

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THIAGO PASTRE PEREIRA

ESTUDO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE
BORRACHA

Ilha Solteira
2016

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THIAGO PASTRE PEREIRA

**ESTUDO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE
BORRACHA**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia – UNESP - do Campus
de Ilha Solteira, como um dos pré-
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil
Área de conhecimento: Estruturas

Orientadora: Prof. Dr^a. Maria da
Consolação Fonseca de Albuquerque

Ilha Solteira

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436e Pereira, Thiago Pastre.
Estudo do concreto de alto desempenho com adição de borracha / Thiago Pastre Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
115 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2016

Orientador: Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque
Inclui bibliografia

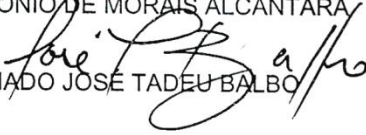
1. Concreto de alto desempenho. 2. Propriedade mecânica e reológica do concreto. 3. Resíduo de borracha.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE THIAGO PASTRE PEREIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 25 dias do mês de novembro do ano de 2016, às 08:00 horas, no(a) Departamento de Engenharia Civil - Sala 50, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Prof. Dr. MARCO ANTONIO DE MORAIS ALCANTARA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, PROFESSOR ASSOCIADO JOSÉ TADEU BALBO do(a) Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes / UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de THIAGO PASTRE PEREIRA, intitulada **ESTUDO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE BORRACHA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE

Prof. Dr. MARCO ANTONIO DE MORAIS ALCANTARA


PROFESSOR ASSOCIADO JOSÉ TADEU BALBO

Ao meu pai *Ivan Pereira*, minha mãe *Ana Lúcia Pastre Pereira* e, ao meu irmão *Leonardo Pastre Pereira*. Meus exemplos base com a confiança, companheirismo, cumplicidade, através da crença e torcida que tem por mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o meu melhor e maior agradecimento. A força maior que me permitiu a vida até aqui e a execução de muitos de meus sonhos que já passaram a ser realidade.

Aos meus protetores e pais Ivan Pereira e Ana Lúcia Pastre Pereira, que me apoiam nas escolhas e dão incentivo necessário, apoio moral e refúgio sentimental em todos os momentos da minha vida.

À minha professora e orientadora Dra. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, pela amizade/confiança construídas ao longo de nossa convivência ao longo destes quatro anos. Pela orientação competente e sempre muito incentivadora, além da luta pelo meu bem-estar como orientado e conselhos a ponto de impactar positivamente na minha decisão de realização do mestrado, minha atual fase de vida.

Aos amigos que fiz e consegui manter durante toda a faculdade, e aos que mesmo depois de formados mantiveram contato deixando claro o significado da nossa amizade. Em especial, aos amigos Carlos Eduardo Cardoso Galli, Rafael Costa Dionísio. Incluindo-se Rodrigo Yuiti Kumagai que se foi, mas que ficaram as memórias dos momentos.

Aos parceiros de república, de faculdade, de estudos e de várias outras horas de diversão, André Luis Toniati, Bruno Pimenta Rocha, Carlos Alberto Alves Viana, Lucas Henriques Pereira, Renato Elberto Vella Júnior, Victor Hugo Oliveira Soares e ao Jhaber Dhasan Yacoub que além disso, esteve de companhia na elaboração da dissertação.

Ao amigo e parceiro de laboratório Marcelo Santana, que dividiu comigo várias horas de produção de traços de concreto e argamassa, e somou trabalhos da dissertação, escrita de artigos, participações em bancas e afins.

Ao José Carlos, amigo e também secretário do Departamento de Engenharia Civil, sempre disposto a ajudar e orientar na entrega de documentos, além da amizade e preocupação fora do local de trabalho.

Aos técnicos e amigos do laboratório de Engenharia Civil da UNESP- FEIS, Gilson Campos Correa, Mário R. C. Ferreira, Flavio Porato, Ozias Porto e Natalia Antoniali por todo o suporte fornecido em ocasiões que, às vezes, passavam das obrigações de técnicos. Como um time, tiveram suas funções e responsabilidades para obtenção dos resultados deste trabalho.

Aos profissionais Elton José de Souza, Rafael Teloli, Caroline Cervigni Fassio, Carlos José Santana, Samuel da Silva que contribuíram para obtenção de alguns dos dados contidos neste trabalho.

Ao integrante da banca de qualificação desta pesquisa, Prof. Dr. Adriano Souza pelas contribuições, por meio de sugestões ao trabalho.

Aos integrantes titulares da banca de defesa desta pesquisa, Prof. Dr. José Tadeu Balbo e Prof. Dr. Marco Antonio de M. Alcântara. Também aos suplentes, Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silvae Prof. Dr^a. Ivone Regina de Oliveira.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP- FEIS, onde foram realizadas todas as etapas desse projeto, em especial ao Departamento de Engenharia Civil-DEC, onde tive muitas oportunidades em todos estes sete anos em Ilha Solteira.

“Cada sonho que você deixa pra trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.”

(Steve Jobs)

RESUMO

A inserção de resíduos de borracha de pneu no concreto, embora traga melhoras em propriedades acústicas, térmicas e redução da fadiga e da vibração no concreto, tem como consequência negativa a queda da resistência à tração e à compressão. Tendo em vista tal problema, admitiu-se uma mistura de Concreto de Alto Desempenho (CAD) como referência e a partir desta, substituíram-se diferentes granulometrias de areia por resíduos de borracha, em volume. Ao encontrar a melhor resistência respectiva ao tamanho dos grãos de resíduos, aumentaram-se as proporções de substituição do material, a fim de encontrar a viabilidade do uso. Com os dados obtidos, observou-se que até 10% de substituição de areia pelo resíduo (na granulometria e traço adotado) a interferência na resistência é mínima, ou praticamente nula. Com 15% de substituição, ocorre queda drástica na resistência à compressão axial. Neste ponto, portanto, decide-se realizar adições na mistura, a fim de diminuir a queda na resistência, ocasionada pelo resíduo. Pôde-se ainda comparar os comportamentos relacionados aos diferentes processos de curas no concreto e tratamentos superficiais nos corpos de prova para ensaios de resistência (com e sem resíduos). As substituições de areia por resíduos em até 10% ocasionaram pequena queda na resistência à compressão axial. A utilização de partículas de borracha separadas na faixa granulométrica de 0,6 mm até 1,19 mm foi a melhor solução para a diminuição da queda na resistência, quando comparado com o aumento do teor de partículas finas.

Palavras-Chave: Concreto de alto desempenho. Propriedade mecânica e reológica do concreto. Resíduo de borracha.

ABSTRACT

Although the rubberized concrete has advantages in the acoustic, thermal properties and reduction of fatigue and vibration in the concrete, has as disadvantage the fall of the resistance to the traction and the compression. In view of such a problem, a mixture of High-Performance Concrete (HPC) was allowed as reference and from this, different grit sizes of sand were replaced with rubber waste, in volume. By finding the best resistance to the size of the ground rubber grains, the proportions of substitution of the material were increased in order to study the feasibility of such a concrete for structural uses. For view the results, it was observed that the decay of strength is minimal or practically null when replacing grains by waste (in granulometry and mix adopted) up to 10%. Fifteen percent residue replacement causes a drastic drop the strength. At this point, additions in the mixture, in order to reduce the decrease in strength caused by the residue. It was also possible to compare the behaviors related to different processes of curing in concrete, and treatments on the surface of the specimens for strength test (with and without ground rubber). The substitutions up to 10% caused a low decay in strength. The use of ground rubber of size range from 0.6 mm to 1.19 mm was the best use to reduce the decay in strenght, when compared to the increase in fine particles ratio.

Keywords: High-performance concrete. Mechanical and rheological properties of concrete. Rubber waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dados das respostas ao impulso para: a) Concreto sem borracha; b) Concreto com borracha (Amplitude das ondas versus tempo).....	27
Figura 2 - Aplicação de carga <i>versus</i> deslocamento.....	27
Figura 3 - influência do material de capeamento sobre a resistência de concretos de alta e baixa resistência.....	31
Figura 4 - Características do cimento.....	34
Figura 5 - a) Material ao sol; b) Material na estufa; c) Armazenamento.....	35
Figura 6 - Curva granulométrica da areia.....	36
Figura 7 - Curva granulométrica da brita zero.....	36
Figura 8 - a) Amostra de superplastificante; b) Líquido, em detalhe.....	38
Figura 9 - Características da Sílica ativa.....	38
Figura 10 - a) Sílica ativa; b) Aspecto pouco coesivo.....	39
Figura 11 - a) Cinza de casca de arroz; b) Aspecto coesivo.....	39
Figura 12 - Partículas de cinzas de casca de arroz analisadas no microscópio eletrônico.....	40
Figura 13 - a) Material separado; b) Ensaio em andamento.....	41
Figura 14 - a) Brita separada; b) Ensaio em andamento.....	42
Figura 15 - a) Agitador de agregado; b) Material em uma das peneiras.....	42
Figura 16 - Procedimentos para a realização do <i>Slump test</i>	44
Figura 17 - a) Início de ensaio de compressão uniaxial; b) final de ensaio.....	45
Figura 18 - a) Conjunto para ensaio de tração por compressão diametral; b) Ensaio iniciando.....	45
Figura 19 - a) Extensômetros no corpo de prova (vista superior); b) Ensaio de modulo de elasticidade.....	46
Figura 20 - a) Início de ensaio de flexão; b) Corpo de prova rompido.....	46
Figura 21 - a) Martelo de impacto; b) Acelerômetros.....	47
Figura 22 - Mesa inercial.....	48
Figura 23 - Amostra engastada no torno.....	48
Figura 24 - a) Amostra preparada com os sensores; b) Sistema de aquisição dos dados.....	49
Figura 25 - a) Amostras preparadas; b) Metalizadora utilizada.....	50
Figura 26 - a) Amostras posteriores ao tratamento; b) Microscópio eletrônico.....	50

Figura 27 - a) Vista da câmara úmida b) Corpos de prova nas prateleiras	51
Figura 28 - Corpos de prova curando no sol	52
Figura 29 - a) Placa de madeira compensada; b) Corpo de prova durante ensaio com madeira compensada	53
Figura 30 - a) Instrumentos utilizados no capeamento; b) Prato de aço; c) Corpos de prova finalizados	54
Figura 31 - a) Máquina retificadora; b) Disco polindo corpo de prova; c) Corpo de prova finalizado	54
Figura 32 - a) Pasta utilizada na cimentação; b) Corpos de prova após cimentação; c) Detalhe da espessura da cimentação	55
Figura 33 - a) Placas de borracha; b) Corpo de prova durante ensaio com borracha	56
Figura 34 - a) Agregados e cimentos para serem colocados; b) produção em andamento	60
Figura 35 - a) Fôrma cilíndrica de PVC, em detalhe; b) Conjunto de fôrmas utilizadas	61
Figura 36 - Mesa vibratória utilizada no laboratório.....	61
Figura 37 - a) Moldes prismáticos sendo montados para utilização; b) Molde pronto para uso	62
Figura 38 - a) Agitador mecânico; b) Borracha sendo preparada para separação e; c) Resíduo resultante da separação.....	65
Figura 39 - Gráfico do comportamento das resistências à compressão axial dos traços da Fase I aos 7 e 98 dias	73
Figura 40 - Gráfico das resistências à compressão diametral da Fase I, aos 98 dias	74
Figura 41 - Médias das resistências à compressão axial aos 56 e 224 dias	78
Figura 42 - Resistências diametrais aos 56 dias	79
Figura 43 - <i>Slump test</i>	80
Figura 44 – Resistências à compressão axial aos 7 e 120 dias, para os traços com e sem borracha	82
Figura 45 - Resistências à tração por compressão diametral aos 7 e 120 dias, para os traços com e sem borracha	82
Figura 46 - Modulo de elasticidade/Resistência à compressão axial T5%, T10%, T15% e T _{Referência3}	85

Figura 47 - Resistências à compressão axial obtidas	87
Figura 48 - Gráfico dos tratamentos.....	89
Figura 49 - Três amostras, uma de cada traço, com detalhe interno (rompida).....	92
Figura 50 - Média das resistências à compressão axial dos traços da Fase V	94
Figura 51 - Materiais finos “tomando lugar” dos agregados graúdos	95
Figura 52 - Médias das resistências à compressão diametral dos traços da Fase V	96
Figura 53 - Médias das resistências à tração na flexão dos traços da Fase V.....	97
Figura 54 - Médias dos módulos de elasticidade dos traços da Fase V.....	97
Figura 55 - Microscopia do traço T15%.....	99
Figura 56 - Microscopia do traço T15%Cinzas.....	99
Figura 57 - Microscopia do traço TReferência5.....	99
Figura 58 - Resposta livre do traço TReferência3.....	100
Figura 59 - Resposta livre do traço T5%	100
Figura 60 - Resposta livre do traço T10%	101
Figura 61 - Resposta livre do traço T15%	102
Figura 62 - Resposta livre do traço TReferência5.....	103
Figura 63 - Resposta livre do traço T15%cinzas.....	103
Figura 64 - Resposta livre do traço T15%	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição média do pneu.....	37
Quadro 2 - Propriedades do superplastificante	37
Quadro 3 - Traços utilizados na primeira parte do trabalho (cimento:areia:brita).....	59
Quadro 4 - Traços da fase II.....	64
Quadro 5 - Nomenclatura dos traços da fase III e respectivas descrições.....	66
Quadro 6 - Nomenclatura e respectivo processo de cura	67
Quadro 7 - Traços para comparação de tratamentos superficiais.....	68
Quadro 8 - Nomenclatura dos traços com respectivos tratamentos.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa específica dos agregados utilizados	35
Tabela 2 - Traços originados na Fase I.....	71
Tabela 3 - Consumos de cimento por traço	72
Tabela 4 - Dados obtidos na Fase I	72
Tabela 5 - Médias, aumento, desvio e porcentagem de aumento de massa dos Corpos de prova.....	74
Tabela 6 - Traços da Fase II, com resíduos.....	75
Tabela 7 - Médias das massas dos corpos de prova	76
Tabela 8 - Valores obtidos na Fase II.....	76
Tabela 9 – Acréscimo das resistências médias dos 56 aos 224 dias de idade	77
Tabela 10 - Traços T15%, T10%, T5% e T _{Referência3}	80
Tabela 11 - Consumos de cimento em kg por m ³ de concreto	80
Tabela 12 - Valores de Resistências da Fase III.....	81
Tabela 13 - Valores dos módulos de elasticidade e das resistências à compressão axial aos 169 dias.....	84
Tabela 14 – Dados obtidos na Fase IV, relativos às curas	86
Tabela 15 - Dados obtidos na Fase IV, relativos aos tratamentos superficiais	88
Tabela 16 - Traços e suas composições na Fase V.....	90
Tabela 17 - Médias das massas dos Corpos de prova produzidos	91
Tabela 18 - Valores obtidos nos ensaios aos 28 dias para os traços da Fase V	93
Tabela 19 - Razão “Módulo de elasticidade/Resistência à compressão axial”, em GPa/MPa.....	98
Tabela 20- Coeficientes de amortecimento para os traços T _{Referência3} , T5%, T10% e T15%.....	102
Tabela 21 - Coeficientes de amortecimento para os traços T _{Referência5} , T15% _{Cinzas} e T15%.....	105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CONCRETO	21
2.2	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	23
2.3	CONCRETO COM RESÍDUOS DE BORRACHA.....	24
2.4	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO.....	29
2.5	PARÂMETROS DINÂMICOS	32
2.6	QUEDA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM BORRACHA.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS	34
3.1.1	Aglomerantes	34
3.1.2	Agregados	34
3.1.3	Aditivos	37
3.2	MÉTODOS	40
3.2.1	Ensaio de caracterização dos materiais	40
3.2.1.1	<i>Relacionados à areia</i>	40
3.2.1.2	<i>Relacionados à brita zero</i>	41
3.2.1.3	<i>Relacionados aos resíduos de borracha de pneus inservíveis</i>	43
3.2.2	Estado fresco	43
3.2.2.1	<i>Coesão, consistência e trabalhabilidade</i>	43
3.2.2.2	<i>Aferição de massa dos corpos de prova</i>	44
3.2.3	Estado endurecido	44
3.2.3.1	<i>Ensaio de resistência à compressão uniaxial</i>	44
3.2.3.2	<i>Ensaio de tração por compressão diametral</i>	45

3.2.3.3	<i>Ensaio de modulo de elasticidade estático à compressão</i>	46
3.2.3.4	<i>Ensaio de resistência à tração na flexão</i>	46
3.2.3.5	<i>Ensaio de vibração</i>	47
3.2.3.6	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	49
3.2.4	Métodos de Cura	51
3.2.4.1	<i>Cura na câmara úmida durante 28 dias</i>	51
3.2.4.2	<i>Cura sob sol por 28 dias</i>	51
3.2.5	Tratamentos superficiais	52
3.2.5.1	<i>Uso de placas de madeira compensada</i>	52
3.2.5.2	<i>Capeamento</i>	53
3.2.5.3	<i>Retificação</i>	54
3.2.5.4	<i>Cimentação</i>	54
3.2.5.5	<i>Uso de placas de borracha</i>	55
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	57
4.1	FASES	62
4.1.1	FASE I – Determinação do traço referência	62
4.1.2	FASE II – Determinação da granulometria do resíduo a ser utilizado	64
4.1.3	FASE III – Determinação da porcentagem do resíduo no traço a ser tratado	66
4.1.4	FASE IV – Análise de determinadas propriedades do material	67
4.1.5	FASE V – Tratamentos no concreto com 15% de resíduos	68
4.1.6	FASE VI – Análises do coeficiente de amortecimento	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	FASE I – DETERMINAÇÃO DO TRAÇO REFERÊNCIA	71
5.2	FASE II - DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO A SER UTILIZADO	75
5.3	FASE III – DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DO RESÍDUO NO TRAÇO A SER TRATADO	79

5.4	FASE IV - ANÁLISE DE DETERMINADAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	86
5.4.1	Processos de cura.....	86
5.4.2	Tratamento superficial	87
5.5	FASE V – TRATAMENTOS NO CONCRETO COM 15% DE RESÍDUOS	90
5.5.1	Fase fresca.....	91
5.5.2	Fase endurecida	92
5.6	FASE VI – ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO	100
6	CONCLUSÕES	106
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

Em meio à variedade de materiais para construção civil, destaca-se a utilização do concreto. Este material tem características que se sobressaem, possibilitando pesquisas em diversos segmentos. Existem diversos estudos para uso de materiais alternativos no concreto a fim de substituir agregados e até mesmo aglomerantes.

Atualmente, a preocupação com os problemas relacionados ao meio ambiente, que envolvem a construção civil, tem sido cada vez maior. Em busca de melhoras em aspectos ecológicos globais, criaram-se linhas de pesquisas para um concreto cada vez mais sustentável.

A produção do concreto compromete o meio ambiente. Para fabricar o cimento utiliza-se grande quantidade de energia. Os agregados são retirados de jazidas, gerando impacto ambiental local ou regional. Isso faz com que a produção de concreto busque alternativas mais ecológicas.

Outro problema importante relaciona-se com o descarte de lixo e resíduos. Faltam aterros para comportarem a quantidade de resíduos. Isso acarreta no descarte destes materiais inservíveis em locais irregulares ou inapropriados

Daí vem a ideia de inserção de resíduos no concreto. Esses resíduos quando inseridos no concreto podem trazer melhorias de algumas características em detrimento de outras. A borracha, por exemplo, melhora algumas propriedades do concreto no que diz respeito à fadiga, absorção de cargas, fissuras, choques, temperatura e acústica, entretanto tende a diminuir a resistência à compressão e à tração.

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é utilizado em obras com alto nível de qualidade, pois este é produzido com controle de materiais, utilizações de aditivos para diminuição da porosidade e aumento da resistência final.

Este trabalho fundamenta-se na verificação da viabilidade de uso de resíduo de borracha de pneu inservível no CAD. Relaciona-se, para tanto, a utilização destes

resíduos, permitindo não só a “reciclagem”, mas também melhoras em características do próprio concreto.

Para isso pretende-se inserir diferentes quantidades de borracha moída e sem tratamento, no CAD, a fim de analisar a partir de que quantidade inicia uma queda significativa da resistência. Para esta quantidade, a borracha será tratada antes de inseri-la, a fim de diminuir a queda da resistência à compressão.

Mesmo se tratando de uma pequena quantidade de borracha, em substituição à areia, uma opção de utilização do concreto em grande escala é em pavimentos rígidos, assim fica viável dar um fim nobre para uma grande quantidade de resíduo, mesmo em pequenas substituições. Estes tem durabilidade maior, em relação aos pavimentos flexíveis. Em quantidades elevadas, como no caso de uma rodovia, o concreto utilizaria muito resíduo de borracha em sua produção. Isso colaboraria com menor descarte irregular deste resíduo.

1.1 OBJETIVO

Analisar a influência de diferentes quantidades de borracha no CAD, a fim de obter uma medida de granulometria que amenize a queda da resistência à compressão uniaxial. A partir desta medida, comparar com outros tratamentos, também a fim de melhorar a resistência. Aumentar a ductilidade do material.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Existem melhoras significativas em determinadas propriedades do concreto ao adicionar resíduos de borracha. São elas: sensível diminuição das cargas estruturais devido ao peso próprio; maior resistência à abrasão; maior taxa de amortecimento; menor rigidez; maior isolamento térmico e acústico; entre outras.

Barbosa (2006), ao acrescentar resíduo de borracha no CAD, observou queda na massa específica, aumento da ductilidade, capacidade de absorção de carga,

tenacidade e, como consequência, redução da fragilidade. Tais estudos demonstram viabilidade para uso estrutural do CAD com borracha.

Segundo Turatsinze *et al.* (2007), materiais que tem cimento como base (concreto e argamassa, por exemplo) tem menor deformação. Com isso, as peças produzidas (como por exemplo: lajes, peças de fundações, dormentes de trilho) ficam frágeis e propensas a fissuras, afetando diretamente a durabilidade do material. Melhoras na ductilidade do material, devido à inserção de resíduos, se mostram interessantes neste aspecto.

Cervo (2004) estudou a fadiga comparando concretos de alto desempenho (CAD) com concretos convencionais (CV). Observou que para o CAD a resistência aos esforços repetitivos é menor, concluindo que este material tem respostas melhores a esforços estáticos de flexão. Sugere ainda melhores verificações da fadiga dos materiais utilizados em pavimentos, incluindo o CAD.

Martins (2005), utilizando cimento CP II-F-32, notou queda aproximada de 12% na resistência à compressão axial aos 91 dias, quando comparado com o CAD sem borracha. Embora tenha havido queda, chegou a resistências à compressão axial entre 50 e 70 MPa no CAD com 3 e 5% de borracha, respectivamente.

A fim de diminuir essa queda de resistência, Balaha, Badawy e Hashish (2007) estudaram a influência do tratamento da borracha utilizada como parte dos agregados no concreto. Tratou os resíduos de borracha em três diferentes condições: usando acetato de polivinila (PVA): sílica ativa (SA) e; hidróxido de sódio (NaOH). Comparados com o concreto contendo borracha sem tratamento, a queda nas resistências foram menores. Enquanto o concreto com resíduos de borracha sem tratamento teve resistência à compressão 27% menor que o de referência, os traços com borrachas tratadas tiveram queda de apenas 14% (PVA), 15% (SA) e 17% (NaOH).

A viabilidade da utilização de resíduos, possivelmente acarretaria em maiores investimentos no processamento dos pneus descartados para reutilização no concreto, auxiliando na diminuição dos descartes destes componentes no meio ambiente.

As características melhoradas do CAD com borracha, aliadas à possibilidade de amenizar a queda na resistência à compressão axial, tornam possível e interessante a sua utilização em peças estruturais. Fato este que justifica a realização do presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO

Concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil por ter resistência à água (diferente da madeira e do aço comum); pela facilidade de produção de peças ou elementos estruturais de diferentes tamanhos e formas e; pelo baixo custo, dependendo da disponibilidade dos materiais que o compõem (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Estima-se, atualmente, que o consumo de concreto no mundo seja da ordem de 11 bilhões de toneladas métricas ao ano (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Simplificadamente, ele resulta da mistura, em determinadas proporções (dosagem), de cimento Portland, areia, brita e água.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), cimento e a água são considerados aglomerantes e tem a função de realizar a ligação no material.

Os agregados têm a função de preenchimento da mistura, contanto que possuam resistências satisfatórias e sendo livres de impurezas, para a utilização. Apesar de serem relativamente inertes no concreto, sua granulometria tem grande importância na qualidade do produto final. Segundo Andriolo e Sgarboza (1993), devem ter grãos desde graduação mais fina até a mais graúda, para que resulte numa massa compacta.

Em se tratando de agregados graúdos, quanto mais áspera for a textura de seus grãos, haverá maior aderência entre as partículas e a pasta de cimento. Com isto, é reduzida a fluidez do concreto em sua fase fresca e se faz necessária maior quantidade de água para tal característica. A finura do agregado miúdo também se relaciona com a fluidez e, quanto menor seu módulo, mais indicada para proporcionar coesão ao concreto (TUTIKIAN; MOLIN, 2008).

É importante a qualidade da pasta de cimento, dos agregados, da água de amassamento e o cuidado na escolha dos aditivos para que resulte em durabilidade do concreto, além de rigor nos procedimentos de produção.

Não só é necessária qualidade dos agregados, mas também alguns processos posteriores à produção. A resposta do concreto às tensões aplicadas depende da combinação de alguns fatores como proporção e propriedades dos materiais que o compõem, do grau de compactação, parâmetros de ensaio e condições de cura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A cura é a última das operações importantes responsáveis pela durabilidade do concreto. Isso porque ainda depois da pega, a água no concreto continua reagindo com o cimento, dando continuidade no ganho de resistência (SOUZA; RIPPER, 1998). Este processo está relacionado com o equilíbrio da temperatura durante a pega.

A hidratação do cimento é uma reação exotérmica. Isto faz com que ocorra dilatação do concreto devido ao aumento de temperatura. Após a dilatação ocorre a retração do mesmo, a qual pode causar microfissuras na peça (ANDRIOLO; SKWARCZYNSKI, 1988). Quanto maior a temperatura, maior a dilatação e maior o tempo para acontecer a retração, o que afeta a resistência em longo prazo.

Segundo Balbo (2009), um concreto que não recebe a cura correta pode apresentar menores resistências e ainda, comprometer a hidratação do cimento devido à elevada evaporação da água que o compõe.

O tipo de cura depende de fatores como a forma na qual o concreto será empregado, dos equipamentos que serão utilizados para a sua produção, condições climáticas e volume de concreto. Em cura de pavimentos, por exemplo, utilizam-se mantas umedecidas periodicamente ou de produtos que são espargidos sobre a superfície para criar uma membrana impermeável, a fim de evitar a evaporação de água. (BALBO, 2009).

Em laboratório é comum utilizar câmara úmida para a cura dos corpos de prova produzidos. Nestas salas, a temperatura deve ser de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e a umidade, no mínimo, 95% para garantir que as superfícies dos corpos de prova estejam úmidas, de acordo com a ABNT NBR 9479:2006.

Em condições normais, a hidratação do cimento começa quando é adicionada água e desacelera consideravelmente quando os produtos da hidratação cobrem os grãos de cimento anidro, que se explica pela condição de umidade de saturação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os ensaios de resistência são uma etapa fundamental no processo de produção do concreto. Todos os ensaios devem obedecer a algumas especificações para que sejam executados, pois as propriedades mecânicas do concreto endurecido dependem do tempo e da temperatura ambiente em que a cura deste ocorreu.

Existem diferentes classes de concreto com diferentes tipos de características mecânicas e reológicas. Se tratando de escalas de resistências, segundo Mehta e Monteiro (1994), existem três tipos de concretos: os de baixa resistência (compressão até 20 MPa); concreto de resistência moderada (compressão de 20 Mpa até 40 MPa) e; concretos de alta resistência (compressão superior a 40 MPa). Os mais comuns são os concreto de moderada resistência.

Dentre os principais tipos para determinados usos, destacam-se as classificações de concreto convencional (CC), concreto compactado com rolo (CCR), concreto auto-adensável (CAA) concreto com resíduos (CCR), CAD.

2.2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O CAD recebeu este nome por apresentar características melhoradas, em relação ao concreto convencional. Exemplo disso é a menor porosidade, que o torna menos suscetível a ataques de agentes agressivos e, por consequência, resulta em maior durabilidade (BALBO, 2009)

Além dos materiais convencionais, o CAD tem aditivos em sua constituição. No mercado existem diversos aditivos para diversas finalidades, mas neste tipo de concreto utilizam-se superplastificantes, para redução da quantidade de água em sua constituição e, microssílica para preenchimento de vazios menores, que o torna menos poroso. Isso porque quanto mais poroso o concreto, maior é a tendência de

sofrer com os ataques químicos e físicos e, portanto, menor será a durabilidade (BAUER, 1994).

Aditivos minerais, como microssílica, são também usados no CAD para preenchimento de vazios menores e melhor homogeneidade da mistura. Aditivos superplastificantes possibilitam menor relação água/cimento da mistura. Misturas de concretos com menor quantidade de água tem menor segregação e exsudação (ANDRIOLO; SGARBOZA, 1993).

Além dos agregados naturais e dos aditivos, tem-se também a alternativa de usar agregados reciclados no CAD, como por exemplo, resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de borracha de pneus.

Barbosa (2006), ao estudar resíduos de borracha no CAD, obteve melhores resultados de resistência à compressão axial com acréscimo de cinza de casca de arroz no concreto, em porcentagens entre 5 a 10%. Para as porcentagens acima de 15%, os ganhos foram menores, comparados com as citadas.

Devido suas propriedades, o CAD é indicado para obras que estão sujeitas à erosão, à abrasão, esforços de tração ou compressão, intempéries, desgastes e agentes agressivos. Soleiras de vertedouros, hangares, pistas de aeroportos e pistas de rolamento de estradas são exemplos de tais obras (ANDRIOLO; SGARBOZA, 1993).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência à tração do concreto geralmente está entre 7 e 11% do valor da axial. Para concretos de resistências elevadas, essa relação tende a ser menor. Martins (2005) constatou que esta característica para o CAD foi sempre menor que 10% em seus trabalhos.

2.3 CONCRETO COM RESÍDUOS DE BORRACHA

O resíduo de borracha de pneus inservíveis, quando colocado no concreto, influencia algumas propriedades mecânicas do mesmo, dependendo da quantidade

na mistura. Deverá variar a trabalhabilidade e a resistência mecânica, com vantagens ou não.

A trabalhabilidade – fator diretamente relacionado com a fluidez - é um dos fatores alterados na fase fresca do concreto. Geralmente, a fluidez é diminuída, por consequência da superfície áspera da borracha que causa maior fricção entre os constituintes do concreto. (REDATAHA *et al.*, 2008).

Martins (2005) e Barbosa (2006) concluíram que a inserção de resíduos de borracha acarreta em significativa redução da trabalhabilidade.

Bravo (2014) analisou a inserção de diferentes substituições de areia por resíduos de borracha em blocos de concreto com utilização de metacaulim. A medida que a substituição aumentou, foram observadas diminuições da trabalhabilidade, do peso específico e da resistência a compressão axial (sendo esta última em valores de perda de 81%, ocasionada pela substituição por resíduos em 26,8%).

Farhan, Dawson e Thom (2015) explicam que a menor massa específica da borracha (em relação ao agregado miúdo) não é o único fator responsável pela queda da massa específica do concreto com resíduos. A eficácia da compactação é afetada pelo acréscimo de borracha devido ao amortecimento das partículas. Isso diminui a compactação do concreto, tornando-o mais leve.

Utilizando fibras de borracha (granulometria maior que da areia grossa) em lajes pré-moldadas treliçadas, Trigo (2008) comprovou que o aumento de resíduos de borracha no concreto aumentava o consumo de cimento e o teor de ar aprisionado; enquanto reduzia a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade.

Em estudos de Fioriti, Ino e Akasaki (2007), em blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha, apesar da queda na resistência à compressão axial, obtiveram-se melhoras na tenacidade (capacidade de absorção de energia) do material.

Queiroz (2012) adicionou teores de 10, 15, 20, 25 e 30 kg de resíduos de borracha por m³ em traços de tubos de concreto. Em todos os casos, as resistências

diametraes foram superiores ao limite da norma respectiva (NBR 8890/2007). Dentre esses, o traço com 15kg/m³ mostrou melhor resistência e menor absorção de água.

A borracha como agregado no concreto o torna um material com menor rigidez quando comparado com o concreto comum. Com isso, tem uma deformação maior. Turatsinze *et al.* (2007) observou esse comportamento em pesquisas com argamassa.

Martins (2005) relata a diminuição de 12% no modulo de elasticidade do CAD com borracha, quando comparado com o CAD sem borracha.

Thomas e Gupta (2015) concluíram que o concreto com borracha tem melhor resistência à abrasão quando comparado com o concreto referência (sem borracha). Ainda sugerem sua utilização em obras das quais sofrem por ações abrasivas aplicadas pela movimentação de veículos, tais como pisos de concreto, estradas e vertedouros de barragens.

A capacidade de absorção de carga pelo concreto mostrou-se melhorada em estudos que utilizaram borracha em substituição de parte de agregados miúdos. De acordo com Redataha *et al.* (2008), a baixa rigidez das partículas de borracha também deixa o concreto mais flexível e melhora consideravelmente a absorção da energia de impacto. Gupta *et al.* (2015) observou que essa característica era proporcional ao aumento do valor da substituição, ou seja, quanto mais borracha em sua constituição, mais golpes eram necessários para causar a primeira fissura no concreto, além de sua ruptura.

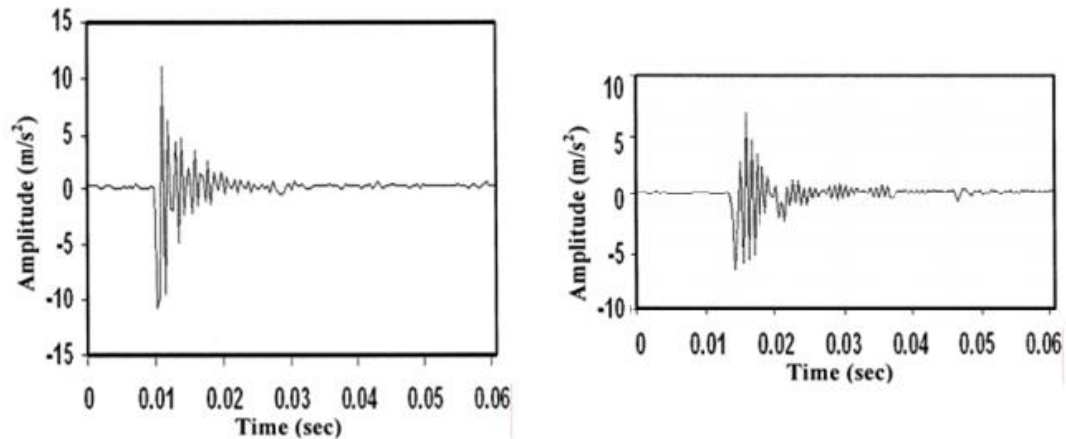
Estudando tubos de concreto com resíduos de borracha, Trentin (2014) verificou que as cargas de fissuração foram maiores que para os tubos com concreto sem resíduo. Consequentemente, retardou-se o processo de fissuração.

Por meio das razões de amortecimento das respostas ao impulso, Balaha, Badawy e Hashish (2007) verificaram que o concreto com 20% de resíduos de borracha tem melhor amortecimento, sendo ela, cerca de 60% maior.

A Figura 1 a) mostra o efeito do amortecimento no concreto sem borracha e a Figura 1 b) no concreto com borracha (BALAHA; BADAWY; HASHISH, 2007). Nota-se que, com borracha, a amplitude da onda é menor e mais duradoura, fazendo com

que a energia se dissipe por mais tempo. Ou seja, a taxa de amortecimento é maior (BALAHA; BADAUWY; HASHISH, 2007).

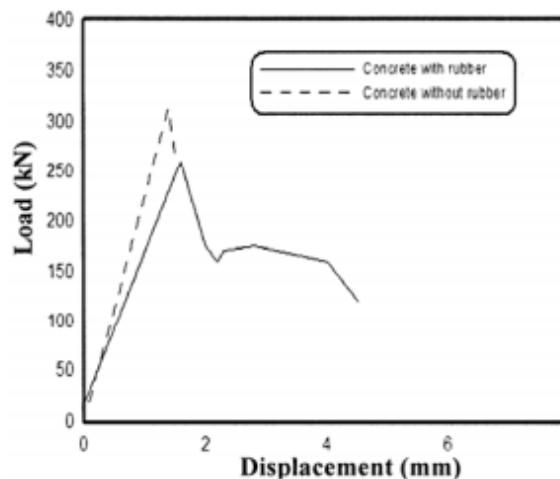
Figura 1– Dados das respostas ao impulso para: a) Concreto sem borracha; b) Concreto com borracha (Amplitude das ondas versus tempo)



Fonte: Balaha, Badawy e Hashish (2007)

Relacionado ao amortecimento de modo crítico, observa-se que a ruptura no concreto comum é abrupta. No caso do concreto com borracha, ocorre uma absorção de carga, logo após a ruptura (BALAHA; BADAUWY; HASHISH, 2007). A Figura 2, retirada dos trabalhos de Balaha, Badawy e Hashish (2007) mostra um gráfico sobre tal fato, onde o concreto comum é representado por linha tracejada e o com borracha, com linha contínua.

Figura 2 - Aplicação de carga versus deslocamento



Fonte: Balaha, Badawy e Hashish (2007)

Balaha, Badawy e Hashish (2007) também observaram que com o aumento do teor de cimento (no caso dos seus estudos: 300, 400 e 500 kg/m³) nos traços, aumentou-se a resistência uniaxial, embora em todos eles, à medida que se aumentava a inserção dos resíduos (5, 10, 15 e 20%), a queda acontecia. Ao mesmo tempo, a massa específica do concreto teve redução, que pode ser atribuída à massa específica da borracha que entra no lugar da areia.

A melhora na absorção dos impactos foi significativa e proporcional ao aumento de sílica nas misturas com borracha estudadas por Gupta *et al.*, (2015). Mais golpes foram necessários para a primeira ruptura em concretos que continham 10% de sílica em substituição do cimento. Já para o caso de 5% o número se reduziu, porém quando comparado ao concreto sem sílica, ainda foram necessários mais golpes.

Ocorre redução da massa específica do concreto ao se adicionar resíduos de borracha, isto pode ser atribuído a dois fatores, de acordo com Redataha *et al.* (2008). O primeiro se deve ao fato da borracha poder aprisionar um pouco de ar em sua superfície, devido sua textura irregular e; o segundo pelo fato da borracha ter menor massa específica que a do agregado que está sendo substituído.

Fazzan (2011), adicionando o resíduo de borracha ao final do processo de mistura, verificou menor teor de ar aprisionado e aumento no valor do módulo de elasticidade (de 25,77 GPa para 29,90 GPa), quando comparado com a adição de resíduo realizada ao início da mistura no traço. O autor atribui ao melhor empacotamento das partículas no processo.

Com relação às propriedades de absorver ruídos e vibrações, existe uma ideia comum entre pesquisadores de que a inserção de resíduos de borracha no concreto o torna melhor isolante térmico e acústico, além de melhorar a capacidade de amortecimento (KHALOO *et al.*, 2008;. ZHENG *et al.*, 2008;. SUKONTASUKKUL, 2009 citados por ONUAGULUCHI; PANESAR, 2014). Isso possibilita a utilização deste tipo de material em barreiras sonoras nas rodovias, por exemplo. Um exemplo prático de utilização deste tipo de barreira localiza-se na marginal do rio Tietê, próximo da ponte Julio de Mesquita Neto, na cidade de São Paulo (VASCONCELOS, 2005).

Guo *et al.* (2014) relataram menor número de microfissuras no concreto com resíduos de borracha, à temperatura elevada. Nas misturas em que o volume de resíduo era maior, quase não havia fissuras. Isso porque quando a 170°C, a borracha se funde, dando espaço para a água contida que se evapora. A retração, que é um dos principais motivos para a fissuração, conseqüentemente é menor.

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO

De modo geral, um concreto comum contendo mais cimento tem uma resistência mais elevada, tanto na compressão quanto na tração. Segundo Balaha, Badawy e Hashish (2007), esse comportamento pode ser explicado devido a maior quantidade de produtos (silicatos de cálcio) formados pela hidratação, diretamente proporcional a quantidade de cimento (reagente). Estes produtos formados preenchem os volumes vazios disponíveis dos poros. Portanto, com o preenchimento de maior quantidade de poros, além do concreto se tornar mais impermeável, sua seção útil é considerada maior.

A temperatura de cura e o tempo de cura são fatores importantes sobre a resistência do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008) quanto maior o tempo de cura, mais alta a resistência. Em temperaturas maiores durante a cura, embora a resistência em longo prazo seja afetada, a resistência inicial do concreto é maior, pois influencia diretamente na velocidade das reações, preenchendo progressivamente os vazios com os produtos da hidratação do cimento.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a *pega* do concreto é definida como o processo de solidificação do mesmo, relacionada com o enrijecimento devido à perda gradual de água livre por evaporação ou reação com o cimento, em sua hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A partir do início de pega, fica inviável a utilização do material para a concretagem - lançamento, adensamento. A resistência do concreto não é adquirida no fim de pega, pois neste momento inicia-se a hidratação do Silicato de tricálcico (C₃S). O preenchimento dos vazios no concreto continua ocorrendo durante as semanas posteriores, com a produção destes compostos. Com isto, a porosidade do

material diminui, dificulta a entrada de agentes e, portanto, influencia positivamente em sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para Neville (1982), o ensaio mais comum no concreto endurecido é o ensaio de compressão simples, visto que é de fácil execução e também porque muitas, embora não todas, as características do concreto estão relacionadas com a resistência, principalmente quando se trata de resistência à compressão nas obras de concreto.

São diversas as finalidades dos ensaios de resistência no concreto, mas os principais objetivos são o controle de qualidade e a verificação das especificações (NEVILLE, 1982). Dentro de um canteiro de obras, é inviável ensaiar amostras de concreto o tempo todo, portanto, os ensaios de resistência são feitos em lotes de corpos de prova, com uma frequência que varia conforme o andamento da obra.

Para a execução dos ensaios de resistência no concreto, as superfícies de concreto devem ficar isentas de partículas soltas de areia ou outros resíduos (NEVILLE, 1982). Quando a superfície do concreto, que recebe a carga, está regularizada, não ocorrem quedas de resistência, ou seja, os valores não ficam prejudicados. As maneiras mais comuns de se regularizar a superfície de uma amostra são: colocar calços, regularização ou “lixamento” do corpo de prova e o “capeamento” da amostra.

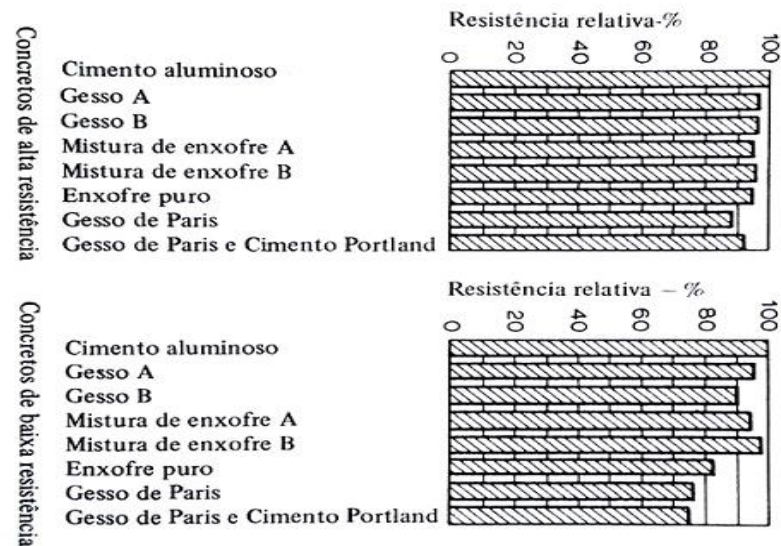
Quando se adota o uso de calços nos corpos de prova, os calços podem ser feitos de madeira, chumbo e neoprene. É uma maneira pouco utilizada atualmente, pois resultam numa redução apreciável da resistência aparente do concreto em relação às obtidas com corpos de prova capeados ou mesmo bem acabados com colher (NEVILLE, 1982).

A retificação dos corpos de prova consiste em eliminar as saliências da superfície que sofrerá carregamento. Na retificação, subtrai-se uma fatia de pequena espessura por meio de um corte reto, enquanto no processo de “lixamento” a superfície é regularizada por meio de atrito com uma segunda superfície áspera. No entanto, a desvantagem dessas técnicas é que pode ocorrer uma subtração excessiva de material nos locais retificados, diminuindo as dimensões da amostra e prejudicando os valores de resistência do concreto.

Nos ensaios, a técnica mais comum empregada para regularizar as superfícies dos corpos de prova é o “capeamento”. Essa técnica tem como vantagem a baixa ou nenhuma perda de resistência das amostras, dependendo do material que é empregado no processo.

Segundo Neville (1982), um material ideal para capeamento de uma amostra deveria ter resistências e propriedades elásticas comparáveis àquelas do concreto dos corpos de prova. Alguns materiais passíveis de servir no processo de capeamento foram testados quanto a perda de resistência por Neville (1982) e os resultados são mostrados na Figura 3.

Figura 3 - influência do material de capeamento sobre a resistência de concretos de alta e baixa resistência



Fonte: Neville (1982)

Para a execução de um pavimento rodoviário, é necessário controle tecnológico sobre os materiais, com dosagem correta. Deve-se atentar aos métodos de cura, temperatura do concreto, tipos de aditivos, entre outros. O consumo de cimento deve ser maior que 320 kg/m³ de concreto para garantir maior durabilidade. A resistência à tração na flexão, definida em projeto, equivale a 4,5 MPa ou, no caso dos pavimentos armados, a resistência característica à compressão axial é geralmente 30 MPa (DNIT, 2004).

2.5 PARÂMETROS DINÂMICOS

A análise de parâmetros dinâmicos do sistema estrutural, tais como frequências naturais e taxas de amortecimento tem se mostrado eficiente para a detecção de danos em estruturas. Tais métodos utilizam-se do decremento aleatório, que consiste em encontrar respostas da estrutura por meio de cargas aplicadas, por meio de ensaios não destrutivos (MORSY *et al.*, 2016).

Morsy *et al.* (2016) notaram diferentes comportamentos da frequência natural e do amortecimento em vigas de concreto armado. Os resultados para diferentes cargas mostraram que a frequência natural diminuiu 6% do valor intacto (sem cargas), indicando crescimento de fissuras e a presença de dano. Por outro lado, o amortecimento aumentou à medida que o nível de dano foi maior.

Por meio do ensaio de amortecimento, é possível a obtenção de tais características da estrutura (frequência natural e amortecimento).

2.6 QUEDA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM BORRACHA

O concreto com resíduos de borracha, de modo geral, tem sua resistência mecânica reduzida (FRANÇA, 2004; MARTINS, 2005; TRIGO, 2008; FAZZAN, 2011; BRAVO, 2014; TRENTIN, 2014;).

França (2004) observou redução nas características mecânicas com a incorporação dos resíduos em proporções de 10% em substituição a areia, embora a ruptura axial acontecesse de forma menos brusca.

Eiras *et al.* (2014) explica a queda na resistência pela fraca ligação das superfícies do resíduo com os componentes do concreto. A alta deformação da borracha não lhe atribui boa resistência a cargas compressivas, fazendo com que ela tenha comportamento semelhante ao de vazios.

Rodrigues, Ferreira e Ino (2007) analisaram placas tipo *drywall* contendo partículas de borracha e obtiveram para estas, menores resistências à compressão que de placas com areia natural e argila expandida.

Os locais do concreto em que existem partículas de borrachas facilitam a formação de microfissuras, tal como ocorre em locais vazios do material (ELDIN; SENOUCI 1993; LEE *et al.* 1998; KHATIB; BAYOMY 1999 Citados por REDATAHA *et al.*, 2008). Isso se dá devido à capacidade de deformação da borracha.

Outra hipótese é que as partículas arredondadas de resíduos de borracha, quando comprimidas podem adquirir formas elípticas, iniciando fissuras por tensão nas paredes da pasta de cimento. A menor ligação entre as partículas de borracha com a pasta de cimento mostra uma sensibilidade, separando partículas à medida que existe aumento de carga (BALAHA; BADAWY; HASHISH, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Nesta subseção apresentam-se os materiais utilizados e suas respectivas propriedades.

3.1.1 Aglomerantes

- Cimento Portland tipo II composto com pozolana (CP II – Z – 32), o mais utilizado nas obras convencionais na cidade de Ilha Solteira. A massa específica média equivalente a $2,96 \text{ g/cm}^3$ e comercializado em sacos de 50 kg. As características do material estavam de acordo com a ABNT NBR 11578:1991. Baseado em tal norma, algumas destas características são organizadas na Figura 4 (ABNT, 1991).

Figura 4 - Características do cimento

Parâmetros Químicos	
Perda ao fogo	$\leq 6,5$ (% massa)
Óxido de Magnésio	$\leq 6,5$ (% massa)
Trióxido de Enxofre	$\leq 4,0$ (% massa)
Acido carbônico	$\leq 5,0$ (% massa)
Parâmetros físicos e mecânicos	
Área específica	$\geq 260 \text{ m}^2/\text{kg}$
Tempo de início de pega	$\geq 1\text{h}$
Resistência à compressão	
Aos 3 dias	$\geq 10,0 \text{ Mpa}$
Aos 7 dias	$\geq 20,0 \text{ Mpa}$
Aos 28 dias	$\geq 32,0 \text{ Mpa}$

Fonte: ABNT (1991)

- Água potável proveniente da rede de distribuição do município de Ilha Solteira - SP, no período de Fevereiro de 2015 a Abril de 2016.

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados foram brita zero, areia e borracha. A brita zero, de origem basáltica, proveniente de jazidas do município de Andradina. A areia,

proveniente do porto de areias do município de Castilho. Os resíduos de borracha são resultantes de processos de recauchutagem, provenientes de uma empresa localizada no município de Araçatuba.

Antes da utilização dos materiais, os mesmos foram secos ao sol (no pátio do laboratório da FEIS/UNESP) para que houvesse evaporação da água, e resultasse em umidade próxima a 0% para comparação dos resultados a serem obtidos. Posterior a isto, foram armazenadas em locais apropriados, até o momento da utilização na produção do concreto. Ao final da secagem ao sol, foram retiradas amostras de cada agregado e colocadas em estufa por ± 24 horas a fim de se comprovar a condição de umidade 0% do lote do material respectivo. Na Figura 5 a) é possível ver o procedimento ao sol; na Figura 5b), o procedimento em estufa e; na Figura 5c) o recipiente para armazenamento do lote de material.

Figura 5 - a) Material ao sol; b) Material na estufa; c) Armazenamento



Fonte: Do próprio autor

A massa específica dos agregados é mostrada na Tabela 1, em g/cm^3 .

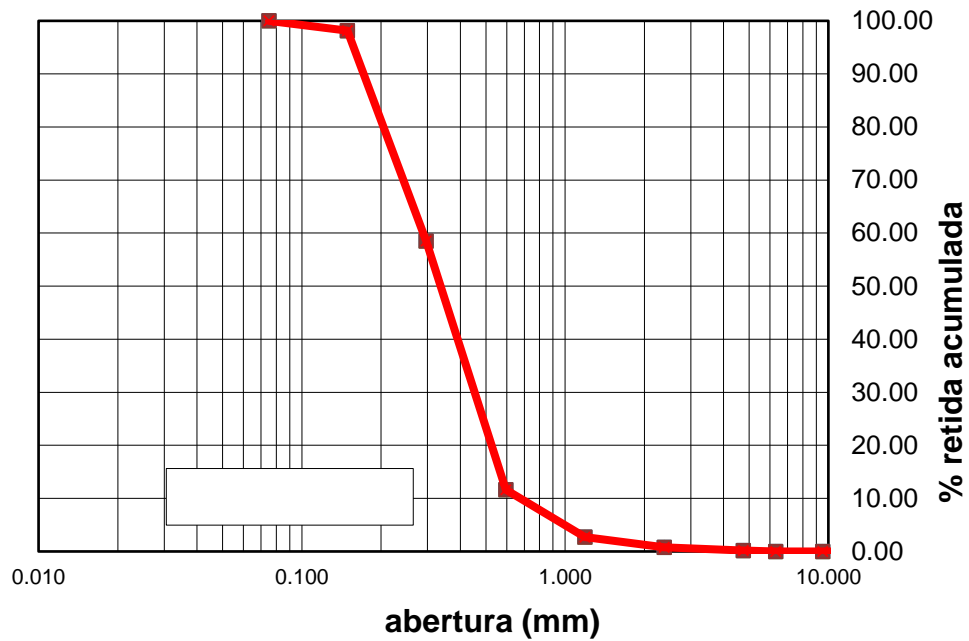
Tabela 1 - Massa específica dos agregados utilizados

Propriedade	Brita zero	Areia	Borracha
Massa específica (g/cm^3)	2,91	2,66	1,08

Fonte: Do próprio autor

A Figura 6 mostra a curva granulométrica resultante do ensaio realizado para a areia.

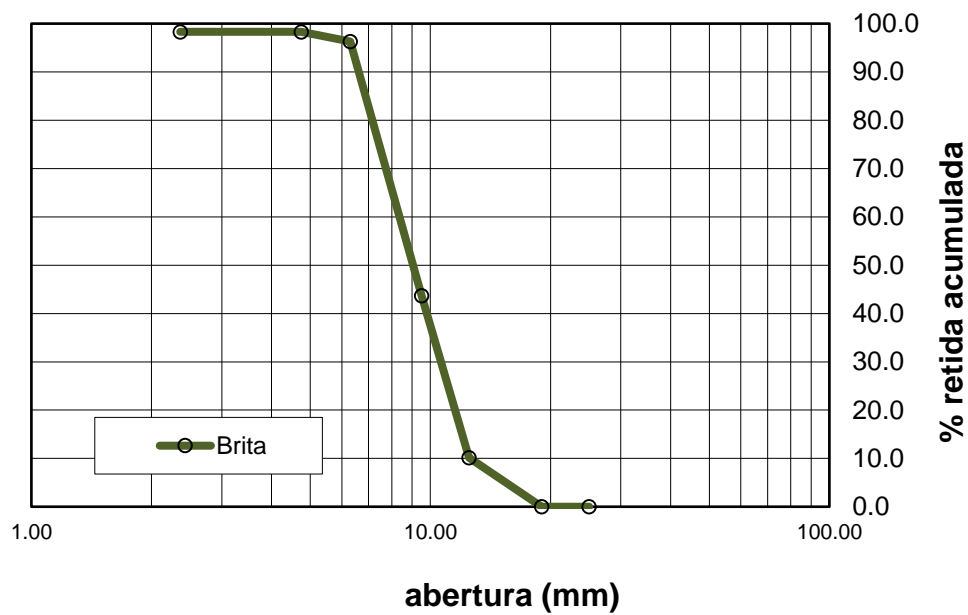
Figura 6 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Do próprio autor

A Figura 7 mostra a curva granulométrica resultante do ensaio realizado para a brita zero.

Figura 7 - Curva granulométrica da brita zero



Fonte: Do próprio autor

A borracha foi separada em diferentes faixas granulométricas para respectiva utilização ao longo da realização do trabalho, que serão posteriormente indicadas. A composição média do pneu é dada no Quadro 1 (RODRIGUES; FERREIRA; INO, 2007).

Quadro 1 - Composição média do pneu

COMPONENTES	PORCENTAGEM
Negro de Fumo	28%
Borracha Natural	14%
Borracha Sintética	27%
S, ZnO, T102	3%
Óleos	10%
Produtos Petroquímicos	4%
Fibras	4%
Cinta de Aço	10%

Fonte: Rodrigues, Ferreira e Ino (2007)

3.1.3 Aditivos

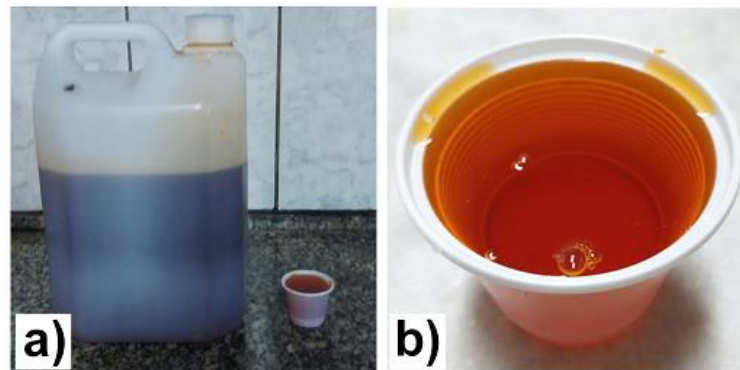
- Superplastificante (Solução de policarboxilato modificado), usado para melhor trabalhabilidade do concreto com menor relação água/cimento. No Quadro 2 são apresentadas informações técnicas, enquanto que na Figura 8a) é mostrada a amostra do superplastificante e na Figura 8b) o líquido, em detalhe.

Quadro 2 - Propriedades do superplastificante

Solução de policarboxilato modificado - FICHA TÉCNICA				
Recomendações técnicas para aplicação	Dosagem recomendada para cada 100 kg de cimento	Aspectos e cor	pH (ABNT 10908)	Massa específica (ABNT 10908)
Concretos de alto desempenho, auto-adensáveis, para pré moldados e para artefatos de cimento. Proporciona manutenção de trabalhabilidade por elevados períodos e obtenção de elevadas resistências iniciais e finais.	300 a 1200 ml Sugestão inicial: 800 ml	Líquido amarelo a âmbar	6,0 ± 1,0	1,095 ± 0,02 g/cm ³

Fonte: Rheoset (2014)

Figura 8 - a) Amostra de superplastificante; b) Líquido, em detalhe



Fonte: Do próprio autor

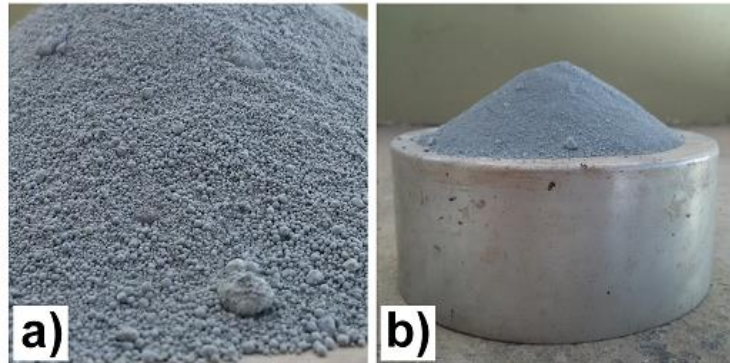
- Sílica ativa (granular), para preenchimento dos vazios menores. A Figura 9 (TECNOSIL, 2016) mostra características técnicas do material em questão. Na Figura 10a), um detalhe da aparência e na Figura 10b) o aspecto pouco coesivo da mesma.

Figura 9 - Características da Sílica ativa

Características Físicas e Químicas	
Massa específica.....	2.220 kg/m ³
Teor de SiO ₂	> 90%
Superfície específica (B.E.T.).....	~19.000 m ² /kg
Formato da partícula.....	Esférico
Diâmetro médio da partícula.....	0,20 μm
Massa unitária	
Não densificado.....	< 350 kg/m ³
Densificada.....	> 350 kg/m ³
Comparativo de finura de alguns materiais	
Sílica Ativa.....	~19.000 m ² /kg
Fumaça do cigarro.....	~10.000 m ² /kg
Fly Ash (Pozolana).....	400 a 700m ² /kg
Cimento Portland.....	.300 a 500m ² /kg

Fonte: Tecnosil (2016)

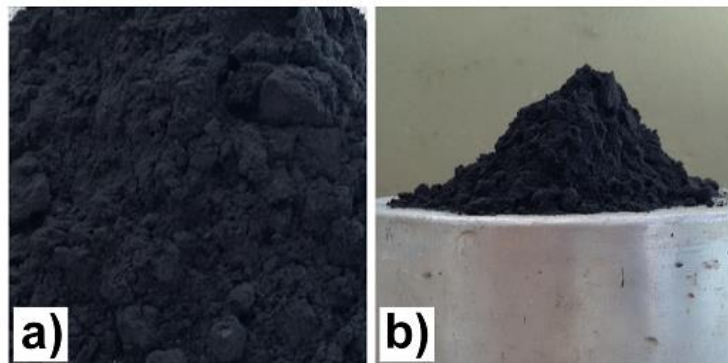
Figura 10 - a) Sílica ativa; b) Aspecto pouco coesivo



Fonte: Do próprio autor

- Cinza de casca de arroz, tendo a mesma função da sílica ativa. O material, foi fornecido através de sacos de 25 kg. Na Figura 11a), um detalhe da aparência mais escura quando comparado com a sílica e, na Figura 11b) o aspecto mais coesivo.

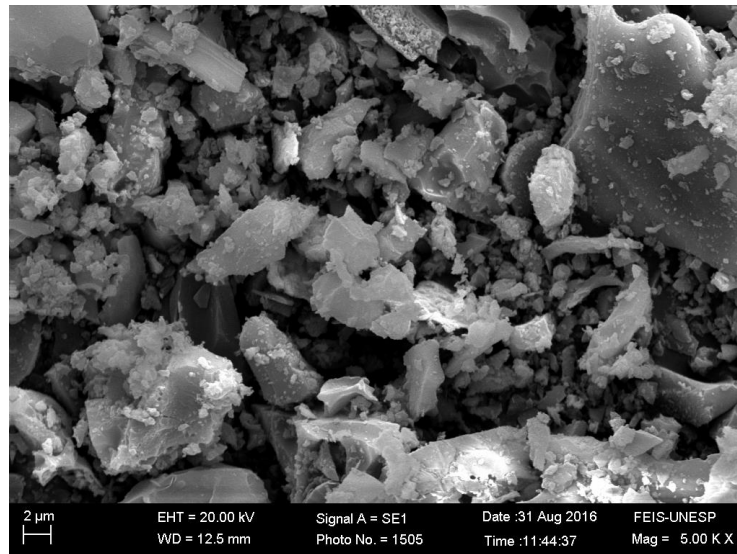
Figura 11 - a) Cinza de casca de arroz; b) Aspecto coesivo



Fonte: Do próprio autor

A Figura 12 mostra as partículas de uma amostra da cinza de casca de arroz, analisada no microscópio eletrônico, onde se pode observar grãos, em sua maioria, na faixa granulométrica compreendida de 2 a 10 μm .

Figura 12 - Partículas de cinzas de casca de arroz analisadas no microscópio eletrônico



Fonte: Do próprio autor

3.2 MÉTODOS

Neste subitem listam-se os métodos de ensaios utilizados para caracterização dos materiais, obtenção dos respectivos aos traços e suas normas; os métodos de cura para o concreto; os tratamentos superficiais dos corpos de prova cilíndricos e os métodos utilizados nos ensaios mecânicos.

3.2.1 Ensaios de caracterização dos materiais

3.2.1.1 *Relacionados à areia*

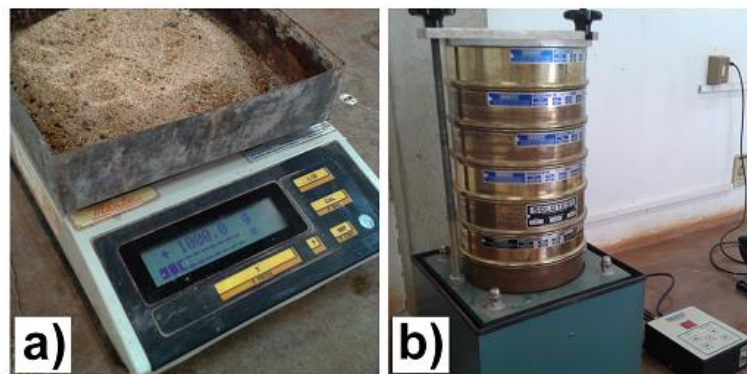
A determinação da sua massa específica aparente foi realizada seguindo a ABNT NBR 52:2009. Para tal ensaio, além da estufa para secagem da areia, utilizaram-se como equipamentos: balança de precisão, molde tronco cônico, soquete, picnômetro, bandeja, espátula, funil e pincel. A amostra foi colocada num recipiente onde permaneceu coberta por água por 24h (em repouso). Posterior, retirou-se o excesso de água e deixou-se passar corrente de ar para que a umidade da amostra fosse regulada. Para verificação da mesma, repetiu-se o procedimento: a areia úmida foi colocada no tronco cônico e sua superfície foi compactada com 25

golpes aplicados com o soquete. Quando verificou-se o desmoronamento, a areia estava na condição saturado de superfície seca.

Assim, 500 gramas da amostra foi colocada no picnômetro e este completo até os 500 cm³.

A determinação da granulometria para o agregado miúdo foi feita seguindo a ABNT NBR NM 248:2003. Para tal ensaio, utilizaram-se: recipiente para areia, balança de precisão, mesa vibratória com bastões para fixação das peneiras e peneiras de diferentes aberturas. A Figura 13a) e b) mostram o procedimento: o material, com umidade zero (0%), este foi separado e submetido ao peneiramento no equipamento apropriado do laboratório.

Figura 13 - a) Material separado; b) Ensaio em andamento



Fonte: Do próprio autor

3.2.1.2 Relacionados à brita zero

A massa específica foi obtida conforme a ABNT NBR NM 53:2009. Após obter a massa de agregado para ensaio com a balança de precisão, a mesma foi lavada sobre a peneira de 4,8 mm, colocada em bandejas e seca em estufa até a constância de massa. Esperou-se o resfriamento até a possibilidade de manipulação de material (cerca de 50 °C), sendo que na sequência, o material foi imerso em água utilizando um balde, onde permaneceu por (24±4)h. A amostra foi retirada da água e espalhada sobre um pano de modo que sua superfície ficou seca. Tomou-se cuidado para não haver evaporação da água dos poros, assim, mediu-se a massa da amostra na condição de saturada com superfície seca.

Posteriormente ao processo de secagem da superfície, a amostra foi colocada em um recipiente vazado para ser completamente imersa em água sem perda de material. O recipiente foi anexado ao prato da balança, a qual estava situada em nível superior ao do balde d'água, onde a amostra foi imersa. O conjunto balança mais recipiente foi previamente zerado vazio e imerso em água. Então foi obtido o peso submerso. Com as três medidas calculou-se a massa específica. Duas das etapas do processo são representadas na Figura 14a) e Figura 14b).

Figura 14 - a) Brita separada; b) Ensaio em andamento



Fonte: Do próprio autor

Para a determinação da granulometria, procedeu-se seguindo a ABNT NBR NM 248:2003. Utilizou-se um agitador mecânico de grande porte com peneiras. Uma amostra de 6,5kg do material em questão foi colocada e vibrada por dez minutos. A Figura 15a) mostra o agitador utilizado e a Figura 15b) mostra o detalhe de uma parcela do material retida em uma das peneiras.

Figura 15 - a) Agitador de agregado; b) Material em uma das peneiras



Fonte: Do próprio autor

Não foi realizado nenhum tipo de processo para a retirada do pó de brita contido no material, que em massa representa, aproximadamente, 1% (obtida a partir de ensaio com determinada amostra) composta por partículas passantes na peneira de 0,3 mm.

3.2.1.3 Relacionados aos resíduos de borracha de pneus inservíveis

Para a determinação da sua massa específica procedeu utilizando o tubo de Chapman, de modo análogo ao descrito na ABNT NBR 9776:1987. Para tal ensaio, utilizaram-se como equipamentos: funil, recipiente para água, tubo de Chapman, Balança de precisão, recipiente para areia. Colocou-se 50 g de borracha em um tubo de Chapman já com 380 cm³ de álcool (neste caso, não foi utilizada água, pela baixa massa específica da borracha). Ao final, fez-se a leitura e as alterações devidas da fórmula.

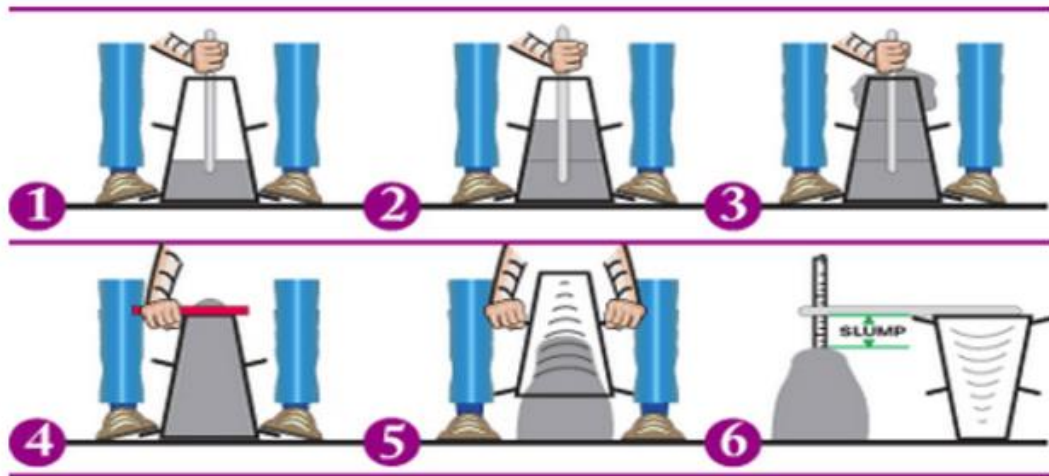
Para separar apenas a granulometria desejada para uso, procedeu-se de modo análogo ao da granulometria da brita, utilizando-se de peneiras respectivas às faixas desejadas, entre 0,3 µm e 2,36 mm.

3.2.2 Estado fresco

3.2.2.1 Coesão, consistência e trabalhabilidade

A análise, neste caso, foi realizada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, seguindo a norma ABNT NBR NM 67:1998. A Figura 16 ilustra os processos para a realização do ensaio.

Figura 16 - Procedimentos para a realização do *Slump test*



Fonte: Guerra (2014)

O concreto foi colocado num tronco de cone em três camadas e, em cada uma delas eram dados 25 golpes. (Processos 1,2 e 3 da Figura 16). O tronco foi rasado (4), levantado (5), e o abatimento da massa foi medida (6).

3.2.2.2 Aferição de massa dos corpos de prova

Foram realizadas medições de massa dos corpos de prova a fim de relacionar os vazios com as propriedades no estado endurecido.

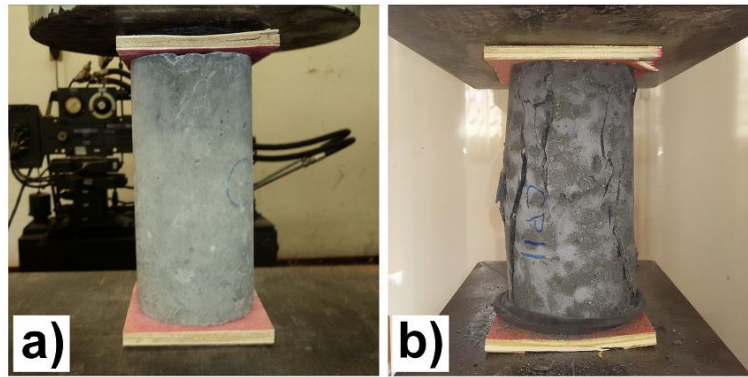
3.2.3 Estado endurecido

3.2.3.1 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

O valor da resistência à compressão axial foi obtido conforme a ABNT NBR 5739:2007. Para isso, utilizaram-se os corpos de prova cilíndricos.

A Figura 17a) mostra o corpo de prova sendo submetido ao ensaio em questão (início do teste). A Figura 17 b) mostra o corpo de prova rompido, ao final do ensaio.

Figura 17 - a) Início de ensaio de compressão uniaxial; b) final de ensaio



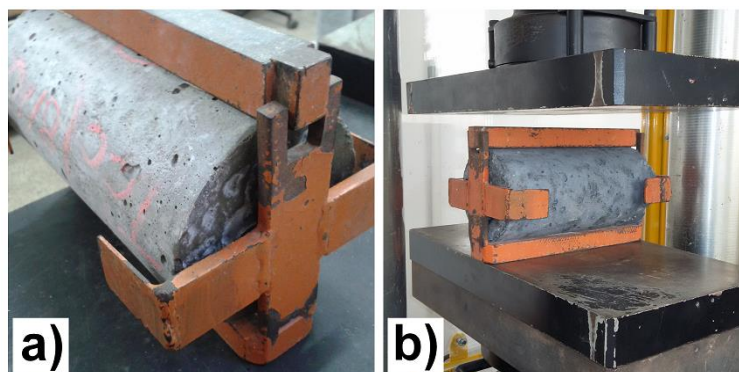
Fonte: Do próprio autor

3.2.3.2 Ensaio de tração por compressão diametral

O valor da resistência à tração foi obtido com o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, também conhecido como “ensaio de Lobo Carneiro” ou ainda “*Brazilian test*” conforme ABNT NBR 7222:2011. Para isso, utilizaram-se os corpos de prova cilíndricos, de altura equivalente a 20 cm e diâmetro das faces igual a 10 cm. Duas chapas de madeira foram colocadas diametralmente, no contato superior e inferior do corpo de prova com o molde de aço.

A Figura 18a) mostra o detalhe do conjunto (corpo de prova e molde de aço) para ensaio. A Figura 18b) mostra um corpo de prova submetido ao ensaio.

Figura 18 - a) Conjunto para ensaio de tração por compressão diametral; b) Ensaio iniciando



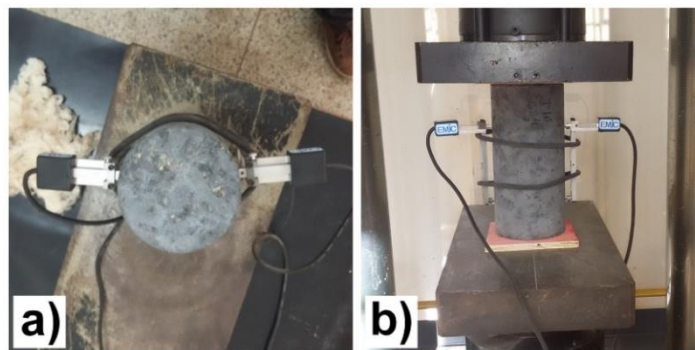
Fonte: Do próprio autor

3.2.3.3 Ensaio de modulo de elasticidade estático à compressão

O valor do módulo foi obtido conforme o ensaio da ABNTNBR 8522:2008. Para isso utilizaram-se corpos de prova cilíndricos.

A Figura 19a) mostra um corpo de prova sendo preparado com os extensômetros, vistos de cima. A Figura 19b) mostra o corpo de prova sendo submetido ao ensaio (já em andamento).

Figura 19 - a) Extensômetros no corpo de prova (vista superior); b) Ensaio de modulo de elasticidade



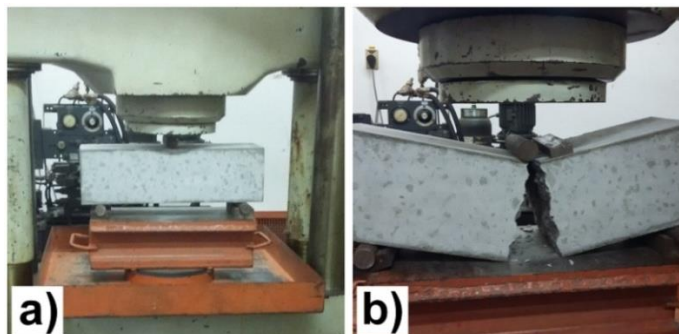
Fonte: Do próprio autor

3.2.3.4 Ensaio de resistência à tração na flexão

O valor da resistência à tração na flexão foi obtido por meio do ensaio preconizado pela ABNT NBR 12142:2010, com um cutelo. Para isso, utilizaram-se os corpos de prova prismáticos (de medidas 15 cm x 15 cm x 50 cm).

A Figura 20a) mostra um corpo de prova prismático em início de ensaio. A Figura 20b) mostra a ruptura no final do teste.

Figura 20 - a) Início de ensaio de flexão; b) Corpo de prova rompido

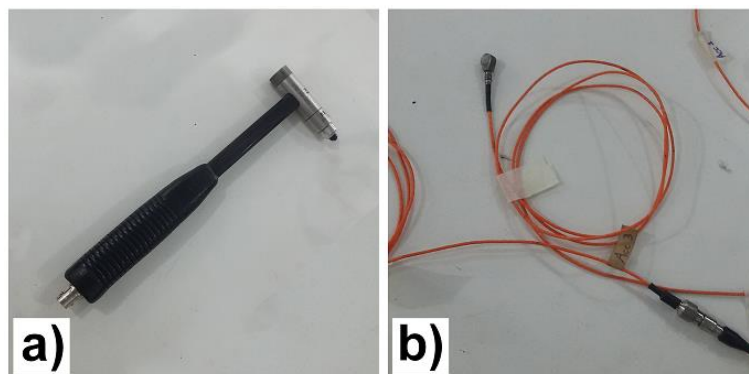


Fonte: do próprio autor

3.2.3.5 Ensaio de vibração

O ensaio de vibração consiste em chocar o martelo de impacto contra a mostra, causando uma tensão. Este impacto precisa ter um valor mínimo, a fim de possibilitar a leitura. As ondas são captadas pelos acelerômetros (sensores) previamente colocados na amostra (por meio de uma cola especial, facilmente removível após o teste). A Figura 21 a) mostra o martelo, enquanto a Figura 21 b) mostra os acelerômetros.

Figura 21 - a) Martelo de impacto; b) Acelerômetros



Fonte: Do próprio autor

Devido à sensibilidade dos receptores, para evitar a influência de frequências externas no ensaio, utiliza-se uma mesa inercial. A amostra (geralmente vigas de metal) é fixada nela para que o ensaio prossiga. No caso do concreto, utilizaram-se corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm). Para o tipo de amostra e material, decidiu-se adaptar o ensaio. Com isso, a amostra foi engastada na castanha do torno, tendo este a mesma função da mesa inercial.

A Figura 22 mostra a mesa inercial.

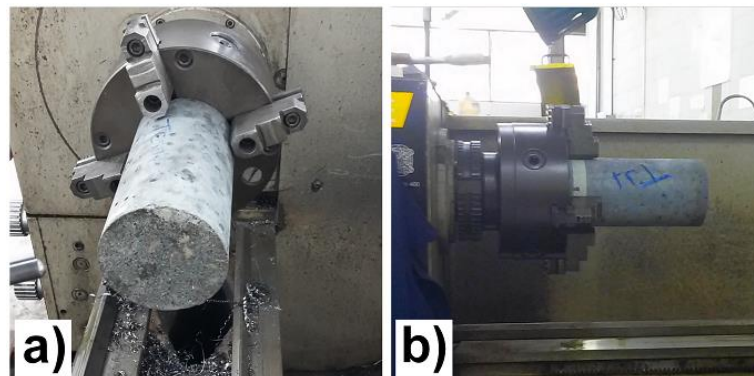
Figura 22 - Mesa inercial



Fonte: Do próprio autor

A Figura 23 mostra duas vistas, a) e b), do corpo de prova fixado no torno.

Figura 23 - Amostra engastada no torno

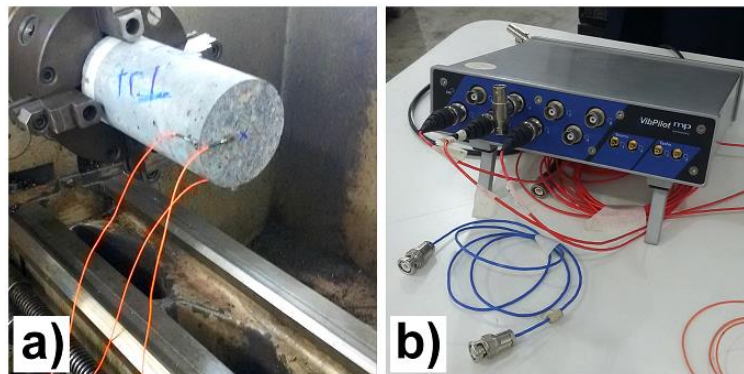


Fonte: Do próprio autor

Posterior ao engastamento da amostra, os acelerômetros foram colados, permitindo o início das excitações com o martelo. Tanto o martelo quanto os acelerômetros foram ligados ao sistema de aquisição.

A Figura 24a) mostra os acelerômetros colados na amostra. O sistema de aquisição é mostrado na Figura 24 b).

Figura 24 - a) Amostra preparada com os sensores; b) Sistema de aquisição dos dados



Fonte: Do próprio autor

Para verificar a homogeneidade do material da amostra (concreto), analisou-se o comportamento com golpes em diferentes locais: na face superior e; em duas regiões distintas da lateral cilíndrica.

Adquiridos os dados, estes puderam ser tratados por meio de um software apropriado de análise numérica (*Matlab*). Assim foi possível obter a frequência natural e os valores dos coeficientes de amortecimento respectivos, além dos gráficos.

O ensaio é importante para encontrar respostas da estrutura por meio de cargas aplicadas, de modo não destrutivo.

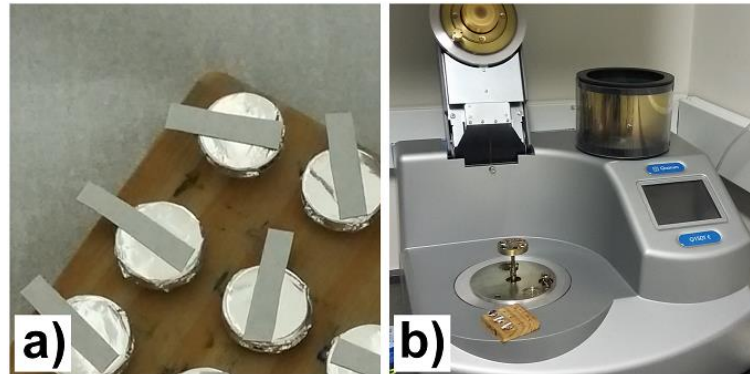
3.2.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para que as leituras das imagens pudessem ser realizadas na microscopia eletrônica de varredura, as amostras necessitaram de um “banho de ouro”, permitindo a realização do ensaio.

Inicialmente, separaram-se as misturas sobre os suportes para que estas fossem levadas à metalizadora (*sputtering*) e pudessem receber átomos de ouro. Tomou-se o cuidado para que houvesse um caminho para que os elétrons saíssem da amostra, através de uma fita condutora colada. As fitas condutoras nos suportes

(de aproximadamente 1 cm de diâmetro) para as amostras são mostradas na Figura 25a) enquanto que a metalizadora é mostrada na Figura 25b).

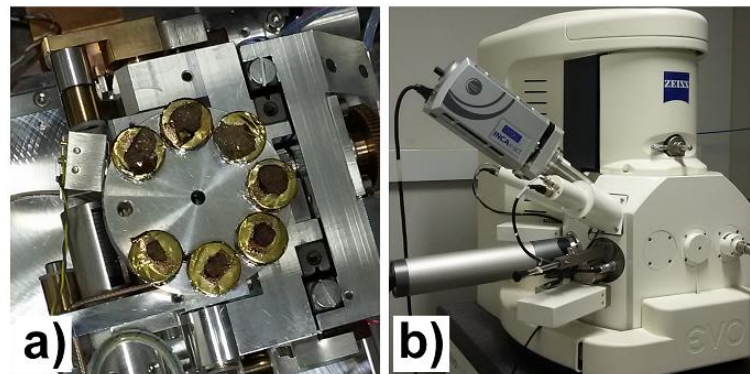
Figura 25 - a) Amostras preparadas; b) Metalizadora utilizada



Fonte: Do próprio autor.

Já prontas, as amostras foram colocadas no microscópio para prosseguimento do ensaio. Na Figura 26 a) as amostras com os átomos de ouro sobre elas e na Figura 26b) o equipamento (microscópio eletrônico) utilizado.

Figura 26 - a) Amostras posteriores ao tratamento; b) Microscópio eletrônico



Fonte: Do próprio autor.

A partir de um software próprio em um computador acoplado ao microscópio, as imagens puderam ser obtidas.

3.2.4 Métodos de Cura

Durante o trabalho, utilizaram-se dois diferentes tipos de curas.

3.2.4.1 Cura na câmara úmida durante 28 dias

Foi o tipo de cura padrão desta pesquisa e presente em todas as fases (que serão descritas no procedimento experimental). Neste processo, após a desforma, as amostras foram colocadas na prateleira da câmara úmida do laboratório da FEIS/UNESP, onde permaneceram até completarem a idade relativa aos ensaios.

Na Figura 27a) tem-se a ilustração da vista da câmara úmida e na Figura 27 b), o detalhe dos corpos de prova nas prateleiras.

Figura 27 - a) Vista da câmara úmida b) Corpos de prova nas prateleiras



Fonte: Do próprio autor

Na câmara, a temperatura deve ser de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e a umidade, no mínimo, 95% para garantir que as superfícies dos corpos de prova estejam úmidas, de acordo com a ABNT NBR 9479:2006. Entretanto, neste trabalho a câmara úmida parou de funcionar após a cura da fase I e, portanto não atendeu essas condições.

3.2.4.2 Cura sob sol por 28 dias

Neste procedimento, após a desforma, as amostras foram colocadas sob o sol, no pátio externo do laboratório da FEIS/UNESP, onde permaneceram até a idade relativa aos ensaios. Na Figura 28 é mostrado o procedimento de cura sob sol.

Figura 28 - Corpos de prova curando no sol



Fonte: Do próprio autor

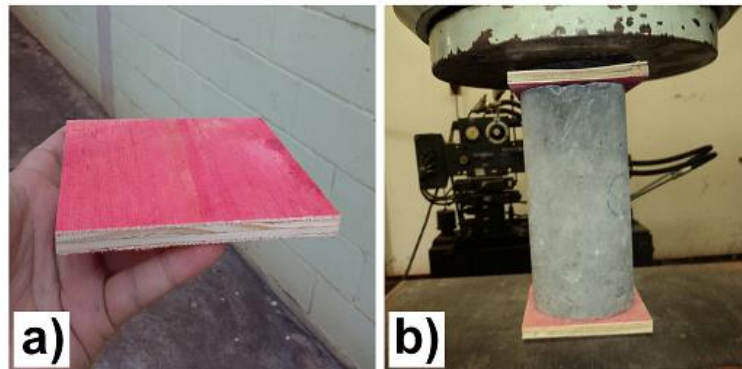
3.2.5 Tratamentos superficiais

A planicidade das amostras é uma característica importante para que a distribuição de cargas axiais nos ensaios seja igual por toda a face em questão. Os processos de tratamentos superficiais utilizados nesta pesquisa são descritos neste subitem. Os mesmos são comparados entre si para os valores de resistência à compressão axial, pois nos ensaios de tração na compressão e flexão não é necessário o tratamento do corpo de prova.

3.2.5.1 Uso de placas de madeira compensada

Foi a opção mais utilizada nesta pesquisa. Neste caso, não foram necessários processos de tratamentos nos Corpos de prova, pois consistiu em acoplar corretamente as placas de madeira compensada de tamanho 11 cm x 11 cm (espessura de 0,9 cm) nas extremidades das amostras quando colocadas na máquina de ensaio, no momento do teste axial. As placas são mostradas na Figura 29a), e o processo na Figura 29b).

Figura 29 - a) Placa de madeira compensada; b) Corpo de prova durante ensaio com madeira compensada



Fonte: Do próprio autor

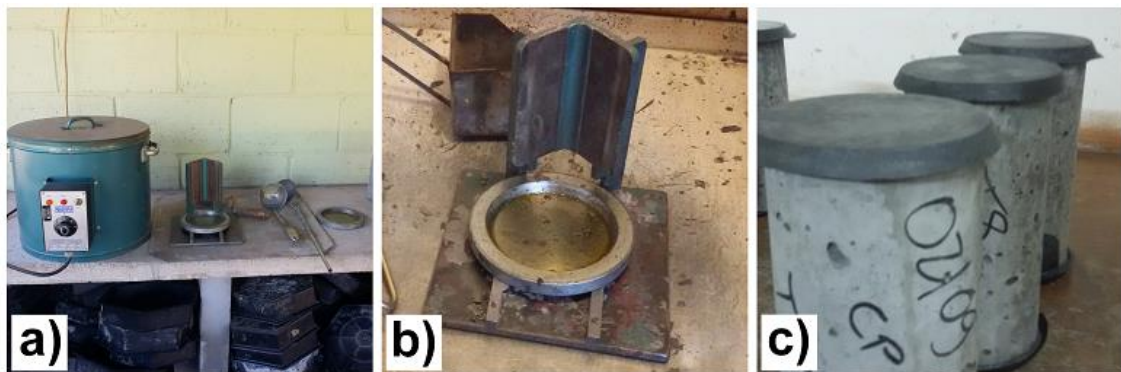
A placa original tinha tamanho 220 cm x 110 cm, sendo necessário passar por processo de corte através de uma serra de diâmetro 3 mm.

3.2.5.2 *Capeamento*

Foi a segunda opção de planificação mais utilizada nesta pesquisa. Para realização, foram utilizados equipamentos do laboratório da FEIS-UNESP. O enxofre foi derretido na panela, situada dentro de uma cuba com exaustor, chamada de “capela”. O enxofre líquido é colocado num prato de aço e o corpo de prova tem a superfície mergulhada no mesmo, até que aconteça a solidificação (à temperatura ambiente) e, portanto, aderência no corpo de prova.

Os instrumentos são mostrados na Figura 30 a), o detalhe do prato de aço na Figura 30 b) e o resultado na Figura 30 c).

Figura 30 - a) Instrumentos utilizados no capeamento; b) Prato de aço; c) Corpos de prova finalizados



Fonte: Do próprio autor

3.2.5.3 Retificação

Foi possível por meio da máquina retificadora do laboratório da FEIS-UNESP (Figura 31a), com motor de indução. Os corpos de prova foram colocados no local apropriado da mesma e com a rotação do disco as superfícies foram polidas (retificadas). Um detalhe do processo é mostrado na Figura 31b) e o detalhe do resultado no corpo de prova na Figura 31c).

Figura 31 - a) Máquina retificadora; b) Disco polindo corpo de prova; c) Corpo de prova finalizado



Fonte: Do próprio autor

3.2.5.4 Cimentação

No caso, assim que o concreto ainda fresco foi despejado no molde e vibrado, colocou-se na superfície superior uma pasta de cimento, água e superplastificante. A

relação água/cimento e a porcentagem de aditivos foram idênticas ao do traço, que permitiu alta fluidez devido à ausência de materiais secos (areia, brita, borracha e cinza). Posterior a 24 horas, os corpos de prova foram desformados. A pasta utilizada é mostrada na Figura 32a). A Figura 32b) mostra o corpo de prova cimentado em comparação com outro que ainda passará por processo de retificação enquanto a Figura 32c) mostra em detalhe, a espessura da cimentação.

Figura 32 - a) Pasta utilizada na cimentação; b) Corpos de prova após cimentação; c) Detalhe da espessura da cimentação

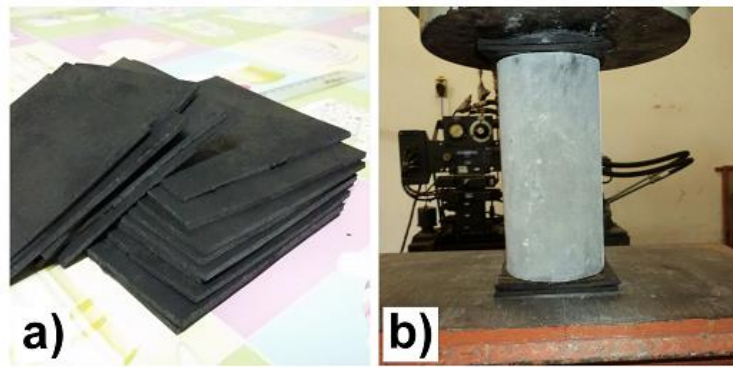


Fonte: Do próprio autor

3.2.5.5 *Uso de placas de borracha*

Deu-se de modo semelhante ao das placas de madeira compensada no que diz respeito à necessidade de processos de tratamentos nos Corpos de prova e modo de utilização. Ou seja, as placas (Figura 33a) com tamanho de 11 cm x 11 cm (duas em cada face, com 0,4 cm de espessura cada) foram colocadas no momento do ensaio, como mostra a Figura 33b).

Figura 33 - a) Placas de borracha; b) Corpo de prova durante ensaio com borracha



Fonte: Do próprio autor

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram separados em seis fases (I, II, III, IV, V e VI).

Resumidamente:

- Na Fase I obtiveram-se quatro traços: T1 (1:5), T2 (1:6), T3 (1:4), T4 (1:4,3), com o objetivo de escolher a mistura que tivesse resistência acima de 40 MPa, a fim de caracterizar um CAD. Devido aos problemas apresentados pela máquina de ensaio aos 28 dias, os valores foram escolhidos aos 7 dias;

-Na Fase II, o traço escolhido na Fase I foi definido como referência. A fim de garantir as mesmas condições de cura, o traço de referência foi refeito no mesmo dia dos traços com borracha, pois a câmara úmida parou de funcionar. A partir deste, definiu-se a substituição de 5% de areia por borracha, em volume, com diferentes granulometrias. Dentre as misturas com diferentes granulometrias de borracha, foi escolhida a que apresentou maior resistência à compressão axial para o prosseguimento do trabalho;

-Na Fase III, escolhida a melhor granulometria da Fase II, definiu-se diferentes porcentagens (5, 10 e 15%) de resíduo de borracha para verificar a queda da resistência à compressão axial. O traço que apresentou uma queda considerável da resistência foi escolhido para prosseguimento do estudo;

-Na Fase IV, analisou-se para o traço da Fase III, a interferência de tipos diferentes de tratamentos superficiais. Também comparou-se este mesmo traço com o da Fase I, no que diz respeito à interferência de processos de curas diferentes na resistência;

-Na Fase V, foram refeitos o traço referência e o escolhido na Fase III (incluindo um com diferente alternativa: maior quantidade de cinzas de cascas de arroz), a fim de se compararem os três traços, no que diz respeito aos valores dos ensaios (compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático à compressão, tração na flexão, análise visual, microscopia eletrônica de varredura). A produção dos traços e a execução dos ensaios realizaram-se com mesmos processos, no intuito de diminuir ou extinguir a interferência de fatores externos (como por exemplo, cura e tratamentos superficiais).

-Na Fase VI, analisaram-se os coeficientes de amortecimento dos concretos das fases III e V.

No subitem fases, é explicado em detalhes o procedimento adotado em cada uma delas.

Os traços foram produzidos e comparados entre si em todas as fases. Com exceção da fase I, que a câmara úmida estava em funcionamento, em cada uma delas, utilizou-se o mesmo processo de cura e o mesmo tratamento superficial, a fim de possuir capacidade de comparações dos resultados e escolher um destes para dar prosseguimento ao trabalho.

O Quadro 3 mostra um resumo da nomenclatura dos traços utilizados na primeira parte do trabalho, respectivos a cada fase.

**Quadro 3 - Traços utilizados na primeira parte do trabalho
(cimento:areia:brita)**

Fase	Nomenclatura	Descrição dos traços
Fase I	T1	Traço de 1:2:3
	T2	Traço de 1:3:3
	T3	Traço de 1:2:2
	T4 ou T _{Referência1}	Traço de 1:1,15:3,15
Fase II	T _{Referência2}	Traço referência, idêntico ao T4
	T _b <0,6mm	Borracha com granulometria menor que 0,6 mm
	T _b =0,6mm	Borracha com granulometria entre 0,6 mm e 1,19 mm
	T _b >0,6mm	Borracha com granulometria entre 1,19 mm e 2,39 mm
Fase III	T _{Referência3}	Traço referência, idêntico ao T4
	T15%	Traço com 15% de resíduos
	T10%	Traço com 10% de resíduos
	T5%	Traço com 5% de resíduos
Fase IV	T _{Referência4}	Traço referência, idêntico ao T4
	T15%	Traço com 15% de resíduos
Fase V	T _{Referência5}	Traço referência, idêntico ao T4
	T15%	Traço com 15% de resíduos
	T15% _{Cinzas}	Traço com 15% de resíduos e maior teor de cinzas (CCA)
Fase VI	Traços da Fase III	T _{Referência3} , T5%, T10% e T15%
	Traços da Fase V	T _{Referência5} , T15% _{Cinzas} e T15%

Fonte: Do próprio autor

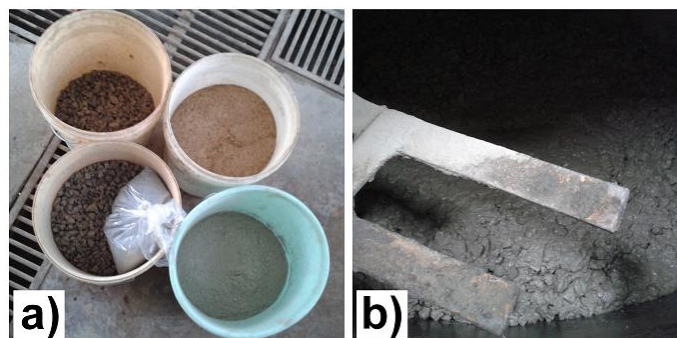
O Traço $T_{Referência}$ é idêntico ao T4, mas foi refeito em cada fase (para diminuir a possível discrepância devido aos fatores climáticos). Isso explica a numeração que vem posterior a ele, por exemplo, $T_{Referência1}$, $T_{Referência2}$, e assim por diante.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira seguiu um procedimento padrão em todos os traços produzidos. Inicialmente colocou-se toda a brita e a areia na betoneira, com metade da água calculada na dosagem (aproximadamente 0,15 a/c), quando se iniciou a rotação do equipamento (betoneira) por dois minutos. Esse processo possibilitou a melhor absorção da água pelos agregados. No caso dos traços que continham resíduos, estes também foram adicionados nesta parte do processo.

Posterior a isso, foram colocados: o cimento, a microsílica (ou cinzas de casca de arroz, quando era o caso) e o resto da água calculada na dosagem (aproximadamente 0,15 a/c). Depois da colocação, a betoneira foi ligada e o aditivo superplastificante foi adicionado aos poucos, nos primeiros dois minutos, junto dos acréscimos de água necessários (de aproximadamente 0,02 a/c).

Para a diluição total do aditivo devido às reações químicas ocorridas, o material foi misturado por mais quinze minutos, tempo suficiente para a obtenção da trabalhabilidade desejada (tempo encontrado a partir de testes prévios). Tal trabalhabilidade assemelhou-se á do concreto utilizado em obras convencionais, com fluidez satisfatória e coesão. Com a realização deste procedimento, o material ficou pronto para ser colocado nos moldes e dar origem às amostras para os ensaios. A Figura 34 a) mostra os agregados e o cimento pronto para serem colocados e a Figura 34 b) mostra o material sendo batido.

Figura 34 - a) Agregados e cimentos para serem colocados; b) produção em andamento



Fonte: do próprio autor

Dois tipos de amostras foram produzidas: a cilíndrica, com medidas 10 cm x 20 cm e; as prismáticas, com medidas de 15 cm x 15 cm x 50 cm.

Para o caso dos corpos de prova cilíndricos, os moldes utilizados são mostrados na Figura 35a) em detalhe, e na Figura 35b) alguns dos que foram utilizados, disponíveis no laboratório da FEIS/UNESP.

Figura 35 - a) Fôrma cilíndrica de PVC, em detalhe; b) Conjunto de fôrmas utilizadas



Fonte: Do próprio autor

O concreto foi colocado em três camadas no molde. Em cada uma delas, o molde com o material foi colocado sobre a mesa vibratória, onde permaneceu por alguns segundos, até que não se observasse bolhas de ar saindo. Esse procedimento serve para evitar vazios nas amostras, retirando grande parte do ar incorporado durante a mistura. Na Figura 36 é mostrada a mesa vibratória.

Figura 36 - Mesa vibratória utilizada no laboratório



Fonte: Do próprio autor.

Para o caso dos corpos de prova prismáticos, os moldes utilizados são formados de placas de PVC parafusadas, formando um prisma “sem tampa”. A Figura 37a) mostra um lote deles sendo montados e a Figura 37b) mostra um molde terminado.

Figura 37 - a) Moldes prismáticos sendo montados para utilização; b) Molde pronto para uso



Fonte: Do próprio autor

Repetiu-se o procedimento realizados nos corpos de prova cilíndricos (reservadas as equivalências) no que diz respeito à retirada do ar incorporado durante a mistura.

4.1 FASES

4.1.1 FASE I – Determinação do traço referência

Nesta fase utilizou-se um traço teste de CAD para verificar o comportamento dos aditivos (superplastificante e microssílica) perante os agregados utilizados.

Fixadas as quantidades de aditivos, fizeram-se os cálculos de dosagem para quatro tipos diferentes de misturas, com objetivo de obter resistências maior que 40 MPa. Três delas foram adotadas e uma experimental. A experimental baseou-se em colocar brita num molde de corpo de prova e preencher com areia (vibrando-o e pesando) até obter a combinação de maior massa, ou seja, maior preenchimento de vazios para tal granulometria.

Foram gerados então os traços T1, T2, T3 e T4 (como mostrado no Quadro 3).

O traço T1 foi escolhido por ser o mais usual nas obras (concreto convencional). O traço T2 foi escolhido tendo como base um concreto convencional, porém com mais areia; o T3 teve como base um concreto convencional, mas com mais brita.

O traço T4 foi feito experimentalmente, colocando brita num recipiente e preenchendo com areia (e vibrando até que acontecesse o assentamento da mesma). Quando não houve mais vazios entre as britas que pudessem ser preenchidos por areia, retirou-se o material e mediu-se a massa de agregados, encontrando a proporção do traço.

No estado fresco da mistura foi medida a sua consistência, por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Para análise dos traços, foram moldados corpos de prova cilíndricos de medidas 10 cm x 20 cm. Os mesmos foram curados nas condições da câmara úmida do laboratório da FEIS/UNESP.

Cada lote de corpos de prova de cada traço teve sua massa medida ao primeiro e sétimo dia de idade para análise do comportamento da água contida.

A partir do ensaio de compressão axial puderam ser obtidos dados de resistência à compressão axial aos 7 e 98 dias de idade, permitindo a comparação do acréscimo de resistência ao longo de tal período.

O tratamento superficial realizado nos corpos de prova desta fase foi o capeamento.

Em uma das idades (98 dias), também se analisou a resistência tração, através do ensaio de tração por compressão diametral.

Dentre os quatro, um foi escolhido como traço padrão para prosseguimento do trabalho. A escolha foi baseada no traço com os maiores valores de resistência à compressão axial aos 7 dias.

4.1.2 FASE II – Determinação da granulometria do resíduo a ser utilizado

Definido o traço na fase I, separaram-se três granulometrias diferentes de resíduos de borracha para que fossem substituídos, em volume, por areia no traço.

Para tal processo, foram mantidas as proporções dos outros materiais, modificando-se apenas a substituição de 5% em volume de areia.

Os resíduos foram separados com uso do agitador mecânico de peneiras maiores. As granulometrias estipuladas nesta fase são listadas no Quadro 4, com a respectiva nomenclatura do traço.

Quadro 4 - Traços da fase II

Nomenclatura do traço	Substituições em 5% do volume de areia
Traço $T_b < 0,6\text{mm}$	Borracha com granulometria menor que 0,6 mm
Traço $T_b = 0,6\text{mm}$	Borracha com granulometria entre 0,6 mm e 1,19 mm
Traço $T_b > 0,6\text{mm}$	Borracha com granulometria entre 1,19 mm e 2,39 mm

Fonte: Do próprio autor

A Figura 38 a) mostra o agitador mecânico dotado de peneiras que foi utilizado para a separação, a Figura 38 b) mostra a peneira do agitador com a borracha que foi submetida à separação e a Figura 38 c) mostra o resíduo retido na peneira de 0,6 mm.

Figura 38 - a) Agitador mecânico; b) Borracha sendo preparada para separação e; c) Resíduo resultante da separação



Fonte: Do próprio autor

Realizou-se ensaio de abatimento de tronco de cone em todos os traços e ensaio de resistência à compressão axial aos sete dias.

Cada lote de corpos de prova, de cada traço, teve sua massa medida ao primeiro dia de idade para análise do comportamento da água contida.

Para análise dos traços, foram moldados corpos de prova cilíndricos de medidas 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Os mesmos foram curados na câmara úmida do laboratório da FEIS/UNESP, entretanto a mesma não estava funcionando nesta fase.

O tratamento superficial realizado nos corpos de prova desta fase foi o capeamento, para os ensaios com carga de compressão axial.

Em uma das idades (56 dias), também se analisou a resistência à tração, através do ensaio de tração por compressão diametral.

Dentre os quatro traços com resíduos, um foi escolhido como traço com granulometria padrão para prosseguimento do trabalho. A escolha foi baseada no traço com os maiores valores de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral aos 56 dias.

4.1.3FASE III – Determinação da porcentagem do resíduo no traço a ser tratado

A fim de encontrar a porcentagem de resíduo que afetasse consideravelmente a resistência à compressão axial, utilizou-se o traço obtido na Fase II. Para isto, variou-se a substituição por resíduos em 5%, 10% e 15%, em volume de areia, e comparou com o traço referência.

Devido à disponibilidade de cinzas de casca de arroz (CCA) e escassez de sílica ativa em estoque durante esta etapa da pesquisa, optou-se pela substituição destes materiais de mesma finalidade na mistura (adições minerais). A nomenclatura dos traços realizados nesta fase e a respectiva descrição se encontram no Quadro 5.

Quadro 5 - Nomenclatura dos traços da fase III e respectivas descrições

Nomenclatura do traço	Processo de cura utilizado
Traço T _{Referência3}	Traço referência (feito, idêntico ao escolhido na Fase I)
Traço T15%	Traço com 15% de resíduos de borracha em substituição da areia, por volume
Traço T10%	Traço com 10% de resíduos de borracha em substituição da areia, por volume
Traço T5%	Traço com 5% de resíduos de borracha em substituição da areia, por volume

Fonte: Do próprio autor

Realizou-se a avaliação da consistência e trabalhabilidade no estado fresco dos traços, a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Foram produzidos corpos de prova cilíndricos, de medidas 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Os mesmos foram curados nas condições da câmara úmida do laboratório da FEIS/UNESP.

Para obtenção dos valores de resistência à compressão axial, uma parte da amostra foi submetida ao ensaio de compressão axial aos 7 e 120 dias. Neste caso,

como processo de planificação superficial, utilizaram-se placas de madeira compensada durante o procedimento.

Outra parte das amostras foi submetida ao ensaio de tração por compressão diametral aos 7 e 120 dias para obtenção dos valores de resistência à tração.

4.1.4 FASE IV – Análise de determinadas propriedades do material

Compararam-se, nesta Fase (IV), os traços escolhidos na Fase I (T_{Referência4}) e Fase III (T15%), referentes às propriedades: interferência do processo de cura dos corpos de prova sobre a resistência à compressão axial e; interferência dos tratamentos superficiais dos corpos de prova sobre a resistência à compressão axial.

Cura

Os dados obtidos no processo de cura são referentes ao ensaio de resistência a cargas axiais aos 28 dias. Para tanto, foram rompidos com placas de madeira compensada e utilizaram-se cinco tipos de cura nos corpos de prova. O Quadro 6 mostra a nomenclatura de cada lote (de três amostras cada, em cada traço) com cada cura respectiva, que já foram explicadas detalhadamente no item “3.2.4 Métodos de Cura”.

Quadro 6 - Nomenclatura e respectivo processo de cura

Nomenclatura do lote	Processo de cura utilizado
Lote - Tcâm28	Cura em sombra por 28 dias iniciais
Lote - Tsol28	Cura sob sol por 28 dias iniciais

Fonte: Do próprio autor

Tratamentos superficiais

Para o traço T15%, analisou-se apenas a interferência do tratamento superficial dos corpos de prova para obtenção dos valores de resistência à compressão axial aos 28 dias. Para tanto, o traço foi refeito e foram curados na

câmara úmida para que cinco diferentes lotes de três amostras passassem por cinco tipos de tratamentos (já explicados detalhadamente no item **3.2.5 Tratamentos superficiais**). Os tratamentos são mostrados no Quadro 7, com as respectivas nomenclaturas.

Quadro 7 - Traços para comparação de tratamentos superficiais

Nomenclatura do lote	Descrição do tratamento superficial
Lote - Cimentados	Cimentação com pasta de cimento, água e superplastificante
Lote - Madeira compensada	Utilização de placas de madeira compensada nas faces
Lote - Capeados	Capeamento da superfície com enxofre
Lote - Retificados	Retificação da superfície com polimento
Lote - Borracha	Utilização de placas de borracha nas faces

Fonte: Do próprio autor

4.1.5 FASE V – Tratamentos no concreto com 15% de resíduos

Encontrada a porcentagem de resíduos que diminuem, consideravelmente, a resistência à compressão axial de determinado traço, aplicaram-se adições no concreto, com o intuito de diminuir esta queda.

Foram feitos três traços: sendo dois deles para comparação (ou seja, os da Fase I – $T_{Referência}$ e; Fase III – com 15% de resíduos) e; um com resíduos e aumento na adição de cinzas de casca de arroz (para 20%). Os traços são nomeados de acordo com o Quadro 8, que também mostra o processo a ser realizado em cada um.

Quadro 8 - Nomenclatura dos traços com respectivos tratamentos

Traço em massa	Processo a ser realizado
T15% _{Cinzas}	Aumento do teor de partículas finas, com acréscimo de mais 12% de cinza de casca de arroz (passando para 20%) – com 15% de resíduo
T15%	Traço com 15% de resíduo (refeito) - idêntico ao T11, da Fase III
T _{Referência5}	Traço referência (refeito) - idêntico ao T4, da Fase I

Fonte: Do próprio autor

Para o Traço com mais cinzas de casca de arroz (T15%_{Cinzas}), a decisão de aumentar a quantidade deste aditivo de 8 para 20% (em relação ao cimento, em massa) foi para que se diminuíssem os vazios no concreto, deixando o resíduo de borracha mais “preso” na pasta formada.

Os traços realizados nesta fase serão submetidos a diferentes tipos de análise e ensaios. No estado fresco, serão medidas as massas dos corpos de prova.

No estado endurecido, cada lote de concreto terá amostras nos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade por compressão axial, resistência à flexão, microscopia eletrônica de varredura (aos 28 dias).

Para os ensaios citados, foram moldados corpos de prova cilíndricos de medidas 10 cm x 20 cm e prismáticos 15 cm x 15 cm x 50 cm. Os mesmos foram curados nas condições da câmara úmida do laboratório da FEIS/UNESP.

O tratamento superficial realizado nos corpos de prova cilíndricos com carga axial nesta fase foi o uso de placas de madeira compensada.

4.1.6 – FASE VI – Análises do coeficiente de amortecimento

Realizaram-se análises relativas ao amortecimento do concreto, quando ocorre inserção de borracha no CAD e ainda, quando se aumenta o teor de finos (aditivos minerais) do CAD com borracha. Para tanto, utilizaram-se os traços realizados na FASE III e na FASE V.

O método de ensaio é referente ao de vibração e foi descrito no subitem "3.2.3.5 Ensaio de vibração".

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 FASE I – DETERMINAÇÃO DO TRAÇO REFERÊNCIA

Para início de estudo, com o traço experimental (1:2:3 – cimento:areia:brita, em massa), a proporção satisfatória de superplastificante foi de 0,5% de acréscimo à mistura, em relação ao volume de cimento. A proporção de microssilica em relação à massa de cimento foi de 8%, também em acréscimo. Com isso, resultou em um abatimento de $7,0 \pm 2,0$ cm, para concreto com relação água/cimento equivalente a 0,37.

Posteriormente, para cada traço, utilizaram-se diferentes relações água/cimento e diferentes relações de cimento, areia e brita. Desejava-se um abatimento de $7,0\text{cm} \pm 2,0$. Para tanto, adotou-se 0,3 de a/c e a água foi sendo adicionada em partes (0,02 a/c, por vez). O ensaio do tronco de cone foi realizado posterior a cada adição de água. Quando o valor do abatimento desejado foi atingido, os corpos de prova foram feitos. A Tabela 2 mostra os traços originados, em massa e seus respectivos valores para os abatimentos.

Tabela 2 - Traços originados na Fase I

Traços	Cimento	Areia	Brita 0	Sílica Ativa	Plastificante	Água	Abatimento
Traço T1	1,00	2,00	3,00	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,38	5,0 cm
Traço T2	1,00	3,00	3,00	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,50	5,0 cm
Traço T3	1,00	2,00	2,00	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,39	8,5 cm
Traço T4	1,00	1,15	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32	8,0 cm

Fonte: Do próprio autor

Para maiores quantidades de material com maior área superficial, ou seja, maior quantidade de areia foi necessária maior relação a/c para obter os mesmos abatimentos, como se observa no traço T2, quando comparado com o T1 (Tabela 2). Com a/c semelhante, o traço T3 apresentou maior trabalhabilidade quando comparado com o T1, pelo mesmo motivo. Já para o traço T4, devido à menor quantidade de areia (agregado miúdo, com maior área superficial) no traço, necessitou-se de menos água para maior fluidez.

Os consumos de cimento em kg/m^3 de concreto são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Consumos de cimento por traço

Traço T1	Traço T2	Traço T3	Traço T4
402,69 kg/m ³	335,65 kg/m ³	465,19 kg/m ³	463,97 kg/m ³

Fonte: Do próprio autor

Os dados obtidos para a resistência são mostrados na Tabela 4, com unidades em MPa.

Tabela 4 - Dados obtidos na Fase I

Corpos de prova Cilíndricos 10cm x 20cm	f_c^* (MPa)		$f_{ct,sp}^{**}$ (MPa)
	7 dias	98 dias	98 dias
T1	37,33	62,1	4,54
	33,93	65,83	3,2
	34,46	52,16	3,74
Média± Desvio	35,24 ± 1,83	60,03 ± 7,07	3,82 ± 0,68
Coeficiente de Variação	5,19%	11,78%	17,80%
T2	27,96	40,6	4,22
	28,94	45,44	2,45
	29,48	30,36	2,95
Média± Desvio	28,79 ± 0,77	38,80 ± 7,7	3,20 ± 0,91
Coeficiente de Variação	2,67%	19,84%	28,43%
T3	40,22	36,04	3,89
	39,83	41,21	2,95
	40,64	47,38	3,41
Média± Desvio	40,23 ± 0,41	41,54 ± 5,68	3,42 ± 0,47
Coeficiente de Variação	1,02%	13,67%	13,74%
T4	40,55	50,19	5,51
	45,43	51,02	4,57
	51,98	49,35	5,43
Média± Desvio	45,99 ± 5,74	50,19 ± 0,84	5,17 ± 0,52
Coeficiente de Variação	12,48%	1,67%	10,05%

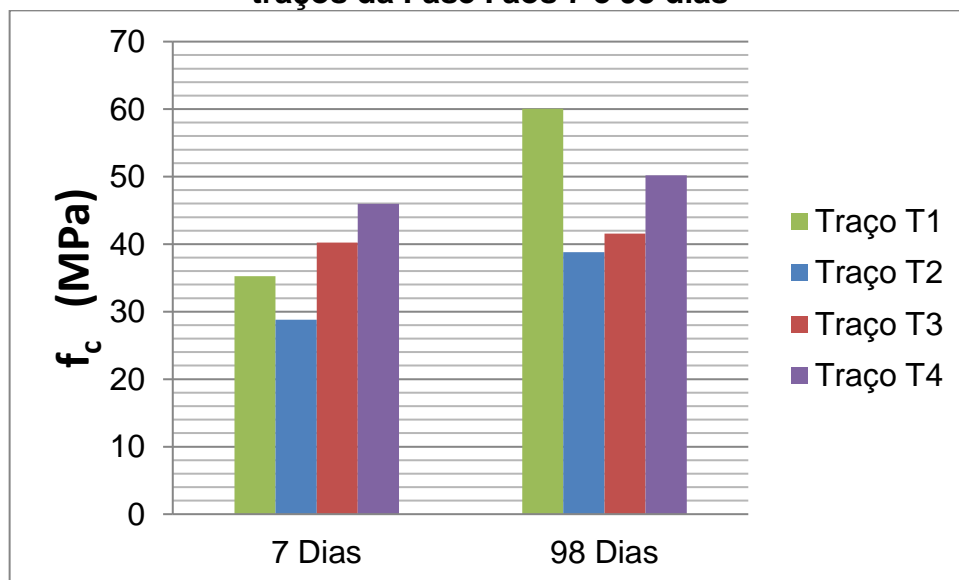
Notas: * Compressão Axial

** Tração por compressão diametral

Fonte: Do próprio autor

As médias dos valores dos ensaios de resistência à compressão axial são ilustradas no gráfico da Figura 39, em duas idades diferentes (em MPa).

Figura 39 - Gráfico do comportamento das resistências à compressão axial dos traços da Fase I aos 7 e 98 dias



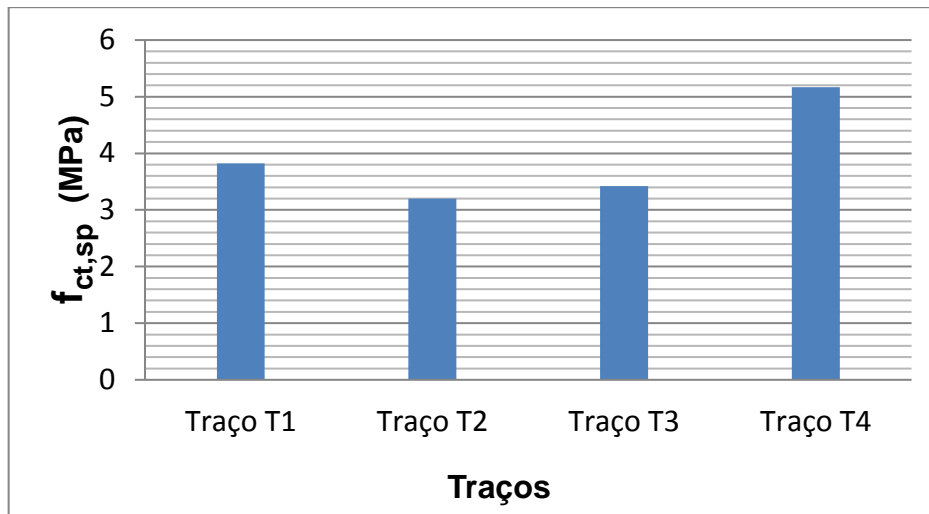
Fonte: Do próprio autor

Observa-se que os traços T1 (1:5), T2 (1:6), T3 (1:4) e T4 (1:4,3) tiveram aumento considerável na resistência à compressão axial entre 7 e 98 dias.

O traço T2 é o mais pobre em cimento e com maior relação água/cimento, portanto, obteve a menor resistência. O traço T3 é o mais rico em cimento, mas teve a segunda maior relação água/cimento, o que deve ter influenciado para que sua resistência ficasse próxima à do traço T2.

A resistência à tração por compressão diametral foi obtida somente aos 98 dias (Tabela 4) e as médias são apresentadas no gráfico da Figura 40.

Figura 40 - Gráfico das resistências à compressão diametral da Fase I, aos 98 dias



Fonte: Do próprio autor

A maior resistência à tração por compressão diametral foi do traço T4 (5,17 MPa), que foi 35% maior que do T1 (3,82 MPa), em segunda colocação, seguido pelos traços T3 (3,42 MPa) e T2 (3,2 MPa).

A Tabela 5 mostra a média das massas dos corpos de prova, em gramas, e o respectivo desvio padrão.

Tabela 5 - Médias, aumento, desvio e porcentagem de aumento de massa dos Corpos de prova

Dados dos lotes de Corpos de prova	Traço T1	Traço T2	Traço T3	Traço T4
Massa média (g)	3802,1	3608,3	3642,1	3852,2
Desvio padrão da média (g)	51,2	32,0	40,7	67,0

Fonte: Do próprio autor

Os dados da Tabela 5 mostram que os traços cujas amostras foram de maior massa (T4 e T1), também tiveram melhor resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, diretamente relacionada com sua maior seção resistente conseguida por menor número de vazios. Isso se prova à medida que a ordem decrescente de massa dos corpos de prova também é a ordem decrescente de resistências dos traços, tanto para axial, quanto para a diametral.

Os fatores principais que explicam a melhor resistência obtida no traço T4 aos 7 dias são a menor relação água/cimento (comparando com os demais traços); maior quantidade (consumo) de cimento e ainda; maior relação de brita no traço, quando comparado com os demais.

O traço T3 também teve alta resistência aos 7 dias, que pode ser explicada pela combinação dos fatores “relação água/cimento” e consumo de cimento.

Como se procurava um traço com resistência superior a 40 MPa aos 7 dias, os que atenderam esta condição foram o T3 e T4. Pelo fato do T4 alcançar maior resistência com menor consumo de cimento (comparando estes dois), ele foi escolhido como traço referência (“traço base”) do trabalho. Aos 28 dias não foi possível a obtenção dos dados, por problemas com a máquina de ensaio, por isso levou-se em consideração os dados dos 7 dias.

5.2 FASE II - DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO A SER UTILIZADO

Refeito o Traço T4, o qual será chamado de $T_{Referência2}$, adotou-se a substituição de areia por 5% de resíduos, em volume, para as diferentes granulometrias da borracha. As proporções (em massa) dos materiais relativos aos traços $T_b < 0,6\text{mm}$; $T_b = 0,6\text{mm}$ e; $T_b > 0,6\text{mm}$ são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Traços da Fase II, com resíduos

Cimento	Areia	Borracha	Brita zero	Sílica ativa	Superplastificante	Água
1,00	1,09	0,02	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32

Fonte: Do próprio autor

Os consumos de cimento, nesta fase, foram aproximadamente 464 kg/m^3 , tanto para os traços com borracha, quanto para o $T_{Referência2}$.

Os valores do abatimento do tronco de cone foram próximos para os quatro traços, ficando entre $4,0 \pm 2,0 \text{ cm}$.

As médias das massas dos corpos de prova são mostradas na Tabela 7, em unidades de gramas, com seus respectivos desvios-padrão.

Tabela 7 - Médias das massas dos corpos de prova

Valor	Tb<0,6mm	Tb=0,6mm	Tb>0,6mm	T _{Referência2}
Média (g)	3828,3	3872,7	3825,7	3850,0
Desvio-padrão (g)	48,04	43,09	23,17	46,90

Fonte: Do próprio autor

Os resultados de resistência à compressão axial aos 56 e 224 dias e à tração por compressão diametral, aos 56 dias, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores obtidos na Fase II

CPs Cilíndricos 10cm x 20cm	f_c^* (MPa)		$f_{ct,sp}^{**}$ (MPa)
	56 dias	224 dias	56 dias
T _{Referência2}	37	52,11	3,86
	35,76	59,22	4,58
	35,42	57,63	4,14
Média ± Desvio	36,06 ± 0,83	56,32 ± 3,73	4,19 ± 0,36
Coeficiente de Variação	2,37%	7,00%	8,59%
Tb<0,6mm	30,61	54,34	4,14
	28,77	52,64	4,21
	26,68	53,57	5,02
Média ± Desvio	28,69 ± 1,97	53,52 ± 0,85	4,46 ± 0,49
Coeficiente de Variação	6,87%	1,59%	10,99%
Tb=0,6mm	39,33	60,11	3,86
	28,76	54,79	4,66
	32,39	56,41	5,25
Média ± Desvio	33,49 ± 5,37	57,10 ± 2,73	4,59 ± 0,70
Coeficiente de Variação	16,03%	4,78%	15,25%
Tb>0,6mm	38,42	48,24	4,04
	36,57	56,05	4,92

	23,11	52,13	4,11
Média ± Desvio	32,70 ± 8,36	52,14 ± 3,91	4,36 ± 0,49
Coeficiente de Variação	25,57%	7,50%	11,24%

Notas: * Compressão Axial

** Tração por compressão diametral

Fonte: Do próprio autor

Da Tabela 8, podem-se calcular os valores dos acréscimos de resistência média axial na Tabela 9, em porcentagem.

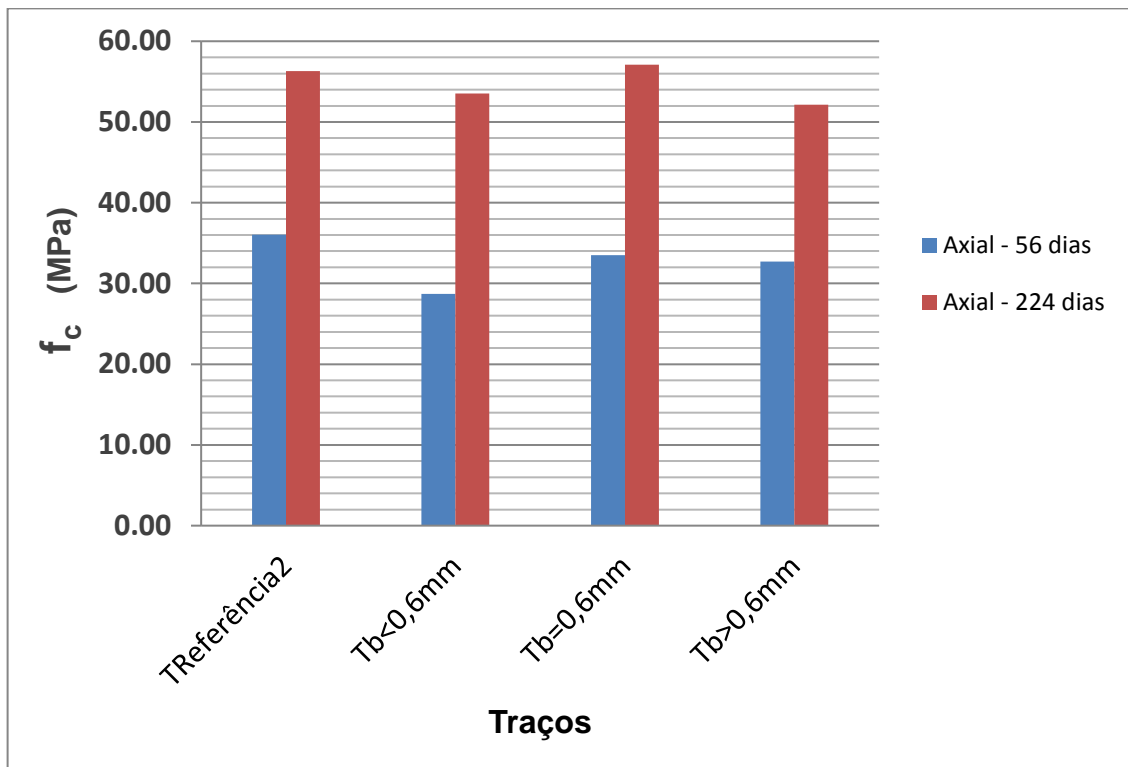
Tabela 9 – Acréscimo das resistências médias dos 56 aos 224 dias de idade

Valores respectivos à(ao)	T _{Referência2}	T _{b<0,6mm}	T _{b=0,6mm}	T _{b>0,6mm}
Acréscimo de resistência(%)	56,18	86,56	70,48	59,45

Fonte: Do próprio autor

Nota-se que o acréscimo de borracha no concreto apresentou ligeira queda na resistência à compressão axial, em relação ao concreto de referência. Porém, a borracha na mistura apresentou maior acréscimo de resistência com o tempo, chegando até mesmo a uma ligeira superação para o caso do traço T_{b=0,6mm} (57,10 MPa). Tal comportamento pode ser mais bem visualizado no gráfico da Figura 41.

Figura 41 - Médias das resistências à compressão axial aos 56 e 224 dias



Fonte: Do próprio autor

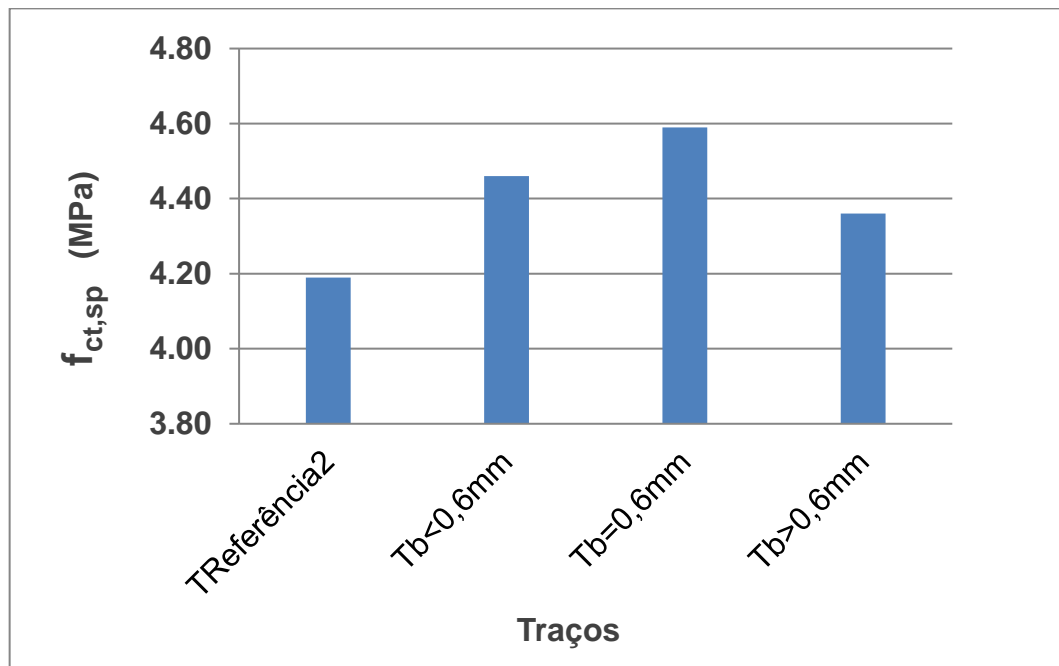
Para ambas as idades, o maior desvio padrão foi para o maior resíduo de borracha. Isso pode ser explicado por menor uniformidade dos resíduos, diferenciando as propriedades dos corpos de prova produzidos.

As diferentes resistências podem ser explicadas por diferentes deformações dos grãos quando submetidos a carregamento ou ainda, diferentes acomodações nos vazios entre os grãos componentes do concreto.

Para o caso da resistência à tração por compressão diametral, houve leve aumento (ou continuidade aproximada do valor), à medida que se adicionou resíduos, mostrando que, para tal, não houve tanta influência do material.

O gráfico da Figura 42 mostra o comportamento das resistências à tração por compressão diametral (com os valores já apresentados na Tabela 8), comparadas em diferentes proporções do resíduo de borracha, aos 56 dias.

Figura 42 - Resistências diametrais aos 56 dias



Fonte: Do próprio autor

5.3 FASE III – DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DO RESÍDUO NO TRAÇO A SER TRATADO

Nessa terceira fase a sílica ativa foi substituída por casca de arroz, devido ao fato de não haver quantidade necessária de sílica ativa para a finalização do trabalho. Essa substituição não acarretou mudanças perceptíveis e/ou relevantes, também os resultados desta fase não são comparados com os da fase II.

Para esta fase foi usada somente a borracha na granulometria equivalente a 0,6 mm (obtido na fase II), devido ao melhor resultado de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, comparada com as outras granulometrias.

A proporção de materiais dos traços, em massa, pertencentes a esta fase estão relacionados na Tabela 10.

Tabela 10 - Traços T15%, T10%, T5% e T_{Referência3}

Traços	Cimento	Areia	Borracha	Brita 0	CCA	Plastificante	Água
T15%	1,00	0,98	0,07	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32
T10%	1,00	1,04	0,05	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32
T5%	1,00	1,09	0,02	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32
T _{Referência3}	1,00	1,15	0,00	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32

Fonte: Do próprio autor

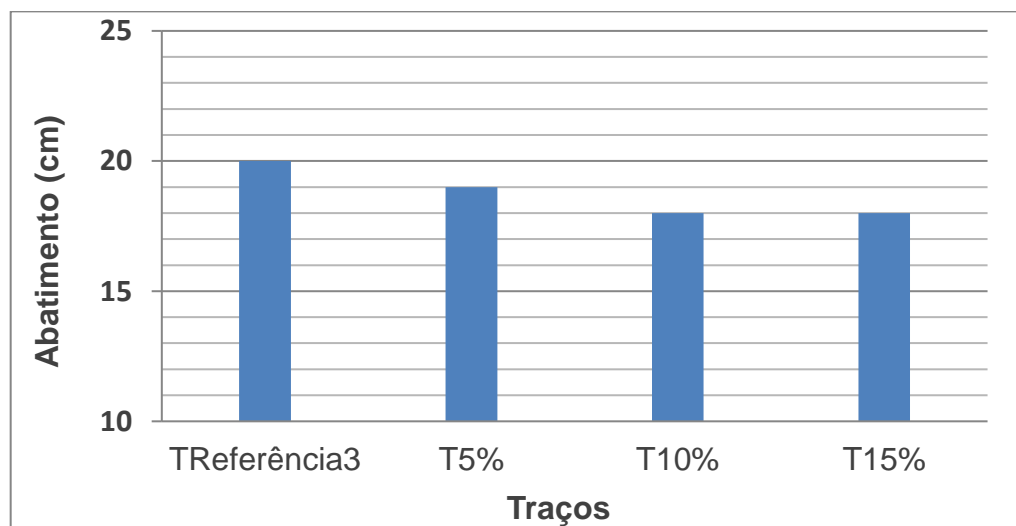
Os consumos de cimento em kg/m³ de concreto foram próximos. Eles são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Consumos de cimento em kg por m³ de concreto

T _{Referencia3}	T5%	T10%	T15%
463,97	463,98	463,90	463,91

Fonte: Do próprio autor

Houve sensível perda de fluidez à medida que se aumentou a quantidade de resíduos na composição. Nota-se uma delicada uniformidade no decréscimo do abatimento, mostrada no gráfico da Figura 43.

Figura 43–Slump test

Fonte: Do próprio autor

O decréscimo do abatimento pode estar relacionado com o atrito superficial do material com as partículas de borracha, sendo que este resultado está de acordo com os resultados de RedaTaha *et al.* (2008).

Na Tabela 12 são apresentados os valores de resistência à compressão axial e à tração na compressão diametral aos 7 e 120 dias, em MPa.

Tabela 12 - Valores de Resistências da Fase III

CPs Cilíndricos 10cm x 20cm	f_c^* (MPa)		$f_{ct,sp}^{**}$ (MPa)	
	7 dias	120 dias	7 dias	120 dias
T15%	28,03	42,75	1,97	2,50
	30,11	39,39	2,04	3,35
	29,53	48,10	3,03	3,20
Média ± Desvio	29,22 ± 1,08	43,41 ± 4,39	2,35 ± 0,59	3,01 ± 0,45
Coeficiente de Variação	3,69%	10,11%	25,10%	14,95%
T10%	40,43	49,03	3,77	3,44
	39,50	49,79	3,51	4,09
	39,92	49,30	2,37	3,91
Média ± Desvio	39,95 ± 0,46	49,37 ± 0,39	3,22 ± 0,75	3,81 ± 0,34
Coeficiente de Variação	1,15%	0,79%	23,29%	8,92%
T5%	46,75	49,37	2,79	4,10
	41,66	42,39	3,12	4,30
	38,48	59,44	2,48	3,86
Média ± Desvio	42,30 ± 4,17	50,40 ± 8,57	2,79 ± 0,32	4,09 ± 0,22
Coeficiente de Variação	9,85%	17,00%	11,47%	5,38%
T _{Referência3}	45,24	64,24	2,76	4,78
	38,71	58,73	2,91	4,89
	38,64	52,96	2,95	4,12
Média ± Desvio	40,86 ± 3,79	58,64 ± 5,64	2,87 ± 0,10	4,6 ± 0,42
Coeficiente de Variação	9,28%	9,62%	2,17%	9,13%

Notas: * Compressão Axial

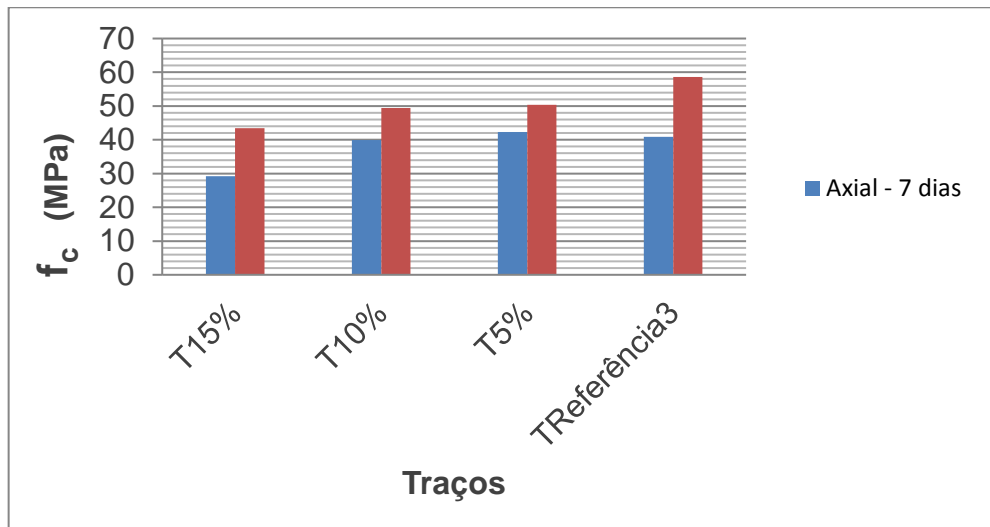
** Tração por compressão diametral

Fonte: Do próprio autor

Em termos gerais, as resistências (tanto axial, quanto diametral) sofrem influências com acréscimo de borracha, de modo parecido (reservando as proporções). No gráfico da Figura 44 e Figura 45, são mostradas as curvas geradas

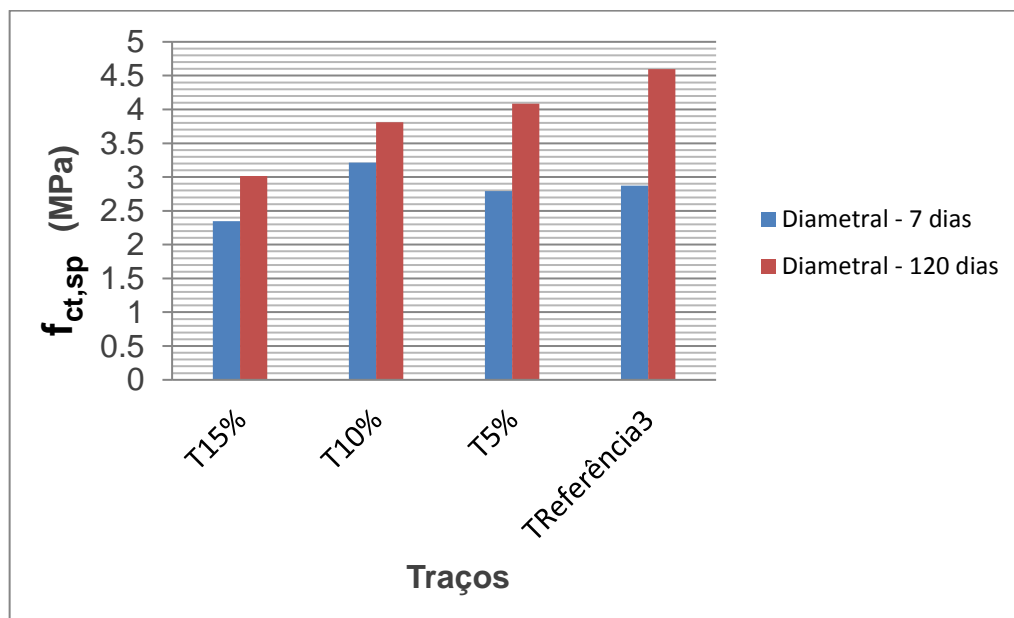
com o aumento de substituição de areia por resíduos de borracha, ou seja, do $T_{Referência3}$ para o T15%.

Figura 44– Resistências à compressão axial aos 7 e 120 dias, para os traços com e sem borracha



Fonte: Do próprio autor

Figura 45 - Resistências à tração por compressão diametral aos 7 e 120 dias, para os traços com e sem borracha



Fonte: Do próprio autor

As médias dos dados obtidos na ruptura aos sete dias de idade mostram que o acréscimo de resíduos em até 10% não teve grande influência, sendo que no caso de 5% (T5%), a resistência foi praticamente a mesma, ou seja, o concreto com borracha teve 1,44 MPa a mais do que o $T_{Referência3}$. Já para 15% de borracha, a

queda foi muito evidente, quando comparado com o traço referência, ou seja, 11,64 MPa menor (levando em consideração a média).

Após cento e vinte dias, as resistências à compressão axial se mostraram com maior discrepância nos traços, entretanto o desvio padrão do traço com borracha é maior, podendo chegar ao valor médio do traço sem borracha. O comportamento é de decréscimo de resistência com o aumento de resíduos.

Tal comportamento de queda na resistência pode ser explicado pelo fato de a borracha não ser um material com boa resistência à compressão. Isso faz com que o resíduo tenha a mesma função dos vazios no concreto ou ainda, crie tensões pela forma elíptica (quando comprimida), como sugere Balaha, Badawy e Hashish(2008)

Neste caso da resistência à tração por compressão diametral, a propriedade responsável pela queda na resistência pode ser o atrito reduzido, ou a falta de aderência entre as partículas de borracha com a do concreto, confirmando a ideia de Balaha, Badawy e Hashish (2007).

Ao comparamos a idade das rupturas podemos observar que aos sete dias,o acréscimo de 15% de borracha no concreto (T15%) apresentou uma redução na resistência à compressão axial de 28,5%, em relação ao concreto sem borracha (T_{Referencia3}). Aos cento e vinte dias a redução foi de 26%, ou seja, a diferença entre os valores de resistência à compressão axial do concreto de referência com o concreto com 15% de borracha continuou sendo praticamente a mesma para ambas as idades.

No gráfico da Figura 44 (resistência à compressão axial), a queda fica explícita quando o acréscimo passa de 10% para 15%. Além disso, aos cento e vinte dias é o traço que possui menor resistência à tração por compressão diametral (gráfico da Figura 45). Portanto, o traço com 15% de resíduos de borracha, foi escolhido para o tratamento na fase V.

Obtiveram-se ainda, os módulos de elasticidade aos cento e sessenta e nove dias depois da produção das amostras, quando a máquina de ensaios foi consertada e voltou a funcionar. Nesta data também foi possível a obtenção dos valores da resistência à compressão axial, a fim de ter um parâmetro para avaliar a ductilidade

do material produzido. Tais valores e a relação da Módulo/Resistência são mostrados na Tabela 13, com suas médias, desvios e coeficientes de variação.

Tabela 13 - Valores dos módulos de elasticidade e das resistências à compressão axial aos 169 dias

Traços	Amostra	f_c^* (MPa)	E^{**} (GPa)	$E / f_c (x10^3)$
T _{Referência3}	CP1	60,84	53,04	0,87
	CP2	65,09	54,89	0,84
	CP3	64,68	48,57	0,75
Média ± Desvio		63,54 ± 2,34	52,17 ± 3,25	0,82 ± 0,06
Coeficiente de variação		3,57%	6,23%	7,62 %
T5%	CP1	63,44	47,92	0,76
	CP2	52,00	48,93	0,94
	CP3	59,59	43,78	0,73
Média ± Desvio		58,34 ± 5,82	46,88 ± 2,73	0,81 ± 0,11
Coeficiente de variação		9,98%	5,83%	14,02 %
T10%	CP1	58,71	47,22	0,80
	CP2	60,24	44,15	0,73
	CP3	61,33	50,28	0,82
Média ± Desvio		60,09 ± 1,32	47,22 ± 3,07	0,78 ± 0,05
Coeficiente de variação		2,20%	6,50%	6,03 %
T15%	CP2	37,60	41,21	1,10
	CP3	46,46	42,82	0,92
Média ± Desvio		42,99 ± 4,73	41,77 ± 0,91	1,01 ± 0,13
Coeficiente de variação		11,00%	2,18%	12,60 %

Notas: * Compressão Axial

** Módulo de Elasticidade

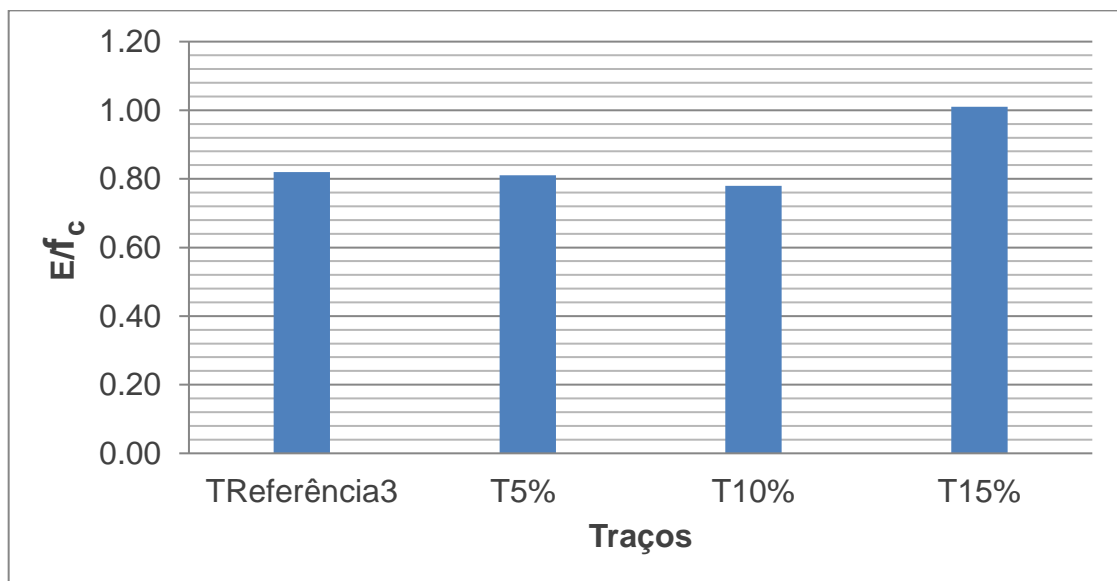
Fonte: Do próprio autor

A partir estes valores, confirmou-se que as resistências à compressão axial tiveram pouca influência quando a porcentagem de resíduo chega até 10%, mesmo para este caso, com mais de 24 semanas posterior à fabricação.

No caso do traço com 5% de substituição (T5%), o desvio padrão foi alto. Como consequência, a média axial foi mais baixa que a do T10%, devido o corpo de prova 2 (52 MPa). Por outro lado o corpo de prova 1 do T5% teve resistência de 63,44 MPa, que é maior que a resistência de uma das amostras do traço referência, e próxima da média deste traço.

A relação “Modulo de elasticidade/Resistência à compressão axial”, mostrada na Tabela 13, é melhor visualizada no gráfico de barras da Figura 46.

Figura 46 - Modulo de elasticidade/Resistência à compressão axial T5%, T10%, T15% e TReferência3



Fonte: Do próprio autor

O módulo de elasticidade do concreto tende a diminuir com o acréscimo de borracha. Consequentemente, para a mesma carga, a deformação é maior no concreto com borracha.

No caso, o traço T10% foi o que apresentou melhor relação para o ganho de ductilidade em relação à perda de resistência, pois foi o traço que apresentou menor relação módulo de elasticidade/resistência à compressão axial. O traço com 5% de borracha também apresentou essa relação menor do que a do traço de referência.

5.4 FASE IV - ANÁLISE DE DETERMINADAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Os traços aqui refeitos foram o T_{Referência1}, da Fase I, que será chamado de T_{Referência4} neste item. Também se refez o T15%, da Fase III.

5.4.1 Processos de cura

Com relação aos processos de cura, os resultados dos ensaios de compressão axial, aos 28 dias, são mostrados na Tabela 14, em MPa.

Tabela 14 – Dados obtidos na Fase IV, relativos às curas

Traços	Processos de cura (lotes)	
	Tcâm28	Tsol28
Treferência4	49,94MPa	53,08MPa
	54,34MPa	45,19MPa
	59,26MPa	41,88MPa
Média (MPa)	54,51 ± 4,66	46,72 ± 5,76
Coefficiente de variação	8,55%	12,33%
T15%	31,27MPa	38,52MPa
	32,21MPa	35,99MPa
	35,60MPa	31,39MPa
Média (MPa)	33,02 ± 2,28	35,30 ± 3,61
Coefficiente de variação	6,90%	10,23%

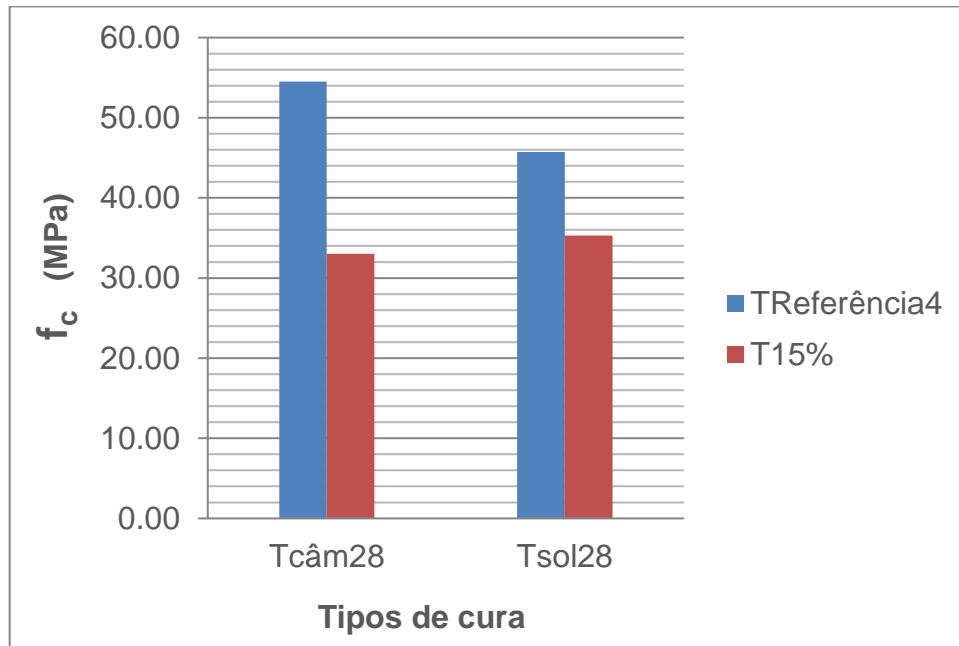
Fonte: Do próprio autor

Nota-se que o traço de CAD com borracha não foi muito influenciado pelo tipo de tratamento (processo) de cura. A média da resistência à compressão axial foi próxima, sendo 33,02 MPa (Tcâm28) e 35,20 MPa (Tsol28).

Para o traço de CAD sem borracha, os diferentes tipos de curas geraram diferenças de quase 8 MPa, porém neste caso, ao contrário do traço com borracha, a resistência diminuiu na cura sob o sol.

O gráfico da Figura 47 mostra o comportamento das médias de resistência dos lotes nos dois diferentes processos de cura, por vinte e oito dias.

Figura 47 - Resistências à compressão axial obtidas



Fonte: Do próprio autor

O concreto com resíduos teve comportamento consideravelmente semelhante (sob o sol, o valor foi apenas 6,9% maior). Já o concreto referência teve valores menores de resistência quando a cura foi sob o sol (sob o sol, foi 16,1% menor).

Tal fato pode comprovar que diferentes curas para o concreto pode ocasionar influência em suas propriedades mecânicas. O concreto de referencia sob o sol deve ter sofrido maior retração do que o de borracha, sendo assim o de borracha mostrou ter menor influência sobre o tipo de cura, pois se o mesmo é mais dúctil tende a acomodar para sofrer a retração, enquanto que o concreto mais rígido não possui capacidade de acomodação e acaba se trincando ao retrain.

5.4.2 Tratamento superficial

A análise da interferência do tratamento superficial das faces dos corpos de prova na resistência à compressão axial foi realizada apenas com o traço com resíduos de borracha na proporção de 15%.

Os dados obtidos (aos 28 dias) para os tratamentos superficiais são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados obtidos na Fase IV, relativos aos tratamentos superficiais

Amostras	f_c (MPa)				
	Cimentados	Madeira compensada	Capeados	Retificados	Borracha
CP1	34,88	36,91	32,90	40,50	12,94
CP2	38,86	34,58	36,15	21,32	13,98
CP3	39,19	35,86	32,79	21,95	11,06
Média± Desvio	37,64 ± 2,4	35,78 ±1,17	33,95±1,91	27,93±10,9	12,66±1,48
Coeficiente de Variação	6,38%	3,27%	5,62%	39,02%	11,69%
<i>Diferença da média Geral dos 5 tratamentos (%)</i>	+ 27,21	+ 20,92	+ 14,73	- 5,63	- 57,23

Fonte: Do próprio autor

Verifica-se que os três melhores tratamentos superficiais, respectivamente, foram: Cimentados; Com utilização de madeira compensada e; Capeados.

O tratamento por meio de retificação foi o que gerou resultados com maior discrepância entre si. Isso porque dos três corpos de prova para o caso, um deles teve o valor aproximadamente duas vezes maior (40,5 MPa) quando comparado com os outros dois (21,95 MPa e 21,32 MPa).

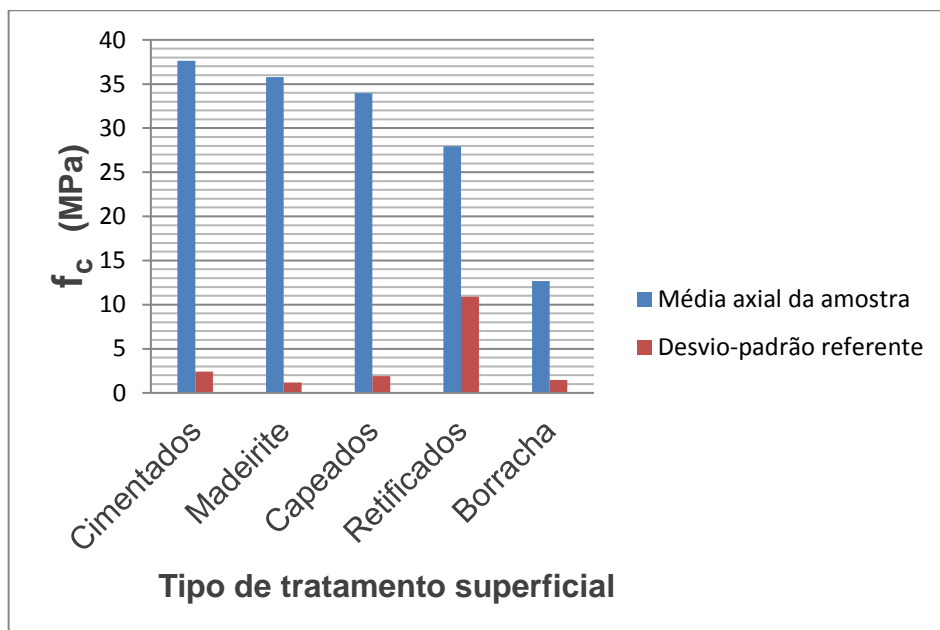
O fator principal responsável pela diferença de resistência, quando se trata de retificação, deve ser a formação de múltiplos planos na superfície do corpo de prova, ocasionados pela máquina retificadora. Com diferentes planos, a carga é aplicada em apenas um deles, ou seja, aplicada numa região parcial da superfície do corpo de prova. Com isso, diminui-se a área de aplicação de carga e afeta diretamente na tensão (de forma a aumentar) sobre o corpo de prova. Para utilização correta, a retífica deve ser aferida.

Já para o caso da utilização de placas de borracha para a ruptura dos corpos de prova não teve um desvio-padrão tão alto quanto da retificação, porém foram os menores valores médios da resistência, ficando esta abaixo dos 14 MPa. Durante o

ensaio, percebe-se que pelo efeito Poisson, a borracha escoar no plano perpendicular à carga aplicada. A hipótese para tais valores de resistência é que este escoamento combinado com a aderência (da borracha no corpo de prova) pode aumentar a fissuração com o aumento de carga. Além disso, este fenômeno não permite a correta transferência da carga pela ausência de rigidez.

O comportamento das resistências através dos diferentes métodos de retificação pode ser visualizado melhor por meio do gráfico da Figura 48.

Figura 48 - Gráfico dos tratamentos



Fonte: Do próprio autor

O tratamento com cimentação, pelo fato de ter mesma relação água/cimento (a/c), acaba ficando com propriedades mecânicas muito similares ao próprio concreto em questão. Esta é uma das explicações do bom resultado, comprovada também por NEVILLE (1982), que sugere um capeamento com um material de resistências e propriedades elásticas comparáveis àquelas do concreto dos corpos de prova.

Além disto, tem boa aderência com a superfície do corpo de prova, pois é colocado assim que o mesmo acaba de ser moldado. A gravidade permite a acomodação da nata, ao mesmo tempo em que a superfície adquire planicidade, devido à boa fluidez ocasionada através do superplastificante.

A madeira compensada deforma com a carga aplicada, ocupando os espaços irregulares. A resistência do material permite uma ótima transferência da carga da prensa para o corpo de prova. Neste caso, a acomodação ocorre durante o andamento do ensaio, diferente de quando é cimentado ou capeado com enxofre.

Já o capeamento com enxofre, tem acomodação razoavelmente semelhante ao da cimentação, porém depende da qualidade do enxofre (e ausência de resíduos no mesmo). Além disso, o enxofre por ser um material diferente do concreto, pode ter alguns fatores que influenciam na passagem da tensão para a amostra. Isso pode explicar porque ocorre certa queda na resistência, quando comparado com a cimentação, onde o tratamento endurece praticamente no mesmo tempo em que o material do corpo de prova.

5.5 – FASE V – TRATAMENTOS NO CONCRETO COM 15% DE RESÍDUOS

A Tabela 16 mostra as composições dos traços formados respectivos nesta fase.

Tabela 16 - Traços e suas composições na Fase V

Traços	Cimento	Areia	Borracha	Brita 0	Cinzas	Plastificante	Água
T15%Cinzas	1,00	0,98	0,07	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32
T15%	1,00	0,98	0,07	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32
T _{Referência5}	1,00	1,15	0,00	3,15	0,08	$5,48 \times 10^{-3}$	0,32

As análises realizadas para estes traços (T15%, T_{Referência5}, T15%Cinzas) foram feitas na fase fresca e endurecida. Os resultados para cada fase são apresentados nos dois subitens seguintes.

5.5.1 Fase fresca

As massas das amostras foram medidas, a fim de relacioná-las com os comportamentos mecânicos. A Tabela 17 mostra as médias obtidas e os desvios-padrões, tanto para as amostras cilíndricas, quanto para as prismáticas.

Tabela 17 - Médias das massas dos Corpos de prova produzidos

Tipo de CP	Dados dos lotes de CPs	T _{Referência5}	T15%	T15% _{Cinzas}
Cilíndricos	Massa média (g)	3780,00	3730,00	3710,00
	Desvio padrão da média (g)	0,05	0,05	0,04
Prismáticos	Massa média (g)	28810,00	28200,00	27020,00
	Desvio padrão da média (g)	0,22	0,03	0,33

Fonte: Do próprio autor

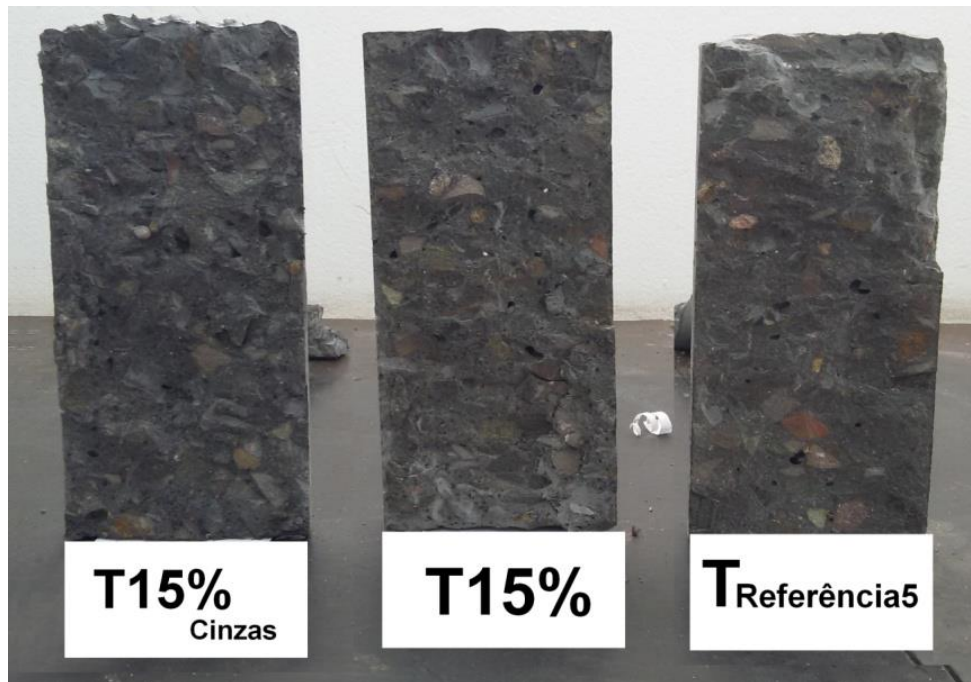
A inserção dos resíduos tornou o material mais leve. Para os dois tipos de amostras, a maior massa foi para o T_{Referência5}, como esperado, por não possuir resíduos. Seguido dele, tem o T15%. O traço com T15%_{Cinzas}, apesar de ter mais finos (cinzas de casca de arroz) obteve a menor massa entre os três.

Considerando as amostras cilíndricas, que tiveram menor desvio padrão, a inserção dos resíduos provocou queda de 1,32% na massa, enquanto que a combinação da inserção de resíduos e cinzas, 1,85%.

Isso mostra que no traço em questão do estudo com uma taxa de borracha a 12,0 kg/m³ de concreto, a redução de peso próprio na estrutura fica entre 13,0 kg/m³ e 18,0 kg/m³, aproximadamente. Isso se explica devido às massas específicas dos materiais utilizados, sendo eles a areia e a borracha.

A Figura 49 ilustra uma amostra de cada traço rompida longitudinalmente (depois do ensaio de resistência à tração por compressão diametral), onde é possível notar que na fase fresca não houve vibração excessiva, já que nos três traços, não existe segregação.

Figura 49 - Três amostras, uma de cada traço, com detalhe interno (rompida)



Fonte: Do próprio autor

Ainda, por meio da Figura 49, pode-se notar a semelhança entre os três materiais.

5.5.2 Fase endurecida

Aos 28 dias, como esperado, os traços com mais resíduos tiveram menor resistência. Por outro lado, a inserção de mais finos não foi suficiente para evitar a queda nas resistências, sendo que o traço com mais finos teve o pior comportamento geral dentre os três. Os valores obtidos nos quatro tipos de ensaio são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores obtidos nos ensaios aos 28 dias para os traços da Fase V

Traços	f_c^* (MPa)	$f_{ct,sp}^{**}$ (MPa)	E^{***} (GPa)	$F_{ct,f}^{****}$ (MPa)
T _{Referência5}	51,54	6,50	42,33	7,56
	50,44	5,33	41,86	6,68
	46,92	6,17	51,96	6,71
Média ± Desvio	46,63 ± 2,41	6,00 ± 0,60	45,38 ± 5,70	6,98 ± 0,50
Coeficiente de Variação	5,17%	10,00%	12,56%	7,16%
T15%	38,69	5,32	40,61	6,43
	42,97	5,74	39,25	6,37
	41,67	5,84	45,33	6,43
Média ± Desvio	41,11 ± 2,19	5,63 ± 0,28	41,73 ± 3,19	6,41 ± 0,04
Coeficiente de Variação	5,32%	4,97%	7,64%	0,62%
T15% Cinzas	32,97	4,26	43,34	5,70
	33,35	5,15	45,09	5,39
	34,72	5,19	43,45	5,16
Média ± Desvio	33,68 ± 0,92	4,87 ± 0,53	43,36 ± 0,98	5,42 ± 0,27
Coeficiente de Variação	2,73%	10,88%	2,26%	4,98%

Notas: * Compressão Axial

** Tração por compressão diametral

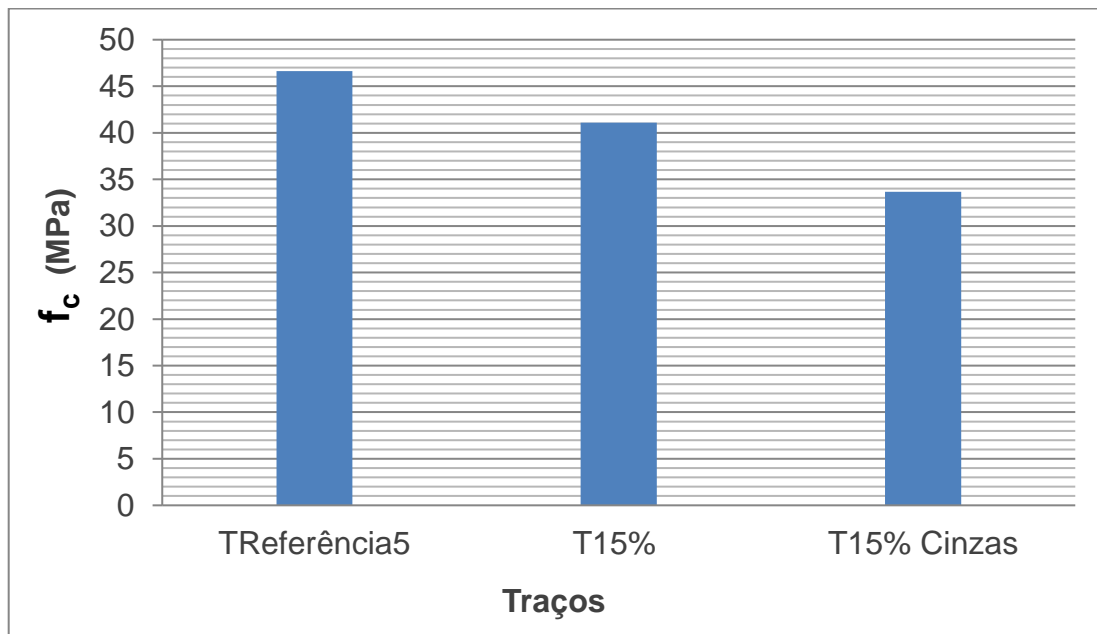
*** Módulo de elasticidade

**** Tração na flexão

Fonte: Do próprio autor

O gráfico da Figura 50 compara as três médias de resistência à compressão axial apresentadas na Tabela 18, em MPa.

Figura 50 - Média das resistências à compressão axial dos traços da Fase V



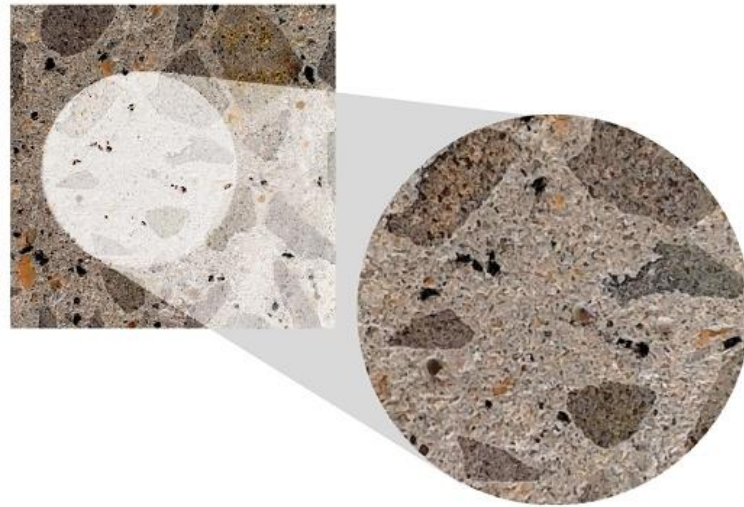
Fonte: Do próprio autor

A inserção de 15% de resíduo provocou queda de aproximadamente 12% na axial, em comparação ao Traço referência. Ainda em comparação com este referência, o aumento de cinzas provocou maior queda, em torno de 28%, aproximadamente. Ou seja, aumentando-se as cinzas, a queda foi 2,3 vezes maior.

O aumento do preenchimento das seções pelos finos pode ter ocasionado locais microscópicos mais rígidos, diminuindo os vazios por onde as partículas de borracha poderiam se deformar com mais folga. Possivelmente, com isso, formavam tensões pequenas nas paredes do concreto, diminuindo sua resistência, como sugere Balaha, Badawy e Hashish (2007).

Além deste motivo, as partículas finas podem ter tomado lugar de parte dos agregados graúdos. Prova disso é a redução de massa das amostras quando se aumentou o teor de cinzas. A Figura 51 ilustra o acontecido, para melhor entendimento.

Figura 51 - Materiais finos “tomando lugar” dos agregados graúdos

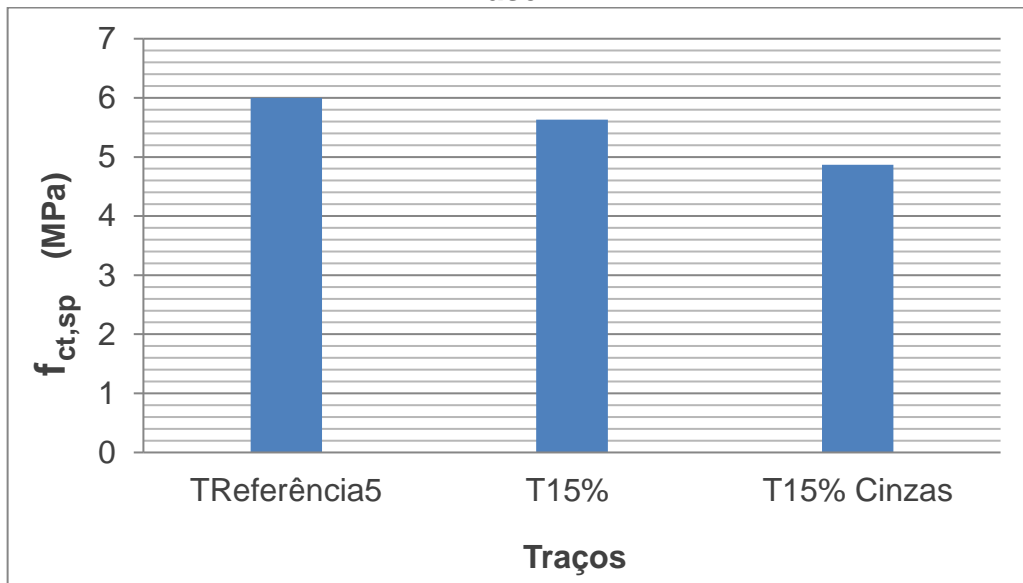


Fonte: Do próprio autor

A solidez do agregado graúdo não deixa espaço para aprisionamento de ar no local em que ele ocupa no material, enquanto que o espaço formado pelas partículas finas permite essa infiltração do ar entre seus grãos.

O comportamento da resistência à tração por compressão diametral teve comportamento semelhante ao da axial e é mostrado na Figura 52, em MPa.

Figura 52 - Médias das resistências à compressão diametral dos traços da Fase V



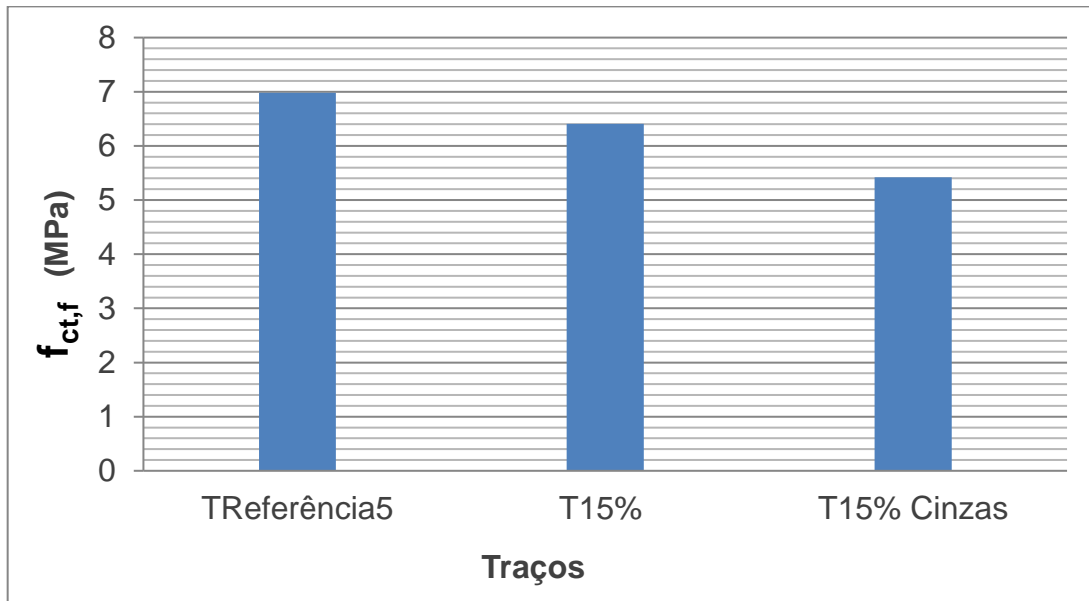
Fonte: Do próprio autor

Nota-se que o traço T15% apresentou uma queda de 6% em relação ao traço de referência, enquanto que o traço T15%_{Cinzas} apresentou queda de 18% em relação ao traço de referência.

Uma das explicações pode ser também do enrijecimento nas “paredes” da pasta de cimento ao redor das partículas de borracha.

Seguindo o comportamento das resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral, a resistência a tração na flexão tem o comportamento semelhante, mostrado no gráfico da Figura 53.

Figura 53 - Médias das resistências à tração na flexão dos traços da Fase V

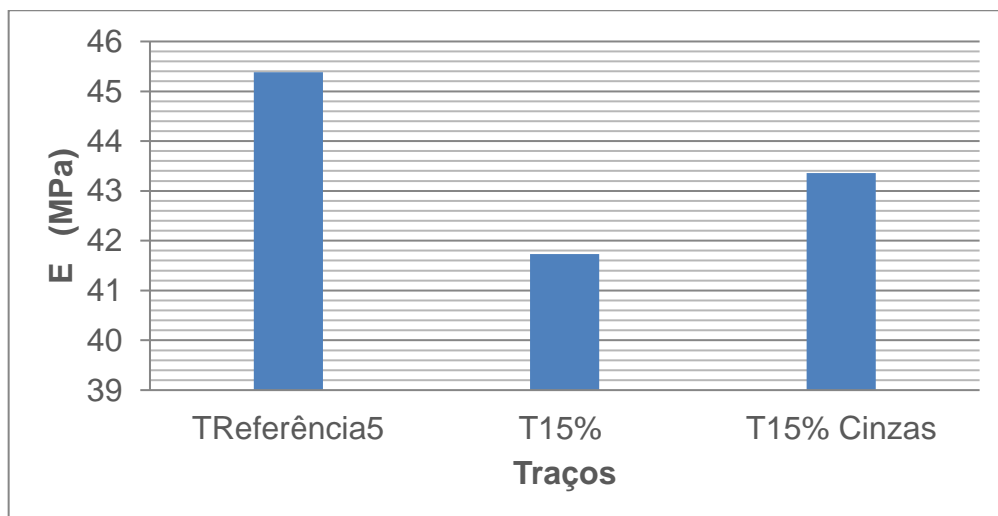


Fonte: Do próprio autor

Neste caso, a queda do valor médio da resistência à tração na flexão do T15% foi, aproximadamente, 8%, em relação ao traço referência, enquanto que o T15%_{Cinzas} foi, aproximadamente, 22%, também em relação ao traço de referência.

Neste caso, o maior módulo obtido foi para o T_{Referência5}. A Tabela 18 mostrou os valores em GPa, onde é possível notar o comportamento ocorrido com os dados. Tal comportamento é melhor visualizado na Figura 54.

Figura 54 - Médias dos módulos de elasticidade dos traços da Fase V



Fonte: Do próprio autor

Com a inserção de resíduos de borracha, o módulo de elasticidade do concreto produzido diminuiu, em média, para aproximadamente 92% do seu valor (comparado ao Referência). Com resíduo e maior teor de cinzas, o módulo de elasticidade equivaleu a 95%, quando comparado com o Referência.

A relação “Módulo de elasticidade/Resistência à compressão axial” resultou nos dados mostrados na Tabela 19, em GPa/MPa.

Tabela 19 - Razão “Módulo de elasticidade/Resistência à compressão axial”, em GPa/MPa

Amostra	T _{Referência5}	T15%	T15% _{Cinzas}
CP1	0,82 (x 10 ³)	1,05 (x 10 ³)	1,31 (x 10 ³)
CP2	0,83 (x 10 ³)	0,91 (x 10 ³)	1,35 (x 10 ³)
CP3	1,11 (x 10 ³)	1,09 (x 10 ³)	1,25 (x 10 ³)
Média ± Desvio	(0,92 ± 0,16) x10 ³	(1,02 ± 0,09) x10 ³	(1,31 ± 0,05) x 10 ³
Coeficiente de Variação	17,70%	9,01%	3,89%

Fonte: Do próprio autor

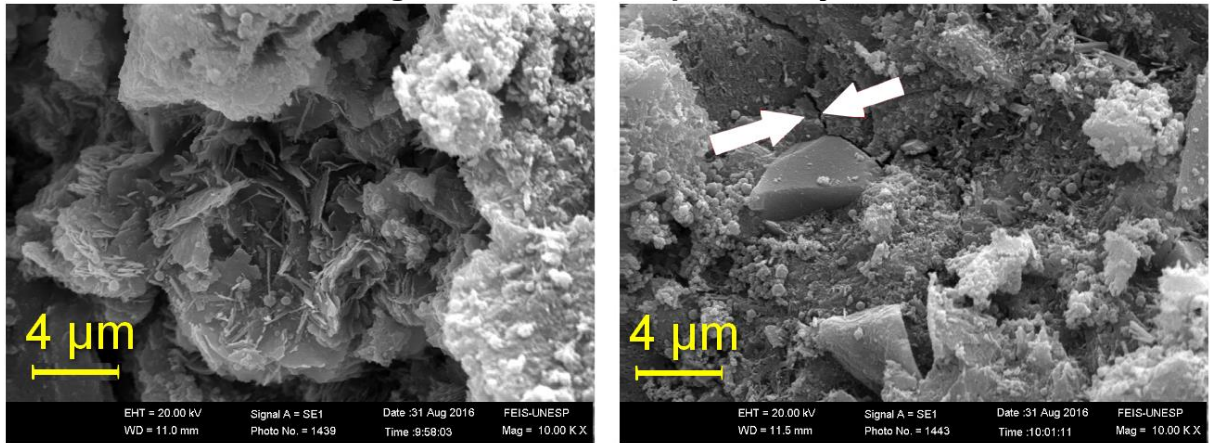
A partir dos dados da tabela, nota-se que a melhor relação acaba sendo do concreto referência. Tal fato, como já visto na Fase III (Página 66), confirma que o concreto com 15% de resíduos tem sua resistência à compressão axial diminuída em proporção muito maior que o módulo, afetando tal razão (Módulo/Resistência).

O aumento do teor de cinzas de casca de arroz na mistura não serviu para melhorar este comportamento mais dúctil e ao mesmo tempo resistente, já que a queda na resistência à compressão axial foi muito maior que a do T15%.

Microscopia eletrônica de varredura

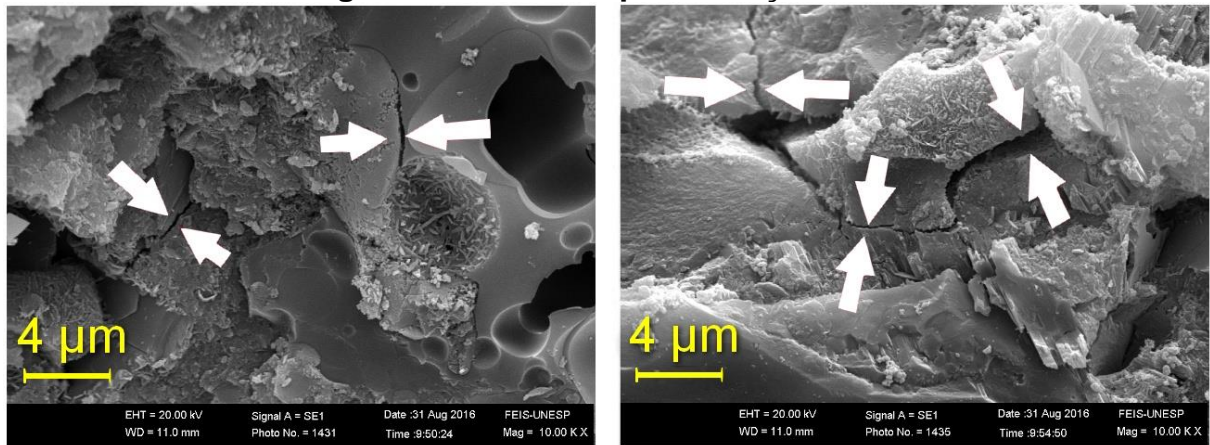
Nas pastas dos concretos com 15% de borracha se notam microfissuras aos 28 dias. Já no concreto sem borracha nota-se uma melhor “acomodação” entre a pasta e as partículas dos agregados. As imagens obtidas (com magnificação igual a 10.00 kx) referem-se a duas regiões distintas (imagens a e b). A Figura 55 mostra o traço T15%, enquanto o T15%_{Cinzas} é mostrado na Figura 56. O T_{Referência5} é mostrado na Figura 57.

Figura 55 - Microscopia do traço T15%



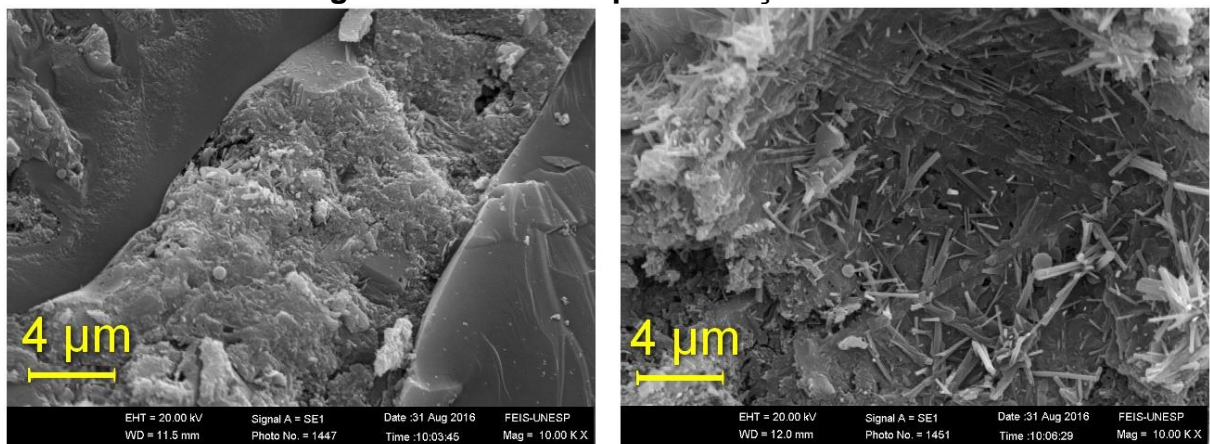
Fonte: Do próprio autor

Figura 56 - Microscopia do traço T15%Cinzas



Fonte: Do próprio autor

Figura 57 - Microscopia do traço TReferência5



Fonte: Do próprio autor

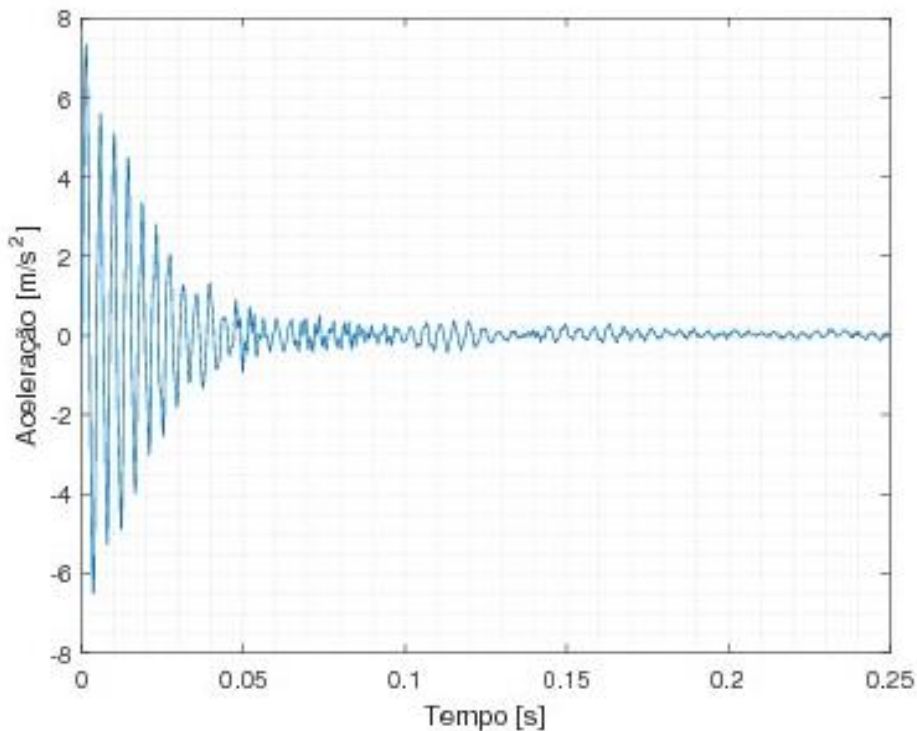
No concreto com maior teor de cinzas, as trincas são mais perceptíveis, formando até micro fendas como mostra a Figura 56, à direita. Ao observar a Figura 55 b), é perceptível quão menores são as fissuras para o caso do concreto com teor de cinzas em 8%. Na Figura 57 pode-se notar a formação de etringita e fissuras não são perceptíveis nas regiões fotografadas. Ainda para o traço sem borracha, é visual a boa aderência entre as partículas, na Figura 57 a).

5.6. FASE VI-ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO

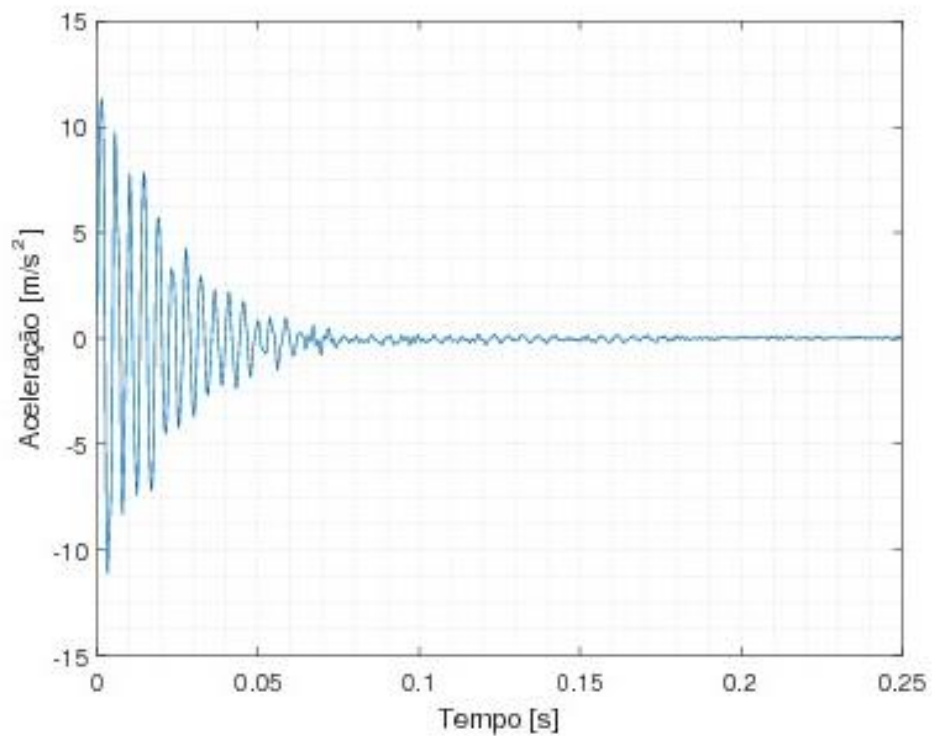
O amortecimento implica na melhor absorção das cargas. O ensaio é importante para que se obtenha os valores numéricos para analisar tal propriedade no concreto.

Para os traços T15% (da FASE III), T10%, T5% e T_{Referência3}, este ensaio foi possível, aproximadamente, dez meses após a fabricação das amostras. Os gráficos da resposta livre (obtidos por meio do ensaio), respectivos a cada traço citado, são mostrados da Figura 58 até a Figura 61.

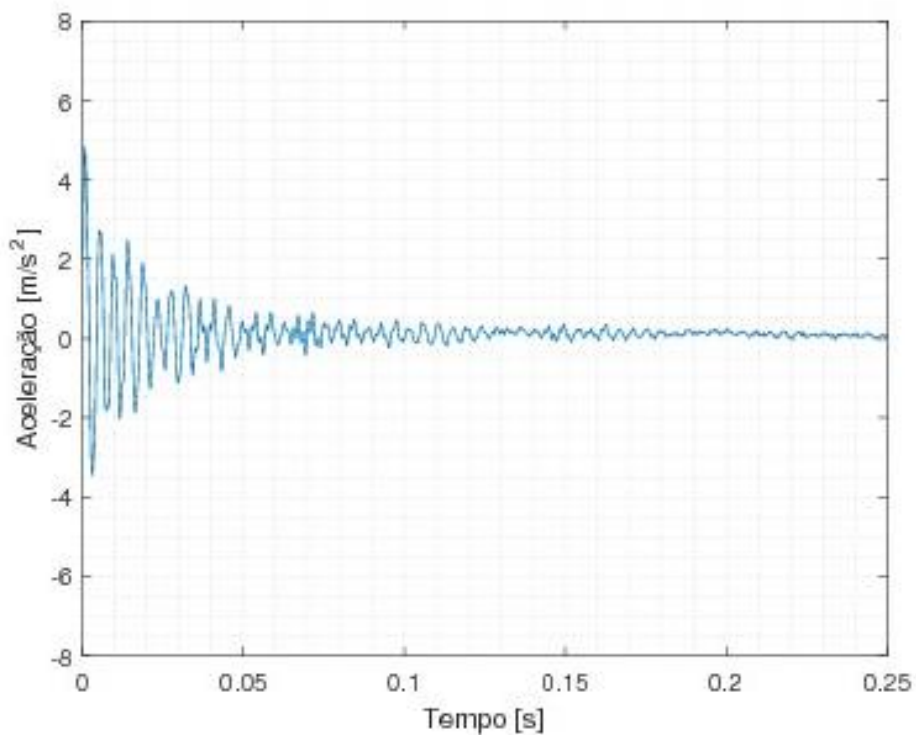
Figura 58 - Resposta livre do traço TReferência3



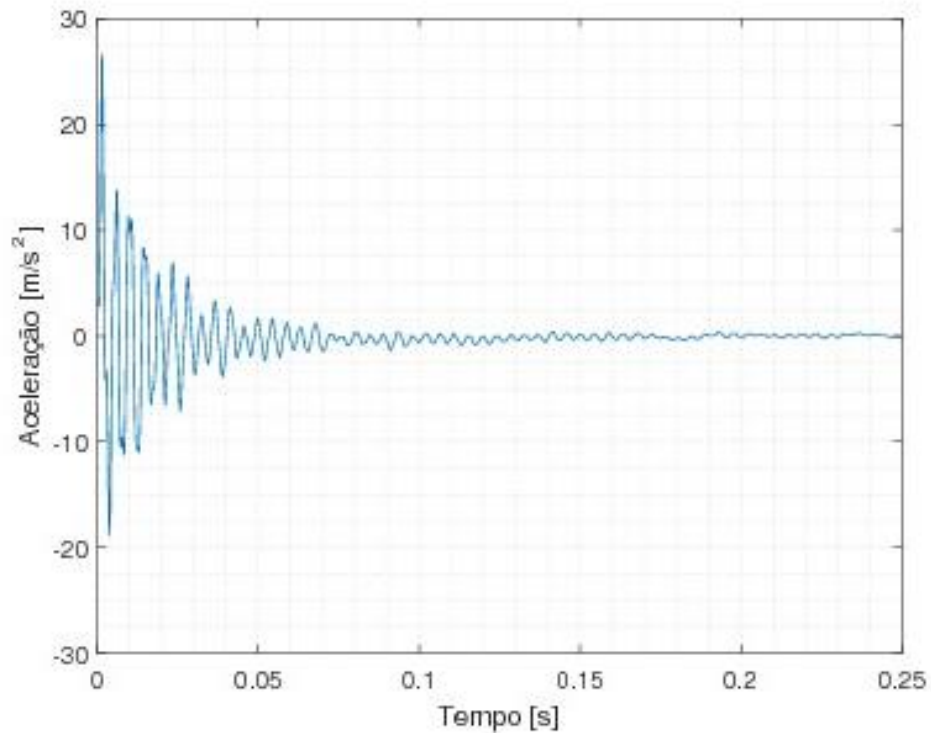
Fonte: Do próprio autor

Figura 59 - Resposta livre do traço T5%

Fonte: Do próprio autor

Figura 60 - Resposta livre do traço T10%

Fonte: Do próprio autor

Figura 61 - Resposta livre do traço T15%

Fonte: Do próprio autor

Os valores relativos ao amortecimento, através do tratamento dos dados são mostrados na Tabela 20. Os dados são relativos a amostras únicas de cada traço em questão.

Tabela 20- Coeficientes de amortecimento para os traços TReferência3, T5%, T10% e T15%

Traço TReferência3	Traço T5%	Traço T10%	Traço T15%
0,0430	0,0244	0,0722	0,104

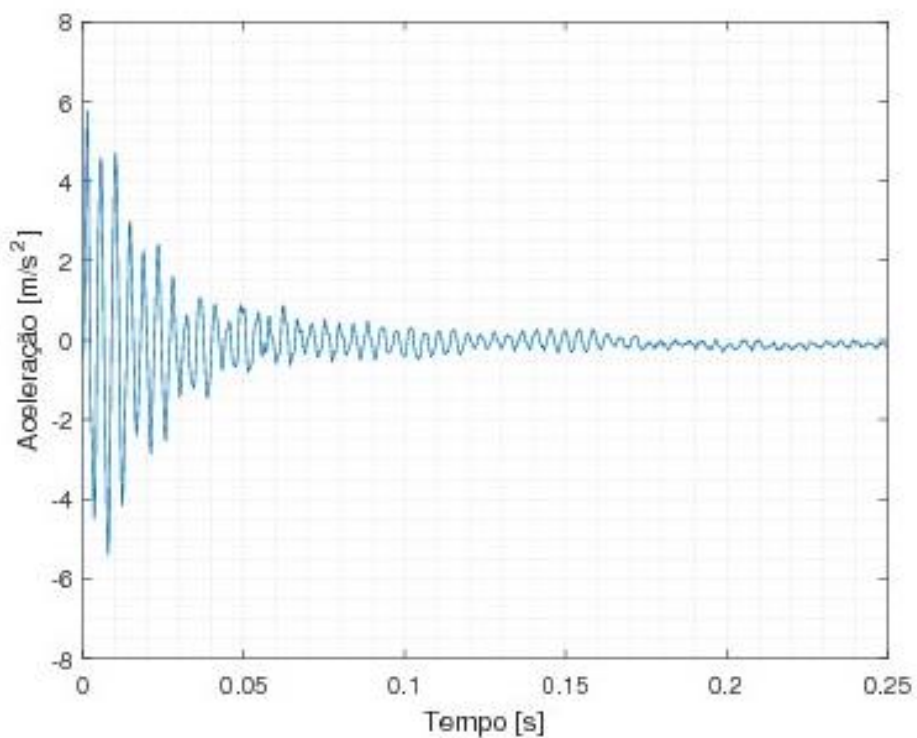
Fonte: Do próprio autor

O concreto com resíduos de borracha nas quantidades de substituição por 10 e 15% mostrou um maior coeficiente de amortecimento quando comparado ao Traço sem resíduos. Isso pode ser explicado pela melhor capacidade de absorção da borracha, que mostra também tal propriedade para o concreto, quando inserida nele.

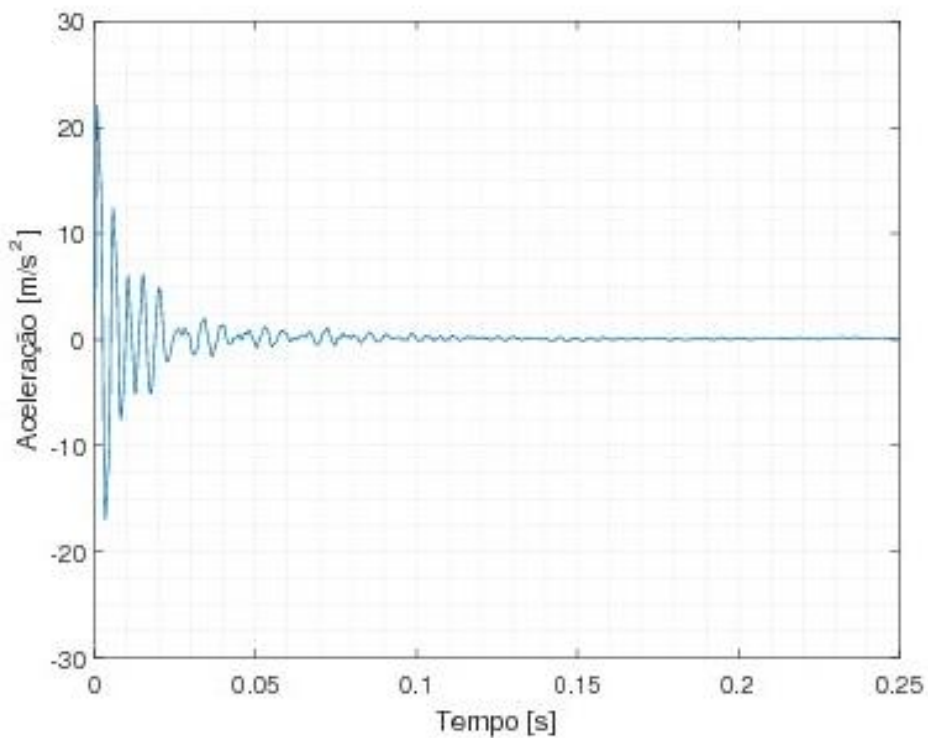
Observa-se que o crescimento não é uniforme, mas tende a ter comportamento mais amortecido à medida que se aumenta a substituição por resíduo.

Já para os traços T15% (da FASE V), T15%_{Cinzas} e T_{Referência5}, este ensaio foi possível, aproximadamente, três meses após a fabricação das amostras. Os gráficos da resposta livre (obtidos por meio do ensaio), respectivos a cada um destes traços, são mostrados da Figura 62 até a Figura 64.

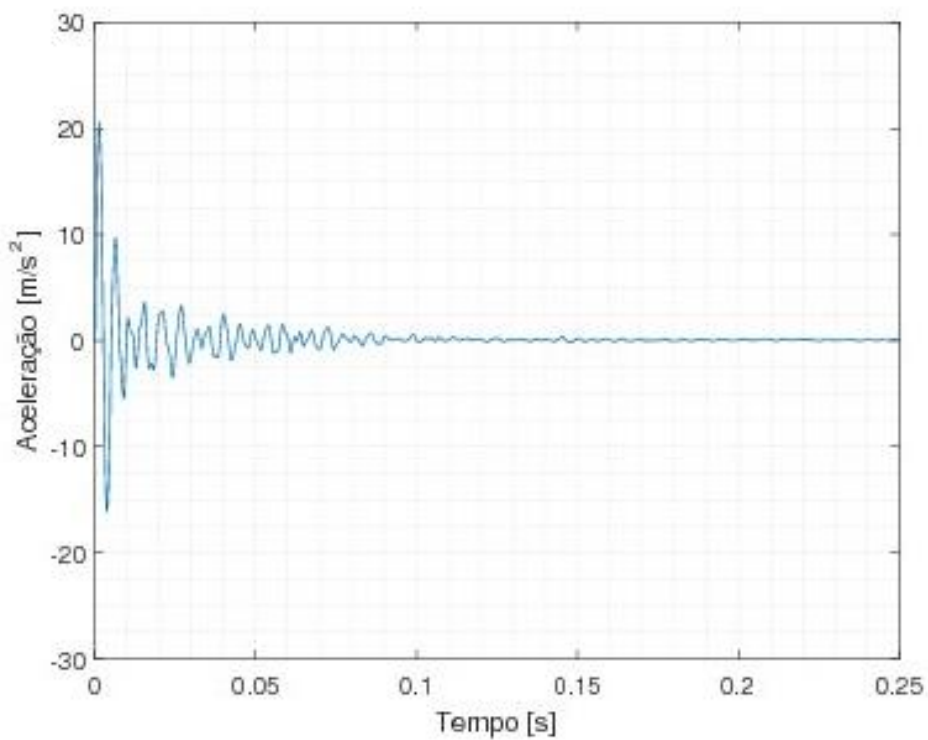
Figura 62 - Resposta livre do traço TReferência5



Fonte: Do próprio autor

Figura 63 - Resposta livre do traço T15%cinzas

Fonte: Do próprio autor

Figura 64 - Resposta livre do traço T15%

Fonte: Do próprio autor

Os valores relativos ao amortecimento, através do tratamento dos dados são mostrados na Tabela 21.

Tabela 21 - Coeficientes de amortecimento para os traços TReferência5, T15%Cinzas e T15%

Traço T _{Referência5}	Traço T15%Cinzas	Traço T15%
0,0368	0,0929	0,1186

Fonte: Do próprio autor

O comportamento da absorção se repete, mostrando que a substituição de areia por resíduos em 15% gera um aumento no coeficiente de amortecimento. O Traço que possui maior teor de finos (T15%Cinzas) apesar de seu coeficiente ser maior que o do traço referência, é menor que do T15%. A explicação provável é a maior ductilidade - comparado ao T_{Referência5} - aliada ao fato de a borracha ficar mais confinada do que no T15%.

Os valores tiveram aproximação satisfatória com os obtidos na Fase III.

6 CONCLUSÕES

Resumidamente, o aumento do teor de aditivos minerais (de 8% para 20% em relação ao cimento, em massa) não se mostra interessante para este material. Este tratamento faz com que suas propriedades mecânicas sejam mais afetadas. Ou seja, a utilização de resíduo de determinada faixa granulométrica (retido na peneira de 0,6mm) se mostra mais interessante do que o aumento no teor de finos na mistura.

Para o CAD com relação de a/c equivalente a 0,32 e 8% de aditivos minerais (em relação à massa do cimento), a substituição por resíduo mostrou que até 10% o decréscimo de resistência foi bem pequeno. O único tratamento realizado na borracha, para este caso, foi separação da faixa granulométrica. Para tal, o consumo de cimento foi consideravelmente o mesmo.

No caso de substituição por 5%, o Concreto com borracha chegou a ter resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral maiores que do concreto referência, aos 224 dias de idade.

O concreto com borracha foi, em todos os casos, mais dúctil. Teve resistências à compressão axial muito próximas, em diferentes tipos de cura. Ainda teve o coeficiente de amortecimento aumentado a partir de 10% de borracha. A mistura T10% também apresentou a melhor relação “módulo de elasticidade/resistência à compressão axial”, mostrando que o aumento de ductilidade desta mistura foi a que mais superou a perda de resistência.

Outras conclusões relevantes, referentes a cada fase da pesquisa são expostas na continuidade desta seção.

FASE I

A maior compacidade da mistura de CAD está diretamente relacionada com a resistência à compressão axial e com a resistência à tração por compressão diametral.

Para mesmos processos de cura e tratamentos superficiais dos corpos de prova, o ganho de resistência à compressão axial do CAD foi semelhante nos traços estudados (T1, T2, T3 e T4), embora as resistências aos sete dias tivessem valores diferentes.

FASE II

A substituição de areia por 5% de resíduos (em volume) apresentou uma ligeira queda na resistência à compressão axial para três das misturas resultantes. Porém, ainda assim essa queda variou com as granulometrias diferentes da borracha, sendo menor ainda para a borracha com diâmetro de 0,6 mm.

De acordo com o esperado, tal como os agregados convencionais (brita e areia), a textura e granulometria do resíduo de borracha são fatores que influenciam diretamente nas resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral.

Em todos os casos, houve pequena melhora na resistência à tração por compressão diametral aos 56 dias e a borracha não impediu o crescimento da resistência à compressão axial ao longo do tempo.

FASE III

De acordo com os dados obtidos, a inserção de resíduos de borracha em substituição de areia, por volume, influencia diretamente na trabalhabilidade, sendo esta última diminuída, à medida que se aumenta a substituição por resíduos.

Por ter valores maiores e devido ao comportamento do material, a queda na resistência é bastante evidenciada quando se trata do caso da compressão axial e pouco sensível no caso tração por compressão diametral, à medida que aumenta-se as quantidades de resíduo;

Com relação aos traços extremos, comparando T15% com T_{Referência3}, embora a resistência à compressão axial mostre uma queda considerável, a proporção de crescimento com a idade é praticamente a mesma. De diferente modo, a resistência à tração por compressão diametral para estes casos tem proporções diferentes de crescimento, sendo que sem borracha é quase duas vezes maior.

Houve crescimento da média de resistências (à compressão axial e à tração por compressão diametral) durante os 120 dias, em ambos os casos. O resíduo de borracha não afetou essa propriedade.

Para substituições de areia por resíduo em 5% e 10%, a razão “tensão de compressão/Módulo de elasticidade” se mostrou melhorada comparada com o Traço referência, mostrando melhor ductilidade do material. Já para substituições de 15% essa relação foi mais baixa que o Referência, portanto com 15% de borracha o ganho em ductilidade não compensa a perda de resistência.

Fase IV

Com inserção de resíduos de borracha, em mesmas condições, a pega do concreto leva mais tempo para ser iniciada, fazendo com que o tempo disponível para processos de lançamento e adensamento do concreto numa obra seja estendido sensivelmente. Mesmo com isso, o fim de pega acontece quase simultaneamente.

A inserção do resíduo deixou os valores mais homogêneos entre os processos de cura sobre o concreto. Ou seja, a diferença entre eles foi mais sensível que no caso do CAD sem borracha.

Diferentes processos de tratamentos das superfícies influenciam os resultados. Dos processos de tratamento superficial utilizados nas faces dos corpos de prova deste trabalho, os mais baratos foram também os que apresentaram menor dificuldade de realização, e ainda, os que trouxeram melhores resultados (cimentação e uso de madeira compensada).

Como mostra o estudo de tratamento superficial para corpos de prova de CAD com borracha, ficaram com valores próximos os processos de: cimentação; capeamento com enxofre e; utilização de madeira compensada. Os desvios-padrões destes também tiveram valores próximos, destacando-se o uso de madeira compensada que foi sensivelmente mais homogêneo.

FASE V

O aumento do teor de cinzas de casca de arroz (de 8 para 20%) no traço com resíduos – T15%_{Cinzas} - provocou quedas aproximadamente três vezes maior na

resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão, levando em consideração o traço com resíduo T15%.

A melhor forma de utilização dos resíduos no trabalho foi sem nenhum tipo de tratamento superficial, mas sim tratamentos de peneiramento para separação granulométrica.

FASE VI

Com o aumento do teor de finos, o coeficiente de amortecimento fica reduzido quando comparado com o traço de mesma quantidade de borracha. Ainda assim, comparado com o traço referência, o valor do amortecimento é maior.

Embora não tenha um comportamento de crescimento uniforme, o coeficiente de amortecimento se mostrou maior no caso de resíduos com maior quantidade de borracha.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas observações decorrentes dos resultados do trabalho dão novas opções na mesma linha de pesquisa, tais como:

- Diminuir a quantidade de cinzas de casca de arroz (aditivo mineral) já que aumentando-se a quantidade, as propriedades mecânicas não foram otimizadas;
- Realizar ensaios de oxidação e corrosão no aço inserido em misturas de CAD com borracha a fim de comparar com os inseridos no CAD referência;
- Estudar mais detalhadamente as consequências da frequência natural e vibração (características) do material;
- Adicionar fibras de aço no CAD com borracha, analisando a consequência nas propriedades mecânicas;
- Análise do comportamento da fissuração pós-ruptura, a partir do ensaio de Curva-R;

REFERÊNCIAS

ANDRIOLO, F. R.; SKWARCZYNSKI, T.M. **Concreto pré refrigerado no Brasil: uma evolução com mais de 20 anos.** São Paulo: Graphos, 1988. 104 p.

ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B. C. **Inspeção e controle de qualidade no concreto.** São Paulo: Newswork, 1993. 572 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908:** aditivos para argamassa e concreto: ensaios de caracterização. Brasília, DF, 2008. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** cimento portland composto: especificação. Brasília, DF, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479:** argamassa e concreto: câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova. Brasília, DF, 2006. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NBR9776:** agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman: método de ensaio. Brasília, DF, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** agregados: determinação da composição granulométrica. Brasília, DF, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** agregado miúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Brasília, DF, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Brasília, DF, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 5739:** concreto: ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Brasília, DF, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Brasília, DF, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7222:** concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Brasília, DF, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 8522:** concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Brasília, DF, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 12142: concreto — determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.**2010. Brasília, DF, 5 p.

BALAHA, M.; BADAWY, A.; HASHISH, M. Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, New Delhi, v.14, p. 427-435, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p.

BARBOSA, M. B. **Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho.** 161 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em:

<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91484/barbosa_mb_me_ilha.pdf?sequence=1>. Acesso em: 13 ago. 2016.

BAUER, L. A.F. **Materiais de construção 1.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 447 p.

BRAVO, R. S. **Análise de blocos de concreto com resíduo de borracha de pneu e metacaulim.** 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014. Disponível em:

<<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/124467/000837029.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação.** 220 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em:

<<http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/download/tatianacervo.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT: **Manual de pavimentos rígidos.** 2 ed. Rio de Janeiro, 2004.231 p.

EIRAS *et al.* **Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires.** London: Materials And Design,2014.

FARHAN, A. H.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis. **Construction And Building Materials**,Amsterdam,v. 105, p. 94-102. dez. 2015.

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu.** 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. Disponível em:

<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91447/fazzan_jv_me_ilha.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 ago. 2016.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 7, n. 4, p.43-54, Dezembro, 2007. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3753/2106>>. Acesso em: 22 set. 2016.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91477/franca_vh_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 ago. 2016.

GUERRA, R. S. de T. **Afinal slump test pra quê?**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/08/afinal-slump-test-para-que.html>>. Acesso em: 26 jul. 2016.

GUO, Y. C., ZHANG, J. H., CHEN, G. M., XIE, Z. H. Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 79, p. 193-203, 2014.

GUPTA T., SHARMA R.K., CHAUDHARY S. Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. **International Journal of Impact Engineering**, Kidlington, p. 76- 87, 2015.

MARTINS, I. R. de F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91486/martins_irf_me_ilha.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 ago. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MORSY, R. *et al.* Use of the random decrement technique for nondestructive detection of damage to beams. **Materials And Structures**, Dordrecht, v. 49, n. 11, p. 4719-4727, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 736 p.

ONUAGULUCHI O; PANESAR, D. K. **Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume**. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, p. 125-131, 2014.

QUEIROZ, R. M. **Tubos de concreto com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012. Disponível em:

<<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/110504/000792656.pdf?sequenc e=1>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

REDATAHA, M. M.; EL-DIEB, A. S.; EI-WAHAB, M. A.; ABDEL-HAMEED, M. E. Mechanical, fracture and micro structural investigations of rubber concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 20, n. 10, p.640-649, 2008.

RHEOSET. G. **Aditivo para concreto**. [S. l.]: Grace, 2014.

RODRIGUES, M. R. P.; FERREIRA, O. P.; INO, A. Produtos derivados da reciclagem de pneus inservíveis. In: CHAHUD, E. (Org.). **Reciclagem de resíduos para a construção civil**. Belo Horizonte: Fumec, 2007. p.217-229.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

TECNOSIL. **Tecnosil sílica ativa**. [S. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos-aditivos-saco-soluvel-concreto/>>. Acesso em: 13 mar. 2016.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, p. 86-92, 2015.

TRENTIN, T. F. S. **Análise estrutural de tubos de concreto armado com resíduo de borracha de pneu**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/126292/000844371.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

TRIGO, A. P. M. **Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91476/trigo_apm_me_ilha.pdf?se quence=1>. Acesso em: 14 ago. 2016.

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**, Amsterdam, v. 21, n. 1, p. 176-181, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D.C.. **Concreto auto-adensável**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 2008. 140 p.

VASCONCELOS, Y. Borracha na mureta: barreiras produzidas com pedaços de pneus reduzem impactos nos acidentes de trânsito. **Revista Fapesp**, São Paulo, v. 109, p. 80-81, 2005. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2005/03/080-081-engenharia-civil.pdf?669346>>. Acesso em: 15 jul. 2016.