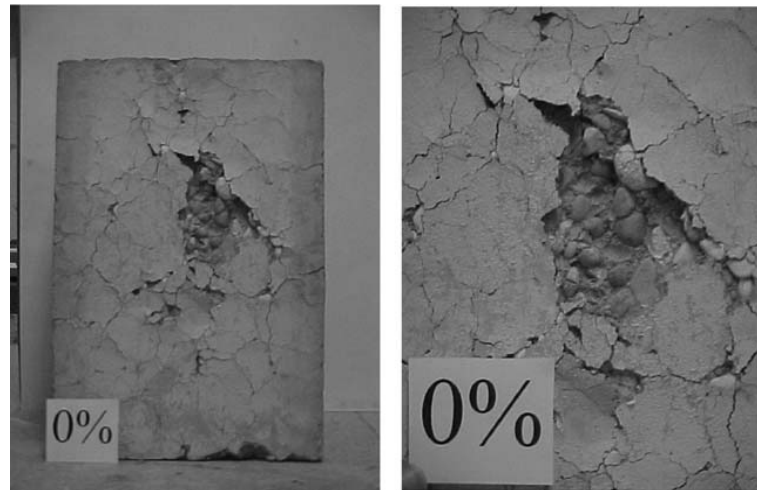
Algumas hipóteses foram levantadas para explicar esse comportamento, mas não puderam ser confirmadas experimentalmente: que ocorre uma maior concentração de portlandita em torno das partículas de borracha e, por isso, o tempo necessário para consumação da reação com CO_2 nessas regiões é mais longo; que a presença das partículas de borracha causa uma mudança na distribuição dos poros e na umidade relativa no interior destes, dificultando a penetração do CO_2 . Ou, ainda, que o CO_2 reage com as partículas de borracha, formando substâncias de natureza básica, mas diferentes dos carbonatos normalmente encontrados nos materiais de matriz cimentícia, as quais, por serem pouco solúveis na água, permanecem em torno das partículas de borracha (BONNET, 2004).

A penetração de agentes agressivos nos materiais de matriz cimentícia ocorre em maior ou menor intensidade em função da porosidade do material e do grau de conexão entre os poros. Para avaliar a porosidade de compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu, foram utilizados testes de frequência ultra-sônica (HERNANDEZ-OLIVARES e BARLUENGA, 2004; ALBANO *et al.*, 2005; MACEDO *et al.*, 2005b), de permeabilidade ao ar (BENAZOUK *et al.*, 2004; BONNET, 2004); e de absorção por imersão e capilaridade (MENEGUINI e PAULON, 2002; BENAZOUK *et al.*, 2004; ALBANO *et al.*, 2005; SEGRE *et al.*, 2004).

Nos testes de frequência ultra-sônica observou-se redução da velocidade de propagação da onda nas amostras contendo borracha de pneu, sendo esse efeito mais pronunciado com o aumento do teor de borracha e diminuição do tamanho das partículas. Tal efeito foi atribuído à redução da densidade dos concretos e aumento do teor de ar aprisionado, como discutido no item 4.2, que resultaria em um aumento da porosidade dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu. Entretanto, nos testes para avaliação da permeabilidade ao ar, da absorção por imersão e da absorção por capilaridade, verificaram-se menores valores nas amostras com borracha de pneu do que aqueles observados nos concretos de referência. Esses resultados indicam que, embora os compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu tendam a apresentar maior porosidade, os poros aparentam não se encontrar interconectados e, conseqüentemente, esses materiais são menos suscetíveis à penetração de agentes agressivos do que os concretos de referência.

A durabilidade de compósitos tipo CBP também foi avaliada por meio de testes de resistência ao fogo (HERNANDEZ-OLIVARES e BARLUENGA, 2004; MACEDO, 2005). Placas de

concreto simples e de CBP foram submetidas a temperaturas na faixa de 800 a 1000°C. Observou-se que as placas de referência apresentaram um lascamento explosivo (fenômeno de *spalling*), enquanto as placas com teores de borracha de até 8% apresentaram grande nível de fissuração, porém sem *spalling*. Isto foi atribuído à abertura de canais deixados pela queima das partículas de borracha, que permite a saída do vapor de água e reduz as tensões internas devido à pressão de vapor. Na figura 32 observa-se o aspecto visual das placas com e sem borracha de pneu após o fogo. Nos ensaios realizados por MACEDO (2005), entretanto, as placas contendo teores de 10% e 15% de borracha de pneu apresentaram lascamento, embora com menor intensidade do que na amostra de controle. Quanto à análise microestrutural, comparando as amostras com 15% de borracha e a referência após a ação do fogo observou-se que houve uma perda da aderência tanto do agregado quanto das fibras de borracha.



(a)

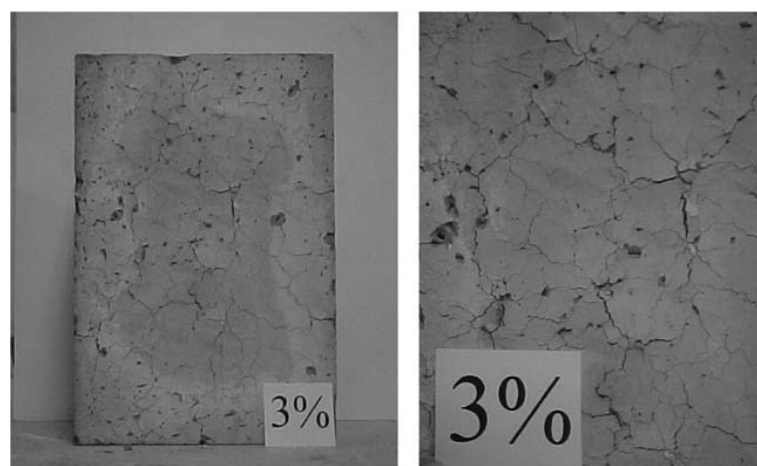


Figura 32: Superfície das placas de concreto expostas ao fogo. (a) referência (sem borracha de pneu) e (b) contendo 3% de borracha de pneu. (HERNANDEZ-OLIVARES e BARLUENGA 2004).

Em ensaios semelhantes realizados por Fatuhi e Clark (1996), amostras de concreto e argamassa com teores variados de borracha de pneu foram expostas ao fogo por três minutos e observou-se que as partículas de borracha que se apresentavam na superfície foram queimadas. Alguma chama remanescente nos corpos-de-prova extinguiram-se após 4 ou 5 segundos, indicando que a inflamabilidade da borracha de pneu é muito reduzida pela presença do cimento e dos agregados.

Analisando todos os resultados apresentados pode-se concluir que, de maneira geral, os compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu apresentam características que indicam um desempenho semelhante ou superior ao concreto convencional quanto aos aspectos referentes à durabilidade.

4.3.5. Propriedades referentes ao conforto térmico e acústico

Diversos pesquisadores (LIMA e ROCHA, 2004; MACEDO *et al.*, 2005c) têm observado que os materiais cimentícios com borracha de pneu apresentam melhores características de isolamento térmico e acústico quando comparados a composições semelhantes, sem adição de partículas de pneu. Essas são características relevantes para avaliar a aplicabilidade desses materiais em sistemas construtivos para habitação.

Comportamento acústico

Existem dois conceitos importantes para a palavra som: vibração ou perturbação física e sensação sonora. O som também pode estar sob forma de vibração e, ao mesmo tempo, provocar sensação sonora, como no caso de máquinas de elevador. O ensaio de isolamento sonora em elementos e sistemas construtivos é realizado em uma *câmara reverberante* e determina o desempenho acústico de uma peça em função do isolamento sonoro a ruídos externos ou laterais, como é o caso de casas geminadas, por exemplo. Para realização do ensaio, pórticos de concreto são posicionados entre duas câmaras com vedação pneumática, numa das quais uma caixa acústica emite ruídos e na outra tem-se os receptores. Ensaio realizados em placas de compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu indicaram que estas podem atingir níveis de atenuamento de ruído da ordem de 26 a 39 dB(A), o que caracteriza esses materiais como adequados para aplicação em paredes e tetos, conforme limites das normas específicas (LIMA e ROCHA, 2004; MACEDO *et al.*, 2005c).

Outros estudos foram desenvolvidos com vistas a avaliar o desempenho dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu em estruturas sujeitas a vibrações tais como bases de máquinas, calçadas, fundações, rodovias, etc. Os resultados mostraram que a frequência fundamental de uma estrutura de concreto mudou de 8 Hz para 5 Hz quando parte da base da estrutura foi substituída pelo concreto com borracha de pneu. Estes resultados indicam que a presença de partículas de borracha na base da estrutura pode mudar significativamente a resposta dinâmica e levar a uma substancial redução da ressonância (LI *et al.*, 1998).

Comportamento térmico

Características térmicas como condutividade, difusividade, calor específico e coeficiente de dilatação são propriedades importantes quando se tem em vista o conforto térmico das habitações e a adequação dos sistemas construtivos com a utilização de blocos e placas pré-moldados. Alguns estudos foram conduzidos em argamassa e concreto com adição de partículas de borracha visando verificar seus efeitos sobre estas propriedades (LIMA e ROCHA, 2004; MACEDO, 2005; LA SAPIENZA, 2007). Os resultados indicaram que as amostras contendo partículas de pneu apresentaram valores de condutividade, difusividade e coeficientes de dilatação térmica inferiores às amostras de controle, enquanto o calor específico resultou em valores superiores, sendo esse efeito acentuado com o aumento do teor de borracha. Esses resultados são satisfatórios para fins de construção civil para habitação, uma vez que o compósito de matriz cimentícia com borracha de pneu proporciona melhor isolamento térmico.

A redução da condutividade e da difusividade deve-se a características intrínsecas da borracha quanto à baixa condução de calor, transferindo parcialmente esta característica ao material compósito, além do maior teor de ar incorporado encontrado nas amostras com borracha.

Cabe destacar que a literatura consultada não registra resultados de uso de partículas de pneu em concreto massa, tema do presente estudo. Neste caso, quanto menos isolante for o material, melhores serão as condições de dissipação de calor e, conseqüentemente, menor o risco de fissuração, um benefício importante. Por isto, um dos focos do programa experimental, que será descrito no próximo capítulo, é justamente a determinação das propriedades associadas ao comportamento térmico do material.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa foram selecionados com base nas observações retiradas da revisão bibliográfica e em testes piloto realizados em argamassas e concretos. Essas observações indicaram a viabilidade da utilização das partículas de borracha de pneu em dimensões semelhantes à areia e a inviabilidade da utilização de bases e ácidos nos tratamentos superficiais da borracha de pneu para utilização em concretos.

Para a dosagem de referência foi selecionada uma classe de concreto massa com resistência característica (F_{c_k}) igual a 20 MPa aos 28 dias, com dimensão máxima característica do agregado de 38 mm, usualmente especificada para algumas estruturas de barragens. Em todas as dosagens os agregados foram utilizados na condição saturada com superfície seca (S.S.S) e foi feita a correção da água no traço. A relação água/cimento foi fixada em 0,492 e o abatimento foi mantido na faixa de $50\text{mm} \pm 10\text{mm}$.

5.1. MATERIAIS

O agregado graúdo utilizado foi do tipo litológico granito, com dimensões características de 19 e 38 mm, e o agregado miúdo foi uma areia natural de rio, ambos provenientes da região de Goiânia, Goiás. O cimento empregado foi do tipo CII F-32, também de uma fábrica da região.

A borracha de pneu foi utilizada na forma de fibras, procedentes da raspagem de pneus durante o processo de recauchutagem, e na forma de grânulos, oriundos da trituração mecânica de pneus inservíveis (à temperatura ambiente), sendo eliminadas as fibras de nylon e metálicas. Em ambos os casos tratava-se de pneus usados em ônibus e caminhões.

As partículas de borracha foram utilizadas na condição como recebidas (ou “sem tratamento superficial”) e revestidas com aditivos de base polimérica (ou “tratadas superficialmente”).

Os aditivos poliméricos utilizados, a saber, formulações à base de estireno-butadieno, resina acrílica e vinílica, são conhecidos como *latexes*. Os mesmos possuem boa compatibilidade com materiais de matriz cimentícia e são amplamente usados para melhorar a fluidez e a coesão de grautes, a aderência de argamassas de reparo ao substrato, aumentar a tenacidade e a impermeabilidade de concretos e argamassas, etc. (ACI Comitee 548, 1994).

Pesquisas em argamassas e concretos modificados com polímeros têm envolvido teores de 1 a 25% de polímero em relação à massa de cimento (FOLIC e RADONJANIN, 1998; ZHONG e CHEN, 2002; BARLUENGA e HERNANDEZ-OLIVARES, 2004). Nesta pesquisa, os aditivos foram utilizados na proporção de 200g/kg de borracha, sendo o teor de água das formulações de látex considerados no cálculo da água de amassamento. As quantidades utilizadas resultaram em teores de 1 a 5% de partículas de borracha em relação à massa de cimento.

A estratégia empregada para executar o tratamento superficial consistiu em utilizar uma quantidade de polímero suficiente para umedecer as partículas de borracha, imediatamente antes de sua incorporação ao traço de concreto (*pré-envolvimento*). O sistema de pré-envolvimento de agregados com *latex* foi usado com sucesso por WU *et al.* (2002), que observaram melhor rendimento do polímero por meio desse processo de mistura. A escolha dessa estratégia de incorporação decorreu da consideração de que a mesma poderia favorecer o contato, dada a compatibilidade química dos polímeros de revestimento com a borracha, uma vez que ambos são de natureza predominantemente orgânica, embora a borracha de pneu possua uma grande carga de aditivos minerais.

Na Tabela 4 estão relacionadas as características básicas dos materiais utilizados no desenvolvimento de todo o programa experimental.

Nas Figuras 33 a 35 são apresentadas as curvas granulométricas das partículas de borracha de pneu, enquanto nas Figuras 36 e 37 pode ser observado seu aspecto morfológico.

Os demais resultados dos ensaios de caracterização dos materiais estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 4: Características básicas dos materiais empregados na pesquisa

Material	Tipo
Cimento Portland	CP II F – 32
Agregado graúdo	Granito (diâmetro característico 19 e 38 mm)
Agregado miúdo	Areia natural média
Borracha de pneu	Grânulos : \varnothing 0,42 mm
	Grânulos : \varnothing 1,5 mm
	Raspas (fibras): até 10 mm de comprimento Fator de Forma (comprimento/diâmetro) = 10
Aditivos para concreto	Superplastificante à base de policarboxilatos. Incorporador de ar isento de cloretos, à base de resina sintética.
	Base acrílica
Aditivo de base polimérica para tratamento superficial da borracha	Base vinílica
	Base estireno-butadieno

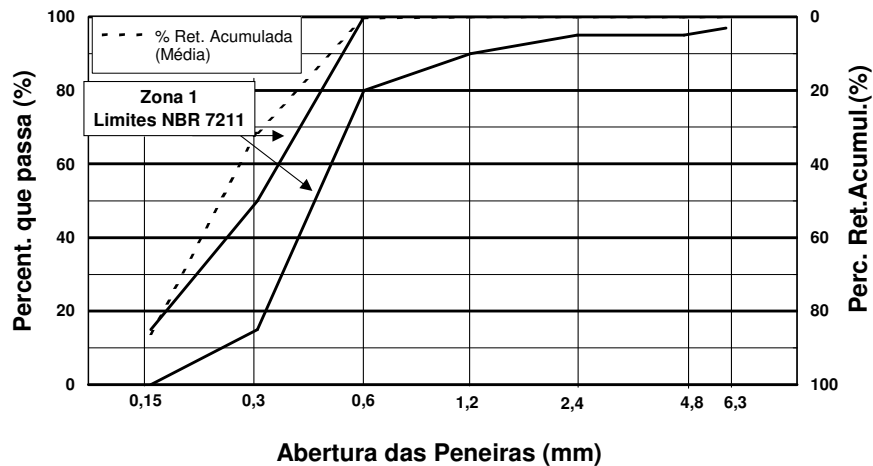


Figura 33: Granulometria das partículas de borracha de pneu em forma de grânulos
($D_{máx}$ 0,42 mm)

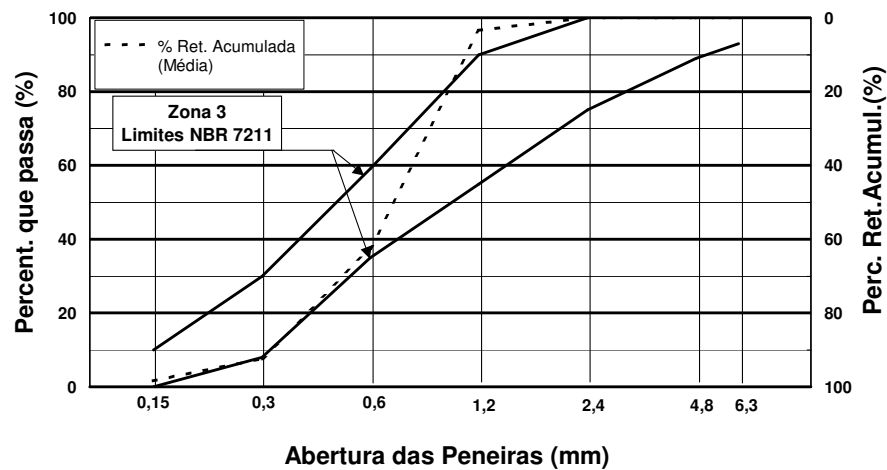


Figura 34: Curva granulométrica das partículas de borracha de pneu em forma de grânulos – (D_{máx} 1,5 mm)

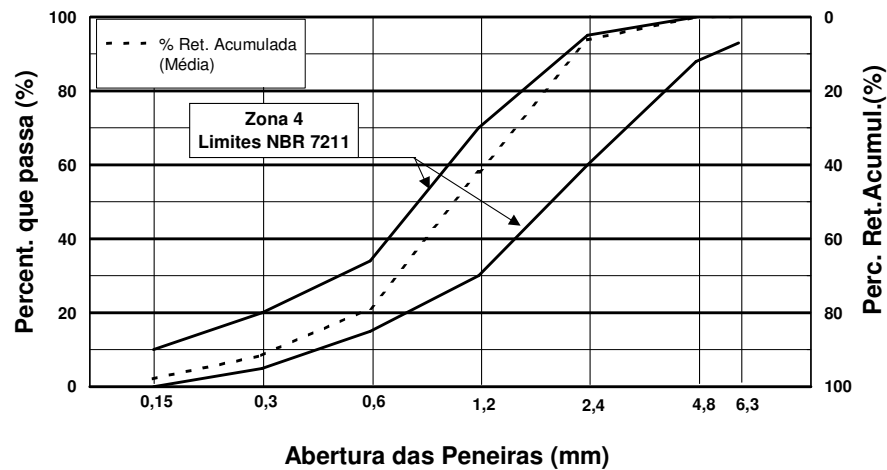


Figura 35: Curva granulométrica das partículas de borracha de pneu em forma de fibras (comprimento nominal = 10 mm) – Classificação granulométrica com D_{máx} de 4,8 mm.

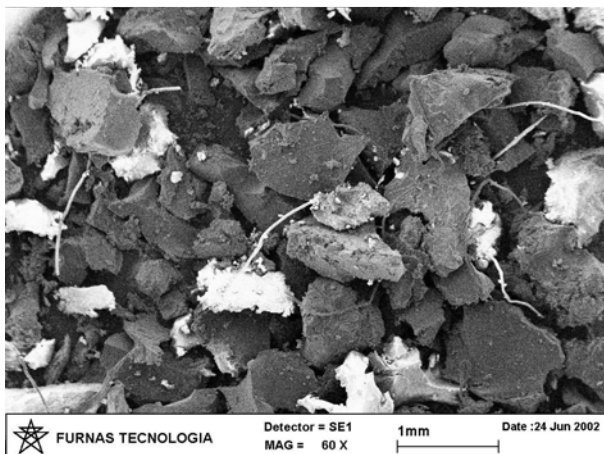


Figura 36: Morfologia dos grânulos de borracha de pneu.

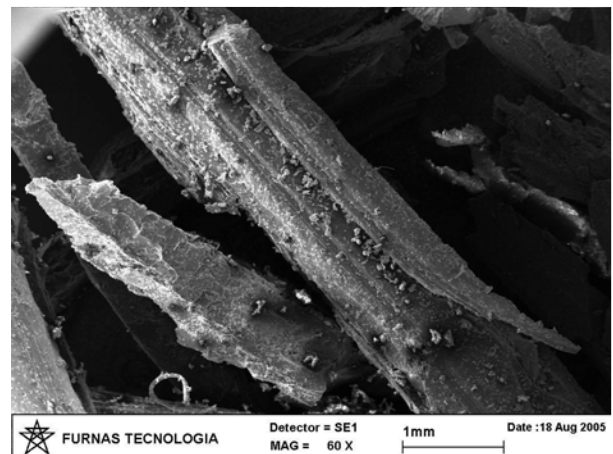


Figura 37: Morfologia das fibras (raspas) de borracha de pneu.

5.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Antes de iniciar o programa experimental deste trabalho foram realizados alguns testes piloto em argamassas, a fim de verificar se a adição de borracha e o uso de tratamentos superficiais influenciavam as propriedades do material, quando comparado com uma argamassa sem adição de borracha. Esses testes não foram conclusivos, uma vez que os resultados foram mascarados pelo alto teor de ar incorporado devido à adição da borracha (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004b).

Estudos preliminares com concreto também foram realizados com o objetivo de identificar a forma mais adequada de incorporação da borracha. Foram realizadas dosagens com partículas de borracha sem tratamento, de $D_{máx}$ igual a 1 mm, resultando em traços com proporções 1:4 e 1:10 de substituição do agregado miúdo ou do agregado total. Os resultados indicaram que a incorporação da borracha em substituição à areia proporciona menor redução das propriedades mecânicas do que em substituição ao agregado total (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004c), comportamento similar ao registrado por Akasaki *et al.* (2001).

A partir desses estudos iniciais foi traçado o programa experimental a ser desenvolvido nesta pesquisa, que é apresentado na Figura 38. Ao longo do mesmo foram realizados estudos em concreto massa, com substituições parciais do volume de areia por borracha de pneu. As partículas de pneu foram utilizadas em diferentes granulometrias, teores e tratamentos superficiais.

Como indicado na figura, o programa experimental foi desenvolvido em três etapas. A primeira delas envolveu uma ampla faixa de teores de partículas de borracha e foram realizados ensaios básicos para identificar a eficácia dos tratamentos superficiais em proporcionar uma boa interface borracha/matriz do concreto e o maior teor de substituição das partículas de borracha, sem prejuízo das propriedades mecânicas. Nessa etapa foram também selecionadas amostras para análise micro-estrutural por microscopia eletrônica de varredura, a fim de correlacionar a qualidade da interface borracha-matriz cimentícia com as características mecânicas do CBP. Os dados das dosagens estudadas na Etapa I estão apresentados no Apêndice B.

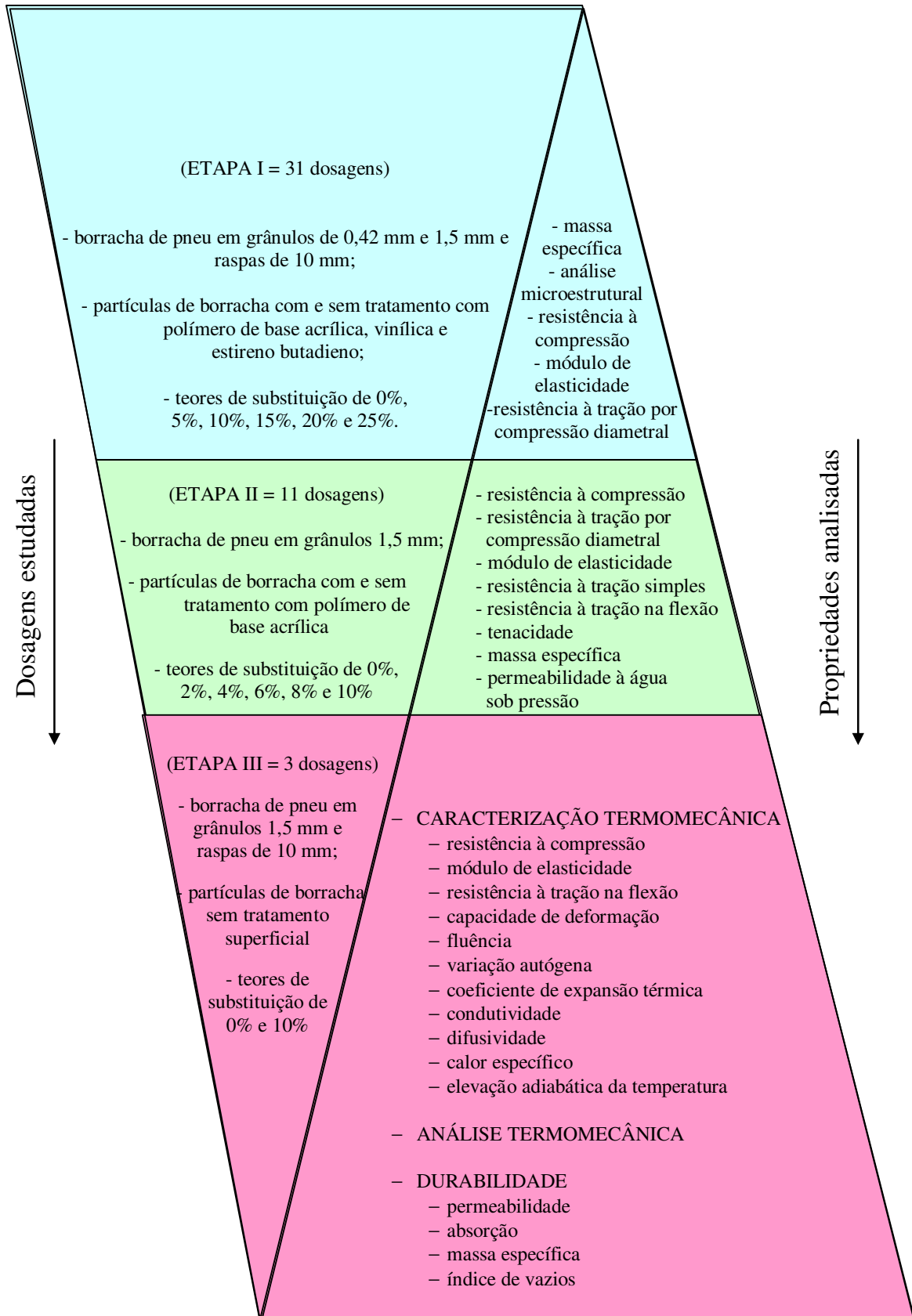


Figura 38: Dosagens e propriedades analisadas em cada etapa do programa experimental.

Na segunda etapa foram selecionados os parâmetros que resultaram em melhor desempenho dentre as variáveis analisadas na primeira etapa. Foram estudadas dosagens com teores de borracha em intervalos menores, até o máximo identificado na etapa I. As propriedades analisadas buscaram avaliar o efeito da adição de partículas de pneu nas propriedades referentes à tenacidade e permeabilidade do concreto. Os dados das dosagens estudadas na Etapa II estão apresentados no Apêndice C.

Para o desenvolvimento da terceira etapa do estudo foram selecionadas duas composições ótimas, dentre aquelas utilizadas na primeira e na segunda etapa. Foi estudado o efeito da utilização da borracha de pneu nas propriedades térmicas, elásticas e visco-elásticas do concreto, visando avaliar os riscos de fissuração de origem térmica. Adicionalmente, algumas amostras foram mantidas em cura até a idade de 364 e 728 dias, com vistas à avaliação de características referentes à durabilidade do concreto. Os dados das dosagens estudadas na Etapa III estão apresentados no Apêndice D.

5.3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Nas tabelas 5 e 6 estão listados, respectivamente, os procedimentos adotados para caracterização dos materiais e dos concretos, em cada etapa do programa experimental.

Tabela 5: Procedimentos realizados para caracterização dos materiais (continua).

Ensaio	Metodologia
Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica	NBR NM 23/00
Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)	NBR NM 76/98
Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal	NBR NM 43/03
Cimento Portland – Determinação do tempo de pega	NBR NM 65/03
Standard test method for autoclave expansion of hydraulic cement	ASTM C151/05
Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão	NBR 7215/96
Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo	NBR NM 18/04
Cimento Portland – Determinação do resíduo insolúvel	NBR NM 15/04
Análise Química por Espectrofotometria de Absorção Atômica – Técnica de Solubilização Ácida	Procedimento Furnas 01.002.069

Ensaio	Metodologia
Análise química de cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre	NBR 5748/93
Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama	NBR NM 17/04
Agregado miúdo – Determinação da absorção de água	NBR NM 30/01
Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52/03
Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.	NBR NM 53/03
Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248/03
Aditivos para Argamassa e Concretos – Ensaio de Uniformidade	NBR 10908/86

Tabela 6: Procedimentos realizados para caracterização do concreto (continua).

Ensaio	Metodologia
Concreto - Amostragem de concreto fresco	NBR NM 33/98
Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico	NBR 9833/87
Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico	NBR NM 47/01
Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	NBR NM 67/98
Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova	NBR 5738/84
Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos	NBR 5739/94
Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação	NBR 8522/03 e Procedimento Furnas 01.008.001
Concreto - Resistência à Tração Direta - Dispositivo Leroy	Procedimento Furnas 01.007.015
Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos	NBR 7222/94
Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos	NBR 12142/91
Concreto endurecido - Determinação da condutividade térmica	NBR 12820/93
Concreto - Determinação da difusividade térmica	NBR 12818/93

Ensaio	Metodologia
Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear	NBR 12815/93
Concreto endurecido - Determinação do calor específico	NBR 12817/93
Concreto endurecido - Determinação da fluência	NBR 8224/83
Argamassa e concreto - Determinação da Variação Autógena	Procedimento Furnas 01.009.004
Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura	NBR 12819/93
Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete	JSCE-SF4:1984
Concreto endurecido - Determinação da capacidade de deformação de concreto submetido à tração na flexão (Carregamento rápido)	NBR 12816/93
Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.	NBR 9778/05
Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água	NBR 10786/89
Microscopia Eletrônica de Varredura - Preparação de Amostras	Procedimento Furnas 04.015.006
Aparelho de Metalização de Amostras - Operação	Procedimento Furnas 04.015.007
Microscópio Eletrônico de Varredura - Operação	Procedimento Furnas 04.015.008
Concreto - Análise da Microestrutura	Procedimento Furnas 04.015.012

5.4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Todos os resultados dos ensaios foram submetidos a testes estatísticos de análise de variância (ANOVA) para verificação do grau de significância do efeito das variáveis nas propriedades estudadas. Além disto, foram realizados testes de agrupamento de médias (Tukey) para verificação da formação de grupos de resultados homogêneos. Essas análises foram realizadas com auxílio do software Statística 7.0 (STATSOFT, 2004). A seguir apresenta-se uma rápida explicação dos testes utilizados.

5.4.1. Análise de variância

As análises estatísticas tipo ANOVA basicamente comparam a variabilidade Entre Grupos e a variabilidade Dentro de Grupos. Quanto maior for a primeira, comparada à segunda, maior é a evidência de que existe diferenças significativas entre os grupos, ou seja, que os mesmos apresentam médias estatisticamente diferentes (SHIMAKURA, 2005).

Define-se a **soma de quadrados total, SQT**, como:

$$SQT = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Equação 8})$$

Essa expressão é calculada a partir de todos os dados, em que \bar{x} é a média amostral global.

A estimativa usual de variância de uma amostra é:

$$s^2 = SQT / (n - 1) \quad (\text{Equação 9})$$

Pode-se dividi-la como:

$$SQT = SQD + SQE \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo **SQD** utilizado para denotar a **soma de quadrados dentro de grupo** e **SQE** para a **soma de quadrado entre grupos**, definidos por:

$$SQD = \sum_{gp1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{gp2} (x_i - \bar{x}_2)^2 + \sum_{gp3} (x_i - \bar{x}_3)^2 + \sum_{gp4} (x_i - \bar{x}_4)^2 \quad (\text{Equação 11})$$

e \bar{x}_k é a média amostral do grupo k ; e

$$SQE = n_1 (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2 (\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + n_3 (\bar{x}_3 - \bar{x})^2 + n_4 (\bar{x}_4 - \bar{x})^2 \quad (\text{Equação 12})$$

em que n_k é o tamanho amostral do grupo k .

Tendo separado a variabilidade, é possível mostrar que pode-se obter estimativas *independentes* da variância populacional comum σ^2 a partir destas duas quantidades. Elas são chamadas de **valores quadrados médios**, e obtêm-se as seguintes estimativas:

$$s_1^2 = SQE / (m - 1) \quad (\text{Equação 13})$$

$$s_2^2 = SQD / (N - m) \quad (\text{Equação 14})$$

em que m é o número de grupos, e N é o tamanho amostral total.

Como estas estimativas de variância são construídas a partir de dois tipos diferentes de variabilidade, quanto mais elas diferirem, mais evidência existe de diferença nas médias. A estatística de teste empregada para realizar este teste é:

$$F_{calc} = s_1^2 / s_2^2 \quad (\text{Equação 15})$$

Compara-se este valor com uma distribuição F de Fisher, determinada com $m - 1$ e $N - m$ graus de liberdade para obter um p -valor. As médias serão consideradas estatisticamente diferentes se $p < 0,05$. A diferença é tanto maior quanto maior for o valor do F calculado (F_{calc}) em relação ao F crítico (F_{crit}).

$$F_{crit} = F_{\alpha; GL_E; GL_D} \quad (\text{Equação 16})$$

onde α é o nível de significância, $GL_E = m - 1$ é o grau de liberdade entre os grupos e $GL_D = N - m$ é o grau de liberdade dentro dos grupos, ou grau de liberdade residual (GL_{res}).

5.4.2. Teste de Tukey

O teste de Tukey é um teste estatístico de comparação múltipla entre médias usado para determinar se grupos amostrais diferem entre si. O primeiro passo é ordenar as médias de forma decrescente, anotando o grupo e o tamanho amostral correspondente (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Em seguida, calculam-se as diferenças entre as médias dos grupos experimentais e estima-se o Erro Padrão (EP) de cada diferença entre as médias, usando a fórmula:

$$EP = \sqrt{\frac{QM_{res}}{2} \times \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (\text{Equação 17})$$

onde n_k é o tamanho amostral do grupo k e QM_{res} é o quadrado médio residual (ou SQD, conforme equação 11).

Para cada diferença de médias, calcula-se a estatística de teste q_{calc} e compara-se com o valor crítico q_{crit} :

$$q_{calc} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{EP} \quad (\text{Equação 18})$$

onde \bar{x}_k é a média do grupo k e EP é o erro padrão entre os respectivos grupos.

$$q_{crit} = q_{\alpha; m; GLres} \quad (\text{Equação 19})$$

onde α é o nível de significância, m é o número total de grupos e $GLres$ é o grau de liberdade residual (ou grau de liberdade dentro dos grupos, GL_D).

Se o valor de q_{calc} para cada par de grupos for maior do que q_{crit} , então os grupos diferem entre si.

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – ETAPA 1

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados na primeira fase do programa experimental desta tese. Nesta fase, dosagens de concreto-massa com adição de partículas de borracha de pneu (CBP) foram testadas quanto ao seu desempenho mecânico, com o objetivo de avaliar qual a granulometria e o teor de partículas de borracha de pneu, bem como o tipo de tratamento superficial, que eventualmente resultariam em melhorias de desempenho, em relação ao um concreto-massa sem borracha.

Dado o caráter exploratório desta fase, as partículas de pneu foram incorporadas ao concreto em teores variados: 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, em substituição ao volume de areia². Como explicado no capítulo 5, empregaram-se partículas com diferentes dimensões: grânulos com $D_{m\acute{a}x}$ de 0,42 mm e $D_{m\acute{a}x}$ de 1,5 mm; e fibras com fator de forma igual a 10 e classificação granulométrica $D_{m\acute{a}x}$ igual a 4,8 mm. Os grânulos e fibras foram utilizados na condição *sem tratamento* ou *tratados* superficialmente com aditivos poliméricos, sendo os tratamentos empregados com a finalidade de testar se os mesmos eram capazes de produzir alterações devido à melhoria da aderência entre as partículas de borracha e a matriz do concreto.

Todas as amostras de concreto, moldadas com o concreto de referência ou com os vários concretos com adição de borracha receberam os mesmos cuidados. Foram moldados corpos-de-prova suficientes e adequados para realização de ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e massa específica, sendo testadas duas amostras por idade de ensaio, totalizando 372 corpos-de-prova. Adicionalmente, foram retiradas amostras, extraídas a partir de superfícies de fratura de corpos-de-prova submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, para análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura a fim de correlacionar a qualidade da interface borracha / matriz do concreto com as características mecânicas do CBP.

² Como discutido no capítulo 5, estudos preliminares realizados pela autora já haviam indicado que a substituição somente da parcela de agregado miúdo dava melhor resultados que a substituição de ambos os tipos de agregado (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004c).

A seguir se discutem as tendências gerais de comportamento registradas para cada tipo de ensaio realizado. Os resultados individuais de cada corpo-de-prova encontram-se apresentados no APÊNDICE B.

6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nas Figuras 39(a), 39(b) e 39(c) são apresentados gráficos que ilustram o comportamento da resistência à compressão do concreto em função do tipo de tratamento, do teor e da granulometria da borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Em todas as idades de ensaio, observa-se uma clara tendência de redução da resistência à compressão para teores de borracha acima de 10%. Essa redução é mais proeminente nas amostras com partículas de pneu em forma de grânulos com 0,42mm, sendo as amostras deste tipo as que apresentam a menor evolução de resistência com a idade. Para as três granulometrias de partículas de borracha utilizadas, os tratamentos superficiais resultaram apenas em pequenas variações nos valores de resistência, independentemente do teor de borracha e da idade de ensaio.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão. A análise indica que todas as variáveis independentes influenciaram significativamente os resultados, a um nível de confiança de 95%. O tipo de tratamento foi a variável de menor impacto, o que é denotado pelo menor valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$. Em seguida, em ordem crescente de influência sobre a resistência à compressão, têm-se as variáveis granulometria, idade de ensaio e percentual de borracha.

Com o teste de Tukey foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Este teste indicou que as amostras contendo partículas de borracha com 1,5mm e 4,8mm podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (Figura 40a), com valores de resistência aproximadamente 50% superiores aos das amostras contendo partículas de 0,42mm, para teores de borracha de 10% a 25% (Figura 39). Cada teor de borracha utilizado formou um grupo homogêneo individual (Figura 40b), o que também aconteceu na análise das idades de ensaio (Figura 40c), ratificando a maior influência dessas variáveis, identificada pela ANOVA. Os tipos de tratamento também formaram grupos distintos (Figura 40d), indicando que essa variável é estatisticamente significativa para a resistência à compressão.

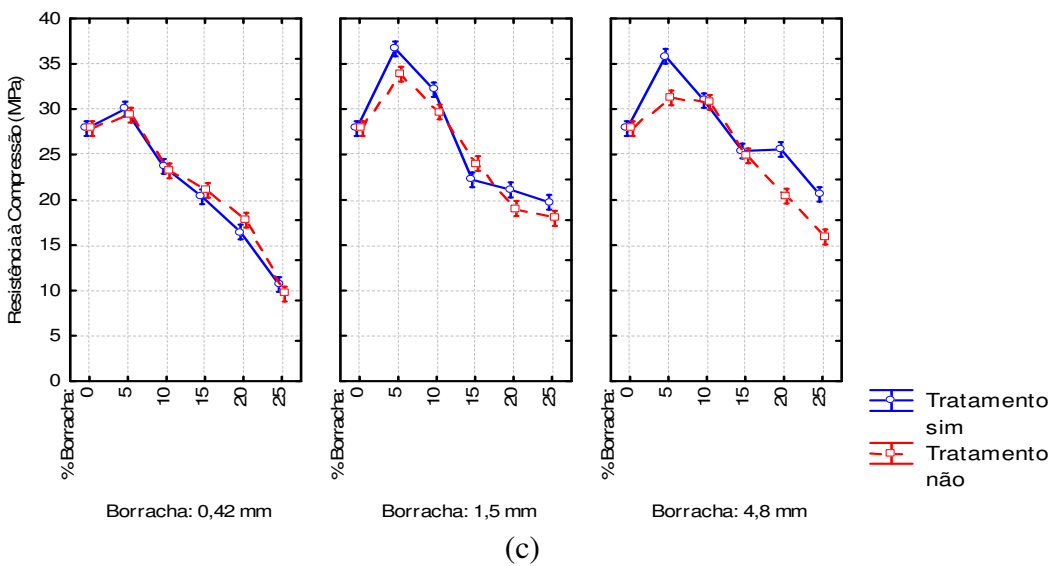
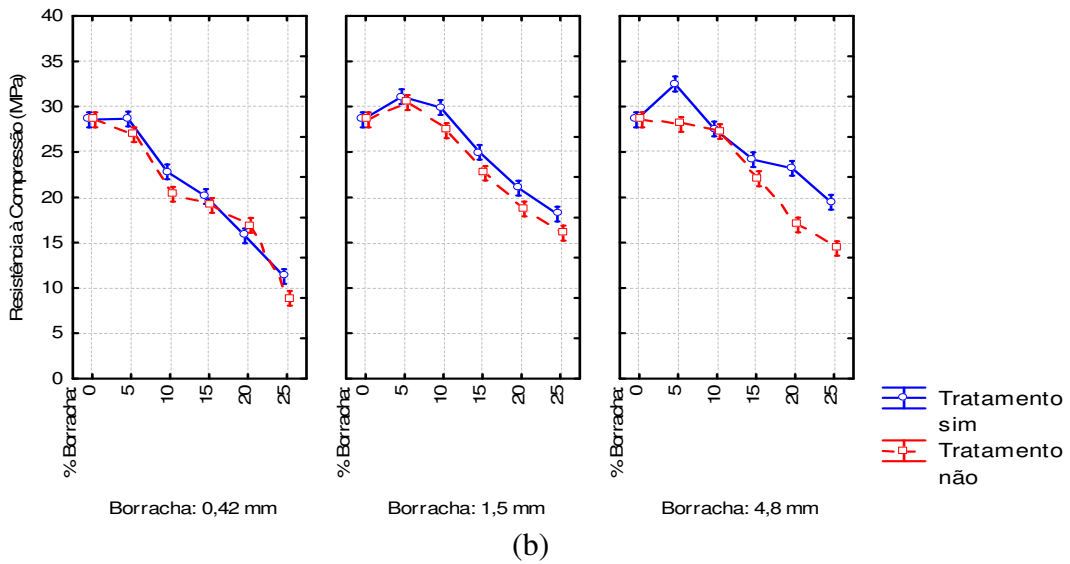
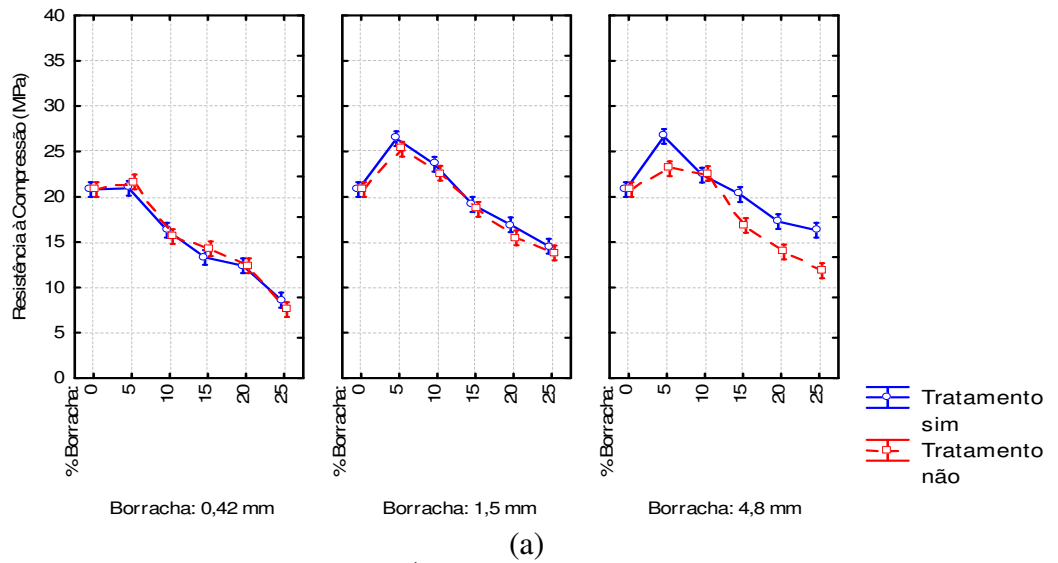


Figura 39: Resistência à compressão dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.

Tabela 7: Análise da variância dos resultados de Resistência à Compressão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Granulometria	888,2	2	444,1	3,040	127,53	0,000000
% Borracha	5363,7	5	1072,7	2,258	308,05	0,000000
Idade	1658,1	2	829,1	3,040	238,07	0,000000
Tratamento	109,4	1	109,4	3,887	31,41	0,000000
Error	713,9	205	3,5			

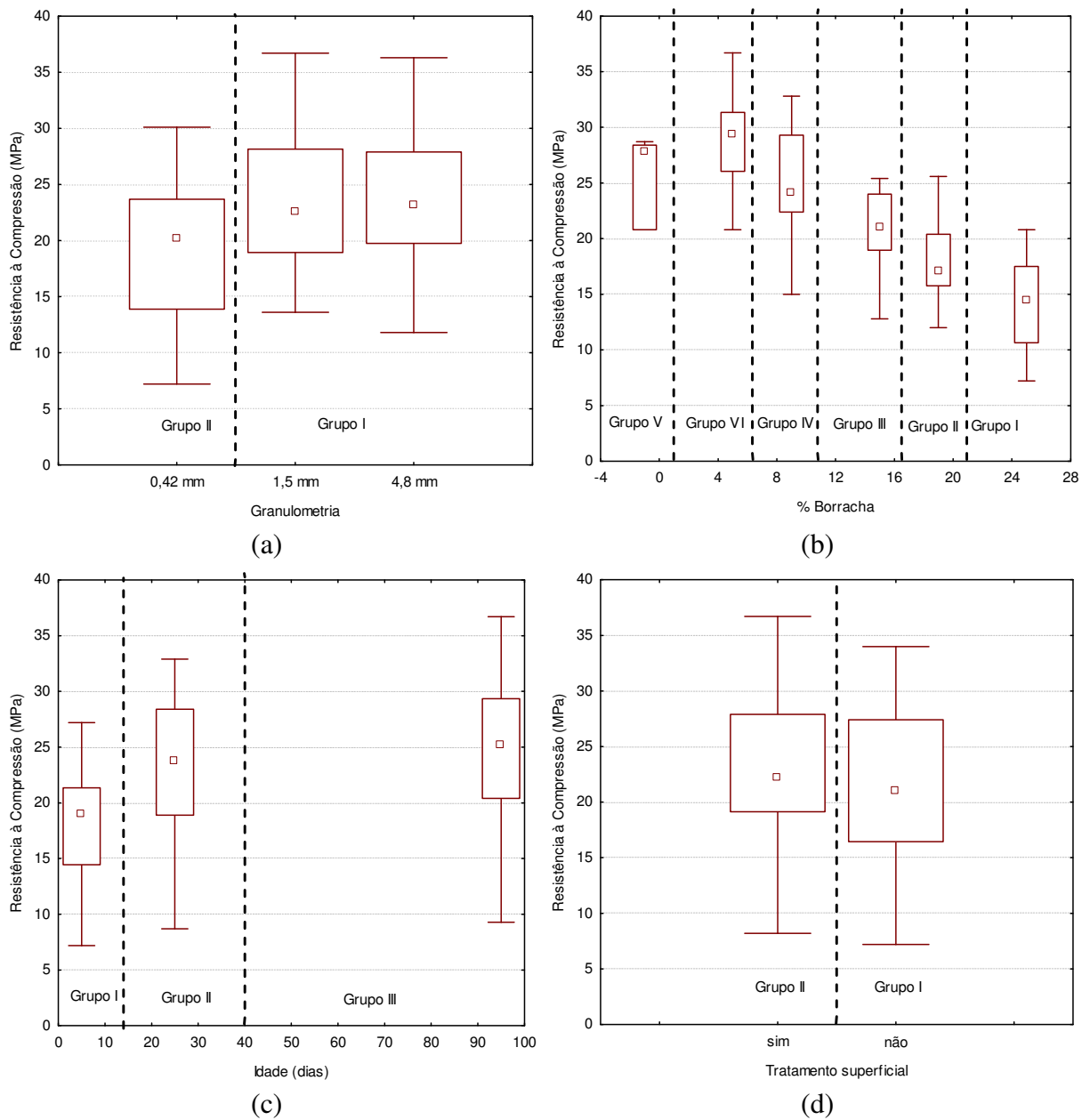


Figura 40: Agrupamento de resultados homogêneos de resistência à compressão conforme teste de Tukey em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.

6.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Nas Figuras 41(a), 41(b) e 41(c) estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento do módulo de elasticidade do concreto em função do tipo de tratamento, do teor e da granulometria da borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Nas idades de 28 e 91 dias, observa-se uma redução contínua do módulo de elasticidade com o aumento do teor de borracha. Na idade de 7 dias esse comportamento é observado para teores de borracha acima de 10%. Para os três tipos de partículas de borracha utilizados, os tratamentos superficiais resultaram em pequenas variações nos valores de módulo, independente do teor de borracha e da idade de ensaio.

Observa-se que os valores obtidos aos 28 dias de idade são mais elevados do que aqueles obtidos aos 91 dias. Este comportamento pode ser explicado pela utilização de diferentes equipamentos para realização dos ensaios. Aos 28 dias os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados com extensômetro mecânico, devido à indisponibilidade do extensômetro tipo LVDT. O mesmo ocorreu com as amostras contendo partículas de borracha de 1,5 mm, com e sem tratamento, aos 7 dias de idade. Os demais ensaios foram realizados com o auxílio de um extensômetro tipo LVDT. Estudos comparativos realizados por FURNAS (2002) demonstraram a tendência de obtenção de maiores valores de módulo de elasticidade com o extensômetro mecânico, em relação aos valores do extensômetro elétrico, e que essa diferença é maior quanto maiores forem a idade do concreto, o $D_{máx}$ do agregado e o F_{ck} do concreto. Essas três variáveis contribuem para aumentar a rigidez do concreto e, uma vez que o extensômetro mecânico apresenta menor sensibilidade de leitura das deformações, é plausível que os resultados obtidos sejam correspondentes a menores deformações do que àquelas lidas com extensômetro elétrico, ou seja, maiores valores do módulo de elasticidade.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de módulo de elasticidade. A análise indica que a variável tratamento não surtiu efeito significativo sobre a propriedade estudada e as demais variáveis independentes influenciaram os resultados, a um nível de confiança de 95%. Entretanto, só a idade interferiu de forma mais significativa, como pode ser constatado pelo maior valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$. Novamente, a partir do teste de Tukey foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável. Essa análise confirmou as análises de variância.

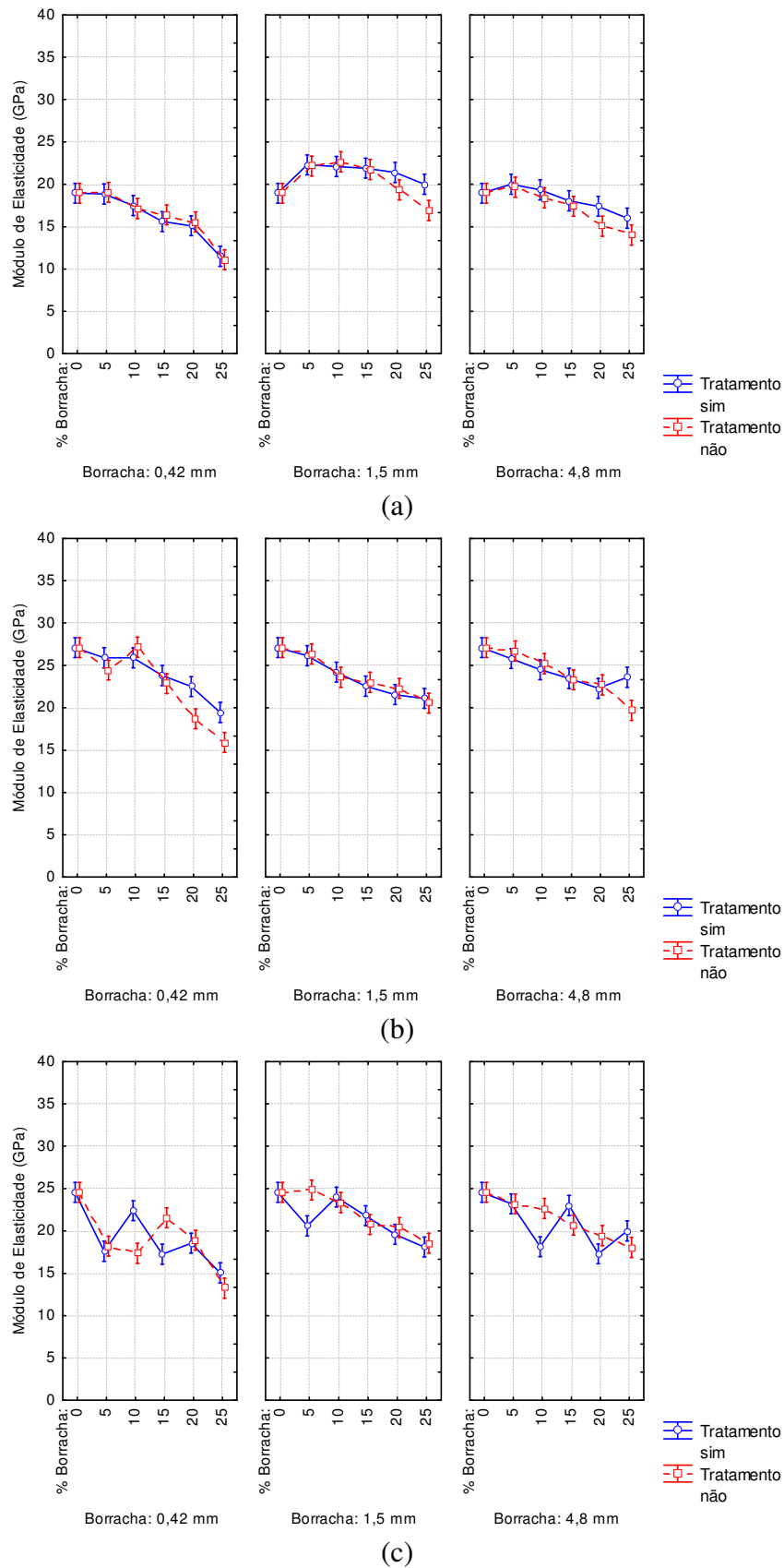


Figura 41: Módulo de elasticidade dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.

Tabela 8: Análise da variância dos resultados de Módulo de Elasticidade.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Granulometria	224,81	2	112,41	3,040	34,07	0,000000
% Borracha	917,94	5	183,59	2,258	55,64	0,000000
Idade	1122,41	2	561,21	3,040	170,10	0,000000
Tratamento	4,86	1	4,86	3,887	1,47	0,226261
Error	676,35	205	3,30			

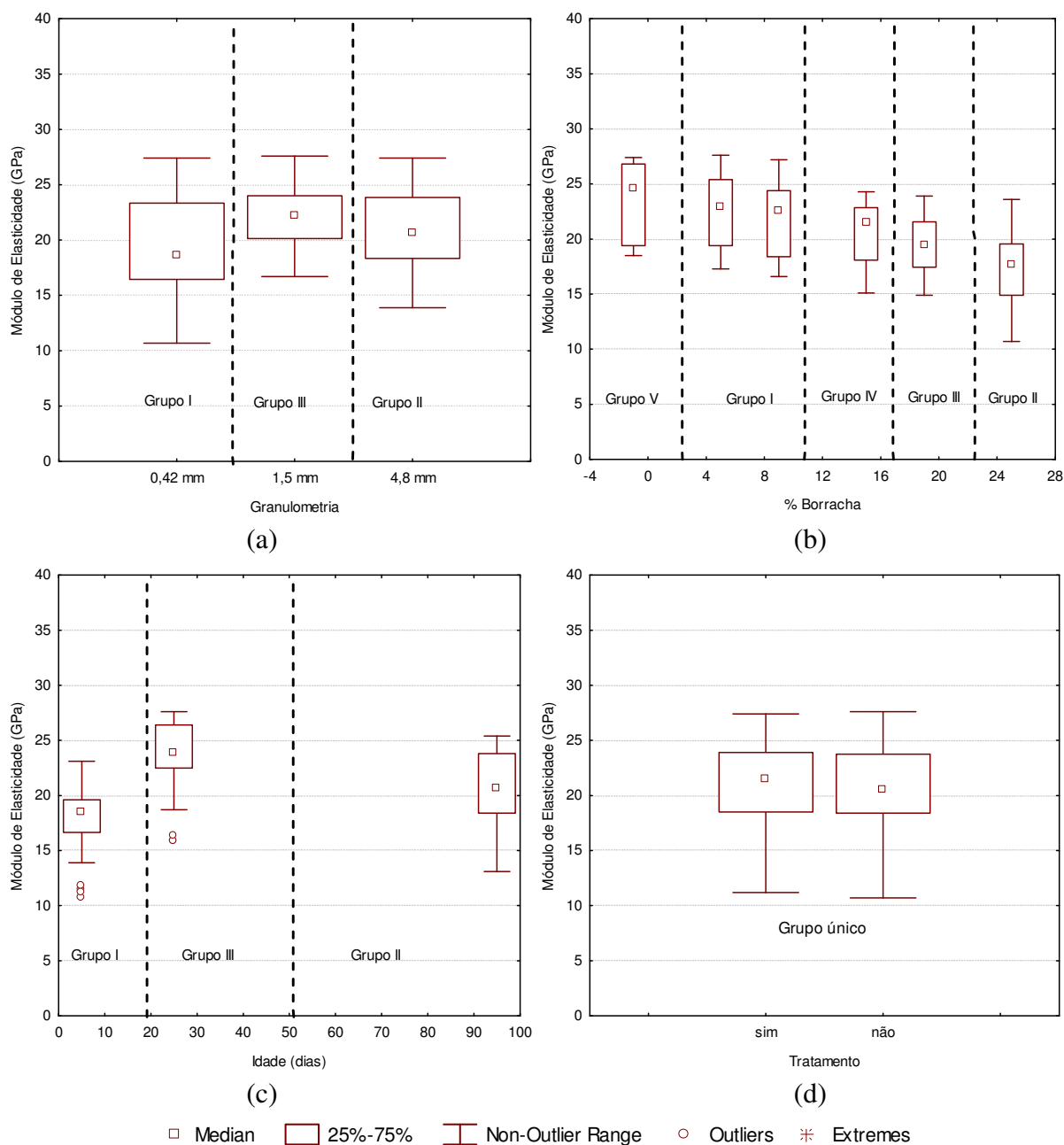


Figura 42: Agrupamento de resultados homogêneos de módulo de elasticidade conforme teste de Tukey, em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.

Cada granulometria de borracha utilizada formou um grupo homogêneo (Figura 42a), bem como as idades de ensaio (Figura 42c) e os teores de borracha (com exceção dos teores de 5% e 10% - Figura 42b), o que indica que essas variáveis resultaram em valores estatisticamente diferentes de módulo de elasticidade. As amostras contendo partículas de borracha com ou sem tratamento superficial formaram um único grupo homogêneo (Figura 42d).

6.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nas Figuras 43(a), 43(b) e 43(c) estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento da resistência à tração por compressão diametral em função do tipo de tratamento, do teor e da granulometria da borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Em todas as idades de ensaio, observam-se reduções da resistência para teores de borracha acima de 10%, no caso das granulometrias de 1,5mm e 4,8mm, e a partir do teor de 5% no caso de partículas de 0,42mm. Observa-se também, para todos os teores de substituição, que a redução na resistência é mais acentuada nas amostras com partículas de pneu em grânulos de 0,42mm. Para as três granulometrias de borracha utilizadas, os tratamentos superficiais resultaram somente em pequenas variações nos valores de resistência, independentemente do teor de borracha e da idade de ensaio.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral. A análise indica que todas as variáveis independentes influenciaram estatisticamente os resultados, a um nível de confiança de 95%. Contudo, a granulometria da borracha e o tipo de tratamento influenciaram fracamente essa propriedade, o que é denotado pelos pequenos valores do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

A partir do teste de Tukey foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável. Essa análise corrobora com as análises de variância. Cada granulometria de borracha utilizada formou um grupo homogêneo (Figura 44a), bem como os teores de borracha (com exceção da referência e da dosagem com 5% de borracha - Figura 44b), as idades de ensaio (Figura 44c) e os tipos de tratamento (Figura 44d), o que indica que essas variáveis resultaram em valores significativamente diferentes de resistência à tração por compressão diametral do concreto.

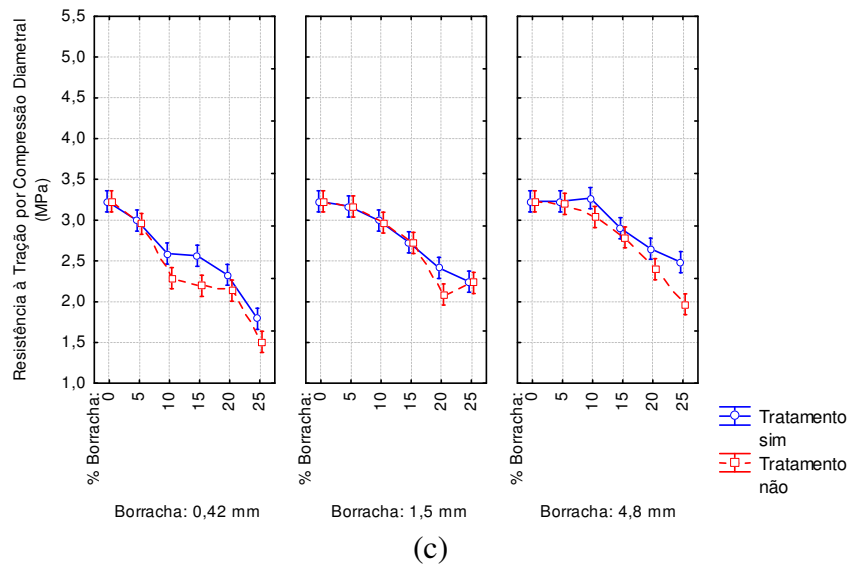
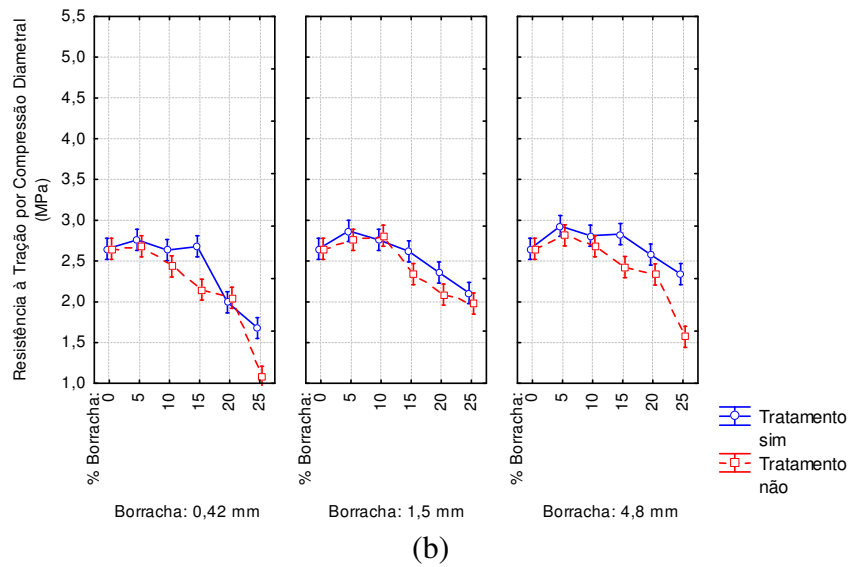
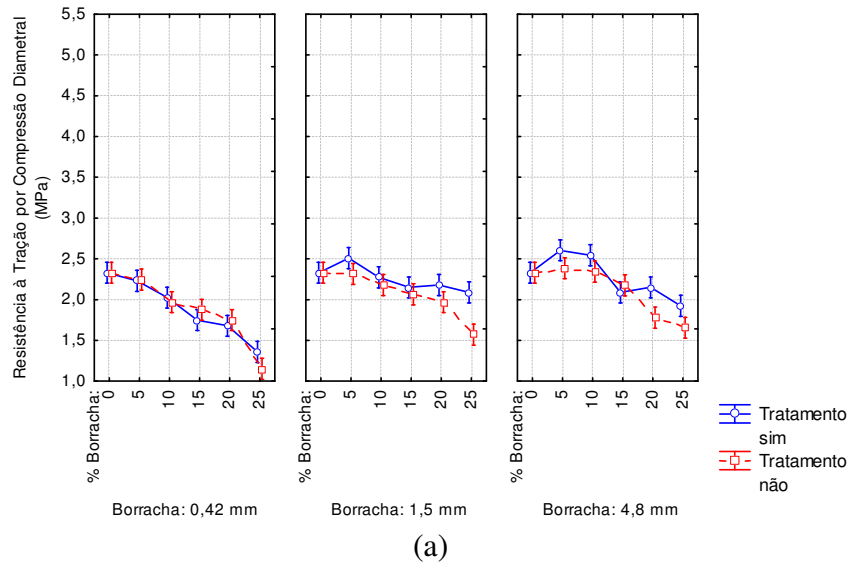


Figura 43: Resistência à tração por compressão diametral nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.

Tabela 9: Análise da variância aplicada aos resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Granulometria	4,050	2	2,025	3,040	60,75	0,000000
% Borracha	24,408	5	4,882	2,258	146,45	0,000000
Idade	14,105	2	7,052	3,040	211,57	0,000000
Tratamento	1,366	1	1,366	3,887	40,99	0,000000
Error	6,833	205	0,033			

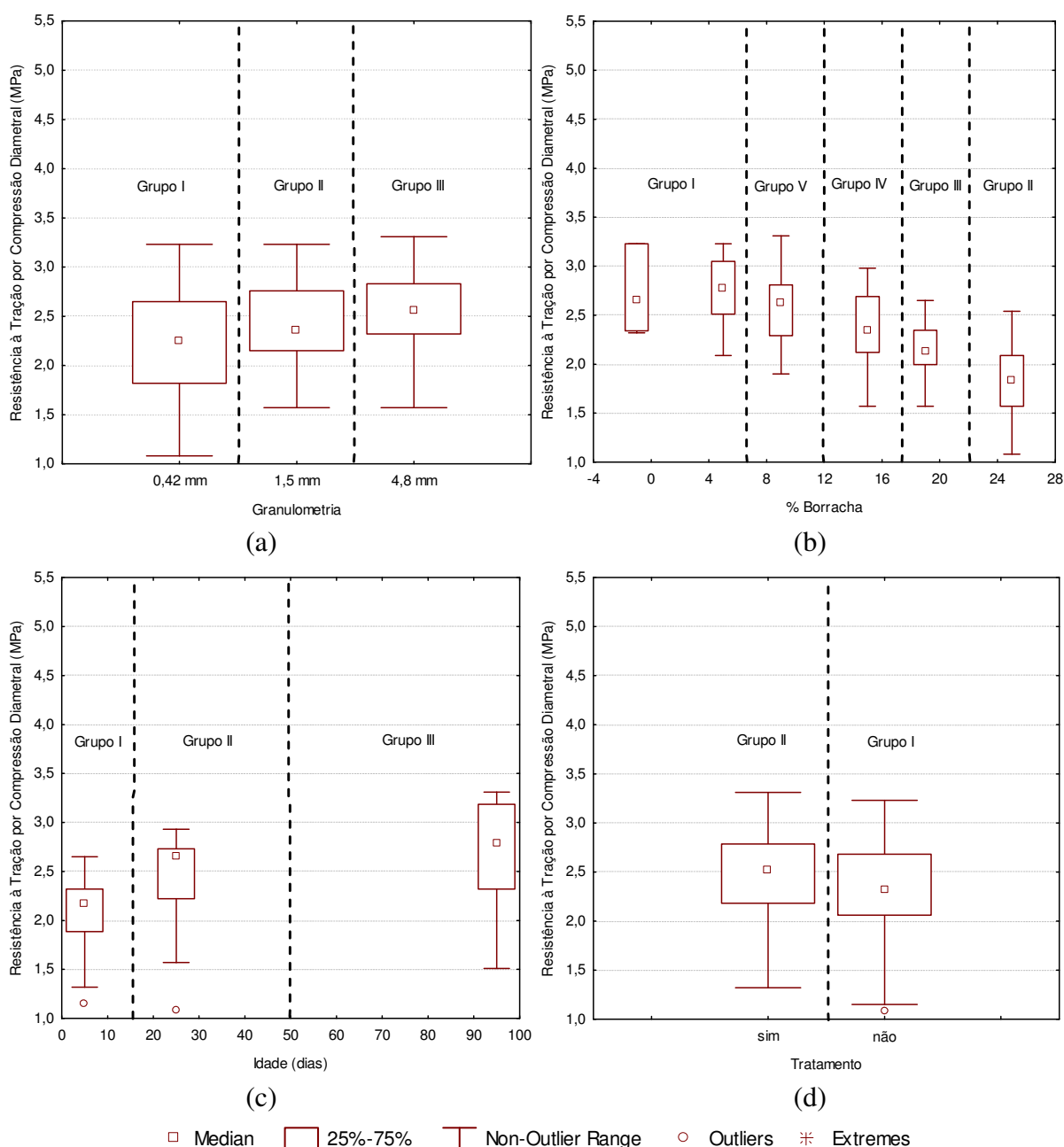


Figura 44: Agrupamento de resultados homogêneos de resistência à tração por compressão diametral conforme teste de Tukey em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.

6.4. MASSA ESPECÍFICA

Nas Figuras 45(a), 45(b) e 45(c) estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento da massa específica do concreto em função do tipo de tratamento, do teor e da granulometria da borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Em todas as idades de ensaio, observa-se uma redução contínua da massa específica, principalmente para teores de borracha acima de 10%. A redução mais drástica ocorre nas amostras com partículas de pneu em grânulos de 0,42mm. Para as três granulometrias de borracha utilizadas, os tratamentos superficiais novamente resultaram somente em pequenas variações nos valores da massa específica, independente do teor de borracha e da idade de ensaio.

Com exceção do teor de 5% houve redução da massa específica dos concretos com a adição crescente de partículas de borracha em substituição à areia, o que era esperado, uma vez que o valor da massa específica da borracha é aproximadamente 43% da massa específica da areia. Observou-se ainda que, para teores de adição de borracha iguais, os valores da massa específica diminuem com a redução do tamanho das partículas de borracha, embora as massas específicas das diversas granulometrias de partículas utilizadas sejam iguais. Esse comportamento anômalo pode ser atribuído ao maior teor de ar aprisionado quando são utilizadas partículas de menores dimensões, o que será discutido no item a seguir.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de massa específica. A análise indica que todas as variáveis independentes influenciaram estatisticamente os resultados, a um nível de confiança de 95%. A idade e o tipo de tratamento influenciaram fracamente essa propriedade, o que é denotado pelos menores valores do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

A partir do teste de Tukey foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos, considerando cada variável. Essa análise confirma as análises de variância. Cada granulometria de borracha utilizada formou um grupo homogêneo (Figura 46a), bem como os teores de borracha (Figura 46b), as idades de ensaio (Figura 46c) e os tipos de tratamento (Figura 46d), o que indica que a variação do nível de qualquer uma dessas variáveis resulta em valores significativamente diferentes de massa específica do concreto.

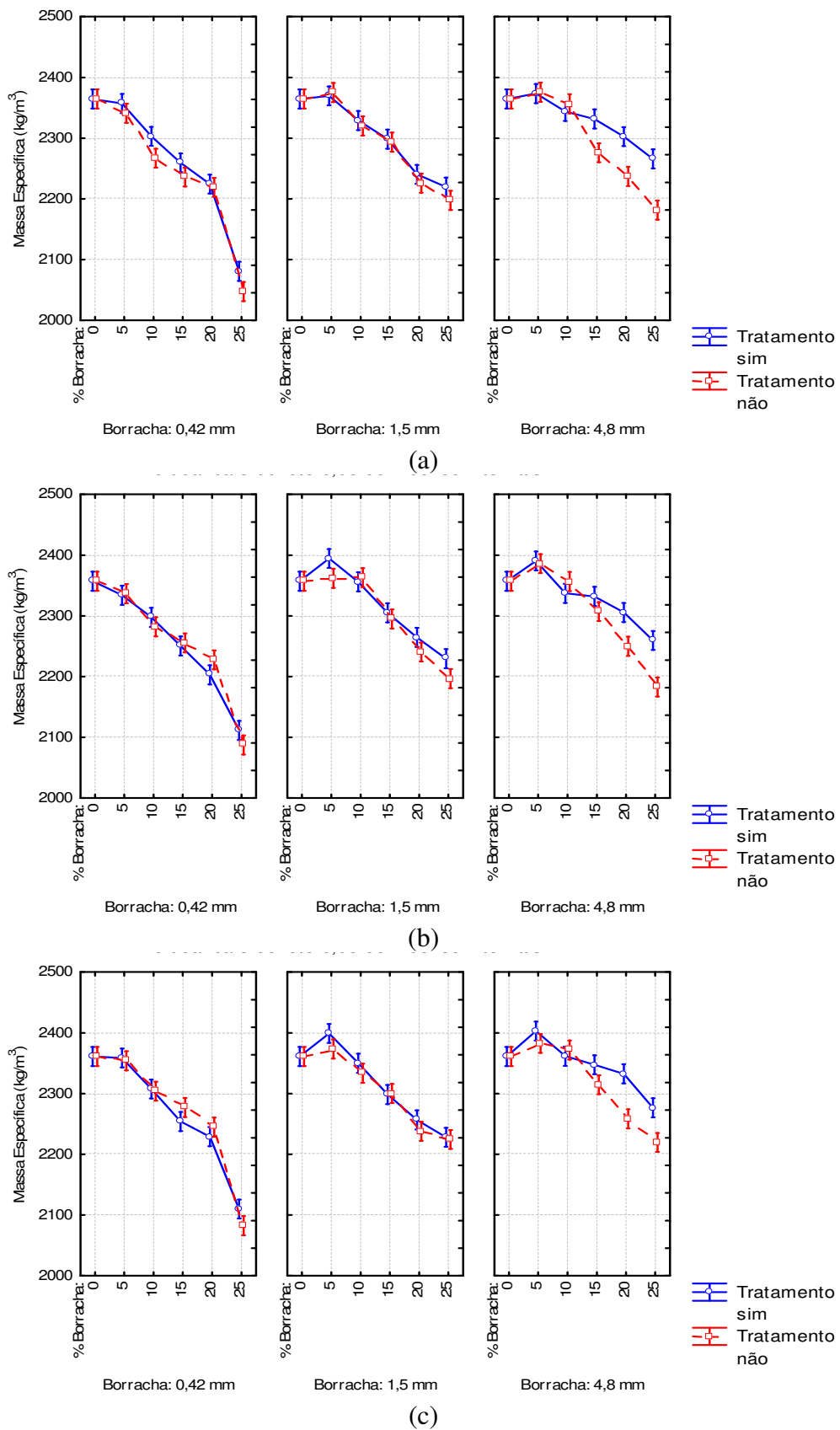


Figura 45: Massa específica dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.

Tabela 10: Análise da variância aplicada aos resultados de Massa Específica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Granulometria	1,432E+05	2	7,158E+04	3,040	103	0,000000
% Borracha	9,877E+05	5	1,975E+05	2,258	286	0,000000
Idade	9,596E+03	2	4,798E+03	3,040	7	0,001218
Tratamento	1,280E+04	1	1,280E+04	3,887	19	0,000026
Error	1,418E+05	205	6,919E+02			

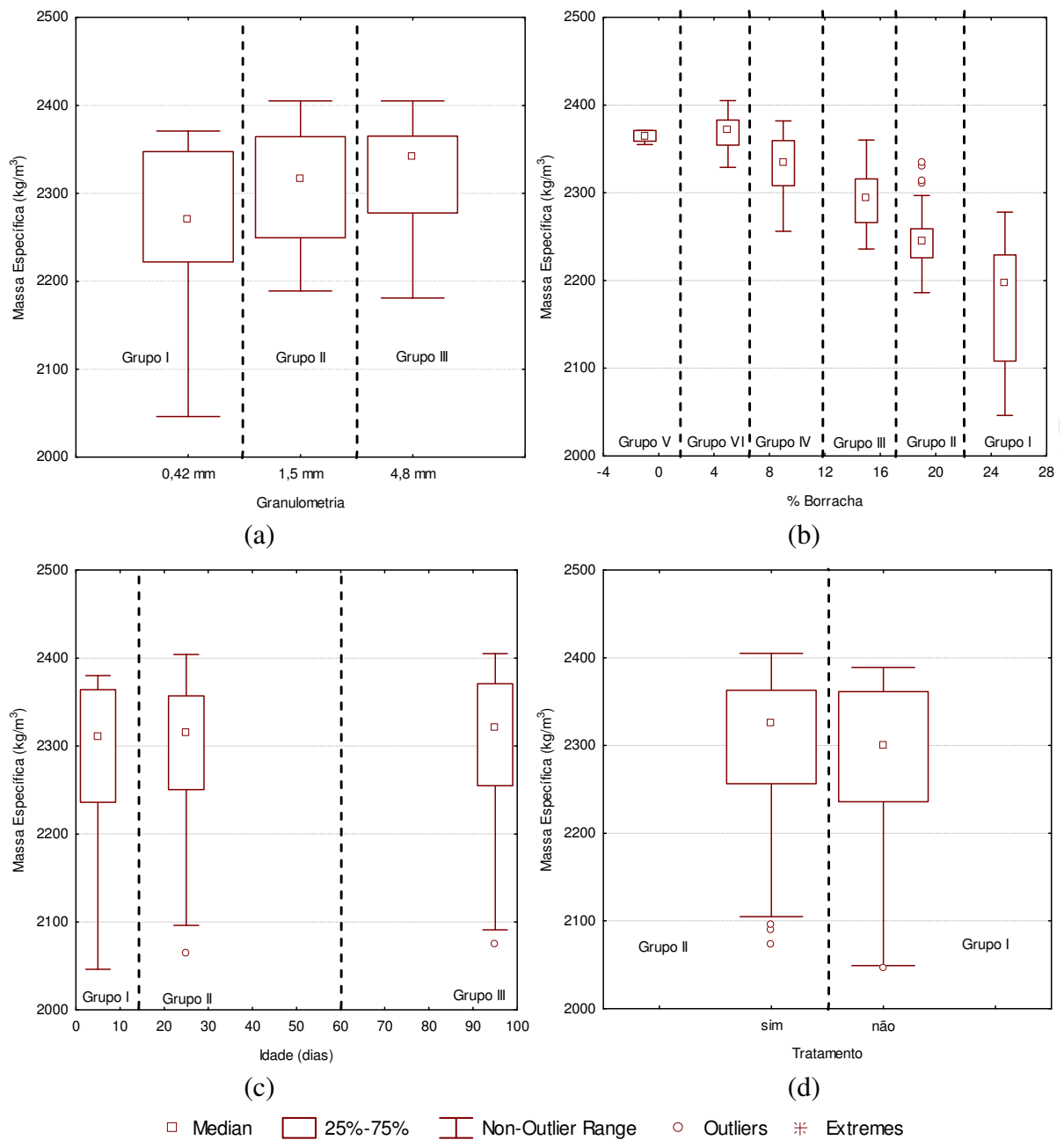


Figura 46: Agrupamento de resultados homogêneos de massa específica do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha, (c) da idade e (d) do tratamento superficial.

6.5. AR APRISIONADO

Embora não seja um objetivo específico desse estudo, foi realizada uma análise dos teores de ar aprisionado nas diferentes composições estudadas, a fim de avaliar a possível interferência desse parâmetro nas demais propriedades.

Na Figura 47 os gráficos ilustram o comportamento do teor de ar aprisionado no concreto fresco em função das variáveis estudadas. Observa-se que o teor de ar aumenta com o aumento da adição de borracha e com a redução das dimensões das partículas, conforme foi observado por outros pesquisadores (KHATIB e BAYOMY, 1999; ALBANO *et al.*, 2005; LOPES *et al.*, 2005). Tal comportamento se acentua a partir de teores de substituição de 10% de borracha, sendo o valor mais crítico obtido quando foram utilizadas partículas de 0,42 mm em substituição de 25% da areia em volume. Esse fato pode explicar as diferenças entre as massas específicas de concretos contendo teores de borracha iguais e os baixos valores de resistência à compressão obtidos nas amostras contendo partículas de borracha na dimensão de 0,42mm.

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios para determinação do teor de ar. A análise indica que a variável tratamento não surtiu efeito significativo sobre o parâmetro estudado, enquanto as demais variáveis influenciaram fracamente os resultados, o que é denotado pelos valores reduzidos do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

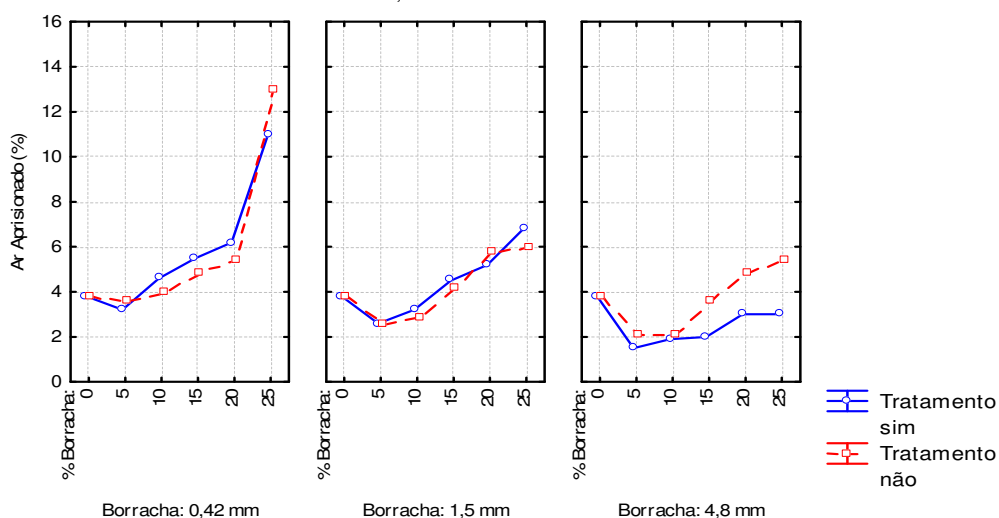


Figura 47: Teor de ar aprisionado no concreto fresco em função da granulometria, do teor e do tratamento superficial da borracha de pneu.

Tabela 11: Análise da variância aplicada aos resultados de ar aprisionado.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Granulometria	42,5517	2	21,2758	3,354	11,8847	0,000199
% Borracha	93,8133	5	18,7627	2,572	10,4809	0,000011
Tratamento	1,0000	1	1,0000	4,210	0,5586	0,461284
Error	48,3350	27	1,7902			

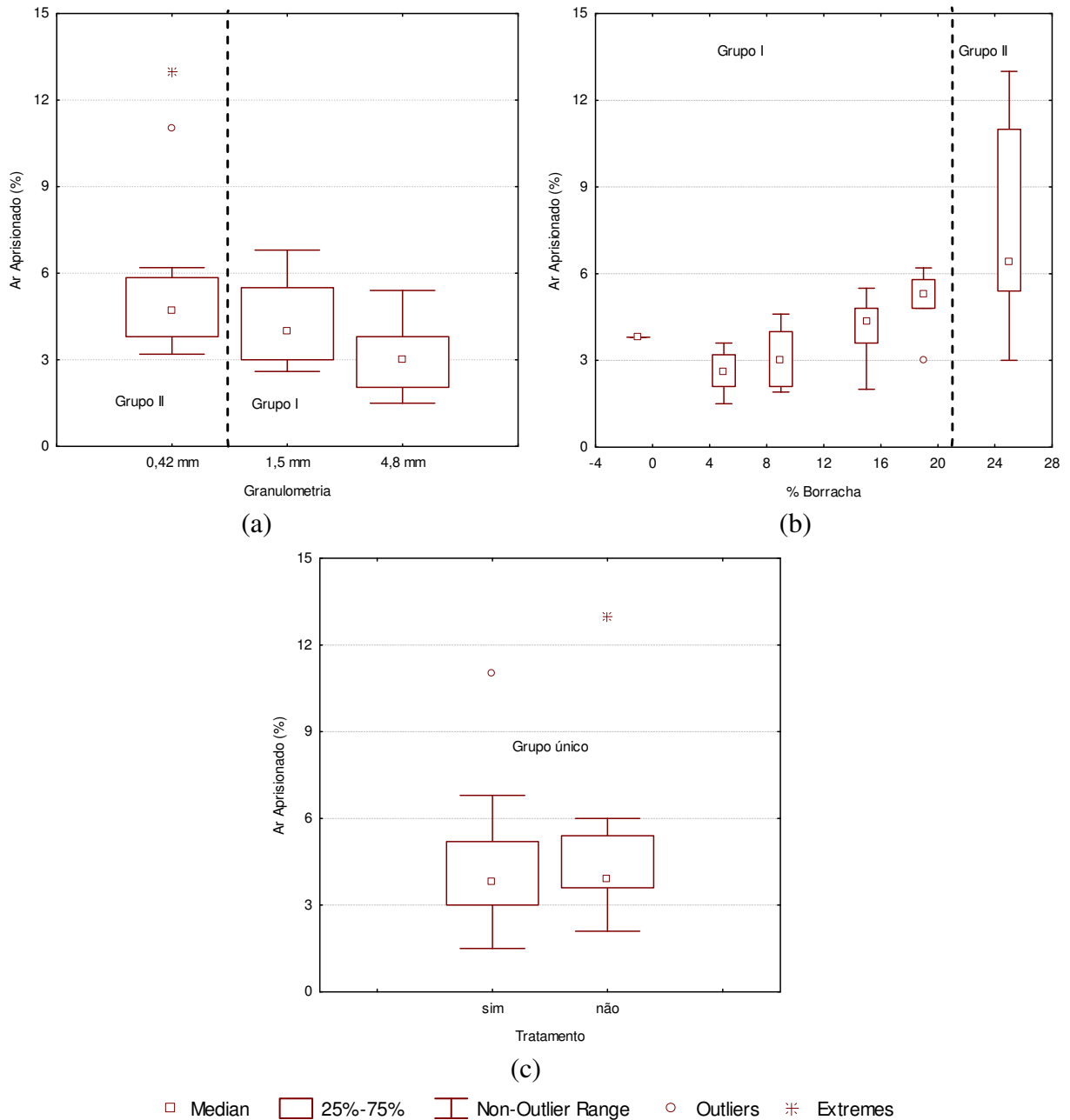


Figura 48: Agrupamento de resultados homogêneos do teor de ar aprisionado no concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) da granulometria da borracha, (b) do teor de borracha e (c) do tratamento superficial.

A partir do teste de Tukey foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável. Os resultados das amostras contendo partículas de 0,42 mm (Figura 48a) e teores de borracha de 25% (Figura 48b) formaram grupos homogêneos isolados, com maior percentual de ar aprisionado, o que explica os resultados de massa específica obtidos no item 6.4. Resultados de amostras contendo partículas de pneu com ou sem tratamento encontram-se em um mesmo grupo homogêneo (Figura 48c).

6.6. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada em amostras extraídas a partir de superfícies de fratura dos corpos-de-prova, provenientes do ensaio de tração por compressão diametral. Essa análise teve como objetivo avaliar a aderência entre a matriz de cimento e as partículas de borracha de pneu tratadas e sem tratamento superficial.

As amostras selecionadas para análise foram aquelas cujas dosagens apresentaram o maior aproveitamento de partículas de pneu e maior redução do módulo de elasticidade, com o menor prejuízo quanto à resistência mecânica à tração e à compressão. Ou seja, foram selecionadas amostras com 10% de partículas de borracha em fibras ou em grânulos de 1,5mm, com e sem tratamento superficial. Adicionalmente, foram selecionadas amostras contendo 10% de partículas de borracha, com dimensão de 0,42mm, a fim de comprovar a variação do teor de ar aprisionado em amostras com partículas de borracha de diferentes tipos e em igual quantidade.

Na Tabela 12 estão listadas as identificações e descrição das amostras de concreto selecionadas para realização da análise microestrutural.

A distinção entre partículas de borracha e agregados foi realizada por meio de micro-análise utilizando-se o espectrômetro por energia dispersiva de Raios-X (EDS). Na Figura 49 está ilustrado o resultado de uma micro-análise típica, onde podem ser observados pontos de concentração referentes à presença de carbono (C) e enxofre (S), principais elementos encontrados na composição da borracha. O ouro (Au) detectado é proveniente do processo de metalização da amostra.

Tabela 12: Amostras selecionadas para análise micro-estrutural.

Código	Granulometria da borracha	Tratamento	% Borracha
REF	Sem borracha	---	0
0,42N10	0,42mm (grânulos)	Sem tratamento	10
0,42T10	0,42mm (grânulos)	Tratada com polímero de base vinílica	10
1,5N10	1,5 mm (grânulos)	Sem tratamento	10
1,5T10	1,5 mm (grânulos)	Tratada com polímero de base acrílica	10
4,8N10	4,8 mm (fibras)	Sem tratamento	10
4,8T10	4,8 mm (fibras)	Tratada com polímero de base estireno-butadieno	10

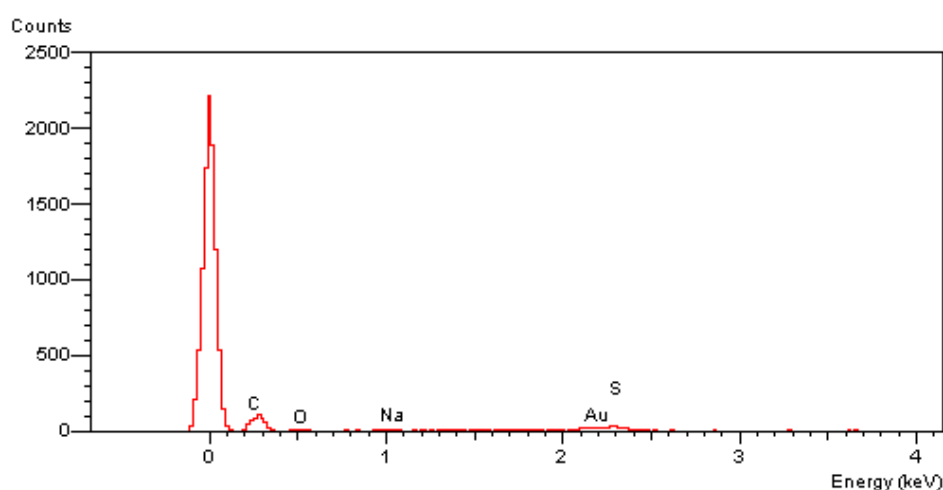


Figura 49: Espectro de raios-X gerado pela microanálise de uma partícula de borracha.

As características das amostras analisadas estão apresentadas nas figuras 50 a 64. Nas figuras 50 e 51 tem-se o aspecto geral e em detalhe da amostra de referência, onde é possível observar, respectivamente, a incidência de bolhas de ar e a região de interface agregado/matriz cimentícia.

Nas figuras 52 e 54 as micrografias apresentam o aspecto geral das amostras 0,42N10 e 0,42T10, respectivamente, onde se observa maior incidência de bolhas de ar, as quais ocorrem em menor tamanho do que nas amostras de referência. Nas figuras 53 e 55 vêem-se, em detalhe, as regiões de interface borracha/matriz cimentícia, com fraca interação entre as fases.

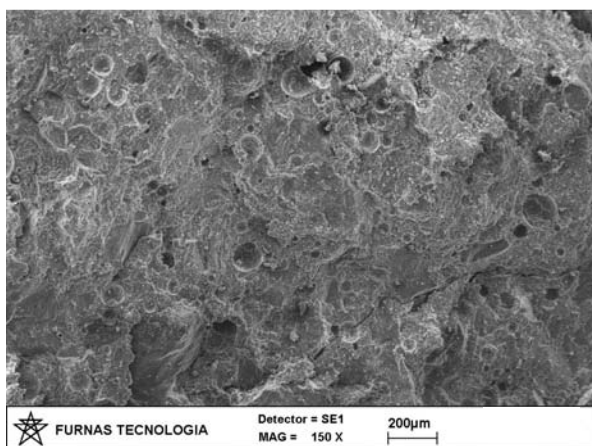


Figura 50: REF. Aspecto geral do concreto de referência. Ar aprisionado = 3,8%.

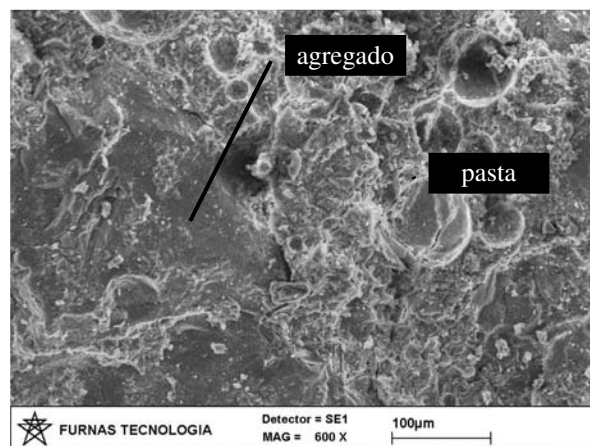


Figura 51: REF. Região de Interface Agregado/Matriz.

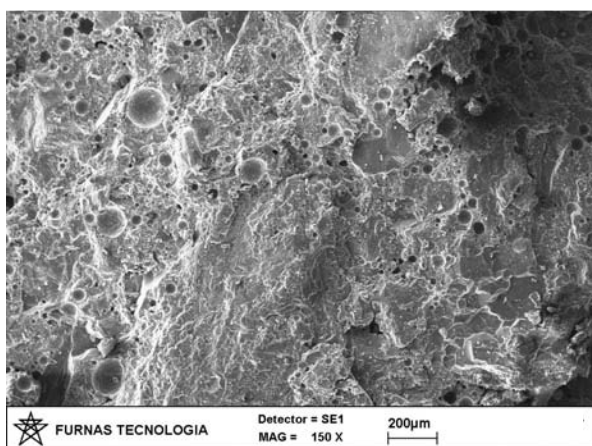


Figura 52: 0,42N10. Aspecto geral da amostra. Grande incidência de bolhas de ar em menor tamanho. Ar aprisionado = 4,0%.

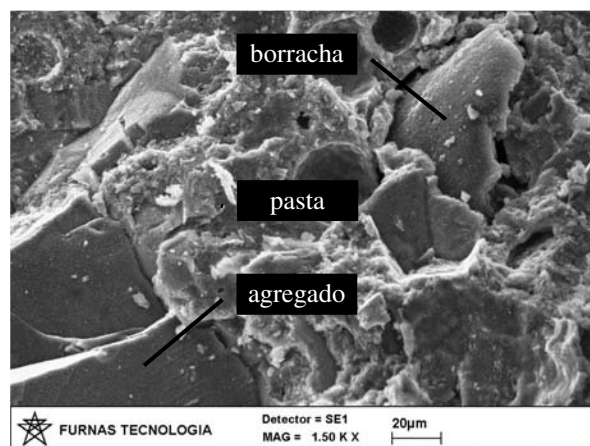


Figura 53: 0,42N10. Interface agregado/pasta de cimento e região de fraca aderência na interface borracha/pasta de cimento.

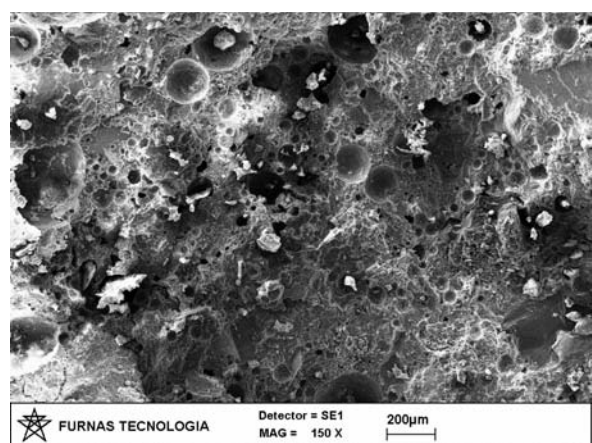


Figura 54: 0,42T10. Aspecto geral da amostra. Grande incidência de bolhas de ar. Ar aprisionado = 4,6%.

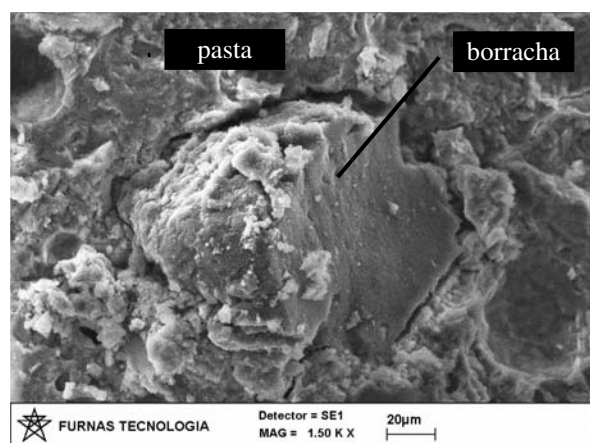


Figura 55: 0,42T10. Interface borracha/pasta de cimento. Boa aderência à direita e fraca aderência à esquerda da partícula de borracha.

Nas figuras 56 e 58 o aspecto geral das amostras 1,5N10 e 1,5T10 exibe bolhas de ar em menor quantidade e de maior dimensão do que aquelas encontradas nas amostras 0,42N10 e 0,42T10. Os detalhes nas figuras 57 e 59 apresentam regiões de boa e de má aderência nas regiões de interface borracha/matriz cimentícia.

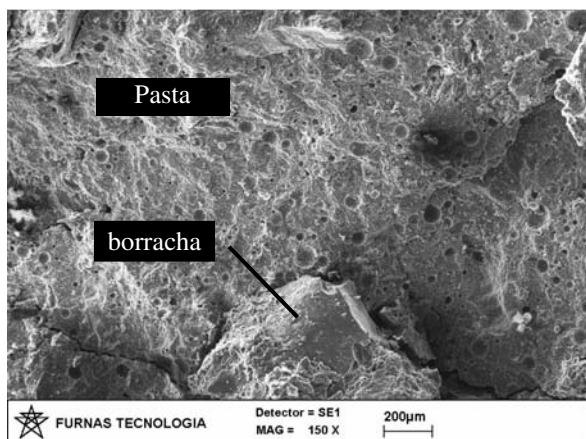


Figura 56: 1,5N10. Nas amostras são encontradas partículas com boa e má aderência. Ar aprisionado = 2,8%.

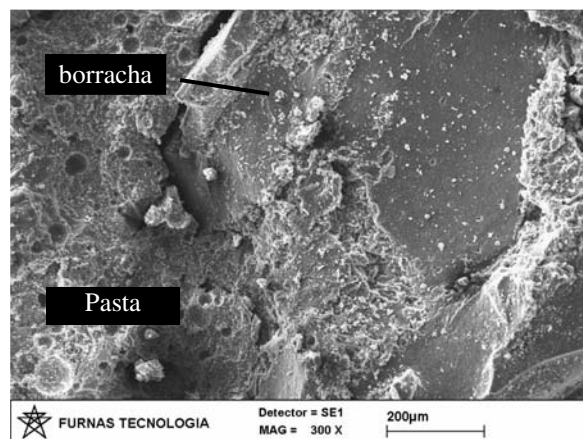


Figura 57: 1,5N10. Detalhe de uma interface. Boa aderência à esquerda e fraca aderência à direita da partícula de borracha.

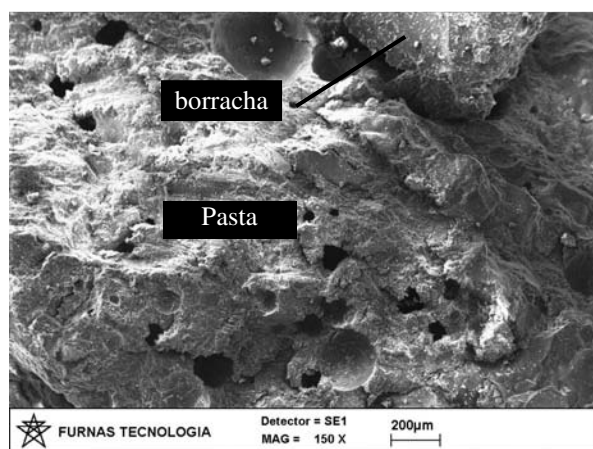


Figura 58: 1,5T10. Aspecto geral da amostra. Observam-se vazios no contorno da partícula de borracha. Ar aprisionado = 3,2%.

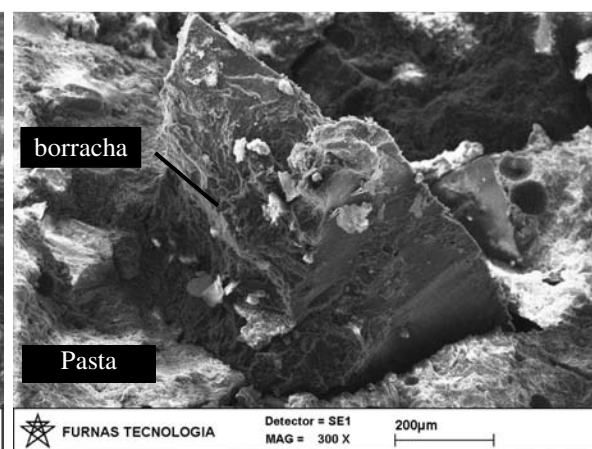


Figura 59: 1,5T10. Região de interface exibindo boa interação borracha/matriz de cimento. Rugosidade sobre a superfície da partícula.

Nas Figuras 60 e 62 as micrografias exibem o aspecto geral das amostras 4,8N10 e 4,8T10. Observa-se menor incidência de bolhas de ar, sendo que as remanescentes apresentam maior dimensão do que as presentes nas amostras 1,5N10 e 1,5T10. Em detalhe, nas figuras 61 e 63 tem-se as regiões de interface borracha/matriz cimentícia, sendo observados pontos de boa e de má aderência. Na Figura 64 a micrografia exibe o berço deixado na matriz devido ao arrancamento (*pull out*) de partículas de borracha durante a fratura da amostra.

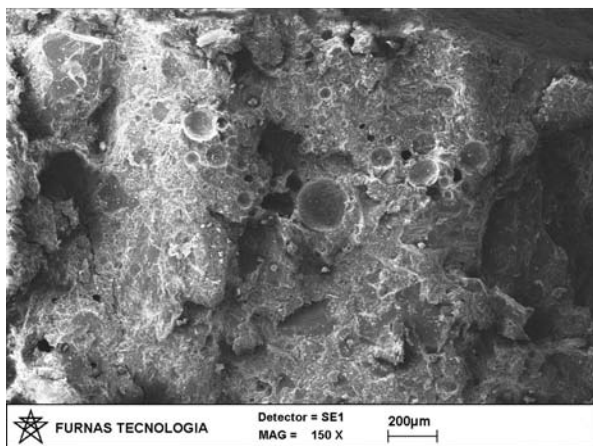


Figura 60: 4,8N10. Vista geral do concreto. Ar aprisionado = 2,1%.

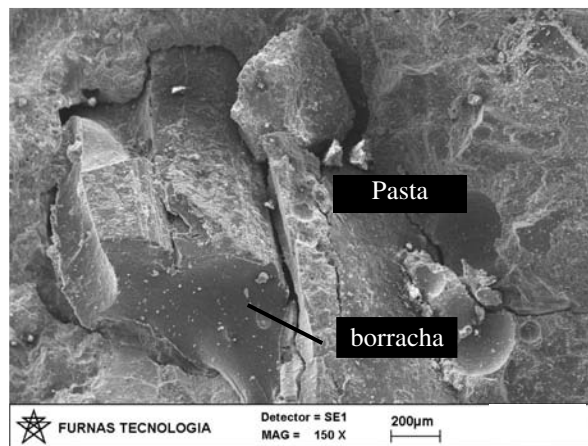


Figura 61: 4,8N10. Partícula de borracha parece ter sido rompida durante o ensaio. O contorno na interface denota fraca aderência.



Figura 62: 4,8T10. Aspecto geral da amostra. Bolhas de ar maiores e com menor incidência. Ar aprisionado = 1,9%.

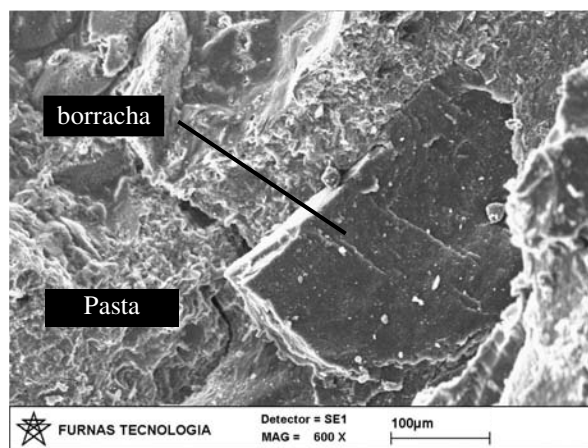


Figura 63: 4,8T10. Região de interface exibindo boa aderência.

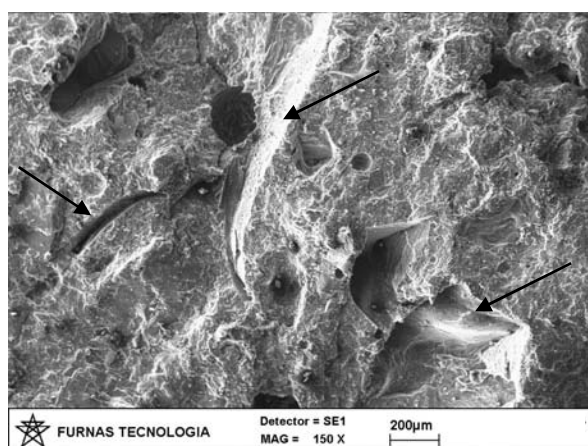


Figura 64: 4,8T10. Aspecto geral da amostra exibindo vazios formados pelo “descolamento/arrancamento” de partículas de borracha durante o ensaio de tração por compressão diametral.

6.7. ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS DA ETAPA 1

Com base nos resultados obtidos é possível definir as melhores combinações das variáveis estudadas, visando o melhor aproveitamento possível dos resíduos de pneus inservíveis, sem grandes repercussões no desempenho mecânico do material. Neste estudo, entende-se por adequado o concreto-massa que apresenta, em relação ao concreto de referência:

- resistência à compressão maior ou equivalente;
- módulo de elasticidade menor ou equivalente;
- resistência à tração por compressão diametral maior ou equivalente;
- massa específica equivalente.

6.7.1. Efeito da granulometria e do teor de borracha nas propriedades do concreto.

Analisando os resultados apresentados no item 6.6, verifica-se que as amostras contendo teores de borracha superiores a 10% apresentaram uma redução contínua da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral, do módulo de elasticidade e da massa específica com o aumento do teor de borracha, como pode ser observado nas figuras 65, 67, 68 e 69, respectivamente. Nessas figuras estão apresentados os valores médios relativos, aos 91 dias de idade, de cada propriedade estudada, utilizados para auxiliar na seleção das dosagens que atendam aos parâmetros acima estabelecidos.

Na Figura 65 observa-se que a redução na resistência à compressão do concreto chega a 60%, no caso do uso de partículas de 0,42 mm (onde ocorreu maior incorporação de ar) e fica entre 30 e 40% no caso de partículas de 1,5 mm e 4,8 mm. O comportamento das curvas contendo partículas com e sem tratamento é similar para cada granulometria analisada.

As dosagens contendo partículas de 1,5 mm e 4,8 mm chegaram a apresentar resistência à compressão de 20% a 30% superior à referência quando usadas nos teores de 10% e 5% em substituição da areia, respectivamente. Um fator que pode ter contribuído para esse fato é o menor teor de ar incorporado apresentado por essas dosagens em relação à referência (ver Figura 47 e tabelas do Apêndice B).

Na Figura 66 tem-se uma comparação da média dos resultados de resistência à compressão obtidos nesta pesquisa com os resultados de outros autores, todos plotados em termos da fração volumétrica de borracha no concreto. Até a proporção volumétrica de 2,7% de borracha de pneu no concreto (10% em relação à areia) os resultados de resistência à compressão obtidos nesta pesquisa são superiores àqueles dos demais autores. Acima de 2,7% de borracha de pneu no concreto a resistência diminui com o aumento do teor de borracha, mas se mantém na média obtida pelos outros autores.

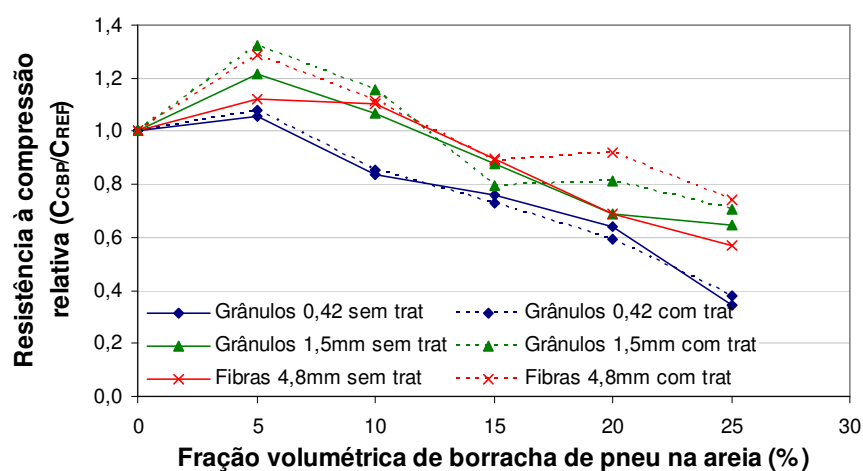


Figura 65: Resistência à compressão relativa das diversas dosagens de CBP em relação à referência.

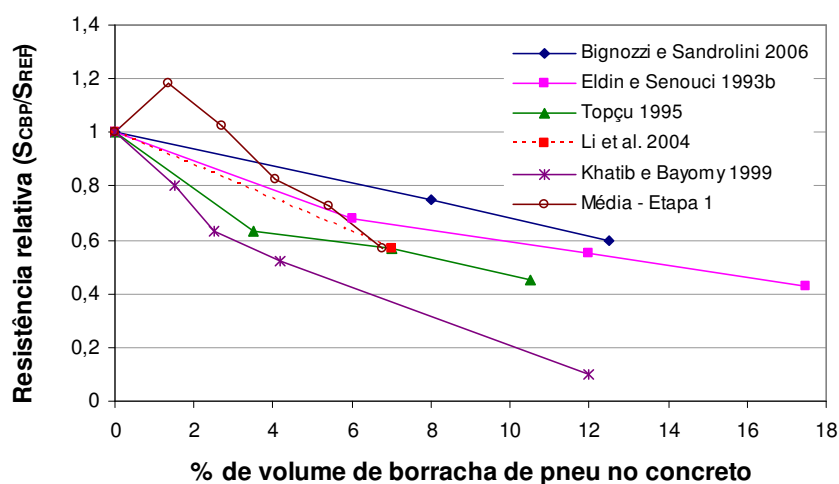


Figura 66: Resistência à compressão relativa média desta pesquisa em relação aos resultados de outros pesquisadores.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral apresentaram comportamento semelhante à resistência à compressão sem, contudo, exibir valores superiores aos do concreto de referência (Figura 67). Dosagens contendo partículas de pneu de 1,5 mm e 4,8 mm não sofreram reduções significativas da resistência à tração até 10% de substituição da areia. Para teores de substituição acima de 10%, a resistência à tração é reduzida continuamente com o aumento do teor de borracha, sendo essa redução mais drástica no caso das dosagens contendo partículas de pneu de 0,42mm. Esse comportamento coincide com o registrado por outros autores (ELDIN e SENOUCI, 1994; TOPÇU e ÖZÇELIKÖRS, 1991; ESER, 1995 *apud* TOPÇU, 1997).

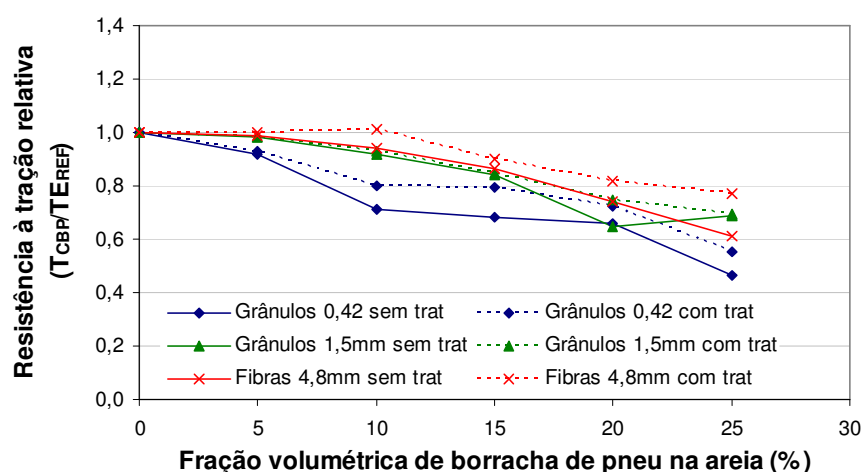


Figura 67: Resistência à tração por compressão diametral das diversas dosagens de CBP em relação à referência.

A redução do módulo de elasticidade do concreto com o aumento do teor de borracha é um comportamento desejável para o concreto-massa, pois indica maior capacidade de deformação e, conseqüentemente, minimização dos riscos de fissuração. Reduções significativas no módulo de elasticidade ocorreram para teores de borracha superiores a 10% (Figura 68). Entretanto, essa corresponde a uma faixa de adição de borracha que acarreta perdas consideráveis de resistência mecânica. Além disso, com exceção das dosagens contendo partículas de 1,5 mm e 4,8 mm, sem tratamento, que apresentam um comportamento aproximadamente linear, as demais dosagens apresentam resultados que oscilam irregularmente entre 10% e 40% de redução do módulo.

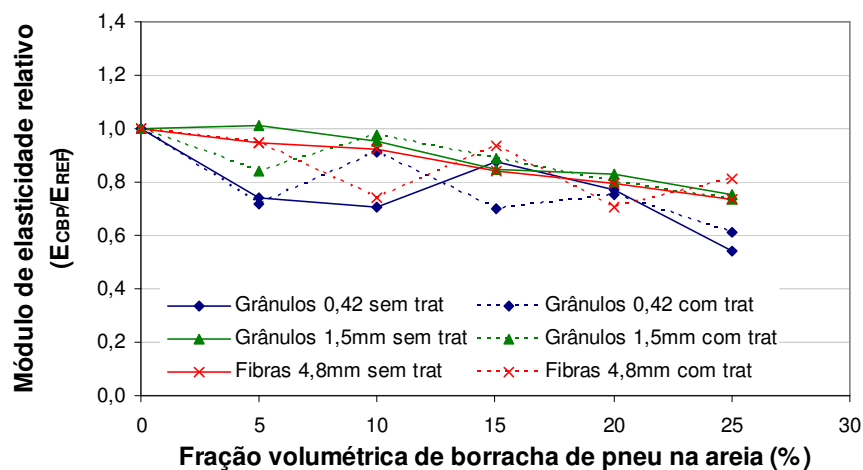


Figura 68: Módulo de elasticidade relativo das diversas dosagens de CBP em relação à referência.

A massa específica é uma importante propriedade para o concreto massa uma vez que este atua principalmente pela ação do seu peso próprio, e não somente pela resistência mecânica. O concreto com borracha de pneu (CBP) sofreu redução da massa específica em relação ao concreto de referência, a cada incremento de teor de borracha (Figura 69). As reduções, entretanto, ficaram na ordem de 10%, mesmo para os teores de borracha mais elevados. A redução da massa específica era um comportamento esperado, uma vez que a areia, com massa específica de aproximadamente $2,64 \text{ g/m}^3$, foi substituída parcialmente pela borracha de pneu, com massa específica de aproximadamente $1,12 \text{ g/cm}^3$. Além desse, um outro fator que contribuiu para a redução da massa específica do CBP foi o aumento do teor de ar aprisionado, que ocorreu de forma diretamente proporcional ao teor de borracha e inversamente proporcional ao tamanho das partículas.

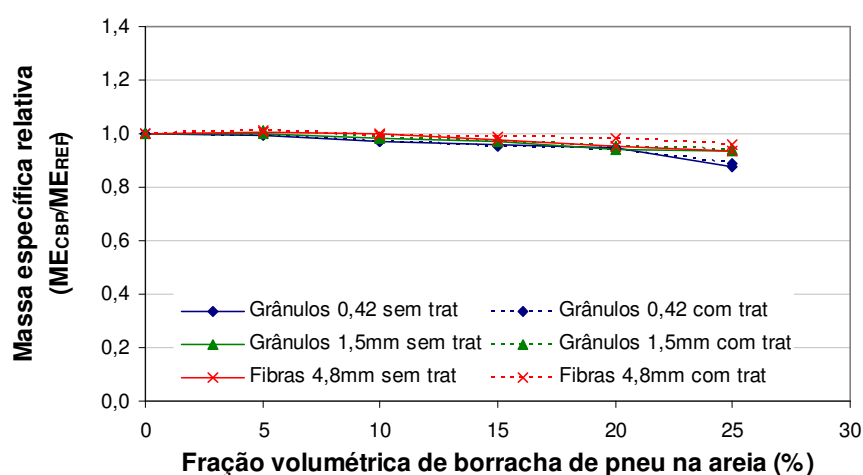


Figura 69: Massa específica relativa das diversas dosagens de CBP em relação à referência.

6.7.2. Efeito do tratamento superficial da borracha nas propriedades do concreto.

A eficiência dos tratamentos superficiais aplicados às partículas de borracha depende da habilidade dos polímeros em aderir à superfície da borracha, não se diluir na água de amassamento e formar pontes de hidrogênio com a areia e a água. Essas habilidades permitiriam a formação de uma região de ligação entre a superfície da borracha e a pasta de cimento, ou seja, o polímero agiria como um agente de acoplamento entre essas fases do concreto.

Nas microscopias realizadas não foram observadas melhorias da zona de transição das amostras contendo partículas tratadas em relação às amostras contendo partículas sem tratamento. Regiões de boa e má aderência entre as partículas de borracha e a pasta de cimento foram observadas em ambos os tipos de amostras, não evidenciando a ação dos polímeros como agentes de acoplamento. Essa análise foi confirmada pelos resultados dos ensaios mecânicos, uma vez que não houve melhoria significativa no desempenho das amostras contendo partículas de borracha tratadas superficialmente, com exceção de teores de borracha acima de 15%. Nesses casos, cabe ressaltar que os tratamentos superficiais realizados nas partículas de 1,5 mm (tratada com polímero de base acrílica) e de 4,8mm (tratada com polímero de base estireno-butadieno) mostraram uma leve tendência de melhoria estatisticamente verificável, da resistência à compressão e da resistência à tração por

compressão diametral (figuras 39 e 43, respectivamente), quando comparados aos concretos que utilizaram partículas de borracha sem tratamento. Esse desempenho, entretanto, pode ter sido influenciado pelo menor teor de ar incorporado identificado nas dosagens com tratamento superficial (Figura 47).

6.7.3. Estimativa da resistência à compressão do concreto com borracha de pneu.

Aïtcin e Neville (2003) resumem sucintamente a história da evolução das leis que ora regem a relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante (W/C), citando Féret (1892) como sendo provavelmente o primeiro a formular a relação entre a resistência à compressão do concreto com seus materiais constituintes. Féret entendia que a presença de água e ar preenchendo os vazios na argamassa eram aspectos negativos para a resistência a compressão dos concretos, deduzindo a relação potencial:

$$f_c = kC^2 / (C + W + A)^2 \quad (\text{Equação 20})$$

Onde C, W e A representam o volume de cimento, de água e de ar incorporado, respectivamente, num volume unitário de concreto. k é um coeficiente que depende das propriedades do cimento e f_c é a resistência à compressão em ensaios com forma, tamanho e idades específicos. Féret concluiu ser a segunda potência a melhor linha de tendência para os valores determinados em seus estudos em função do coeficiente k . Introduzindo a expressão W/C, ainda em termos volumétricos, a Equação 20 pode ser reescrita como:

$$f_c = k / [1 + W / C + A / C]^2 \quad (\text{Equação 21})$$

Para concretos comuns, a fim de ilustração, podem-se considerar as seguintes proporções volumétricas em 1 m³: C=0,1, A= 0,01 a 0,02, e W=0,2 (LIMA, 2006). Assim W/C=2 e A/C=0,1. Deste modo este último valor pode ser desprezado, passando a Equação 21 para a seguinte forma:

$$f_c = k / [1 + W / C]^2 \quad (\text{Equação 22})$$

Outra relação entre a resistência à compressão do concreto e relação água/cimento mostrada por Aïtcin e Neville (2003) consiste na equação proposta por Abrams (1925):

$$f_c' = A/B^{w/c} \quad (\text{Equação 23})$$

Onde W/C é a relação água/cimento expressa em volume, e A e B são constantes dependentes de condições específicas tais como o tipo de cimento, período de cura e idade de ensaio.

A equação 22 é uma simplificação da equação 21 para concretos comuns, que desconsidera a relação volume de ar incorporado/volume de cimento. No caso dos concretos com borracha de pneu, elevados teores de ar incorporado foram observados diretamente proporcionais ao teor de borracha e inversamente proporcionais ao tamanho das partículas. Essa simplificação, portanto, torna-se inadequada no caso dos concretos com borracha de pneu. A Equação 23, por sua vez, também não é aplicável aos dados obtidos nesta pesquisa, uma vez que a relação água/cimento foi constante ao longo de todo o estudo.

A estimativa da resistência à compressão em função dos volumes de cimento, de água e de ar incorporado foi realizada com base na equação 21. Regressões não lineares foram realizadas utilizando-se os dados experimentais referentes a todas as dosagens de concreto da fase 1 desta pesquisa, moldados com borracha de diferentes granulometrias, em diferentes teores de substituição à areia, com ou sem tratamento superficial, que foram testados aos 7, 28 e 91 dias.

Na Figura 70 observam-se as regressões não lineares obtidas para a determinação do coeficiente k para as idades específicas de 7 dias, 28 dias e 91 dias. Observa-se que as regressões não-lineares resultaram em coeficientes de correlação (R) semelhantes para as três idades, da ordem de 0,800. Para cada idade estão plotadas a nuvem de pontos experimentais e a curva correspondente à equação obtida.

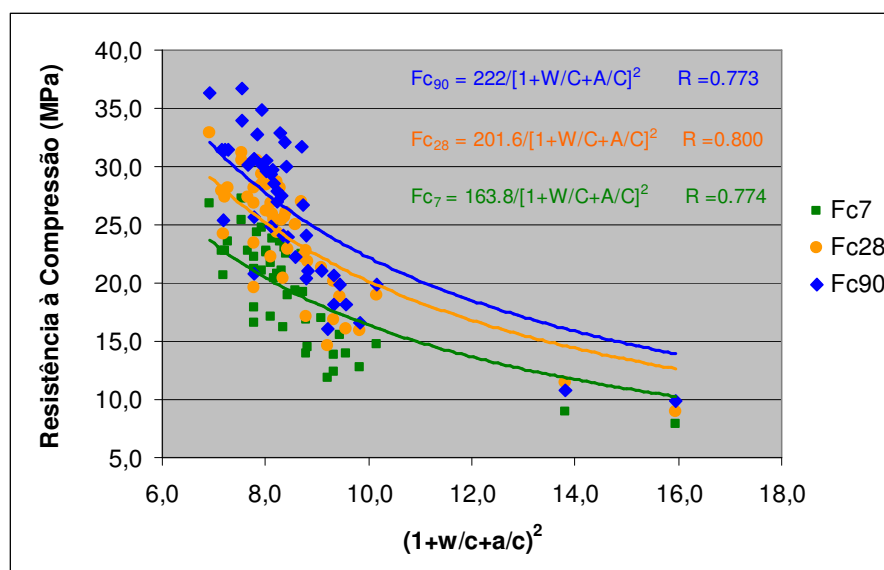


Figura 70: Regressões não-lineares para predição da resistência à compressão do concreto com borracha de pneu em função das relações volumétricas água/cimento e ar incorporado/cimento.

6.7.4. Estimativa do módulo de elasticidade do concreto com borracha de pneu.

Os fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto são diversos e se sobrepõem, formando uma complexa interação de fenômenos. Entre esses fatores, Metha e Monteiro (1994) citam a porosidade, a fração volumétrica e o módulo de deformação das fases constituintes, bem como os parâmetros de teste. Organismos nacionais e internacionais de normalização envidaram esforços no sentido de definir modelos de predição do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto, conforme apresentado na Tabela 13 (CEB/FIP, 1990; EUROCODE, 1990; ACI, 1995; EHE, 1999; ABNT, 2003).

Na Figura 71 estão apresentados os resultados dos módulos de elasticidade determinados na primeira fase desta pesquisa, em função da resistência à compressão efetiva, comparados com as curvas correspondentes obtidas aplicando as recomendações de algumas normas utilizadas para previsão do módulo de elasticidade do concreto. Observa-se que a nuvem de dados experimentais dos concretos com borracha de pneu (CBP) e dos concretos de referência (REF) se encontram abaixo da curva predita pela NBR 6118/2003 e se aproximam do modelo teórico proposto pelo ACI 318/1995. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de ter sido utilizado um nível de carregamento de 40% da carga de ruptura para determinação do módulo de elasticidade, enquanto o previsto pela NBR é 30% e o previsto pelo ACI é 45% .

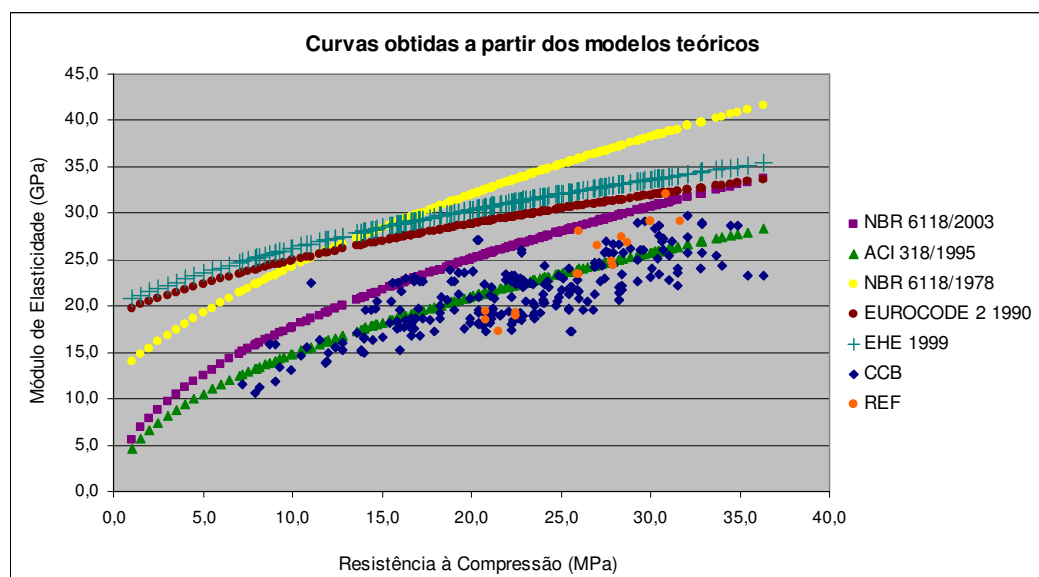


Figura 71: Resultados dos módulos de elasticidade determinados nesta pesquisa em função de modelos teóricos para previsão do módulo de elasticidade.

Adicionalmente, foram realizadas análises de regressão não-linear utilizando os modelos adotados por normas nacionais e estrangeiras, de onde foram obtidos modelos de previsão ajustados aos dados experimentais (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008b). Na Tabela 13 estão apresentados os modelos adotados pelas normas nacionais e internacionais para previsão do módulo de elasticidade, em função da resistência efetiva à compressão, e os respectivos modelos obtidos a partir das análises de regressão não-linear.

Tabela 13: Modelos normalizados e equações obtidas a partir de regressões não-lineares, para previsão do módulo de elasticidade a partir da resistência efetiva do concreto.

MODELOS	NORMA	EQUAÇÃO DA NORMA ⁽¹⁾	COEFICIENTES "A" E "R" OBTIDOS DAS REGRESSÕES NÃO-LINEARES				
			CCB		REF		
			A	R	A	R	
1	Mod = A . (fcef+3,5) ^{0,5}	NBR 6118/78	$E_c = 6600 \cdot (f_{ck}+3,5)^{1/2}$	4131,78	0,7164	4491,52	0,7141
2	Mod = A . (fcef) ^{0,5}	NBR 6118/03 ACI 318/95	$E_c = 5600 \cdot (f_{ck})^{1/2}$ $E_c = 4700 \cdot (f_{cef})^{0,5}$	4439,41	0,7082	4786,71	0,7503
3	Mod = A . $\left(\frac{f_{cef}+8}{10}\right)^{1/3}$	CEB/FIP/1990	$E_c = \alpha \cdot 2,15 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$ ⁽²⁾	$1,474 \cdot 10^4$	0,6881	$1,620 \cdot 10^4$	0,5666
4	Mod = A . (fcef+8) ^{1/3}	EUROCODE (1990) EHE (1999)	$E_c = 9500 \cdot (f_{ck}+8)^{1/3}$ $E_c = 10000 \cdot (f_{ck}+8)^{1/3}$	6843,57	0,6881	7519,88	0,5666

NOTAS: (1) E_c e f_{ck} estão expressos em megapascal.

(2) $\alpha = 1,2$ para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito. Neste caso $\alpha = 1$.

Pode-se verificar, na Tabela 13, que as regressões não-lineares realizadas a partir dos modelos 1 e 2 resultaram em coeficientes de correlação (R) semelhantes e superiores aos modelos 3 e 4. Entretanto, os coeficientes “A” obtidos no modelo 2 apresentaram melhor aproximação da equação proposta pelo ACI 318/1995. Tal fato é observado tanto para os concretos com borracha (CBP) quanto para os concretos de referência (REF) e são confirmados pelos dados da Tabela 14. Nela se encontram os valores previstos para o módulo de elasticidade e os respectivos erros calculados a partir dos modelos obtidos das análises de regressão não-linear e dos modelos das normais nacionais e internacionais (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008b).

Tabela 14: Valores do módulo de elasticidade calculados a partir dos modelos normalizados e dos modelos obtidos das análises de regressão não-linear.

Modelo	Norma	E_c (MPa) ⁽¹⁾	$E_{c_{pred}}$ (MPa) ⁽²⁾		Erro (%) ⁽³⁾	
			CBP	REF	CBP	REF
1	NBR 6118 (1978)	31994,69	20357,59	22240,53	36,37	30,49
2	NBR 6118 (2003)	25043,96	20202,43	21406,82	19,33	14,52
2	ACI 318 (1995)	21019,04	20202,43	21406,82	3,89	-1,84
3	CEB/FIP (1990)	30303,38	20781,07	23108,52	31,42	23,74
4	EUROCODE (1990)	28847,60	20781,11	23108,51	27,96	19,89
4	EHE (1999)	30365,89	20781,11	23108,51	31,56	23,90

NOTAS: (1) E_c = Módulo de Elasticidade obtido pelas normas nacionais e estrangeiras para $f_{ck} = 20$ MPa.

(2) $E_{c_{pred}}$ = Módulo de elasticidade pelos modelos das análises de regressão não-linear para $f_{ck} = 20$ MPa.

$$(3) \text{ Erro } \% = \left(\frac{E_c - E_{c_{pred}}}{E_c} \right) \cdot 100$$

Observa-se que os valores estimados pelo ACI 318/1995 apresentaram os menores erros (3,89% e -1,84%), quando comparados aos valores calculados a partir da regressão não-linear do modelo 2, o que confirma as observações realizadas a partir da Figura 71 e da Tabela 13. Ou seja, os resultados obtidos indicam que o módulo de elasticidade do concreto com borracha de pneu pode ser estimado com boa aproximação, a partir do valor da resistência à compressão, utilizando como referência o modelo proposto pelo ACI 318/1995.

Para que se possam apreciar melhor estas tendências, na Figura 72 são apresentadas as curvas correspondentes às equações usadas para predição do módulo de elasticidade nos modelos normalizados (ACI 318/1995 e NBR 6118/2003) e aquelas obtidos a partir das regressões não-lineares dos dados do concreto com borracha (CBP) e do concreto de referência (REF). As curvas indicam que o CBP tende a apresentar módulos de elasticidade inferiores ao concreto sem borracha, para uma mesma resistência à compressão efetiva.

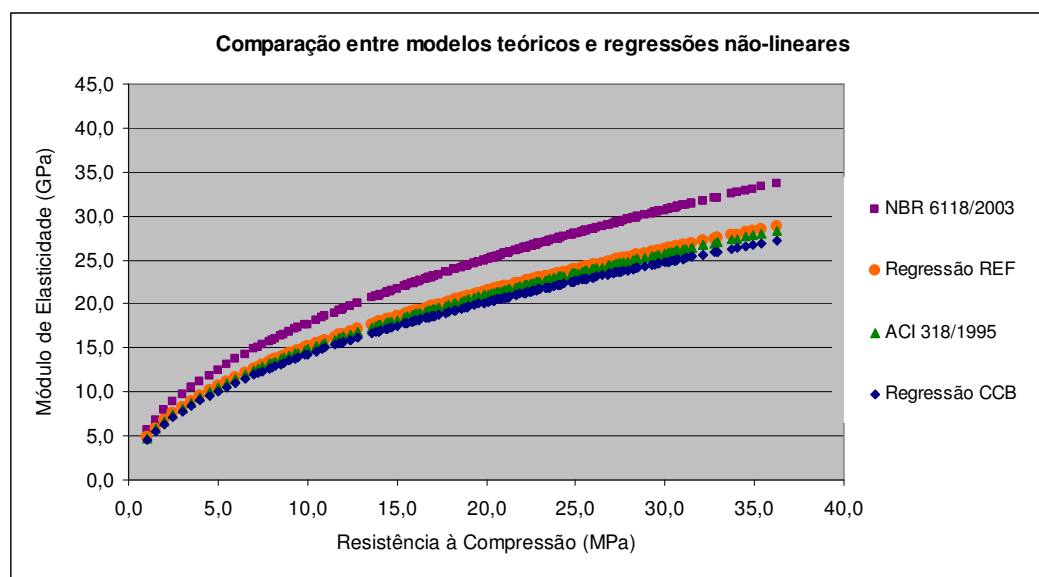


Figura 72: Módulo de elasticidade calculado a partir dos modelos normalizados em comparação com os módulos de elasticidade calculados a partir das regressões não-lineares (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008b).

6.7.5. Conclusões Gerais da Etapa 1

De maneira geral, nesta etapa se verificou que as dosagens contendo partículas de 1,5 mm e 4,8 mm, com e sem tratamento superficial, apresentam valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral satisfatórios, quando utilizadas em teores de até 10%. Teores crescentes de borracha levaram a um aumento gradual do teor de ar incorporado, principalmente no caso das partículas de menor dimensão, o que pode ser a principal causa da redução das propriedades mecânicas e da massa específica. Além disso, o aumento no teor de borracha reduziu a trabalhabilidade do concreto, causando uma demanda crescente de aditivo superplastificante, a fim de que se possa manter a trabalhabilidade sem alterar a relação água/cimento. Esse fenômeno era esperado, uma vez que foi verificado nos estudos iniciais desta pesquisa e confirmado por outros pesquisadores (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004a; HERNANDEZ-OLIVARES e BARLUENGA, 2004; SUKONTASUKKUL e CHAIKAEW, 2006).

Em conclusão, cruzando as análises dos resultados de resistência à compressão com os de módulo de elasticidade e tomando como diretriz do trabalho o objetivo de buscar um material de maior deformabilidade, com a menor perda de resistência possível e com melhor aproveitamento dos resíduos de borracha de pneu, foram feitas as seguintes definições:

- teor de borracha de pneu em substituição do volume de areia: até 10%;
- partículas de borracha em grânulos de 1,5mm e em fibras de 4,8 mm;
- tratamento superficial de base acrílica ou estireno-butadieno.

Portanto, para continuidade dos estudos na segunda etapa, a opção foi feita em função da melhor trabalhabilidade apresentada durante as moldagens pelo concreto com adição de partículas em grânulos de 1,5 mm, a serem utilizadas nas condições com e sem tratamento superficial com polímero de base acrílica.

A substituição do volume de areia por borracha de pneu será realizada com incrementos de 2% até 10% e o teor de ar incorporado será controlado por meio de aditivo incorporador de ar a fim de neutralizar a interveniência desse fator nos resultados.

7. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS - ETAPA 2

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados na segunda fase do programa experimental. Nesta etapa foram investigados, em maior detalhe, os parâmetros teor, granulometria e tratamento superficial da borracha, que resultaram nos concretos com melhor desempenho na primeira fase. Foram avaliadas dosagens de concreto-massa com borracha de pneu (CBP) quanto ao seu desempenho mecânico, de tenacidade e de permeabilidade em relação a um concreto-massa sem borracha. Desta forma, as partículas de pneu foram incorporadas ao concreto nos teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em substituição ao volume de areia, a fim de identificar um teor ótimo na faixa identificada como de melhor desempenho na primeira fase. Empregaram-se partículas em grânulos com $D_{\text{máx}}$ de 1,5 mm, na condição *sem tratamento* ou *tratados* superficialmente com aditivo polimérico de base acrílica.

As amostras geradas foram submetidas a ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração simples, resistência à tração na flexão, tenacidade, permeabilidade e massa específica, sendo testadas duas amostras por idade de ensaio, totalizando 286 corpos-de-prova. Novamente foram selecionadas algumas amostras para análise micro-estrutural por microscopia eletrônica de varredura a fim de avaliar a região de interface borracha/matriz cimentícia em relação à região de interface agregado/matriz cimentícia.

Para redução do número de corpos-de-prova e da variabilidade entre betonadas, o ensaio de determinação da resistência à compressão do concreto foi realizado no mesmo corpo-de-prova empregado para o ensaio de massa específica. Já o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi efetuado no mesmo corpo-de-prova que o ensaio de módulo de elasticidade. Além disto, o valor de resistência à tração na flexão foi tomado como sendo a carga de ruptura registrada durante o ensaio de tenacidade. A seguir se discutem as tendências gerais de comportamento registradas para cada tipo de ensaio realizado. Os resultados individuais de cada corpo-de-prova encontram-se apresentados no APÊNDICE C.

7.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Figura 73 estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento da resistência à compressão do concreto em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Em todas as idades de ensaio, observa-se que a resistência dos concretos não sofre grandes alterações com o aumento do teor de borracha e nem com o tratamento superficial. A influência da idade de ensaio, entretanto, é evidente.

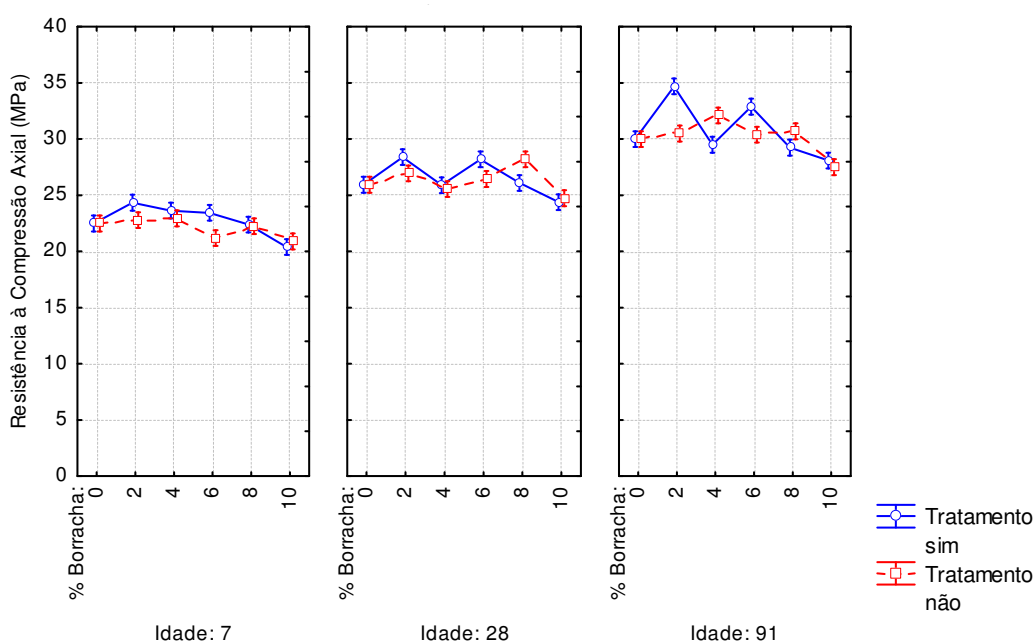


Figura 73: Resistência à compressão dos concretos nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de resistência à compressão. A análise indica, mais uma vez, que a variável tratamento não surte efeito sobre esta propriedade. As demais variáveis independentes influenciaram significativamente os resultados, a um nível de confiança de 95%. O efeito do teor de borracha, entretanto, é pequeno, o que é evidenciado pelo baixo valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$. Com o teste de Tukey foi possível, ainda, realizar o agrupamento dos resultados homogêneos para esta propriedade. Com exceção dos teores de 2% e 10%, as demais combinações resultaram em um mesmo grupo homogêneo (Figura 74a). Os valores de resistência à compressão das amostras de concreto nas diferentes idades de ensaio (Figura 74b) e contendo partículas de pneu com e sem tratamento superficial (Figura 74c) resultaram em grupos homogêneos individuais para cada condição.

Tabela 15: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à compressão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	86,80	5	17,36	2,361	15,03	0,000000
Idade	772,86	2	386,43	3,143	334,60	0,000000
Tratamento	4,01	1	4,01	3,993	3,48	0,066944
Error	72,76	63	1,15			

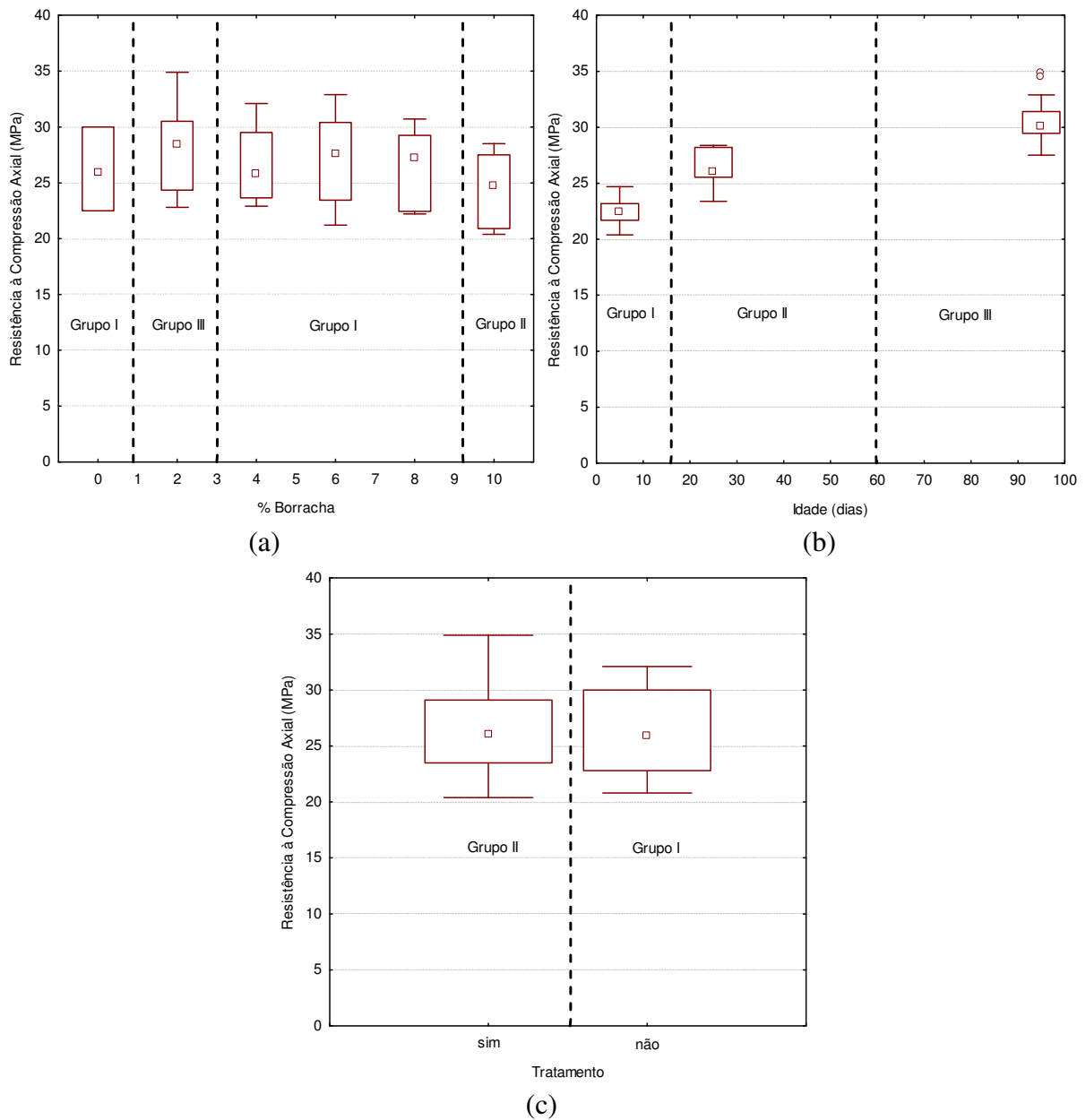


Figura 74: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à compressão, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

É interessante notar que, embora a ANOVA indique que o tratamento superficial não tem influência sobre a propriedade resistência à compressão, o teste de Tukey parece ser mais sensível às pequenas variações observadas nos resultados (Figura 73), sendo as mesmas suficientes para resultar em uma separação dos resultados em grupos distintos.

7.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Figura 75 estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento do módulo de elasticidade do concreto em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Em todas as idades de ensaio, observa-se que o módulo de elasticidade do concreto não sofre grandes alterações com o aumento do teor de borracha e nem com o tratamento superficial. Entretanto observa-se claramente a influência da idade de ensaio.

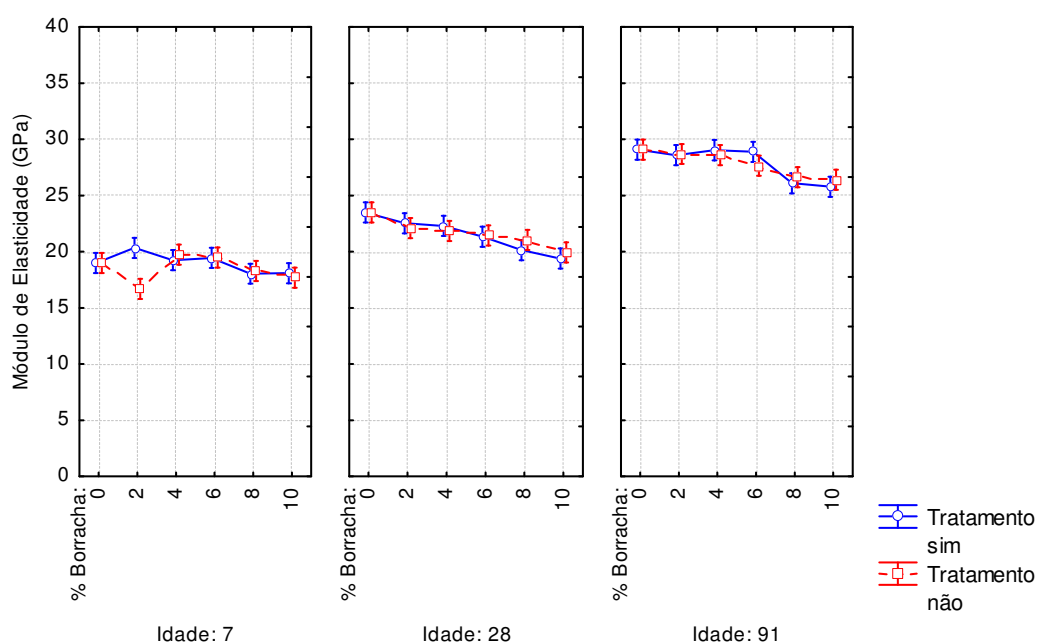


Figura 75: Módulo de elasticidade dos concretos nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de módulo de elasticidade. A análise indica que a variável tratamento não surtiu efeito sobre a propriedade estudada e as demais variáveis independentes influenciaram os resultados, a um nível de confiança de 95%. O efeito do teor de borracha, entretanto, é pequeno, o que é evidenciado pelo baixo valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

Tabela 16: Análise da variância aplicada aos resultados de módulo de elasticidade.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	65,01	5	13,00	2,361	17,81	0,000000
Idade	1047,03	2	523,51	3,143	717,23	0,000000
Tratamento	0,52	1	0,52	3,993	0,71	0,403279
Error	45,98	63	0,73			

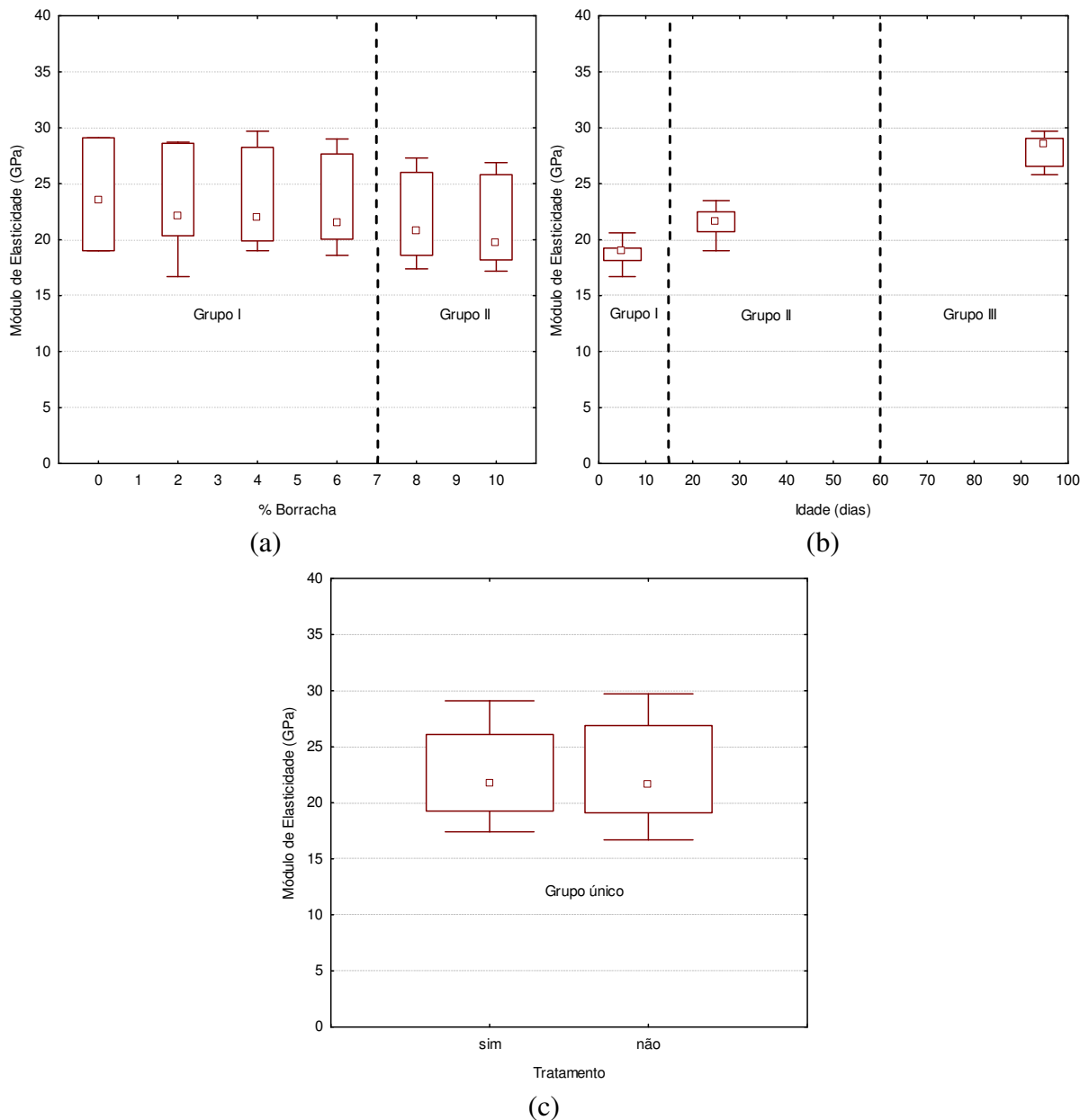


Figura 76: Agrupamento de resultados homogêneos do módulo de elasticidade, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

A partir do teste de Tukey foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável. A pequena influência do teor de borracha identificada na ANOVA é confirmada pelo teste de Tukey quando se obtêm apenas dois grupos homogêneos para os diversos teores de borracha utilizados (Figura 76a). Por outro lado, os valores de módulo de elasticidade resultaram em grupos homogêneos individuais para cada idade de ensaio (Figura 76b). Os valores de módulo de elasticidade das amostras de concreto contendo partículas com e sem tratamento superficial resultaram em um mesmo grupo homogêneo (Figura 76c), conforme indicado pela ANOVA.

7.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Figura 77 estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento da resistência à tração por compressão diametral do concreto em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Em todas as idades de ensaio, observa-se que essa propriedade não sofre grandes alterações com o aumento do teor de borracha e nem com o tratamento superficial, embora pareça haver, visualmente, uma suave tendência de queda da resistência com o aumento do teor de borracha a partir do teor de 6%. Por outro lado, como seria de esperar, observa-se claramente a influência da idade de ensaio.

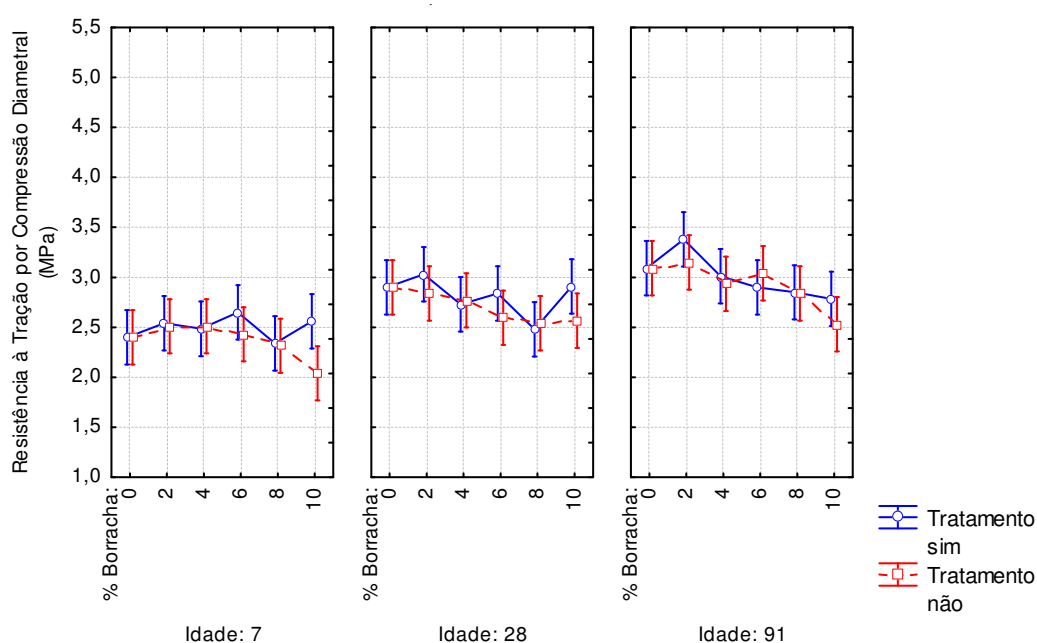


Figura 77: Resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Tabela 17: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	1,0993	5	0,2199	2,361	6,24	0,000092
Idade	3,4907	2	1,7454	3,143	49,54	0,000000
Tratamento	0,1964	1	0,1964	3,993	5,57	0,021344
Error	2,2196	63	0,0352			

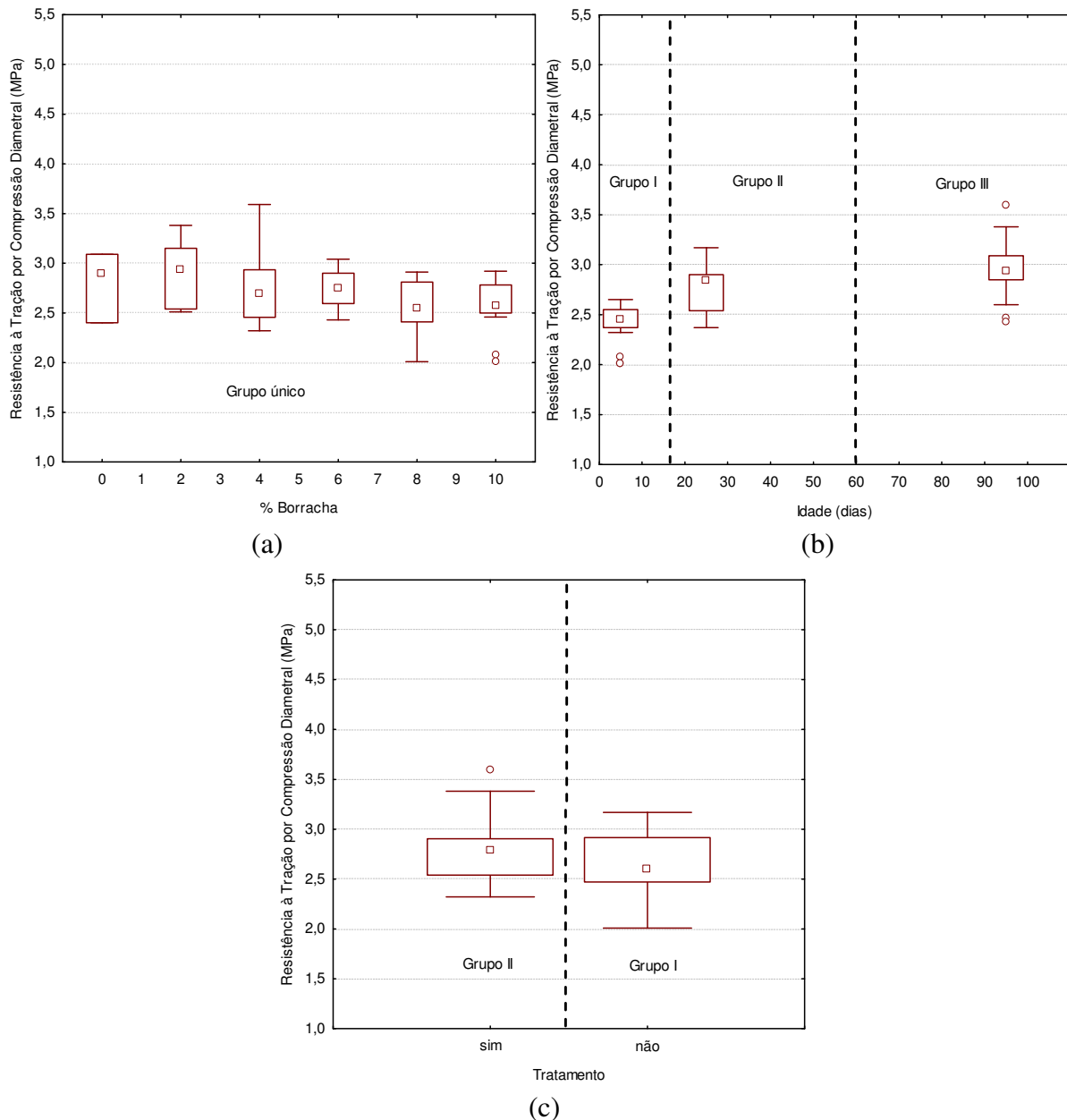


Figura 78: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração por compressão diametral, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

Na Tabela 17 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de resistência à tração por compressão diametral. A análise indica que todas as variáveis independentes influenciam significativamente os resultados, a um nível de confiança de 95%, confirmando a tendência visual discutida acima. O efeito do teor e do tratamento superficial da borracha, entretanto, é pequeno, o que é evidenciado pelo baixo valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

A partir do teste de Tukey foi possível, ainda, agrupar os resultados homogêneos. Os valores de resistência à tração por compressão diametral das amostras contendo diferentes teores de borracha ficaram todas no mesmo grupo (Figura 78a). Por outro lado, os resultados levaram à formação de grupos homogêneos individuais para cada idade de ensaio (Figura 78b) e condição de tratamento (Figura 78b).

7.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SIMPLES

Na Figura 79 estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento da resistência à tração simples do concreto em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Em todas as idades de ensaio observa-se que essa propriedade não sofre grandes alterações com o aumento do teor de borracha e nem com o tratamento superficial. Observa-se que as amostras contendo partículas de borracha sem tratamento apresentam um comportamento mais uniforme em todas as idades, quando comparado ao comportamento das amostras nas quais as partículas receberam tratamento superficial.

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para a resistência à tração simples. A análise indica que todas as variáveis independentes estudadas influenciaram estatisticamente os resultados, a um nível de confiança de 95%. O efeito do teor e do tratamento superficial da borracha, entretanto, é pequeno, o que é evidenciado pelo baixo valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$, principalmente no caso do teor de borracha.

A partir do teste de Tukey foi possível, ainda, agrupar os resultados em grupos estatisticamente homogêneos. Os valores de resistência à tração simples das amostras de concreto contendo diferentes teores de borracha resultaram em um mesmo grupo homogêneo (Figura 80a). Por outro lado, os resultados levaram à formação de grupos homogêneos individuais para cada idade de ensaio (Figura 80b) e condição de tratamento (Figura 80b).

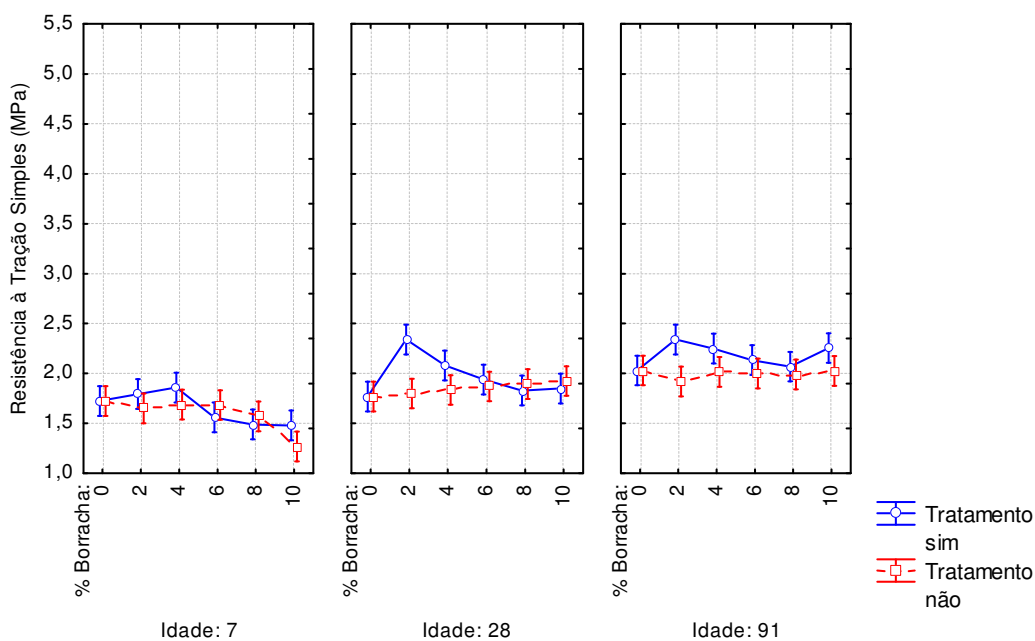


Figura 79: Resistência à tração simples nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Tabela 18: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração simples.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	0,3300	5	0,0660	2,361	3,19	0,012552
Idade	2,6195	2	1,3098	3,143	63,25	0,000000
Tratamento	0,2532	1	0,2532	3,993	12,23	0,000868
Error	1,3046	63	0,0207			

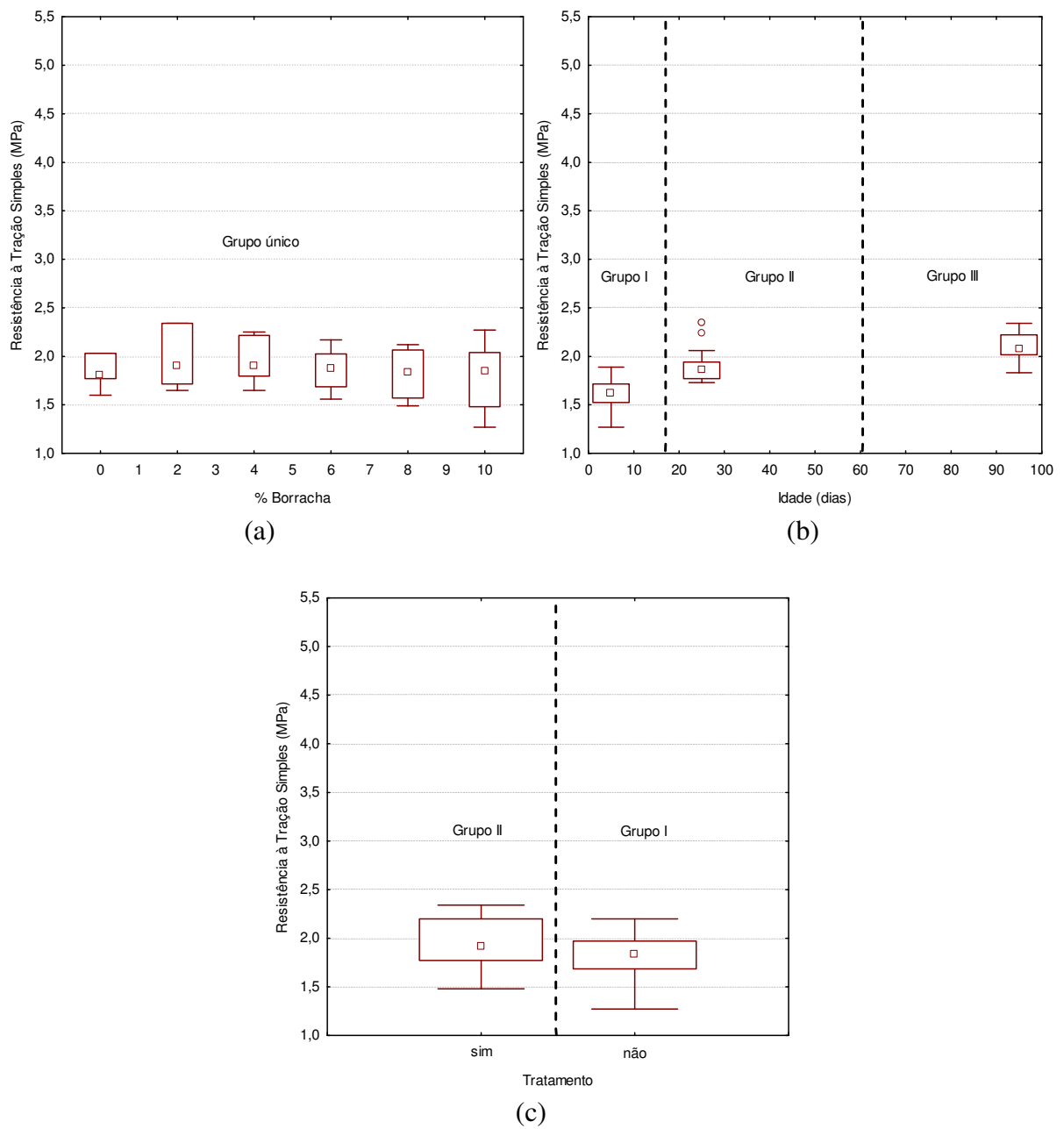


Figura 80: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração simples, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

7.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Na Figura 81 estão apresentados gráficos que ilustram o comportamento da resistência à tração na flexão em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Em todas as idades de ensaio observa-se que essa propriedade sofre pequenas variações com o aumento do teor de borracha e com o tratamento superficial.

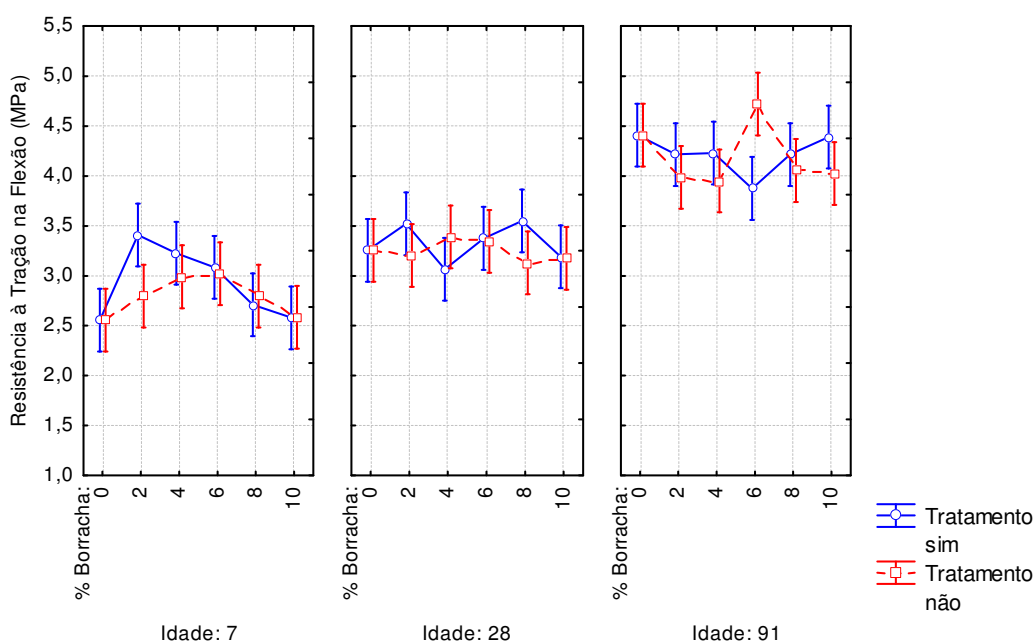


Figura 81: Resistência à tração na flexão nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Na Tabela 19 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios para determinação da resistência à tração na flexão. A análise de variância indica que apenas a variável idade afeta significativamente a propriedade estudada, a um nível de confiança de 95%.

Essas observações são confirmadas pelos resultados do teste de Tukey, que permite agrupar os dados em grupos homogêneos. O mesmo indica que, estatisticamente, os valores de resistência à tração na flexão de amostras contendo diferentes teores de borracha e que utilizaram partículas de borracha com ou sem tratamento, resultam num único grupo homogêneo (Figuras 82a e 82c). Por outro lado, a variação da idade de ensaio leva à formação de vários grupos homogêneos individuais (Figura 82b).

Tabela 19: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	0,4744	5	0,0949	2,361	1,26	0,29372
Idade	22,7613	2	11,3807	3,143	150,76	0,00000
Tratamento	0,1201	1	0,1201	3,993	1,59	0,21193
Error	4,7557	63	0,0755			

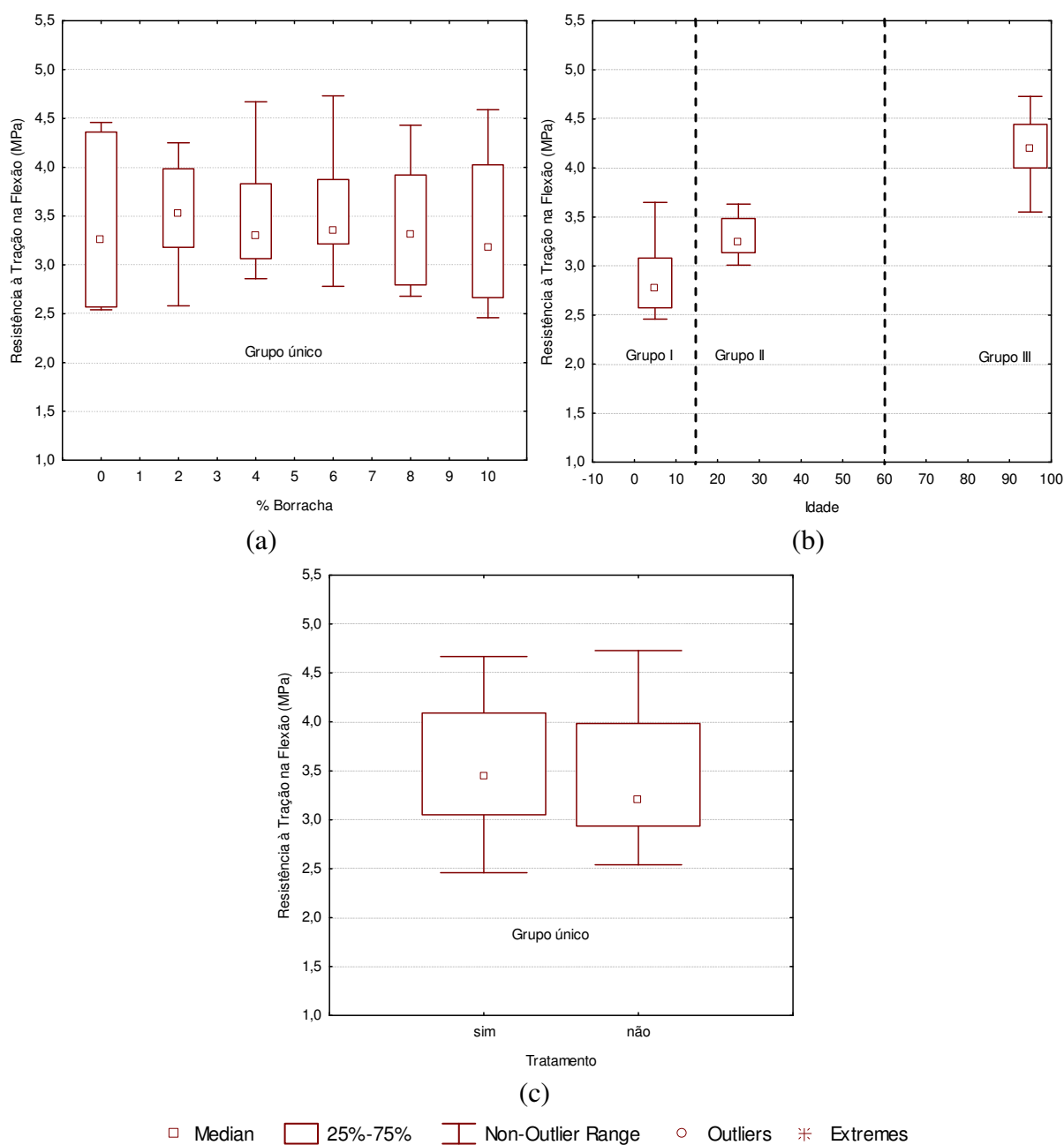


Figura 82: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração na flexão, conforme o teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

7.6. TENACIDADE

Na Figura 83 estão apresentados os gráficos que ilustram a variação dos valores de energia absorvida pelas amostras de concreto durante os ensaios de tenacidade, até 1,5mm de deflexão, em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Em todas as idades de ensaio observa-se que essa propriedade sofre pequenas variações com o aumento do teor de borracha e com o tratamento superficial. Em termos de idade, diferenças significativas são observadas somente para os resultados obtidos aos 91 dias.

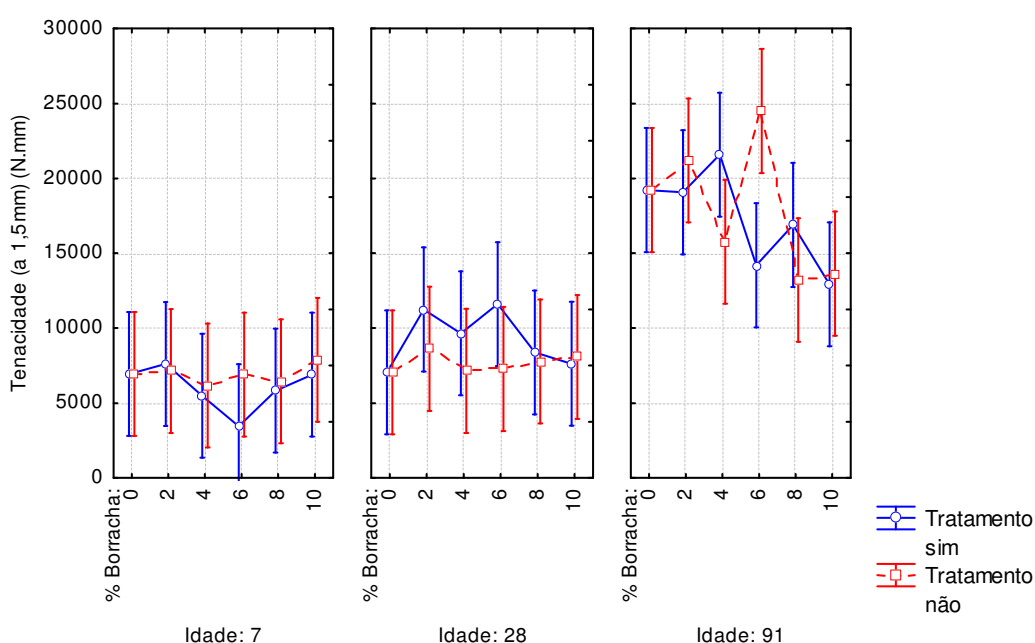


Figura 83: Tenacidade nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Na Tabela 20 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de energia absorvida obtidos a partir dos ensaios de tenacidade. A análise indica que apenas a variável idade influencia significativamente os resultados, a um nível de confiança de 95%. Ou seja, todas as combinações utilizadas resultaram em um material com valores de tenacidade equivalentes aos da referência. Essas observações são confirmadas pelo teste de Tukey, que indica que os valores de tenacidade de amostras contendo diferentes teores de borracha, com ou sem tratamento, resultam em um grupo homogêneo (Figuras 84a e 84c). No caso da variável idade, os resultados levam à formação de dois grupos homogêneos, um contendo os resultados aos 7 e 28 dias, e outro os resultados aos 91 dias (Figura 84b).

Tabela 20: Análise da variância aplicada aos resultados de tenacidade a 1,5 mm de deslocamento.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	7,1E+07	5	1,4E+07	2,361	1,4333	0,224685
Idade	170,0E+07	2	85,0E+07	3,143	85,3341	0,000000
Tratamento	0,002E+07	1	0,0027E+07	3,993	0,0027	0,958715
Error	63,0E+07	63	0,99E+07			

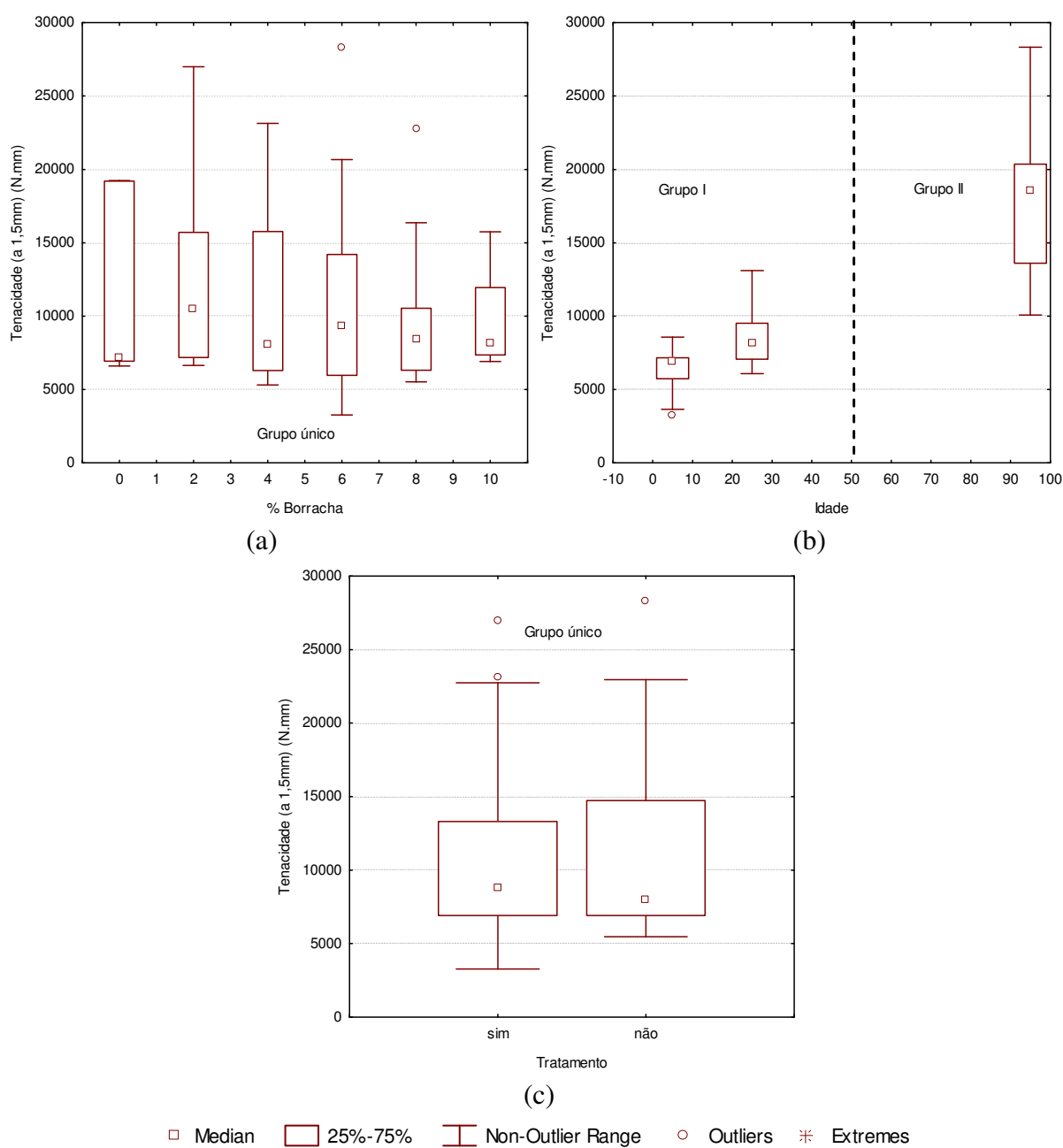


Figura 84: Agrupamento de resultados homogêneos da tenacidade do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

7.7. PERMEABILIDADE

Na Figura 85 o gráfico ilustra o comportamento da permeabilidade em função do tratamento superficial e do teor de borracha. Os ensaios foram realizados apenas aos 60 dias de idade. Todas as combinações utilizadas resultaram em um material com permeabilidade inferior ou equivalente a do concreto de referência.

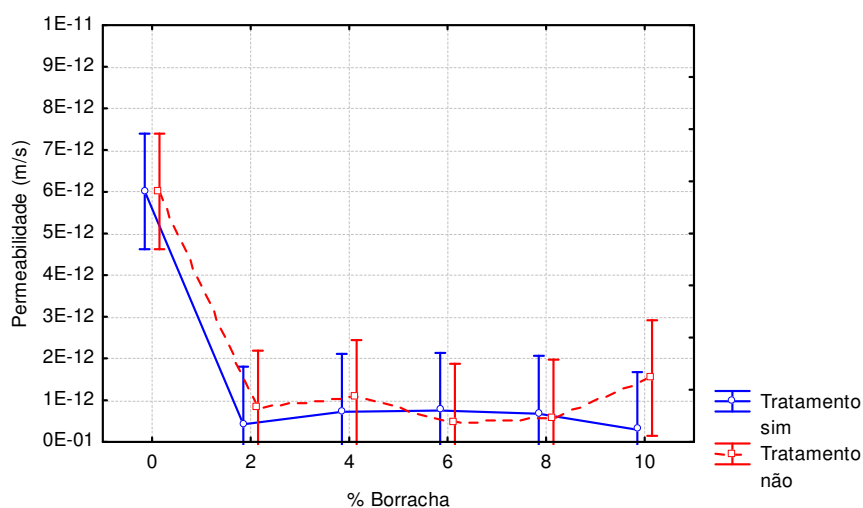


Figura 85: Permeabilidade à água sob pressão na idade de 60 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de permeabilidade. A análise indica que apenas a variável teor de borracha surtiu efeito sobre os resultados, embora a mesma se mostre pouco significativa, tendo em vista o baixo valor do $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

Essas observações são confirmadas pelo teste de Tukey, que permite efetuar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável. Os resultados referentes à amostra de referência formaram um grupo homogêneo, enquanto todos os concretos com borracha de pneu formaram outro grupo, indicando que o efeito do teor de borracha de pneu se restringe à condição *com* ou *sem* adição de borracha (Figura 86a). Ou seja, o aumento no teor de borracha de pneu não interferiu na permeabilidade do concreto. Quanto ao tratamento superficial das partículas de borracha, verifica-se que todas as combinações que utilizaram partículas com ou sem tratamento resultaram em um mesmo grupo homogêneo (Figura 86b).

Tabela 21: Análise da variância aplicada aos resultados de permeabilidade à água sob pressão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	9,32E-23	5	1,86E-23	2,810	28,4539	0,000000
Tratamento	0,0435E-23	1	0,0435E-23	4,451	0,6635	0,426591
Error	1,11E-23	17	0,0655E-23			

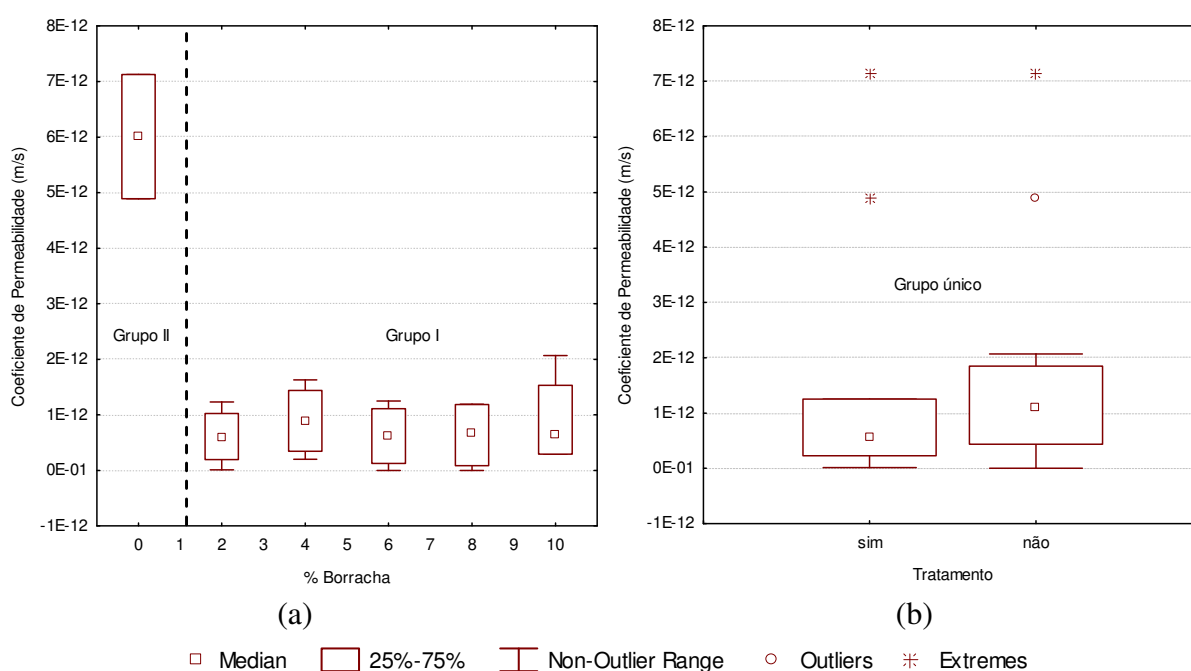


Figura 86: Agrupamento de resultados homogêneos da permeabilidade à água sob pressão, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha e (b) do tratamento superficial.

7.8. MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 87 os gráficos ilustram o comportamento da massa específica do concreto em função do tratamento superficial e do teor de borracha, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Todas as combinações utilizadas resultaram em um material com massa específica equivalente ao concreto de referência, com exceção dos teores de 10%. Observa-se uma tendência à redução da massa específica dos concretos com 10% de borracha de pneu, embora estes apresentem teor de ar aprisionado semelhante às demais combinações.

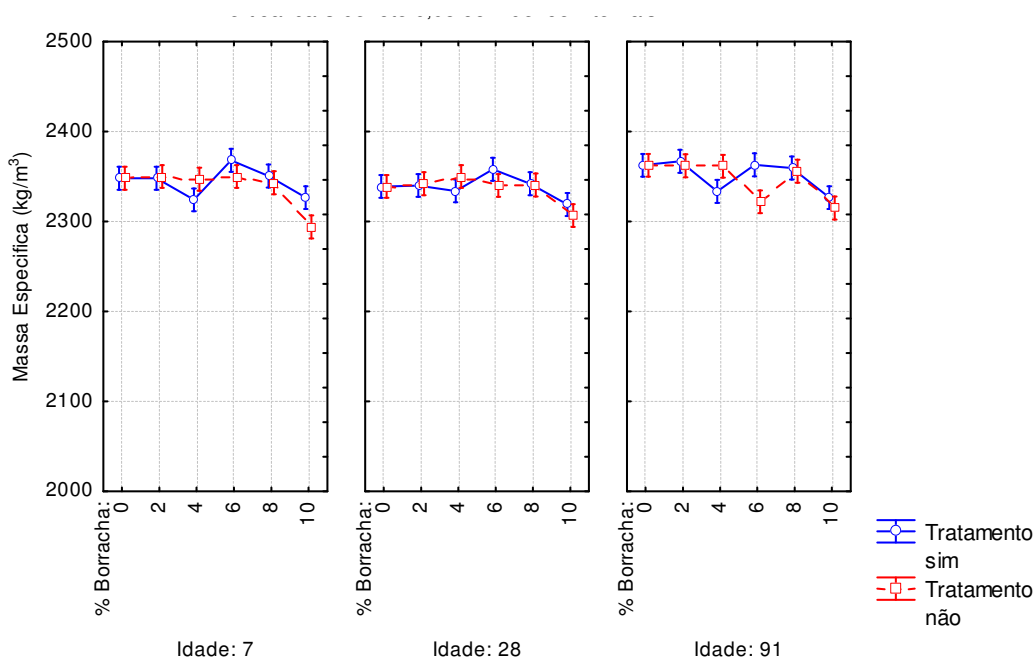


Figura 87: Massa específica nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias em função do teor de borracha de pneu e do tratamento superficial.

Na Tabela 22 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de massa específica do concreto. A análise indica que a variável tratamento não afetou significativamente a propriedade estudada e as demais variáveis influenciaram os resultados, a um nível de confiança de 95%. O efeito do teor de borracha e da idade, entretanto, é pouco significativo, o que é denotado pelos baixos valores de $F_{calculado}$ em relação ao $F_{crítico}$.

Essa observação é confirmada pelo teste de Tukey quando são correlacionados os diferentes teores de borracha com os tratamentos superficiais realizados. Com exceção do teor de 10% de borracha, as demais combinações que utilizaram partículas de borracha, com ou sem tratamento, resultaram em um mesmo grupo homogêneo (Figura 88a). Embora a análise de variância indique que o tratamento não surtiu efeito significativo, o teste de Tukey se mostra sensível às pequenas variações de massa específica observadas entre as amostras com e sem tratamento superficial (Figura 87), resultando em dois grupos homogêneos de resultados (Figura 88c). Da mesma forma como indicado pela ANOVA, a idade de ensaio teve pouco efeito sobre a massa específica, sendo que o teste de Tukey indica a formação de um mesmo grupo homogêneo para os resultados aos 7 e 28 dias (Figura 88b).

Tabela 22: Análise da variância aplicada aos resultados de massa específica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
% Borracha	12124	5	2425	2,361	15	0,000000
Idade	1718	2	859	3,143	5	0,006862
Tratamento	356	1	356	3,993	2	0,140002
Error	10027	63	159			

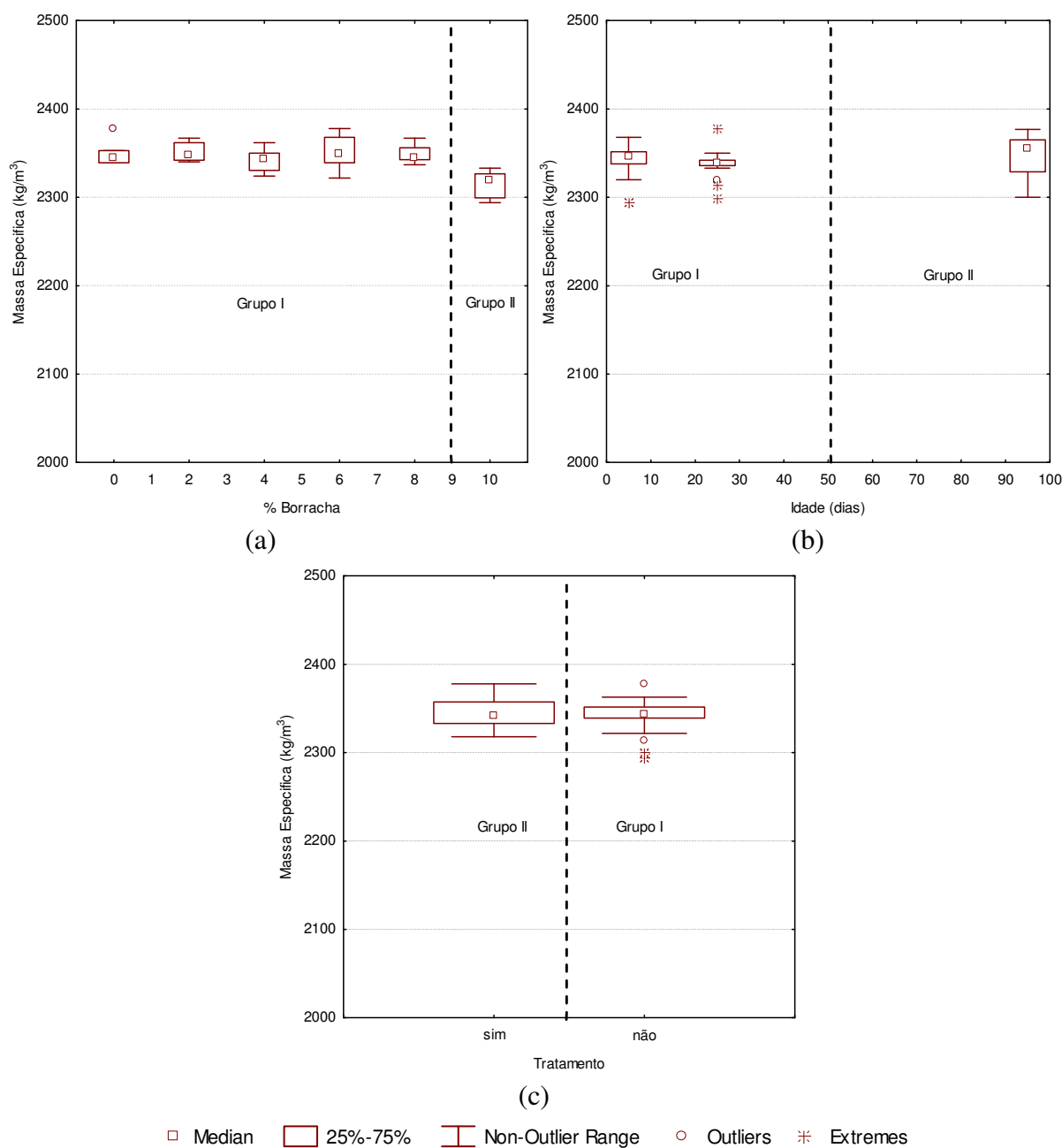


Figura 88: Agrupamento de resultados homogêneos da massa específica do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do teor de borracha, (b) da idade de ensaio e (c) do tratamento superficial.

7.9. ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS DA ETAPA 2

Com base nos resultados obtidos buscou-se identificar um teor ótimo de utilização da borracha de pneu, entre 2% e 10% de substituição do volume de areia, considerando a expectativa de que o concreto gerado apresentasse, em relação ao concreto de referência:

- resistência à compressão maior ou equivalente;
- módulo de elasticidade menor;
- maior resistência à tração;
- maior tenacidade;
- grau de permeabilidade menor ou equivalente;
- otimização do aproveitamento dos resíduos de pneus inservíveis.

As análises de variância indicaram que as variáveis *teor de borracha* e *tratamento* resultaram em pouca ou nenhuma influência sobre as propriedades estudadas (também apresentadas por ALBUQUERQUE *et al.*, 2008c). A discussão a seguir buscou identificar uma composição ótima, ou seja, que melhor atendesse aos requisitos acima, para utilização na terceira fase da pesquisa.

7.9.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Diversos pesquisadores têm mostrado que a resistência à compressão do concreto com borracha cai drasticamente com o aumento do teor de borracha de pneu, em comparação a dosagens sem borracha (ELDIN e SENOUCI, 1993a; TOPÇU, 1997; TURATSINZE *et al.*, 2003). Manter os níveis de resistência é importante a fim de evitar o aumento no consumo de cimento e, conseqüentemente, do custo do produto final. Além disso, com relação ao concreto-massa, teores mais elevados de cimento implicam em maior geração de calor durante as reações de hidratação e, conseqüentemente, resultam em um maior risco de fissuração.

Na Figura 89 têm-se os valores médios relativos da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto na idade de 91 dias. Observa-se que os valores de resistência à compressão oscilam de 5% a 20% acima do valor do concreto de referência, confirmando os resultados observados na fase 1 (com exceção do teor de 10% - Figura 65), sem que haja a interferência do teor de ar aprisionado, uma vez que, nesta segunda fase, esse fator foi controlado.

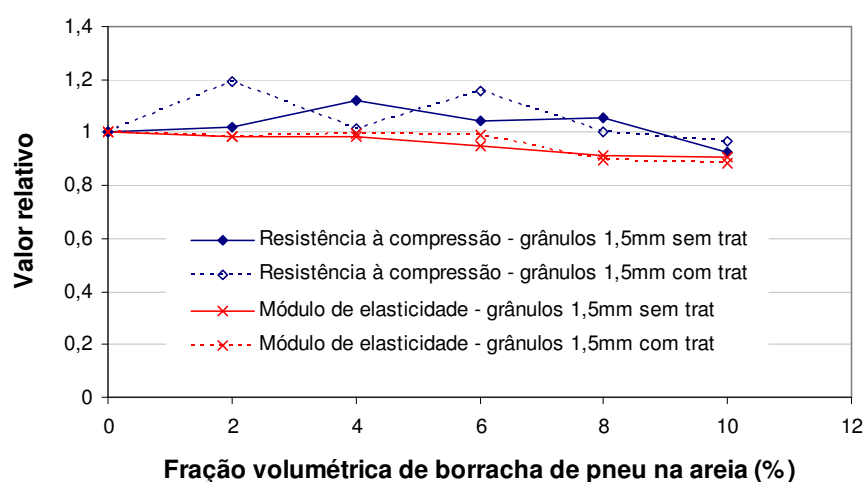


Figura 89: Resistência à compressão e módulo de elasticidade relativo das diversas dosagens de CBP em relação à referência.

Em geral, a redução da resistência à compressão é acompanhada pela redução do módulo de elasticidade do concreto, resultado que, por sua vez, pode ser uma característica desejável em estruturas que requerem maior tenacidade e capacidade de deformação, como é o caso do concreto massa. Na Figura 89 observa-se que, assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade não sofre grande variação com o aumento do teor de borracha de pneu, apresentando um comportamento praticamente linear, com uma leve tendência de redução. Essa redução, porém, não ultrapassa 10%, mesmo no caso da dosagem com maior teor de borracha.

Tomando como base o modelo apresentado por Khatib e Bayomy (1999) (Equação 3 no item 4.3.1) para simular a redução na resistência e adequando para os resultados obtidos nas etapas 1 e 2 desta pesquisa, foi possível determinar os parâmetros da função por meio de uma análise de regressão não-linear, com um ajuste do modelo aos dados obtidos nesta pesquisa. Na Figura 90 estão representados os dados experimentais e a curva obtida pela aplicação da função proposta (Equação 24):

$$SRF = 1 + b \times (R)^m \quad (\text{Equação 24})$$

Onde, *SRF* (*strength reduction factor*) = relação entre a resistência do concreto com borracha e a do concreto de controle;

R = fração volumétrica de borracha de pneu em relação à areia;

b e *m* são parâmetros determinados para o concreto independente da idade de ensaio.

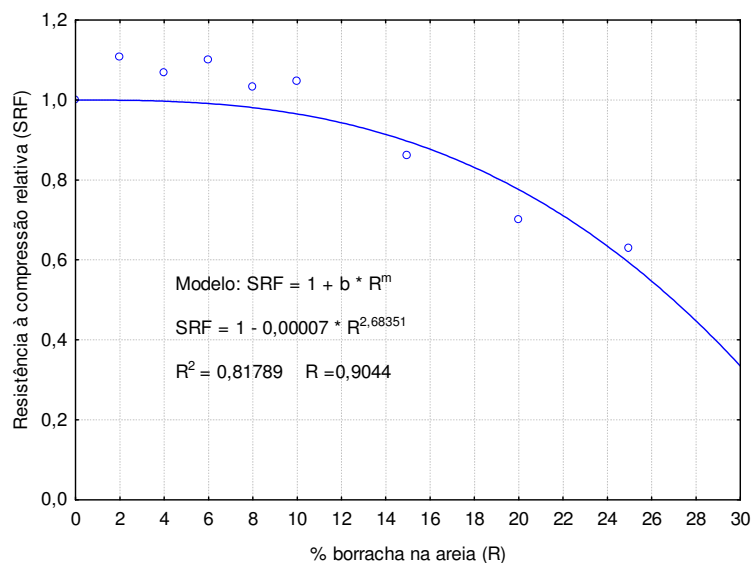


Figura 90: Resistência à compressão relativa em função do volume de borracha na areia, comparada ao modelo proposto na Equação 24.

No exemplo da Figura 90 foram usados os valores médios obtidos do concreto contendo partículas de pneu na forma de grânulos nas idades de 7, 28 e 91 dias. Os parâmetros b e m devem ser definidos para cada tipo de partícula de pneu e para cada granulometria, tendo em vista a forte influência dessas variáveis no comportamento da resistência.

7.9.2. Resistência à tração

Na Figura 91 encontram-se os resultados médios relativos³ da resistência à tração determinada por diferentes métodos. Observa-se que, à medida que se aumenta o teor de borracha, os valores oscilam em torno daquele obtido para o concreto de referência, apresentando ganhos e perdas de resistência de até 20%. Verifica-se, ainda, que os resultados obtidos por meio do ensaio de tração simples se mostram mais estáveis, o que evidencia a tendência de obtenção de um melhor desempenho nas amostras contendo partículas de pneu tratadas. A alta variabilidade dos resultados, entretanto, termina por determinar que, estatisticamente, os mesmos se mantenham num mesmo grupo homogêneo, como foi visto nos itens 7.3, 7.4 e 7.5, fazendo com que o tratamento não gere diferença estatisticamente significativa.

³ Foi tomada como referência a resistência à tração das amostras de concreto sem adição de borracha.

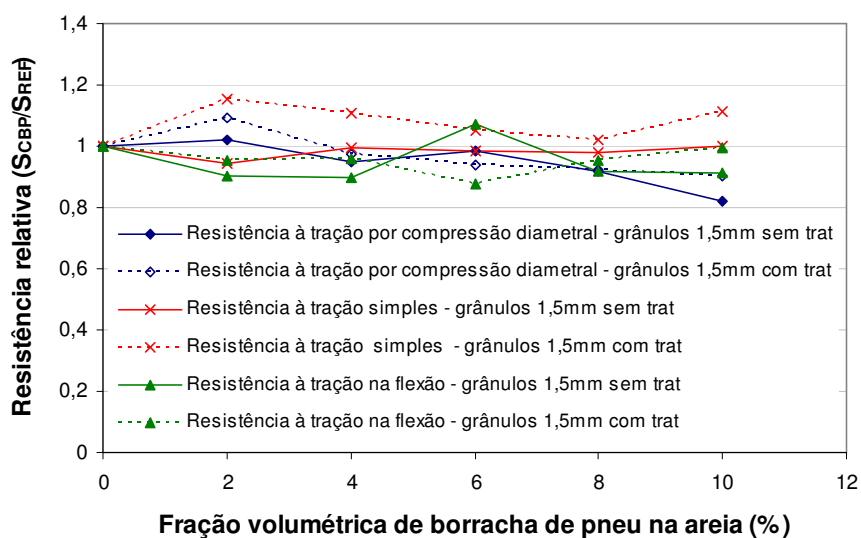


Figura 91: Resistência à tração relativa das diversas dosagens de CBP em relação à referência.

O mesmo modelo (Equação 24) usado para a resistência à compressão pode ser aplicado à resistência à tração por compressão diametral, com melhor correlação entre a resistência relativa (SRF) e o teor volumétrico de borracha (vide Figura 92).

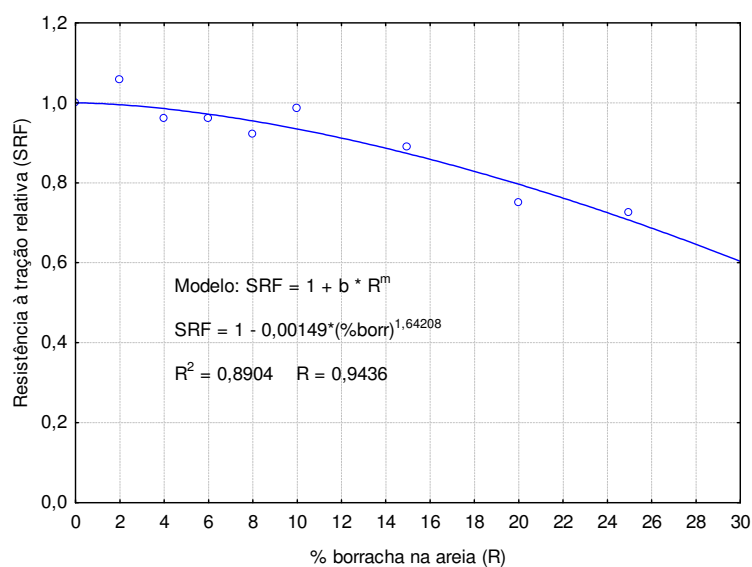


Figura 92: Resistência à tração relativa em função do volume de borracha na areia, comparada ao modelo proposto na Equação 24.

Segundo a NBR 6118 (ABNT 2003), a resistência à tração direta do concreto pode ser estimada por meio das equações a seguir, as quais também podem ser usadas para idades diferentes de 28 dias, se o f_{ck} desejado for superior a 7 MPa, como é o caso dos resultados obtidos nesta pesquisa.

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (\text{Equação 24})$$

$$f_{ct} = 0,7 f_{ct,f} \text{ ou, na falta de ensaios para obtenção de } f_{ct,sp} \text{ e } f_{ct,f} \quad (\text{Equação 25})$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Equação 26})$$

onde:

f_{ct} = resistência do concreto à tração direta, em MPa;

$f_{ct,m}$ = resistência média do concreto à tração direta, em MPa;

$f_{ct,f}$ = resistência do concreto à tração na flexão, em MPa;

$f_{ct,sp}$ = resistência do concreto à tração indireta, em MPa;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Na figura 93 estão apresentadas as curvas de regressão não linear realizadas com a finalidade de avaliar a aderência dos resultados de resistência à tração dos concretos com borracha de pneu às equações preconizadas pela norma NBR 6118. Verifica-se, analisando as mesmas, que a equação prescrita pela norma NBR 6118, em todos os casos, superestima os valores de resistência à tração direta. Em contrapartida, as equações obtidas pelas regressões não lineares oferecem uma boa aproximação com os resultados efetivamente obtidos.

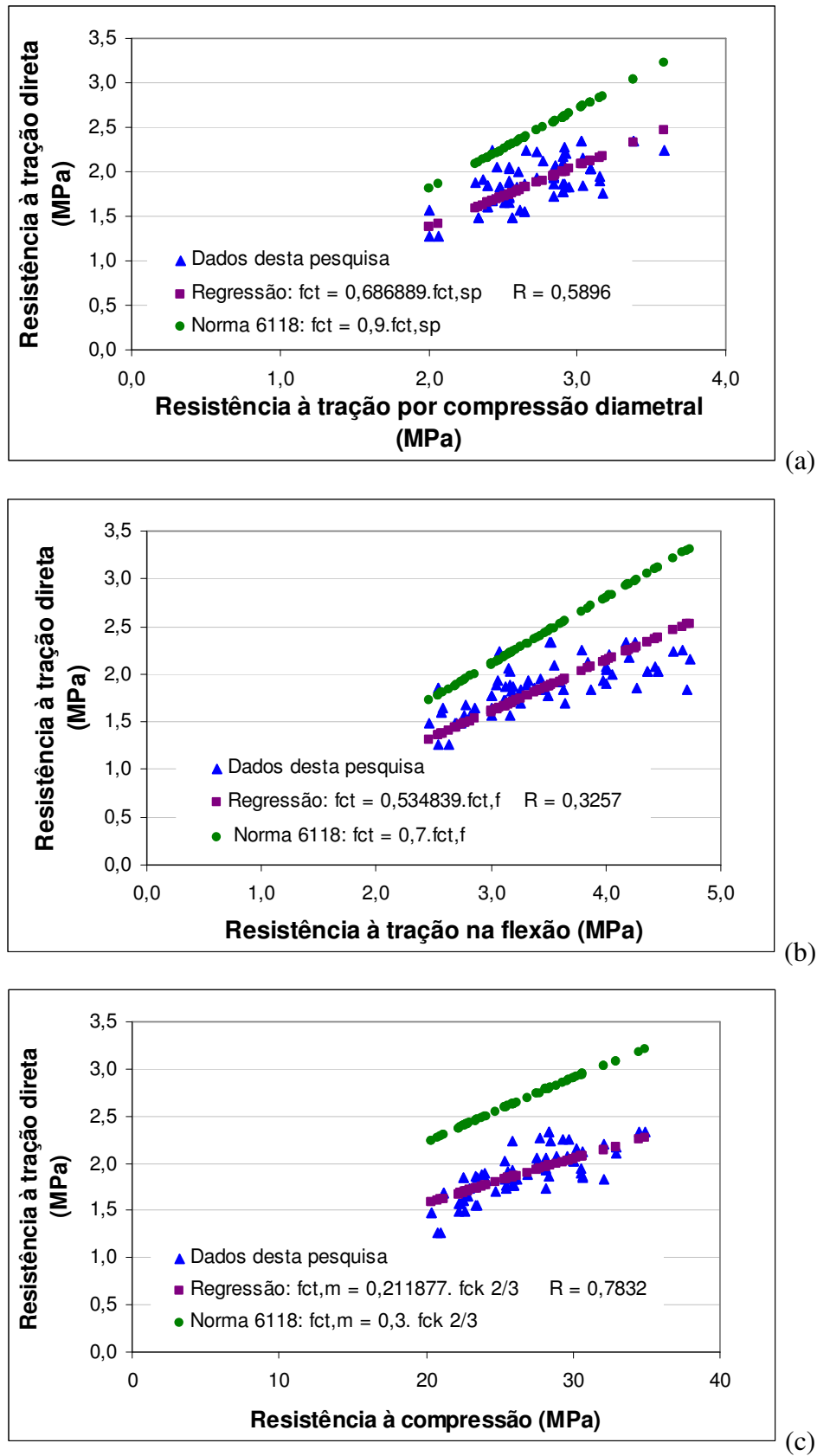


Figura 93: Resistência à tração direta do concreto com borracha de pneu em função: (a) da resistência à tração por compressão diametral; (b) da resistência à tração na flexão; e (c) da resistência à compressão axial.

7.9.3. Tenacidade

A análise de variância e o teste de Tukey indicaram que os valores de tenacidade do concreto com borracha de pneu (CBP) são equivalentes aos registrados para o concreto de referência, independentemente do teor e do tratamento das partículas de pneu.

A fim de avaliar a tenacidade das amostras, em termos de comportamento sob carga, foram analisadas as curvas força x deflexão, obtidas a partir dos ensaios de tenacidade do concreto. Essas curvas estão ilustradas nas Figuras 94 e 95, organizadas em função do tratamento superficial e do teor de borracha, na idade de 91 dias, para as amostras de concreto contendo partículas de pneu sem e com tratamento superficial, respectivamente. Devido a problemas técnicos no software do equipamento de ensaio, não foi possível plotar as curvas das amostras de concreto com 6% de partículas de borracha tratadas. A identificação e a descrição das amostras ensaiadas encontram-se apresentadas na Tabela 23.

Observa-se que o comportamento das curvas carga-deflexão apresenta pequenas variações com o aumento do teor de borracha e com o tratamento superficial, mas não se percebe um comportamento padrão. As amostras CBP8%T e CBP8%N, por exemplo, ora apresentam comportamento semelhante ao concreto de referência e ora se afastam deste padrão.

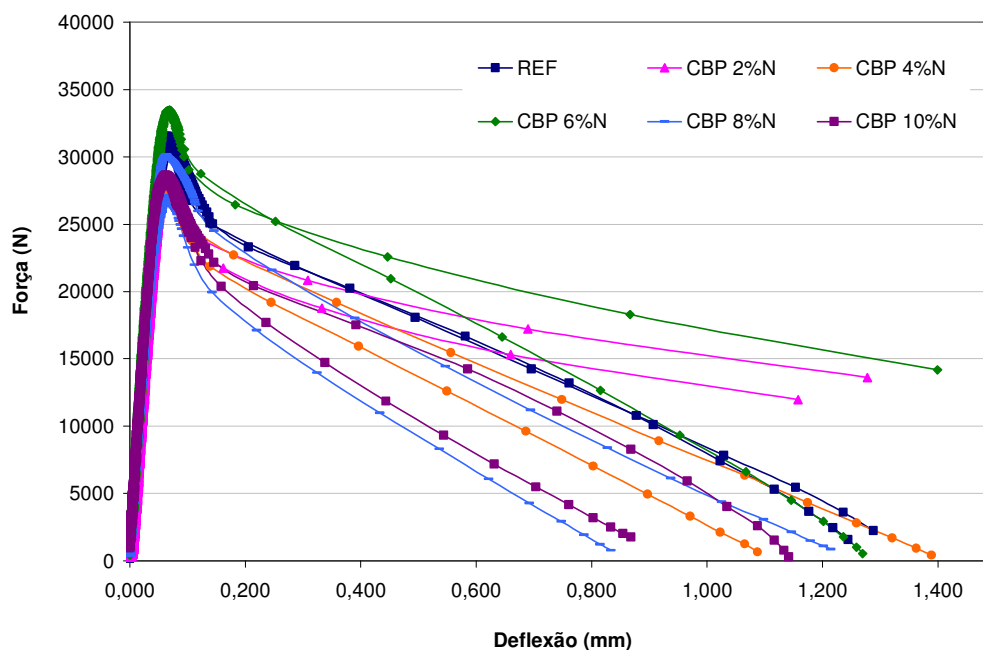


Figura 94: Curvas de tenacidade em função do teor da borracha na idade de 91 dias para amostras de concreto contendo partículas de pneu de 1,5 mm sem tratamento superficial.

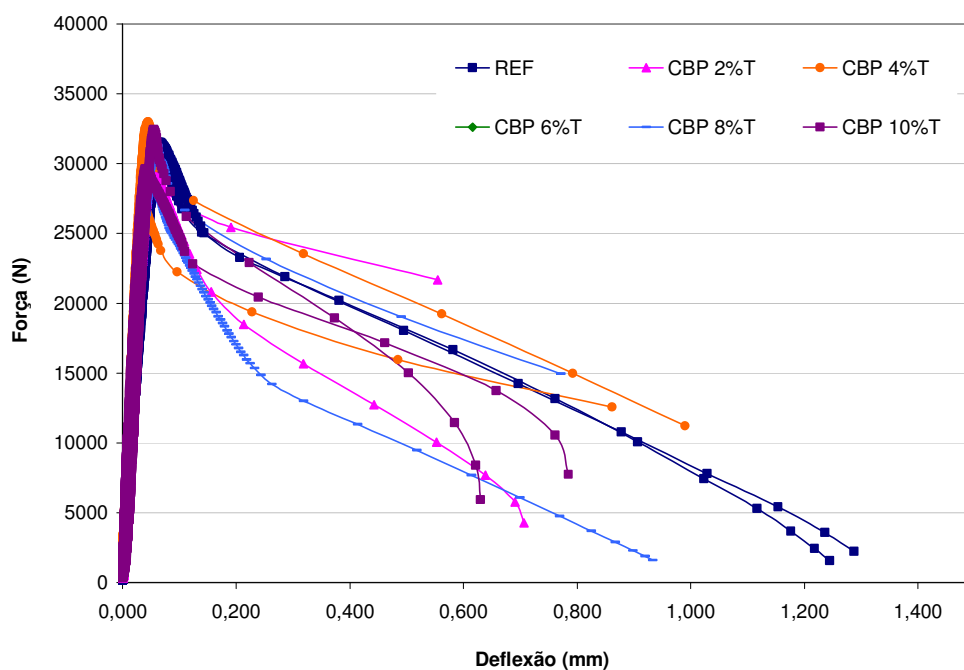


Figura 95: Curvas de tenacidade em função do teor da borracha na idade de 91 dias para amostras de concreto contendo partículas de pneu de 1,5 mm com tratamento superficial.

Tabela 23: Identificação e descrição das amostras testadas na segunda fase da pesquisa.

Código	Granulometria da borracha	Tratamento	% Borracha
REF	Sem borracha	---	0
CBP2%N	1,5 mm (grânulos)	Sem tratamento	2
CBP2%T	1,5 mm (grânulos)	Tratada com polímero de base acrílica	2
CBP4%N	1,5 mm (grânulos)	Sem tratamento	4
CBP4%T	1,5 mm (grânulos)	Tratada com polímero de base acrílica	4
CBP6%N	1,5 mm (grânulos)	Sem tratamento	6
CBP6%T	1,5 mm (grânulos)	Tratada com polímero de base acrílica	6
CBP8%N	1,5 mm (grânulos)	Sem tratamento	8
CBP8%T	1,5 mm (grânulos)	Tratada com polímero de base acrílica	8
CBP10%N	1,5 mm (grânulos)	Sem tratamento	10
CBP10%T	1,5 mm (grânulos)	Tratada com polímero de base acrílica	10

Analisando a literatura, em busca de confirmação desta tendência de comportamento, verifica-se que, somente em estudos conduzidos com teores de substituição acima de 30%, foi possível observar um aumento substancial da tenacidade e da ductilidade, porém com elevada perda de resistência à compressão e à tração (LI *et al.*, 1998; TOUTANJI, 1996). Na faixa de substituição estudada nesta pesquisa, porém, não foram registrados aumentos consideráveis da tenacidade do concreto ou de sua ductilidade. Em contrapartida, a resistência mecânica, como no presente caso, também foi pouco afetada.

7.9.4. Massa específica e permeabilidade

Tomando como base os resultados da etapa I deste trabalho, era esperado que, nesta etapa, também ocorresse alguma redução da massa específica do concreto com o aumento do teor de borracha incorporado. Esse comportamento seria explicado pela menor massa específica da borracha de pneu em relação à massa específica da areia e à tendência de maior incorporação de ar com o aumento do teor de borracha.

Nesta segunda fase do trabalho decidiu-se, para isolar os efeitos, controlar o teor de ar incorporado nos concretos. Para tanto, variou-se a quantidade de aditivo incorporador utilizada, sendo a mesma inversamente proporcional ao teor de borracha de pneu, como se observa nas tabelas do Apêndice C. Desta forma, qualquer variação observada na massa específica pode ser atribuída exclusivamente à diferença entre as massas especificadas da borracha e da areia. Nestas condições, verificou-se que somente as dosagens com 10% de borracha de pneu apresentam massas específicas significativamente inferiores às da dosagem de controle.

Por outro lado, todas as dosagens estudadas apresentaram valores de permeabilidade à água sob pressão da ordem de 10^{-12} m/s a 10^{-13} m/s, valores considerados adequados para o concreto massa (FURNAS, 1997). Além disto, todas as dosagens de concreto com borracha apresentaram menor permeabilidade à água sob pressão (10^{-13} m/s) do que a dosagem de controle (10^{-12} m/s), evidenciando um ganho de desempenho importante. Albuquerque *et al.* (2005) justificam este comportamento com a hipótese de que os poros dos concretos com borracha de pneu sejam menos interconectados ou menores que os do concreto de controle, devido à presença de partículas de borracha, que aumentam a tortuosidade, o que necessita ser confirmado por ensaios específicos. Independentemente da explicação, todavia, este estudo indica que a incorporação de partículas de borracha não afeta negativamente a permeabilidade do concreto.

7.9.5. Conclusões Gerais da Etapa 2

Analisando o conjunto de resultados apresentados nos itens anteriores, constata-se que, dentro da faixa de substituição de borracha adotada nesta etapa (até 10%), os valores das propriedades estudadas não sofrem aumento ou redução significativa, em relação aos registrados nas amostras de concreto de referência. Dessa forma, o teor ótimo de substituição pode ser escolhido em função do maior aproveitamento das partículas de pneu, ou seja, 10%. Alguns ensaios indicam que este pode ser um teor limite para que a presença da borracha não altere significativamente as características do concreto.

Quanto ao tratamento superficial com polímero de base acrílica, verifica-se que o mesmo não afeta significativamente as propriedades analisadas, o que parece indicar que a realização deste tipo de tratamento não se justifica.

Buscando avaliar a eficácia do tratamento superficial aplicado às partículas de borracha, algumas medidas das distâncias na interface agregado/pasta de cimento e borracha/pasta de cimento foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura. Constatou-se que as distâncias variavam entre $1\mu\text{m}$ e $8\mu\text{m}$, tanto na interface pasta/agregado como na interface da pasta com partículas de borracha com ou sem tratamento superficial. Nas Figuras 96 a 98 são exibidos exemplos dessa análise. Com base nessas observações, concluiu-se que a interface pasta/agregado não se altera de forma considerável quando o agregado natural é substituído pela borracha de pneu, ou mesmo pela borracha tratada superficialmente. Levanta-se a hipótese de que os sinais de problemas de aderência observados sejam, na verdade, resultado do esforço suportado pelo material e da conseqüente propagação de fissuras. Na Figura 97(b) o desenho da superfície da partícula na pasta de cimento e das fissuras em torno parecem evidenciar que descolamentos deste tipo efetivamente acontecem.

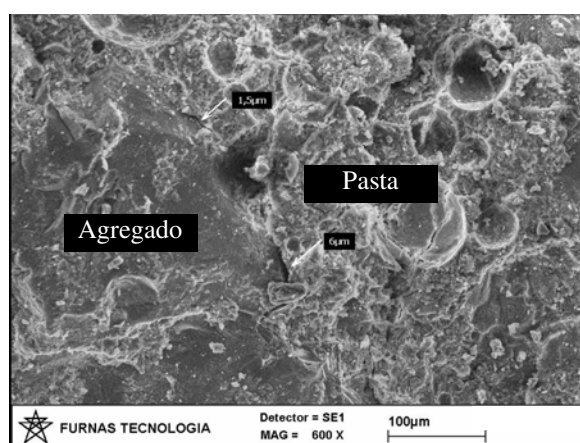


Figura 96: Região de interface pasta/agregado natural.

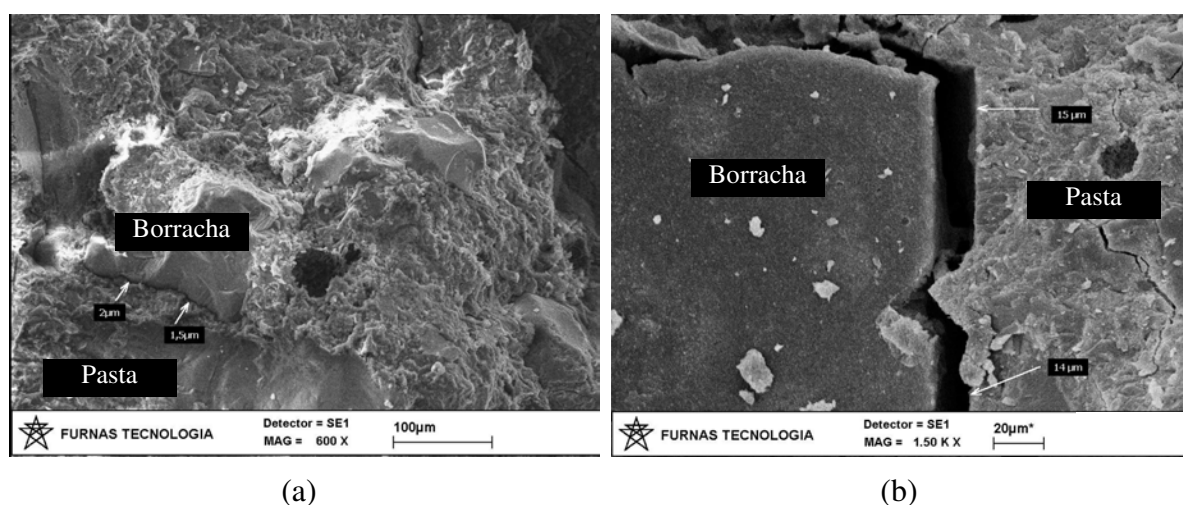


Figura 97: Região de interface pasta/partícula de pneu sem tratamento superficial.

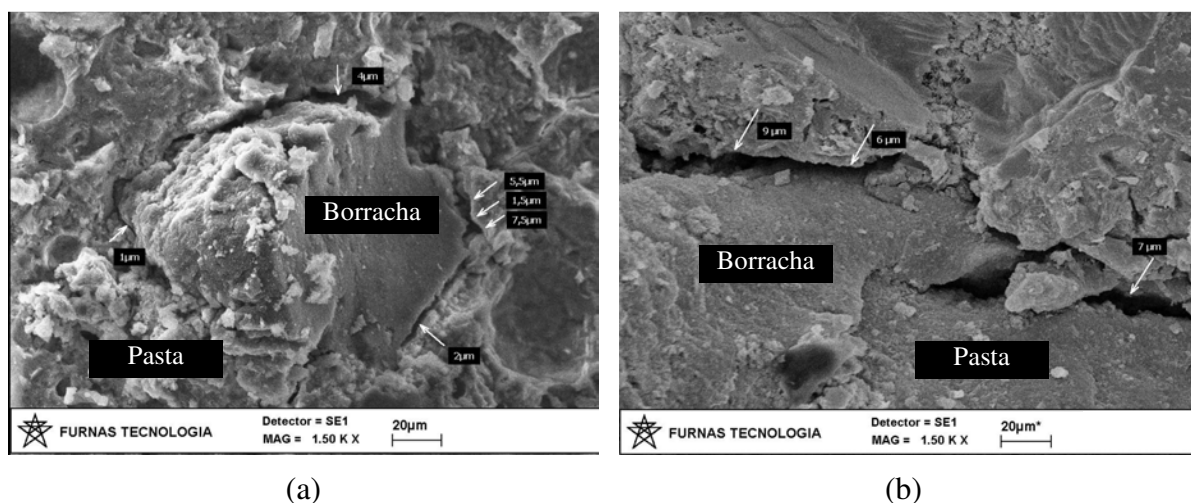


Figura 98: Região de interface pasta/partícula de pneu com tratamento superficial.

Algumas micrografias foram registradas por Wang *et al.* (2005) buscando avaliar o efeito da adição de polímeros de revestimento nas partículas de borracha. Nas figuras 99 e 100 observam-se superfícies de fratura de argamassas modificadas com polímero e analisadas ao microscópio eletrônico de varredura. As micrografias exibem filmes poliméricos que penetram na fase inorgânica da matriz cimentícia, o que propicia a alteração das propriedades mecânicas e elásticas do compósito.

Nesta pesquisa, o teor de polímero utilizado nas amostras analisadas foi de, aproximadamente, 9,3%, em relação à massa de cimento. A análise das superfícies de fratura por meio de microscopia eletrônica de varredura não revelou a formação de filmes poliméricos ou mesmo a nucleação desses. Era esperado que pelo menos localmente, em torno das partículas de pneu, houvesse certa interação na região de interface, uma vez que a concentração local de polímero seria maior. A ausência do filme polimérico pode explicar a ineficácia do tratamento superficial em melhorar a resistência à tração do concreto. Tal fato pode ser explicado pela solubilização do polímero na água e posterior dispersão na mistura.

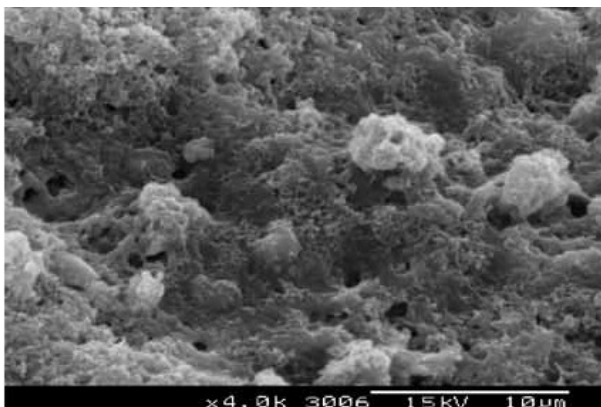


Figura 99: Argamassa modificada com 5% de polímero estireno-butadieno em relação à massa de cimento. Formação de filme polimérico. (WANG *et al.*, 2005).

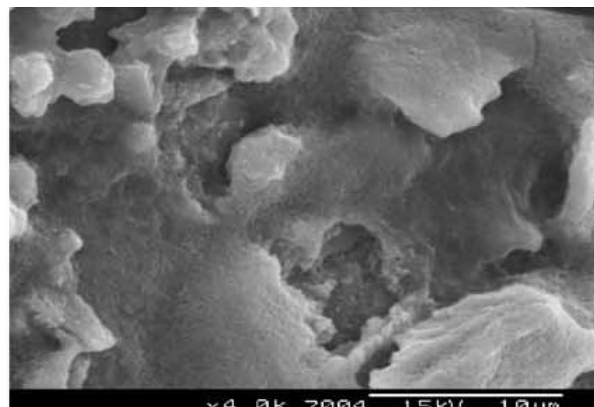


Figura 100: Argamassa modificada com 20% de polímero estireno-butadieno em relação à massa de cimento. Filme polimérico interconectado à matriz cimentícia. (WANG *et al.*, 2005).

Na terceira etapa, com base nos resultados das etapas anteriores, o foco do trabalho foi voltado para a caracterização das propriedades térmicas, mecânicas, do comportamento termomecânico e das propriedades referentes à durabilidade das misturas contendo 10% de partículas de pneu, sem tratamento superficial, em substituição à areia.

8. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS - ETAPA 3

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados na terceira e última fase do programa experimental. Esta fase foi destinada à avaliação do desempenho do concreto com borracha de pneu quanto às características térmicas e viscoelásticas, bem como quanto a certas características associadas à durabilidade, em relação a um concreto de referência, com vistas à aplicação em estruturas massivas. Por se tratar de uma etapa que envolveu ensaios de longa duração e de elevado custo financeiro, o número de variáveis foi reduzido.

Nesta fase as principais variáveis avaliadas foram a granulometria e a idade de ensaio. Empregaram-se partículas na forma de grânulos, com $D_{máx}$ de 1,5 mm, e na forma de fibras, com fator de forma igual a 10 (classificação granulométrica semelhante à areia grossa – $D_{máx}$ 4,8 mm). As partículas foram empregadas em substituição a 10% do volume de areia e na condição *sem tratamento superficial*, tendo em vista as conclusões derivadas das fases anteriores da pesquisa, expostas nos capítulos 6 e 7. Isto resultou em três dosagens: REF - dosagem de referência, sem borracha; GRÂNULO - dosagem com 10% borracha em grânulos sem tratamento; FIBRAS - dosagem com 10% borracha em raspa/fibras sem tratamento.

A fim de subsidiar a análise termomecânica dos concretos com borracha de pneu em relação ao concreto de referência, foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, capacidade de deformação sob carregamento rápido, fluência, variação autógena, coeficiente de dilatação térmica, condutividade térmica, difusividade, calor específico e elevação adiabática da temperatura. Para avaliação das características referentes à durabilidade do concreto com borracha de pneu foram realizados ensaios de permeabilidade, absorção, massa específica e índice de vazios, além da resistência à compressão e módulo de elasticidade, nas idades de 364 e 728 dias.

Foram testadas duas amostras por idade de ensaio, totalizando 128 corpos-de-prova. Todos os resultados individuais encontram-se no APÊNDICE D.

8.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Figura 101 o gráfico ilustra o comportamento da resistência à compressão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu. Verifica-se que as dosagens contendo partículas de pneu resultaram em valores de resistência à compressão aproximadamente 15% inferiores ao registrado no concreto de referência, o que foi inesperado, uma vez que nas fases 1 e 2 do programa experimental, as dosagens com esse teor de borracha apresentaram resistências equivalentes às amostras de referência (ver figuras 39 e 75).

Observa-se, ainda, na Figura 101, um desenvolvimento normal da resistência à compressão até a idade de 91 dias, como era esperado. Nas idades de 364 dias e 728 dias, as resistências deveriam se manter aproximadamente iguais às registradas aos 91 dias. Entretanto, verificou-se uma redução na resistência à compressão dos corpos-de-prova rompidos aos 728 dias. Tal comportamento se manifestou com intensidade semelhante para todas as dosagens, inclusive para o concreto de controle, o que afasta a possibilidade de que o mesmo esteja associado à presença das partículas de borracha. Após uma revisão das condições de armazenagem dos corpos-de-prova, esse comportamento foi atribuído ao aumento do índice de vazios, como foi constatado no item 8.13.4, devido à manutenção em ambiente com alto teor de umidade.

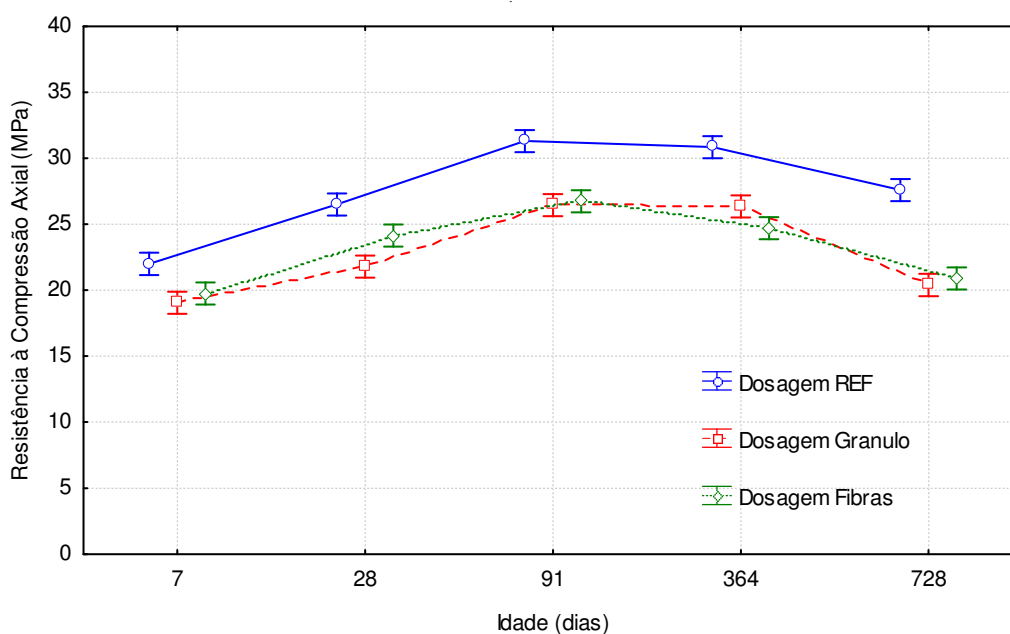


Figura 101: Resistência à compressão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

Na Tabela 24 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada aos valores de resistência à compressão. A análise indica que ambas as variáveis testadas influenciaram significativamente os resultados de resistência à compressão, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelo teste de Tukey.

Tabela 24: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à compressão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	143,26	2	71,63	3,134	59,45	0,000000
Idade	249,93	4	62,48	2,509	51,86	0,000000
Error	27,71	23	1,20			

O teste de Tukey mostra que as dosagens contendo grânulos ou fibras de pneu apresentaram valores de resistência à compressão equivalentes entre si e inferiores aos valores registrados para o concreto de referência (Figura 102a). O teste indicou, ainda, que a idade de ensaio também influencia de forma significativa a resistência à compressão (Figura 102b). Como esperado, os resultados aos 91 e 364 dias formam um mesmo grupo homogêneo, superior aos de idades mais baixas. O problema ocorre com os resultados obtidos aos 728 dias, que são estatisticamente equivalentes aos registrados aos 28 dias.

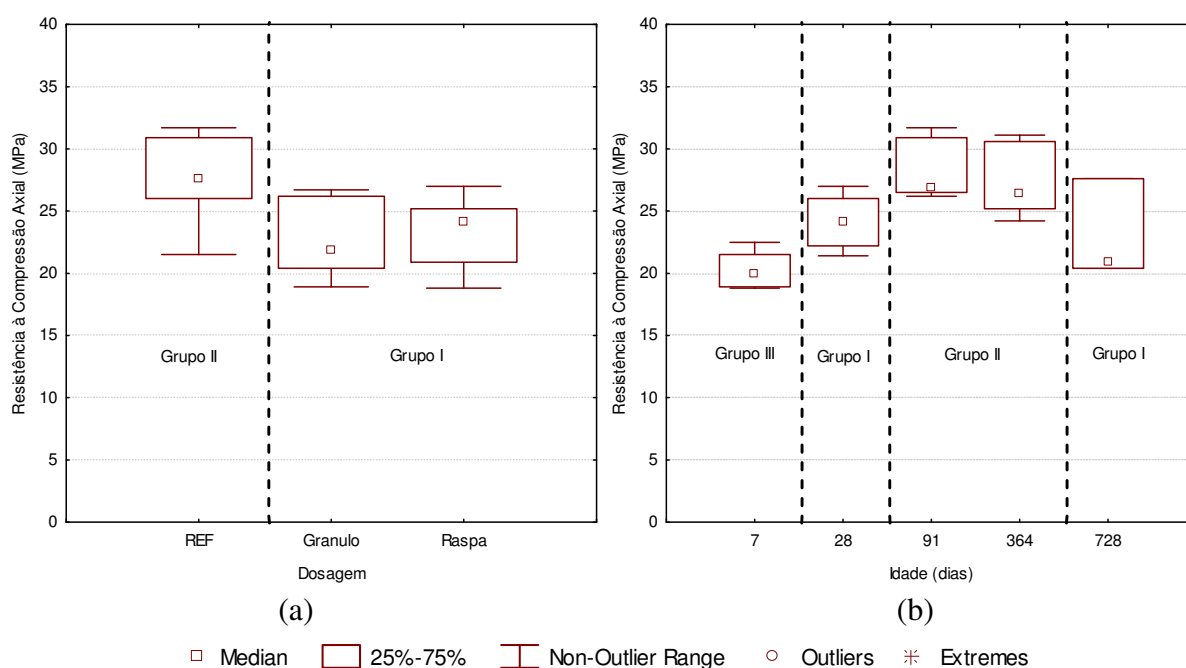


Figura 102: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à compressão do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio

8.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Figura 103 o gráfico ilustra o comportamento do módulo de elasticidade do concreto em função das variáveis estudadas. Observa-se o crescimento no valor desta propriedade até a idade de 91 dias, como esperado. Nas idades de 364 dias e 728 dias os valores deveriam se manter próximos aos medidos aos 91 dias. Entretanto, houve um crescimento inusitado na idade de 364 dias. Tal comportamento se manifestou em todas as dosagens, inclusive na de concreto de controle, e foi ser atribuído ao uso do extensômetro mecânico nesta idade, ao invés do elétrico, o qual foi usado nas demais idades de ensaio (ver comentário ao item 6.2).

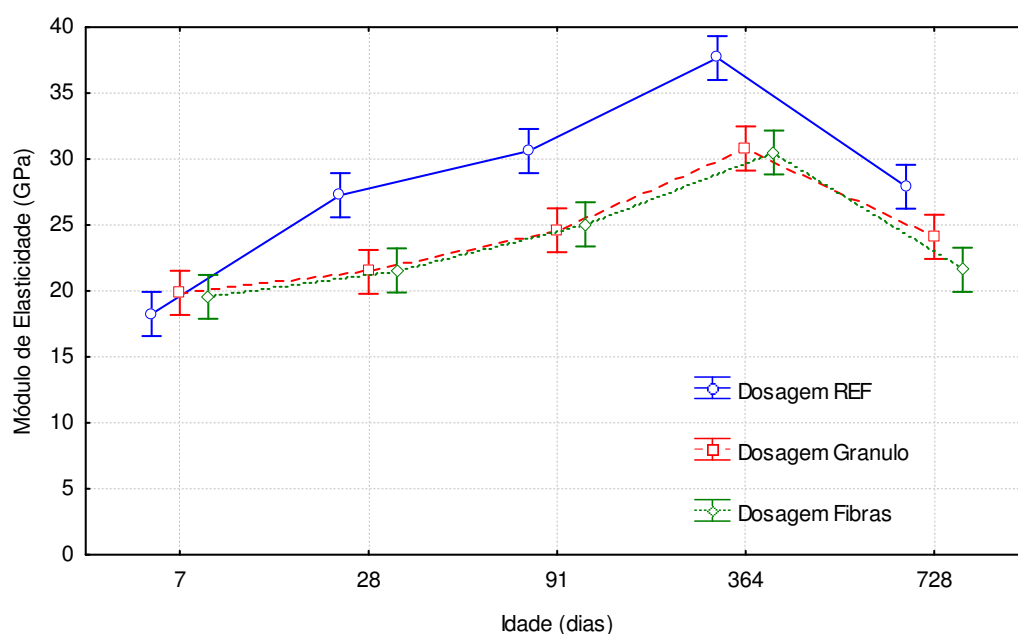


Figura 103: Módulo de elasticidade em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

De fato, como a borracha possui um módulo de elasticidade muito menor, a mesma traz para o compósito a capacidade de trabalhar e atingir maiores deformações sob carga. Num concreto convencional, o agregado é um dos principais elementos que restringem as deformações. A substituição parcial da areia por partículas de borracha atenua essa restrição, dando ao concreto uma maior deformabilidade. Esse comportamento foi observado por diversos pesquisadores, e se constitui numa característica desejável, uma vez que a maioria das pesquisas que envolvem compósitos de matriz cimentícia com partículas de borracha tem

como objetivo o aumento da capacidade de deformação e da tenacidade do concreto (ELDIN e SENOUCI, 1993b; TOPÇU, 1997; TURATSINZE *et al.*, 2003). Porém, como salienta Neville (1997), o módulo de elasticidade e a resistência à compressão são duas propriedades diretamente ligadas entre si. Assim, a redução do valor do módulo de elasticidade do concreto com borracha pode ser atribuída, em parte, à redução de sua resistência.

Na Tabela 25 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de módulo de elasticidade. A análise indica que as variáveis influenciaram significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelo teste de Tukey. O teste de Tukey mostra que as dosagens contendo grânulos ou fibras de pneu apresentaram módulos de elasticidade equivalentes entre si e inferiores aos do concreto de referência (Figura 104a). O menor valor de $F_{calculado}$, entretanto, denota que o uso das partículas de pneu tem menor interferência nessa propriedade do que a idade. A idade de ensaio atuou de forma significativa e os resultados aos 28, 91 e 728 dias formaram um mesmo grupo homogêneo, enquanto os resultados aos 7 e 364 dias formaram grupos distintos (Figura 104b).

Considerando que os dados aos 364 dias podem ter sido comprometidos pelo método de medida, uma nova análise de variância e um novo teste de agrupamento de médias foram realizados (vide Figura 105). Neste caso, a partir de 28 dias se pode dizer que, estatisticamente, o módulo de elasticidade se mantém constante.

Tabela 25: Análise da variância aplicada aos resultados de módulo de elasticidade.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	131,84	2	65,92	3,134	18,089	0,000019
Idade	613,47	4	153,37	2,509	42,086	0,000000
Error	83,82	23	3,64			

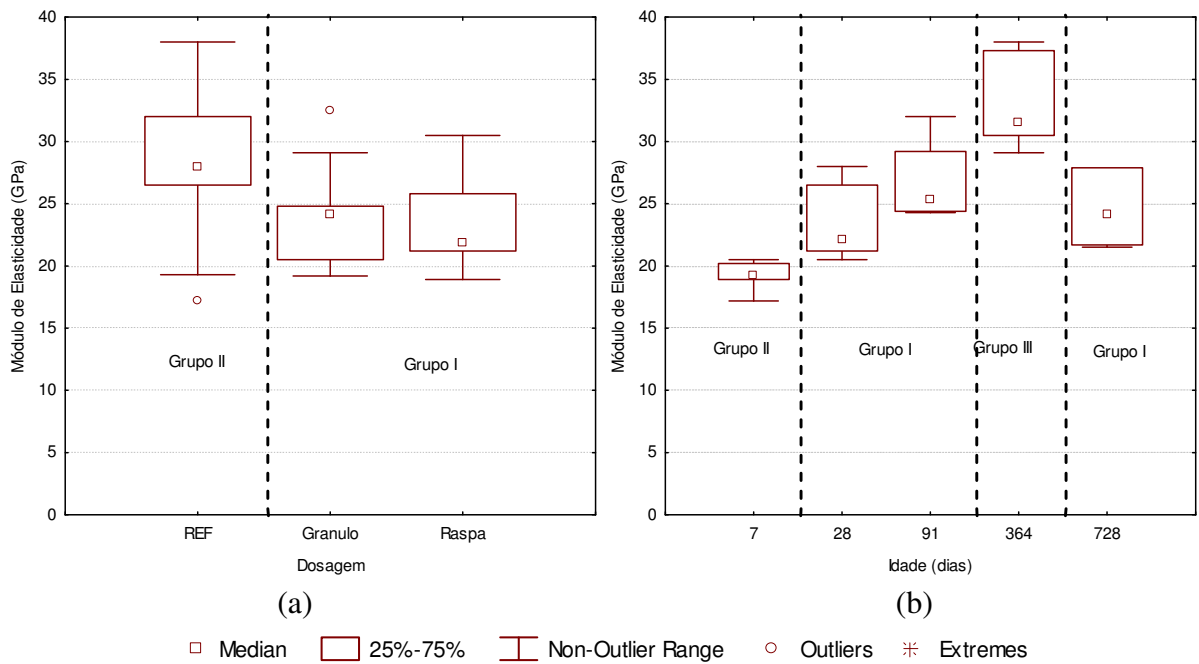


Figura 104: Agrupamento de resultados homogêneos do módulo de elasticidade do concreto, conforme teste de Tukey, em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio

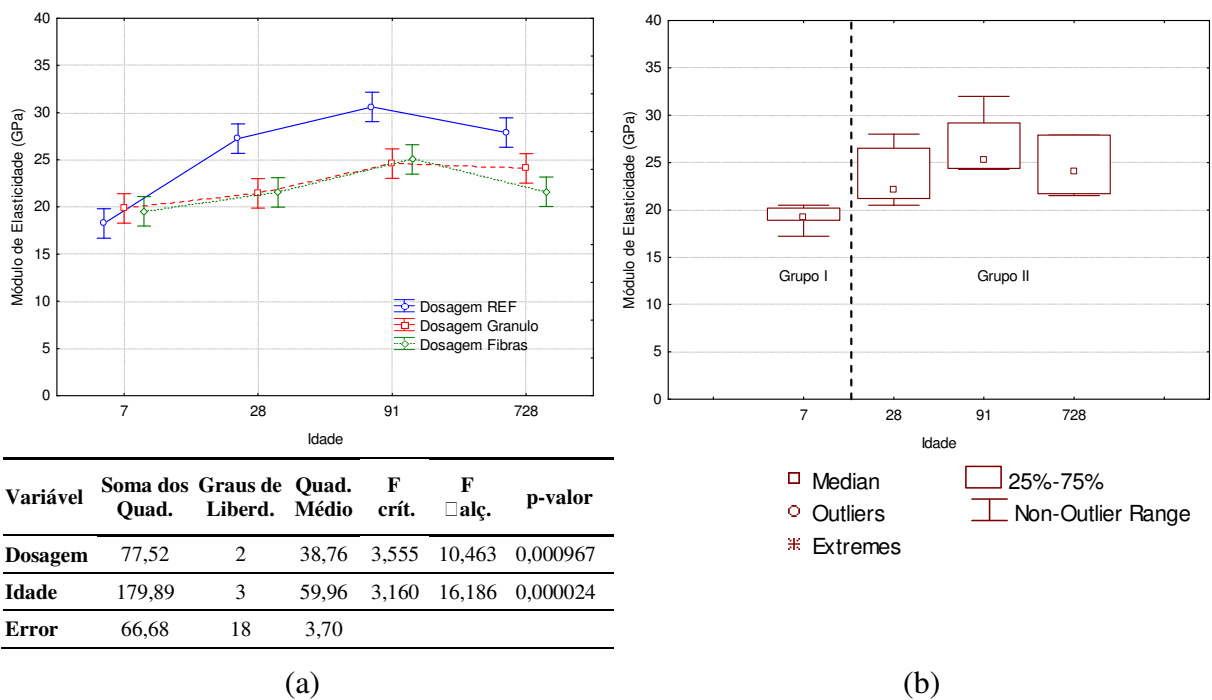


Figura 105: Módulo de Elasticidade (sem os resultados aos 364 dias): (a) Análise de variância e (b) agrupamento de resultados homogêneos conforme teste de Tukey.

8.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

O gráfico da Figura 106 ilustra o comportamento da resistência à tração na flexão do concreto em função do tipo de borracha de pneu e da idade de ensaio. Observa-se que os resultados não sofreram forte variação em função de qualquer uma das variáveis.

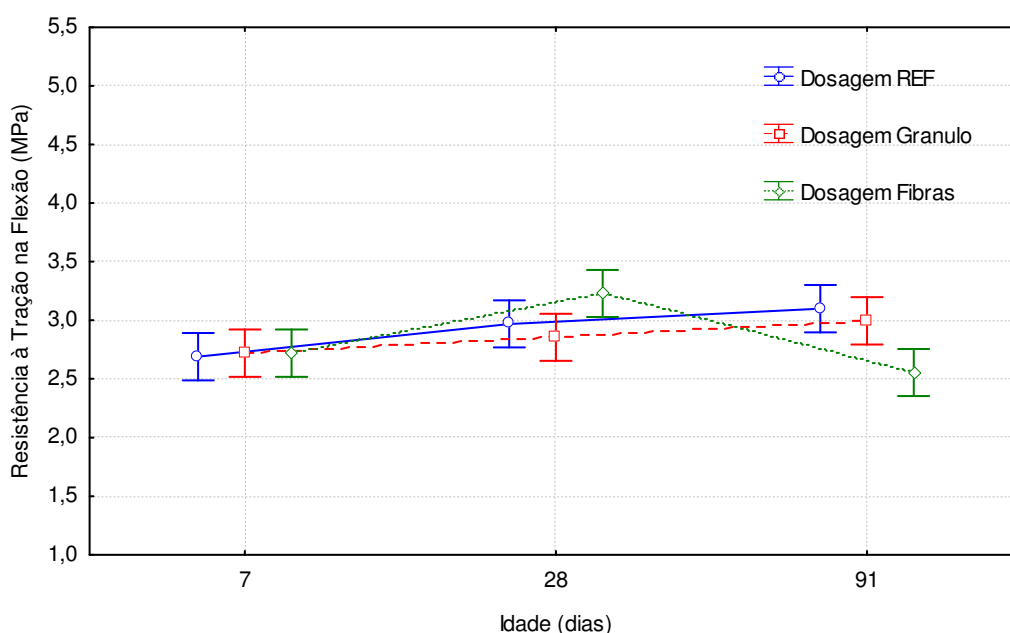


Figura 106: Resistência à tração na flexão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

Na Tabela 26 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de resistência à tração na flexão, obtidos a partir dos ensaios de capacidade de deformação do concreto. A análise indica que as variáveis não influenciaram significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelo teste de Tukey .

Tabela 26: Análise da variância aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,0234	2	0,0117	3,806	0,253	0,780435
Idade	0,2867	2	0,1433	3,806	3,094	0,079588
Error	0,6022	13	0,0463			

Os resultados do teste de Tukey, mostrados nas Figuras 107a e 107b, indicam que as dosagens contendo partículas de pneu apresentaram resistência à tração na flexão equivalente à registrada para o concreto de referência. Ou seja, não há perda de resistência estatisticamente notável com a adição de borracha. Em relação às diferentes idades de ensaio, os resultados também formaram um grupo homogêneo, indicando que a idade não exerce influência estatisticamente notável na resistência à flexão.

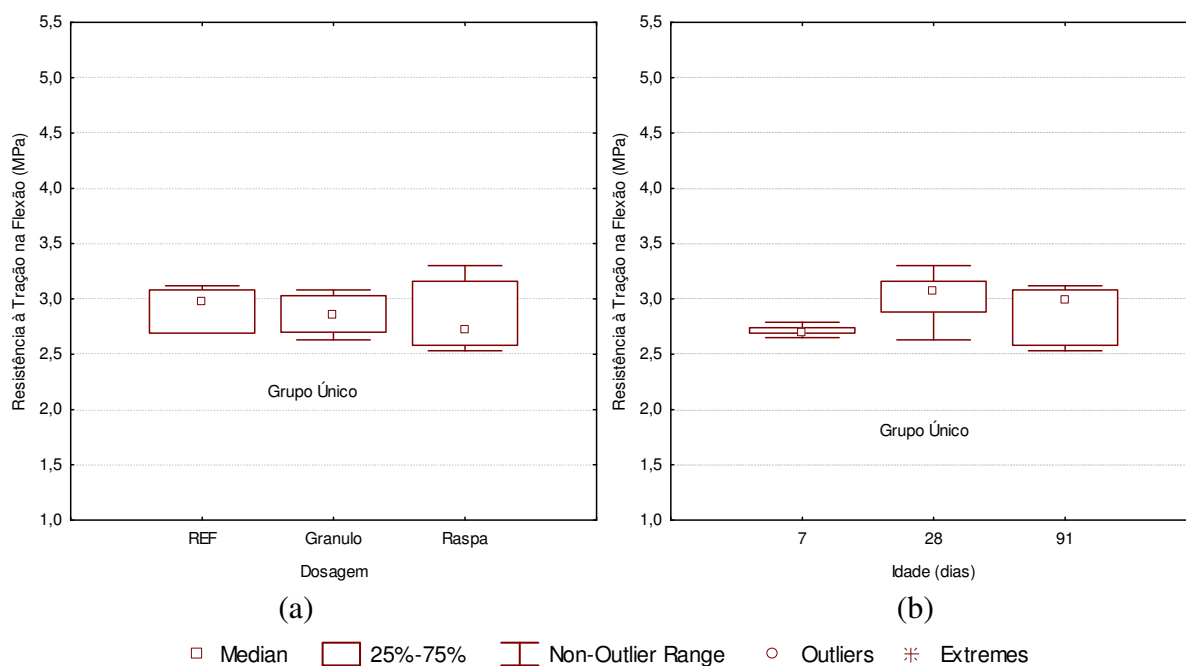


Figura 107: Agrupamento de resultados homogêneos da resistência à tração na flexão, conforme teste de Tukey, em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.4. CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO

A capacidade de deformação representa a deformação linear específica que o concreto pode suportar até a fissuração, quer por solicitação de cargas, quer pela retração térmica ou outros tipos de esforços. As deformações sofridas pelo concreto por diferenciais de temperatura podem induzi-lo à fissuração, se as mesmas ultrapassarem sua capacidade de deformação, quando de seu resfriamento. A capacidade de deformação dividida pelo coeficiente de dilatação térmica representa uma variação de temperatura limitada que o concreto resiste sem fissuras, denominada equivalente de temperatura (FURNAS, 1997).

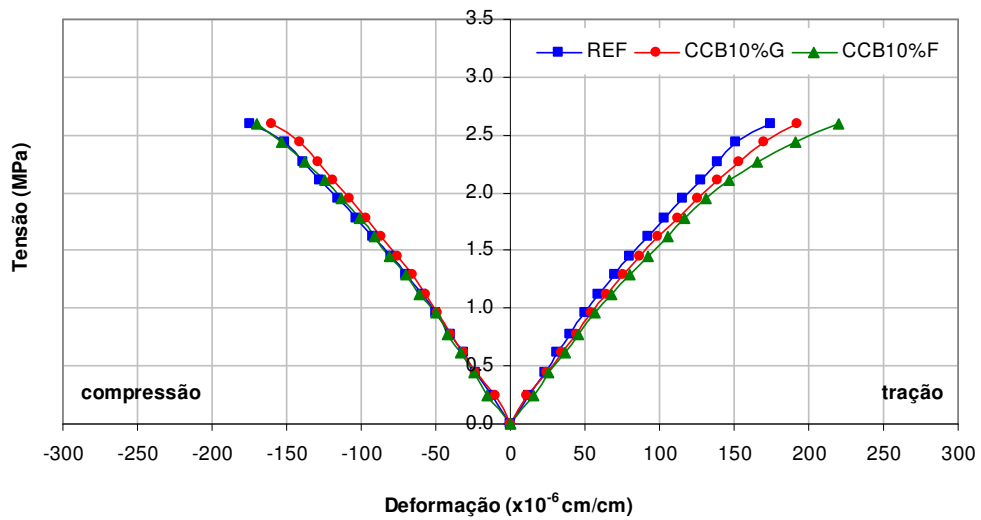
Na Figura 108 estão apresentados gráficos comparativos da capacidade de deformação do concreto durante os ensaios de flexão em quatro pontos. Os gráficos mostram as deformações médias nas faces tracionada e comprimida das vigas nas idades de 7, 28 e 91 dias. Observa-se que, para um mesmo nível de tensão, as dosagens contendo partículas de pneu apresentam deformação maior ou igual à referência. Esse comportamento é muito importante para concretos-massa, pois pode contribuir para minimizar o risco de fissuração.

Nas Tabelas 27 a 30 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de capacidade de deformação e módulo de elasticidade do concreto, obtidos a partir dos ensaios de flexão em quatro pontos. A análise de variância indica que a utilização de partículas de borracha e a idade de ensaio tiveram pouco ou nenhum efeito significativo sobre as propriedades estudadas, com exceção do caso do módulo de elasticidade na face tracionada, cuja análise de variância indica que a idade afeta fortemente os resultados.

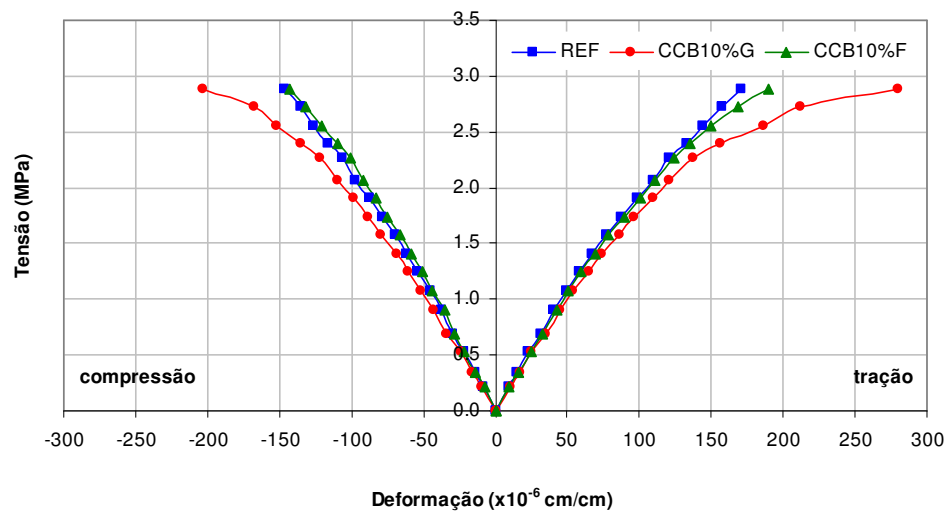
Os testes de Tukey indicaram que os resultados de capacidade de deformação na face tracionada de todas as dosagens e em cada idade podem ser classificados em um mesmo grupo homogêneo (Figuras 109a e 109b). O mesmo foi observado com relação aos resultados de capacidade de deformação na face comprimida (Figuras 110a e 110b).

Quanto aos resultados de módulo de elasticidade na face tracionada das dosagens contendo partículas de borracha, os testes de Tukey indicaram que os mesmos são equivalentes entre si e inferiores aos resultados obtidos para o concreto de referência (Figura 111a). No caso do módulo de elasticidade na face comprimida, todos os resultados foram considerados equivalentes (Figura 112a).

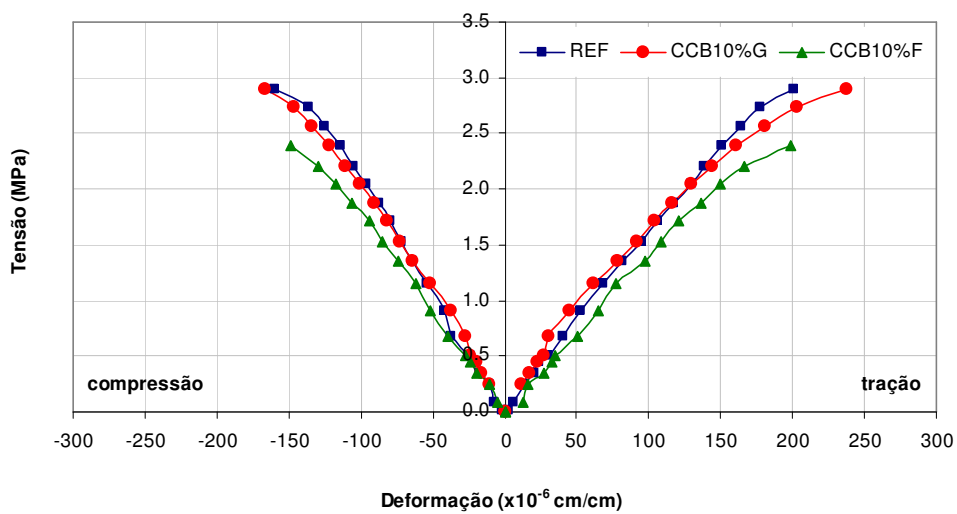
Em conformidade com a análise de variância, os testes de Tukey indicaram que os resultados do módulo de elasticidade na face tracionada formam grupos homogêneos distintos em cada idade de ensaio (Figura 111b). No caso do módulo de elasticidade na face comprimida o efeito dessa variável é menos significativo, os resultados aos 7 dias e 91 dias formam um só grupo homogêneo e os resultados aos 28 dias formam um segundo grupo (Figura 112b).



(a)



(b)



(c)

Figura 108: Capacidade de deformação média em função da tensão e do tipo de borracha de pneu, nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.

Tabela 27: Análise da variância - Capacidade de Deformação na Face Tracionada.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	3811,1	2	1905,6	3,806	2,779	0,098906
Idade	5219,0	2	2609,5	3,806	3,805	0,050004
Error	8914,5	13	685,7			

Tabela 28: Análise da variância – Capacidade de Deformação na Face Comprimida.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	573,4	2	286,7	3,806	1,469	0,265936
Idade	2109,1	2	1054,6	3,806	5,404	0,019583
Error	2536,8	13	195,1			

Tabela 29: Análise da variância – Módulo de Elasticidade na Face Tracionada.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	4,595	2	2,297	3,806	14,24	0,000530
Idade	22,556	2	11,278	3,806	69,92	0,000000
Error	2,097	13	0,161			

Tabela 30: Análise da variância - Módulo de Elasticidade na Face Comprimida.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	2,256	2	1,128	3,806	1,58	0,243615
Idade	9,040	2	4,520	3,806	6,32	0,012086
Error	9,295	13	0,715			

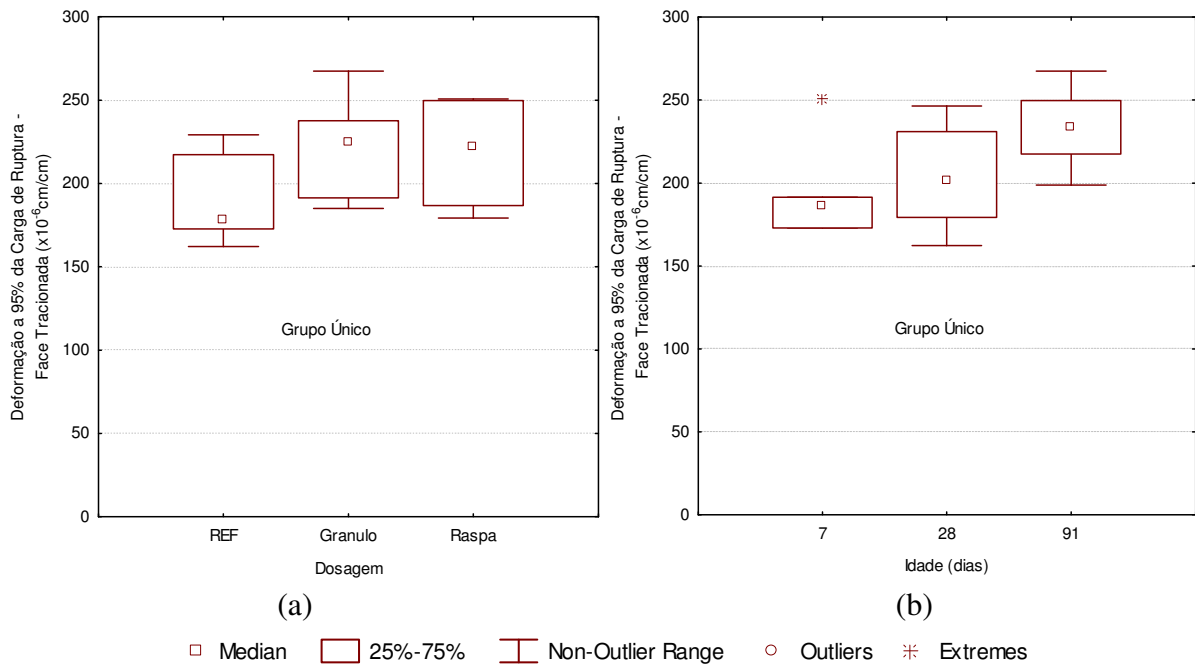


Figura 109: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, das deformações a 95% da carga de ruptura na face tracionada do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

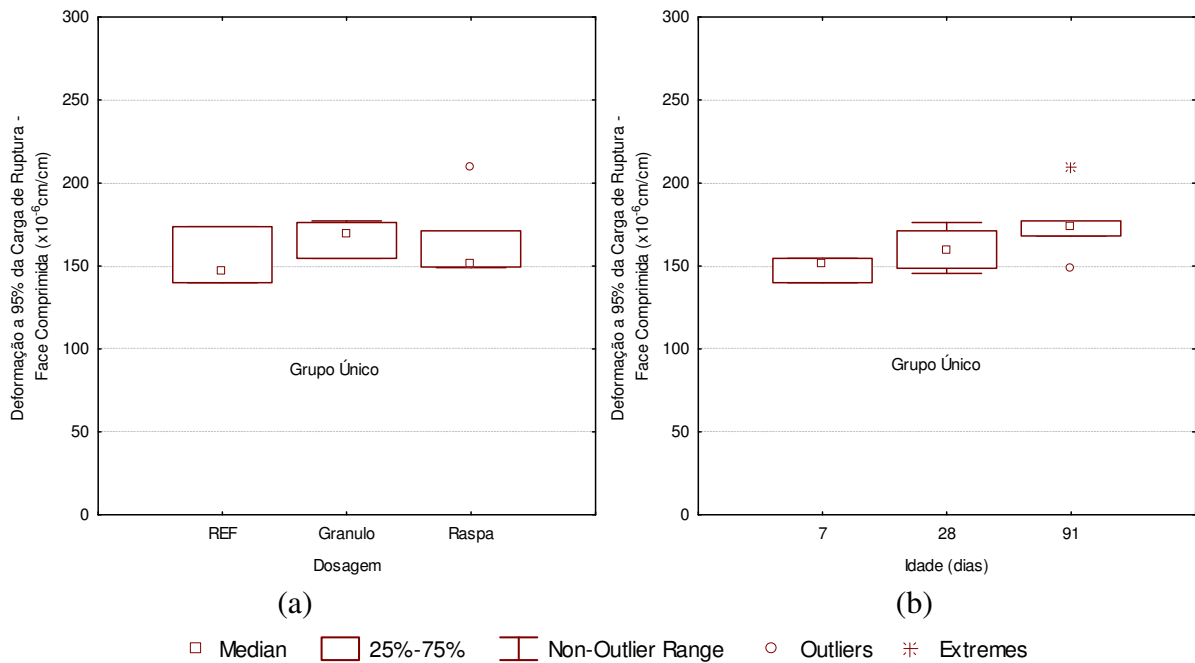


Figura 110: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, das deformações a 95% da carga de ruptura na face comprimida do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

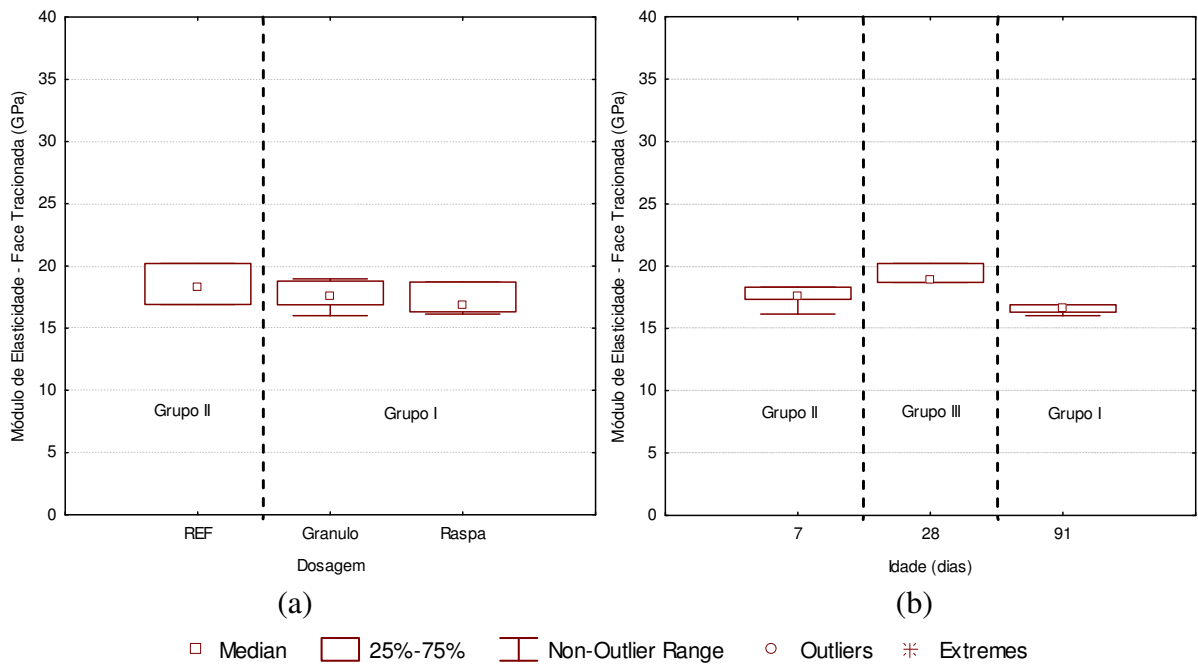


Figura 111: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do módulo de elasticidade na face tracionada do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio

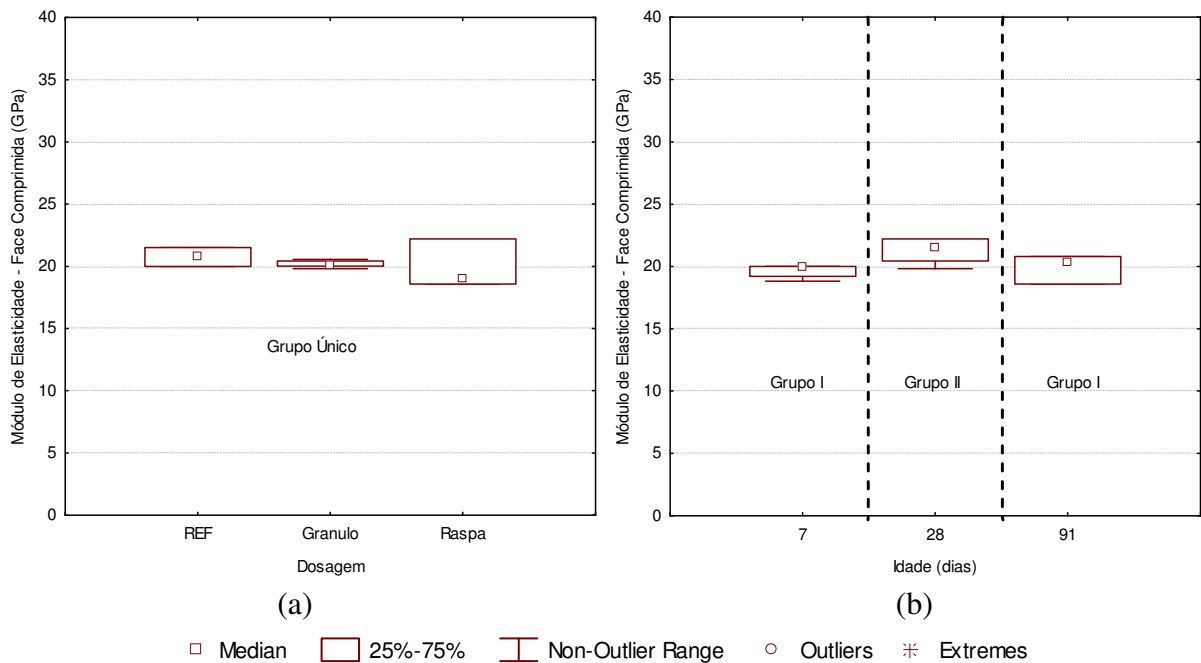


Figura 112: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do módulo de elasticidade na face comprimida do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

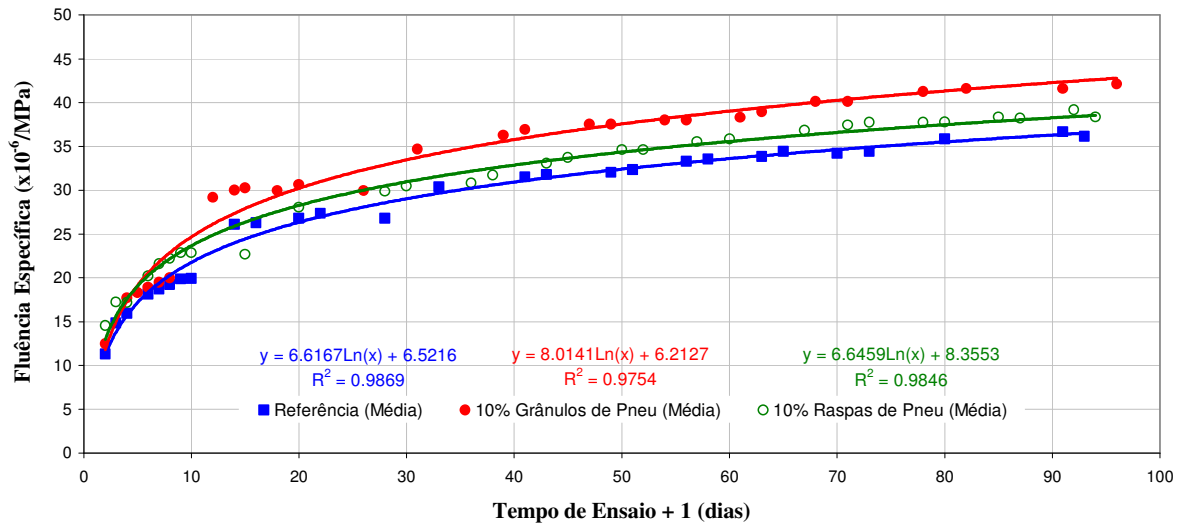
8.5. FLUÊNCIA

A fluência tem um efeito amenizante nas tensões de origem térmica, considerando que ela também diminui as tensões de compressão inicialmente geradas pela dilatação do material. A fluência atua reduzindo as tensões internas devidas à não uniformidade da deformação ou restrição, propiciando uma redução do surgimento de fissuras, principalmente quando uma estrutura com grande fluência inicial é carregada em idades recentes (SANTOS *et al.*, 2004). No caso do concreto com borracha de pneu, esse fenômeno pode ser incrementado pela menor restrição interna proporcionada pelas partículas de pneu, devido a sua menor rigidez.

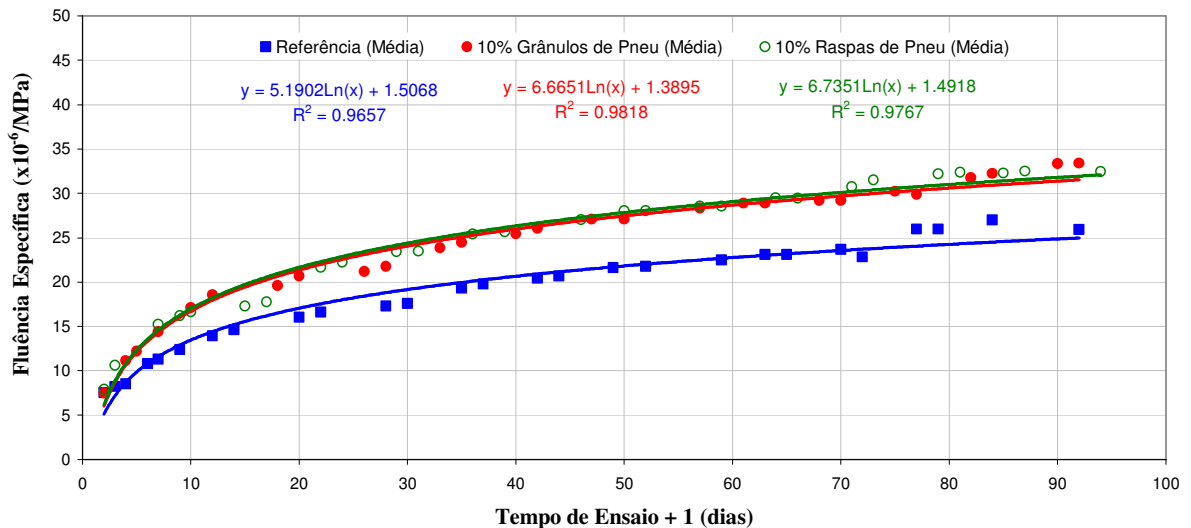
Nas Figuras 113(a), 113(b) e 113(c) estão apresentadas as curvas de fluência específica em função do tempo de ensaio e suas respectivas equações nas idades de 7, 28 e 91 dias respectivamente. Na fluência específica já estão descontadas as parcelas de deformação referentes à dilatação térmica, à deformação elástica e à retração autógena. Em todas as idades de ensaio observa-se que as dosagens contendo partículas de pneu apresentaram maior deformação por fluência do que o concreto de referência. Esse comportamento se acentua com o aumento da idade de ensaio, o que torna claro e importante o papel das partículas de pneu em situações de maior rigidez da pasta de cimento.

Na Tabela 31 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores de fluência específica, obtidos a partir dos ensaios de fluência do concreto. A análise indica que as variáveis independentes influenciaram significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelos resultados do teste de Tukey.

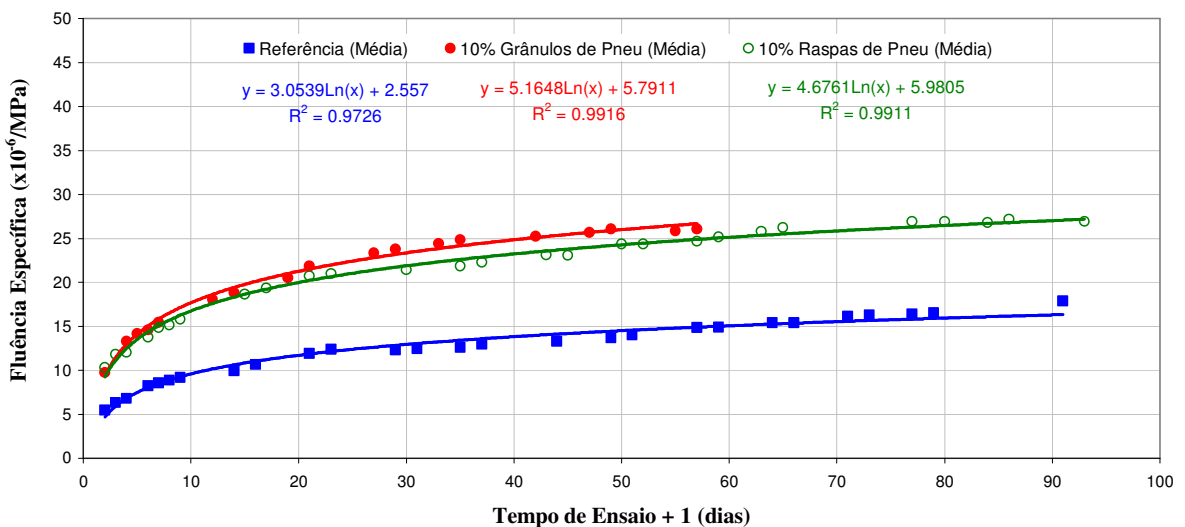
Os testes de Tukey indicam que os resultados das dosagens contendo fibras ou grânulos de pneu podem ser classificados como pertencentes a um mesmo grupo homogêneo, que tem resultados superiores aos verificados para o concreto de referência (Figura 114a). Isto indica que a adição de partículas de borracha, independentemente da forma, aumenta a fluência do material. Além disso, os resultados em cada idade de ensaio formaram grupos homogêneos distintos (Figura 114b), salientando a influência da idade nesta propriedade.



(a)



(b)



(c)

Figura 113: Evolução da fluência específica em função do tempo e do tipo de borracha de pneu, a partir das idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.

Tabela 31: Análise da variância aplicada aos resultados de Fluência Específica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	179,72	2	89,86	3,806	10,089	0,002265
Idade	701,69	2	350,84	3,806	39,391	0,000003
Error	115,79	13	8,91			

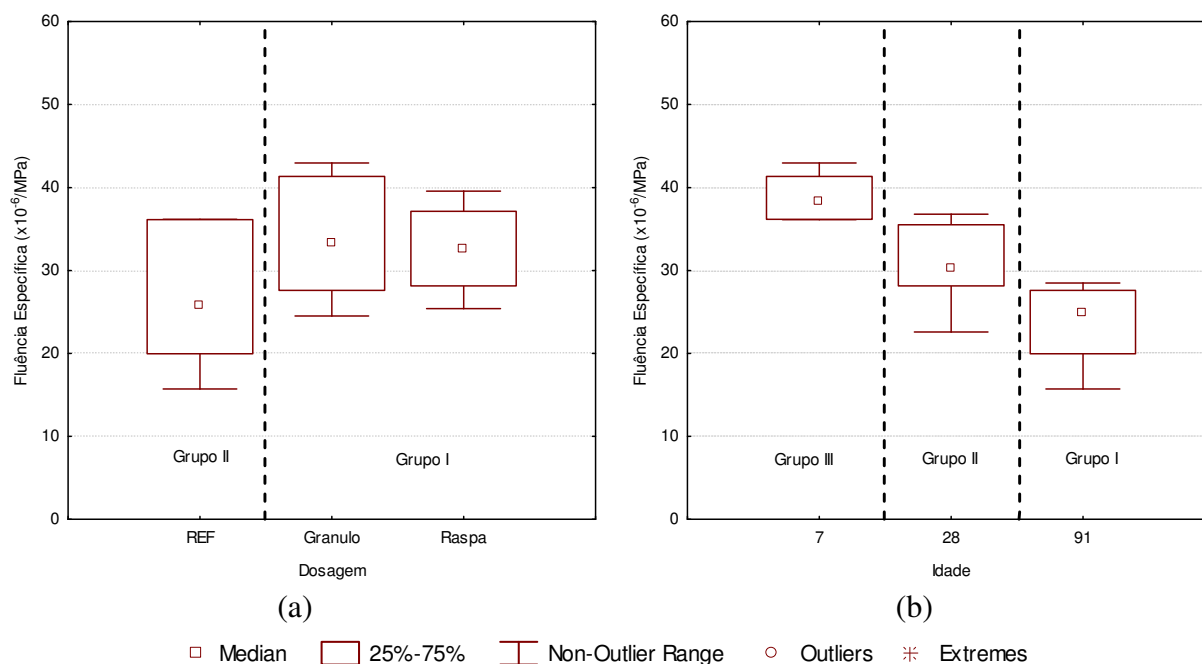


Figura 114: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da fluência específica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.6. RETRAÇÃO AUTÓGENA

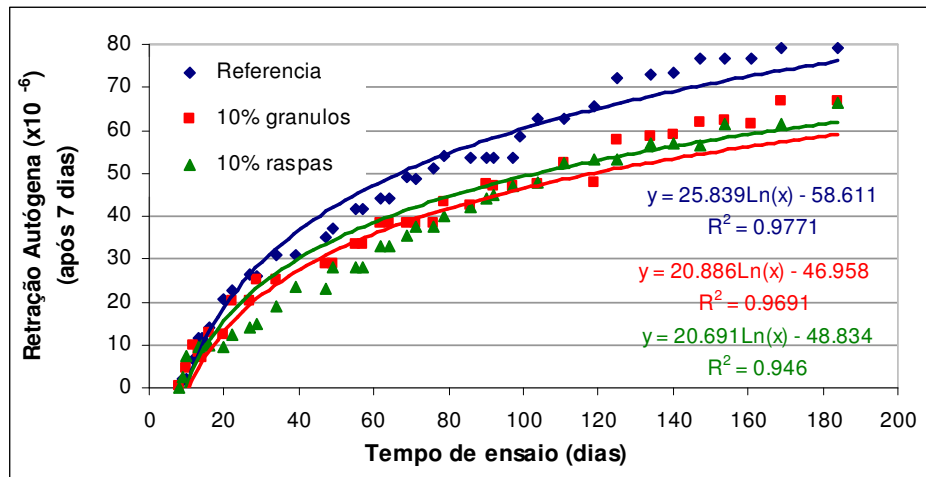
A retração autóloga é um fator a ser considerado no cálculo das deformações por fluência. Esse tipo de retração ocorre ao longo do tempo, em decorrência das reações de hidratação do cimento, envolvendo dois mecanismos: o da *retração química* e o da *autodessecação*. A retração química é resultado da redução do volume total de sólidos e líquidos consumidos nas reações de hidratação, enquanto a autodessecação resulta da diminuição da umidade relativa no interior do concreto endurecido, sem que ocorra perda de massa, também devido ao consumo de água pelas reações de hidratação. A autodessecação leva à formação de meniscos cuja tensão superficial provoca a retração autóloga (IBRACON, 2005).

Nas Figuras 115(a), 115(b) e 115(c) os gráficos ilustram o comportamento da retração autógena do concreto em função das dosagens estudadas e do tempo de ensaio, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Os resultados sugerem que as dosagens com partículas de borracha tendem a apresentar menor retração do que o concreto de referência. Esse é um comportamento que pode ser interessante tanto para o concreto massa como para outras aplicações, tais como, por exemplo, concretos com elevado consumo de cimento.

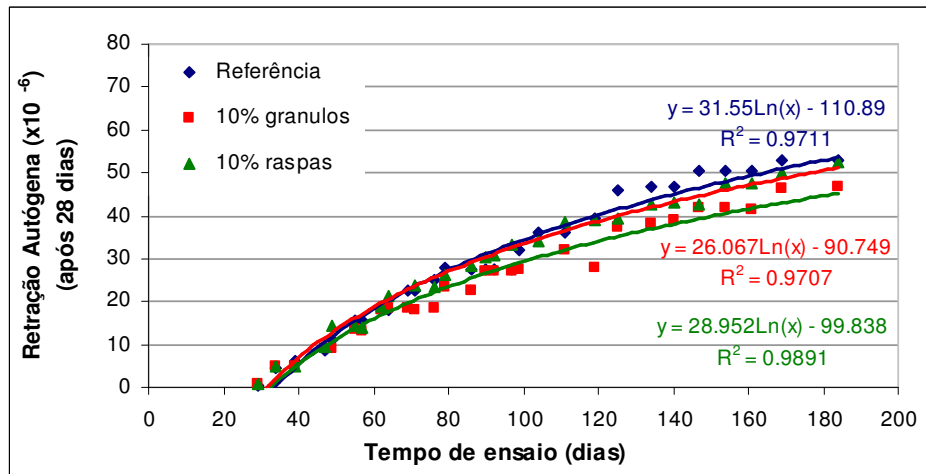
Na Tabela 32 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de retração autógena. A análise de variância indica que a utilização das partículas de pneu em fibras ou em grânulos tem influência significativa nos resultados. Já a idade de ensaio surtiu efeito claramente significativo sobre esta propriedade. Verifica-se que os valores médios de retração diminuem com a idade, o que era esperado, pois, à medida que as reações de hidratação do cimento se completam, o fenômeno de retração autógena se desacelera e tende a se estabilizar.

A influência do tipo de dosagem, porém, não é confirmada pelo teste de Tukey. O teste mostra que os resultados de todas as dosagens podem ser agrupados em um único grupo homogêneo, enquanto cada idade de ensaio forma um grupo distinto (Figuras 116a e 116b).

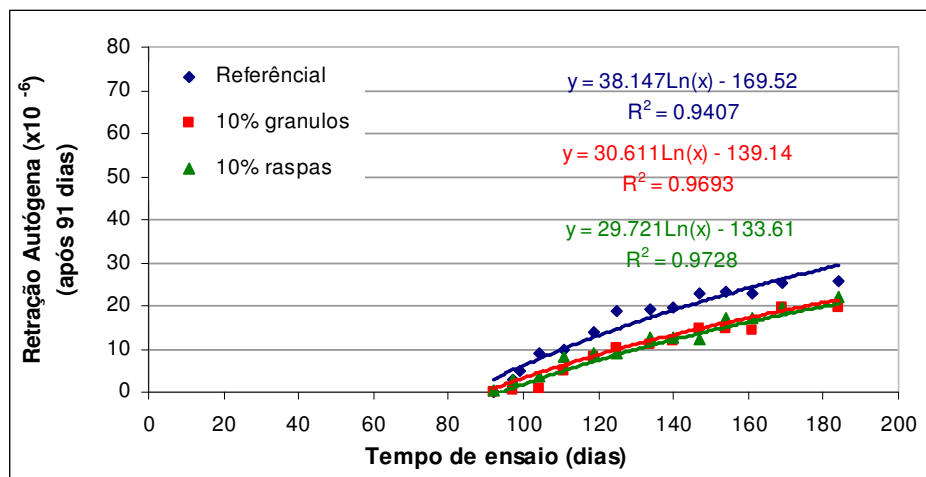
Ou seja, a análise visual dos dados sugere uma tendência de redução da retração com a incorporação de partículas de borracha, que pode ser confirmada estatisticamente pela ANOVA, a um nível de confiança de 95%. A alta variabilidade, porém, faz com que o teste de Tukey não considere os grupos como estatisticamente distintos.



(a)



(b)



(c)

Figura 115: Retração autóloga do concreto após
(a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias de cura.

Tabela 32: Análise da variância - Retração autógena.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	197,67	2	98,83	3,806	6,327	0,012056
Idade	2588,37	2	1294,19	3,806	82,844	0,000000
Error	203,09	13	15,62			

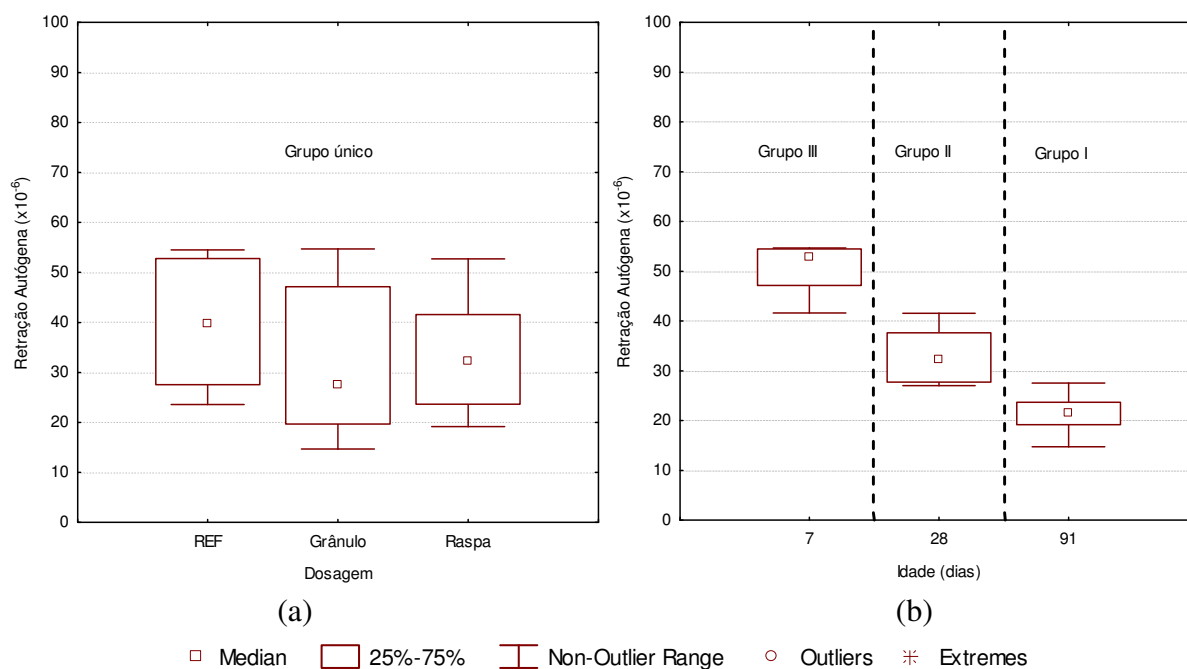


Figura 116: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da retração autógena do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.7. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA

Quando uma estrutura de concreto sofre gradientes de temperatura, as variações volumétricas decorrentes são diretamente proporcionais ao coeficiente de dilatação térmica do concreto. A partir dessa propriedade, juntamente com o conhecimento da capacidade de deformação do concreto, é possível estabelecer gradientes térmicos limites que, se ultrapassados, podem induzir a fissuração do concreto durante seu resfriamento (FURNAS, 1997). Desse modo, para efeito do comportamento termomecânico do concreto massa, são desejáveis composições que resultem em menores coeficientes de dilatação térmica.

Na Figura 117 o gráfico ilustra o comportamento dos coeficientes de dilatação térmica do concreto em função das dosagens estudadas e da idade de ensaio. Observa-se que, para todas as dosagens, o coeficiente de dilatação térmica tende a aumentar com a idade e que os valores médios de dilatação são muito próximos para cada dosagem.

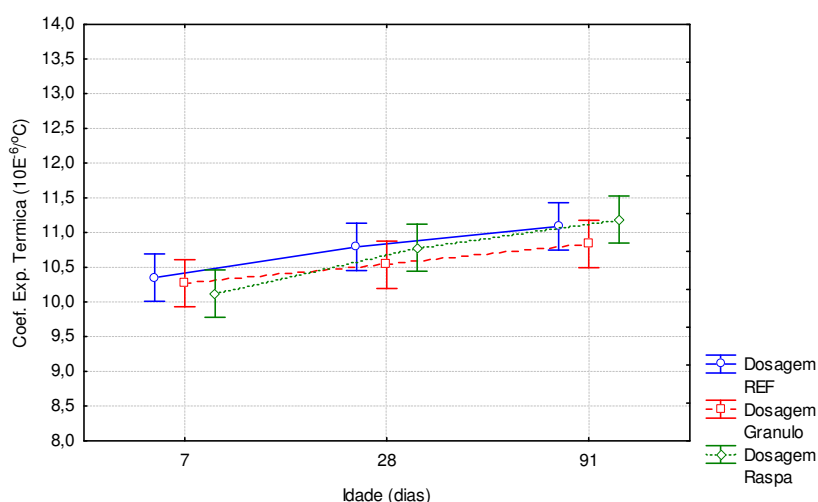


Figura 117: Coeficiente de dilatação térmica em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

Na Tabela 33 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir de ensaios de determinação do coeficiente de dilatação térmica do concreto. A análise de variância indica que apenas a variável idade de ensaio influencia significativamente os resultados, o que foi confirmado pelo teste de Tukey, que indica que as dosagens formam um único grupo homogêneo, enquanto as idades de ensaio formam grupos de resultados distintos (Figura 118a e 118b).

Tabela 33: Análise da variância - Coeficiente de dilatação térmica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,510	2	0,255	3,134	1,12	0,331227
Idade	7,574	2	3,787	3,134	16,68	0,000001
Error	15,212	67	0,227			

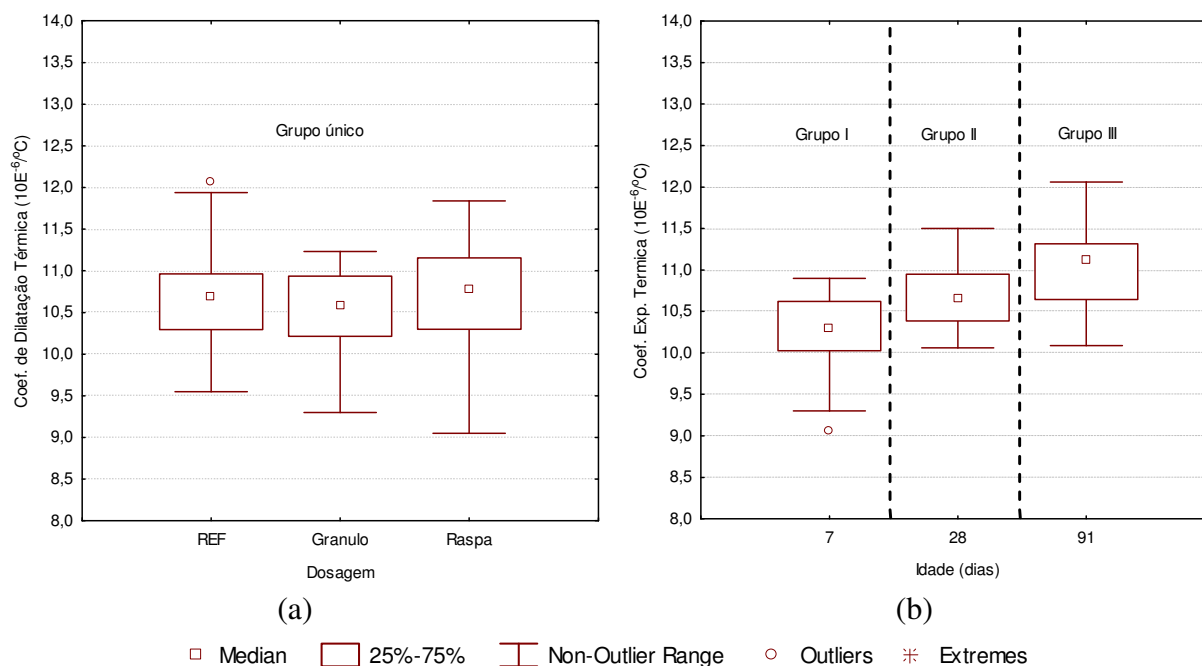


Figura 118: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do coeficiente de dilatação térmica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.8. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é um parâmetro de grande relevância no cálculo do campo de temperaturas em estruturas de concreto. O conhecimento das condições de dissipação de calor através de uma estrutura de concreto massa é de fundamental importância na fase de projeto e planejamento executivo, quando são estimadas as tensões de origem térmica.

Ao contrário do concreto massa, compósitos de matriz cimentícia fabricados com vistas à aplicação em edificações requerem menor condutividade térmica, a fim de melhorar as características isolantes do material e, conseqüentemente, o conforto térmico da estrutura confeccionada com o mesmo.

Na Tabela 34 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de condutividade térmica. A análise de variância indica que a utilização das partículas de pneu em fibras ou em grânulos influencia os resultados, ao nível de confiança de 95%. O interessante é que, neste caso, a forma das partículas parece surtir um efeito inesperado e diferenciado, como indicam os resultados do teste de Tukey.

O teste de Tukey indica que os resultados das dosagens contendo fibras de pneu ou o concreto de referência formam um único grupo homogêneo, com valores superiores àqueles das dosagens contendo borracha de pneus em grânulos (Figura 119). Ou seja, apenas as partículas em forma de grânulos parecem afetar a condutividade térmica, efeito para o qual não se obteve explicação razoável, sendo o mesmo atribuído a variações experimentais.

Tabela 34: Análise da variância – Condutividade térmica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,00431	2	0,00215	3,682	11,1	0,001082
Error	0,00290	15	0,00019			

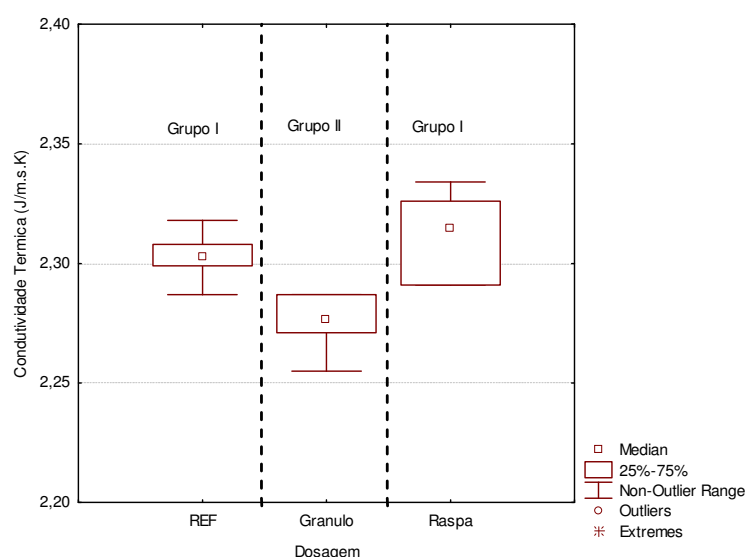


Figura 119: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da condutividade térmica do concreto em função do tipo de borracha.

8.9. DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica é a propriedade que expressa a capacidade de difusão do calor em todas as direções, indicando a facilidade com que o concreto pode sofrer variações de temperatura. Na Tabela 35 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de difusividade térmica. A análise de variância indica que a utilização das partículas de pneu em fibras ou em grânulos influencia significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelo teste de Tukey

(Figura 120). O mesmo indica que os resultados das dosagens contendo partículas de borracha de pneu em grânulos ou em fibras podem ser agrupados em um único grupo homogêneo, que tem valores médios de difusividade térmica inferiores aos do concreto de referência.

Tabela 35: Análise da variância - Difusividade térmica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,000110	2	0,000055	3,682	11,39	0,000979
Error	0,000073	15	0,000005			

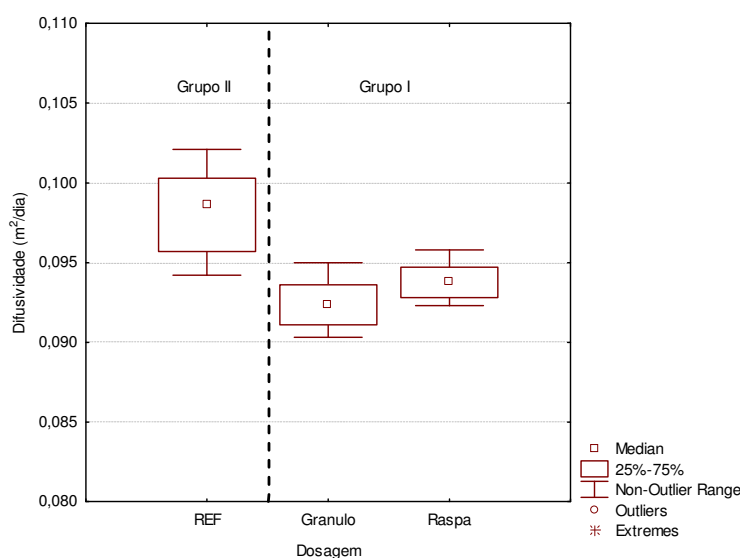


Figura 120: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da difusividade do concreto em função do tipo de borracha.

8.10. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico é uma das propriedades que influenciam na capacidade de armazenamento de calor, sendo expressa numericamente pela quantidade de calor que deve ser cedida a uma unidade de massa, para elevar sua temperatura em 1°C. Ou seja, concretos com maior calor específico terão maior capacidade de armazenar o calor gerado pelas reações de hidratação do cimento e resultarão em menor elevação de temperatura.

Na Tabela 36 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de calor específico do concreto. A análise de variância indica que a utilização das partículas de pneu em fibras ou em grânulos não influencia significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelo teste de Tukey.

O teste de Tukey mostra que os resultados de todas as dosagens podem ser agrupados em um único grupo homogêneo (Figura 121). O ideal seria que as dosagens contendo partículas de pneu apresentassem maior calor específico, o que significaria que esses concretos absorveriam maior quantidade do calor liberado nas reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, alcançariam um pico menor de temperatura do que o concreto sem borracha. Entretanto, o resultado obtido é satisfatório, uma vez que o desempenho do concreto com borracha é semelhante ao do concreto de referência.

Tabela 36: Análise da variância - Calor específico.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,000835	2	0,000418	3,682	2,498	0,115769
Error	0,002508	15	0,000167			

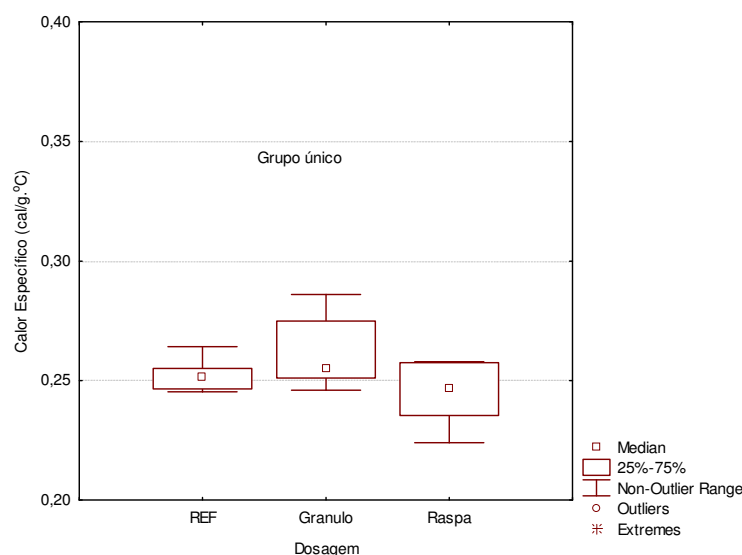


Figura 121: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do calor específico do concreto em função do tipo de borracha.

8.11. ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DA TEMPERATURA

O estudo da evolução da temperatura em estruturas massivas de concreto, decorrente do calor liberado pela reação exotérmica da hidratação do cimento, só é possível através do conhecimento da elevação adiabática da temperatura do concreto. Esse calor, embora possa ser medido por ensaios com o próprio cimento na pasta pura ou em argamassa, só pode ser conhecido com exatidão através da curva de elevação adiabática da temperatura do concreto, medida em um calorímetro adiabático (FURNAS, 1997). Nas Figuras 122(a) e 122(b) os gráficos ilustram a evolução das temperaturas do concreto em condições adiabáticas, respectivamente, durante as 24 horas iniciais de ensaio e até 28 dias, quando o ensaio foi finalizado. Verifica-se que todos os concretos apresentam um comportamento similar.

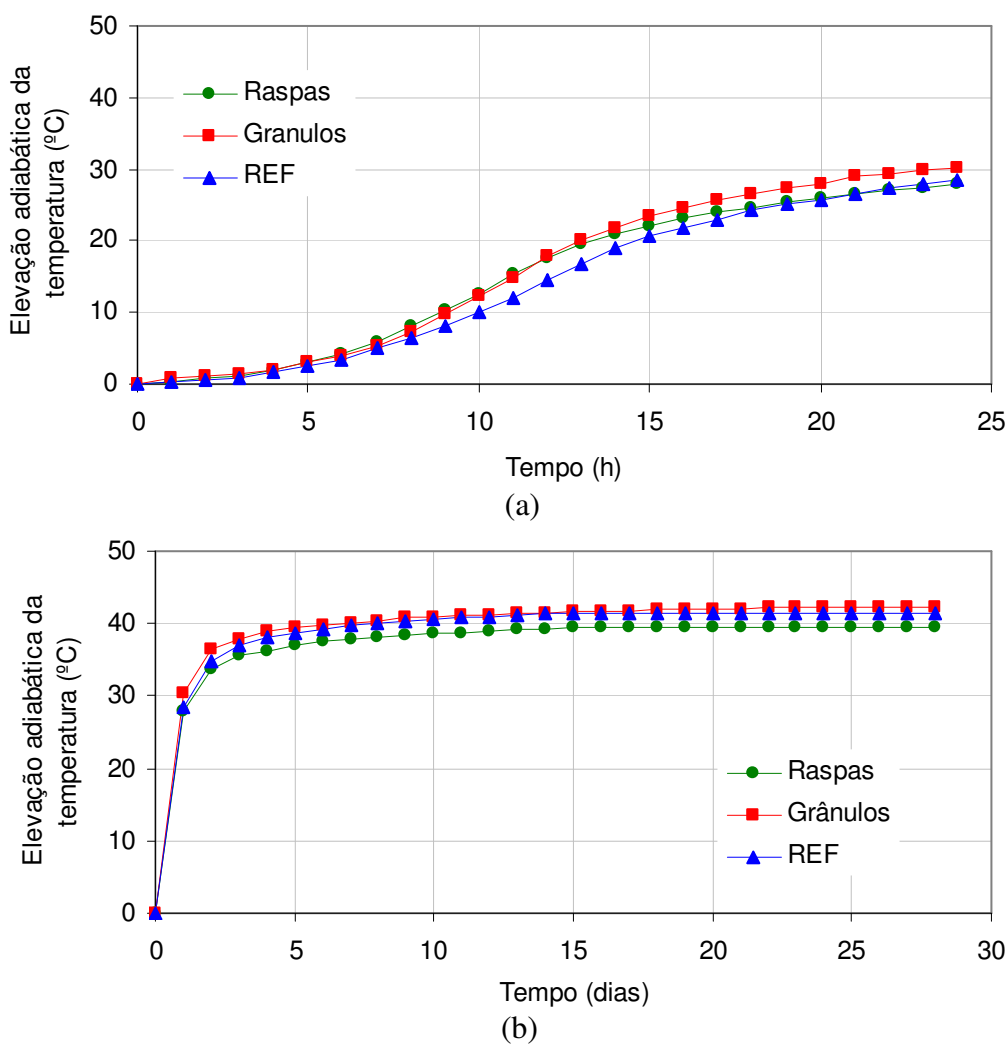


Figura 122: Evolução da elevação adiabática da temperatura em função do tipo de borracha de pneu durante o período de ensaio: (a) até 24 horas e (b) até 28 dias.

Na Tabela 37 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de elevação adiabática da temperatura do concreto. A análise de variância indica que a utilização de partículas de pneu em grânulos ou em fibras teve alguma influência sobre a propriedade estudada, o que não se justifica, uma vez que a elevação da temperatura depende tão somente do consumo de cimento dos concretos. O tempo de ensaio, como era esperado, afetou significativamente os resultados.

Como foi verificado na análise de variância, o teste de Tukey também indica que os resultados de cada dosagem pertencem a grupos distintos de médias que se posicionam em ordem crescente de valores, como apresentado na Figura 123a. Ou seja, estatisticamente, existem diferenças entre as dosagens. Os resultados em cada tempo de ensaio também formaram grupos homogêneos distintos, em concordância com o que foi verificado na análise de variância (Figura 123b).

Tabela 37: Análise da variância - Elevação adiabática da temperatura.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	14,58	2	7,29	4,459	38,20	0,000081
Idade	444,08	1	444,08	5,318	2327,07	0,000000
Error	1,53	8	0,19			

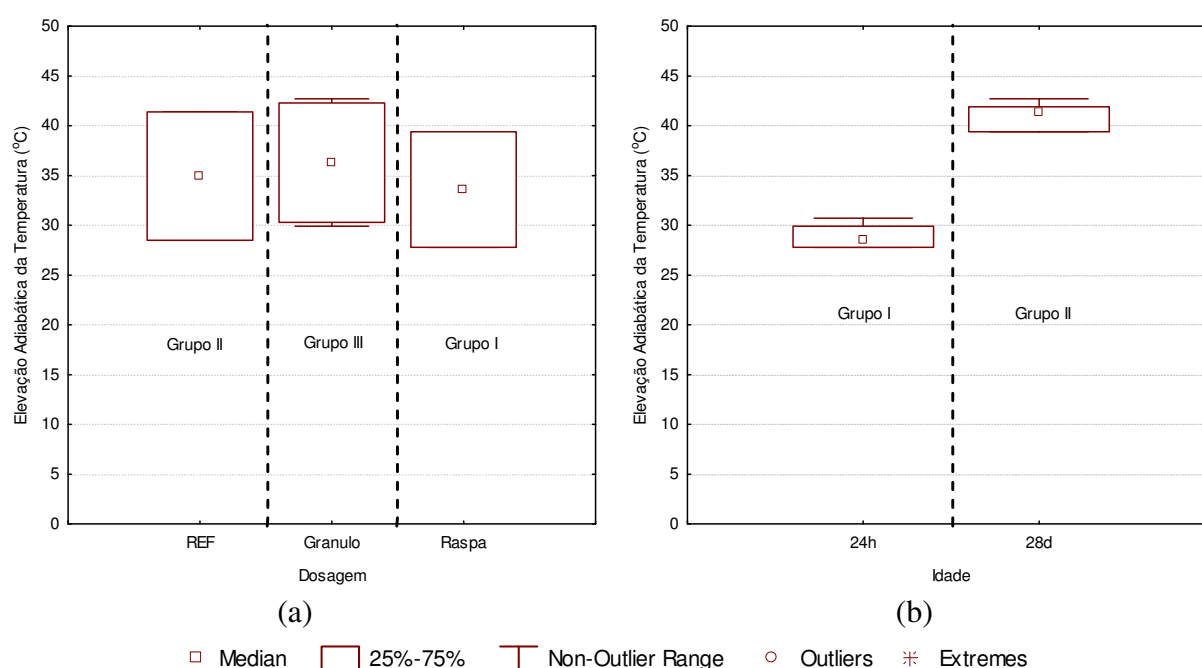


Figura 123: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da fluência específica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.12. COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO COM BORRACHA DE PNEU

Nesta etapa buscou-se avaliar o desempenho das amostras quanto às características térmicas e viscoelásticas do concreto com borracha de pneu em relação ao concreto de referência, com vistas à sua aplicação em estruturas massivas, considerando como desejável a obtenção das seguintes características:

- resistência à compressão equivalente;
- redução do módulo de elasticidade;
- aumento da resistência à tração; da capacidade de deformação e da fluência;
- aumento da condutividade, da difusividade e do calor específico;
- redução do coeficiente de dilatação térmica e do valor de elevação adiabática da temperatura.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que as amostras contendo partículas de borracha de pneu apresentaram o seguinte desempenho em relação à referência:

- menor resistência à compressão e resistência à tração na flexão equivalente;
- menor módulo na compressão axial e na flexão em quatro pontos;
- capacidade de deformação equivalente na flexão e maior sob fluência;
- coeficiente de expansão térmica equivalente;
- menor difusividade e equivalente calor específico;
- menor condutividade das amostras com partículas de borracha em grânulos e condutividade equivalente no caso de partículas de borracha em fibras;
- maior elevação adiabática da temperatura das amostras com partículas de borracha em grânulos e menor no caso de partículas de borracha em fibras.

De modo geral, do ponto de vista da utilização para fabricação de concreto massa, as dosagens contendo partículas de pneu apresentaram desempenho melhor ou equivalente à dosagem de concreto de referência nas propriedades estudadas, com exceção da resistência à compressão. Entretanto, esses resultados isoladamente não significam que o concreto com borracha de pneu é mais resistente à fissuração de origem térmica. Para tanto, é necessária uma análise conjunta dos parâmetros avaliados por meio de uma análise termomecânica, como apresentado a seguir.

8.12.1. Metodologia utilizada na análise termomecânica

Com base na caracterização termomecânica e viscoelástica, realizada nesta fase da pesquisa, foi possível avaliar os concretos com borracha de pneu quanto à resistência à fissuração devido a variações volumétricas de origem térmica, em comparação ao concreto de referência, sem borracha. Para isso, os resultados dos testes termomecânicos e viscoelásticos foram utilizados como parâmetros para análise do comportamento termomecânico dos concretos, utilizando um software capaz de gerar respostas térmicas e de tensões a partir de domínios bidimensionais em uma estrutura de geometria hipotética, utilizando o método dos elementos finitos. Um maior detalhamento sobre a modelagem termomecânica e softwares utilizados deve-se pesquisar Calmon (1995) e Santos (2004).

As dosagens de concreto foram denominadas: CC - dosagem de controle; CG - dosagem contendo 10% de borracha de pneu em grânulos; e CF - dosagem contendo 10% de borracha de pneu em fibras. As propriedades térmicas e mecânicas dos concretos, utilizadas para subsidiar a análise termomecânica, estão relacionadas nas Tabelas 38 e 39, ou mostradas nas figuras 124 a 126.

Tabela 38: Resultados médios de ensaio das propriedades térmicas.

Concreto	Condutividade térmica (J/m.s.K)		Calor específico (J/kg.K) (20% sat)		Difusividade térmica (m ² /dia)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
CC	2,30	0,01	963	30	0,098	0,003
CG	2,28	0,01	1031	72	0,092	0,002
CF	2,31	0,02	927	68	0,094	0,001

Tabela 39: Resultados médios de ensaio das propriedades mecânicas.

Concrete	Coeficiente de Poisson		Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)		Resistência à compressão (91 dias)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
CC	0,22	0,01	11,09	0,31	31,30	0,57
CG	0,16	0,01	10,84	0,13	26,45	0,35
CF	0,22	0,01	11,19	0,01	26,75	0,35

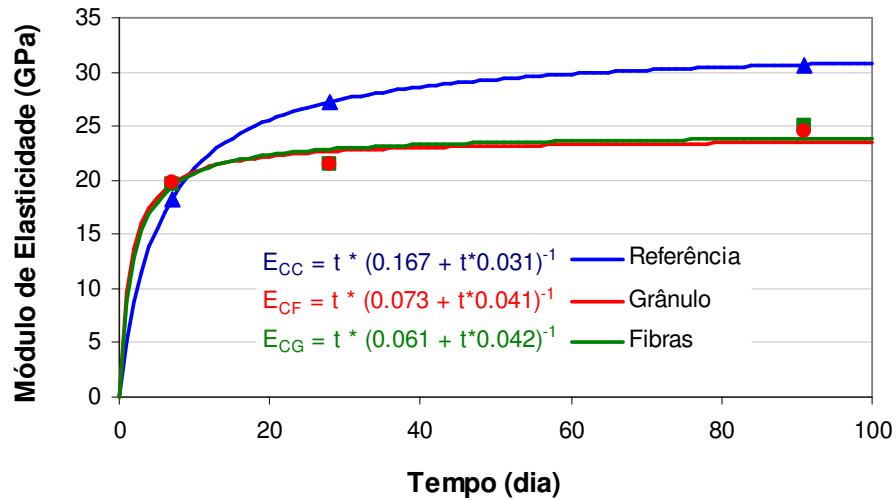


Figura 124: Módulo de elasticidade em função do tempo.

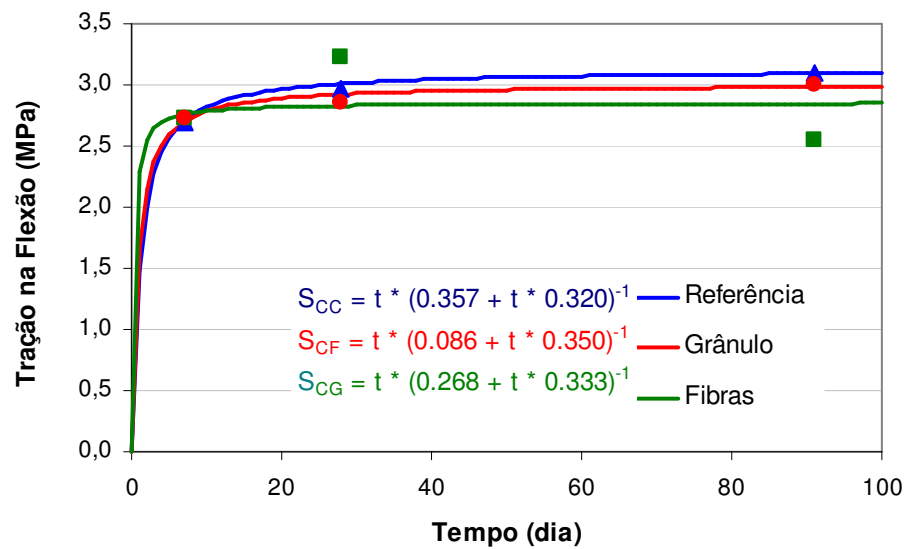


Figura 125: Resistência à tração na flexão em função do tempo.

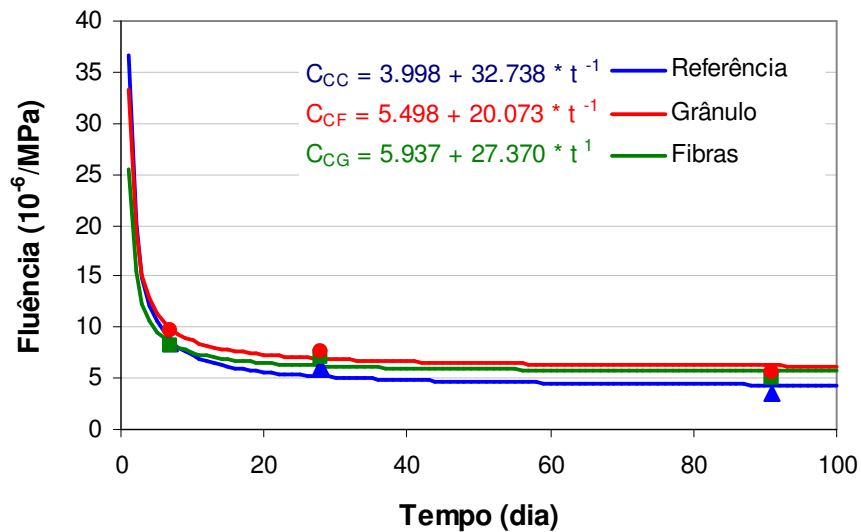


Figura 126: Fluência específica em função do tempo.

Com base nas características dos diferentes concretos, foi analisado o comportamento termomecânico de uma estrutura de concreto massa hipotética, correspondente a um muro de vertedor, sujeita ao calor interno gerado pela hidratação e exposta às influências das condições ambientais, que permitem que esse calor seja dissipado, o que resulta em gradientes de temperatura não-lineares no interior da estrutura. Na Figura 127 observam-se a seção transversal da estrutura de concreto analisada e a respectiva malha de elementos finitos utilizada.

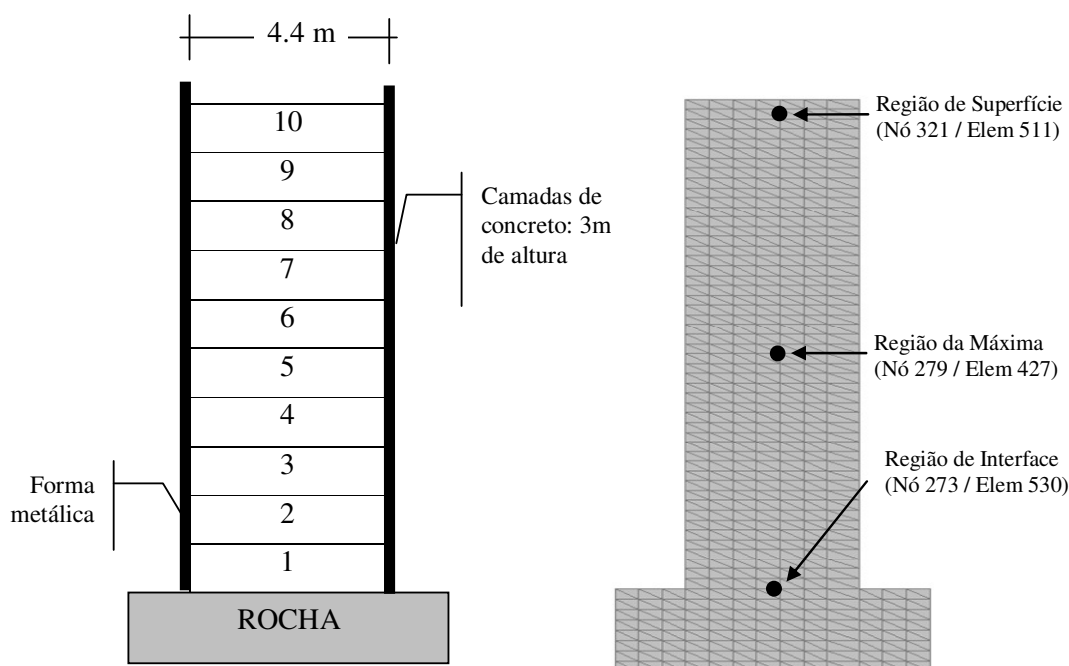


Figura 127: Seção transversal e malha de elementos finitos da estrutura de concreto analisada.

As simulações foram realizadas com auxílio dos programas PFEM_2DT e PFEM_2DAT⁴, capazes de gerar respostas térmicas e de tensões, respectivamente, em domínios bidimensionais de qualquer geometria, utilizando o método dos elementos finitos (SANTOS, 2004).

⁴ Esses programas foram desenvolvidos desde 1997 pela equipe do Eng. Cláudio José da Silva e Eng. Sergio Botassi dos Santos, sob a orientação do Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama (ver Santos, 2004).

Os programas PFEM_2DT e PFEM_2DAT simulam processos de construção por camadas, típicos da construção de barragens. Os mesmos, desenvolvidos utilizando a técnica de Programação Orientada a Objetos, foram validados pelos seus autores por meio de diferentes aplicações em estruturas de barragens e fundações (SANTOS, 2004; SANTOS *et al.*, 2004b).

O programa PFEM_2DAT realiza uma análise termomecânica viscoelástica linear e desacoplada. Sua integração com o programa de análise térmica PFEM_2DT é efetuada de forma incremental, proporcionando a obtenção do vetor solução de deformações e tensões em função dos gradientes térmicos gerados pelo programa de análise térmica. Essas ferramentas computacionais consideram as deformações diferidas segundo modelos de predição baseados na função de fluência do Bureau of Reclamation (1956) e no coeficiente de fluência preconizado pelo ACI (1992), além da retração por secagem da maneira recomendada pelo CEB (1991) e por Bazant (1987).

Para cada tipo de concreto – CC, CG e CF – foram realizadas simulações térmicas com base nas propriedades dos respectivos concretos, adotando as hipóteses de execução e condições de contorno descritas na Tabela 40. Dados os recursos oferecidos pelo programa PFEM_2DT optou-se pela simulação de concretagem em camadas de três metros de altura, executadas com intervalo de 2 dias, situação comum em estruturas massivas como as encontradas nas obras correntes de barragens (FURNAS, 1997; SANTOS *et al.*, 2004).

Tabela 40: Condições executivas (continua).

<i>Condições Executivas</i>
- Execução em camadas de 3 m executadas com intervalo de 2 dias, totalizando 30 metros
- Cura úmida
- Fôrma metálica
- Temperatura de lançamento = 22°C
<i>Condições de Campo</i>
- Coeficiente de Convecção: 25 W/m ² .°C
- Temperatura média: 22°C
<i>Características da Rocha</i>
Propriedades térmicas
- Temperatura inicial = 22°C
- Condutividade térmica: 2,303 (J/m.s.K)
- Massa específica: 2400 (kg/m ³)
- Calor específico: 1006 (J/kg.°C)
Propriedades mecânicas
- Módulo de elasticidade: 32 GPa
- Coefficient of expansion: 11,09 (10 ⁻⁶ /°C)
- Coeficiente de Poison: 0,22

Dados da Simulação

- Total de elementos: 908
- Total de nós: 526
- Tempo de Análise: 2400h (em incrementos de 4h)
- Tamanho do elemento: 0,6m
- Tipo do elemento: triangular com 3 nós

8.12.2. Análise térmica

Com base nas propriedades térmicas dos diferentes concretos, e por meio de simulações numéricas, como descrito acima, foi possível obter o campo de temperaturas desenvolvido na seção transversal da estrutura. O calor liberado durante as reações de hidratação do cimento provoca a elevação da temperatura do concreto que, por sua vez, tende a se equiparar com a temperatura ambiente, o que resulta em um gradiente de resfriamento⁵ do interior para a superfície do elemento. Na Figura 128 pode-se observar as isotermas de temperatura da superfície até o núcleo dos diferentes concretos estudados.

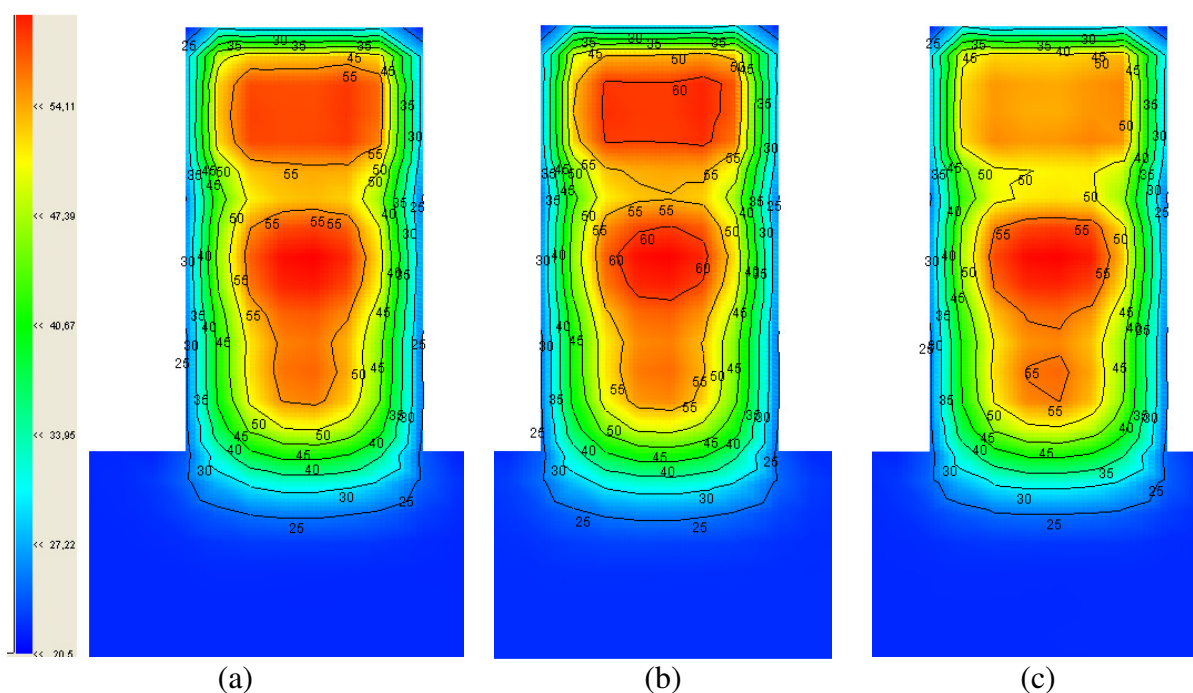


Figura 128: Isotermas exibindo o gradiente de temperatura da superfície ao núcleo do (a) concreto de referência (CC) após 144h, (b) do concreto com grânulos de pneu (CG) após 128h e (c) do concreto com fibras de pneu (CF) após 144h.

⁵ A transferência de calor em sólidos ocorre em função da transmissão da energia de uma região mais quente para outra, a qual é resultante das diferentes temperaturas nessas regiões. A transmissão do calor presente no interior de uma estrutura e nas suas circunvizinhanças segue os três mecanismos básicos da transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Verifica-se que as temperaturas variam, aproximadamente, de 25°C nas regiões próximas ao contato com a rocha (nó 273) e à superfície do concreto (nó 321), até 60°C no núcleo da estrutura (nó 279). Os gradientes térmicos obtidos são semelhantes, um comportamento esperado, uma vez que os concretos apresentaram valores semelhantes para as propriedades térmicas (Figura 122 e Tabela 38), embora a análise estatística dos dados tenha indicado que o concreto tipo CG apresenta menor condutividade térmica e maior elevação adiabática da temperatura.

O concreto com grânulos de borracha – CG – apresentou o campo de temperaturas com os maiores valores de temperatura, tanto na região próxima à interface concreto-rocha, quanto na região próxima ao centro da estrutura (região da máxima das máximas) e próximo à superfície. O mesmo alcançou valores máximos de temperatura iguais a 53.5 °C, 62.5°C e 54.5 °C, nas idades de 2, 6 e 20 dias, respectivamente (Figura 129, 130 e 131).

Em segundo lugar ficou o concreto de referência – CC – com valores intermediários de temperatura. Já o concreto com fibras de borracha – CF – obteve os menores valores de temperatura, iguais a 50.5 °C, 59.5°C e 51.5 °C, nas mesmas idades de controle dadas acima para o concreto com grânulos de borracha – CG.

Este comportamento térmico, medido em termos de temperaturas máximas no núcleo do concreto, condiz com os resultados dos ensaios de elevação adiabática da temperatura e de condutividade térmica, que indicaram valores respectivamente maiores e menores para o concreto CG do que para o concreto CF.

No núcleo, devido à sobreposição das camadas e a distância das superfícies de contato, a produção de calor é maior que a dissipação nas primeiras idades, de modo que a temperatura só se estabiliza após 70 dias, aproximadamente (Figura 130). O intervalo de lançamento entre as camadas de concreto não permite o completo resfriamento da camada antecedente e a transferência de calor é portanto reduzida, devido ao pequeno gradiente térmico. Desse modo, as temperaturas máximas ocorrem relativamente cedo, alcançando valores mais elevados que demoram mais para se estabilizar do que nas regiões periféricas.

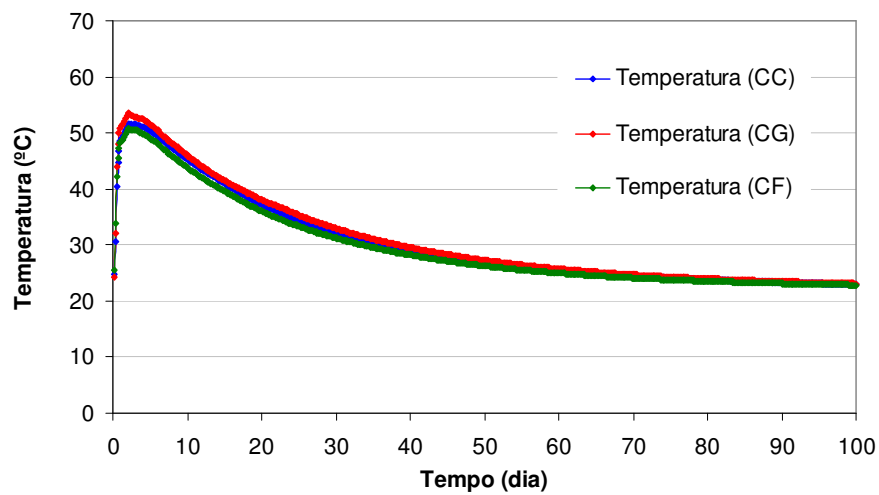


Figura 129: Evolução da temperatura na interface concreto-rocha (nó 273).

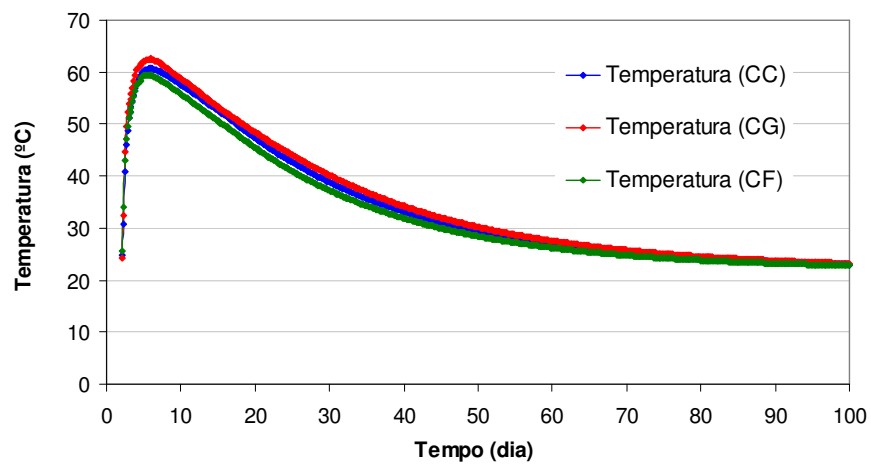


Figura 130: Evolução da temperatura no núcleo dos concretos (nó 279).

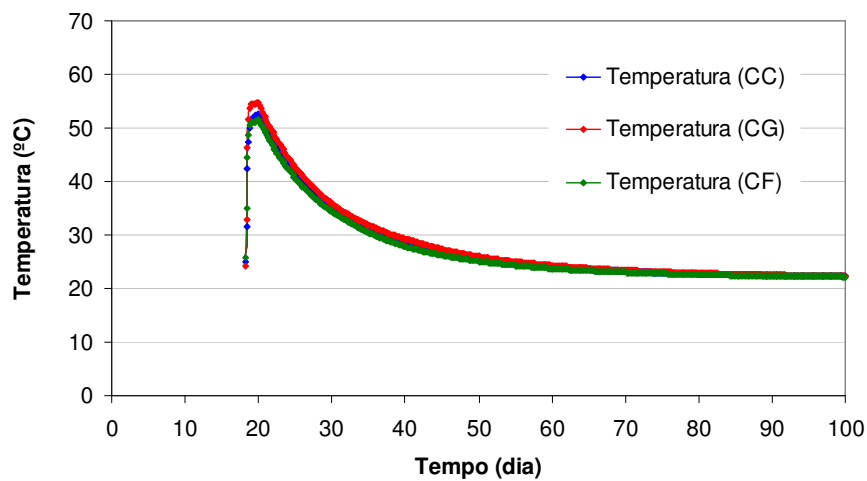


Figura 131: Evolução da temperatura na superfície dos concretos (nó 321).

Nas regiões periféricas, como na interface concreto-rocha e na superfície do concreto, a produção de calor no concreto é menor que a sua dissipação e, conseqüentemente, as temperaturas máximas alcançam menores valores do que no núcleo. No início, o calor gerado nessas regiões, ou transferido a partir do núcleo, é rapidamente dissipado para os sistemas circunvizinhos, que se encontram com temperaturas mais baixas. Com o tempo, todavia, a temperatura da rocha também se eleva, reduzindo o gradiente térmico na interface concreto-rocha, enquanto na superfície do elemento o gradiente com o ar permanece. Desse modo, as curvas de resfriamento na superfície da estrutura são mais acentuadas e a temperatura se estabiliza após, aproximadamente, 35 dias, enquanto na interface concreto-rocha a estabilização se dá somente após 60 dias (vide Figuras 131 e 129, respectivamente).

Como a avaliação térmica por si só não é suficiente para avaliar o risco de ocorrência de fissuração de origem térmica, os campos de temperatura do problema térmico foram utilizados como dados de entrada para a simulação da evolução de tensões por meio do programa PFEM_2DAT. No programa foram inseridas as propriedades mecânicas dos concretos obtidas por meio de ensaios, possibilitando desta forma que fosse transformado o campo de temperatura em efeitos deformacionais.

8.12.3. Análise das tensões

O concreto se expande com a elevação da temperatura proporcionalmente ao seu coeficiente de dilatação térmica. Nas primeiras idades o concreto encontra-se no estado plástico, não existindo grandes restrições a essa expansão. Com o aumento da idade o concreto passa ao estado viscoelástico, gerando restrições e ocasionando o desenvolvimento de tensões de compressão. O concreto continua a se expandir até que a temperatura máxima seja atingida. Já no processo de resfriamento o concreto se contrai, aliviando as tensões de compressão até que a contínua queda da temperatura passa a gerar tensões de tração crescentes, que se tornam constantes com a estabilização da temperatura. Esse paralelo entre a evolução das temperaturas e das tensões normais máximas pode ser facilmente observado comparando-se a figura 129 com a figura 132, a figura 130 com a figura 133 e a figura 131 com a figura 134.

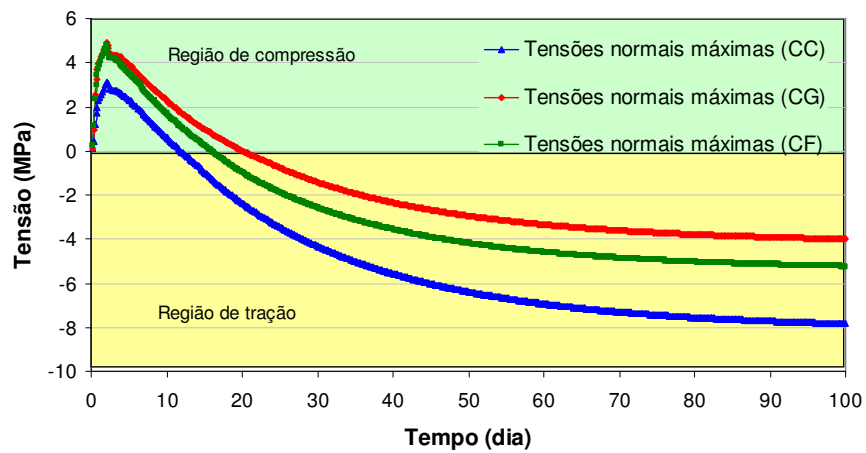


Figura 132: Evolução das tensões de tração na interface concreto-rocha (Elemento 530).

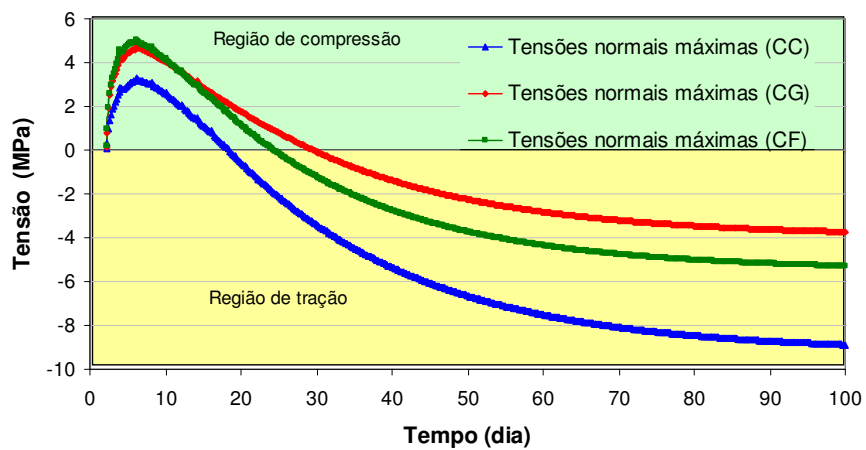


Figura 133: Evolução das tensões de tração no núcleo dos concretos (Elemento 427).

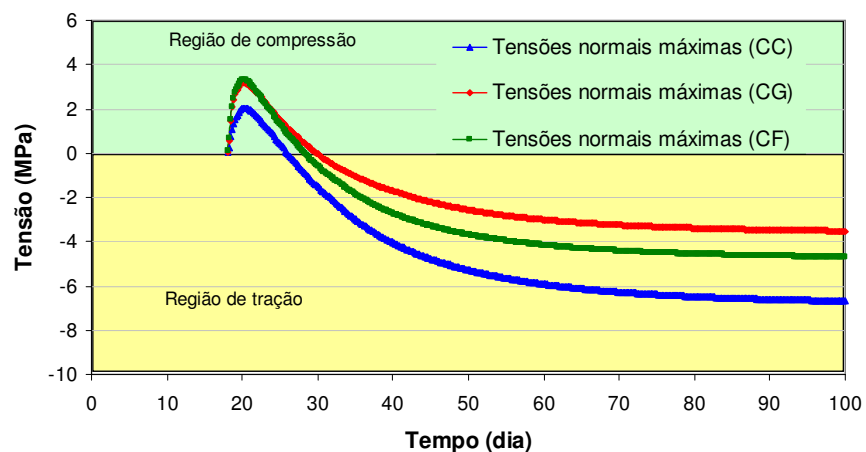


Figura 134: Evolução das tensões de tração na superfície dos concretos (Elemento 511).

Dadas as características específicas de cada concreto, a análise termomecânica resultou em grande diferença nos valores das tensões geradas, apesar das diferentes dosagens apresentarem comportamento térmico semelhante. Nas três regiões estudadas: próximo à interface concreto-rocha (Figura 132), no núcleo (Figura 133) e na superfície (Figura 134), o concreto CC resultou em tensões de tração da ordem do dobro do concreto CG, enquanto o concreto CF apresentou tensões intermediárias. Esse comportamento pode ser explicado pela diferença entre os módulos de deformação e fluência dos concretos estudados, conforme apresentados nas figuras 124 e 126. Os concretos contendo borracha de pneu apresentaram menor módulo de elasticidade, da ordem de 27% inferiores ao concreto de referência e maiores valores de fluência, em torno de 20% superiores ao concreto de referência, o que contribuiu para absorção e alívio das tensões de tração geradas. Segundo Mehta e Monteiro (1994), quanto menor o módulo de deformação, menor será a quantidade de tensão elástica de tração induzida para uma dada magnitude de retração e, quanto maior a fluência, maior será a relaxação de tensão e menor a tensão resultante de tração.

Nas figuras 135, 136 e 137 têm-se um comparativo entre a evolução das tensões de origem térmica e a evolução da resistência à tração para os concretos CC, CF e CG, respectivamente. Observa-se que, em todos os casos, as tensões geradas ultrapassam a resistência à tração dos concretos. Entretanto, no caso do concreto CC, isto ocorre mais cedo (aproximadamente aos 26 dias) do que nos concretos CF e CG (aos 38 e 60 dias, respectivamente). Isso significa que um quadro de fissuração de origem térmica poderia se instalar mais cedo e com maior intensidade numa estrutura elaborada com o concreto de referência CC do que numa elaborada com os concretos com adição de borracha CF e CG, o que confirma a hipótese de trabalho inicial da presente pesquisa, que a adição de borracha pode ser útil para controlar a fissuração térmica em concretos massa. Estes dados vão ao encontro de estudos de propagação de fissuras que indicaram que os compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu demandam maior tempo para apresentar fissuras e, quando essas ocorrem, aparecem de forma mais homogênea, descontínua e com menor abertura. Esse comportamento foi atribuído à capacidade das partículas de borracha de absorver energia e desviar o caminho original das micro-fissuras quando estas se propagam na interface com a pasta de cimento, atuando como obstáculos à formação e coalescência das mesmas, o que resulta em aumentos da capacidade de deformação do material (SEGRE *et al.*, 2006; TURATSINZE *et al.*, 2007).

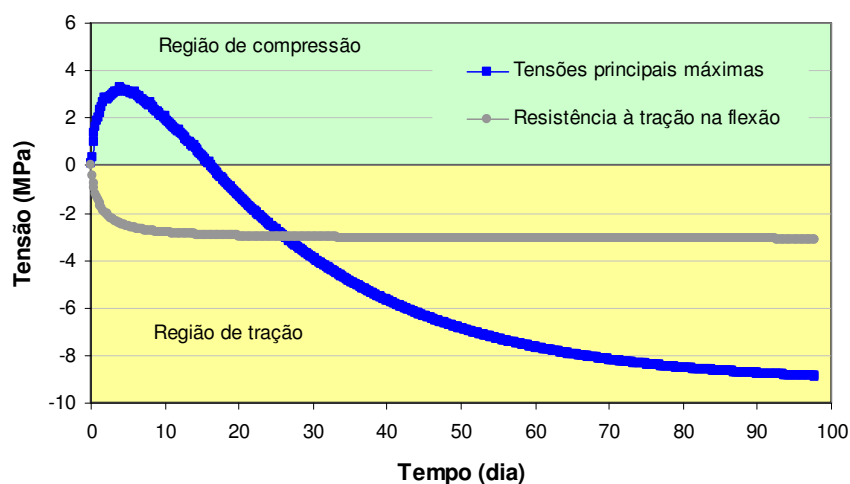


Figura 135: Concreto de referência (CC): Evolução das tensões de origem térmica x resistência à tração do concreto (Elemento 427).

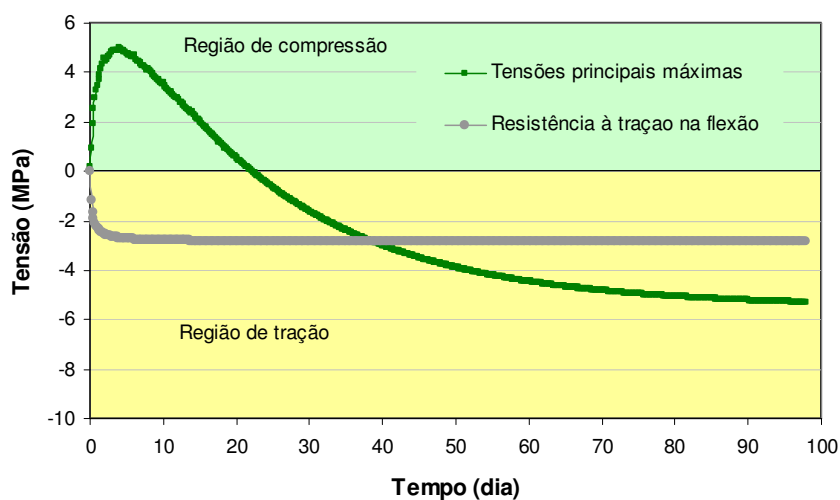


Figura 136: Concreto com partículas de pneu na forma de fibras (CF): Evolução das tensões de origem térmica x resistência à tração do concreto (Elemento 427).

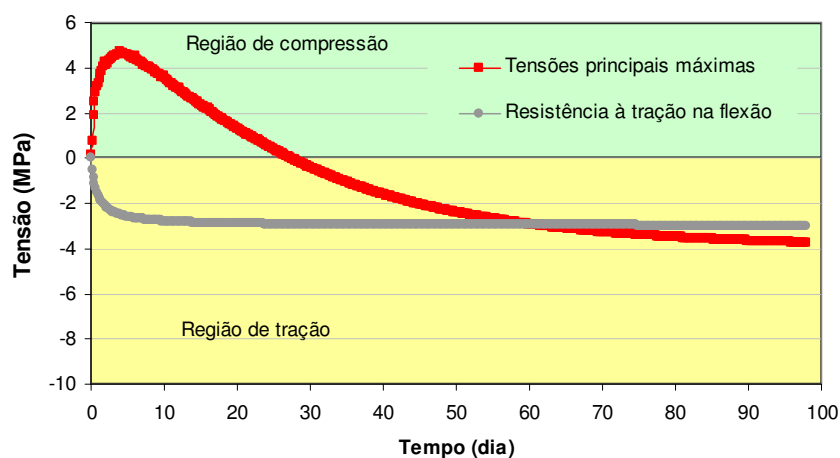


Figura 137: Concreto com partículas de pneu na forma de grânulos (CG): Evolução das tensões de origem térmica x resistência à tração do concreto (Elemento 427).

8.13. ASPECTOS REFERENTES À DURABILIDADE

Para verificar a viabilidade de uso dos concretos com partículas de borracha, decidiu-se realizar alguns ensaios que permitissem caracterizar sua durabilidade ao longo do tempo. Sabe-se que, para obter um bom desempenho de uma estrutura de concreto é fundamental que ela atenda às exigências mecânicas e que tenha uma vida útil adequada (SILVA FILHO, 2004). Desta forma, a durabilidade dos materiais constituintes de uma estrutura é um aspecto tão importante quanto a sua resistência.

Essa preocupação torna-se ainda mais forte quando se utilizam materiais alternativos na composição do concreto, principalmente resíduos, sendo de suma importância o estudo a respeito das propriedades que afetam a durabilidade e da sua suscetibilidade aos agentes agressivos, bem como as eventuais formas de neutralizar ou minorar os fenômenos de degradação.

Por estas razões, na terceira fase da pesquisa, além do comportamento termomecânico, foi analisado o desempenho de concretos com borracha de pneu ao longo do tempo, em relação ao comportamento de um concreto de referência. Para tanto, amostras de cada tipo de concreto (referência; dosagem contendo 10% de borracha de pneu em grânulos e dosagem contendo 10% de borracha de pneu em fibras) foram submetidas a testes físicos e mecânicos entre as idades de 7 dias e 728 dias. Análises visuais e por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas a fim de observar eventuais alterações no concreto.

8.13.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

As discussões referentes à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade até a idade de 728 dias encontram-se nos itens 8.1 (Figura 101) e 8.2 (Figura 103). Até os 728 dias, as dosagens de concreto contendo partículas de borracha de pneu apresentaram desenvolvimento semelhante à dosagem de referência, indicando que a incorporação desse material ao concreto não prejudica o desempenho mecânico do material ao longo do tempo.

8.13.2. Permeabilidade

A permeabilidade do concreto mede a capacidade desse material poroso de transferir fluidos sob um gradiente de pressão. O fluxo do fluido ocorre numa rede de poros formada pela porosidade inicial, não necessariamente conectada, e pelas micro e macro fissuras que foram induzidas por carregamentos mecânicos, que é influenciada pela ação do meio ambiente e por certos efeitos dependentes do tempo. As fissuras geralmente interligam os caminhos de fluxo e diminuem a resistência do material ao fluxo do fluido, resultando em um aumento da permeabilidade (CHOINSKA *et al.*, 2007).

Na Figura 138 o gráfico ilustra, ao longo do tempo, o comportamento dos concretos quando submetidos ao teste de permeabilidade à água sob pressão. Todos os concretos apresentaram coeficientes de permeabilidade à água da ordem de 10^{-11} m/s a 10^{-12} m/s, valores considerados satisfatórios e observados por outros pesquisadores em amostras de concreto massa (FURNAS, 1997). Esses resultados são interessantes do ponto de vista da durabilidade, pois mostram que a presença das partículas de borracha de pneu não aumenta a permeabilidade do concreto, mesmo em idades mais avançadas.

Benazzouk *et al.* (2004) e Bonnet (2004), por sua vez, investigaram a permeabilidade ao ar de argamassas com adição de borracha de pneu, encontrando valores para a permeabilidade específica da ordem de 10^{-17}m^2 , embora com uma forte tendência de redução da permeabilidade com o aumento no teor de borracha.

Em estudos conduzidos por Macedo (2005) e Bonnet (2004) verificou-se que uma menor profundidade de carbonatação era atingida em concretos e argamassas contendo partículas de pneu, quando comparadas com as amostras de controle, o que confirma a menor permeabilidade ao ar do material.

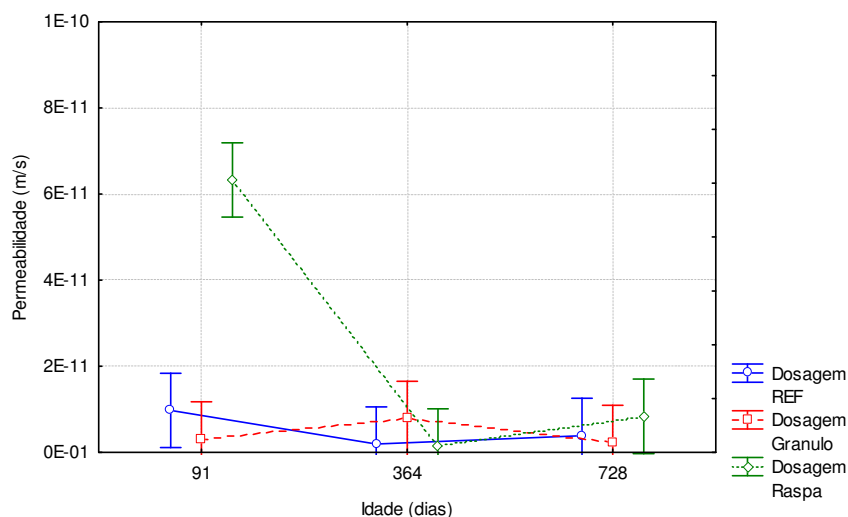


Figura 138: Permeabilidade à água sob pressão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

Na Tabela 41 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de permeabilidade à água sob pressão. A análise de variância indica que as variáveis testadas não influenciam significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%. Isto foi confirmado pelo teste de Tukey, que indicou que os resultados de todas as dosagens podem ser agrupados em um único grupo homogêneo, seja por tipo de concreto ou por idade de ensaio, como mostrado na Figura 139.

Tabela 41: Análise da variância aplicada aos resultados da permeabilidade.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	1,53E-21	2	7,66E-22	3,806	3,143252	0,076999
Idade	1,77E-21	2	8,87E-22	3,806	3,639736	0,055560
Error	3,17E-21	13	2,44E-22			

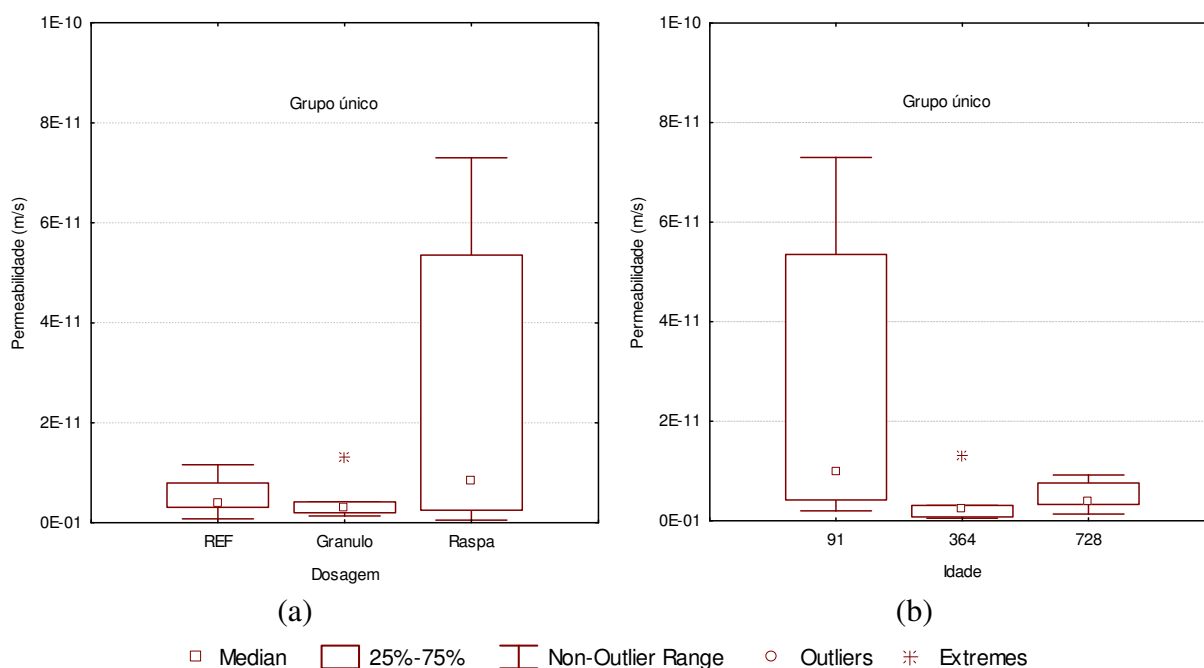


Figura 139: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da permeabilidade do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.13.3. Massa específica, índice de vazios e absorção

Assim como a permeabilidade, a absorção pode influenciar na durabilidade das estruturas de concreto por meio do controle da penetração de agentes agressivos. Variações nos valores de absorção são geralmente acompanhadas por variações do índice de vazios e da massa específica do concreto.

Nas Figuras 140 a 143 os gráficos ilustram o comportamento, em termos de massa específica, índice de vazios e absorção, dos concretos ensaiados em função do tempo. Observa-se que as amostras com partículas de pneu apresentaram, ao longo do tempo, resultados equivalentes aos do concreto de referência. Comportamentos semelhantes foram observados por Martins (2005) e Bignozzi e Sandrolini (2006), mas o contrário foi verificado por Bauer *et al.* (2001). Por outro lado, a absorção por capilaridade das amostras contendo partículas de borracha de pneu foi menor do que das amostras de referência, o que condiz com os estudos realizados por outros pesquisadores (BAUER *et al.*, 2001; BENAZZOUK *et al.*, 2004; BONNET, 2004; MACEDO, 2005). Cabe salientar que, aos 728 dias, verificou-se um aumento da absorção e do índice de vazios, que se manifestou em todas as dosagens, inclusive na de concreto de controle. O mesmo foi atribuído à condição de cura prolongada em câmara úmida, que pode ter contribuído para a lixiviação de produtos solúveis de hidratação.

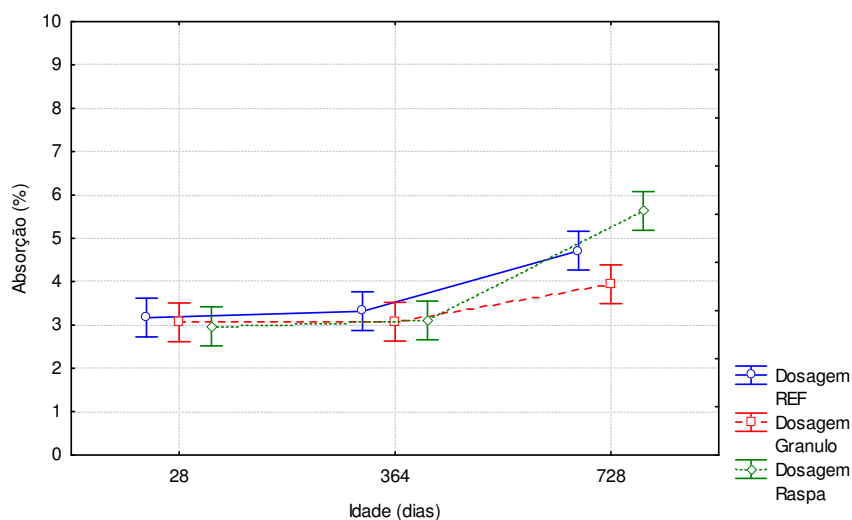


Figura 140: Absorção por imersão em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

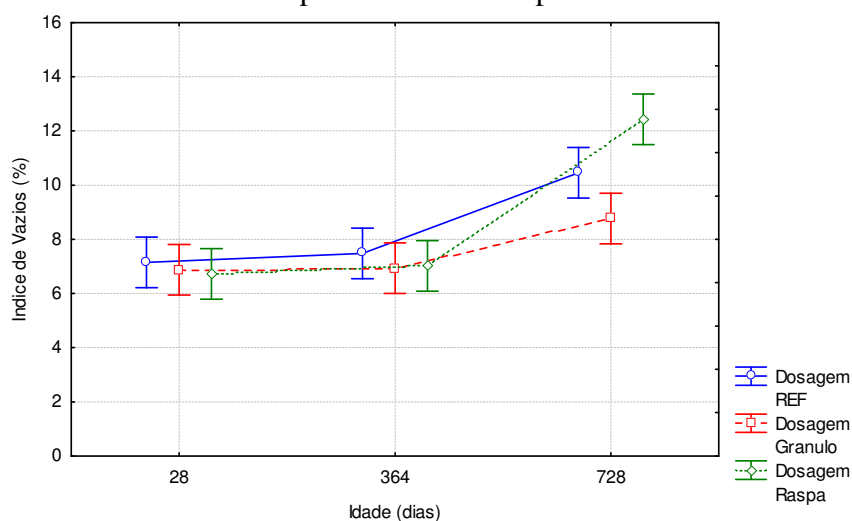


Figura 141: Índice de vazios em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

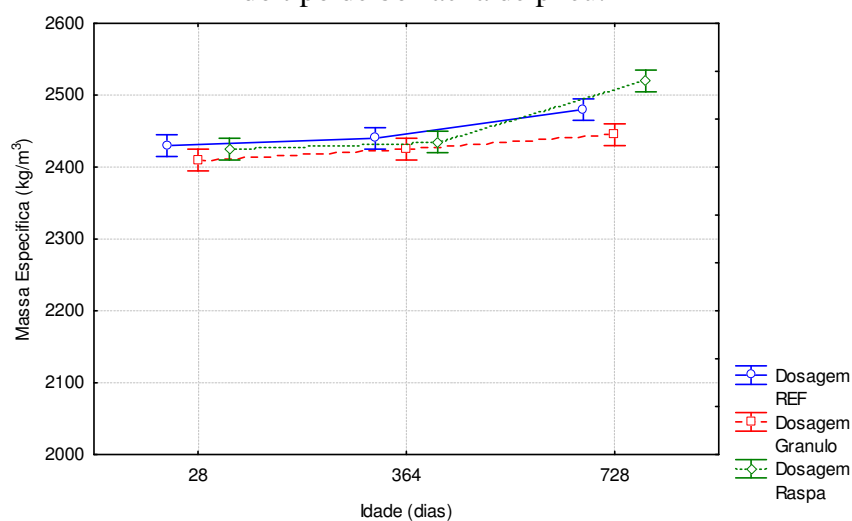


Figura 142: Massa específica em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

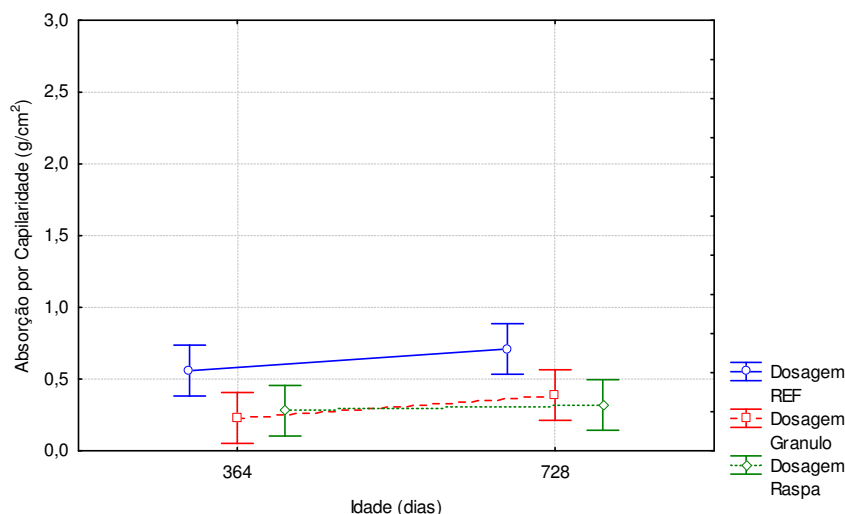


Figura 143: Absorção por capilaridade em função da idade do concreto e do tipo de borracha de pneu.

Nas Tabelas 42 a 45 são apresentados os resultados da ANOVA aplicada aos resultados dos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade do concreto. As análises de variância indicaram que as variáveis não influenciam significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%, o que foi confirmado pelo teste de Tukey, que indicou que os resultados de todas as dosagens podem ser agrupados em um único grupo homogêneo. Esses resultados são interessantes do ponto de vista da durabilidade do concreto, pois mostram que a presença das partículas de borracha não aumenta a porosidade do concreto ao longo do tempo (figuras 144 a 147).

Tabela 42: Análise da variância aplicada aos resultados da absorção por imersão.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,9283	2	0,4642	3,806	2,182	0,152422
Idade	10,8661	2	5,4330	3,806	25,535	0,000031
Error	2,7660	13	0,2128			

Tabela 43: Análise da variância aplicada aos resultados do índice de vazios.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	4,513	2	2,256	3,806	2,344	0,135166
Idade	49,840	2	24,920	3,806	25,882	0,000029
Error	12,517	13	0,963			

Tabela 44: Análise da variância aplicada aos resultados da massa específica.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	3511	2	1756	3,806	6,4	0,011859
Idade	12144	2	6072	3,806	22,0	0,000067
Error	3589	13	276			

Tabela 45: Análise da variância aplicada aos resultados da absorção por capilaridade.

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F crítico	F calculado	p-valor
Dosagem	0,290600	2	0,145300	4,459	16,3106	0,001504
Idade	0,040833	1	0,040833	5,318	4,5837	0,064679
Error	0,071267	8	0,008908			

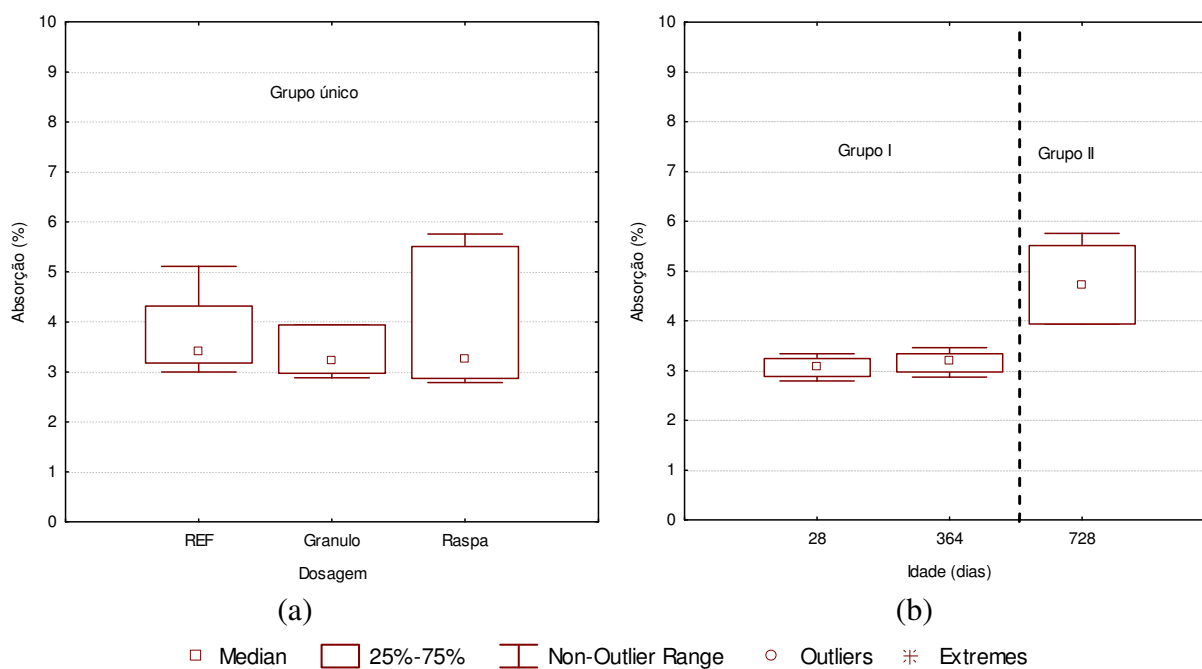


Figura 144: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da absorção por imersão do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

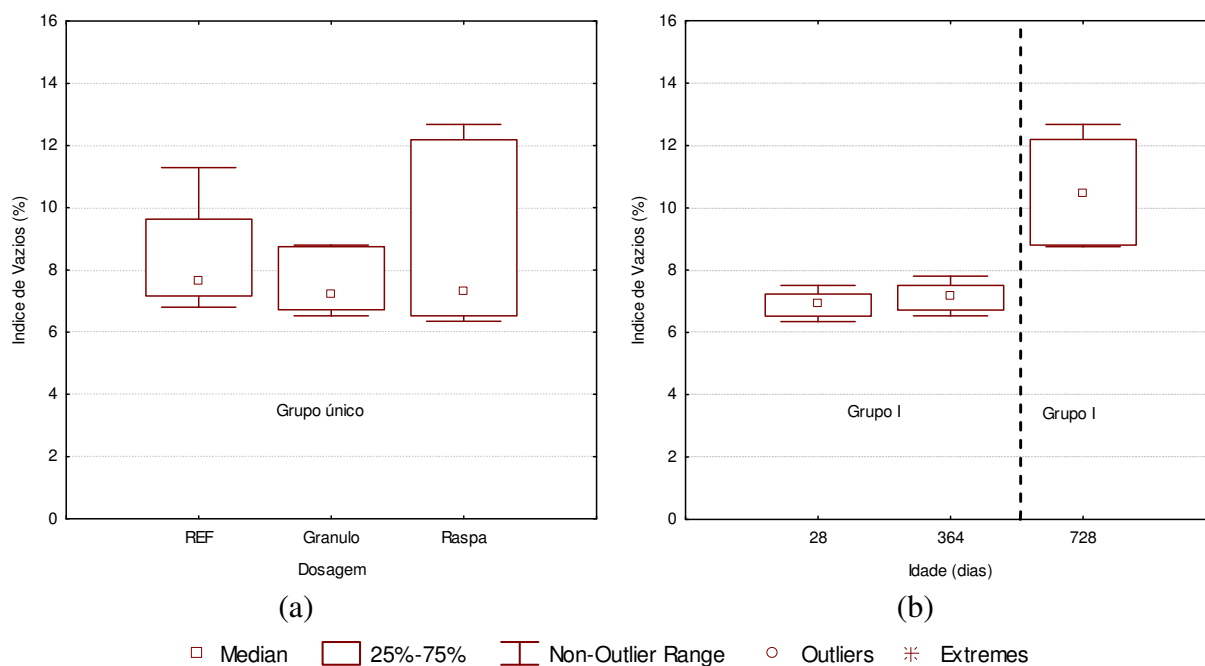


Figura 145: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, do índice de vazios do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

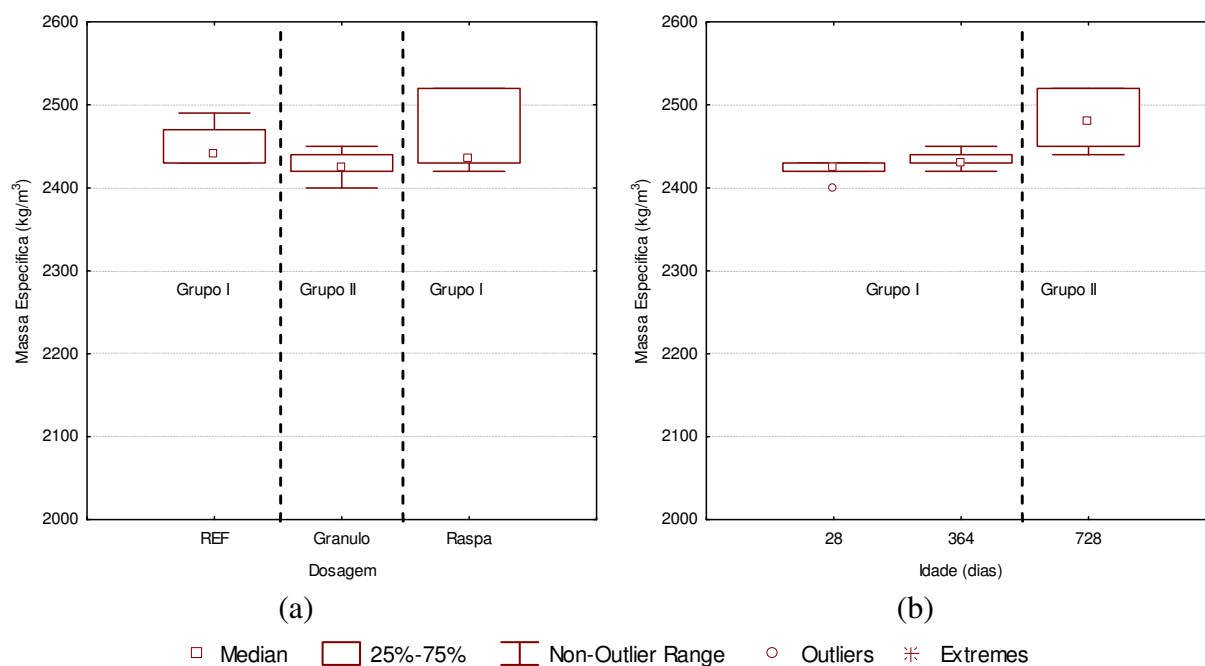


Figura 146: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da massa específica do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

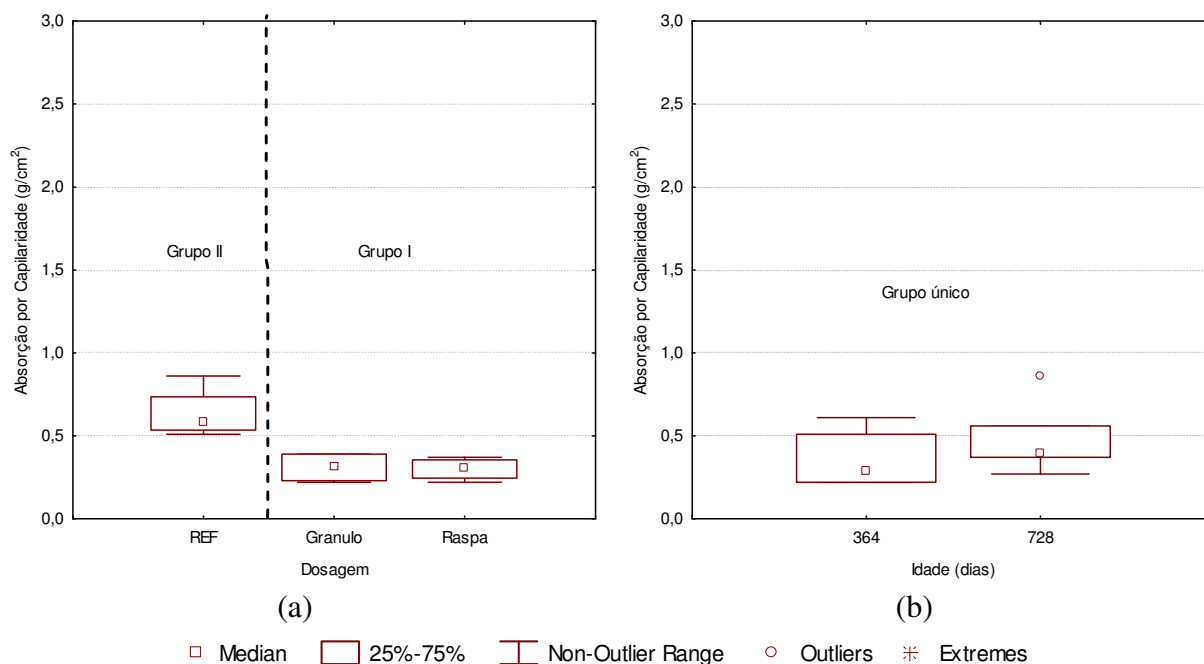


Figura 147: Agrupamento de resultados homogêneos, conforme teste de Tukey, da absorção por capilaridade do concreto em função (a) do tipo de borracha e (b) da idade de ensaio.

8.13.4. Aspecto visual das amostras de concreto

Na Figura 148 pode-se observar o aspecto externo de algumas amostras após 364 e 728 dias de armazenamento em câmara úmida. Já na Figura 149 pode-se ver um detalhe das superfícies de fratura de algumas amostras após a realização do ensaio de absorção por capilaridade aos 364 e 728 dias.

Macroscopicamente, verifica-se que as amostras não apresentam nenhum sinal de manchamento ou fissuração em torno das partículas de borracha.

Algumas manchas de ferrugem, que podem ser notadas na figura 148, foram atribuídas ao contanto eventual dos corpos-de-prova com as prateleiras de aço onde eram acondicionadas as amostras.



(a) 364 dias



(b) 364 dias



(c) 364 dias



(a) 728 dias



(b) 728 dias



(c) 728 dias

Figura 148: Aspecto geral dos corpos-de-prova aos 364 e 728 dias de idade. (a) Dosagem de referência; (b) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por grânulos de borracha de pneu; (c) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por fibras de pneu.

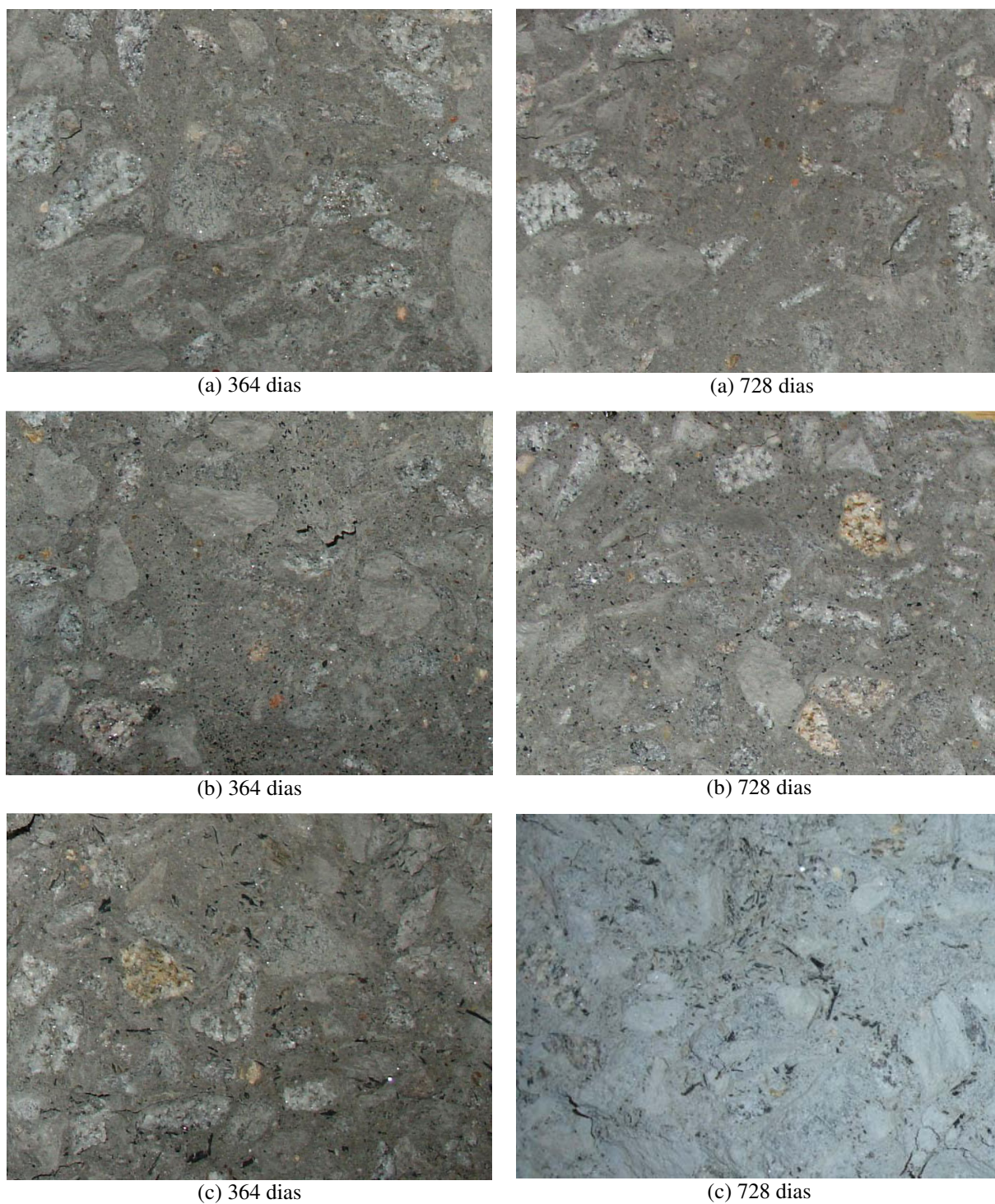


Figura 149: Aspecto interno dos corpos-de-prova aos 364 e 728 dias de idade.
(a) Dosagem de referência; (b) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por grânulos de borracha de pneu; (c) Dosagem com substituição de 10% do volume areia por fibras de pneu.

8.13.5. Análise microestrutural

Na Figura 150 estão apresentadas algumas micrografias mostrando a microestrutura das amostras de concreto aos 91 e 728 dias de idade. As mesmas foram realizadas com o objetivo de identificar possíveis sinais de deterioração incipiente provocada pela presença das partículas de pneu.

As amostras foram inicialmente analisadas a olho nú e, posteriormente, por microscopia eletrônica de varredura. As micrografias apresentadas são representativas de diversas áreas analisadas, nas quais não foram observadas bordas ou quaisquer produtos de reação estranhos à estrutura comum do concreto.

É interessante notar que, nesta fase da pesquisa, no caso da dosagem do concreto de referência, utilizou-se um aditivo incorporador de ar para se obter um teor de ar aprisionado semelhante ao verificado nos concretos com borracha. Apesar de não se observar a mesma incidência de bolhas de ar, quando se compara as figuras 150(b) e 150(c), verifica-se que as bolhas na amostra do concreto com fibras são maiores do que as existentes no concreto com partículas em forma de grânulos, o que pode resultar na mesma quantidade total de ar aprisionado.

Por meio da análise microscópica não foi possível comprovar o aumento do índice de vazios na idade de 728 dias, em relação à idade de 364 dias, como ficou evidenciado pela figura 141.

Raghavan *et al.* (1998) e Segre (1999) estudaram a estabilidade química da borracha de pneu submetida a ambientes altamente alcalinos por um período de 4 meses. Nesse período foram realizados ensaios de determinação da perda de massa, resistência à tração, análise microestrutural e determinação da variação do pH das soluções com borracha de pneu em imersão, não sendo verificada nenhuma grande variação das propriedades da borracha.

Na Figura 151 observa-se o aspecto superficial de partículas de pneu antes e após sua incorporação ao concreto. Verifica-se que, mesmo após 728 dias, as partículas de pneu não apresentam sinais de deterioração derivados da exposição ao ambiente alcalino típico do interior de concretos jovens.

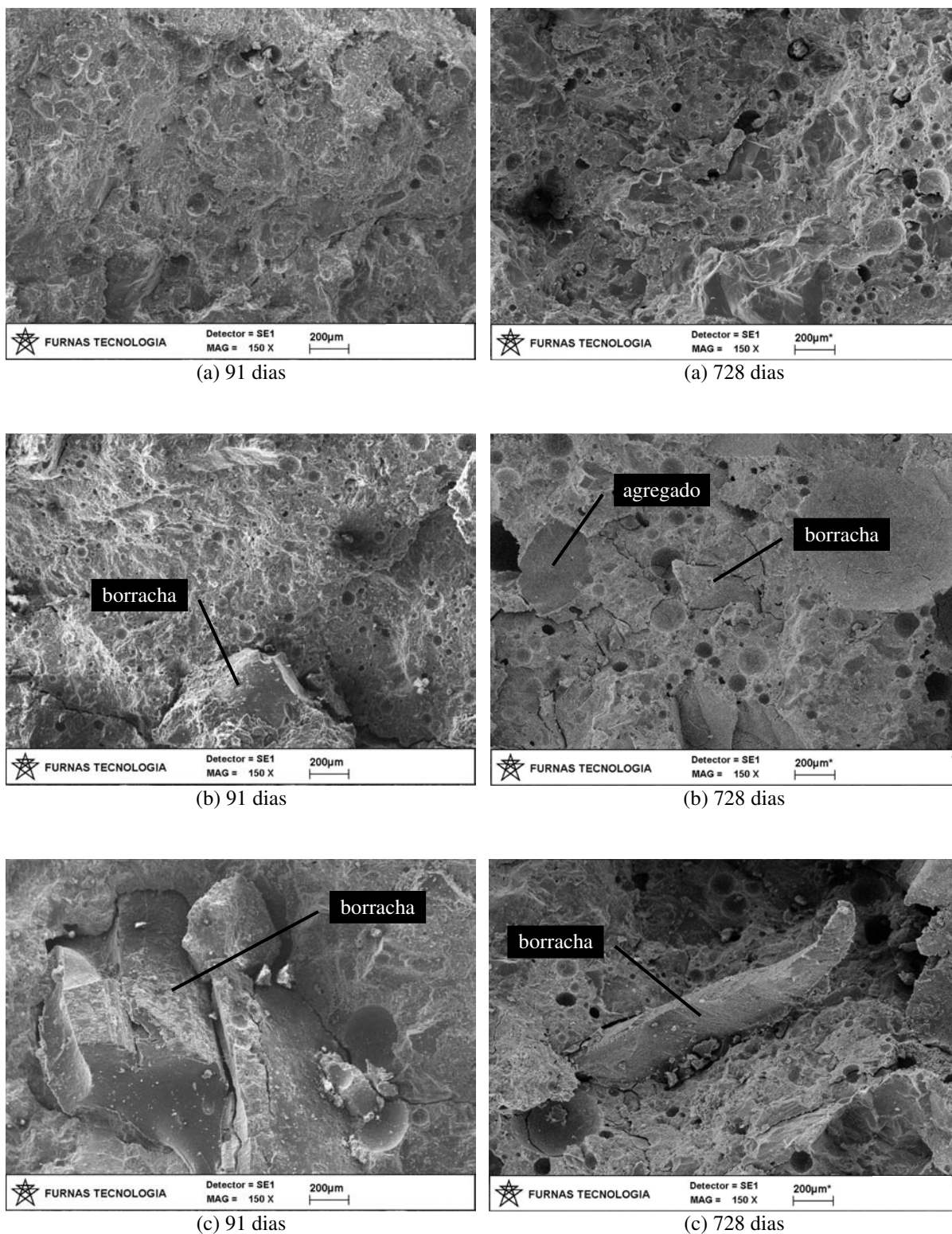
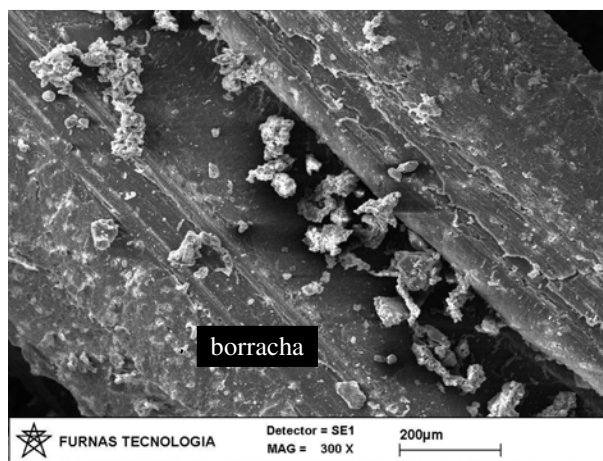
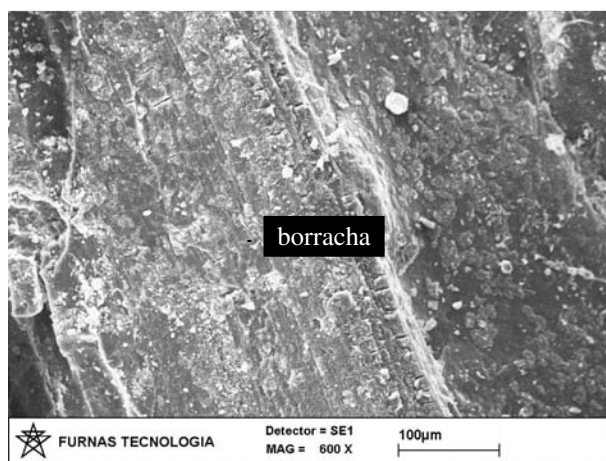


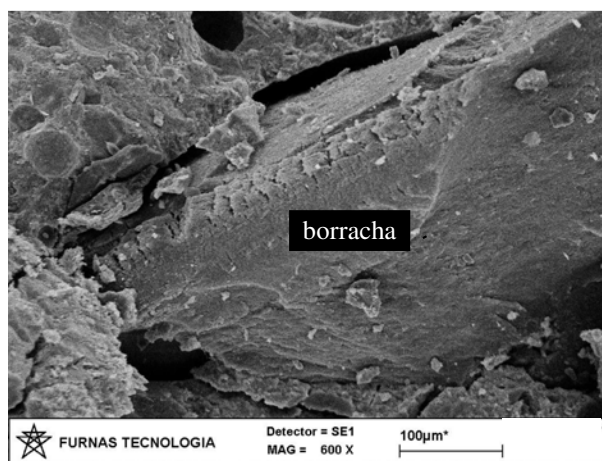
Figura 150: Micrografias da microestrutura dos concretos aos 91 e 728 dias de idade.
 (a) Referência; (b) Substituição de 10% do volume areia por grânulos de borracha de pneu;
 (c) Substituição de 10% do volume areia por fibras de pneu.



(a)



(b)



(c)

Figura 151: Aspecto superficial de partículas de pneu: (a) antes da incorporação ao concreto; (b) após 91 dias de incorporação ao concreto; (c) após 728 dias de incorporação ao concreto.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são revisadas as principais tendências de comportamento registradas no programa experimental deste trabalho e apresentadas as conclusões que puderam ser extraídas pela autora da análise dos seus resultados. Adicionalmente, são lançadas algumas sugestões de pesquisas futuras que podem vir a ser desenvolvidas para complementar esses resultados e ampliar o conhecimento na área de compósitos de matriz cimentícia com adição de partículas de borracha de pneu.

9.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS: RESUMO DAS TENDÊNCIAS DE COMPORTAMENTO OBSERVADAS

Neste trabalho, dosagens de concreto massa com adição de borracha de pneu na forma de grânulos e fibras foram avaliadas quanto as suas características mecânicas, elásticas, térmicas e de durabilidade. O programa experimental buscou avaliar como variavam estas características, em resposta a variações na forma, teor, granulometria e tratamento superficial aplicado às partículas de borracha. Considera-se que os objetivos gerais e específicos desta pesquisa foram alcançados e, com base nos resultados obtidos, acredita-se que podem ser justificadas as seguintes respostas às hipóteses formuladas:

9.1.1. Quanto à granulometria e ao teor de borracha de pneu

- Embora o teor ideal de borracha para algumas propriedades esteja situado em valores de cerca de 6%, o máximo patamar para aproveitamento da borracha de pneu no concreto, sem prejuízo considerável das propriedades mecânicas, fica em torno de 10% de partículas de borracha em substituição parcial do volume de areia, o que corresponde a um consumo de aproximadamente 29 kg de borracha por metro cúbico de concreto;

- O módulo de elasticidade é menos sensível às variações no teor de borracha do que a resistência mecânica;
- Teores de substituição da areia por partículas de borracha acima de 10% levam a uma redução sensível das resistências à compressão e à tração;
- No caso de adoção de um teor de substituição de 10%, pode-se utilizar com sucesso tanto partículas de pneu na forma de grânulos (obtidas da trituração de carcaças de pneus inservíveis) quanto partículas na forma de fibras (obtidas a partir de processos de recauchutagem), desde que as dimensões máximas características das mesmas fique em torno de 1,5mm e 4,8mm, respectivamente;
- A adição de partículas de borracha tende a causar a incorporação de ar. O teor de ar aprisionado no concreto é diretamente proporcional ao teor de borracha e inversamente proporcional ao tamanho das partículas.

9.1.2. Quanto ao tratamento superficial

- Não foi possível estabelecer uma correlação entre os tratamentos utilizados e a qualidade da interface borracha / matriz, uma vez que as amostras contendo partículas com e sem tratamento superficial resultaram em desempenho mecânico equivalente e apresentaram aspectos semelhantes na interface.

9.1.3. Quanto ao comportamento termomecânico

- A incorporação da borracha de pneu no concreto foi uma estratégia eficiente para minimizar os riscos de fissuração devido às tensões de origem térmica, dada a maior deformabilidade dos concretos com borracha de pneu;
- Os gradientes térmicos obtidos e a evolução das temperaturas são semelhantes entre os concretos de referência e aqueles contendo partículas de pneu;
- Embora as temperaturas máximas previstas sejam semelhantes para todos os concretos, aqueles contendo borracha de pneu geraram menores tensões de tração, da ordem da metade das tensões registradas no concreto de controle;

- No concreto convencional, as tensões de tração geradas pela variação de temperatura superam a resistência à tração mais cedo do que no caso dos concretos contendo partículas de pneus;
- Dentre os concretos contendo partículas de pneu, as tensões de tração geradas são menores quando são usadas partículas na forma de grânulos.

9.1.4. Quanto à durabilidade

- A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos com e sem borracha de pneu apresentaram um comportamento de crescimento ao longo do tempo, como esperado;
- Os concretos contendo borracha de pneu apresentaram valores de resistência e de módulo de elasticidade inferiores ao concreto de referência, sem borracha, em todas as idades avaliadas;
- O coeficiente de permeabilidade à água sob pressão de todas as amostras de concreto se manteve aproximadamente constante ao longo do tempo;
- A absorção por imersão e a absorção por capilaridade dos concretos com borracha de pneu foram semelhantes às do concreto de referência, em todas as idades avaliadas.

9.1.5. Quanto ao custo e ao meio ambiente

- O melhor desempenho termomecânico dos compósitos de matriz cimentícia com adição de partículas de borracha de pneu pode justificar a eliminação da necessidade de refrigeração da água em algumas aplicações de concreto massa, resultando num forte impacto sobre o custo. Como se sabe, a refrigeração é o principal processo usado atualmente para minimizar a fissuração de origem térmica, mas a mesma onera consideravelmente o custo das obras. O custo com gelo em escamas pode ser estimado em, aproximadamente, R\$ 4,50 por metro cúbico de concreto, em obras de grande porte, como barragens. Em obras de pequeno porte o custo aumenta, por um efeito de escala, e, geralmente, se torna inviável. Desta forma, em uma obra com volumes de concreto em torno de 1 milhão de metros cúbicos, por exemplo, o emprego da borracha poderia resultar em uma economia de até R\$ 4.500.000,00 em materiais,

processo e mão-de-obra, além de evitar o gasto com a central de gelo, que pode chegar a R\$ 3.000.000,00;

- Os benefícios ambientais da utilização do compósito estudado neste trabalho também podem ser notáveis, uma vez que, para um consumo de 29 kg/m^3 de partículas de pneu, como ocorreu no presente caso, a cada 100.000 m^3 de concreto seriam retirados do ambiente 300.000 pneus inservíveis, ao mesmo tempo em que seriam poupadas 7.000 toneladas de areia, aproximadamente;
- O aproveitamento dos pneus inservíveis resulta em benefícios sócio-econômicos na forma de melhoria da qualidade do meio ambiente, redução de risco de vetores de doenças e geração de empregos para coleta e beneficiamento do resíduo.

9.2. CONCLUSÕES

Tendo em vista as observações acima, conclui-se que:

- I) O uso de concretos com borracha de pneu pode ser uma alternativa eficiente para minimizar o risco do surgimento de fissuras de origem térmica, quando comparados a um concreto convencional, trazendo ganhos econômicos e ambientais;
- II) A incorporação de partículas de borracha tende a incrementar a incorporação de ar, fenômeno que deve ser levado em conta quando se usa este tipo de compósito. Apesar disto, é possível produzir concretos massa estruturalmente eficientes com adição de partículas de borracha;
- III) O uso de tratamentos superficiais nas partículas de borracha a serem incorporadas ao concreto ainda não se justifica, dada a pequena eficiência, maior custo e maior complexidade. Estudos adicionais, todavia, deveriam ser efetuados para verificar se a leve tendência de melhora nas propriedades pode ser incrementada;
- IV) Com base nos resultados obtidos até a idade de 2 anos, verifica-se que a adição de 10% (no presente caso, equivalentes a 29 kg/m^3) de borracha de pneu ao concreto não prejudica as características de durabilidade do compósito;

- V) Um maior aproveitamento de pneus pode ser obtido gerando compósitos especialmente formulados para aplicações de baixa exigência estrutural, com teores de adição de borracha de pneu que podem chegar a 60 kg/m^3 .

É importante ressaltar que, não obstante as diferentes formas e teores de borracha de pneu utilizados por outros pesquisadores, muitos trabalhos não explicitam a metodologia e a forma de substituição da borracha no concreto, o que dificulta a discussão e a análise comparativa dos resultados obtidos. Ainda neste contexto, deve-se levar em consideração a grande diferença de massa específica existente entre a borracha e os demais materiais do concreto e realizar qualquer substituição em relações de volume e não de massa, sob pena de gerar composições irreais.

9.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam que o uso de compósitos formados pela adição de partículas de borracha a matrizes cimentícias se mostra promissor para aplicações onde se necessita de um concreto com maior capacidade de deformação. Estes dados necessitam ser confirmados e ampliados por estudos adicionais. A seguir são apresentadas algumas sugestões de estudos que poderiam auxiliar a complementar e avançar o conhecimento na área:

- Realizar estudos de tenacidade à fratura de concretos com partículas de borracha na forma de grânulos e de fibras a fim de identificar os mecanismos de fratura que levam ao primeiro apresentar maior resistência à fissuração que o segundo;
- Executar o programa referente à segunda fase desta pesquisa utilizando fibras/raspas de pneu com variados fatores de forma;
- Avaliar o comportamento termomecânico de concretos contendo maiores teores de borracha de pneu, a fim de identificar qual o teor mais adequado, considerando o aumento na capacidade de deformação e fluência, dentro de uma faixa de perda de resistência aceitável, dependendo da aplicação desejável;

- Comprovar os resultados das análises termomecânicas, por meio da comparação dos dados estimados com resultados experimentais, obtidos pelo monitoramento e instrumentação de estruturas reais executadas com concretos similares ao CC, CG e CF estudados neste trabalho;
- Ainda com relação às análises termomecânicas, realizar um estudo de dosagem tentando padronizar os traços de concreto, referência e com adição de partículas de pneu, com base em uma resistência característica única, para uma determinada idade de controle, a fim de se averiguar, com melhor precisão, a viabilidade de substituição do concreto convencional por um com adição de partículas de pneus, sem perdas significativas de eficiência estrutural;
- Avaliar a durabilidade de concretos contendo teores superiores a 10% de partículas de borracha de pneu.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

_____. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994. 9 p.

_____. **NBR 5748 - Análise química de cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre**. Rio de Janeiro, 1993. 3 p.

_____. **NBR 6118 - Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 1978 (norma cancelada).

_____. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003. 221 p.

_____. **NBR 7211 - Agregado para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

_____. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

_____. **NBR 7222 - Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

_____. **NBR 8224 - Concreto endurecido - Determinação da fluência**. Rio de Janeiro, 1983. 8 p.

_____. **NBR 8522 - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação**. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

_____. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____. **NBR 9833 - Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

_____. **NBR 10.004. Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

_____. **NBR 10.786. Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água**. Rio de Janeiro, 1989. 4 p.

_____. **NBR 10.908 - Aditivos para Argamassa e Concretos – Ensaio de Uniformidade**. Rio de Janeiro, 1986. 15 p.

_____. NBR 11578 - **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. NBR 12142 - **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1991. 3 p.

_____. NBR 12815 - **Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 2 p.

_____. NBR 12816 - **Concreto endurecido – Determinação da capacidade de deformação do concreto submetido à tração na flexão**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 6p.

_____. NBR 12817 - **Concreto endurecido – Determinação do calor específico**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 9 p.

_____. NBR 12818 - **Concreto – Determinação da difusividade térmica**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 9 p.

_____. NBR 12819 - **Concreto e argamassa – Determinação da elevação adiabática da temperatura**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 3 p.

_____. NBR 12820 - **Concreto endurecido - Determinação da condutividade térmica**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 7 p.

_____. NBR 12821 - **Preparação de concreto em laboratório**. Rio de Janeiro, ABNT, 1993. 5p.

_____. NBR NM 15 - **Cimento Portland – análise química - determinação de resíduo insolúvel**. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

_____. NBR NM 17 - **Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama**. Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

_____. NBR NM 18- **Cimento Portland – determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2004. 4 p.

_____. NBR NM 23 - **Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, 2000. 5 p.

_____. NBR NM 30 - **Agregados - determinação da absorção de água em agregados miúdos**. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

_____. NBR NM 33 - **Concreto - Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

_____. NBR NM 43 - **Cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

_____. NBR NM 47 - **Concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco – método pressométrico**. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

_____. NBR NM 52 - **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

_____. NBR NM 53 - **Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

_____. NBR NM 65 - **Cimento Portland – determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

_____. NBR NM 67 - **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

_____. NBR NM 76 - **Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine)**. Rio de Janeiro, 1998. 12 p.

_____. NBR NM 248 - **Agregados: determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASTM – American Society for Testing and Materials. C151, 2005 - **Standard test method for autoclave expansion of hydraulic cement**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, DOI: 10.1520/C0151-05.

CEB/FIP - COMITE EUROPÉEN DU BETON - **Federation Internationale de la Precontrainte** (CEB/FIP). Model Code, 1990.

EHE - COMISION PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **Instrucción Española Hormigón Estructural** (EHE), 1999.

EUROCODE 2. **Disign of Concrete Structures**. Comission of the European Communities. 1992.

FURNAS Centrais Elétricas S/A. Departamento de Apoio e Controle Técnico. **Procedimento 01.002.069 - Análise Química por Espectrofotometria de Absorção Atômica – Técnica de Solubilização Ácida**.

_____. **Procedimento 01.008.001 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação**.

_____. **Procedimento 01.007.015 - Concreto - Resistência à Tração Direta - Dispositivo Leroy.**

_____. **Procedimento 01.009.004 - Argamassa e concreto - Determinação da Variação Autógena.**

_____. **Procedimento 04.015.006 - Microscopia Eletrônica de Varredura - Preparação de Amostras.**

_____. **Procedimento 04.015.007 - Aparelho de Metalização de Amostras - Operação.**

_____. **Procedimento 04.015.008 - Microscópio Eletrônico de Varredura - Operação.**

_____. **Procedimento 04.015.012 - Concreto - Análise da Microestrutura.**

JSCE - Japan Society of Civil Engineers. JSCE-SF4:1984 - **Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.** JSCE Standard for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete, 1984. pp.45-51.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCEM – Associação Brasileira da Construção Metálica. **Prêmios ABCEM 2003 - Categoria Pontes e Viadutos: Ponte Juscelino Kubistchek.** Revista Metálica. Edição 60. Maio/Junho, 2003.

ACI – American Concrete Institute. ACI Committee 207 - **Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete**, Michigan - USA, 1991.

ACI – American Concrete Institute. ACI Committee 207. **Guide to Mass Concrete.** ACI 207.1R-05, 2005. 30 p.

ACI – American Concrete Institute. ACI Committee 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete and Complementary.** Journal of the ACI, Farmington Hills, 1995.

ACI – American Concrete Institute. ACI Committee 548. **State-of-the-Art Report on Polymer-Modified Concrete.** Materials Journal, Vol 91, Issue 5, pp.511-515, 1994.

AİTCIN, P. C. – **Concreto de Alto Desempenho** – Ed. PINI, São Paulo-SP, 2000 – págs. 113-179.

AİTCIN, P.C.; NEVILLE, A. **How the water-cement ratio affects concrete strength.** Concrete International. [S.I], v.25, n.8, p. 51-58, august, 2003.

AKASAKI, J.L., NIRSCHL, G.C., FIORITI, C.F. **Análise experimental da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de borracha vulcanizada.** Anais do 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu. 2001.

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.** Anais do 45^o Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória, 2003.

ALBANO, C., CAMACHO, N., REYES, J., FELIU, J.L., HERNÁNDEZ, M. **Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing.** Composites Structures, vol.71, pp. 439-446, 2005.

ALBUQUERQUE, A. C., ANDRADE, M. A. S., NETO, M. M. S., CORREA, M. I. F., CARDOSO, C. G., MACEDO, D. C. B., CALMON, J. L. **Concreto com Borracha de Pneu: Uma Revisão Bibliográfica.** 44^o Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte. 2002.

ALBUQUERQUE, A. C. ; ANDRADE, M. A. S. ; ANDRADE, W. P. ; SILVA, O. C. ; MARTINS, W. **Adição da Borracha de Pneu ao Concreto Compactado Com Rolo.** In: Anais do 46^o Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2004a.

ALBUQUERQUE, A. C. ; HASPARYK, N. P. ; ANDRADE, M. A. S. ; CORREA, M. I. F. ; S. NETO, M. M. ; MACEDO, D. C. B. ; CARDOSO, C. G. **Investigation of Different Treatments in Tire Rubber with a View to Concrete Application.** Conference on Use of the Recycled Materials in Building and Structures, RILEM, Barcelona, 2004b.

ALBUQUERQUE, A. C. ; ANDRADE, M. A. S. ; MACEDO, D. C. B. ; CARDOSO, C. G. ; CORREA, M. I. F. ; S. NETO, M. M. **Use of Tire Rubber as Concrete Aggregate.** In: 7th ICCTDC, Kuala Lumpur. Proceedings of 7th International Conference on Concrete Technology in Development Countries, C036, 2004c.

ALBUQUERQUE, A. C., HASPARYK, N. P., ANDRADE, M. A. S., ANDRADE, W. P. **Polymeric Admixtures as Bonding Agent between Tire Rubber and Concrete Matrix.** ACI - Special Publication 229, Michigan/USA, v. 229, p. 479-496, 2005.

ALBUQUERQUE, A.C.; CALMON, J. L. ; SILVA FILHO, L. C. P. **Uso da Borracha de Pneu em Materiais Cimentícios para Elementos Construtivos - Estado da Arte.** In: II Seminário Mato-grossense de Habitação de Interesse Social, 2007, Cuiabá. Anais do 2º SHIS. Cuiabá : UFMT, 2007.

ALBUQUERQUE, A.C.; CALMON, J. L. ; SILVA FILHO, L. C. P. ; GRAÇA, N.G. **Caracterização Mecânica de CCR com Borracha de Pneu** In: Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto, RCC Symposium, Salvador, 2008a.

ALBUQUERQUE, A.C.; CALMON, J. L. ; SILVA FILHO, L. C. P. **Análises de regressão não-linear de propriedades físicas e mecânicas de concretos com borracha de pneu.** In: Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008b.

ALBUQUERQUE, A.C.; SILVA FILHO, L. C. P. ; CALMON, J. L. ; ANDRADE, M.A.S. **Physical and Mechanical Properties of Rubberized Concretes.** In: 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 2008, Istanbul - Turkey. CD. Stanbul - Turkey, 2008c.

ALBUQUERQUE NETO, J.R.; PACHECO, E.B.A. ; FURTADO, C.R.V ; VISCONTE, L.L.Y. **Métodos de Reciclagem de Borrachas.** Jornal de Plásticos, site www.jorplast.com.br, 11 jan. 2006.

ARAÚJO NETO, A.M., COSTA, M.V.S., GONÇALVES JR., P.P.B., SOUZA, P.S.L. **Avaliação da Substituição Parcial do Agregado Miúdo por Raspa de Pneu, para Concretos Feitos em Belém – PA.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, CBC0086, pp.1-16, 2006.

BARLUENGA, G., HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. **SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour.** Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 527-535, 2004.

BARROS DA PENHA, J.R., MORAES, R.F.G., ASSUNÇÃO, L.T., MOREIRA, F.E.B. PEREIRA, M.S., FURTADO, J.B.M. **Estudo e desenvolvimento de material compósito: CAD auto-adensável com adição de fibra de borracha.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro. 2006.

BATISTA, E.L. **Estudo da influência do tipo e teor de agregado pulverizado e do consumo de água nas propriedades do concreto compactado com rolo para barragens.** Dissertação de Mestrado. UFG, 2004.

BAUER, R. J. F., TOKUDOME, S., GADRET, A. D. **Estudo de Concreto com pneu moído.** Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu. 2001.

BENAZZOUK, A., DOUZANE, O., QUÉNEUDEC, M. **Transport fluids in cement-rubber composites.** Cement and Concrete Composites, vol. 26, pp. 21-29, 2004.

BIGNOZZI, M. C., SANDROLINI, F. **Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete.** Cement and Concrete Research. vol. 36, pp.735-739, 2006.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Pneus.** Área de operações industriais 2 - Gerência setorial 2. Junho, 1998. 34 pg.

BONNET, S. **Materiaux cimentaires a haute deformabilite par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usages.** These de Docteur de L'Universite Toulouse III, 2004.

BRASIL – Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 23**, de 12 de dezembro de 1996. 1996.

BRASIL – Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 258**, de 26 de agosto de 1999 (texto modificado em 21 de março de 2002 pela resolução nº 301). 2002a.

BRASIL – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Instrução Normativa nº 8**, de 15 de maio de 2002. 2002b.

CALLEGARI-JACQUES, S.M. **Bioestatística - princípios e aplicações.** Ed. Artmed, São Paulo, 2003.

CALLEJA, J; **Las puzolanas.** Monografías del Instituto Eduardo Torroja – de la construcción y del cemento, Madrid, 1969.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. LTC Editora. Rio de Janeiro, 2002.

CALMON, J. L. **Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicacion a las presas durante la etapa de construcción.** Tesis Doctoral - Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 1995.

CALMON, J.L. VERONEZ, M, SANTOS, S.B., ANDRADE, M.A. S. **A study on thermal properties of high performance concretes with different types of superplasticizers.** Proceedings of INCOS 05: International Conference on Concrete for Structures INCOS 05, Coimbra, pp. 21-28. 2005.

CHOINSKA M., KHELIDJ A., CHATZIGEORGIOU G., PIJAUDIER-CABOT G. **Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete,** Cement and Concrete Research, vol. 37, pp.79-88, 2007.

CIMINO, M.A. **Gerenciamento de Pneumáticos Inservíveis: Análise crítica de procedimentos operacionais e tecnologias para minimização, adotados no território nacional.** Dissertação de Mestrado. UFSCar. 2004.

DIAS, E.G.; GAMBALE, E.A.; FONTOURA, J.T.F.; ESPER, M.W.; GÓZ, R.S.; BITTENCOURT, R.M.; PACELLI, W.A. **Estudo da influência do cimento Portland de alto-forno e cimento Portland comum com adição de escória de alto-forno moída nas propriedades do concreto.** In: 32º Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v.2, Fortaleza, 1990. (Anais).

ELDIN, N. N., SENOUCI, A. B. **Use of Scrap Tires in Road Construction.** Journal of Construction Engineering and Management. Vol 118, N. 3 - pag. 561-578.1992.

ELDIN, N. N., SENOUCI, A. B. **Observations on Rubberized Concrete Behavior.** Cement, Concrete and Aggregates, Vol 15, N. 1 - pag. 74-84, 1993a.

ELDIN, N., SENOUCI, A. B. **Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate.** Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, N. 4.1993b.

ELDIN, N., SENOUCI, A. B. **Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete.** Cement and Concrete Composites, vol. 16, pp.287-298.1994.

ELETROBRÁS. **Concreto massa no brasil: Memória técnica – Registro histórico /** Centrais Elétricas Brasileiras, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, Instituto Brasileiro do Concreto – Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1989, v 1.

FATTUHI, N. I., CLARK, L. A. **Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber.** Cement and Concrete Research, Vol 10 - pag. 229-236, 1996.

FIORITI, C.F., AKASAKI, J.L., NIRSCHL, G.C. **Estudo da viabilidade da produção dos blocos estruturais de concreto com adição de resíduos de borracha.** Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.

FOLIC, R.J., RADONJANIN, V.S. **Experimental Research on polymer modified concrete.** Materials Journal, vol. 95, pp. 463-469, 1998.

FURNAS Centrais Elétricas S/A. **Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaio e Propriedades.** Editor Walton Pacelli de Andrade - Ed. Pini, São Paulo-SP, 1997.

FURNAS Centrais Elétricas S/A. **Relatório DCT.T.01.157.2002-R0 - Validação de Procedimento - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson - Determinação por Meio de Extensômetro Mecânico** - Departamento de Apoio e Controle Técnico. 2002.

GAMBALE, A. G.; FONTOURA, J. T.; PIMENTA, M. D.; GUEDES, Q. M. **A evolução da tensão obtida a partir da deformação medida em um material viscoelástico.** Anais da XXV jornadas sul-americanas de engenharia estrutural. Porto Alegre, 1991.

GAMBALE, E.A., ANDRADE, M.A.S., NASCIMENTO, J.F.F. **Plano de Concretagem - Caracterização do Concreto Bombeado com Calcário e Monitoração de Temperatura.** Relatório DCT.T.1.095.2001-R2, Janeiro, 2002.

GARCIA, R., FURTADO, J. **Relatório Setorial Final – Setor: Reciclagem.** FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, Janeiro de 2008. Disponível em http://www.finep.gov.br/PortalDPP/relatorio_setorial_final/relatorio_setorial_final_impressa.o.asp?lst_setor=403. Acesso em janeiro de 2009.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., BARLUENGA, G., BOLLATI, M., WITOSZEK, B. **Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete.** Cement and Concrete Research, Vol 32, pp. 1587-1596, 2002.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., BARLUENGA, G. **Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete.** Cement and Concrete Research, Vol 34 - pag. 109-117. 2004.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., BARLUENGA, G., PARGA-LANDA, B., BOLLATI, M., WITOSZEK, B. **Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements.** Construction and Building Materials Vol.21, pp. 1918–1927, 2007.

HUYNH, H., RAGHAVAN, D., FERRARIS, C.F. **Rubber particles from recycled tires in Cementitious Composite materials,** Department of Chemistry, Howard University, Washington, pp.1-18,1996.

HUYNH, H., RAGHAVAN, D. **Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments.** Cement and Concrete Research, Vol 6 - pag. 138-143, 1997.

ISHIKAWA, M. **Thermal stress analysis of a concrete dam.** Computers and Structures, Great Britain, v. 40, n. 2, p. 347-352, 1991.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G.C. Isaía. São Paulo, IBRACON, 2005.

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

KHATIB, Z. K., BAYOMY, F. M. **Rubberized Portland Cement Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, N. 3., pp.206-213. 1999.

KHAYAT, K. H.; AİTCIN, P. C. **Silica fume in concrete – An overview**. In: International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, 1992. Proceedings. Detroit, American Concrete Institute, SP-132, p. 835-872, 1993.

LA SAPIENZA Rome University. **Re-Book: Recycled Tyre Materials in Roads and Civil Engineering**. Edited by A. D’Andrea and V. Shulman. Edizione ARGO, 2007.

LI, G., GARRICK, G., EGGERS, J., ABADIE, C., STUBBLEFIEL, M.A., PANG, S. **Waste Tire Fiber Modified Concrete**, Composites Part B: Engineering, vol. 35, pp. 305-312, 2004.

LI, Z., LI, F., LI, J. S. L. **Properties of concrete incorporating rubber tyre particles**, Magazine of Concrete Research, Vol 50, N. 4 - pag. 297-304, 1998.

LIDUARIO, A. S. **Estudo da Influência de Adições Mineraias e Pozolâncias nas Propriedades do Concreto**. Relatório DCT.T.01.055.2003-R2. Furnas Centrais Elétricas S.A. 2003.

LIDUARIO, A. S. **Contribuição ao estudo das propriedades térmicas do concreto convencional na presença das adições mineraias**. Dissertação de Mestrado, UFG, 2006.

LIMA, I. S., ROCHA, F. S., FERREIRA, J. B. **Um estudo da argamassa de cimento com adição de fibras de borracha vulcanizada para a construção civil**. Anais do 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza. 2000.

LIMA, I. S., ROCHA, F. S. **Concreto com fibras de borracha vulcanizada e sua utilização em placas pré-moldadas**, Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, V.179 a V.193, 2004.

LIMA, S.M. **Concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas**. Dissertação de Mestrado.USP, 2006.

LOPES, R.E., MARQUES, A.C., RICCI, E.C., FIORITI, C.F., AKASAKI, J.L. **Estudo de dosagens para obter concretos com resíduos de borracha de pneus**. Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Recife, 2005.

MACEDO, D.C.B. **Estudo da viabilidade técnica de placas pré-moldadas utilizando borracha de pneu em matrizes cimentícias.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2005.

MACEDO, D.C.B., TUBINO, R.M.C., ALBUQUERQUE, A.C. **Premolded panels in mortar / concrete with tyre rubber.** Proceedings of IV International ACI/CANMET, 2005a.

MACEDO, D.C.B., TUBINO, R.M.C., ALBUQUERQUE, A.C., FARIAS, L.A. **Propriedades do concreto com borracha de pneu referente à durabilidade.** Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Olinda, 2005b.

MACEDO, D.C.B., TUBINO, R.M.C., CARVALHO, M. L. U, NETO, M.F.F, BORGES, C. I.R. **Comportamento acústico de placas pré-moldadas em concreto com borracha de pneu.** Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Olinda, 2005c.

MACHIDA, N.; UEHARA, K. **Nonlinear thermal stress analysis of a massive concrete structure.** Pergamon Journals - Computers e Structures, Printed in Great Britain. Vol. 26, n. 12, p. 287-296, 1987.

MAJORANA, C. E.; ZAVARISE, G.; BORSETTO; GIUPPETTI, M. **Nonlinear analysis of thermal stresses in mass concrete castings.** Cement and Concrete Research, USA, v. 20, p.559-578, May 1990.

MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K; **Pozzolanic and cementitious materials. Advanced Concrete Techonology Program.** CANMET, Ottawa, Ontario, Canada, Vol. 1, 1996.

MARTINS, I.R.F. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2005.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Structure, Properties and Materials.** 2nd Edition. New Jersey, EUA: Prentice Hall, 1994.

MENEGUINI, E.C.A., PAULON, V.A. **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha.** Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.

MENESES, V. J. **Avaliação das emissões oriundas da degradação térmica de pneus.** Dissertação de Mestrado: IMA/UFRJ, 2005.

METRÔ - Companhia do Metropolitano de São Paulo . Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/expansao/sumario/noticias/noticias30.shtml>>. Acesso em outubro de 2006.

MOTTA, F.G. **A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – O papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico.** Ambiente e Sociedade, Campinas v. XI, n. 1. jan.-jun. 2008.

MIRAMBELL, E.; PUJOL, F. **Estudio térmico-tensional de grandes volúmenes de hormigón frente a la acción del calor de fraguado.** Hormigon y Acero, España, v. 115, p. 141-155, 1990.

NENDI, M., KHAN, A. **Protective system for buried infrastructure using recycled tire rubber-filled cement mortars.** ACI Special Publication, vol. 219, pp.99-114. 2004.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** Tradução Eng. Salvador E. Giammusso. 2. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

PACHECO, E. V. **Reciclagem de Borracha.** 9º Seminário das Comissões Técnicas da ABPol. 2004.

PROJETO DE LEI 203/1991. **Acondicionamento, coleta, tratamento, transporte e destinação final dos resíduos de serviços de saúde.** Ministério do Meio Ambiente. Disponível em < <http://www2.camara.gov.br/comissoes/temporarias/especial/pl20391> > Acesso em janeiro de 2009.

PROJETO DE LEI 1991/2007. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Ministério do Meio Ambiente. Disponível em < <http://www.camara.gov.br/sileg/integras/501911.pdf> > Acesso em janeiro de 2009.

RAGHAVAN, D., HUYNH, H., FERRARIS, C. F. **Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composites.** Journal of Materials science, Vol 33, pp. 1745-1752, 1998.

RAMACHANDRAN, V.S.; MALHOTRA, V.M.; JOLICOEUR, C.; SPIRATOS, N. – **Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete.** CANMET, Canada, 1995, pp. 43-55

RIBEIRO, F.C.V, BOLORINO, H., FERNANDES, S.A. **Análise da influência da adição de pneu na deformabilidade do concreto.** Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte. 2002.

ROSTAMI, H., LEPORE, J., SILVERSTRIM, T., ZANDI, I., **Use of Recycled Rubber Tyres in Concrete.** Concrete 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence - Proceedings of the International Conference - University of Dundee, Scotland, UK, Vol 2, pp.391-399, 1993.

ROY, D.M; **Fly Ash and Silica Fume Chemistry and Hydration.** In : International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete – third, Trondheim, 1989. Proceedings. Detroit, American Concrete Institute, SP-114, 1989. P. 117-138.

SABIR, B.B; WILD, S; BAI, J; **Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: a review.** Cement and Concrete Composites. 23, Ed. Elsevier Science, 6ª edição, 2001.

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.** I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2004.

SANTOS, S.B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações.** Dissertação de Mestrado. Brasil, Universidade Federal do Espírito Santo, 2004.

SANTOS, S.B., CALMON, J.L. **PFEM_2DT E PFEM_2DAT - Programas para análise termomecânica desacoplada em estruturas maciças de concreto durante a fase de construção.** CILAMCE 2004 - XXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Recife, 2004.

SANTOS, S.B. ; CALMON, J.L.; GAMBALE, E.A.; ANDRADE, M.A.S. **Comparação entre Resultados Obtidos por um Medidor de Tensão Instalado em um Bloco de Concreto Massa e os Valores Gerados pelo Programa PFEM_2DAT.** In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis – Brasil, 2004b.

SEGRE, N. **Reutilização de borrachas de pneus usados como adição em pasta de cimento.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

SEGRE, N., MONTEIRO, P.J.M., SPOSITO, G. **Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix.** Journal of Colloid and Interface Science, vol 248, pp. 521-523. 2002.

SEGRE, N., GALVES, A.D., RODRIGUES, J.A., MONTEIRO, P.J.M., JOEKES, I., **Rubber-mortar composites: effect of composition on properties.** Journal of Materials Science, vol 39, pp. 3319-3327, 2004.

SEGRE, N., OSTERTAG, C., MONTEIRO, P.J.M. **Effect of tire rubber particles on crack propagation in cement paste.** Materials Research, Vol. 9, No. 3, 311-320, 2006.

SHIMAKURA, S. **Como funciona a ANOVA.** Disponível em:
<<http://leg.ufpr.br/~shimakur/CE701/node91.html>> Acesso em abril de 2006.

SILVA, E.C.R. **Estudos das tecnologias de destinação de pneus inservíveis através de avaliação de impactos ambientais para um desenvolvimento sustentável.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, F. T. **O caso dos pneus inservíveis no Brasil.** UFRRJ, 2005.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas**. Notas de aula: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFRGS. 2004.

SILVOSO, M. M. **Otimização da Fase Construtiva de Estruturas de Concreto Vis-à-Vis os Efeitos da Hidratação via Algoritmos Genéticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003. 166p.

SOUZA, F.A. **Utilização de pneus pós-consumo como combustível em fornos de cimento**. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo, 2000.

SOUZA, A., FRANÇA, V.H., SOUSA, D.A., GARCIA, J.R., REIS, J.F.A. **Estudo do comportamento de misturas de concreto com fibras de borracha, visando a sua utilização em estacas do tipo broca**. Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, II.913 a II.919. 2004.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de Doutorado, UFRGS. 2004.

StatSoft, Inc. (2004). **STATISTICA** (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com.

SUKONTASUKKUL, P., CHAIKAEW, C. **Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber**. Construction and Building Materials, Volume 20, Issue 7, September, Pages 450-457, 2006.

TAM, C.T; LOO, Y.H; CHOONG, K.F; **Adiabatic temperature rise in concrete with and without GGBFS**. In: Proceedings – ACI International Conference, Editor V.M. Malhotra, Singapore, SP – 149, 1994.

TOPÇU, I.B., ÖZÇELİKÖRS, Y. **Lastik Agregalı Beton**, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, VII. Mühendislik Haftası, 25-29 Mayıs, Isparta. 1991.

TOPÇU, I. B. **The properties of rubberized concretes**. Cement and Concrete Research, Vol 25, N.2 - pag. 304-310. 1995.

TOPÇU, I. B. **Assessment of the brittleness index of rubberized concretes**. Cement and Concrete Research, V 27 - pag. 177-183,1997.

TOPÇU, I. B., AVCULAR, N. **Collision behaviours of rubberized concrete**. Cement and Concrete Research, Vol 27 - pag. 1893-1898, 1997a.

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

TORTUM, A., ÇELIK, C., AYDIN, A.C. **Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete.** Building and Environment, Vol 40 – pag. 1492 – 1504, 2005.

TOUTANJI, H. A. **The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates.** Cement and Concrete Composites, Vol 18, N. 2 - pag. 135-139, 1996.

TURATSINZE, A., BONNET, S., GRANJU, J.L. **Cement-based materials incorporating rubber aggregates: shrinkage length changes.** Proceedings of International Symposium Brittle Matrix Composites 7. Warsaw, pp.359-368, 2003.

TURATSINZE, A., BONNET, S., GRANJU, J.L. **Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance.** Construction and Building Materials, (21) 176–181. 2007.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de Ciências dos Materiais.** Ed. Edgard Blücher. São Paulo, 1970.

VIEIRA, F.L.; LIDUÁRIO, A.S.; LOPES, A.D.; BITTENCOURT, R.M.; GUIMARÃES, E.M.; **Comparativo da determinação do teor de amorfismo da cinza de casca de arroz (CCA) através de difração de raios – X e método químico.** In: 47 ° Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON, Recife, 2005.

WANG, R. WANG, P., LI, X. **Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars.** Cement and Concrete Research, Vol 35 - pag. 900-906, 2005.

WU, K., ZHANG, D., SONG, J. **Properties of polymer-modified cement mortar using pre-enveloping method.** Cement and Concrete Research, Vol 32 - pag. 425-429, 2002.

XI, Y., LI, Y., RICHARD, J. **Use of solid wastes to make construction materials.** University of Colorado, 2003.

YAMAZAKI, M.; MIYASHITA, T.; MORIKAWA, H.; HAYAMI, Y. **An analytical study on the thermal stress of mass concrete.** Kajima Institute of Construction Technology, Japan, KICT Report, n. 57, pp. 1-17, 1985.

ZHONG, S., CHEN, Z. **Properties of latex blends and its modified cement mortars.** Cement and Concrete Research, Vol 32 – pp. 1515-1524, 2002.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALI, N. A., AMOS, A. D., ROBERTS, M. **Use of ground rubber tyres in portland cement concrete.** Concrete 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence - Proceedings of the International Conference - University of Dundee, Scotland, UK, Vol 2, pp.379-390,1993.

ALVES, E. F. R., PINTO, R. S., BITTENCOURT, R. M., ANDRADE, W. P. **Estudo do concreto com adição de borracha de pneu.** FURNAS,1999.

BANTHIA, N., YAN, C., SAKAI, K. **Impact Resistance of Fiber Reinforced Concrete at Subnormal Temperatures,** Cement and Concrete Composites, Vol 20 - pag. 393-404,1998.

BENAZZOUK, A., MEZREB, K., DOYEN, G., GOULLIEUX, A., QUÉNEUDEC, M. **Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites - influence alveolar texture of rubber aggregates.** Cement and Concrete Composites, vol. 25, pp. 711-720, 2003.

BIGNOZZI, M. C., SACCANI, F., SANDROLINI, F. **New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microstructure and mechanical properties,** Composites: Part A, Vol. 31 - pag. 97-106, 2000.

BROTHERS, L.E., ONAN, D.D., MORGAN, R.L. **Well cement compositions containing rubber particles and methods of cementing subterranean zones,** US Patent Documents, 1997.

CARVALHO, J. **Análise de Ciclo de Vida Ambiental Aplicada a Construção Civil - Estudo de Caso: Comparação entre Cimentos Portland com Adição de Resíduos.** Dissertação de Mestrado. USP. 2002.

COULTER, P. E. **Synopsis of scrap rubber reclamation Canada,** North American Recycled Rubber Association, 2001.

CURY, M.V.Q., MURTA, A.L.S., FIGUEIREDO, L.H.F., MONTENEGRO, L.C.S. **Análise Sócio-econômica e Ambiental para o Uso do Asfalto Emborrachado na Construção de Rodovias.** ANPET - Congresso de Transportes, Foz de Iguaçu, 2002.

ELDIN, N. N., PIEKARSKI, J. A. **Scrap Tires: Management and Economics.** Journal of Environmental Engineering, Vol 119, n. 6 - pag. 1217-1232. 1993.

FRANÇA, V.H., BARBOSA, M.P., AKASAKI, J.L., SALLES, F.M. **Determinação do coeficiente de conformação superficial das barras de concreto com incorporação de resíduos de pneu.** Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, II.672 a II.684, 2004.

GAO, B., KIM, J. K., LEUNG, C. K. Y. **Effect of rubber modifier on interlaminar fracture toughness of CFRP-concrete interface**, Composites Science and Technology, Vol 63 - pag. 883-892, 2003.

GÜNEYISI, E., GESOGLU, M., ÖZTURAN, T. **Properties of rubberized concretes containing silic fume**. Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 2309-2317. 2004.

INSTITUTO BIOSFERA. **Reciclagem de pneus**. Manual técnico: 2007.

JORGE, M.R.P.R. **Adição de borracha de pneus inservíveis em matriz de cimento**. Monografia, Universidade de São Paulo, 2004.

LEE, B. I., BURNETT, L., MILLER, T., POSTAGE, B., CUNEO, J. **Tyre rubber/cement matrix composites**, Journal of Materials science letters, Vol 12 - pag. 967-968, 1993.

LEE, H. S., LEE, H., MOON, J. S., JUNG, H. W. **Development of tire-added latex concrete**, ACI Materials Journal, Vol 95, n. 4 - pag. 356-364, 1998.

LI, G., STUBBLEFIEL, M.A., GARRICK, G., EGGERS, J., ABADIE, C., HUANG, B. **Development of waste tire modified concrete**, Cement and Concrete Research, vol. 34, 2283-2289, 2004.

LIMA, I. S., FERREIRA, J. A., FILHO, L.C.S., COSTA, P.L.M., FILHA, F.C., SOUZA, C.L.O. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos de concreto e borracha com adição de microssilica**, Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, II.290 a II.303, 2004.

LINTZ, R.C.C., SANCHEZ, E.M.S., CARNIO, M.A. **Influência da utilização da borracha vulcanizada na resistência à compressão do concreto**, Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, II.1105 a II.1116, 2004.

LISBOA, A.A., FERNANDES, S.A. **Análise do comportamento de blocos de concreto confeccionados com resíduos de borracha pneumática solicitados à compressão centrada**. Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória, 2003.

MARQUES, A.C., TRIGO, A.P.M., AKASAKI, J.L. **Argamassas compostas com fibras de borracha: microestrutura e propriedades mecânicas**, Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, II.183 a II.194, 2004.

MARQUES, M.L. MARQUES, A.C., AKASAKI, J.L., SILVA, E.J. **Influência de diferentes granulometrias de fibras de borracha de pneus em argamassas**. Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, VI.973 a VI.981, 2004.

NIRSCHL, G.C. **Estudos das Propriedades mecânicas de concretos com adição de fibras de borracha vulcanizada, proveniente da indústria de recauchutagem de pneus**, Relatório Técnico UNESP/FAPESP, 2001.

- NIRSCHL, G.C., AKASAKI, J.L., FIORITI, C.F. **Influência da granulometria das fibras de borracha vulcanizada em dosagens de concreto**, Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.
- ODA, S., FERNANDES Jr., J.L. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. Acta Scientiarum. Maringá, v. 23, n. 6, pp. 1589-1599, 2001.
- PÉRA, J., AMBROISE, J., CHABANNET, M. **Valorization of automotive shredder residue in building materials**. Cement and Concrete Research, vol 34, pp. 557-562. 2004.
- PIERCE, C. E., BLACKWELL, M. C. **Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill**. Waste Management, Vol 23 - pp. 197-208, 2003.
- RAGHAVAN, D. **Study of Rubber-Filled Cementitious Composites**. Journal of Applied Polymer Science, Vol 77 - pp. 934-942, 2000.
- ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. **Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete**. Cement and Concrete Research, Vol 32 - pp. 329-334, 2002.
- ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. **Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete**. Cement and Concrete Composites, vol 26, pp. 375-380, 2004.
- SEGRE, N., JOEKES, I. **Use of tire rubber particles as addition to cement paste**. Cement and Concrete Research, Vol 30 - pp. 1421-1425, 2000.
- SEGRE, N., GALVES, A.D., RODRIGUES, J.A., MONTEIRO, P.J.M., JOEKES, I. **Use of tire rubber particles in slag-modified cement mortars**. Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement , Durban, South Africa. pp 1546-1554, 2003.
- SIDDIQUE, R., NAIK, T.R. **Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview**. Waste Management, vol. 24, pp. 563-569. 2004.
- SOARES, R.C., NETO, L.X.C, MENDES, J.U.L., MARINHO, G.S. **Análise do desempenho térmico de cimento com agregado de resíduo de borracha**. Simpósio: Desempenho Térmico de Sistemas Construtivos Alternativos, Natal, 2003.
- SOBRAL, M., SAMAGAIO, A. J. B., FERREIRA, J. M. F., LABRINCHA, J. A. **Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate**. Journal of Materials Processing Technology, Vol 142 - pag. 427-433. 2003.
- TURATSINZE, A., BONNET, S., GRANJU, J.L. **Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres**. Building and Environment, vol 40, pp. 221-226, 2005.

ZANDI, I., LEPORE, J., ROSTAMI, H. **Particulate rubber included concrete compositions.** Cement and Concrete Compositions, vol.18, pp. 369-470, 1996.

ANEXO A - RESOLUÇÃO CONAMA 258/2002

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 258/99 - Texto modificado em 21.03.02

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, no uso das atribuições que lhe são conferidas pela lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 06 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

CONSIDERANDO que os pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública;

CONSIDERANDO que não há possibilidade de reaproveitamento desses pneumáticos inservíveis para uso veicular e nem para processos de reforma, tais como recapagem, recauchutagem e remoldagem;

CONSIDERANDO que os pneumáticos novos, depois de usados, podem ser utilizados em processos de reciclagem;

CONSIDERANDO a necessidade de dar destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis;

CONSIDERANDO que a importação de pneumáticos usados é proibida pelas Resoluções CONAMA nº 23/96 e nº 235/98;

CONSIDERANDO que se faz necessário o controle do passivo ambiental gerado pelos pneumáticos usados oriundos de veículos automotores e bicicletas;

CONSIDERANDO que de acordo com a legislação vigente compete ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, o controle, a fiscalização e a edição dos atos normativos pertinentes à Resolução;

RESOLVE:

Art. 1º - As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos para uso em veículos automotores e bicicletas ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Parágrafo Único - As empresas que realizam processos de reforma ou de destinação final ambientalmente adequada de pneumáticos ficam dispensadas de atender o disposto neste artigo, exclusivamente no que se refere à utilização dos quantitativos de pneumáticos coletados no território nacional.

Art. 2º - Para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se:

I – pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço, utilizado para rodagem em veículos automotores e bicicletas;

II – pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4011 da Tarifa Externa Comum – TEC;

III – pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4012.10 da Tarifa Externa Comum – TEC;

IV – pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição e rodagem adicional, conforme código 4012.20 da Tarifa Externa Comum – TEC;

Art. 3º - Os prazos e quantidades para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneumáticos inservíveis resultantes de uso em veículos automotores e bicicletas de que trata esta Resolução, são os seguintes:

I – A partir de 1º de Janeiro de 2002: para cada quatro pneus novos, fabricados no País ou pneus importados, novos ou reformados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

II – A partir de 1º de Janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou pneus importados, novos ou reformados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

III – A partir de 1º de Janeiro de 2004:

a. Para cada um pneu novo fabricado no País ou pneu novo importado, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

b. Para cada quatro pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

IV – A partir de 1º de Janeiro de 2005:

a. Para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

b. Para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis.

Parágrafo Único - O disposto neste artigo não se aplica aos pneumáticos exportados ou aos que equipam veículos exportados pelo País.

Art. 4º - No quinto ano de vigência desta Resolução, o CONAMA, após avaliação a ser procedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, reavaliará as normas e procedimentos estabelecidos nesta Resolução.

Art. 5º - O IBAMA poderá adotar, para efeito de fiscalização e controle, a equivalência em peso dos pneumáticos inservíveis.

Art. 6º - As empresas importadoras deverão, a partir de 1º de Janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, previamente aos embarques no exterior, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no Art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades a serem importadas, para efeitos de

liberação de importação junto ao Departamento de Operações de Comércio Exterior – DECEX, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

Art. 7º - As empresas fabricantes de pneumáticos deverão, a partir de 1º de Janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, anualmente, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no Art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades fabricadas.

Art. 8º - Os fabricantes e os importadores de pneumáticos poderão efetuar a destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneus inservíveis de sua responsabilidade, em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros.

Parágrafo Único - As instalações para o processamento de pneus inservíveis e a destinação final deverão atender ao disposto na legislação ambiental em vigor, inclusive no que se refere ao licenciamento ambiental.

Art. 9º - A partir da data de publicação desta Resolução fica proibida a destinação final inadequada de pneumáticos inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços e queimas a céu aberto.

Art. 10º - Os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis, a serem localizadas e instaladas de acordo com as normas ambientais e demais normas vigentes, para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada.

Art. 11º - Os distribuidores, os revendedores, os reformadores, os consertadores e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

Art. 12º - O não cumprimento ao disposto nesta Resolução implicará nas sanções estabelecidas na lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e seu regulamento.

Art. 13º - As regras desta Resolução aplicar-se-ão também aos pneus usados, de qualquer natureza, que ingressarem em território nacional por força de decisão judicial.

Art. 14º - Esta resolução entra em vigor na data de sua publicação.

José Carlos Carvalho
Presidente do Conselho

.....
Secretário Executivo

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Tabela A.1 – Caracterização do cimento.

PROPRIEDADES DETERMINADAS CP II F-32		Amostra 1	Amostra 2	Limite NBR 11578/91	
Massa específica (g/cm ³)		3,04	3,06	---	
Área específica (cm ² /g)		3.550	3.890	≥ 2600	
Tempos de Pega	Ínicio de Pega (h:min)	2:00	2:10	≥ 1:00	
	Fim de Pega (h:min)	3:50	3:20	≤ 10:00	
Água de Consistência – Pasta (%)		26,4	28,0	---	
Expansão em Autoclave (%)		0,0	0,0	---	
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	24,4	18,9	≥ 10	
	7 dias	29,9	24,1	≥ 20	
	28 dias	33,4	28,6	≥ 32 e ≤ 49	
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	6,73	5,36	≤ 6,5	
	resíduo insolúvel	3,33	2,18	≤ 2,5	
	trióxido de enxofre (SO ₃)	2,31	1,93	≤ 4,0	
	óxido de magnésio (MgO)	1,41	0,42	≤ 6,5	
	dióxido de silício (SiO ₂)	20,07	20,83	---	
	óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,50	4,64	---	
	óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,59	3,59	---	
	óxido de cálcio (CaO)	60,31	61,18	---	
	óxido de cálcio livre (CaO)	1,70	2,1	---	
	Álcalis Totais	óxido de sódio (Na ₂ O)	0,34	0,34	---
		óxido de potássio (K ₂ O)	0,46	0,58	---
		equivalente alcalino em Na ₂ O	0,64	0,72	---
	sulfato de cálcio (CaSO ₄)		3,93	3,28	---

Tabela A.2 – Caracterização dos agregados.

Agregado	Granito 38 mm	Granito 19 mm	Areia Natural	Granito 38 mm	Granito 19 mm	Areia Natural
Absorção (%)	0,5	0,6	0,9	0,5	0,6	1,0
Granulometria (MF)	7,3	6,9	2,79	7,71	6,88	2,75
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,65	2,62	2,65	2,64	2,66

Tabela A.3 – Caracterização das partículas de borracha.

Partículas de borracha	0,42mm	1,5mm	4,8mm
Granulometria (MF)	1,0	2,57	3,16
Massa específica (g/cm ³)	1,12	1,12	1,12

Tabela A.4 – Caracterização dos aditivos poliméricos.

Aditivos para tratamento superficial das partículas de borracha	pH	Resíduo Sólido (%)	Densidade (g/cm ³)
Aditivo polimérico de base vinílica	5,0	3,2	1,02
Aditivo polimérico de base acrílica	8,0	20,6	1,02
Aditivo polimérico de base estireno butadieno	---	13,0	---

APÊNDICE B – DOSAGENS DE CONCRETO – ETAPA 1

Tabela B.1 – Dosagens contendo Grânulos de Borracha de Pneu – 0,42 mm – Sem tratamento superficial.

Dosagem E -		11151	11173	11175	11174	11176	11177
% de borracha		(Ref)	5%	10%	15%	20%	25%
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	312	309	307	307	290	264
	Água	154	152	151	151	142	130
	Areia Natural	636	598	563	532	473	404
	Borracha	-	14,52	28,86	43,29	54,52	62,3
	Brita 19mm	544	538	534	534	505	460
	Brita 38mm	692	685	680	680	643	585
	Superplastificante	-	0,086	0,307	0,368	0,638	1,077
	Polímero Vinílico	-	-	-	-	-	-
	Incorporador de ar	0,094	-	-	-	-	-
	Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492
% Argam. s/ ar incorporado		49,87	49,32	49,01	49,02	46,24	42,20
% Argam. c/ ar incorporado		53,67	52,92	53,01	53,82	51,64	55,20
Módulo de Finura		5,81	5,73	5,64	5,56	5,48	5,40
% Areia em massa		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
% Areia em volume		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,1
Abatimento (cm)		5,5	4,0	5,0	4,0	3,0	6,0
Ar incorporado (%)		3,8	3,6	4,0	4,8	5,4	13,0
Massa Específica (kg/m ³)		2339	2320	2263	2251	2081	1874
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	20,8	21,6	15,0	14,5	12,4
	20,8		21,7	16,2	14,0	12,4	7,9
	28 dias	28,7	26,9	20,3	21,9	16,9	9,0
		28,4	26,9	20,4	16,3	16,9	8,7
	91 dias	27,9	29,3	22,3	21,0	17,3	9,9
		27,8	29,4	24,1	21,1	18,2	9,3
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,4	19,0	16,6	16,3	15,6	11,5
		18,5	19,1	17,7	16,5	15,5	10,7
	28 dias	26,8	24,7	27,2	22,8	18,7	15,9
		27,4	24,2	27,1	22,9	18,7	15,9
	91 dias	24,3	18,0	18,1	21,1	18,6	13,1
		24,8	18,4	16,6	22,0	19,2	13,4
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,32	2,40	1,90	1,57	1,65	1,15
		2,34	2,09	2,04	2,18	1,85	1,15
	28 dias	2,65	2,68	2,26	2,12	2,05	1,08
		2,65	2,68	2,61	2,18	2,05	1,08
	91 dias	3,23	3,01	2,29	2,32	2,18	1,51
		3,23	2,90	2,29	2,07	2,09	1,51
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2365	2340	2256	2236	2219	2046
		2364	2342	2278	2236	2219	2049
	28 dias	2355	2340	2272	2243	2241	2064
		2359	2333	2292	2268	2214	2111
	91 dias	2371	2354	2301	2269	2245	2074
		2371	2354	2307	2285	2244	2091

Tabela B.2 – Dosagens contendo Grânulos de Borracha de Pneu – 0,42 mm – Com tratamento superficial.

Dosagem E -		11151	11185	11186	11187	11188	11189
% de borracha		(Ref)	5%	10%	15%	20%	25%
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	312	305	300	296	293	274
	Água	154	150	148	145	144	135
	Areia Natural	636	591	551	513	478	419
	Borracha	-	14,34	28,20	41,74	55,08	64,66
	Brita 19mm	544	531	522	515	510	477
	Brita 38mm	692	676	665	656	649	607
	Superplastificante	-	0,085	0,264	0,355	0,598	0,986
	Polímero Vinílico	-	3,040	5,978	8,848	11,677	13,708
	Incorporador de ar	0,094	-	-	-	-	-
	Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492		0,492	0,492	0,492
% Argam. s/ ar incorporado		49,87	48,71	47,97	47,20	46,77	43,79
% Argam. c/ ar incorporado		53,67	51,91	52,57	52,70	52,97	54,79
Módulo de Finura		5,81	5,73	5,64	5,56	5,48	5,40
% Areia em massa		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
% Areia em volume		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,1
Abatimento (cm)		5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	5,5
Ar incorporado (%)		3,8	3,2	4,6	5,5	6,2	11,0
Massa Específica (kg/m ³)		2339	2251	2194	2151	2119	1955
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	20,8	20,8	15,8	12,8	12,0
	20,8		21,1	16,8	13,8	12,8	9,0
	28 dias	28,7	29,4	22,8	20,1	15,9	11,5
		28,4	27,9	22,8	20,1	15,6	11,0
	91 dias	27,9	29,9	23,3	20,6	16,6	10,5
		27,8	30,1	24,1	20,1	16,3	10,8
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,4	19,1	17,5	16,1	15,0	11,2
		18,5	18,6	17,5	15,1	15,2	11,8
	28 dias	26,8	26,1	25,8	23,8	22,5	16,4
		27,4	25,7	26,0	23,8	22,5	22,5
	91 dias	24,3	17,3	22,5	17,3	18,6	14,6
		24,8	17,9	22,3	17,2	18,5	15,5
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,32	2,23	2,07	1,79	1,79	1,32
		2,34	2,23	1,98	1,71	1,57	1,40
	28 dias	2,65	2,76	2,62	2,68	2,01	1,68
		2,65	2,76	2,65	2,68	1,98	1,68
	91 dias	3,23	3,09	2,59	2,45	2,34	1,79
		3,23	2,90	2,59	2,68	2,32	1,79
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2365	2353	2296	2264	2239	2073
		2364	2361	2310	2255	2210	2089
	28 dias	2355	2329	2286	2249	2186	2096
		2359	2339	2309	2252	2220	2127
	91 dias	2371	2362	2306	2258	2234	2115
		2371	2355	2309	2250	2224	2105

Tabela B.3 – Dosagens contendo Grânulos de Borracha de Pneu – 1,5 mm – Sem tratamento superficial.

Dosagem E -		11151	11204	11205	11206	11207	11208
% de borracha		(Ref)	5%	10%	15%	20%	25%
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	312	317	315	311	305	302
	Água	154	156	155	153	150	148
	Areia Natural	636	614	578	539	498	492
	Borracha	-	14,9	29,61	43,85	57,34	71,27
	Brita 19mm	544	552	548	541	531	526
	Brita 38mm	692	702	698	689	676	669
	Superplastificante	-	0,241	0,340	0,460	0,585	0,701
	Polímero Acrílico	-	-	-	-	-	-
	Incorporador de ar	0,094	-	-	-	-	-
	Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492
% Argam. s/ ar incorporado		49,87	50,63	50,30	49,66	48,71	49,34
% Argam. c/ ar incorporado		53,67	53,23	53,10	53,86	54,51	55,34
Módulo de Finura		5,81	5,82	5,83	5,84	5,85	5,86
% Areia em massa		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
% Areia em volume		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	35,1
Abatimento (cm)		5,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0
Ar incorporado (%)		3,8	2,6	2,8	4,2	5,8	6,0
Massa Específica (kg/m ³)		2339	2364	2326	2289	2226	2175
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	20,8	25,4	22,7	18,9	15,4
	20,8		25,1	22,5	18,3	15,5	13,6
	28 dias	28,7	30,4	27,3	22,9	18,6	16,1
		28,4	30,5	27,4	22,4	18,8	16,0
	91 dias	27,9	34,0	29,3	24,0	18,2	17,7
		27,8	33,7	30,1	24,0	19,9	18,2
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,4	21,3	23,0	22,6	18,2	16,7
		18,5	23,0	22,3	20,9	20,5	17,1
	28 dias	26,8	25,1	24,3	22,8	20,7	21,6
		27,4	27,6	22,9	23,2	23,9	19,5
	91 dias	24,3	24,3	22,7	21,2	20,0	18,5
		24,8	25,4	24,0	20,3	20,8	18,6
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,32	2,37	2,18	2,04	1,93	1,57
		2,34	2,26	2,18	2,09	2,01	1,57
	28 dias	2,65	2,76	2,81	2,34	2,09	1,98
		2,65	2,76	2,81	2,34	2,09	1,98
	91 dias	3,23	3,17	3,04	2,76	2,09	2,23
		3,23	3,17	2,90	2,68	2,09	2,23
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2365	2371	2310	2295	2226	2196
		2364	2379	2330	2292	2226	2199
	28 dias	2355	2362	2363	2296	2254	2204
		2359	2362	2363	2294	2227	2189
	91 dias	2371	2381	2348	2302	2222	2217
		2371	2366	2319	2298	2254	2232

Tabela B.4 – Dosagens contendo Grânulos de Borracha de Pneu – 1,5 mm – Com tratamento superficial.

Dosagem E -		11151	11209	11210	11211	11212	11213
% de borracha		(Ref)	5%	10%	15%	20%	25%
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	312	317	314	310	305	300
	Água	154	156	154	152	150	148
	Areia Natural	636	614	576	537	498	459
	Borracha	-	14,9	29,52	43,71	57,34	70,8
	Brita 19mm	544	552	547	540	531	522
	Brita 38mm	692	703	696	687	676	665
	Superplastificante	-	0,342	0,527	0,657	0,829	1,008
	Polímero Acrílico	-	3,159	6,258	9,266	12,156	15,009
	Incorporador de ar	0,094	-	-	-	-	-
	Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492
% Argam. s/ ar incorporado		49,87	50,63	50,09	49,44	48,71	47,97
% Argam. c/ ar incorporado		53,67	53,23	53,29	53,94	53,91	54,77
Módulo de Finura		5,81	5,82	5,83	5,84	5,85	5,86
% Areia em massa		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
% Areia em volume		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,1
Abatimento (cm)		5,5	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0
Ar incorporado (%)		3,8	2,6	3,2	4,5	5,2	6,8
Massa Específica (kg/m ³)		2339	2364	2326	2276	2213	2163
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	20,8	25,6	22,9	19,3	17,0
	20,8		27,2	24,3	19,0	16,8	14,7
	28 dias	28,7	31,2	30,5	24,9	21,3	17,3
		28,4	31,0	29,3	25,0	20,7	19,0
	91 dias	27,9	36,6	32,8	22,2	21,1	19,6
		27,8	36,7	31,5	22,2	21,1	19,9
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,4	22,0	22,1	21,2	19,7	19,5
		18,5	22,6	22,1	22,6	23,1	20,5
	28 dias	26,8	26,9	23,5	23,3	20,8	22,7
		27,4	25,4	24,9	21,8	22,3	19,5
	91 dias	24,3	20,6	24,0	20,9	19,6	17,6
		24,8	20,6	24,0	22,7	19,6	18,6
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,32	2,51	2,29	2,15	2,18	2,09
		2,34	2,51	2,26	2,15	2,18	2,09
	28 dias	2,65	2,87	2,76	2,70	2,32	2,15
		2,65	2,87	2,76	2,54	2,40	2,07
	91 dias	3,23	3,17	2,90	2,48	2,51	2,45
		3,23	3,17	3,09	2,98	2,32	2,04
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2365	2373	2325	2281	2236	2209
		2364	2366	2333	2316	2245	2230
	28 dias	2355	2393	2365	2316	2258	2231
		2359	2396	2347	2294	2271	2228
	91 dias	2371	2393	2335	2313	2254	2228
		2371	2405	2365	2284	2259	2228

Tabela B.5 – Dosagens contendo Fibras de Borracha de Pneu – 4,8 mm – Sem tratamento superficial.

Dosagem E -		11151	11154	11155	11156	11157	11158
% de borracha		(Ref)	5%	10%	15%	20%	25%
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	312	315	315	311	306	303
	Água	154	155	154	153	150	149
	Areia Natural	636	610	578	539	499	463
	Borracha	-	14,8	29,61	43,8	57,53	71,5
	Brita 19mm	544	549	548	541	533	527
	Brita 38mm	692	698	698	689	678	671
	Aditivo plastificante	-	0,063	0,063	0,087	0,153	0,260
	Polímero estireno-butadieno	-	-	-	-	-	-
	Incorporador de ar	0,094	-	-	-	-	-
	Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492
% Argam. s/ ar incorporado		49,87	50,30	50,20	49,66	48,80	48,38
% Argam. c/ ar incorporado		53,67	52,40	52,30	53,26	53,60	53,78
Módulo de Finura		5,81	5,824	5,843	5,861	5,880	5,898
% Areia em massa		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
% Areia em volume		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,1
Abatimento (cm)		5,5	5,0	4,0	4,5	4,0	4,5
Ar incorporado (%)		3,8	2,1	2,1	3,6	4,8	5,4
Massa Específica (kg/m ³)		2339	2364	2346	2282	2226	2182
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	20,8	23,5	22,3	16,6	13,8
	20,8		22,7	22,8	17,1	14,0	11,8
	28 dias	28,7	28,2	27,1	22,2	16,8	14,6
		28,4	27,9	27,4	21,9	17,1	14,1
	91 dias	27,9	31,5	31,5	24,9	20,4	16,0
		27,8	31,0	30,0	24,8	20,4	15,8
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,4	20,0	18,3	18,0	15,2	14,1
		18,5	19,3	18,5	16,8	14,9	13,9
	28 dias	26,8	26,7	24,7	23,2	22,7	19,8
		27,4	26,7	25,7	23,4	22,7	19,6
	91 dias	24,3	23,6	22,2	20,9	19,3	17,7
		24,8	22,8	23,1	20,5	19,6	18,4
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,32	2,37	2,40	2,12	1,85	1,60
		2,34	2,40	2,29	2,23	1,71	1,71
	28 dias	2,65	2,79	2,68	2,56	2,32	1,57
		2,65	2,84	2,68	2,29	2,35	1,57
	91 dias	3,23	3,20	3,04	2,79	2,40	1,87
		3,23	3,20	3,04	2,79	2,40	2,07
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2365	2371	2352	2272	2245	2181
		2364	2380	2361	2280	2229	2182
	28 dias	2355	2389	2353	2321	2259	2183
		2359	2383	2360	2293	2241	2183
	91 dias	2371	2383	2382	2305	2256	2214
		2371	2382	2361	2324	2261	2225

Tabela B.6 – Dosagens contendo Fibras de Borracha de Pneu – 4,8 mm – Com tratamento superficial.

Dosagem E -		11151	11165	11166	11167	11168	11169
% de borracha		(Ref)	5%	10%	15%	20%	25%
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	312	317	318	318	313	313
	Água	154	155	156	156	154	154
	Areia Natural	636	614	583	551	510	478
	Borracha	-	14,9	29,89	44,84	58,84	73,87
	Brita 19mm	544	552	554	553	545	545
	Brita 38mm	692	702	705	705	694	694
	Aditivo plastificante	-	0,114	0,140	0,203	0,275	0,451
	Polímero estireno-butadieno	-	3,159	6,336	9,506	12,474	15,660
	Incorporador de ar	0,094	-	-	-	-	-
	Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492
% Argam. s/ ar incorporado		49,87	50,53	50,71	50,73	49,96	49,98
% Argam. c/ ar incorporado		53,67	52,03	52,61	52,73	52,96	52,98
Módulo de Finura		5,81	5,82	5,84	5,86	5,88	5,90
% Areia em massa		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
% Areia em volume		34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Abatimento (cm)		5,5	4,0	4,0	4,5	3,0	5,0
Ar incorporado (%)		3,8	1,5	1,9	2,0	3,0	3,0
Massa Específica (kg/m ³)		2339	2377	2352	2333	2276	2264
Resistência à compressão (MPa)		7 dias	20,8	26,5	22,1	20,6	17,9
	20,8		26,8	22,7	19,9	16,6	16,6
	28 dias	28,7	32,9	27,2	24,2	23,4	19,3
		28,4	32,1	27,9	24,1	23,0	19,6
	91 dias	27,9	35,4	31,5	25,4	25,5	20,4
		27,8	36,3	30,4	25,4	25,6	20,8
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,4	20,5	19,4	17,9	17,2	15,2
		18,5	19,5	19,3	18,2	17,6	16,8
	28 dias	26,8	25,8	24,5	22,6	22,3	23,6
		27,4	25,8	24,5	24,3	22,3	23,6
	91 dias	24,3	23,2	18,1	24,1	17,3	20,9
		24,8	23,2	18,2	21,9	17,3	19,1
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,32	2,56	2,62	2,09	1,98	1,87
		2,34	2,65	2,47	2,09	2,32	1,98
	28 dias	2,65	2,93	2,81	2,83	2,61	2,34
		2,65	2,93	2,81	2,83	2,55	2,34
	91 dias	3,23	3,23	3,31	2,90	2,65	2,54
		3,23	3,23	3,23	2,90	2,65	2,43
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2365	2372	2335	2320	2311	2277
		2364	2375	2353	2343	2294	2255
	28 dias	2355	2404	2342	2338	2314	2266
		2359	2377	2342	2326	2297	2253
	91 dias	2371	2405	2359	2335	2330	2275
		2371	2401	2364	2360	2335	2278

APÊNDICE C – DOSAGENS DE CONCRETO – ETAPA 2

Tabela C.1 – Dosagens contendo Grânulos de Borracha de Pneu - 1,5mm - Sem Tratamento Superficial.

Dosagem E -		11309	11310	11312	11317	11340	11346	
% de borracha		0%	2%	4%	6%	8%	10%	
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	306	310	305	309	307	308	
	Água	151	153	150	152	151	151	
	Areia Natural	624	620	597	593	576	565	
	Borracha	-	5,83	11,50	17,46	23,15	29,01	
	Brita 19mm	533	540	531	538	535	536	
	Brita 38mm	678	687	676	685	681	683	
	Ad. superplastificante	-	-	-	0,065	0,107	0,123	
	Ad. base acrílica	-	-	-	-	-	-	
	Incorporador de ar	0,092	0,078	0,061	0,046	0,031	0,015	
	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492	
Propriedades do Concreto Fresco	% Argam. s/ ar incorporado	48,92	49,58	48,70	49,37	49,03	49,13	
	% Argam. c/ ar incorporado	52,92	52,98	52,70	52,37	52,03	53,13	
	Módulo de Finura	5,81	5,82	5,83	5,84	5,85	5,86	
	% Areia em massa	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	
	% Areia em volume	34,0	34,0	34,0	34,1	34,0	34,0	
	Abatimento (cm)	6,0	5,0	6,0	5,0	5,5	3,1	
	Ar incorporado (%)	4,0	3,4	4,0	3,0	3,0	4,0	
	Massa Específica (kg/m ³)	2282	2308	2262	2292	2267	2261	
	Resistência à compressão (MPa)	7 dias	22,5	22,8	23,0	21,2	22,2	20,8
			22,5	22,8	22,9	21,2	22,3	21,0
28 dias		26,0	25,5	25,6	26,0	28,2	25,4	
		25,9	28,4	25,5	26,9	28,2	24,1	
91 dias		30,0	30,5	32,1	30,2	30,7	27,5	
		30,0	30,5	32,1	30,6	30,7	27,5	
Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,0	16,7	20,5	19,2	18,1	17,2	
		19,0	16,7	19,0	19,8	18,5	18,2	
	28 dias	23,5	22,0	22,1	21,6	20,7	19,5	
		23,5	22,2	21,6	21,3	21,4	20,4	
	91 dias	29,1	28,7	29,7	28,4	27,3	26,9	
		29,1	28,7	27,5	26,9	26,0	25,9	
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,40	2,51	2,48	2,43	2,01	2,07	
		2,40	2,51	2,54	2,43	2,62	2,01	
	28 dias	2,90	2,84	2,37	2,65	2,54	2,54	
		2,90	2,84	3,17	2,54	2,54	2,59	
	91 dias	3,09	3,15	2,95	3,04	2,77	2,46	
		3,09	3,15	2,92	3,04	2,91	2,60	
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2353	2346	2347	2350	2343	2294	
		2343	2354	2347	2350	2343	2294	
	28 dias	2339	2342	2350	2340	2339	2299	
		2339	2342	2350	2340	2342	2314	
	91 dias	2348	2363	2362	2322	2355	2300	
		2377	2361	2361	2322	2357	2330	

Dosagem E -		11309	11310	11312	11317	11340	11346
% de borracha		0%	2%	4%	6%	8%	10%
Resistência à tração simples (MPa)	7 dias	1,85	1,65	1,73	1,68	1,57	1,27
		1,60	1,65	1,65	1,69	1,57	1,27
	28 dias	1,77	1,73	1,91	1,86	2,06	2,03
		1,77	1,87	1,76	1,88	1,73	1,82
	91 dias	2,03	1,94	1,83	2,16	2,12	2,05
		2,03	1,90	2,20	1,84	1,86	2,00
Resistência à tração na flexão (MPa)	7 dias	2,54	2,58	3,12	2,78	2,82	2,54
		2,57	3,01	2,86	3,26	2,77	2,63
	28 dias	3,5	3,22	3,60	3,38	3,15	3,17
		3,01	3,19	3,18	3,31	3,11	3,18
	91 dias	4,36	3,97	3,87	4,73	3,84	4,00
		4,46	4,00	4,03	4,71	4,27	4,05
Tenacidade (a 1,5mm) (N.mm)	7 dias	6939	7585	5461	7959	5527	7643
		6939	6704	6896	5848	7381	8138
	28 dias	7476	10465	7056	6085	6750	8132
		6607	6785	7240	8473	8806	8030
	91 dias	19249	19428	13719	20670	10063	11548
		19198	22957	17818	28327	16371	15741
Tenacidade (a 3,0mm) (N.mm)	7 dias	7685	9107	6184	8205	6218	8809
		7685	7455	7434	6298	8106	9338
	28 dias	8339	10888	7534	6258	7429	8862
		7091	7230	8063	9077	9757	8282
	91 dias	19446	31718	14237	21303	10172	12339
		20783	40221	18536	40867	17201	16039
Permeabilidade (m/s)	91 dias	4,89E-12	1,23E-12	4,92E-13	9,77E-13	0	2,07E-12
		7,13E-12	3,76E-13	1,63E-12	0	1,18E-12	9,94E-13

Tabela C.2 – Dosagens contendo Grânulos de Borracha de Pneu - 1,5mm - Com Tratamento Superficial.

Dosagem E -		11309	11342	11313	11316	11341	11355	
% de borracha		0%	2%	4%	6%	8%	10%	
Dados de Composição	Cimento CP II F	306	306	307	304	305	304	
	Água	151	151	151	150	150	150	
	Areia Natural	624	612	601	593	572	558	
	Borracha	-	5,75	11,574	17,18	23	28,64	
	Brita 19mm	533	533	535	529	531	530	
	Brita 38mm	678	678	681	974	676	674	
	Ad. superplastificante	-	-	0,031	0,030	0,064	0,094	
	Ad. base acrílica	-	1,219	2,454	3,642	4,876	6,072	
	Incorporador de ar	0,092	0,0765	0,0614	0,046	0,0305	0,015	
Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492	0,492	
	% Argam. s/ ar incorporado	48,92	48,93	49,03	48,99	48,70	48,60	
	% Argam. c/ ar incorporado	52,92	52,13	52,63	52,79	52,10	52,20	
	Módulo de Finura	5,81	5,82	5,83	5,84	5,85	5,86	
	% Areia em massa	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0	
	% Areia em volume	34,0	34,0	34,0	29,5	34,0	34,0	
	Abatimento (cm)	6,0	5,0	6,0	5,0	6,0	6,0	
	Ar incorporado (%)	4,0	3,2	3,6	3,8	3,4	3,6	
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	22,5	24,0	23,5	23,5	22,2	20,4	
		22,5	24,7	23,8	23,4	22,6	20,4	
	28 dias	26,0	28,4	25,9	28,2	26,0	25,4	
		25,9	28,4	25,9	28,2	26,2	23,4	
	91 dias	30,0	34,9	29,3	32,9	28,9	27,7	
		30,0	34,5	29,7	32,9	29,6	28,5	
	Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	19,0	20,6	19,2	18,6	17,4	18,2
			19,0	20,1	19,3	20,3	18,7	18,0
28 dias		23,5	21,7	21,8	20,7	20,8	19,8	
		23,5	23,4	22,8	22,0	19,5	19,0	
91 dias		29,1	28,6	29,0	29,0	26,2	25,8	
		29,1	28,6	29,1	28,8	26,0	25,8	
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7 dias	2,40	2,54	2,65	2,65	2,34	2,56	
		2,40	2,54	2,32	2,65	2,34	2,56	
	28 dias	2,90	3,03	2,73	2,84	2,48	2,92	
		2,90	3,03	2,73	2,84	2,48	2,90	
	91 dias	3,09	3,38	3,59	2,90	2,85	2,91	
		3,09	3,38	2,43	2,90	2,85	2,66	
Massa específica (kg/m ³)	7 dias	2353	2348	2324	2368	2358	2320	
		2343	2348	2324	2368	2343	2333	
	28 dias	2339	2340	2335	2378	2347	2318	
		2339	2340	2333	2338	2337	2320	
	91 dias	2348	2367	2328	2369	2352	2326	
		2377	2367	2339	2357	2367	2327	

Dosagem E -		11309	11342	11313	11316	11341	11355
% de borracha		0%	2%	4%	6%	8%	10%
Resistência à tração simples (MPa)	7 dias	1,85	1,89	1,84	1,56	1,49	1,48
		1,60	1,70	1,88	1,56	1,49	1,48
	28 dias	1,77	2,34	1,93	1,95	1,83	1,83
		1,77	2,34	2,23	1,93	1,83	1,87
	91 dias	2,03	2,34	2,25	2,17	2,07	2,27
		2,03	2,34	2,25	2,10	2,07	2,24
Resistência à tração na flexão (MPa)	7 dias	2,54	3,17	3,41	3,17	2,74	2,46
		2,57	3,65	3,04	3,00	2,68	2,70
	28 dias	3,5	3,53	3,06	3,43	3,63	3,26
		3,01	3,51	3,07	3,32	3,47	3,12
	91 dias	4,36	4,18	3,79	4,20	4,43	4,19
		4,46	4,25	4,67	3,55	4,00	4,59
Tenacidade (a 1,5mm) (N.mm)	7 dias	6939	8573	5672	3267	5805	6902
		6939	6646	5307	3649	5869	6902
	28 dias	7476	10498	10408	10125	8148	8169
		6607	12008	8909	13099	8617	7085
	91 dias	19249	11154	20032	14196	22752	13498
		19198	26988	23144	14196	11027	12351
Tenacidade (a 3,0mm) (N.mm)	7 dias	7685	9854	6178	3456	6388	8013
		7685	6946	5524	3814	6897	8013
	28 dias	8339	10935	10838	10686	8908	8685
		7091	12420	9221	13401	8994	7379
	91 dias	19446	11443	26538	14907	27612	13697
		20783	42497	23359	14907	11549	12549
Permeabilidade (m/s)	91 dias	4,89E-12	8,23E-13	1,25E-12	1,25E-12	1,19E-12	2,9E-13
		7,13E-12	1,14E-14	1,98E-13	2,52E-13	1,65E-13	2,9E-13

APÊNDICE D – DOSAGENS DE CONCRETO – ETAPA 3

Tabela D.1 – Dosagens de concreto contendo partículas de borracha de pneu sem tratamento superficial.

Dosagem		E-12482	E-12484	E-12527	
Tipo de borracha		REF (CC)	Grânulos (CG)	Fibras (CF)	
% de borracha		0%	10%	10%	
Dados de Composição (kg/m ³)	Cimento CP II F	307	305	309	
	Água	151	150	152	
	Areia Natural	626	560	567	
	Borracha	---	28,3	28,7	
	Brita 19mm	535	531	538	
	Brita 38mm	681	676	685	
	Ad. superplastificante	0,460	0,520	0,618	
	Incorporador de ar	0,092	0,0	0,0	
Propriedades do Concreto Fresco	Relação A/C	0,492	0,492	0,492	
	% Argam. s/ ar incorporado	49,4	49,8	50,0	
	% Argam. c/ ar incorporado	54,0	54,4	53,8	
	Módulo de Finura	5,783	5,836	5,846	
	% Areia em massa	34	33	33	
	% Areia em volume	34	34	34	
	Abatimento (cm)	4,0	4,0	3,5	
	Ar incorporado (%)	4,6	4,6	3,8	
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	21,5	19,2	18,8	
		22,5	18,9	20,7	
	28 dias	26,0	21,4	24,3	
		27,0	22,2	24,0	
	91 dias	31,7	26,7	27,0	
		30,9	26,2	26,5	
	364 dias	31,1	26,0	25,2	
		30,6	26,7	24,2	
	728 dias	27,6	20,4	20,9	
		27,6	20,4	20,9	
	Módulo de elasticidade (GPa)	7 dias	17,2	19,2	20,2
			19,3	20,5	18,9
28 dias		28,0	22,4	21,9	
		26,5	20,5	21,2	
91 dias		29,2	24,4	25,8	
		32,0	24,8	24,3	
364 dias		38,0	32,5	30,5	
		37,3	29,1	30,5	
728 dias	27,9	23,9	21,5		
	27,9	24,3	21,7		

Dosagem		E-12482	E-12484	E-12527
Tipo de borracha		REF (CC)	Grânulos (CG)	Fibras (CF)
% de borracha		0%	10%	10%
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	7 dias	2,69	2,74	2,65
		2,69	2,70	2,79
	28 dias	2,88	2,63	3,30
		3,06	3,08	3,16
	91 dias	3,08	3,03	2,58
		3,12	2,96	2,53
Deformação a 95% da Carga de Ruptura – Face Tracionada (x10-6cm/cm)	7 dias	172,82	184,97	186,75
		172,82	191,45	250,71
	28 dias	162,22	230,93	179,33
		182,90	219,50	246,31
	91 dias	229,31	267,46	198,72
		217,40	237,76	249,75
Deformação a 95% da Carga de Ruptura – Face Comprimida (x10-6cm/cm)	7 dias	140,00	154,59	151,66
		140,00	154,59	151,66
	28 dias	148,63	169,84	149,45
		145,58	176,25	171,11
	91 dias	173,61	177,25	148,88
		173,61	168,10	209,65
Módulo de Elasticidade - Face Tracionada (GPa)	7 dias	18,30	17,75	16,14
		18,30	17,33	17,43
	28 dias	20,20	18,79	18,70
		20,20	18,96	18,70
	91 dias	16,90	16,88	16,30
		16,90	16,01	16,30
Módulo de Elasticidade - Face Comprimida (GPa)	7 dias	20,00	20,01	19,22
		20,00	20,01	18,83
	28 dias	21,50	20,44	22,20
		21,50	19,81	22,20
	91 dias	20,80	20,55	18,58
		20,80	20,01	18,58
Fluência Específica (x10 ⁻⁶ /MPa)	a partir de 7 dias, durante 91 dias	36,140	41,328	37,116
		36,171	42,954	39,581
	a partir de 28 dias, durante 91 dias	29,102	31,324	28,154
		22,585	35,493	36,798
	a partir de 91 dias, durante 91 dias	19,969	27,586	28,494
		15,719	24,495	25,383
Retração Autógena (x10 ⁻⁶)	a partir de 7 dias, durante 91 dias	54,48	54,70	52,70
		52,77	47,16	41,60
	a partir de 28 dias, durante 91 dias	37,63	27,04	34,32
		41,54	27,70	30,30
	a partir de 91 dias, durante 91 dias	23,57	14,70	19,17
		27,52	19,70	23,65

Dosagem		E-12482	E-12484	E-12527
Tipo de borracha		REF (CC)	Grânulos (CG)	Fibras (CF)
% de borracha		0%	10%	10%
Coeficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	7 dias	9,55	10,71	9,05
		10,34	10,61	9,77
		10,17	10,07	10,28
		10,63	10,57	10,90
		10,19	9,30	9,62
		10,89	9,98	10,20
		10,25	10,33	10,32
	28 dias	10,78	10,59	10,82
		10,16	10,82	11,20
		10,65	10,93	11,16
		10,66	10,06	10,25
		11,50	10,94	10,92
		10,97	10,38	10,65
		10,96	10,36	10,60
		10,51	10,17	10,39
		10,94	10,63	11,09
		10,59	11,16	11,61
		10,75	11,08	11,15
		10,19	10,26	10,41
		11,94	11,23	11,61
		11,32	10,56	11,31
11,17	11,09	10,86		
10,70	10,09	10,72		
12,06	11,21	11,84		
Condutividade Térmica (J/m.s.K)	2,299	2,280	2,334	
	2,308	2,287	2,319	
	2,318	2,255	2,310	
	2,299	2,287	2,291	
	2,287	2,271	2,326	
	2,307	2,273	2,291	
Difusividade Térmica (m^2/dia)	0,1021	0,0936	0,0941	
	0,0971	0,0936	0,0923	
	0,1003	0,0903	0,0934	
	0,0957	0,0950	0,0958	
	0,1002	0,0912	0,0947	
	0,0942	0,0911	0,0928	
Calor Específico ($\text{cal/g.}^{\circ}\text{C}$)	0,245	0,254	0,224	
	0,247	0,256	0,235	
	0,264	0,275	0,258	
	0,252	0,251	0,236	
	0,255	0,246	0,257	
	0,251	0,286	0,257	

Dosagem		E-12482	E-12484	E-12527
Tipo de borracha		REF (CC)	Grânulos (CG)	Fibras (CF)
% de borracha		0%	10%	10%
Elevação Adiabática da Temperatura (°C)	7 dias	28,5	29,9	27,8
		28,5	30,7	27,8
	28 dias	41,4	41,9	39,4
		41,4	42,7	39,4
Absorção (%)	28 dias	3,34	2,88	3,15
		3,00	3,24	2,79
	364 dias	3,46	3,19	2,87
		3,18	2,97	3,34
	728 dias	4,32	3,94	5,51
		5,11	3,94	5,76
Massa específica (kg/m ³)	28 dias	2430	2420	2420
		2430	2400	2430
	364 dias	2450	2420	2430
		2430	2430	2440
	728 dias	2470	2440	2520
		2490	2450	2520
Índice de Vazios (%)	28 dias	7,51	6,52	7,09
		6,80	7,23	6,35
	364 dias	7,81	7,16	6,53
		7,16	6,72	7,51
	728 dias	9,63	8,75	12,19
		11,29	8,80	12,68
Absorção por Capilaridade (g/cm ²)	364 dias	0,61	0,22	0,22
		0,51	0,24	0,34
	728 dias	0,86	0,39	0,37
		0,56	0,39	0,27
Permeabilidade (m/s)	91 dias	7,951E-12	4,187E-12	5,352E-11
		1,158E-11	2,011E-12	7,300E-11
	364 dias	3,112E-12	2,589E-12	2,490E-12
		7,978E-13	1,315E-11	5,314E-13
	728 dias	4,282E-12	1,335E-12	7,583E-12
		3,579E-12	3,311E-12	9,204E-12