



COMPORTAMENTO SOB ALTAS TEMPERATURAS DE CONCRETOS COM  
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Jéssica Beatriz da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro  
Setembro de 2017

COMPORTAMENTO SOB ALTAS TEMPERATURAS DE CONCRETOS COM  
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Jéssica Beatriz da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:



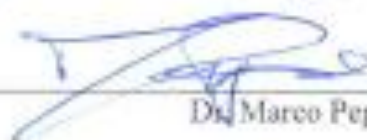
Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



Dr. Thiago de Melo Grabois, D. Sc.



Prof. Denise Carpena Corrinho Dal Molin, D. Sc.



Dr. Marco Pepe, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2017

Silva, Jéssica Beatriz da

Comportamento sob altas temperaturas de concretos com agregados reciclados de concreto/ Jéssica Beatriz da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIX, 137 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 110-117.

1. ARC 2. Altas temperaturas 3. Propriedades mecânicas I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Aos meus queridos pais,*

*Lúcia e Antônio.*

# AGRADECIMENTOS

É difícil expressar gratidão adequadamente, quando a dissertação a seguir é consequência de um trabalho intenso, no qual foi tanta ajuda que precisei e recebi tanto de pessoas que já estavam na minha vida quanto daquelas que conheci ao longo destes últimos dois anos, que inevitavelmente alguém não será lembrado, ou não será devidamente agradecido. Então aqui vai pelo menos uma tentativa de menção a estas pessoas que muito enriqueceram a minha vida e jornada científica.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por proteger, guiar e iluminar meus passos nessa caminhada e em toda a minha vida.

Aos meus pais Lúcia e Antônio e ao meu irmão Jhone, por não medirem esforços em me fazer feliz, pelo apoio e amor, por sempre acreditarem nos meus sonhos e por nunca duvidarem das minhas escolhas. Ao meu pai, por ser meu maior incentivador e exemplo, por sempre buscar o melhor para nossa família. A minha mãe, por ser minha melhor amiga, me animando com seu otimismo, consolando minhas lágrimas com suas palavras afáveis e carinhosas, por ser corajosa por mim, não me deixando desistir quando achei que isso não daria certo. Ao meu irmão, que mesmo sendo tão diferente, enche minha vida de luz. A distância só me fez amá-los e admirá-los ainda mais.

A minha família, que desde sempre, torce pelo meu sucesso e entende minha constante ausência.

Ao meu orientador e professor Romildo Dias Toledo Filho, que abriu as portas do NUMATS e, desde então, tem me ensinado e inspirado, com paciência e entusiasmo. Espero que esta dissertação seja, talvez, a melhor forma de honrar este privilégio.

Ao Marco Pepe, pela paciência e gentileza constantes, por participar e me ajudar desde o começo desse trabalho, dividindo seu precioso conhecimento.

A todos os técnicos e funcionários do NUMATS e LabEST, que contribuíram imensamente para o desenvolvimento deste trabalho: Anderson, Márcio, Wesley, Hidekel, Rosângela, Bruna, Ítalo, Adriana, Luzidelle, Carmen, Jorge, Jô, Dalva e em especial a Claudinha, pelo carinho, Alex, Marcelo, Adaílton e Alessandro, pela grande e indispensável ajuda, fazendo seu trabalho sempre com muita competência e bom humor.

Agradeço também ao Josimar e Antonieta, do CETEM, que foram muito gentis me ajudando na preparação de amostras e nas análises de MEV.

Aos meus amigos alagoanos, pelo apoio hoje e sempre, por me deixarem sempre ansiosa e feliz pela volta a terras alagoanas. Em especial a minha amiga Myckelle, que desde a infância tem sido minha companheira, dividindo alegrias, sonhos e angústias; pelas inúmeras horas ao telefone ouvindo minhas bobagens, me consolando, animando e sempre levantando minha autoestima, pela amizade verdadeira, que me faz sentir tão especial quanto você é pra mim. Você é um exemplo e inspiração pra mim. A Danúbia, que me incentivou a fazer o mestrado na Coppe, que praticamente pegou na minha mão e guiou meus passos iniciais nessa jornada incrível que foi morar no Rio de Janeiro.

As melhores amigas que poderia ter conhecido no Rio: Gabriela Fernandes, por ser mais que uma companheira de mestrado, por torna minha vida mais divertida, pelas inúmeras aventuras que vivemos juntas, pelo apoio e companhia em todos os momentos. A Maíse, por ser mais do que alguém com quem dividi apartamento, pelas conversas e risadas depois de um dia cansativo, pela ajuda em todos os momentos, principalmente nos problemas mais recentes. A vida se torna muito mais fácil quando é compartilhada com pessoas tão incríveis como vocês.

Aos companheiros do NUMATS, pela ajuda e descontração do dia-dia e pela diversão sempre garantida nas sextas do concreto. Em muito especial aos amigos: Yassin, que me ajudou em todas as etapas desse trabalho, me ensinando e incentivando a fazer um trabalho melhor, por ser simplesmente um amigo maravilhoso, sempre preocupado e interessado no meu bem estar, sua companhia deixou meus dias ainda mais alegres. Caroline e Mayara que acompanharam e me ajudaram desde o começo, pela preocupação sincera. Tamara, Vanessa, Daniele e Carolina pela companhia em todos os momentos, pela amizade, por compartilhar conhecimento e pela ajuda no trabalho e na vida. As Gabriela's, Rayane e Pedro, que chegaram recentemente, mas que deixaram meu dia-dia mais descontraído e feliz. Vocês são amigos que admiro e desejo ter para toda a vida.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## COMPORTAMENTO SOB ALTAS TEMPERATURAS DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Jéssica Beatriz da Silva

Setembro/2017

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

O agregado reciclado de concreto (ARC) apresenta características distintas do agregado natural, pois é formado por parte de agregado natural com argamassa aderida no seu entorno. Essa diferença afeta suas propriedades e a do concreto com eles produzido. Para o uso racional dos ARC na produção do concreto é necessário se conhecer a relação entre o teor de argamassa aderida e as propriedades reológicas, físicas, mecânicas, e de durabilidade dos concretos. Um comportamento de particular interesse, e que ainda não está completamente estudado na literatura técnica, diz respeito ao comportamento desses concretos sob altas temperaturas. O presente trabalho visa, portanto, avaliar a influência dos ARC no comportamento físico, mecânico e microestrutural de concretos de distintas classes de resistência (C25 e C65) após exposição às temperaturas de 150, 400 e 650 °C. Os concretos foram dosados utilizando-se o método de empacotamento compressível e os teores de substituição, em volume, de agregado graúdo natural por ARC foram de 50 e 100% para permitir avaliar a influência do teor de argamassa aderida nas propriedades residuais dos concretos. Os resultados obtidos mostraram que os concretos contendo ARC apresentaram praticamente o mesmo comportamento mecânico dos concretos convencionais. Até uma temperatura de 150 °C as propriedades dos concretos foram aumentadas e uma maior degradação iniciou-se apenas a partir dos 400°C. Análises microestruturais mostraram o aumento gradual de fissuras nas interfaces agregado-argamassa antiga, agregado-argamassa nova e argamassa nova-argamassa antiga a partir dessa temperatura.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## BEHAVIOR UNDER HIGH TEMPERATURE OF CONCRETE WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES

Jéssica Beatriz da Silva

September/2017

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

Recycled aggregate of concrete (RAC) presents different characteristics from the natural aggregates because it is formed by part of natural aggregate with attached mortar around. This difference directly affects its properties and consequently the concretes produced with. Thus, for the rational use of the RAC in the concrete production, it is necessary to know the relation between the amount of the attached mortar and the rheological, physical, mechanical and durability properties of the concrete. It is interesting to mention that there are not fully studies about the behavior of these concretes under high temperatures. The present work aims to evaluate the influence of recycled aggregates on the physical, mechanical and microstructural behavior of different classes of concrete (C25 e C65), after exposure to temperatures of 150, 400 and 650°C. The concretes were designed using the compressive packing method and the substitution contents, by volume, of coarse natural aggregates by RAC were about 50 and 100%, in order to access the influence of the stuck mortar on the residual properties of the concrete. The results showed that the concretes containing RAC presented practically the same mechanical behavior with the conventional concrete. Until 150°C, the properties of the concretes rose, and a higher degradation started only at 400°C. Microstrutural analyses showed a gradual increase of cracks in the interfaces aggregate-old mortar, aggregate-new mortar and new mortar – old mortar, from this temperature.



# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE TABELAS .....	xviii
LISTA DE ABREVIACÇÕES E SÍMBOLOS .....	xix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	6
2.1.1 Definição, geração e classificação.....	6
2.1.2 Composição .....	7
2.1.3 Características dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição .....	8
2.2 CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS.....	11
2.3 CONCRETOS CONVENCIONAIS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS.....	16
2.4 CONCRETOS CONTENDO ARC EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS .....	21
3.1 PLANO EXPERIMENTAL .....	21
3.1.1 Materiais .....	22
3.1.2 Tipo de concreto .....	23
3.1.3 Misturas .....	23
3.1.4 Caracterização dos materiais .....	23
3.1.5 Dosagem científica .....	24

3.2	MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS .....	25
3.2.1	Classificação granulométrica.....	25
3.2.2	Composição química .....	26
3.2.3	Perda ao fogo .....	26
3.2.4	Massa específica e absorção de água.....	27
3.2.5	Compacidade .....	30
3.2.6	Ensaio de compatibilidade e ponto de saturação .....	33
3.2.7	Calibração dos parâmetros “p” e “q” .....	34
3.2.8	Abatimento de tronco de cone .....	36
3.2.9	Resistência à compressão .....	37
3.2.10	Resistência à tração por compressão diametral .....	38
3.2.11	Absorção total, índice de vazios e massa específica do concreto.....	39
3.2.12	Argamassa aderida.....	41
3.2.13	Morfologia dos agregados graúdos por AIMS .....	47
3.2.14	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura .....	51
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS: RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	52
3.3.1	Agregados.....	52
3.3.2	Cimento .....	61
3.3.3	Aditivo químico – Superplastificante.....	62
3.3.4	Água .....	64
4.	DOSAGEM, PRODUÇÃO, MOLDAGEM E AQUECIMENTO DOS CONCRETOS .....	65
4.1	DOSAGEM.....	65
4.1.1	Traços adotados .....	66
4.2	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	67
4.2.1	Processo de mistura, moldagem e cura dos concretos.....	67
4.2.2	Metodologia de avaliação estatística dos resultados experimentais.....	70

4.3	AQUECIMENTO DO CONCRETO .....	71
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	73
5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO .....	73
5.1.1	Comportamento sob ensaio de compressão axial .....	73
5.1.2	Comportamento sob carga de tração por compressão diametral .....	84
5.1.3	Propriedades físicas do concreto .....	88
5.1.4	Correlação entre a argamassa aderida e as propriedades físicas e mecânicas do concreto .....	92
5.1.5	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	96
6.	CONCLUSÕES.....	107
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	110
	ANEXO A – COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL .....	118
	ANEXO B – IMAGENS DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS ENSAIO DE COMPRESSÃO .....	126
	ANEXO C – ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	129

# LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1-</b> Duas fases principais do agregado reciclado de concreto: agregado natural e argamassa antiga aderida. ....	8
<b>Figura 2.2</b> - Padrões de fissuras observados após o aquecimento: (a) concreto $f_c= 75$ MPa aquecido a $600^{\circ}\text{C}$ (HAGER, 2013), (b) microfissura entre agregado e a pasta antiga após exposição à $450^{\circ}\text{C}$ (LANEYRIE et al., 2016).....	19
<b>Figura 2.3</b> - Fragmentação ocorrida nas colunas do estudo de Dong et al. (2014) após o aquecimento: (a) concreto convencional C30 (b) concreto reciclado C30.....	19
<b>Figura 3.1</b> - Etapas do plano experimental. ....	22
<b>Figura 3.2</b> - Ensaio de perda ao fogo: (a) amostras no forno para a queima ; (b) balança utilizada para evitar o ganho de umidade ; (c) amostras após a queima ; (d) amostra em dessecador para evitar o ganho de umidade . ....	26
<b>Figura 3.3</b> - Amostra dos agregados dentro do forno para o aquecimento.....	30
<b>Figura 3.4</b> - Etapas do ensaio de demanda d'água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar. ....	31
<b>Figura 3.5</b> - Ensaio de compactação mecânica: (a) preenchimento do cilindro com agregado; (b) posição do pistão antes da vibração; (c) posição do pistão após a vibração. ....	33
<b>Figura 3.6</b> - Ensaio de ponto de saturação: (a) equipamento utilizado para a mistura; (b) funil de Marsh; (c) passagem da pasta através do funil; (d) instante em que 1000 ml de pasta passam pelo funil.....	34
<b>Figura 3.7</b> - Ensaio de resistência à compressão em corpo-de-prova cilíndrico 7,5x15 cm. ....	38
<b>Figura 3.8</b> - Ensaio de absorção total: (a) disposição dos CPs; (b) imersão dos CPs. ...	40
<b>Figura 3.9</b> - Equipamento utilizado para o choque térmico: (a) Visão geral; (b) e (c) mesa “elevador”.....	42
<b>Figura 3.10</b> – Etapas do processo de tratamento térmico: (a) amostra de ARC; (b) amostra submersa em água para saturação da argamassa; (c) disposição dos agregados saturados na mesa para o primeiro choque térmico, quando a mesa é levantada com todo o ARC para exposição a $600^{\circ}\text{C}$ por 2 h; (d) segundo choque térmico, quando os agregados saem diretamente do forno para a água fria; (e) agregado após o choque térmico; (f) agregado após a remoção da argamassa aderida. ....	43

<b>Figura 3.11</b> - (a) Agregado reciclado antes do tratamento; (b) agregado após a retirada da argamassa aderida. ....	44
<b>Figura 3.12</b> – Processo de fabricação do concreto colorido: (a) mistura cimento e corante; (b) acréscimo dos ARCs; (c) mistura final; (d) moldagem dos corpos-de-prova. ....	45
<b>Figura 3.13</b> - Corpos-de-prova cortados.....	45
<b>Figura 3.14</b> - Etapas para o cálculo das áreas: (a) imagem original; (b) matriz de cimento realçada em vermelho; (c) seleção do agregado natural; (d) seleção do agregado reciclado.....	46
<b>Figura 3.15</b> - Equipamento de análise: (a) exterior do equipamento; (b) câmeras, iluminação e bandeja na parte interna. ....	48
<b>Figura 3.16</b> – Imagens fornecidas pelo programa: (a) análise da fração miúda (angularidade); (b) análise da fração graúda (textura).....	48
<b>Figura 3.17</b> - Disposição da amostra. ....	49
<b>Figura 3.18</b> - Escalas de forma (2D) para agregados miúdos.....	49
<b>Figura 3.19</b> - Escalas de angularidade para agregados miúdos e graúdos.....	50
<b>Figura 3.20</b> - Escalas de textura para o agregado graúdo.....	51
<b>Figura 3.21</b> – Amostras dos corpos-de-prova fraturados embutidos em resina. ....	52
<b>Figura 3.22</b> - Agregados naturais e reciclados: (a) areia natural; (b) brita 0 natural; (c) brita ARC.....	53
<b>Figura 3.23</b> - Curvas granulométricas dos agregados. ....	54
<b>Figura 3.24</b> – Comparação das curvas de perda de massa entre a brita ARC e a brita natural. ....	55
<b>Figura 3.25</b> – Curvas de angularidades obtidas através do AIMS para as granulometrias analisadas.....	58
<b>Figura 3.26</b> – Imagens dos agregados para a determinação do índice de angularidade.....	59
<b>Figura 3.27</b> – Curvas de índice de texturas. ....	59
<b>Figura 3.28</b> – Imagens da análise de textura obtidas por AIMS, com aumento de 22 vezes. ....	60
<b>Figura 3.29</b> – Curvas do índice de forma 2D. ....	60
<b>Figura 3.30</b> - Amostra do cimento CPV - ARI.....	61
<b>Figura 3.31</b> - Curva granulométrica do cimento. ....	61
<b>Figura 3.32</b> - Superplastificante Glenium 51. ....	63

<b>Figura 3.33</b> - Ponto de saturação do superplasticante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI .....	64
<b>Figura 4.1</b> - Misturador utilizado na produção dos concretos.....	67
<b>Figura 4.2</b> – Etapas do processo de produção dos concretos: (a) e (b) lançamento dos agregados no misturador; (c) resultado da mistura dos agregado após um minuto; (d) adição da metade da água; (e) aspecto da mistura dos agregado com a água; (f) adição do cimento na mistura; (g) e (h) adição do superplastificante e do restante da água; (i) mistura após 8 minutos.....	69
<b>Figura 4.3</b> - Moldagem dos concretos: (a) pintura com óleo; (b) moldes; (c) lançamento do concreto no molde; (d) primeira camada após adensamento.....	69
<b>Figura 4.4</b> - Fornos utilizados para o aquecimento dos corpos-de-prova: (a) Elektro Therm, (b) corpos de prova no forno para o aquecimento.....	71
<b>Figura 4.5</b> - Curva tempo-temperatura do forno.....	72
<b>Figura 5.1</b> - Curvas tensão-deformação para o concreto C25-00 submetido a diferentes temperaturas.....	73
<b>Figura 5.2</b> - Curvas tensão-deformação para o concreto C25-50 submetido a diferentes temperaturas.....	74
<b>Figura 5.3</b> - Curvas tensão-deformação para o concreto C25-100 submetido a diferentes temperaturas.....	74
<b>Figura 5.4</b> – Comportamento da resistência à compressão dos concretos em função da temperatura: (a) variação da resistência à compressão com a temperatura: (b) relação entre as resistência à compressão residuais e iniciais.....	76
<b>Figura 5.5</b> – Comparação entre os resultados do presente estudo e os resultados obtidos por Liu <i>et al.</i> (2016).....	77
<b>Figura 5.6</b> - Comportamento do módulo de elasticidade dos concretos em função da temperatura: (a) variação do módulo de elasticidade com a temperatura: (b) relação entre módulos de elasticidade residuais e iniciais.....	78
<b>Figura 5.7</b> - Curvas tensão-deformação para o concreto C65-00 submetido a diferentes temperaturas.....	79
<b>Figura 5.8</b> - Curvas tensão-deformação para o concreto C65-50 submetido a diferentes temperaturas.....	80
<b>Figura 5.9</b> - Curvas tensão-deformação para o concreto C65-100 submetido a diferentes temperaturas.....	80

<b>Figura 5.10</b> – Comportamento da resistência à compressão dos concretos em função da temperatura: (a) variação da resistência à compressão com a temperatura: (b) relação entre as resistência à compressão residuais e iniciais.....	82
<b>Figura 5.11</b> – Comparação entre os resultados do presente estudo e os resultados obtidos por: (a) Kou, Poon e Etxberria (2014); (b) Vieira, Correia e Brito (2011).....	83
<b>Figura 5.12</b> - Comportamento do módulo de elasticidade dos concretos em função da temperatura: (a) variação do módulo de elasticidade com a temperatura: (b) relação entre módulos de elasticidade residuais e iniciais. ....	84
<b>Figura 5.13</b> - (a) Variação da tração por compressão diametral com a temperatura; (b) relação entre as trações por compressão diametral residuais e iniciais. ....	85
<b>Figura 5.14</b> - (a) Variação da tração por compressão diametral com a temperatura; (b) relação entre as trações por compressão diametral residuais e iniciais. ....	86
<b>Figura 5.15</b> – Relação entre a normalização da resistência à tração e resistência à compressão. ....	87
<b>Figura 5.16</b> – Taxas de perda de massa das misturas nas respectivas temperaturas. ....	91
<b>Figura 5.17</b> – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e a taxa de absorção de água apresentada pelo mesmo: (a) 25MPa; (b) 65 MPa. ....	93
<b>Figura 5.18</b> – Correlação entre o volume de agregado graúdo natural e o volume de argamassa total na mistura e as propriedades físicas do concreto. ....	94
<b>Figura 5.19</b> – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e a resistência à compressão apresentada pelo mesmo: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.....	95
<b>Figura 5.20</b> – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e o módulo de elasticidade apresentada pelo mesmo: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.....	95
<b>Figura 5.21</b> – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e a resistência à tração por compressão diametral apresentada pelos concretos: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.....	96
<b>Figura 5.22</b> – Interfaces apresentadas pelo concreto contendo ARC (imagem da superfície de fratura).....	97
<b>Figura 5.23</b> – Concreto convencional das misturas C25 na temperatura de 22 °C (imagem da superfície de fratura).....	97
<b>Figura 5.24</b> – Concreto reciclado das misturas C25 na temperatura de 22 °C (imagem da superfície de fratura).....	98

<b>Figura 5.25</b> – (a) Interface entre as diferentes argamassa no concreto reciclado (imagens da superfície de fratura); (b) detalhe da fragmentação entre argamassa aderida e agregado graúdo natural.....	98
<b>Figura 5.26</b> – Comparação da microestrutura das misturas C25 na temperatura de 150 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado. ....	99
<b>Figura 5.27</b> - Concreto convencional das misturas C25 na temperatura de 400 °C (imagem da superfície de fratura).....	99
<b>Figura 5.28</b> - Concreto reciclado das misturas C25 na temperatura de 400 °C (imagem da superfície de fratura).....	100
<b>Figura 5.29</b> – Fissuras apresentadas pelo concreto reciclado na interface entre argamassa antiga e nova, após ser submetido a 400 °C (imagens da superfície de fratura). ....	100
<b>Figura 5.30</b> - Concreto convencional das misturas C25 na temperatura de 650 °C (imagem da superfície de fratura).....	101
<b>Figura 5.31</b> - Concreto reciclado das misturas C25 na temperatura de 650 °C (imagem da superfície de fratura).....	101
<b>Figura 5.32</b> – Comparação da microestrutura das misturas C65 na temperatura de 22 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado. ....	102
<b>Figura 5.33</b> - Concreto convencional das misturas C65 na temperatura de 150 °C (imagem da superfície de fratura).....	102
<b>Figura 5.34</b> - Concreto reciclado das misturas C65 na temperatura de 150 °C (imagem da superfície de fratura).....	103
<b>Figura 5.35</b> – Exemplos de fissuras entre o agregado natural e a argamassa aderida (imagens da superfície de fratura). ....	103
<b>Figura 5.36</b> – Comparação da microestrutura das misturas C65 na temperatura de 400 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado; (c) fissura entre agregado reciclado e argamassa nova; (d) fissura entre argamassa e agregado.....	104
<b>Figura 5.37</b> – Comparação da microestrutura das misturas C65 na temperatura de 650 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado. ....	105



**Figura 5.38** – Fissuras apresentadas pelo concreto reciclado de classe C65, após ser submetido a 650 °C (imagens da superfície de fratura)..... 106

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> - Traços utilizados na calibração dos parâmetros "p" e "q".....	35
<b>Tabela 3.2</b> - Resistência à compressão das misturas utilizadas para a calibração dos parâmetros "p" e "q". .....	36
<b>Tabela 3.3</b> - Valores dos parâmetros "p" e "q" obtidos através do programa Betonlab Pro.....	36
<b>Tabela 3.4</b> - Propriedades físicas dos agregados utilizados na pesquisa. ....	53
<b>Tabela 3.5</b> - Propriedades granulométricas dos agregados.....	54
<b>Tabela 3.6</b> – Valores médios de perda de massa apresentados pelos agregados graúdos. ....	55
<b>Tabela 3.7</b> – Resultados encontrados para a taxa de argamassa aderida a partir do choque térmico. ....	56
<b>Tabela 3.8</b> – Dados da análise das imagens.....	57
<b>Tabela 3.9</b> - Composição química e propriedades físicas, mecânicas e granulométricas do cimento CPV - ARI. ....	62
<b>Tabela 3.10</b> - Propriedades do aditivo superplastificante ( <a href="http://www.basf.com.br">www.basf.com.br</a> ).....	63
<b>Tabela 4.1</b> - Traços utilizados na produção dos concretos. ....	67
<b>Tabela 5.1</b> - Resultados médios das propriedades dos concretos C25 sob cargas de compressão axial, após serem submetidos a diferentes temperaturas. ....	75
<b>Tabela 5.2</b> - Resultados médios das propriedades dos concretos C65 sob cargas de compressão axial, após serem submetidos a diferentes temperaturas. ....	81
<b>Tabela 5.3</b> – Valores médios da resistência à tração por compressão diametral para os concretos C25. ....	84
<b>Tabela 5.4</b> - Valores médios da resistência à tração por compressão diametral para os concretos C65. ....	86
<b>Tabela 5.5</b> – Valores médios de absorção de água dos concretos. ....	88
<b>Tabela 5.6</b> - Valores médios de índice de vazios dos concretos.....	89
<b>Tabela 5.7</b> - Valores médios de massa específica dos concretos.....	90
<b>Tabela 5.8</b> – Perda de massa apresentada pelas amostras após o aquecimento.....	91
<b>Tabela 5.9</b> – Volume de agregado graúdo natural total, de argamassa aderida, de argamassa nova e de argamassa total de cada mistura de concreto.....	92

# LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

<i>AA</i>	Argamassa aderida
<i>E</i>	Módulo de elasticidade tangente concreto
<i>f<sub>c</sub></i>	Resistência à compressão do concreto
<i>f<sub>ct,sp</sub></i>	Resistência à tração do concreto por compressão diametral
<i>a/c</i>	Fator água cimento
<i>p</i>	Parâmetro relacionado à interface pasta-agregado
<i>q</i>	Parâmetro relacionado à resistência intrínseca do agregado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
RCD	Resíduo de construção e demolição

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A preocupação com o meio ambiente é cada vez maior nos dias atuais e medidas sustentáveis, em vários setores industriais, têm surgido visando evitar o esgotamento de recursos não renováveis. O processo de conscientização da sociedade tem resultado na criação e implantação de programas de gestão da qualidade e de medidas que diminuam a produção de resíduos, ou que possibilitem o seu reaproveitamento, nas mais variadas áreas econômicas. No setor da construção civil a geração e disposição inadequada de resíduos sólidos são problemas graves e o meio científico tem buscado soluções que resultem no seu aproveitamento de forma mais sustentável.

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil de 2016, apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram coletados no Brasil, em 2016, cerca de 45,1 milhões de toneladas de RCD (Resíduos de Construção e Demolição). No entanto, a quantidade total desses resíduos é ainda maior, pois os municípios, em geral, coletam apenas os resíduos lançados ou abandonados nos logradouros públicos.

Dentre os diversos tipos de RCD, os resíduos de concreto são os que apresentam maior potencial para serem utilizados como agregados reciclados. Isso se dá porque, em geral, eles possuem menores taxas de absorção de água e conferem maior resistência aos concretos dosados com os mesmos. O potencial desses materiais gera a necessidade de se entender melhor o comportamento dos concretos produzidos com eles. Na verdade, o reaproveitamento dos agregados de concreto pode favorecer a economia circular na construção civil o que poderá resultar em benefícios econômicos para o setor. Mais pesquisas são, no entanto, necessárias para que se possa utilizar racionalmente os agregados reciclados tanto em concretos não estruturais quanto estruturais. É preciso, por exemplo, que se conheça bem a composição e as propriedades do próprio agregado e como afeta a dosagem e as propriedades de curta e longa duração dos concretos resultantes.

O agregado reciclado de concreto é composto, principalmente, de agregado natural com argamassa aderida a sua superfície. A presença dessa argamassa antiga, derivada do concreto de origem, acrescenta uma segunda interface nos concretos de agregado reciclado de concreto já que se tem um terceiro elemento nas misturas: agregado natural, argamassa antiga e argamassa nova. As características apresentadas pelos agregados reciclados tais como teor de argamassa aderida, absorção de água e forma e textura superficial podem ocasionar em mudanças nas características dos concretos produzidos com eles tais como maior porosidade e absorção de água, redução na trabalhabilidade e, potencialmente, redução na resistência mecânica e rigidez, se uma dosagem racional, considerando as características desses agregados, não for realizada.

Vários estudos foram realizados com o objetivo de investigar as propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados, a principal dificuldade apontada pelos pesquisadores está relacionada com a elevada absorção de água dos agregados que exige medidas de controle e compensação de água no momento da mistura (ÂNGULO, 2005; CABRAL, 2007; REIS, 2009; AMARIO, 2015; BRAVO *et al.*, 2015; PEPE, 2015; RANGEL, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; AMARIO *et al.*, 2017).

Assim como na grande maioria das pesquisas que propõem a investigação do desempenho de concretos com agregado reciclado, os estudos sobre o comportamento físico e mecânico de concretos reciclados submetidos a altas temperaturas utilizaram traços semelhantes para as misturas, onde o agregado natural é substituído por agregado reciclado e a compensação de água é realizada por meio da pré-saturação dos agregados reciclados, com a quantidade de agregado miúdo, cimento e relação água/cimento efetiva constantes para todas as misturas (VIEIRA, CORREIA e BRITO, 2011; GUPTA *et al.*, 2012, SARHAT e SHERWOOD, 2013; CHEN *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2016).

Como essas dosagens não consideram outras particularidades dos ARCs além da absorção de água, os concretos produzidos apresentam, em geral, resistências à compressão diferentes, com até 15% de diferença entre concretos convencionais e concretos com teor de 100% de agregado reciclado de concreto, ou seja, são comparados concretos com resistências à compressão distintas.

Amario *et al.* (2017) utilizaram o Método de Empacotamento Compressível (MEC) com algumas considerações, de modo a permitir dosagens específicas para cada teor de agregado reciclado de concreto. De acordo com estudo de elevação adiabática de temperatura em conjunto com ensaios de resistência à compressão aos 7 dias e abatimento de tronco de cone, os autores observaram que ao considerar 50% da taxa de absorção total e a utilizar os agregados reciclados de concreto na condição seca, a água livre da mistura não é comprometida e os concretos produzidos apresentaram resistência a compressão semelhantes aos 28 dias. Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar o comportamento pós aquecimento de concretos de mesma resistência, essas condições propostas por Amario *et al.* (2017) serão utilizadas no presente estudo, em razão de seus satisfatórios.

São poucos os estudos que avaliaram o comportamento residual das propriedades físicas do concreto além das propriedades mecânicas (GUPTA *et al.* 2012; CHEN *et al.*, 2014; LANEYRIE *et al.*, 2016). Gupta *et al.* (2012) avaliaram as propriedades mecânicas e microestruturais de concretos reciclados de resistência normal, expostos a altas temperaturas. Os autores submeteram os concretos produzidos ao aquecimento por um período de 6 horas, observaram o comportamento da porosidade com o aumento da temperatura e utilizaram o estudo microscópico para observar a mudança de textura da superfície dos concretos. Já Chen *et al.* (2016) e Laneyrie *et al.* (2016) avaliaram a perda de massa e a porosidade dos concretos após o aquecimento.

Embora alguns trabalhos abordem a influência da argamassa aderida na granulometria, absorção, densidade e absorção de água dos agregados reciclados e com a porosidade, absorção de água e resistências mecânicas dos concretos (JUAN e GUTIÉRREZ, 2008; DUAN e POON, 2014; SEO e CHOI, 2014, PEPE, 2015, YANG e LEE, 2016), não é possível encontrar estudos que relacionem essa característica com o comportamento mecânico e físico dos concretos quando esses são submetidos a altas temperaturas.

Assim, o presente estudo visa cobrir lacunas existentes na literatura sobre o comportamento de concretos de resistência normal e de alto desempenho produzidos com agregado reciclado de concreto após exposição a altas temperaturas. Os objetivos do estudo serão apresentados a seguir.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência de agregados reciclados de concreto no comportamento físico, mecânico e microestrutural de concretos de classes de resistências distintas: C25 e C65, após exposição, por um período de 1 hora, a 150 °C, 400 °C e 650 °C. As classes de resistência foram escolhidas para se avaliar qual seria o efeito das diferentes microestruturas das misturas já que, embora ambas sejam classes de concreto estruturais, a primeira é de resistência normal e a segunda de alto desempenho.

Os objetivos específicos são:

- Determinar o teor de argamassa aderida dos agregados reciclados através do método de tratamento térmico e análise de imagens;
- Analisar o efeito do teor de argamassa aderida no comportamento pós-aquecimento de concretos com teor de 0%, 50% e 100% de agregado graúdo reciclado de concreto;
- Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de amostras fraturadas, observar mudanças na microestrutura dos concretos após o aquecimento.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é composta por seis capítulos.

**Capítulo 1:** Introdução ao tema estudado, com considerações iniciais sobre o assunto da pesquisa, motivação para a escolha do tema e os objetivos do trabalho.

**Capítulo 2:** Revisão bibliográfica sobre as principais características do agregado reciclado de concreto e propriedades do concreto reciclado. Desempenho de concretos convencionais e reciclados sob altas temperaturas.

**Capítulo 3:** É explicado, de forma resumida, o plano experimental do trabalho, apresentando as etapas e materiais a serem utilizados, assim como a metodologia empregada nos ensaios de caracterização dos materiais e os valores obtidos para a caracterização do cimento, agregados naturais e reciclados e aditivo químico, além da

metodologia de ensaios para a determinação das propriedades mecânicas, taxa de argamassa aderida e microscopia.

**Capítulo 4:** Apresenta o processo de dosagem, produção e aquecimento dos concretos para os ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral.

**Capítulo 5:** Apresentação e análise dos resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas residuais.

**Capítulo 6:** Apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

#### 2.1.1 Definição, geração e classificação

Os resíduos de construção civil podem ser definidos, segundo a Resolução nº 307 (2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a Norma Brasileira (NBR) 15114 (2004) como os materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os oriundos da preparação e da escavação de terrenos, sendo composto por restos de praticamente todos os materiais da construção civil.

A classificação dos resíduos é de grande importância, pois é a partir desse passo que será definido o gerenciamento mais apropriado do material. De acordo com a NBR 10004 (2004) – “Resíduos sólidos – Classificação”, que propõe a classificação em virtude dos riscos potenciais e à saúde pública, os resíduos de construção e demolição podem ser classificados como aqueles pertencentes à classe II B – Inertes, pois estes, quando submetidos aos testes de solubilização, não têm nenhum dos seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A Resolução 307/2002 do CONAMA adota a classificação dos resíduos da construção civil da seguinte forma:

- Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou utilizáveis como agregados, dentre eles os oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações (componentes cerâmicos, argamassa, concreto), pavimentações e do processo de fabricação e/ou demolição de pré-moldados (bloco e tubos);
- Classe B: são os resíduos que podem ser reciclados para outros propósitos, tais como os plásticos, papel/papelão, metal, vidro, madeira e outros;
- Classe C: são os resíduos que ainda não possuem tecnologias apropriadas ou aplicações que viabilizem sua reciclagem/recuperação, como o gesso;

- Classe D: são os resíduos perigosos, provenientes do processo de construção. Tintas, solventes, óleos e outros.

A NBR 15116 (2004) apresenta uma classificação para os agregados reciclados obtidos do beneficiamento de resíduos pertencentes à Classe A apresentada na Resolução CONAMA 307, sendo:

- Agregado de resíduo de concreto (ARC): agregado que apresenta em sua fração graúda, no mínimo 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas;
- Agregado de resíduo misto (ARM): agregado que apresenta em sua fração graúda menos de 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.

Neste trabalho, os agregados utilizados são do tipo ARC.

### **2.1.2 Composição**

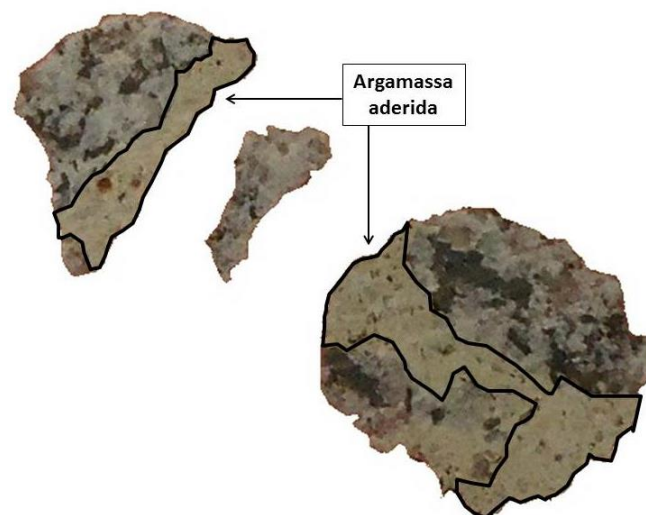
O resíduo da construção civil é um material bastante heterogêneo, uma característica que prejudica sua aplicação em longa escala (RANGEL, 2015). Sua composição varia de acordo com diferentes fatores, como: tipo de obra, fase da obra em que a amostra foi retirada, materiais disponíveis, desenvolvimento econômico e tecnológico da região da construção, entre outros. Assim, é constituído por uma ampla diversidade de matérias-primas e técnicas construtivas que alteram, de forma significativa, as características dos resíduos gerados.

O RCD é constituído por solos, rochas naturais, concreto, argamassa, materiais cerâmicos, materiais metálicos e materiais orgânicos; a viabilidade técnica da reciclagem destes resíduos é definida segundo a sua composição (RANGEL, 2015). A fração composta por material cerâmico, concreto e rochas pode ser beneficiada como agregado para a produção de concreto (MOREIRA, 2010).

## 2.1.3 Características dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição

### 2.1.3.1 Argamassa aderida

O agregado graúdo reciclado de concreto apresenta, normalmente, duas fases: agregado natural e argamassa aderida (areia, produtos hidratados e cimento não hidratado), sendo esta última a principal diferença em relação aos agregados naturais (Figura 2.1). A presença da argamassa aderida influencia nas principais propriedades dos agregados reciclados, como porosidade, absorção, densidade e textura, sendo de grande importância considerar esses efeitos no processo de dosagem, uma vez que estes provocam alterações no desempenho mecânico dos concretos produzidos com esse material (JUAN, GUTIÉRREZ, 2008; BUTLER, 2012; PEPE, 2015).



**Figura 2.1-** Duas fases principais do agregado reciclado de concreto: agregado natural e argamassa antiga aderida.

A quantidade de argamassa aderida presente nos ARCs depende de fatores como as características do concreto de origem, tamanho dos grãos e tipo de beneficiamento. Entretanto essa quantidade não é facilmente determinada, pois ainda não há uma metodologia padrão para estimar esse valor. Contudo, é possível encontrar na literatura alguns métodos para determinar a quantidade de argamassa nos agregados reciclados de concreto:

- Tratamento térmico: Este método fundamenta-se no princípio de que o cimento começa a se transformar em cal viva próxima a 400 °C, deste modo, um forno mufla é utilizado para aquecer os agregados, em seguida, para induzir maiores tensões térmicas é promovido um choque térmico através do contato imediato dos agregados aquecidos com água fria, tornando mais fácil remover a argamassa aderida (PEPE *et al.*, 2014; Butler, 2012). Alguns autores utilizaram esse processo para suas estimativas de argamassa presente nos ARCs, Butler (2012) através de método semelhante obteve valores próximos a 46,7% (agregados de concreto não-estrutural) e 37,6% (agregado de concreto nunca utilizado em serviço), com dimensão entre 4,75-9,5 mm. Juan e Gutiérrez (2008) obtiveram taxas entre 33% e 55% para agregados reciclados de concreto com dimensão entre 4 e 8 mm, enquanto varia de 23% a 44% para os grãos de dimensão entre 8 e 16 mm. Pepe *et al.* (2014) aplicaram esse método e encontraram taxas de argamassa aderida em torno de 30% para agregados reciclados de concreto e de aproximadamente 15% para os mesmos agregados, após esses serem submetidos a um processo de limpeza autógena, no qual foram colocados em um moinho rotativo para colidir uns contras os outro, de forma a promover a remoção da argamassa aderida e em seguida foram lavados e secos.

- Ciclos de congelamento-descongelamento: Este procedimento consiste em submeter o agregado, previamente imerso em soluções químicas, a ciclos de congelamento-descongelamento. Abbas *et al.* (2007) compararam várias soluções químicas e chegaram a conclusão que o sulfato de sódio é a mais eficaz na degradação da argamassa. Através deste processo, Abbas *et al.* (2008), em procedimento semelhante, obtiveram valores entre 26% e 43% para partículas com tamanho entre 4,75 e 9,5 mm. Para partículas com dimensão entre 4,75-9,5mm, Butler (2012) obteve taxas de 40,1% e 35,6% para agregados oriundos de concreto não-estrutural e que não foi exposto a solicitações, respectivamente.

- Análise de imagens: A determinação da argamassa aderida pode ser feita através da produção de um novo concreto com agregado reciclado e cimento colorido, tornando possível observar as diferentes fases do concreto e determinar o volume de cada uma delas por meio da análise de imagens que podem ser combinadas com outras técnicas como a tomografia computadorizada (CT). Através dessas técnicas Pepe (2015) encontrou taxas de 24 - 55,9% para partículas sem processo de limpeza e com diâmetros entre 15,7 – 19,7 mm. Abbas *et al.* (2009) utilizaram a análise de imagens em seções de

concreto polido, no qual utilizaram fotografias digitais e com o auxílio de um software encontraram taxas entre 30% e 43% para grãos com tamanhos na faixa de 4,75 – 9,5 mm.

- Dissolução em ácido: Esse é um dos procedimentos mais utilizados na literatura para separar a argamassa do agregado natural. Basicamente, o processo é dado pela imersão do agregado em ácido, onde ao final do processo apenas o agregado original permanece íntegro. Butler (2012) utilizou ácido nítrico e para agregados reciclados de concreto encontrou um percentual de 20,4% (concreto não-estrutural) e 36,1% (concreto que nunca foi utilizado), Movassaghi (2006) obteve taxa em torno de 38%, o autor também utilizou ácido nítrico.

### 2.1.3.2 *Propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto*

A presença da argamassa aderida nos agregados reciclados faz com que os mesmos apresentem uma massa específica menor do que a dos agregados convencionais. Amario (2015) ressalta que é necessário conhecer os valores dessa propriedade antes da dosagem dos concretos, pois a diferença de valores entre agregados convencionais e reciclados, exige ajustes na quantidade de material.

Seo e Choi (2014) aponta que em uma quantidade adequada, a argamassa antiga favorece a angularidade, melhorando a ligação entre matriz e agregados. Moreira (2010) menciona que a argamassa aderida confere textura mais rugosa e porosa ao agregado já que a argamassa é mais porosa e rugosa que o agregado natural. Segundo os autores, essas características podem resultar em uma boa aderência entre os agregados e a pasta de cimento.

A presença da argamassa aderida torna o ARC mais poroso, com uma porcentagem maior de poros capilares, micro-fissuras e, conseqüentemente, uma estrutura mais aberta, facilitando o acesso à água (GUEDES *et al.*, 2013). A porosidade das britas de ARCs depende principalmente de duas variáveis: da composição da mistura original do concreto e do procedimento de produção dos agregados reciclados (Pepe *et al.*, 2014).

A absorção de água se torna mais elevada conforme a porosidade aumenta e segundo Butler (2012), quanto maior a quantidade de argamassa aderida maiores são as taxas de absorção de água dos ARCs. É consenso na literatura que esta é a propriedade que apresenta maior diferença entre agregados reciclados e naturais, sendo fundamental o

seu estudo, sobretudo, quando o propósito é utilizá-los na produção de concreto, uma vez que a taxa influencia na relação água/cimento e consequentemente, na trabalhabilidade, durabilidade, resistência à compressão e à tração, entre outras propriedades do material (RICHARDSON; COVENTRY; BACON, 2010). Em razão da variação da origem dos agregados e métodos de ensaios adotados, são encontrados diversos valores para absorção de água dos agregados de RCD na literatura. Autores como Yang *et al.* (2016), Amario (2015), Rangel (2015), Zhu *et al.* (2015) e Chen *et al.* (2014) obtiveram em suas pesquisas, taxas de absorção de água para seus agregados graúdos reciclados de concreto em torno de 4,54%, 7,31%, 8%, 4,67% e 3,08%, respectivamente.

## **2.2 CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS**

As diferenças apresentadas entre as propriedades dos agregados reciclados e os agregados naturais influenciam diretamente no comportamento do concreto produzido com eles. Em geral, os concretos reciclados apresentam propriedades distintas dos concretos convencionais, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Segundo Reis (2009), a discrepância entre as propriedades desses concretos dependem de variáveis como o teor de agregado natural substituído, das características do agregado reciclado usado e da quantidade de contaminantes e finos presentes em sua composição.

Nas propriedades do concreto fresco, percebe-se que, em geral, o material reciclado produz misturas menos trabalháveis, decorrente da sua forma mais irregular, textura rugosa e, principalmente, altas taxas de absorção (REIS, 2009). Por esses motivos, para manter a trabalhabilidade apresentada por concretos convencionais, a demanda de água na mistura dos reciclados é maior, o que ocasiona em perda de resistência para traços similares ou aumento do consumo de cimento e utilização de aditivos superplastificantes, para manter a resistência.

Pepe *et al.* (2014) comentaram que como o tempo utilizado no ensaio de absorção (24 horas) é muito maior que o tempo de mistura do concreto, é possível que parte da água não seja absorvida pelo agregado, modificando a relação  $a/c$ , o que resulta em valores de abatimento de tronco diferentes e diminuição da resistência à compressão. Essa hipótese é reforçada por Leite (2001), que em seu estudo, com diferentes porcentagens

de substituição, observou que o abatimento reduziu com o aumento da quantidade de agregado graúdo reciclado, enquanto a substituição da fração miúda não apresentou comprometimento relevante nos valores de abatimento.

A massa específica dos concretos reciclados é menor que a do tradicional, em consequência da massa específica dos agregados de ARC ser menor. Assim como acontece com a trabalhabilidade, esta propriedade apresenta variação em função do teor de substituição dos agregados, quanto maior for o volume de agregado reciclado, menor a massa específica apresentada pelo concreto. A porosidade do concreto comporta-se de forma semelhante, a maior quantidade de argamassa aderida ao ARC faz com que a porosidade do concreto com agregado reciclado de concreto seja maior (OMARY; GHORBEL; WARDEH, 2016).

Em relação à resistência à compressão, não há unanimidade nos resultados dos estudos já feitos. Assim como ocorre em outras propriedades, fatores como a relação  $a/c$ , porosidade e absorção de água dos agregados e a dosagem podem interferir diretamente no comportamento mecânico do concreto.

Na pesquisa de Rangel (2015) foram realizados estudos preliminares de dosagens, a autora adotou dosagens individuais para cada teor de brita ARC, para assim, atender as propriedades desejadas para o concreto. Desta forma, foram produzidos concretos reciclados com resistência à compressão de até 65 MPa, concluindo que é possível produzir concretos de resistência normal e de alta resistência com diferentes teores de agregado reciclado, sem perdas nos quesitos de comportamento reológico, mecânico e estrutural. No Canadá, Lotfy e Al-Fayez (2015) produziram concretos com agregado graúdo de concreto com resistências à compressão similares a concretos convencionais e defendem que o teor de utilização de agregado reciclado pouco fez diferença para a resistência à compressão.

Os resultados obtidos por Vieira, Correia e Brito (2011) também mostraram uma diminuição na resistência à compressão média com o aumento do teor de agregado reciclado na mistura, com diferença em torno de 13% entre o concreto com 100% de agregado reciclado em relação ao concreto de referência.

Em relação ao módulo de elasticidade, estudos apontam que a substituição dos agregados provoca uma redução, em geral, maior que a redução da sua resistência à

compressão (CASUCCIO *et al.*, 2008; REIS, 2009). Os concretos produzidos nas pesquisas de Amario (2015) e Rangel (2015) apresentaram módulos de elasticidade ligeiramente menores que os concretos tradicionais, no entanto não houve grande diferença entre os concretos com diferentes teores de substituição. Os resultados obtidos no trabalho de Pepe *et al.* (2014) mostraram que a adição de ARCs não afetou significativamente o módulo de elasticidade, os valores obtidos para os concretos de referência e reciclado foram semelhantes.

A resistência à tração, embora considerada uma propriedade mecânica secundária, não deve ser desprezada, principalmente quando se estuda a utilização de novos materiais para o concreto. Assim como as propriedades do concreto no estado endurecido já citadas, ainda não há um consenso nos resultados obtidos pelos autores em relação à resistência à tração.

Lotfy e Al-Fayez (2015) ressaltam que no agregado reciclado, a natureza relativamente mais fraca da pasta aderida ao agregado natural e a maior quantidade de partículas finas contribuem para a redução da resistência à tração. Entretanto Amario (2015) produziu concretos reciclados de classe C25, C45 e C65 com diferentes teores de agregado reciclado de concreto e, de acordo com os resultados obtidos pela autora, a presença de agregado reciclado não influenciou na resistência à tração dos concretos. Rangel (2015) observou tendências similares, a autora avaliou concretos de resistência normal e alto desempenho com teor de 0, 25 e 50% de agregado reciclado de concreto e também observou valores de resistência à tração similares entre as misturas de mesma classe de resistência. Tanto Amario (2015) quanto Rangel (2015) utilizaram o modelo de empacotamento compressível, com considerações diferenciadas para o uso de agregado reciclado.

A durabilidade dos concretos também é afetada, pois como o concreto reciclado é mais poroso, sua permeabilidade é afetada, e por consequência, sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão, entre outros processos de deterioração (AMARIO, 2015). Em sua pesquisa, Brito *et al.* (2015) utilizaram agregado reciclado de construção e demolição de usinas de reciclagem diferentes, e concluíram que a durabilidade do concreto é prejudicada pelo uso desses materiais, principalmente quando estes são usados na fração fina. Além disso, os autores ressaltam que por terem origens distintas há uma grande variedade de resultados, o que provoca diferenças



significativas nas propriedades dos agregados e, conseqüentemente, nas propriedades do concreto.

Amario (2015) estudou a absorção de água por capilaridade em concretos reciclados de classe de resistência distinta (C25, C45 e C65). A autora observou que após 72 e 672 horas de ensaio os concretos de classe C25 apresentaram taxa de absorção por capilaridade diferente, sendo que o concreto com maior teor de agregado reciclado apresentou a menor absorção por capilaridade. Já para as classes C45 e C65 os resultados mostraram que o aumento do teor de utilização de agregado reciclado não afetou a absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos, pois segundo a análise estatística, realizada pela autora, os concretos de mesma classe não apresentaram diferença significativa entre si, tanto para 72 horas quanto para 672 horas de ensaio.

Para tornar possível a produção de concretos reciclados com propriedades específicas e comparáveis a concretos convencionais com propriedades semelhantes, deve-se utilizar métodos de dosagem que considerem as diferenças apresentadas pelos agregados reciclados em relação ao agregado natural.

Ângulo (2005) e Cabral (2007) realizaram a dosagem de concretos reciclados através do método do IPT. Neste método é montado um esquema de dosagem, a partir de no mínimo três pontos, que correlaciona resistência à compressão, relação água/cimento, consumo de cimento e traço unitário em massa. O estudo consiste na determinação do teor ideal de argamassa na mistura do concreto (mínimo possível), através de variações no teor da argamassa da mistura para um traço intermediário. Em seguida são produzidos mais dois traços auxiliares, um mais pobre e outro mais rico, para possibilitar a montagem do diagrama de dosagem a partir da resistência à compressão apresentada por esses traços. Os autores fizeram a compensação de parte da água do agregado reciclado através da imersão dos agregados durante 10 minutos, antes da mistura dos materiais na betoneira. Para os autores, a pré-umidificação do agregado reciclado reduz a perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados.

Lima *et al.* (2013) adicionaram uma quantidade extra de água, determinada de acordo com a taxa de absorção de água apresentada pelos agregados reciclados utilizados, de forma a manter a quantidade de água livre para a mistura. Para tal considerou-se que os agregados estavam na condição seca. Os autores observaram redução expressiva na

trabalhabilidade e perda de resistência à compressão e à tração conforme se aumentou o teor de substituição de agregados naturais por reciclados.

Pepe (2015) propôs um novo método de dosagem para concretos reciclados. O autor utilizou como base resultados experimentais obtidos para os agregados reciclados, através dos quais foram propostas fórmulas analíticas para a determinação de propriedades físicas, relacionando o teor de argamassa aderida aos grãos com propriedades como porosidade, capacidade de absorção e massa específica das partículas. Através da correlação com o grau de hidratação do cimento é possível estimar a resistência à compressão dos concretos. Assim, fornecendo-se as propriedades dos materiais constituintes, o modelo pode ser calibrado e com a definição da resistência à compressão esperada é possível chegar à composição do concreto.

Reis (2009) utilizou o modelo do empacotamento compressível (MEC) com o programa *Betonlab Pro2* para a dosagem do concreto de referência. O mesmo traço desenvolvido para esse concreto serviu como base para os concretos reciclados, sendo realizada a substituição volumétrica dos agregados miúdos naturais pelo agregado miúdo reciclado, com adição de água equivalente a 75% da absorção total após 24 horas de imersão. Os resultados obtidos pela autora indicaram redução nas propriedades mecânicas à medida que o teor de agregado reciclado aumentou.

Em razão das diferentes propriedades dos agregados reciclados de concreto, este método não pode ser aplicado com considerações semelhantes às usadas para a dosagem de concretos convencionais. O MEC considera que durante o processo de mistura, os agregados estão na condição seca e, adota a absorção de água de 24 horas para saturação dos agregados. No entanto, como o tempo de mistura é muito inferior a esse período, o material com alta absorção de água não é capaz de absorver esse volume de água, que resulta em quantidade extra de água que passa a ser água livre e, conseqüentemente, causa o aumento na relação água/cimento da mistura que afeta algumas propriedades do concreto reciclado.

Amario (2015) e Rangel (2015) utilizaram o MEC para a dosagem de concretos com agregado graúdo reciclado de concreto. Para que fosse possível a produção de concretos com as propriedades desejadas, foi necessário informar ao programa uma taxa de absorção de água equivalente a 50% da taxa de absorção total, após 24 horas.

Mediante estudos e testes de dosagens os efeitos desfavoráveis devido às características distintas dos ARCs podem ser amenizados e concretos reciclados com propriedades compatíveis com sua aplicação possam ser produzidos. A necessidade de estudar a dosagem é ainda mais importante devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo, o desenvolvimento de concretos com propriedades específicas depende essencialmente da dosagem, os procedimentos adotados para a produção dos concretos tradicionais (com agregados naturais) não podem ser empregados quando se utiliza agregados reciclados (AMARIO, 2015; PEPE *et al.*, 2014). Portanto, é necessário encontrar valores ideais de utilização, observando a melhor combinação para cada caso em particular. Desta forma, como é importante conhecer as propriedades dos agregados, também é fundamental analisar as propriedades do concreto, pois apenas compreendendo a influência que uma exerce sobre a outra, será possível assegurar o emprego dos agregados reciclados.

## **2.3 CONCRETOS CONVENCIONAIS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Quando submetido a temperaturas elevadas, o concreto tem sua heterogeneidade aflorada por mudanças físico-químicas na pasta de cimento e nos agregados, apresentando vários fenômenos, como a expansão dos agregados, retração da pasta de cimento, fissuras e desprendimentos argamassa-agregado, o que reduz o seu comportamento mecânico (LANEYRIE *et al.*, 2016; LE; BOUSSA; MEFTAH, 2010).

Os coeficientes de dilatação térmica dos agregados e da pasta de cimento não são iguais e os gradientes de temperatura provocam movimentos térmicos diferenciais na massa de concreto e podem ocasionar microfissuras. Em geral, o coeficiente de dilatação térmica da pasta endurecida de cimento varia entre  $9 \times 10^{-6}$  e  $21 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , enquanto que para as rochas utilizadas como agregado pode variar de  $5,5 \times 10^{-6}$  a  $11,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (WENDT, 2006; VELASCO, 2002).

Com o aumento da temperatura a pasta de cimento passa por um processo de secagem e de acordo com Hager (2013) a água do material gradualmente se evapora. Segundo a

autora a água livre evapora primeiro, em seguida ocorre a remoção da água dos hidratos. Para temperaturas entre 40 e 105 °C a água capilar é removida do concreto e segundo Velasco (2002) para temperaturas superiores a 105 °C ocorre o maior desprendimento da água dos produtos de hidratação do cimento. Segundo a autora, o processo inicia-se com a desidratação do gel de tobermorita e dos hidratos de silicato de cálcio e entre 390 e 450 °C ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio.

Castellote *et al.* (2003) estudaram as mudanças microestruturais de pastas de cimento Portland através da difração de nêutrons e, segundo os autores, a etringita foi o primeiro produto a se decompor, antes dos 100 °C. Os autores chegaram à conclusão de que a taxa de aquecimento pouca influência na microestrutura da pasta de cimento e foi notado apenas o aumento da velocidade de desidratação do gel de C-S-H na faixa entre 140 – 400 °C.

A elevação da temperatura faz com que a pasta se torne mais porosa e conforme a temperatura é elevada, o tamanho médio e a superfície interna do poro também aumentam. Além da perda de material, Castellote *et al.* (2003) citam a desidratação do gel de CSH, que ocorre de forma progressiva desde o início do aquecimento e provoca redução no seu volume, como umas das causas para esse comportamento.

Em relação aos agregados, sua resistência à temperatura é alta. Normalmente os agregados de quartzo apresentam mudanças físicas, como aumento volumétrico, em torno de 575 °C, enquanto os granitos possuem temperatura de fusão entre 1210 – 1250°C (HAGER, 2013).

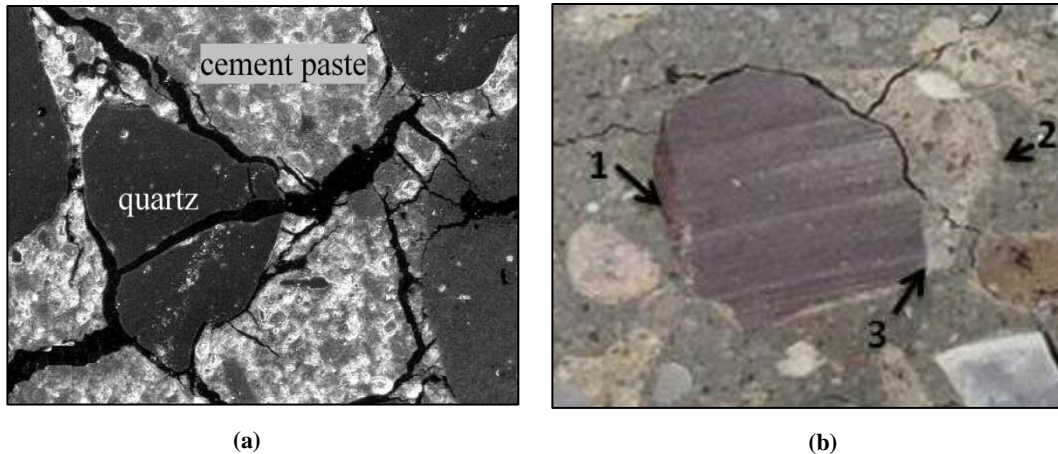
A expansão térmica dos agregados contrasta com a retração da pasta de cimento. Enquanto a pasta expande um pouco até 150 °C e, em seguida, se retrai conforme a temperatura aumenta, o volume do agregado aumenta com o aumento da temperatura em diferentes intensidades para os diferentes tipos de rocha (MENDES *et al.*, 2012). Segundo Velasco (2002), no caso de ocorrer fissuras na zona de transição durante o aquecimento, o concreto apresentará redução da sua resistência. As mudanças observadas na estrutura do concreto ocasionam perdas de resistência, módulo de elasticidade e aumentos na deformabilidade das misturas.

Em geral, estudos apontam que os concretos submetidos a temperaturas superiores a 400 °C apresentaram considerável perda de massa e declínio mais rápido da resistência

à compressão, em consequência da perda de portlandita (LANEYRIE *et al.*, 2016; HAGER, 2013). Alguns autores apontam que a acentuação da retração causada pela desidratação do hidróxido de cálcio ocorrida após esse nível de temperatura é a uma das principais causas desse comportamento (GEORGALI, TSAKIRIDIS, 2004; YÜZER *et al.*, 2004). Quando a temperatura de 500 °C é ultrapassada, a resistência à compressão do concreto cai em torno de 50% a 60%. A partir de 600 °C a desidratação torna-se mais crítica (HAGER, 2013; PENG; HUANG, 2006).

## **2.4 CONCRETOS CONTENDO ARC EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS**

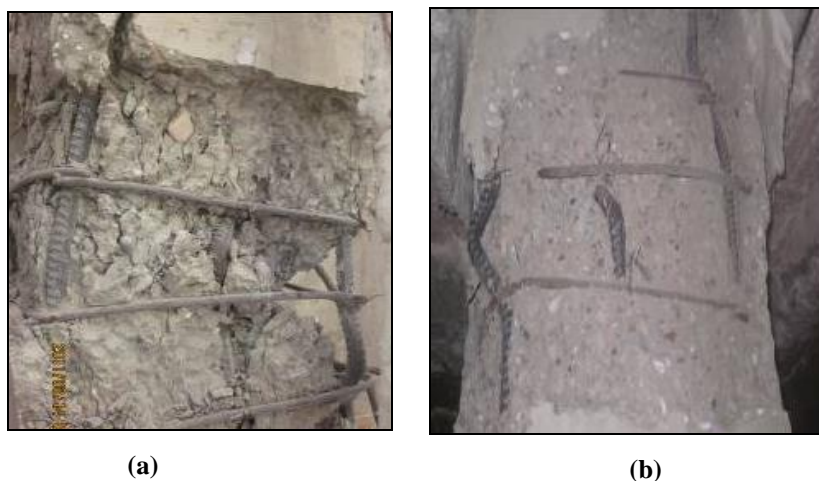
A argamassa aderida dos ARCs faz com que o teor de argamassa seja maior nos agregados reciclados e, como consequência, haja menor quantidade de rocha natural no concreto resultante. Vieira, Correia e Brito (2011) citam que até 600 °C a maioria dos agregados apresenta expansão térmica e, como consequência, tensões internas dão origem a fissuras que ocorrem principalmente nas interfaces de ligação, como é possível observar na Figura 2.2 a. Nesse estágio o desempenho mecânico do concreto já está altamente comprometido. Como o agregado reciclado é composto de dois elementos distintos, a quantidade e tipos de interfaces são maiores. É possível visualizar na Figura 2.2 b (ver ponto 1) a interface entre agregado natural e argamassa nova, a interface entre a argamassa antiga e argamassa nova (ver ponto 2) e a interface entre agregado natural e a argamassa antiga (ver ponto 3).



**Figura 2.2** - Padrões de fissuras observados após o aquecimento: (a) concreto  $f_c = 75$  MPa aquecido a  $600^\circ\text{C}$  (HAGER, 2013), (b) microfissura entre agregado e a pasta antiga após exposição à  $450^\circ\text{C}$  (LANEYRIE et al., 2016).

Laneyrie *et al.* (2016) submeteram concretos de resistência normal e de alto desempenho produzidos com agregado de RCD a ciclos de aquecimento e resfriamento, seguido de exposição a alta temperatura constante. Os autores observaram que durante o aquecimento os concretos reciclados apresentaram menos fragmentação, mas que algumas amostras do concreto de alto desempenho exibiram fragmentação explosiva.

Dong *et al.* (2014) testaram, sob altas temperaturas, colunas de concreto produzido apenas com agregado gráudo reciclado de concreto, com teor de utilização de 100%. Os resultados indicaram que comparado a concretos convencionais de mesma resistência, o concreto reciclado apresentou taxa de aquecimento mais lenta e que seu tempo de resistência ao fogo foi maior. A fragmentação dessa coluna também foi menor, como é possível observar na Figura 2.3.



**Figura 2.3** - Fragmentação ocorrida nas colunas do estudo de Dong et al. (2014) após o aquecimento: (a) concreto convencional C30 (b) concreto reciclado C30.

Zega e Di Maio (2008) compararam três tipos de agregado graúdo reciclado, entre eles o de concreto com brita granítica, e avaliaram as propriedades dos concretos produzidos antes e depois de sua exposição a uma temperatura de 500 °C, por 1 h. Em condições normais, o módulo de elasticidade dos concretos reciclados foi, em geral, 15% menor que o convencional. Os autores apontam a argamassa presente no agregado reciclado como principal responsável por esse resultado, pois ela confere maior capacidade de deformação a estes. No entanto, com o aquecimento, seu módulo de elasticidade apresentou menor diminuição que o do concreto convencional. A resistência à compressão apresentou, em temperatura ambiente, valor ligeiramente inferior ao concreto tradicional, mas após o aquecimento, enquanto o concreto natural apresentou redução na resistência em torno de 22%, o concreto reciclado apresentou redução de 10%.

Vieira, Correia e Brito (2011) submetem concretos com 20, 50 e 100% de agregado graúdo reciclado de concreto a temperaturas de 400, 600 e 800 °C. Os autores mantiveram a dosagem dos concretos semelhantes, fazendo apenas a compensação de água para manter a relação água/cimento efetiva constante. Os resultados indicaram que a variação das propriedades mecânicas residuais dos concretos reciclados foi semelhante à apresentada pelo concreto de referência.

Sarhat e Sherwood (2013) observaram que para taxas de substituição iguais ou superiores a 50%, as propriedades mecânicas residuais do concreto reciclado são superiores às do concreto de referência.

Cree *et al.* (2013) alertam que para a utilização de concretos reciclados, seu comportamento sob altas temperaturas deve ser melhor estabelecido e, para isso, diz que estudos adicionais são necessários para se entender melhor esse comportamento.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS**

### **3.1 PLANO EXPERIMENTAL**

A Figura 3.1 apresenta as etapas do plano experimental do presente trabalho. O trabalho experimental se inicia com a obtenção do agregado reciclado, que foi produzido através do processo de beneficiamento aplicado por Amario (2015) e Rangel (2015).

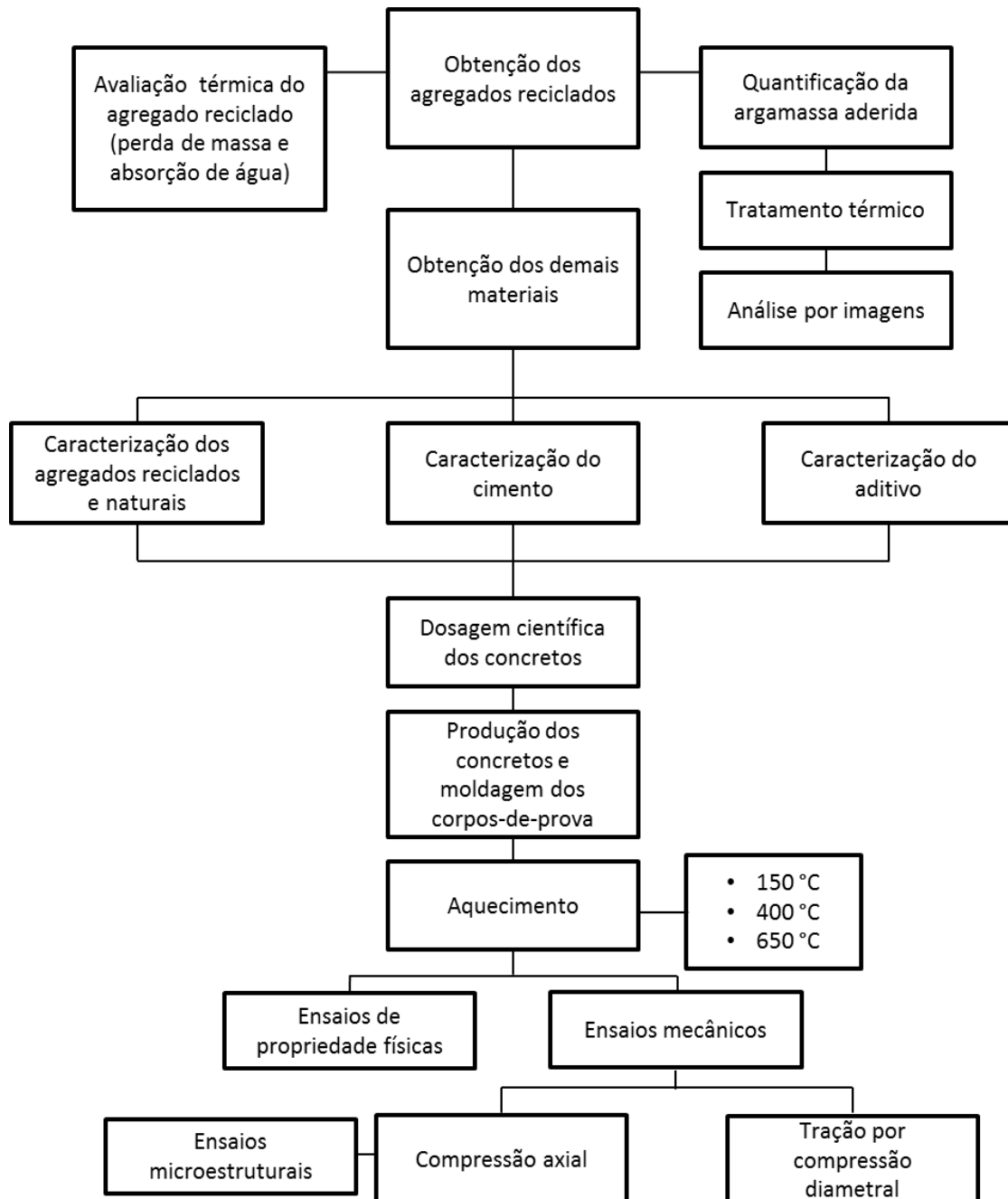
A etapa de caracterização de todos os materiais (brita de concreto reciclado, brita natural, areia natural, superplastificante e cimento) foi realizada em seguida. Para o cimento foram determinadas a curva granulométrica, composição química, massa específica, absorção de água, compatibilidade e ponto de saturação, compacidade e resistência à compressão. Para os agregados foram determinados: classificação granulométrica, massa específica, absorção total e compacidade.

A seguir, foi realizada a dosagem científica através do Método de Empacotamento Compressivo (MEC) para concretos com classe de resistência de 25 e 65 MPa. Para cada resistência, foram dosadas duas misturas com teores de utilização de agregado reciclado de 50% e 100% (em relação ao agregado convencional – em volume) e uma mistura de concreto convencional para referência (0% de agregado reciclado). Com as dosagens obtidas pelo MEC foram produzidos os concretos para determinação do abatimento e da resistência desejada aos 28 dias. Em seguida, iniciaram-se as moldagens dos corpos-de-prova que foram aquecidos a diferentes temperatura e nos quais foram realizados os ensaios para a determinação das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais residuais.

Após 28 dias de cura em câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram até as idades de ensaios, os concretos foram levados para a estufa ( $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) para secagem até constância de massa. As amostras secas foram submetidas a altas temperaturas em forno mufla. Foram estudados quatro níveis de temperatura,  $22^{\circ}\text{C}$  (temperatura de referência - ambiente),  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  e  $650^{\circ}\text{C}$ . Após a exposição a altas temperaturas os corpos-de-prova foram encaminhados para os ensaios mecânicos, com a finalidade de avaliar as propriedades



mecânicas do concreto através dos ensaios de compressão axial (comportamento tensão  $\times$  deformação) e tração por compressão diametral (resistência à tração).



**Figura 3.1** - Etapas do plano experimental.

### 3.1.1 Materiais

No presente trabalho os seguintes materiais são utilizados:

- Cimento CPV-ARI

- Aditivo superplastificante Glenium 51
- Agregados

Brita 0 de concreto reciclado (frações 4,75 a 9,5 mm)

Brita 0 natural

Areia natural

- Água

### **3.1.2 Tipo de concreto**

O trabalho estuda o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD sob altas temperaturas, para isso, são dosadas duas classes de resistência de concreto, classe normal e alta resistência. As resistências adotadas foram:

- Concreto de resistência normal de 25 MPa.
- Concreto de alta resistência de 65 MPa.

### **3.1.3 Misturas**

Três misturas de concreto foram dosadas para cada classe de resistência, sendo uma mistura de referência, apenas com agregado natural e duas com diferentes teores de agregado reciclado. O agregado reciclado foi utilizado somente na fração graúda e com teores de utilização de 50 e 100% em relação ao volume total de agregado graúdo da mistura.

### **3.1.4 Caracterização dos materiais**

A caracterização dos materiais foi realizada de acordo com:

- Classificação Granulométrica

Agregado graúdo e agregado miúdo: segundo a NBR NM 248 (2003)

Cimento: através da granulometria a laser

- Composição Química

Cimento: foi utilizada a análise através da espectrometria de fluorescência de raio X

- Massa Específica e Absorção Total

Agregado graúdo: massa específica e absorção de água segundo a NBR NM 53 (2009)

Agregado miúdo: massa específica segundo a NBR NM 52 (2009)

Agregado miúdo: absorção de água segundo a NBR NM 30 (2001)

Cimento: através de picnômetro e gás hélio

- Compacidade

Cimento: através de ensaio de demanda d'água, segundo e De Larrard (1999)

Agregado graúdo e agregado miúdo: por ensaio de vibração e compressão, segundo De Larrard (1999)

- Compatibilidade

Cimento: através de funil de Marsh, segundo De Larrard (1999)

- Resistência à Compressão do Cimento

Cimento: segundo a NBR 7215 (1997)

### **3.1.5 Dosagem científica**

As dosagens dos concretos estudados foram feitas com base nos procedimentos adotados por De Larrard (1999) com o auxílio da ferramenta computacional *Betonlab Pro3* (Sedran e De Larrard, 2000), desenvolvido a partir do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) proposto por De Larrard (1999).

O programa permite otimizar traços de concretos com base nas características e propriedades de cada material, além de estimar algumas propriedades da mistura nos estados fresco e endurecido do concreto pretendidas pelo usuário, calculando a proporção mais apropriada de cada material.

## **3.2 MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS**

### **3.2.1 Classificação granulométrica**

#### *3.2.1.1 Agregados*

Para os agregados, a determinação da granulometria foi realizada através do peneiramento a seco, segundo a norma NBR NM 248 (2003). As amostras foram secas em estufa, à temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e pesadas após a secagem, em seguida o material foi colocado em um conjunto de peneiras dispostas em ordem crescente com abertura de 150  $\mu\text{m}$  a 12,5 mm. O peneiramento foi realizado no Laboratório de Geotecnia Professor Jacques Medina da COPPE/UFRJ, através da agitação mecânica do conjunto, por tempo suficiente para a separação e classificação dos grãos de acordo com seu tamanho.

#### *3.2.1.2 Cimento*

O cimento foi caracterizado através de análise de laser, de acordo com o procedimento utilizado por Cordeiro (2006), realizado no equipamento Malvern Mastersizer, que se fundamenta na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são associados ao tamanho das partículas. O ensaio teve duração de 60 segundos e foi realizado com lente 100 (0,5 – 180  $\mu\text{m}$ ), álcool etílico absoluto P.A. e ultrassom. A quantidade de material foi incorporada à solução aos poucos, de modo que o índice de obscuração indicado pelo analisador permanecesse entre 20% e 25%. As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ.

A curva de distribuição granulométrica é gerada a partir da determinação dos acumulados abaixo de dados diâmetros. No caso, foram utilizados os parâmetros  $D(0,1)$ ,

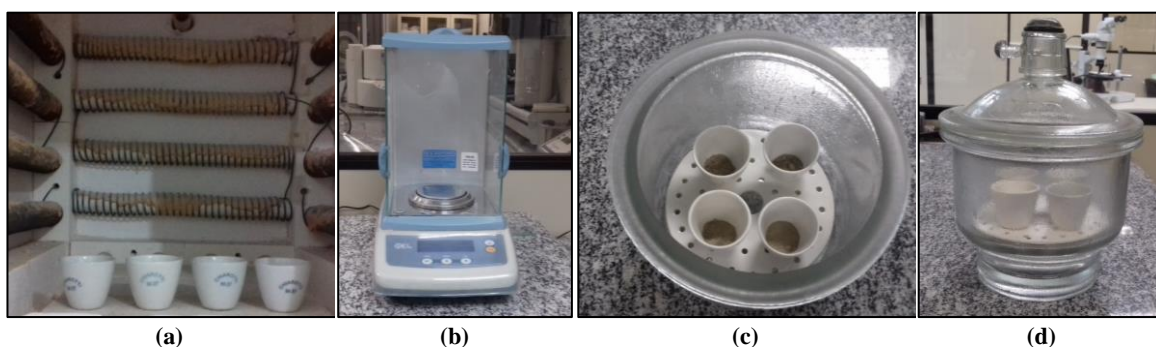
D(0,5) e D(0,9), que correspondem ao tamanho de partículas abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% da massa do material, respectivamente.

### 3.2.2 Composição química

Para determinar a composição química do cimento Portland, foi utilizada a técnica de análise por espectrometria de fluorescência de raios X, em equipamento Shimadzu, modelo EDX-720. As amostras foram secas em estufa à temperatura de  $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas, e prensadas com ácido bórico para a formação de um disco. Os resultados são apresentados na forma percentual dos óxidos presentes. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

### 3.2.3 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo do cimento Portland foi realizado segundo as especificações da NBR NM 18 (2012). O ensaio consiste em queimar uma amostra do material em forno tipo mufla à temperatura de  $950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , por 15 minutos, com taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Em seguida as amostras esfriam em um dessecador. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. A Figura 3.2 apresenta os passos do método de ensaio.



**Figura 3.2** - Ensaio de perda ao fogo: (a) amostras no forno para a queima ; (b) balança utilizada para evitar o ganho de umidade ; (c) amostras após a queima ; (d) amostra em dessecador para evitar o ganho de umidade .

O valor da perda ao fogo foi obtido pela média aritmética de quatro determinações, que foram calculadas pela Equação 3.1:

$$PF(\%) = \frac{m_{110} - m_{950}}{m_{110}} \times 100 \quad 3.1$$

Onde:

*PF*: perda ao fogo em porcentagem;

$m_{110}$ : massa da amostra seca em estufa a  $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , em gramas;

$m_{950}$ : massa da amostra seca em estufa a  $950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , em gramas.

### 3.2.4 Massa específica e absorção de água

#### 3.2.4.1 Cimento

A massa específica do cimento Portland foi determinada por meio do picnômetro a gás hélio, modelo Accupyc da Micromeritics. O método baseia-se na determinação do volume de uma massa conhecida de amostra através da variação de pressão do gás em um volume calibrado. As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

#### 3.2.4.2 Agregados graúdos

Para os agregados graúdos, natural e reciclado, a determinação da massa específica e da absorção total foi realizada através dos procedimentos descritos na NBR NM 53 (2009). As amostras foram previamente secas em estufa à temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas. Posteriormente, o agregado foi imerso em água à temperatura ambiente por  $24 \pm 4$  horas. Em seguida a mostra passou por uma secagem superficial e foi pesada, esse valor corresponde ao peso do agregado saturado com superfície seca. Por fim, o agregado foi pesado em água.

A massa específica é dada pela Equação 3.2:

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad 3.2$$

Onde:

$d$ : massa específica do material seco, em gramas por centímetro cúbico;

$m$ : massa ao ar do material seco em estufa, em gramas;

$m_a$ : massa do material imerso em água, através da leitura hidrostática, em gramas.

A absorção total é obtida através da Equação 3.3:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad 3.3$$

Onde:

$A$ : absorção de água do material, em porcentagem;

$m$ : massa ao ar do material em estufa, após a leitura hidrostática, em gramas;

$m_s$ : massa ao ar do material saturado com superfície seca, em gramas.

#### 3.2.4.3 Agregados miúdos

A determinação da massa específica e da absorção de água do agregado miúdo foi realizada segundo as prescrições das NBR NM 52 (2009) e NBR NM 30 (2001), respectivamente. Após 24 horas submersas em água, as amostras foram espalhadas sobre uma superfície plana sob ação de uma corrente de ar suave. É necessário encontrar o momento de agregado saturado com superfície seca, para isso, são utilizados um molde tronco de cone metálico e uma haste de compactação. Em seguida, a amostra foi colocada em um frasco de vidro calibrado, com volume de  $500 \pm 5 \text{ cm}^3$ , e coberta com água até a marca de 500 ml, para nova pesagem. Por fim, as amostras foram secas em estufa à temperatura de  $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , até constância de massa. As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

A massa específica do agregado miúdo pode ser calculada através da Equação 3.4, de acordo com NBR NM 52 (2009). Enquanto a absorção pode ser calculada por meio da Equação 3.5, indicada pela NBR NM 30 (2001).

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad 3.4$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad 3.5$$

Onde:

$d_1$ : massa específica do material seco, em gramas por centímetro cúbico;

$m$ : massa ao ar do material seco em estufa, e, gramas;

$V$ : volume do frasco de vidro, em centímetro cúbico;

$V_a$ : é o volume de água adicionada ao frasco, em centímetro cúbico;

$A$ : é a absorção de água do material, em porcentagem;

$m_s$ : é a massa ao ar do material saturado com superfície seca, em gramas.

#### 3.2.4.4 *Perda de massa, absorção e densidade dos agregados graúdos após aquecimento*

Conforme comentado em itens anteriores, a exposição a temperaturas elevadas causa mudanças físico-químicas nos componentes do concreto. Assim, para melhor entendimento do comportamento dos concretos reciclados submetidos a este tipo de situação, as propriedades físicas dos agregados graúdos utilizados na produção dos concretos foram determinadas, após esses serem expostos a altas temperaturas.

Os agregados graúdos utilizados na produção dos concretos foram expostos as seguintes temperaturas: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 °C. Inicialmente, os agregados foram secos em estufa à  $60 \pm 1$  °C até obterem massa constante e três amostras de cada tipo de agregado foram devidamente pesadas, em seguida as amostras foram aquecidas até a temperatura a ser analisada (Figura 3.3). A taxa de aquecimento utilizada foi de 2 °C/min e o tempo de exposição a temperatura estudada foi de 1 hora. Essa metodologia foi igual à adotada no aquecimento dos concretos reciclados e de referência produzidos, assim como os equipamentos usados, como apresentados no item 3.2.4.2.





**Figura 3.3** - Amostra dos agregados dentro do forno para o aquecimento.

A perda de massa foi determinada a partir da Equação 3.6:

$$\% P.M = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad 3.6$$

Onde:

- $m_i$ : massa inicial da amostra;
- $m_f$ : massa final da amostra.

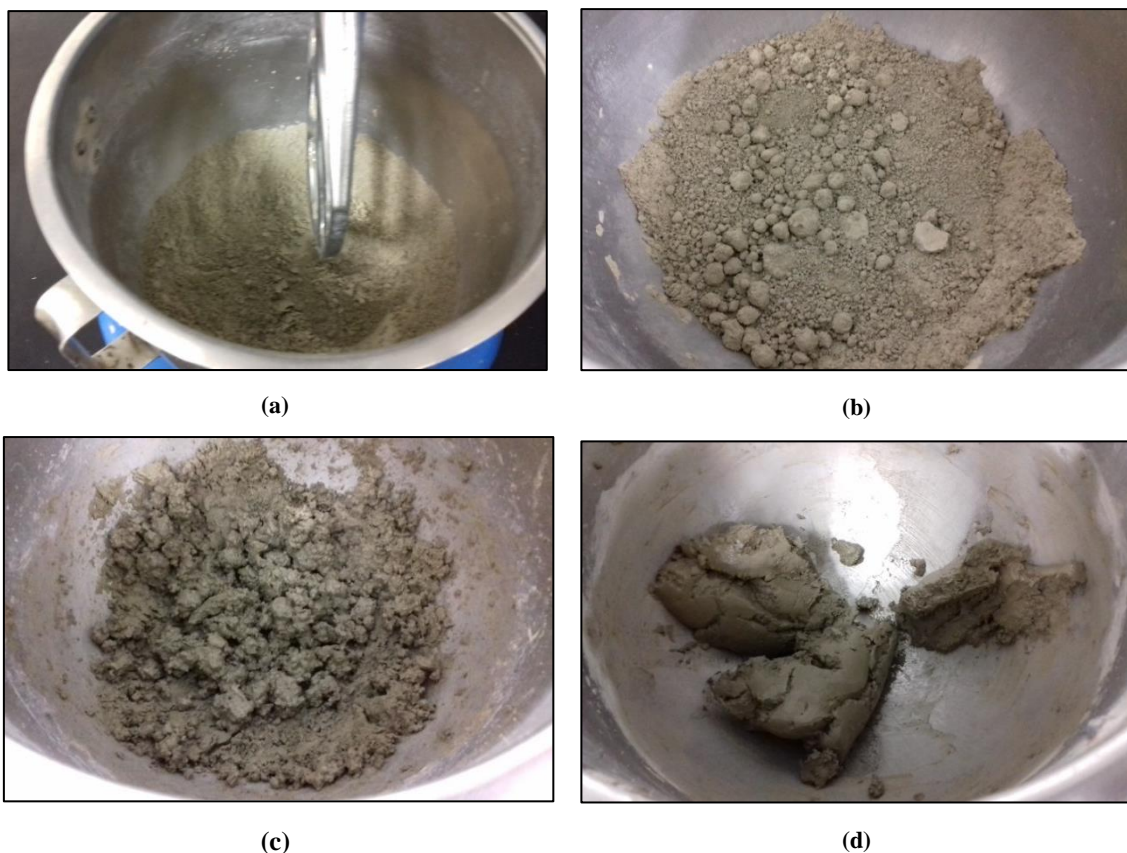
### **3.2.5 Compacidade**

A aplicação do Método de Empacotamento Compressível (MEC) para a dosagem dos concretos requer a determinação da compacidade experimental dos materiais. A compacidade foi determinada através de dois procedimentos experimentais desenvolvidos por De Larrard (1999): ensaio de demanda d'água (cimento) e ensaio de compressão e vibração (agregados).

#### *3.2.5.1 Ensaio de demanda d'água*

A compacidade experimental do cimento Portland foi determinada pelo método da demanda d'água. O método se baseia na quantificação de massa de água necessária para transformar o material seco em uma pasta como máximo de empacotamento das partículas. Essa quantidade de água, que é adicionada aos poucos, corresponde à quantidade necessária para o preenchimento de vazios, que é denominada demanda d'água do material.

Durante a adição de água ao material ocorrem quatro fases denominadas: seca Figura 3.4 (a), pendular Figura 3.4 (b), funicular Figura 3.4 (c) e capilar Figura 3.4 (d).



**Figura 3.4** - Etapas do ensaio de demanda d'água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar.

O estado seco é o estado inicial, onde há um alto teor de vazios no material. Segundo Miranda (2008), o estado pendular é caracterizado pela presença de pequenas pontes líquidas entre os grãos, o acréscimo de água aumenta o número de pontes, e a tensão superficial da água tende a unir os grãos, empacotando-os. A fase funicular ocorre quando todos os grãos se encontram molhados por água, mas há bolhas no interior da mistura (MIRANDA, 2008). O momento de transição para a fase capilar, de acordo com Cordeiro (2006), é o chamado ponto de demanda d'água, quando é possível visualizar três partes homogêneas de material, separadas e bem definidas.

O ensaio foi realizado de forma semelhante ao executado por Cordeiro (2006), utilizando-se um misturador planetário de 2 litros de capacidade. Inicialmente, e aos poucos, água foi sendo adicionada à 350 g de material, com o misturador na velocidade mínima por 1 minuto, posteriormente aumentou a velocidade do equipamento, até atingir o estado capilar. Este ensaio também foi realizado para pastas confeccionadas

com aditivo superplastificante, cuja dosagem foi determinada através do ensaio de ponto de saturação.

Conhecido o ponto de demanda d'água, a compacidade é dada pela Equação 3.7.

$$C = \frac{1}{1 + \delta \frac{m_a}{m}} \quad 3.7$$

Onde:

$C$ : é a compacidade experimental;

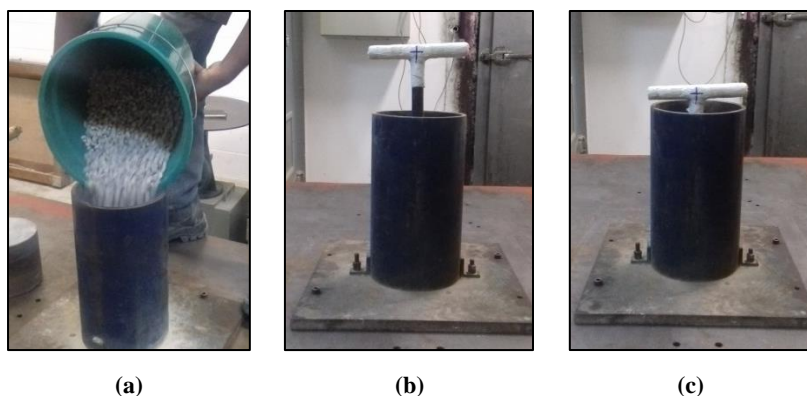
$\delta$ : é a massa específica do material;

$m_a$ : é a massa de água;

$m$ : é a massa de material.

#### 3.2.5.2 Ensaio de compactação mecânica e vibração

A compacidade experimental dos agregados (partículas maiores que 100  $\mu\text{m}$ ) foi determinada segundo o ensaio de compactação mecânica e vibração, proposto por De Larrard (1999), que implica na combinação simultânea de compressão mecânica e vibração do material. Neste ensaio, um volume padrão de material é condicionado em um cilindro metálico, com 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, preso a uma mesa vibratória com frequência de 68 Hz, onde aplica-se uma pressão de 10 kPa, através de um pistão maciço com aproximadamente 200 N de peso. Após posicionar o pistão, é feita a leitura da sua altura, por meio de um catetômetro. Em seguida, o conjunto é submetido à vibração por um período de 2 minutos. Terminada a vibração, a altura do material compactado é determinada. Para os agregados graúdos foram utilizados 6,0 kg de material, enquanto para os agregados miúdos, utilizou-se 3,0 kg de material. As etapas deste ensaio são ilustradas pelas Figura 3.5 (a) a Figura 3.5 (c).



**Figura 3.5** - Ensaio de compactação mecânica: (a) preenchimento do cilindro com agregado; (b) posição do pistão antes da vibração; (c) posição do pistão após a vibração.

Para a obtenção de um resultado mais preciso, os agregados foram separados em 3 diferentes classes de tamanho. Para os agregados graúdos, a classe 1 correspondia aos grãos maiores que 7,93 mm, a classe 2 aos grãos compreendidos entre 6,3 e 7,93 mm, e por fim, a classe 3 referente as partículas menores que 6,3 mm. No caso do agregados miúdos, na classe 1 estão compreendidos os grãos com dimensão entre 1,18 e 2,36mm e a classe 2, as partículas menores que 1,18 mm. A compacidade de cada classe para cada agregado foi obtida através da média aritmética de três determinações.

Assim, a compacidade experimental pode ser calculada através da Equação 3.8.

$$C = \frac{4M_s}{\pi \cdot h \cdot \delta \cdot D_c^2} \quad 3.8$$

Onde:

$C$ : é a compacidade experimental;

$M_s$ : é a massa de material seco;

$D_c$ : é o diâmetro interno do cilindro;

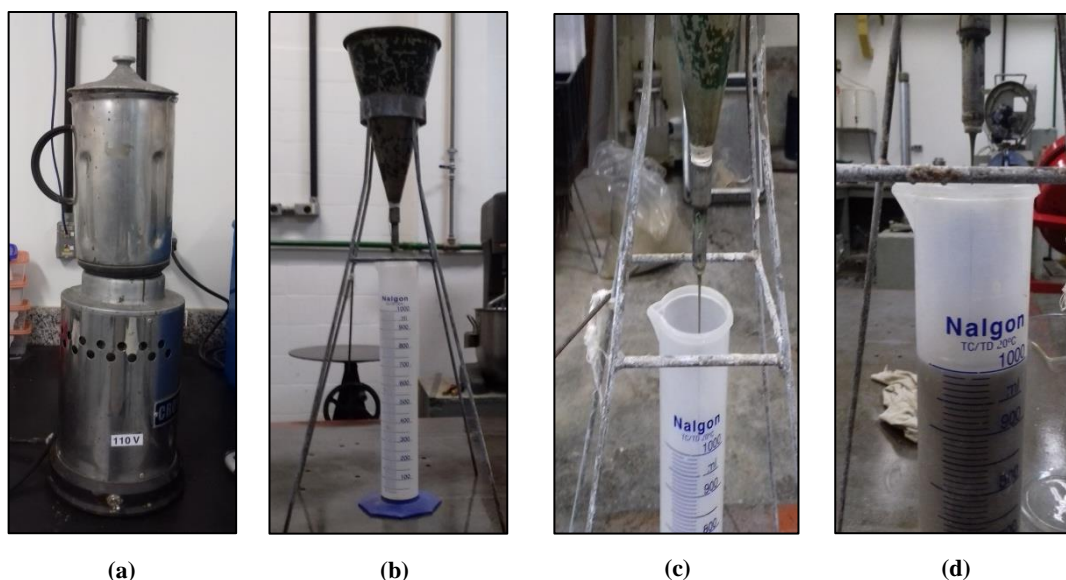
$h$ : é a altura da camada de material compactada ao final do ensaio;

$\delta$ : é a massa específica do material.

### 3.2.6 Ensaio de compatibilidade e ponto de saturação

A avaliação da compatibilidade entre o superplastificante e o cimento Portland é de grande importância, pois suas propriedades afetam diretamente a dosagem e a produção

do concreto. Dessa forma, foram realizados ensaios de escoamento de pastas em cone de Marsh. As pastas foram produzidas com relação água/cimento de 0,35 e teores de superplastificante variando entre 0,2% e 1% de sólidos em relação à massa de cimento. O ensaio consiste em medir, aos 5 minutos, 30 minutos e 60 minutos após a mistura, o tempo de escoamento de 1000 ml de pasta por um cone com abertura de 5 mm de diâmetro. As fases deste ensaio são apresentadas na Figura 3.6.



**Figura 3.6** - Ensaio de ponto de saturação: (a) equipamento utilizado para a mistura; (b) funil de Marsh; (c) passagem da pasta através do funil; (d) instante em que 1000 ml de pasta passam pelo funil.

Esse ensaio indica o ponto de saturação do dispersante em relação ao cimento, que aponta qual o grau máximo de dispersão das partículas de cimento, provocado pelo superplastificante (RANGEL, 2015). Acima dessa dosagem, o aumento do teor de aditivo não influenciará de forma significativa na dispersão das partículas (AMARIO, 2015). O ponto de saturação é expresso como o percentual da fração sólida de aditivo químico em relação à massa total de cimento.

### 3.2.7 Calibração dos parâmetros “p” e “q”

A ferramenta computacional *Bentolab Pro 3* requer a calibração de dois parâmetros de resistência à compressão relacionados aos agregados. O parâmetro “p” está relacionado à interface pasta-agregado e o parâmetro “q” está associado à resistência intrínseca do agregado.

Foram produzidas argamassas para a calibração da areia natural e concreto para a calibração dos agregados graúdos. Foram definidos dois traços de argamassa e de concreto (concreto natural e concreto reciclado), um de alta resistência (Traço Rico – TR) e outro de baixa resistência (Traço Pobre - TP). A composição de cada traço utilizado pode ser observada na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Traços utilizados na calibração dos parâmetros "p" e "q".

Misturas		Materiais (kg/m <sup>3</sup> )					
		Brita Natural	Brita ARC	Areia Natural	Cimento	SP	Água
Argamassa Natural	TP	-	-	1558,00	342,00	3,42	248,41
	TR	-	-	1359,00	600,00	6,00	247,34
Concreto Natural	TP	1020,87	-	815,59	254,64	0,56	191,90
	TR	1021,21	-	596,70	503,74	3,21	201,95
Concreto Reciclado	TP	-	1012,75	809,27	252,69	2,64	198,49
	TR	-	1003,98	583,19	501,99	6,20	214,08

TP – Traço Pobre; TR – Traço Rico.

Para as argamassas produzidas, foram moldados 4 corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, enquanto para os concretos foram moldados 4 corpos-de-prova de 7,5 cm de diâmetro por 15 cm de altura. Tanto a argamassa quanto os concretos foram ensaiados à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade.

Os resultados de resistência à compressão para cada mistura são apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** - Resistência à compressão das misturas utilizadas para a calibração dos parâmetros "p" e "q".

Misturas		Resistência à compressão (MPa) – CV (%)		
		3 dias	7 dias	28 dias
<b>Argamassa</b>	TP	16,0 (3,1)	18,5 (2,0)	22,0 (3,1)
<b>Natural</b>	TR	42,4 (7,1)	49,0 (5,2)	63,8 (2,1)
<b>Concreto</b>	TP	17,5 (4,5)	19,9 (7,2)	24,1 (1,6)
<b>Natural</b>	TR	48,5 (3,9)	53,6 (3,7)	70,3 (3,3)
<b>Concreto</b>	TP	23,0 (1,9)	26,9 (1,5)	32,7 (1,4)
<b>Reciclado</b>	TR	49,4 (1,0)	51,4 (3,2)	67,3 (0,4)

Com base nesses resultados, os parâmetros “p” e “q” foram calibrados, através do programa Bentolab Pro 3, para todos os agregados utilizados na pesquisa. Os valores calculados estão expostos na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** - Valores dos parâmetros "p" e "q" obtidos através do programa Betonlab Pro.

Materiais	Parâmetros de resistência	
	p (adimensional)	q (Mpa <sup>-1</sup> )
<b>Areia Natural</b>	1,5026	0,01096
<b>Brita Natural</b>	1,1515	0,00338
<b>Brita ARC</b>	0,9271	0,00529

A areia natural obteve o maior valor de “p”, o que significa que a interface pasta-agregado para este agregado é melhor, proporcionando uma resistência maior para este agregado. Os valores de “p” entre as britas tem uma pequena diferença, então, pode-se esperar alguma diferença no comportamento de ambas.

### 3.2.8 Abatimento de tronco de cone

O ensaio de abatimento de cone de Abrams foi feito segundo as recomendações da NBR NM 67 (1998), três camadas são compactadas com 25 golpes distribuídos de forma

uniforme, utilizando uma haste de socamento. O molde é retirado cuidadosamente na vertical, e por fim, é medido o abatimento do concreto.

### **3.2.9 Resistência à compressão**

#### *3.2.9.1 Resistência à compressão do cimento Portland*

O ensaio de resistência à compressão do Cimento Portland foi realizado segundo as prescrições da NBR 7215 (1997). Foi utilizada a prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo *UH-F1000kN*. Para a realização do ensaio, as extremidades dos corpos-de-prova foram regularizadas e paralelizadas, com o objetivo de evitar a concentração de tensões nas faces do corpo-de-prova. Foram avaliadas as resistências à compressão nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UF RJ.

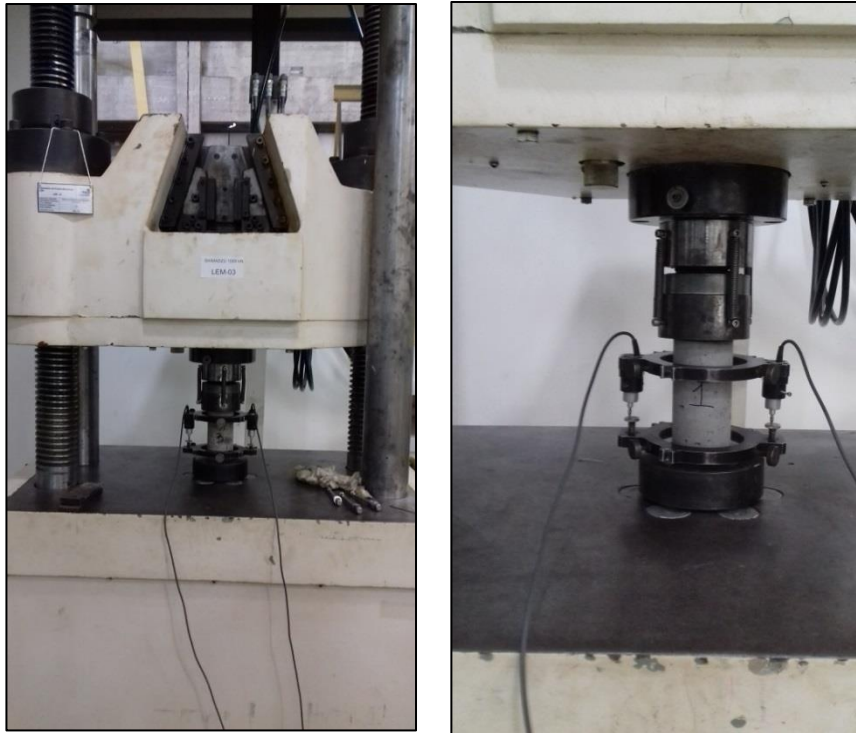
#### *3.2.9.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos concretos*

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos produzidos foram avaliados de acordo com as recomendações da NBR 5739 (2007), através da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos (75 mm de diâmetro e 150 mm de altura) em prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo *UH-F1000kN*. Antes do ensaio foi feita a regularização das extremidades dos corpos-de-prova.

Para os concretos e argamassas produzidos para a calibração dos parâmetros “p” e “q”, do programa *Bentolab*, os ensaios foram realizados aos 3, 7 e 28 dias de cura úmida, com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min.

Para os concretos produzidos com os traços obtidos por meio do programa *Bentolab Pro 3*, foram registrados a carga de ruptura e o comportamento tensão *versus* deformação, que foi obtido com o emprego de transdutores elétricos (LVDT) para medição dos deslocamentos longitudinais, posicionados na região central dos corpos-de-prova (Figura 3.7). Esses ensaios foram realizados aos 28 dias, com velocidade de carregamento de 0,1 mm/min, na prensa *Shimadzu*, modelo *UH-F1000kN*.





**Figura 3.7** - Ensaio de resistência à compressão em corpo-de-prova cilíndrico 7,5x15 cm.

O cálculo do módulo de elasticidade (Equação 3.9) foi feito através da curva tensão *versus* deformação, conforme NBR 8522 (2003).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad 3.9$$

Onde:

$E$ : é o módulo de elasticidade;

$\sigma_1$ : é a tensão de compressão correspondente à deformação axial  $\varepsilon_1$ , de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\sigma_2$ : é a tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

$\varepsilon_1$ : é a deformação axial igual a  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\varepsilon_2$ : é a deformação axial produzida por  $\sigma_2$ .

### **3.2.10 Resistência à tração por compressão diametral**

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, desenvolvido por Lobo Carneiro, por sua facilidade de execução, é uma alternativa ao ensaio de tração direta. O ensaio consiste na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral do corpo-de-prova cilíndrico (estado

plano de deformação). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o ensaio de tração direta, quando comparado ao ensaio de compressão diametral, tem sua resistência à tração do concreto superestimada em 10% a 15%.

Para este ensaio foi utilizada a prensa *Shimadzu*, modelo *UH-F1000kN*. Para a determinação da resistência à tração aos 28 dias de idade, foram utilizados quatro corpos-de-prova cilíndricos de 75 mm de diâmetro por 75 mm de altura. A velocidade do carregamento adotada foi de 0,1 mm/min..

A resistência à tração foi calculada pela Equação 3.10.

$$\sigma_t = \frac{2.F_r}{D.L.\pi} \quad 3.10$$

Onde:

$\sigma_t$ : é a resistência à tração por compressão diametral;

$F_r$ : é a carga de ruptura;

$D$ : é o diâmetro do corpo-de-prova;

$L$ : é a espessura do corpo-de-prova.

### **3.2.11 Absorção total, índice de vazios e massa específica do concreto**

O ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica prescrito na NBR 9778 (2005) foi realizado para cada mistura e temperatura, aos 28 dias. Três corpos-de-prova cilíndricos (75 mm de diâmetro e 150 mm de altura) foram ensaiados para cada configuração. A Figura 3.8 ilustra algumas das etapas desse ensaio.



(a)



(b)

**Figura 3.8** - Ensaio de absorção total: (a) disposição dos CPs; (b) imersão dos CPs.

Os corpos de prova foram secos em estufa mantida em temperatura constante e igual a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  até atingirem constância de massa. O índice de vazios calculado corresponde ao volume total de poros acessíveis à água, não possui relação com a facilidade com a qual a água pode penetrar no concreto (permeabilidade).

A absorção total, o índice de vazios e a massa específica são calculados através das Equações 3.11, 3.12 e 3.13, respectivamente.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad 3.11$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \quad 3.12$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad 3.13$$

Onde:

$A$ : é a absorção total de água, em porcentagem;

$m_{sat}$ : é a massa, em gramas, do corpo-de-prova saturado em água com superfície seca;

$m_s$ : é a massa, em gramas, do corpo de prova seco em estufa;

$I_v$ : é o índice de vazios, em porcentagem;

$m_i$ : é a massa, em gramas, do corpo-de-prova, saturado e imerso em água;

$\rho_s$ : é a massa específica seca, em g/cm<sup>3</sup>.

#### *3.2.11.1 Absorção total, índice de vazios e massa específica do concreto após aquecimento*

Assim como foi realizado para os agregados graúdos, a absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos após esses passarem por aquecimento, também foram determinadas. Cada dosagem de concreto foi submetida a 150, 400 e 650 °C, que são as temperaturas analisadas na pesquisa. O processo de aquecimento foi igual ao especificado no item 3.1.6.

### **3.2.12 Argamassa aderida**

Os métodos utilizados neste estudo foram o do tratamento térmico e da análise através de imagens do concreto reciclado colorido.

#### *3.2.12.1 Tratamento Térmico*

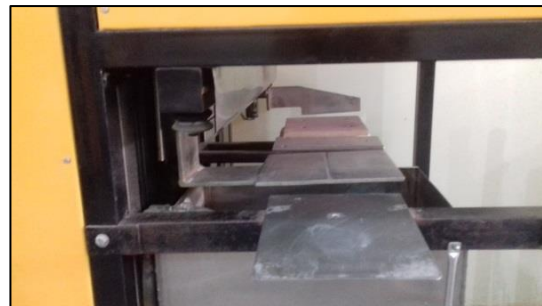
Para sua realização foi utilizado um forno mufla (Figura 3.9-a) que possibilita o choque térmico através da abertura do fundo do forno a altas temperaturas, retirada da amostra e imersão da mesma em água a temperatura ambiente (Figura 3.9-b; Figura 3.9-c). Todo o processo é automatizado e não se manuseia a amostra durante esse procedimento.



(a)



(b)



(c)

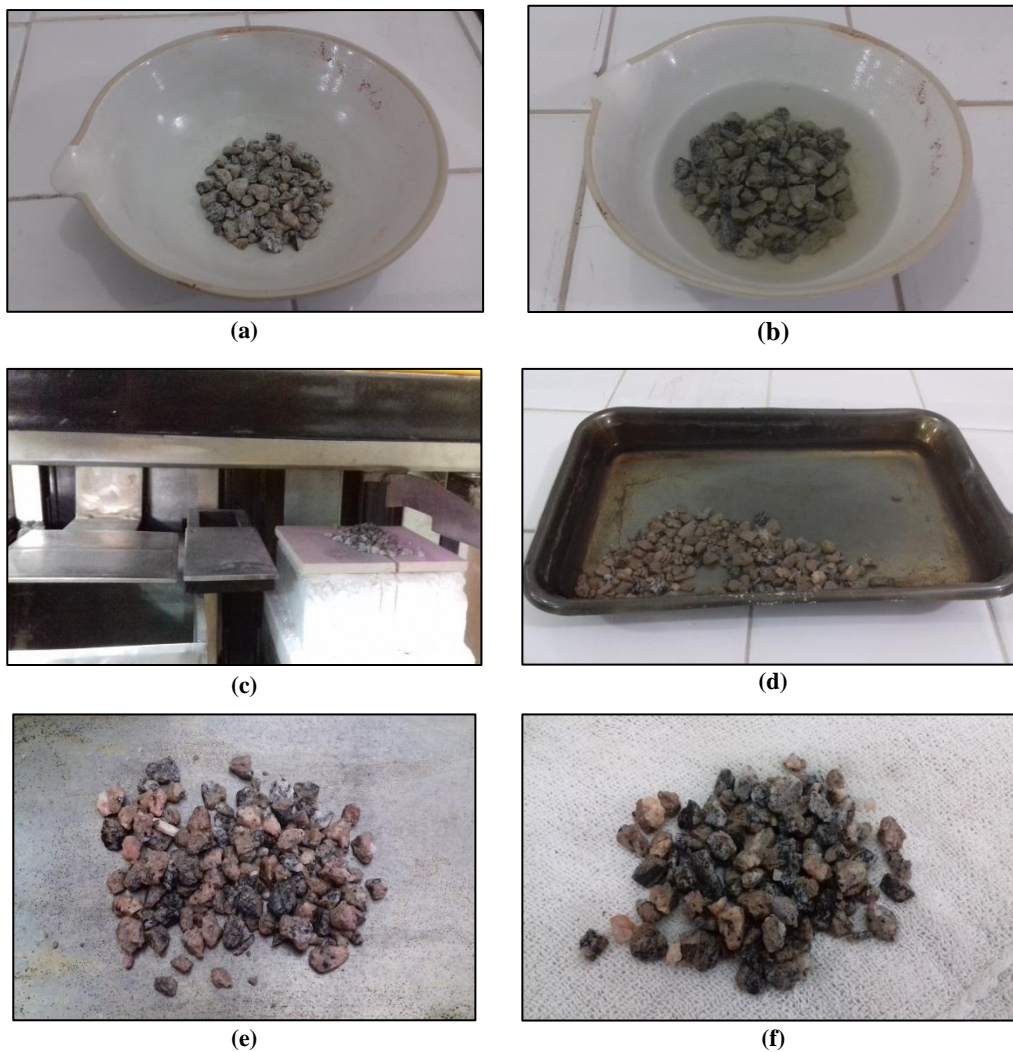
**Figura 3.9** - Equipamento utilizado para o choque térmico: (a) Visão geral; (b) e (c) mesa “elevador”.

A metodologia aplicada para este método é explicada a seguir:

- a) uma amostra da brita ARC foi preparada, removendo previamente todas as impurezas que poderiam estar presentes, em seguida a amostra foi pesada ( $m_i$ ) (Figura 3.10-a);
- b) a amostra foi imersa em água durante 2 horas para promover a saturação completa da argamassa (Figura 3.10-b);
- c) em seguida, a amostra foi colocada no forno a  $600^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas (Figura 3.10-c).
- d) após o aquecimento, o agregado foi posto em contato imediato com água fria (Figura 3.10-e). O arrefecimento repentino provoca tensão internas e conseqüentemente fissuras na argamassa, tornando sua remoção mais fácil (JUAN; GUTIÉRREZ, 2008);

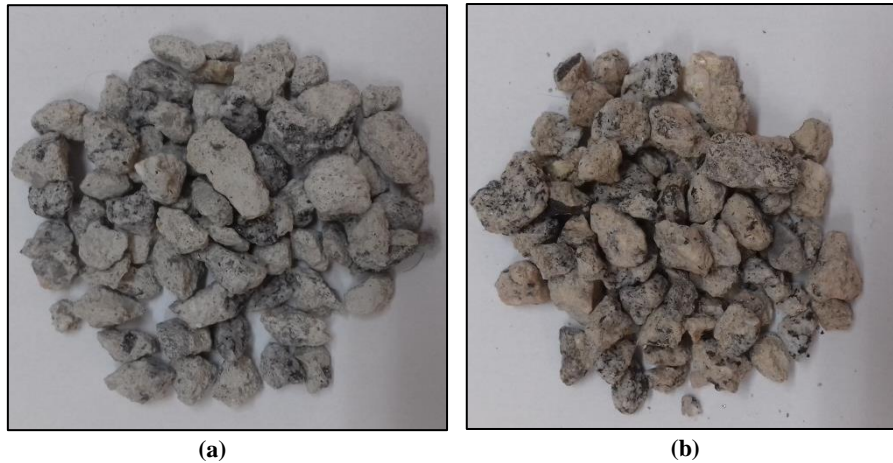
- e) normalmente, nem toda a argamassa pode ser removida, assim é necessário utilizar um martelo de borracha para retirá-la;
- f) quanto toda a argamassa possível for removida, o agregado restante é colocado em estufa para secagem e em seguida é pesado ( $m_f$ ) (Figura 3.10-g). Finalmente a taxa de argamassa aderida (%AA) é calculada através da Equação 3.14:

$$\% AA = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad 3.14$$



**Figura 3.10** – Etapas do processo de tratamento térmico: (a) amostra de ARC; (b) amostra submersa em água para saturação da argamassa; (c) disposição dos agregados saturados na mesa para o primeiro choque térmico, quando a mesa é levantada com todo o ARC para exposição a 600 °C por 2 h; (d) segundo choque térmico, quando os agregados saem diretamente do forno para a água fria; (e) agregado após o choque térmico; (f) agregado após a remoção da argamassa aderida.

A Figura 3.11 apresenta a comparação do agregado antes e depois do tratamento.

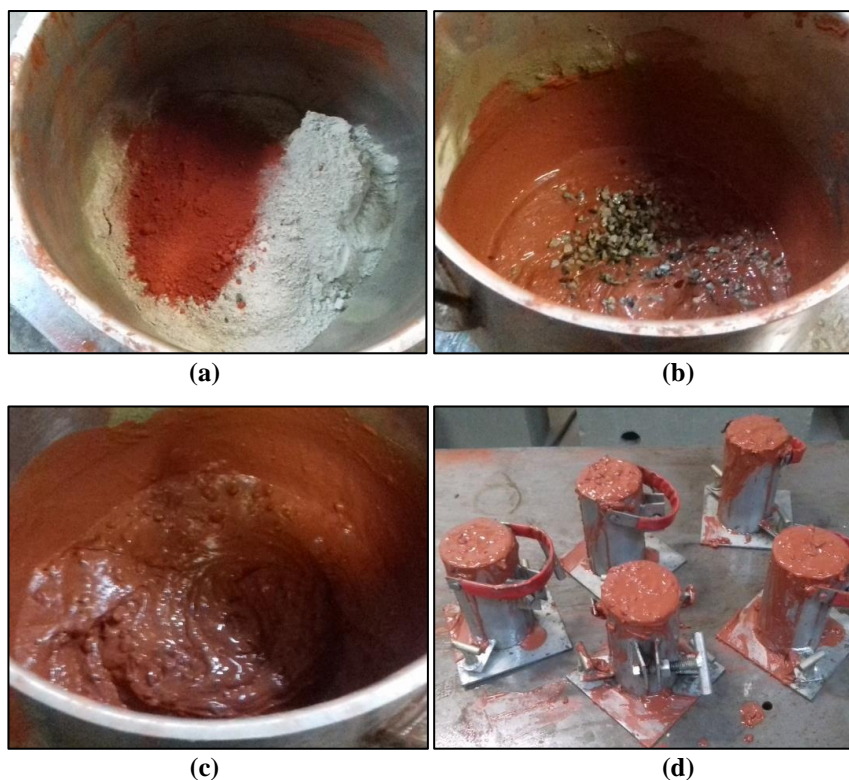


**Figura 3.11** - (a) Agregado reciclado antes do tratamento; (b) agregado após a retirada da argamassa aderida.

### 3.2.12.2 Análise por imagem

Baseado no método proposto por Abbas *et al.* (2009), para a realização desta análise foi necessário produzir uma pasta de cimento colorida para facilitar a identificação das diferentes fases dos materiais, além da utilização de programas computacionais para o cálculo das áreas correspondentes a cada elemento analisado. Para este trabalho foi produzida uma pasta de cimento vermelha e foram utilizados os programas *PhotoFiltre 7* e *ImageJ* para editar a imagem e calcular as áreas desejadas, respectivamente.

Para a produção desta pasta foi utilizado corante vermelho numa proporção em massa de corante-cimento de 5%. Posteriormente foi acrescentada e misturada certa quantidade de água e o ARC. Foram moldados cinco corpos-de-prova desse material. A Figura 3.12 mostra todo o processo de produção e moldagem do concreto colorido.



**Figura 3.12** – Processo de fabricação do concreto colorido: (a) mistura cimento e corante; (b) acréscimo dos ARCs; (c) mistura final; (d) moldagem dos corpos-de-prova.

Após a desmoldagem dos corpos-de-prova, os mesmos foram cortados em cinco discos (Figura 3.13). Para a análise foi escolhido o pedaço correspondente ao meio de cada corpo-de-prova, CPX – 3.

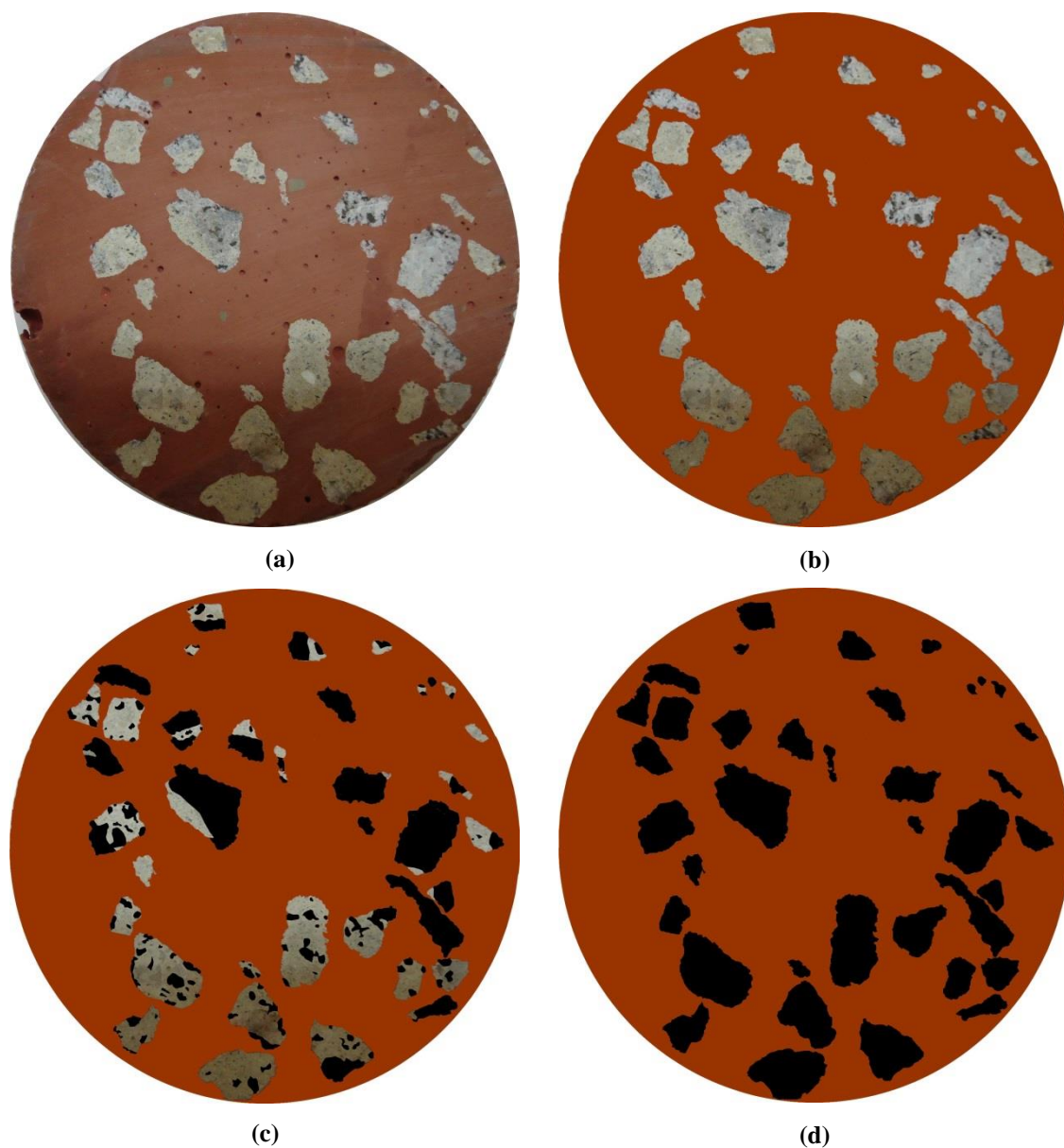


**Figura 3.13** - Corpos-de-prova cortados.

Através do programa computacional foi possível separar as diferentes fases do concreto, devido a semelhança entre a tonalidade de algumas partículas do agregado com a argamassa aderida e com os poros presentes na matriz de cimento. Não foi possível utilizar um filtro automático e a edição manual foi necessária para melhorar a precisão. A técnica utilizada foi selecionar inicialmente o tom de fundo (pasta de cimento vermelha) e, em seguida, foram selecionadas as partículas de agregado natural presentes



no agregado reciclado, que foram hachuradas em preto, a partir dessa imagem, no programa. Através de processo de binarização calculou-se a área de cada partícula de agregado natural. Ao final todas foram somadas e chegou-se a área total de agregado natural na imagem. A próxima etapa foi selecionar todo o agregado reciclado e todo o restante foi colorido de vermelho, para assim, mais uma vez, o programa calcular a área total de agregado reciclado presente na imagem. A área de argamassa aderida foi determinada através da subtração da área total de agregado reciclado pela área de agregado natural. A Figura 3.14 mostra o processo de análise das imagens.



**Figura 3.14** - Etapas para o cálculo das áreas: (a) imagem original; (b) matriz de cimento realçada em vermelho; (c) seleção do agregado natural; (d) seleção do agregado reciclado.

Uma vez que a taxa determinada através do processo de análise de imagens está em termos de área, foram utilizadas equações analíticas desenvolvidas para converter os dados de área de superfície fornecidos pela análise de dados para quantidades com base em massa (ABBAS *et al.*; 2007). Considerando a espessura da amostra unitária, a massa total do agregado natural presente no agregado reciclado é dada pela Equação 3.15.

$$m_{NAT} = \rho_{NAT} \cdot A_{NAT} \quad 3.15$$

Onde  $\rho_{NAT}$  e  $A_{NAT}$  correspondem à massa específica e área total do agregado natural, respectivamente.

De forma semelhante calcula-se a massa da argamassa presente no agregado reciclado (Equação 3.16).

$$m_{ARG} = \rho_{ARG} \cdot A_{ARG} \quad 3.16$$

Onde  $\rho_{ARG}$  e  $A_{ARG}$  correspondem à massa específica e área total da argamassa aderida, respectivamente. A massa específica da argamassa aderida foi determinada a partir dos resultados obtidos pelo método do tratamento térmico, e apresentou valor igual a 2,4 g/cm<sup>3</sup>.

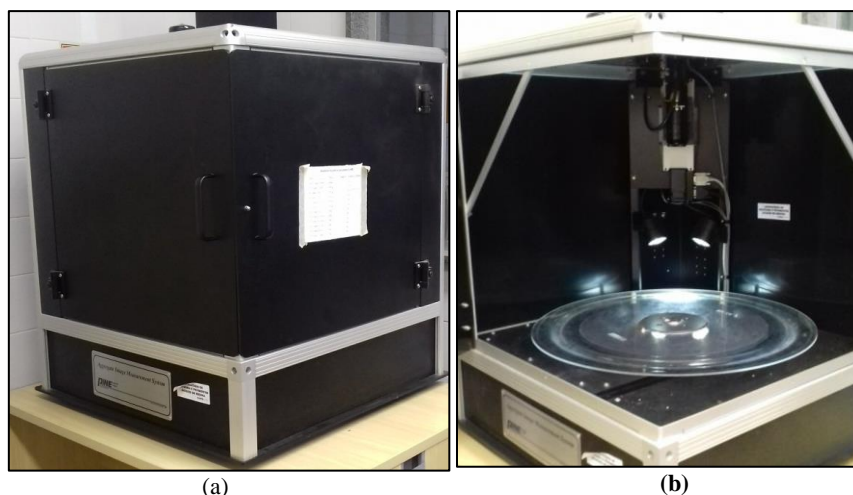
Assumindo que a massa total do agregado reciclado é igual a soma das massas do agregado natural e da argamassa aderida, a taxa de argamassa aderida em termos de massa pode ser calculada através da Equação 3.17:

$$\% AA = \frac{\rho_{ARG} \cdot A_{ARG}}{\rho_{ARG} \cdot A_{ARG} + \rho_{NAT} \cdot A_{NAT}} \quad 3.17$$

### 3.2.13 Morfologia dos agregados graúdos por AIMS

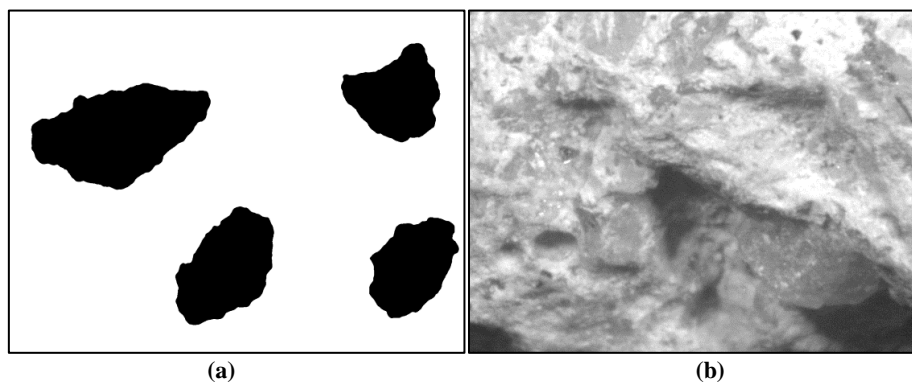
O ensaio de morfologia dos agregados foi realizado no *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS) da marca Pine no Laboratório de Geotecnia Professor Jaques de Medina (LABGEO), da COPPE/UFRJ. O AIMS (Figura 3.15) é um equipamento automatizado, que através de um sistema de digitalização e processamento digital de imagens permite a análise da forma 2D e índice de angularidade de agregados

finos e forma tridimensional, angularidade, textura, esfericidade, planicidade e alongamento para agregados graúdos (SILVA, 2015; AL ROUSAN, 2005).



**Figura 3.15** - Equipamento de análise: (a) exterior do equipamento; (b) câmeras, iluminação e bandeja na parte interna.

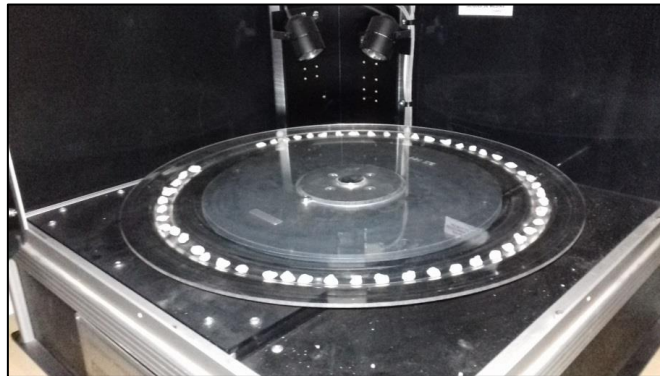
O equipamento de ensaio é composto por um hardware de aquisição de imagens, que fornece imagens em preto e branco para análises em agregado fino (Figura 3.16-a) e imagens em cinza, preto e branco para agregados graúdos (Figura 3.16-b).



**Figura 3.16** – Imagens fornecidas pelo programa: (a) análise da fração miúda (angularidade); (b) análise da fração graúda (textura).

O hardware de aquisição considera para agregados graúdos as frações retidas nas peneiras de malha 25,4 (1"); 19,0 (3/4"); 12,5 (1/2"); 9,5 (3/8") e 4,75mm (#4), para a fração miúda, consideram-se as frações retidas nas peneiras de malha 2,63 (#8), 1,18 (#16), 0,60 (#30), 0,30 (#50), 0,15 (#100) e 0,075 (#200). Para a realização do ensaio, os grãos da fração graúda são posicionados na bandeja, deixando um espaço razoável entre os grãos, de forma que o equipamento possa analisar de forma correta cada partícula (Figura 3.17), são utilizadas no mínimo 50 partículas de agregado graúdo, para o agregado de fração miúda

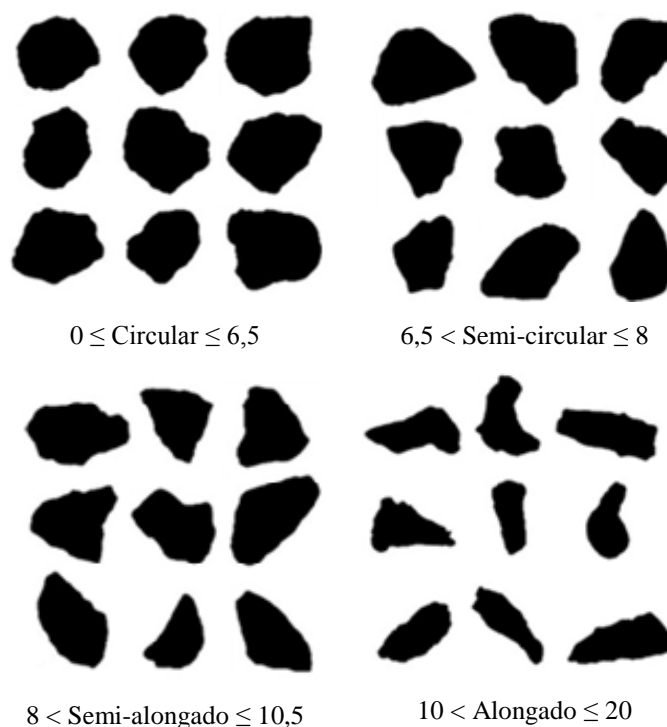
são espalhados 200 g de material na bandeja. Após o posicionamento dos grãos as portas do equipamento são fechadas para o início o ensaio.



**Figura 3.17** - Disposição da amostra.

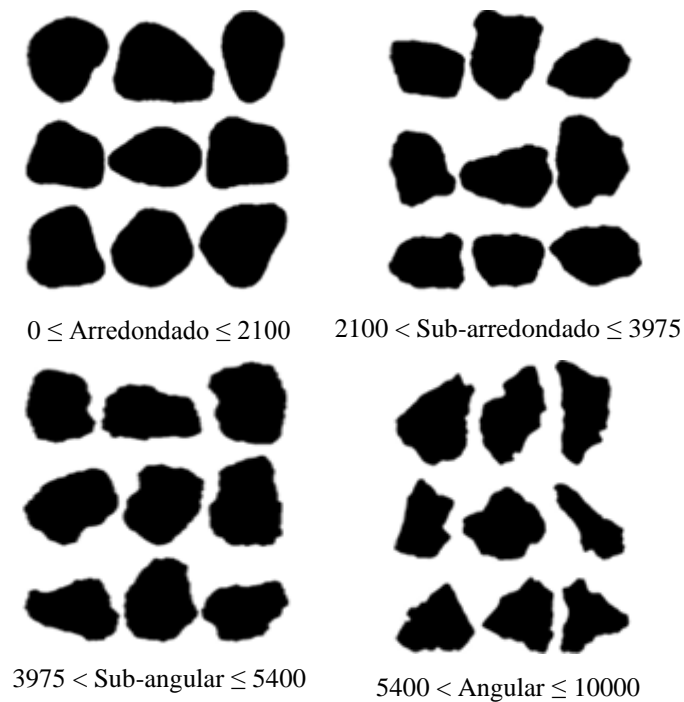
Para esta pesquisa, os agregados analisados serão classificados de acordo com os limites sugeridos por Al Rousan (2005). O autor estudou as características de forma, angularidade e textura de diversos agregados e desenvolveu uma metodologia de classificação baseada nos parâmetros de sua pesquisa.

A análise de forma 2D aplica-se apenas aos agregados miúdo e quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais de partículas do agregado, esse índice tem uma escala relativa de 0 a 20 (Figura 3.18) e como comparação, um círculo perfeito tem um valor de forma 2D igual a zero (SILVA, 2015).



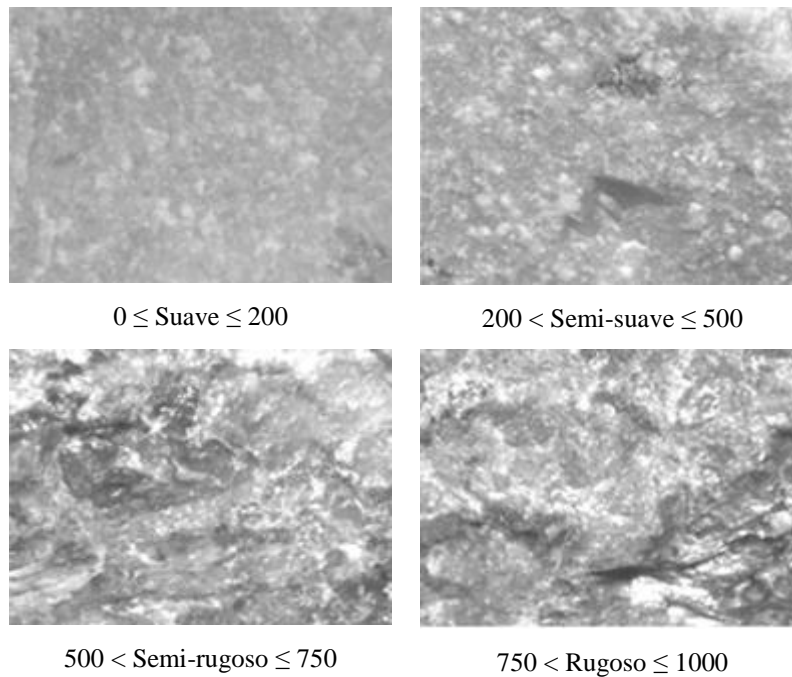
**Figura 3.18** - Escalas de forma (2D) para agregados miúdos.

O ensaio determina o índice de angularidade tanto para os agregados miúdos quanto para os graúdos e caracteriza as variações no contorno do grão que influenciam a forma geral, podendo variar de 0 a 10000 (Figura 3.19), com um círculo perfeito tendo valor próximo a zero (SILVA, 2015).



**Figura 3.19** - Escalas de angularidade para agregados miúdos e graúdos.

O índice de textura determinado pelo ensaio aplica-se somente aos agregados graúdos e descreve as alterações de suavidade ou rugosidade da superfície das partículas, sua escala varia de 0 a 1000 (Figura 3.20), onde um índice de textura próximo a zero indica uma superfície lisa e polida.



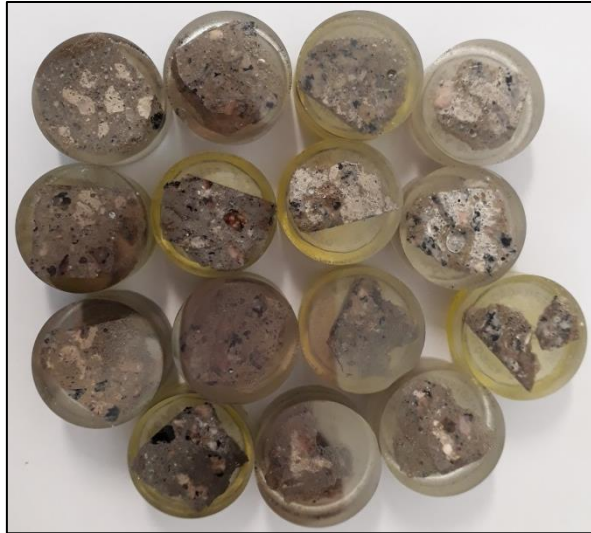
**Figura 3.20** - Escalas de textura para o agregado graúdo.

Nesta pesquisa foram analisadas as britas ARC e natural. Como as britas utilizadas nesta pesquisa é do tipo brita 0, foram analisadas os grãos retidos nas peneiras de 9,5 e 4,75mm, a fração retida na peneira de 2,36mm (#8) também foi analisada, no entanto como agregado miúdo.

### **3.2.14 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura**

A microscopia eletrônica foi utilizada na investigação das interfaces de ligação entre os agregados graúdos naturais e a argamassa nova e a argamassa aderida do agregado reciclado de concreto, além da ligação entre os dois tipos de argamassa presente no concreto. Para isso, foram utilizadas amostras fraturadas provenientes dos corpos-de-prova que passaram por ensaio de compressão.

Foram separadas amostras dos concretos das duas classes para cada faixa de temperatura estudada. Essas amostras foram embutidas em resina epoxi transparente, após a secagem passaram por desbastamento com álcool isopropílico e polimento com suspensão de diamante e em seguida foram recobertas com uma fina camada de carbono (Figura 3.21), esses procedimentos foram realizados no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).



**Figura 3.21** – Amostras dos corpos-de-prova fraturados embutidos em resina.

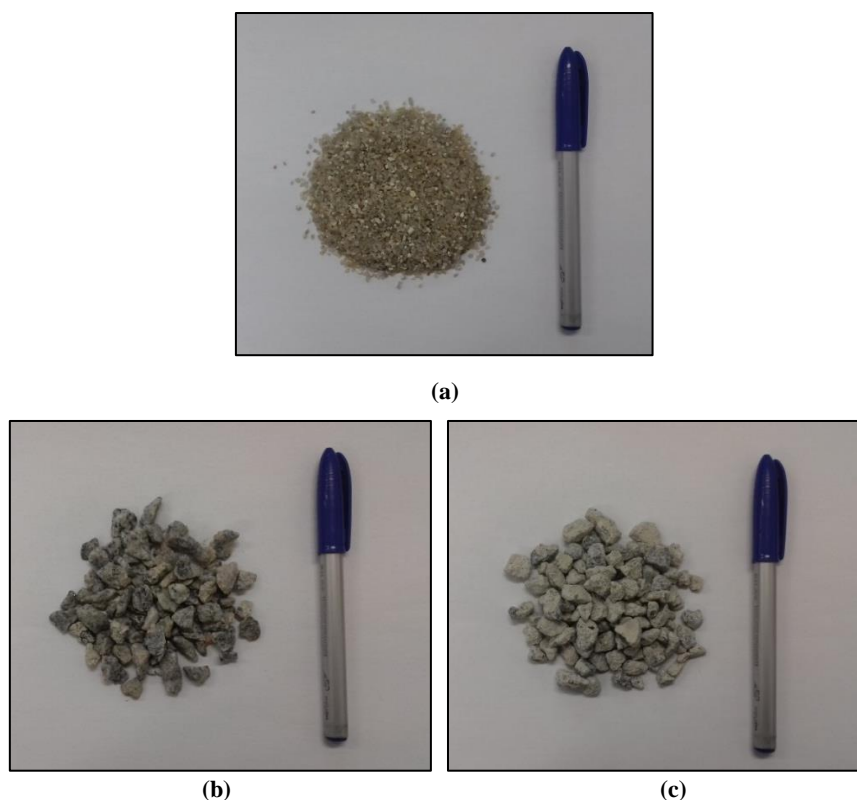
A análise foi realizada em um microscópio MEV FEI Quanta 400 no CETEM. Neste caso, as micrografias foram detectadas por elétrons retroespalhados (RE), com o microscópio operando a 20 kV em alto vácuo.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS: RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

#### **3.3.1 Agregados**

##### *3.3.1.1 Propriedades físicas*

Para a produção dos concretos, como agregado miúdo, foi utilizada uma areia natural quartzosa, proveniente do Rio Guandu, no Rio de Janeiro (Figura 3.22-a). Como agregado graúdo, foram utilizados dois tipos de brita 0 (tamanho de grão entre 4,75 e 9,5 mm). A brita natural é de origem granítica (Figura 3.22-b), a brita reciclada, que será denominada como “brita ARC” (Figura 3.22-c), é derivada de processos de beneficiamento de vigas de concreto produzidas em laboratório (AMARIO, 2015; RANGEL, 2015). O concreto de origem utilizado para a confecção das vigas foi produzido com areia natural, gnaisse britado com dimensão máxima de 19 mm, cimento Portland CPV-ARI, com resistência à compressão média de cerca de 30 MPa (VAZ, 2013).



**Figura 3.22** - Agregados naturais e reciclados: (a) areia natural; (b) brita 0 natural; (c) brita ARC.

As propriedades físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** - Propriedades físicas dos agregados utilizados na pesquisa.

<b>Propriedades físicas</b>	<b>Areia natural</b>	<b>Brita natural</b>	<b>Brita ARC</b>
<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2298,3	2711,4	2610,0
<b>Absorção total (%)</b>	0,34	1,81	5,28
	Classe 1	0,716	0,542
<b>Compacidade</b>	Classe 2	0,744	0,545
	Classe 3	-	0,543

É possível notar que a massa específica do agregado graúdo reciclado é menor que a do graúdo natural. A maior porosidade do agregado reciclado, resultante da argamassa aderida, justifica esse resultado. Em relação à absorção total, observa-se que o agregado reciclado (5,28%) apresenta valor maior que o agregado graúdo natural (1,81%), resultado também explicado pela maior porosidade da brita ARC.



As propriedades granulométricas e as curvas granulométricas dos agregados são apresentadas a seguir na Tabela 3.5 e na Figura 3.23, respectivamente.

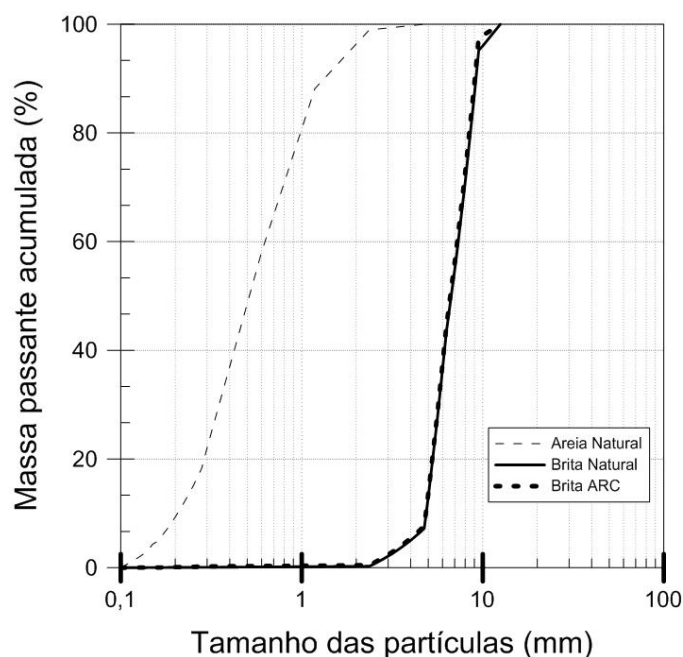


Figura 3.23 - Curvas granulométricas dos agregados.

Tabela 3.5 - Propriedades granulométricas dos agregados.

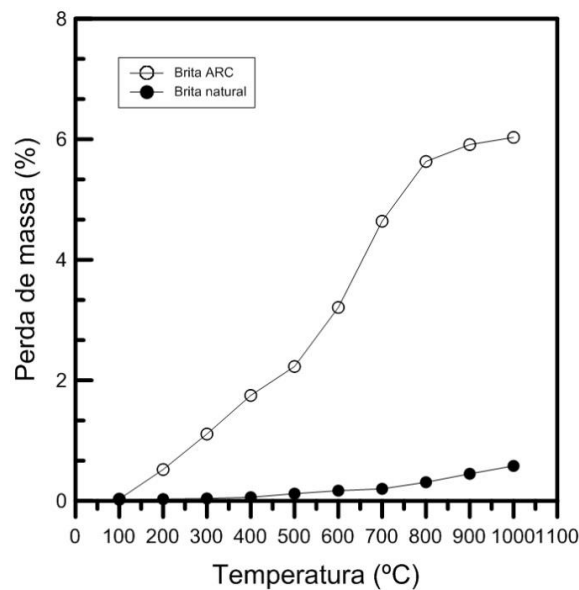
Propriedades granulométricas	Areia Natural	Brita Natural	Brita ARC
Dimensão máxima (mm)	4,75	9,5	9,5
Módulo de finura	2,66	-	-
Classificação	Média	-	-

Os agregados graúdos reciclado e natural utilizados na produção dos concretos passaram por aquecimento. A perda de massa foi determinada a cada 100 °C, as amostras foram expostas a cada temperatura por 1 hora, a taxa de elevação utilizada foi de 2°C/min, os resultados obtidos são expostos na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6** – Valores médios de perda de massa apresentados pelos agregados graúdos.

Temperatura	Perda de massa (%) – CV (%)	
	Brita ARC	Brita natural
100 °C	0,03 (3,5)	0,02 (2,1)
200 °C	0,52 (6,9)	0,03 (5,4)
300 °C	1,11 (6,2)	0,04 (1,5)
400 °C	1,75 (1,7)	0,06 (3,7)
500 °C	2,23 (3,3)	0,12 (3,5)
600 °C	3,21 (3,4)	0,17 (3,2)
700 °C	4,64 (6,3)	0,19 (1,8)
800 °C	5,63 (3,6)	0,28 (3,2)
900 °C	5,91 (5,2)	0,29 (3,9)
1000 °C	6,03 (3,0)	0,50 (0,7)

Os resultados indicam que o agregado reciclado apresenta perda de massa muito superior ao agregado natural. Esse comportamento se deve à argamassa presente no agregado reciclado, que é um material poroso e propenso à perda de massa em função do aquecimento (Figura 3.24).



**Figura 3.24** – Comparação das curvas de perda de massa entre a brita ARC e a brita natural.

### 3.3.1.2 Taxa de argamassa aderida

Foram utilizados dois métodos distintos para a determinação da taxa de argamassa aderida dos agregados reciclados utilizados, tratamento térmico e análise de imagens. A Tabela 3.7 apresenta os resultados experimentais das 10 amostras e a taxa média de argamassa aderida da brita reciclada, 41,8% em relação à massa de brita ARC, determinada através do tratamento com choque térmico.

**Tabela 3.7** – Resultados encontrados para a taxa de argamassa aderida a partir do choque térmico.

<b>Amostra</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Taxa (%)</b>
<b>1</b>	200,5	115,4	42,4
<b>2</b>	200,5	122,1	39,1
<b>3</b>	100,3	54,5	45,6
<b>4</b>	100,8	61,0	39,4
<b>5</b>	100,2	58,8	41,3
<b>6</b>	100,4	56,7	43,4
<b>7</b>	100,1	57,6	42,4
<b>8</b>	100,8	60,2	40,3
<b>9</b>	100,5	58,6	41,7
<b>10</b>	100,4	57,9	42,2
<b>Média (%) – CV (%)</b>			<b>41,8 (4,6)</b>

A análise de imagem utilizada para quantificar a argamassa aderida presente nos ARCs foi realizada a partir de cinco corpos-de-prova, que foram cortados para a análise das imagens da parte central de cada corpo-de-prova. Para a comparação com a taxa determinada através do tratamento térmico, que é baseada em massa, os dados obtidos através das imagens, em termos de área de superfície, foram convertidos através das equações analíticas (item 3.2.12.2) para quantidades com base em massa. A Tabela 3.8 apresenta o resumo dos dados obtidos pela imagem de cada amostra.

**Tabela 3.8** – Dados da análise das imagens.

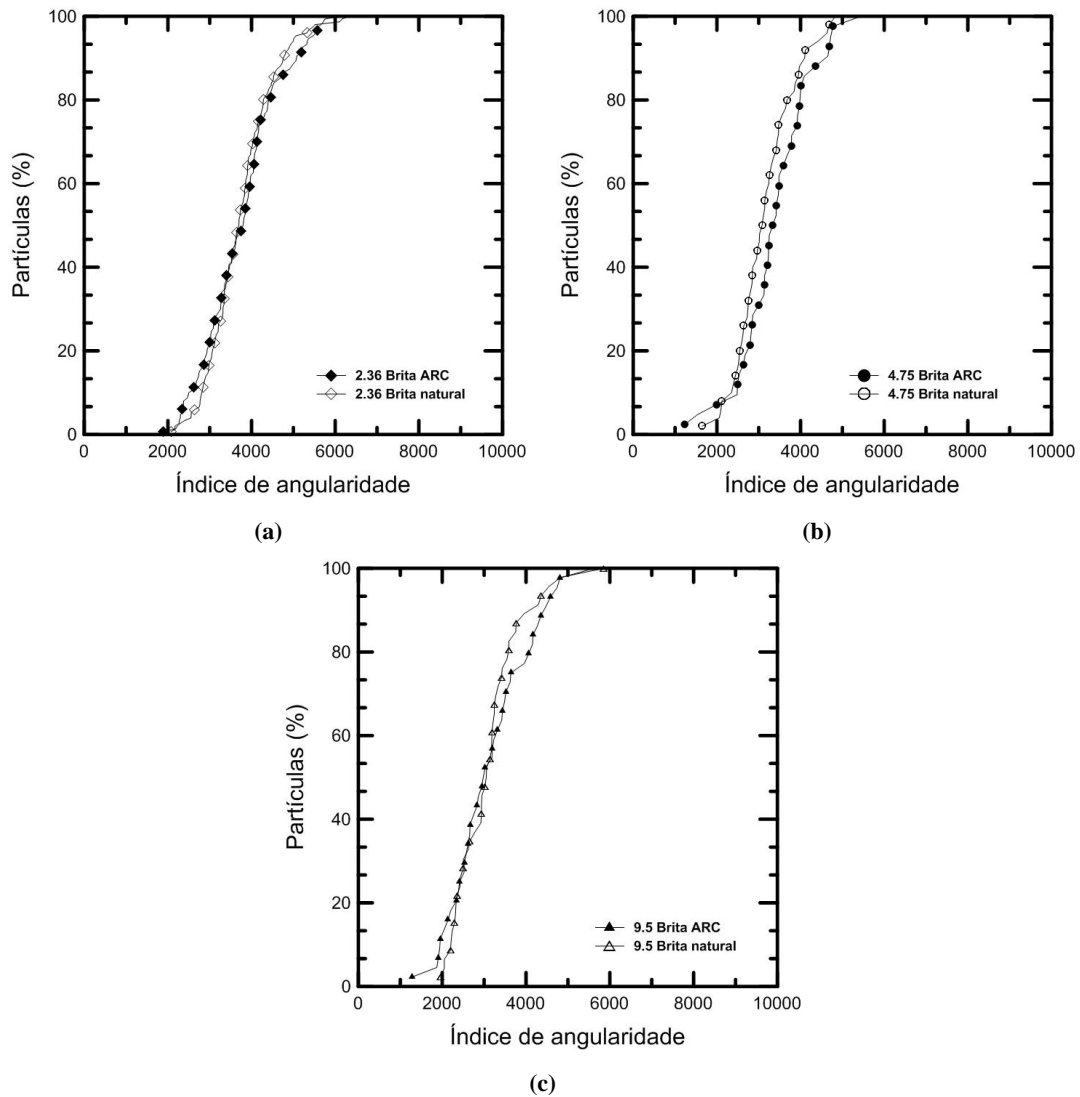
<b>Amostra</b>	<b>A<sub>TOTAL</sub> (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>A<sub>ARG</sub> (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Taxa<sub>área</sub> (%)</b>	<b>Massa<sub>NAT</sub> (g)</b>	<b>Massa<sub>ARG</sub> (g)</b>	<b>Taxa<sub>massa</sub> (g)</b>
<b>1</b>	13,3	5,9	43,4	34,7	15,1	43,4
<b>2</b>	8,2	3,9	46,6	21,4	9,9	46,6
<b>3</b>	29,6	4,6	48,7	77,0	37,5	48,7
<b>4</b>	13,0	6,1	45,8	34,0	15,6	45,8
<b>5</b>	12,6	5,5	42,6	33,0	14,0	42,6
<b>Média</b>			48,6			45,4
<b>CV (%)</b>			5,2			5,4

A taxa da argamassa aderida determinada a partir das imagens foi de 45,4% em relação à área de brita ARC, valor dentro da faixa de variação da taxa encontrada através do choque térmico, confirmando que a estimativa realizada pelo teste de laboratório fornece uma medida razoável da argamassa aderida presente no agregado reciclado, embora seja necessário um maior número de testes, com maior diversidade de agregados reciclados para confirmar a confiabilidade do método de choque térmico.

Os resultados encontrados estão próximos às taxas citadas na literatura para essa granulometria (BUTLER, 2012; JUAN; GUTIÉRREZ, 2008). No entanto essa faixa de valores relatados ainda é muito abrangente devido à dispersão observada entre estudos que utilizaram o mesmo método, decorrente da variabilidade dos agregados reciclados estudados, em função das diferentes fontes e qualidade dos concretos de origem, assim como a dimensão das partículas analisadas, o agregado natural utilizado na produção do concreto de origem e o tipo de beneficiamento adotado. Estes resultados evidenciam a heterogeneidade do agregado reciclado de concreto e confirma a necessidade de conhecer e levar em consideração suas propriedades.

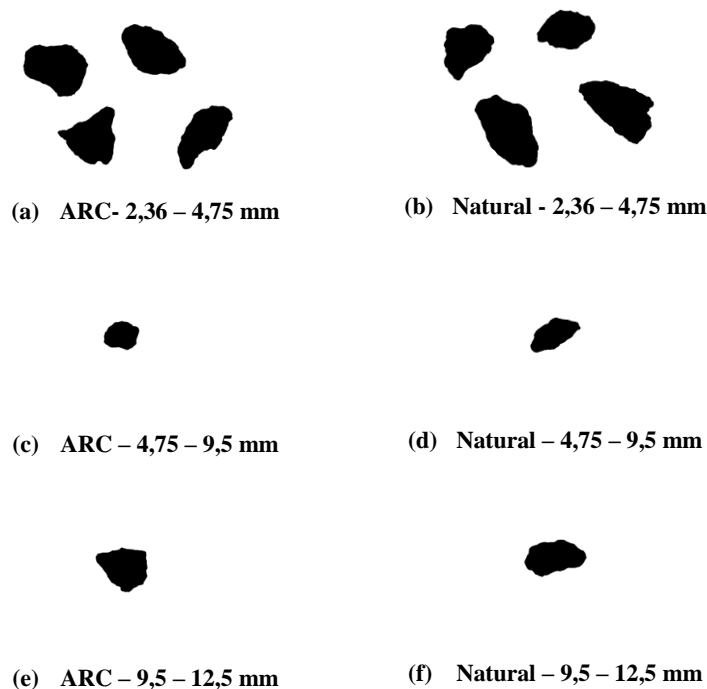
### 3.3.1.3 Morfologia dos agregados graúdos por AIMS

Os resultados nas curvas de distribuição cumulativas obtidas através do AIMS, para o índice de angularidade das partículas passantes na peneira 4,75mm e retidas na peneira de abertura 2,36mm (Figura 3.25-a), passante na peneira 9,5mm e retida na peneira de abertura 4,75mm (Figura 3.25-b) e passante na peneira de 12,5mm e retida na peneira de 9,5mm de abertura são apresentados na (Figura 3.25-c)



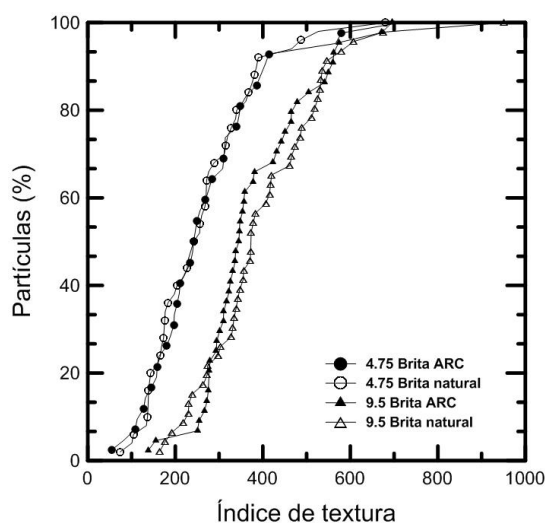
**Figura 3.25** – Curvas de angularidades obtidas através do AIMS para as granulometrias analisadas.

Para todas as faixas granulométricas utilizadas, a brita ARC e natural apresentaram curvas de angularidade semelhantes, resultando em índices de angularidade similares. O índice de angularidade médio para a brita ARC foi de 3574,7 e para a brita natural o índice foi de 3505. De acordo com Al Rousan (2005) é possível classificar as duas britas como sub-arredondadas, com pouca presença de angularidades em seu contorno. A Figura 3.26 apresenta as imagens obtidas dos agregados analisados. Para partículas com dimensão entre 2,36 – 4,75 mm o aumento é de 55 vezes, 4,75 – 9,5 mm o aumento é de 22 vezes e 9,5 – 12,5 o aumento é de 22 vezes.

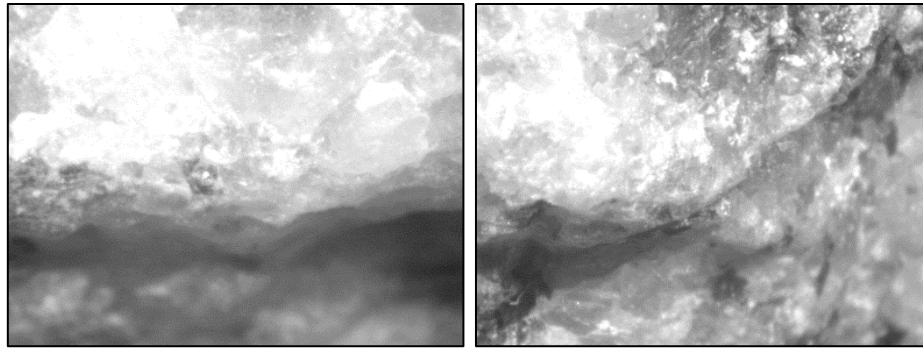


**Figura 3.26** – Imagens dos agregados para a determinação do índice de angularidade.

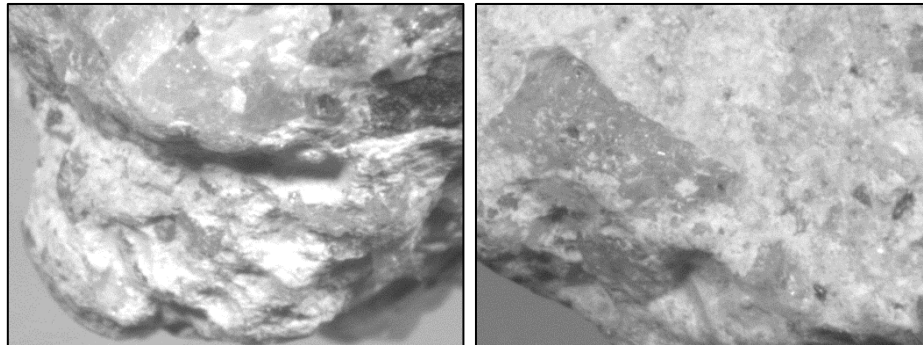
A distribuição cumulativa da textura superficial dos agregados estudados está apresentada na Figura 3.27. Os agregados apresentam texturas diferentes entre as granulometrias estudadas (4,75 e 9,5mm), onde as partículas maiores mostraram-se mais rugosas que as menores. Entretanto não há diferenças significativas entre as texturas das britas naturais e recicladas para as partículas de mesma granulometria. O índice de textura médio apresentado pela brita ARC foi 324 enquanto que o da brita natural foi de 326,8. A classificação segundo Al Rousan (2005) indica que a textura das duas britas é semi-suave. Algumas das imagens fonecidas pelo AIMS são apresentadas na Figura 3.28, com aumento de 22 vezes.



**Figura 3.27** – Curvas de índice de texturas.



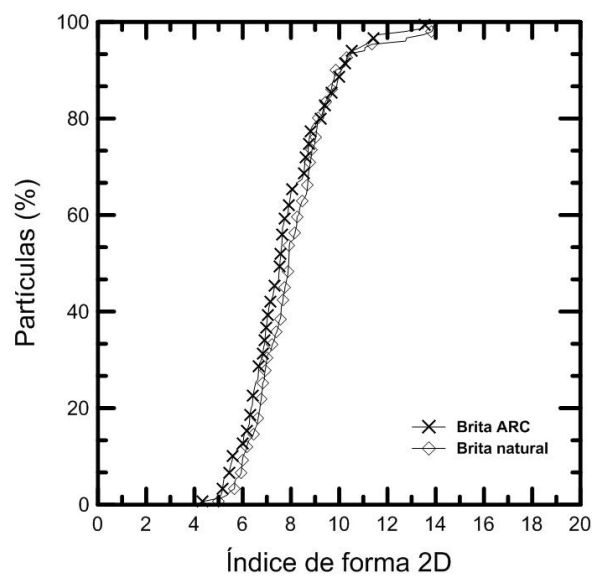
(a) Brita natural



(b) Brita reciclada de concreto

**Figura 3.28** – Imagens da análise de textura obtidas por AIMS, com aumento de 22 vezes.

O índice de forma 2D foi realizado apenas para as partículas retidas na peneira de 2,36mm (#8), os gráficos dos agregados referentes a este índice são apresentados na Figura 3.29.



**Figura 3.29** – Curvas do índice de forma 2D.

O índice médio de forma 2D foi de 7,8 para a brita ARC, sendo classificada como semi-circular, e de 8,14 para a brita natural, classificada como semi-alongada. Embora

apresentem classificações diferentes, segundo os padrões da literatura, as curvas cumulativas são muito próximas, indicando que a forma 2D das britas são semelhantes e que não há diferença significativa entre elas para essa propriedade.

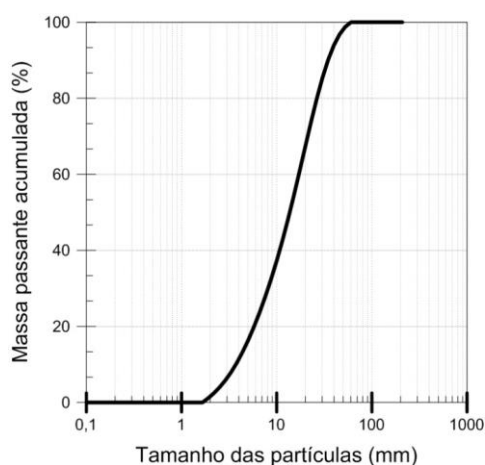
### 3.3.2 Cimento

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland CPV – ARI (Figura 3.30), um tipo de cimento que apresenta alta resistência inicial, produzido pela empresa Holcim, em conformidade com a NBR 5733 (1991).



**Figura 3.30** - Amostra do cimento CPV - ARI.

Suas propriedades físicas, mecânicas, granulométricas e composição química são encontradas na Tabela 3.9 O cimento apresenta compactidade igual a 0,53, massa específica e  $3201,9 \text{ kg/m}^3$  e resistência à compressão aos 28 dias de 43,7 MPa. A Figura 3.31 apresenta a curva granulométrica do cimento.



**Figura 3.31** - Curva granulométrica do cimento.



**Tabela 3.9** - Composição química e propriedades físicas, mecânicas e granulométricas do cimento CPV - ARI.

<b>Composto</b>	<b>Composição (%)</b>	<b>Propriedades físicas e mecânicas CPV - ARI</b>	
<b>CaO</b>	71,221	<b>Massa específica</b>	3201,9
<b>SiO<sub>2</sub></b>	14,801	<b>Compacidade sem aditivo</b>	0,52
<b>SO<sub>3</sub></b>	4,111	<b>Compacidade com aditivo</b>	0,59
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,537	<b>Perda ao fogo (%)</b>	4,02
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,479	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	1 dia 21,0 (6,3)
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,007		3 dias 34,6 (3,4)
<b>SrO</b>	0,433		7 dias 37,4 (2,5)
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,278		28dias 43,7 (2,9)
<b>MnO</b>	0,132	<b>Propriedades granulométricas CPV - ARI</b>	
<b>CuO</b>	0,016	<b>D<sub>90</sub> (µm)</b>	32,9
<b>ZnO</b>	0,015	<b>D<sub>50</sub> (µm)</b>	12,0

### 3.3.3 Aditivo químico – Superplastificante

O superplastificante utilizado neste estudo foi o Glenium 51 (Figura 3.32), produzido pela empresa BASF, que tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, causando redução do consumo de água, favorecendo a trabalhabilidade, sem alterar o tempo de pega.



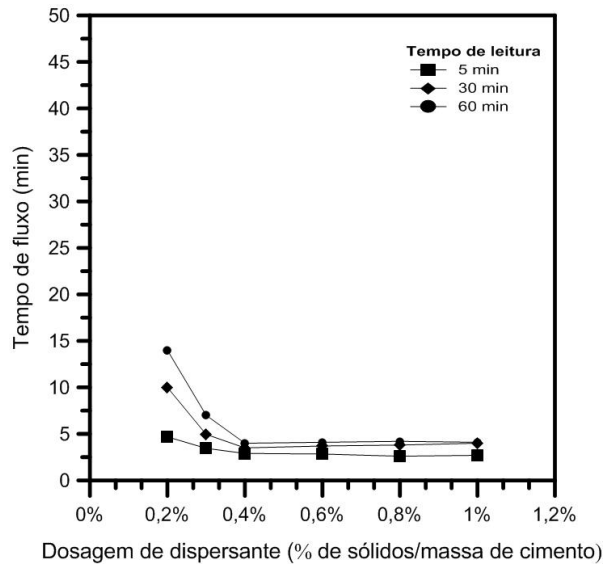
**Figura 3.32** - Superplastificante Glenium 51.

A Tabela 3.10 apresenta as principais propriedades do aditivo superplastificante, fornecidas pelo fabricante. Para o cálculo das dosagens foram utilizados os valores médios de densidade e teor de sólidos.

**Tabela 3.10** - Propriedades do aditivo superplastificante (www.basf.com.br).

<b>Descrição</b>	<b>Características</b>
<b>Tipo</b>	Éter policarboxílico
<b>Aparência</b>	Líquido branco turvo
<b>pH</b>	5 – 7
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,067 – 1,107
<b>Teor de sólidos (%)</b>	28,5 – 31,5

O ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI corresponde à dosagem de 0,4% de sólidos do dispersante em relação à massa de cimento. A compatibilidade e o ponto de saturação desses materiais é apresentado na Figura 3.33.



**Figura 3.33** - Ponto de saturação do superplasticante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI.

### 3.3.4 Água

A água utilizada na produção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

# 4. DOSAGEM, PRODUÇÃO, MOLDAGEM E AQUECIMENTO DOS CONCRETOS

## 4.1 DOSAGEM

A dosagem científica dos concretos estudados nesta pesquisa foi realizada com base no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999), com o auxílio do programa *Bentolab Pro 3*, que possibilita a configuração de diferentes traços dos materiais de acordo com as propriedades desejadas para o concreto. Para isso, foi criado um banco de dados com as características dos materiais utilizados para assim estimar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

Duas classes de concreto foram dosadas com relação à resistência à compressão aos 28 dias: uma classe de concreto de resistência convencional e uma classe de concreto de alta resistência, essas classes serão denominadas, ao longo deste trabalho, “C25” e “C65” para resistência à compressão de 25 MPa e 65 MPa, respectivamente.

O agregado reciclado foi usado apenas na fração graúda e foram realizadas dosagens individuais para cada teor de brita ARC, ou seja, não foi feita a simples substituição do agregado natural pelo reciclado na dosagem de referência. Foram feitas dosagens de concreto com teores de 50 e 100% de agregado reciclado em relação ao volume total de agregado graúdo, e dosagens de concretos de referência sem agregado reciclado na mistura. Durante o trabalho, os teores de brita RCD de 0, 50 e 100% serão denominados por “00”, “50” e “100”, respectivamente. Assim, entende-se que o concreto C65-50 trata-se de um concreto de classe 65 MPa com teor de 50% de brita ARC. A consistência, medida pelo teste de abatimento de tronco, foi estimada para a faixa de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ .

A otimização das dosagens obtidas a partir do *Bentolab Pro 3* foi realizada em quatro etapas. A etapa inicial consistiu na criação do banco de dados com as propriedades determinadas na fase de caracterização dos materiais constituintes: agregados graúdos natural e reciclado, agregado miúdo natural, cimento e superplastificante. Como proposto por Amario (2015), os agregados reciclados foram utilizados na condição

compelatamente seca, e a absorção de água informada ao programa foi de 50% da taxa de absorção total apresentada pelo agregado reciclado. A segunda etapa compreendeu a calibração de parâmetros de cálculo da mistura, em que foi produzida uma quantidade de misturas e suas propriedades foram determinadas para, em seguida, serem inseridas no programa, o traço utilizado e os valores obtidos nos ensaios. Na terceira etapa, por meio dos parâmetros já definidos, se escolheu os traços mais adequados para a produção e testes adequados para conferir se as propriedades desejadas para os concretos foram atendidas. Na última etapa, os concretos foram produzidos com base nos traços escolhidos.

A criação do banco de dados dos constituintes no *Bentolab Pro 3* foi realizada a partir das propriedades dos materiais, determinadas no Capítulo 3.3 – Caracterização dos Materiais, massa específica, absorção de água, compacidade, granulometria, ponto de saturação, resistência à compressão com 1, 3, 7 e 28 dias do cimento.

#### **4.1.1 Traços adotados**

A escolha dos traços dos concretos fornecidos no *Betonlab Pro 3* foi realizada de acordo com os testes de abatimento de tronco de cone e resistência à compressão aos 7 dias. Algumas variáveis foram fixadas no programa, resistência à compressão aos 28 dias de 25 MPa para os concretos de resistência normal e 65 MPa para os concretos de alta resistência, com taxa de 0,4% de superplastificante (ponto de saturação) para todos os concretos, proporção de grãos de exatamente 50% em relação ao volume total de agregados na mistura, tanto para os concretos de referência quanto para os concretos reciclados. Para os concretos reciclados, foram estabelecidas faixa de utilização dos agregados reciclados de acordo com as taxas desejadas, em torno de 50% e 100% do volume de agregado grão total. A Tabela 4.1 apresenta as misturas que foram adotadas após passarem pelos testes e apresentarem propriedades aceitáveis.

Tabela 4.1 - Traços utilizados na produção dos concretos.

Misturas	Materiais (kg/m <sup>3</sup> )								
	Brita Natural	Brita ARC	Areia Natural	Cimento	SP	Água total	Água efetiva	a/c (efetiva)	Abatimento (mm)
C25-00	941,9	-	798,4	300	4,0	216,9	200	0,66	115
C25-50	441,1	458,2	776,8	319,4	4,2	237,4	213,1	0,66	120
C25-100	-	941,8	829,3	268,2	5,3	206,9	172,9	0,64	135
C65-00	895,2	-	758,8	500	6,67	187,1	170	0,34	130
C65-50	457,7	440,6	776	500	6,67	172,6	150	0,30	130
C65-100	-	858,4	755,8	550	7,33	179,2	150	0,27	140

## 4.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

### 4.2.1 Processo de mistura, moldagem e cura dos concretos

Os concretos foram produzidos em sala climatizada a  $21\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  utilizando-se um misturador do tipo betoneira (Figura 4.1). O procedimento de mistura adotado seguiu a recomendação de Amario (2015).



Figura 4.1 - Misturador utilizado na produção dos concretos.

As etapas de colocação dos materiais e o tempo necessário em cada fase deste processo são apresentados a seguir:

- a) lançamento de todos os agregados graúdos e miúdos, misturando-os por um minuto, promovendo a melhor homogeneização possível (Figura 4.2 a - Figura 4.2 c);
- b) adição de 50% da água total da mistura aos agregados, misturando-se por mais um minuto (Figura 4.2 d);
- c) adição do cimento, misturando-o por um minuto com os agregados (Figura 4.2 f);
- d) adição do restante da água e de todo o superplastificante (Figura 4.2 g a Figura 4.2 i) e homogeneização por mais oito minutos, tempo necessário para ação do superplastificante.



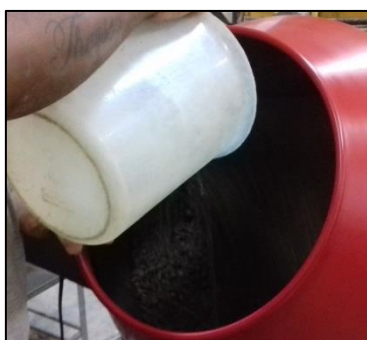
(a)



(b)



(c)



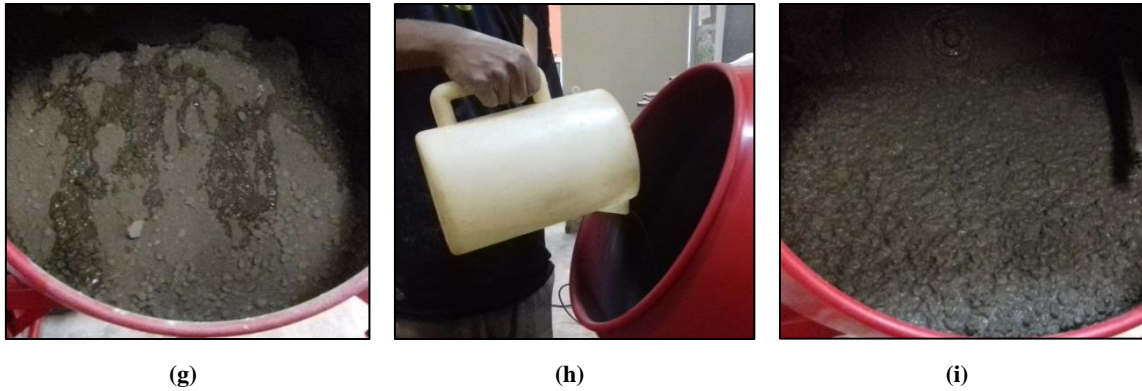
(d)



(e)



(f)



**Figura 4.2** – Etapas do processo de produção dos concretos: (a) e (b) lançamento dos agregados no misturador; (c) resultado da mistura dos agregado após um minuto; (d) adição da metade da água; (e) aspecto da mistura dos agregado com a água; (f) adição do cimento na mistura; (g) e (h) adição do superplastificante e do restante da água; (i) mistura após 8 minutos.

Terminado o procedimento de mistura iniciou-se a moldagem dos corpos-de-prova. O concreto foi lançado nos moldes em três camadas, em seguida foi adensado mecanicamente em mesa vibratória (68 Hz), com tempo de vibração de 30 segundos para cada camada (Figura 4.3).



**Figura 4.3** - Moldagem dos concretos: (a) pintura com óleo; (b) moldes; (c) lançamento do concreto no molde; (d) primeira camada após adensamento.



Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, com proteção contra a perda de umidade, cobertos com panos úmidos e mantidos em laboratório com temperatura controlada. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram colocados na câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram até as idades de ensaio.

#### **4.2.2 Metodologia de avaliação estatística dos resultados experimentais**

Para as propriedades avaliadas com repetição de ensaios iguais (3 ou mais determinações), técnicas estatísticas foram implementadas para validação dos resultados experimentais obtidos.

A comparação entre os diferentes tratamentos foi realizada através da análise de variância (ANOVA) com o auxílio do *software OriginPro 8*, ao nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ), pelo teste de comparação de médias de Tukey. Este teste permite avaliar qualquer discrepância entre duas médias de tratamentos e é baseada na Diferença Mínima Significativa (DMS), onde a estatística do teste é dada de acordo com a Equação 4.1:

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QMRes}{r}} \quad 4.1$$

Onde:

$\Delta$ : é a Diferença Mínima Significativa (DMS);

$q$ : é a amplitude total studentizada;

$QMRes$ : é o quadrado médio do resíduo,

$r$ : é o número de repetições.

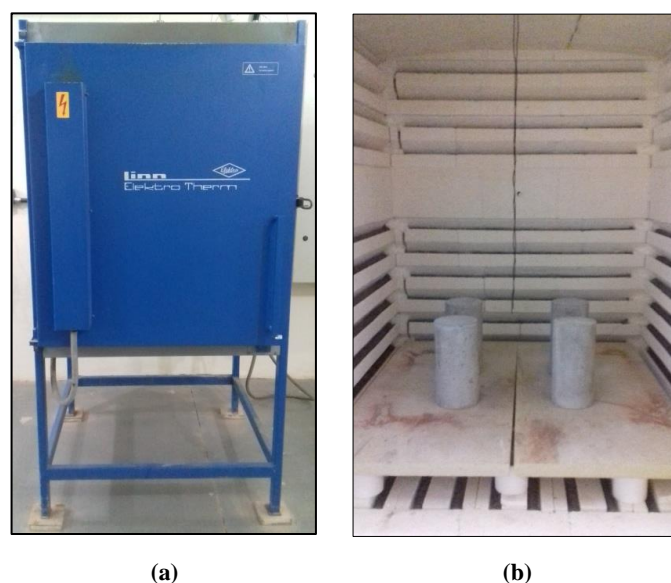
### 4.3 AQUECIMENTO DO CONCRETO

O trabalho estuda o comportamento de concretos reciclados quando estes são submetidos a níveis de temperaturas mais elevados. Para isso foram estudados quatro níveis de temperatura:

- 22°C (referência)
- 150°C
- 400°C
- 650°C

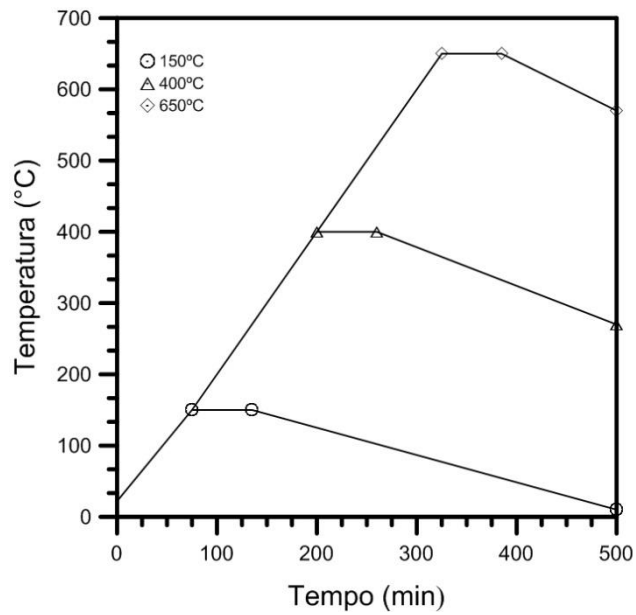
A fragmentação é uma das formas de degradação causada nas estruturas de concreto quando essas são expostas a altas temperaturas, onde ocorre o lascamento da superfície do elemento em razão da pressão causada pela umidade presente nos poros internos do concreto. Com o intuito de evitar esse fenômeno, aos 28 dias, os corpos-de-prova foram mantidos em estufa com temperatura constante e igual a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  até atingirem constância de massa.

A seguir, foi realizado o processo de aquecimento, o equipamento utilizado neste estágio foi o forno mufla Elektro Therm (Figura 4.4-a) que pode chegar até  $1300^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova saíram imediatamente da estufa para os fornos, evitando ao máximo o ganho de umidade (Figura 4.4-b).



**Figura 4.4** - Fornos utilizados para o aquecimento dos corpos-de-prova: (a) Elektro Therm, (b) corpos de prova no forno para o aquecimento.

A taxa de aquecimento utilizada foi de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , atingida a temperatura máxima do nível estudado, esta foi mantida constante durante uma hora (Figura 4.5), em seguida o equipamento foi desligado e o arrefecimento foi dado de forma natural, com a porta no forno fechada, quando atingida a temperatura de referência, os corpos-de-prova foram encaminhados para os ensaios mecânicos. Os corpos-de-prova foram envolvidos em plástico filme, para evitar ganho de umidade até passarem pelos ensaios mecânicos.



**Figura 4.5** - Curva tempo-temperatura do forno.

# 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

### 5.1.1 Comportamento sob ensaio de compressão axial

As curvas típicas tensão-deformação obtidas na temperatura de referência e após o aquecimento a 150, 400 e 900 °C para os concretos C25-00, C25-50 e C25-100 são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. As demais curvas encontram-se no Anexo A. Os resultados médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação axial de pico dos concretos C25 são mostrados na Tabela 5.1.

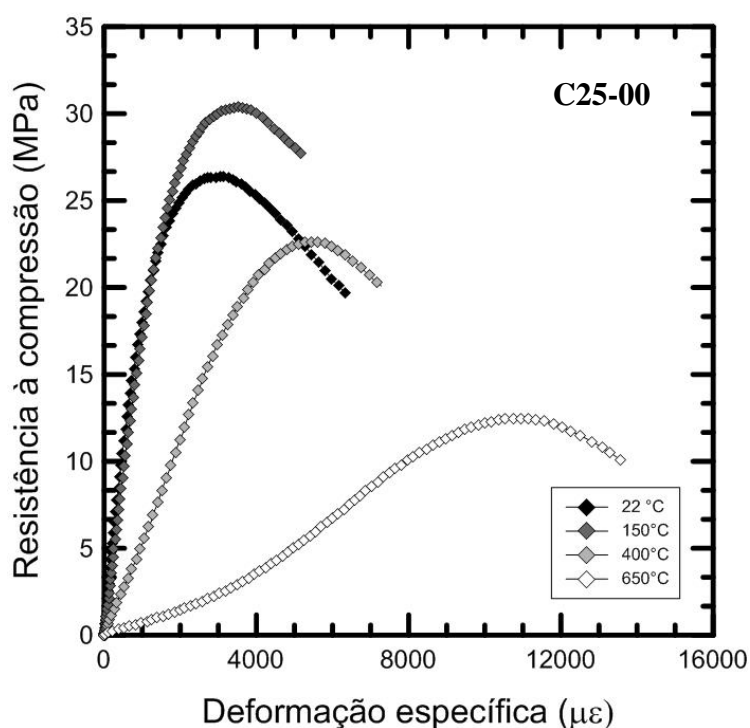
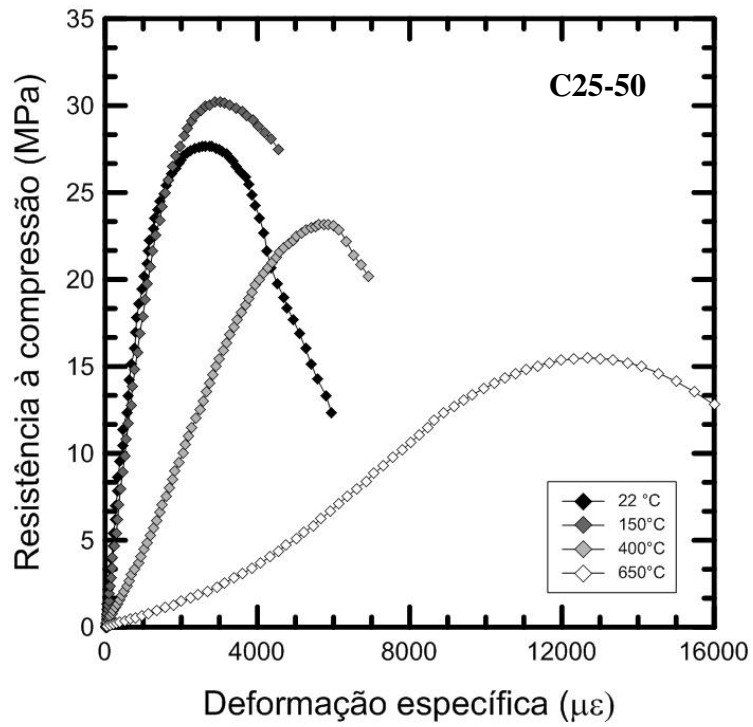
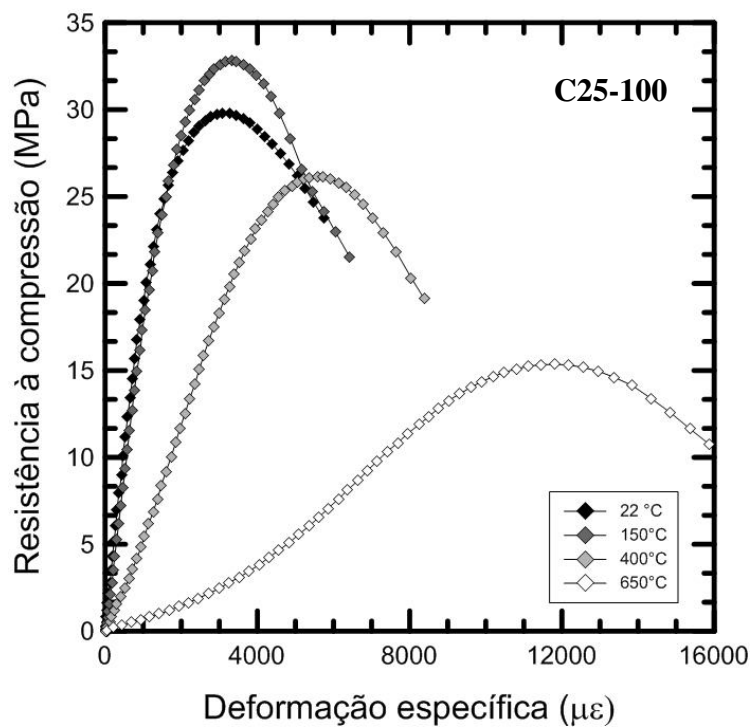


Figura 5.1 - Curvas tensão-deformação para o concreto C25-00 submetido a diferentes temperaturas.



**Figura 5.2** - Curvas tensão-deformação para o concreto C25-50 submetido a diferentes temperaturas.



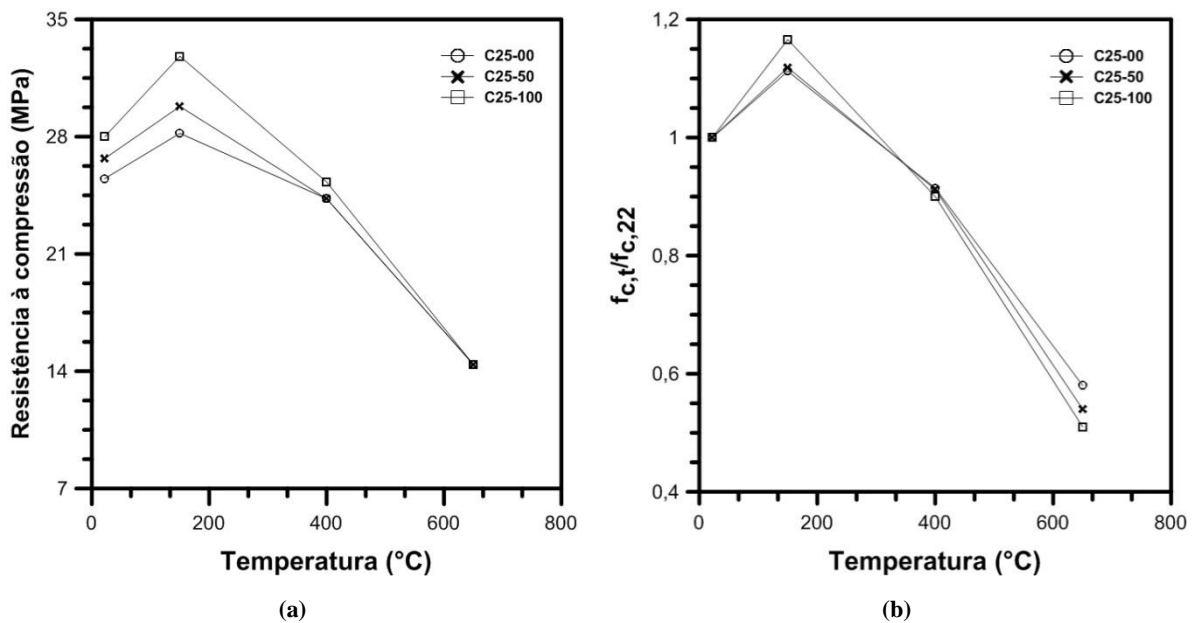
**Figura 5.3** - Curvas tensão-deformação para o concreto C25-100 submetido a diferentes temperaturas.

**Tabela 5.1** - Resultados médios das propriedades dos concretos C25 sob cargas de compressão axial, após serem submetidos a diferentes temperaturas.

Misturas	Temperatura	$f_c$ (MPa) – CV (%)	$\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ ) – CV (%)	E (GPa) – CV (%)
<b>C25-00</b>	22 °C	25,5 (6,1)	3108,1 (2,8)	20,1 (6,1)
	150 °C	28,2 (2,9)	3471,5 (1,6)	19,7 (3,5)
	400 °C	23,1 (4,8)	5488,3 (5,6)	7,5 (4,8)
	650 °C	14,2 (5,7)	11153,3 (6,4)	1,5 (2,9)
<b>C25-50</b>	22 °C	26,7 (2,9)	3218,4 (3,9)	20,5 (3,8)
	150 °C	29,8 (3,9)	3446,2 (2,6)	19,2 (5,8)
	400 °C	24,3 (5,2)	5661,2 (4,0)	7,3 (4,3)
	650 °C	14,4 (6,0)	11531,0 (2,6)	1,6 (5,2)
<b>C25-100</b>	22 °C	28,0 (6,4)	2796,7 (8,2)	21,4 (1,7)
	150 °C	32,8 (2,2)	2852,9 (1,8)	19,0 (1,4)
	400 °C	25,3 (4,8)	5810,8 (0,4)	7,6 (4,3)
	650 °C	14,4 (6,6)	11992,8 (4,0)	1,8 (3,1)

Como é possível observar, o comportamento tensão-deformação dos concretos C25-00, C25-50 e C25-100 apresenta mudanças com o aumento da temperatura. Nota-se a redução nos valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade assim como o aumento nas deformações de pico, fazendo com que as curvas desloquem-se para a direita e tornem-se cada vez mais achatadas. Esse comportamento decorre da desidratação dos produtos de hidratação e, possivelmente, da microfissuração da pasta de cimento e dos descolamentos e fissurações na interface argamassa-agregado (ver discussão no item 5.1.5).

A Figura 5.4 mostra a variação da resistência à compressão com a temperatura e a razão entre a resistência à compressão residual e a resistência à compressão inicial antes do aquecimento, para os concretos C25-00, C25-50 e C25-100.

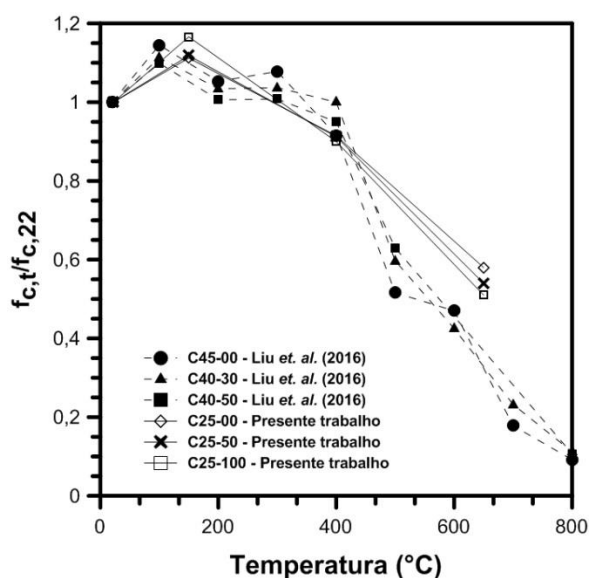


**Figura 5.4** – Comportamento da resistência à compressão dos concretos em função da temperatura: (a) variação da resistência à compressão com a temperatura; (b) relação entre as resistências à compressão residuais e iniciais.

Os resultados iniciais médios de resistência à compressão apresentados pelos concretos C25-00 e C25-100 apresentaram, segundo a análise estatística, variações significativas e não podem ser considerados estatisticamente iguais. O concreto C25-100 apresentou a maior resistência à compressão entre as misturas e esse resultado pode ser atribuído a menor relação a/c efetiva (ver Tabela 4.1). Após serem submetidos a 150 °C, todas as misturas apresentaram resistências residuais maiores que os resultados obtidos na temperatura ambiente. Em comparação às misturas C25-00 e C25-50, a mistura C25-100 obteve maior acréscimo na resistência. Em termos relativos observa-se um aumento no valor da resistência à compressão da ordem de 11% para as misturas C25-00 e C25-50 e de 17% para C25-100, quando estes são expostos a 150°C (ver Figura 5.4 b). Após exposição à temperatura de 400 °C todos os concretos apresentaram queda de resistência. A redução no valor da resistência à compressão para as misturas de referência e com 50% de ARC foi de 9%, enquanto que para a mistura produzida apenas com brita ARC a redução foi de 10%. Após exposição a 650 °C a resistência à compressão das misturas C25-00, C25-50 e C25-100 sofreu perda de 44,3%, 46% e 48,7%, respectivamente (ver Figura 5.4 b). Note que nessa temperatura a presença de maiores teores de ARC conduziram a reduções um pouco mais altas na resistência a compressão dos concretos. A redução mais expressiva na resistência dos concretos após

o aquecimento a 650 °C está associada a desidratação não apenas do C-S-H mas também do CH que ocorre por volta de 400-450°C.

Liu *et al.*(2016) realizaram estudo semelhante em concretos com teores de substituição de 30 e 50% de agregado natural por ARC e expondo-os a altas temperaturas por 4 horas, à uma taxa de aquecimento e arrefecimento de 5 °C/min. Os resultados encontrados pelos autores mostraram acréscimo de resistência à compressão após exposição até 100 °C, com taxas muito semelhantes as registradas por esse trabalho após o aquecimento a 150 °C. Os autores atribuem esse ganho de resistência à presença de Nano-SiO<sub>2</sub> em seus concretos, que pode causar maior hidratação e efeitos pozolânicos no concreto, aumentando a resistência do concreto. Para temperatura de 400 °C e acima, os autores também observaram reduções na resistência para todas as misturas estudadas. Esses resultados mostram que, embora as características dos materiais utilizados, a taxa de aquecimento e o período de exposição sejam diferentes, o comportamento geral observado é bastante semelhante ao do presente estudo.



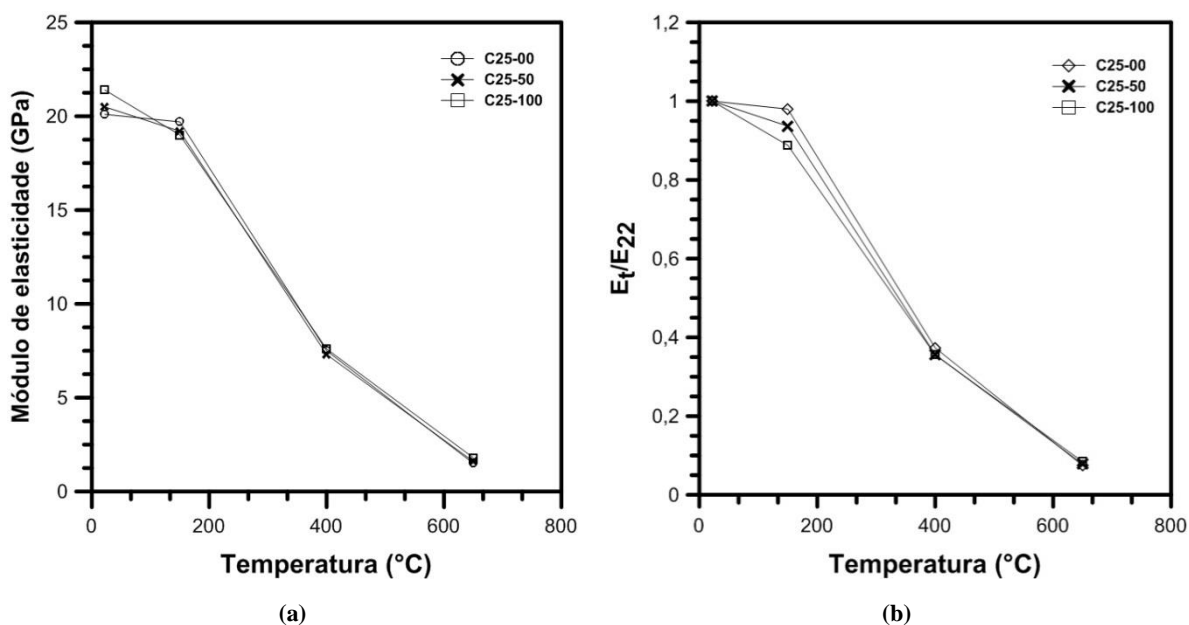
**Figura 5.5** – Comparação entre os resultados do presente estudo e os resultados obtidos por Liu *et al.*(2016).

No entanto, comportamentos divergentes a estes são também encontrados na literatura, como a pesquisa de Sarhat e Sherwood (2013) e Zega e Di Maio (2008) que observaram queda na resistência à compressão de todos os concretos produzidos com ARC após exposição a altas temperaturas por 1 hora, no entanto, em comparação aos concretos de referência, os concretos com ARC mostraram sempre desempenho superior. No estudo realizado por Gupta *et al.*(2012) a resistência à compressão de concretos de classe C25,



com teores de utilização de brita ARC similares a este estudo, reduziu conforme a temperatura aumentou e o concreto produzido apenas com brita reciclada de concreto mostrou desempenho inferior aos demais.

A exposição a altas temperaturas também causou impactos negativos no módulo de elasticidade dos concretos. A Figura 5.6 mostra a variação do módulo de elasticidade com a temperatura e a relação entre o módulo de elasticidade residual e o inicial, antes do aquecimento, para os concretos C25-00, C25-50 e C25-100.



**Figura 5.6** - Comportamento do módulo de elasticidade dos concretos em função da temperatura: (a) variação do módulo de elasticidade com a temperatura; (b) relação entre módulos de elasticidade residuais e iniciais.

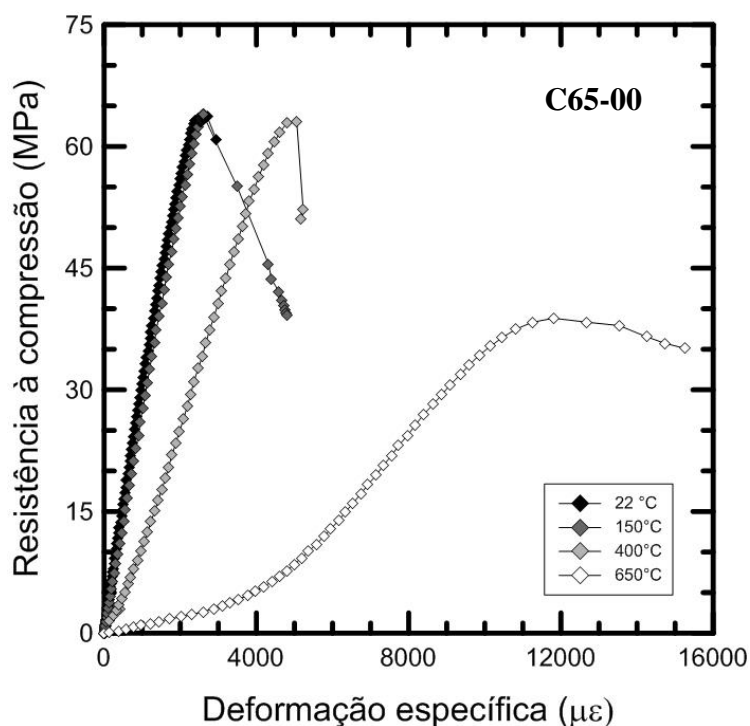
Assim como observado para os resultados de resistência, os resultados médios do módulo de elasticidade dos concretos C25-00 e C25-100 apresentaram variações estatísticas significativas. Essa propriedade foi afetada pela exposição a altas temperaturas, no entanto, de forma ainda mais crítica que a resistência à compressão. A exposição a 150 °C, por exemplo, causou redução nos valores de módulos de elasticidade das misturas (2%, 6,3% e 11,2% para os concretos contendo 0, 50 e 100% de ARC, respectivamente).

Para as temperaturas de 400 e 650 °C a presença de agregado reciclado não apresentou diferenças significativas em comparação à resposta do concreto contendo apenas agregado natural. Por exemplo, os módulos de elasticidade residuais apresentados pelos concretos C25-00, C25-50 e C25-100 são da ordem de 37,3%, 35,6% e 35,5% do valor

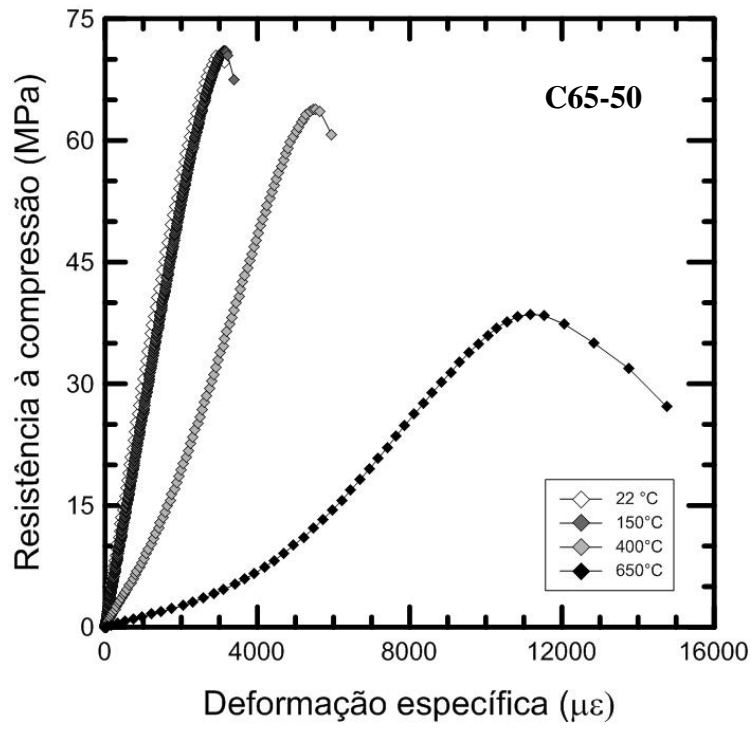
do módulo inicial, respectivamente. A exposição a 650 °C provocou reduções ainda mais acentuadas no módulo de elasticidade e uma redução de cerca de 92% é observada para as três misturas estudadas.

Os resultados obtidos por Zega e Di Maio (2009) também mostraram que o módulo de elasticidade apresenta grandes perda com o aumento da temperatura e que o módulo de elasticidade residual foi bastante semelhante para as diferentes porcentagens de ARC utilizadas. Liu et al. (2016) e Sarhat e Sherwood (2013) observaram, no entanto, que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto resultou em menores reduções de rigidez.

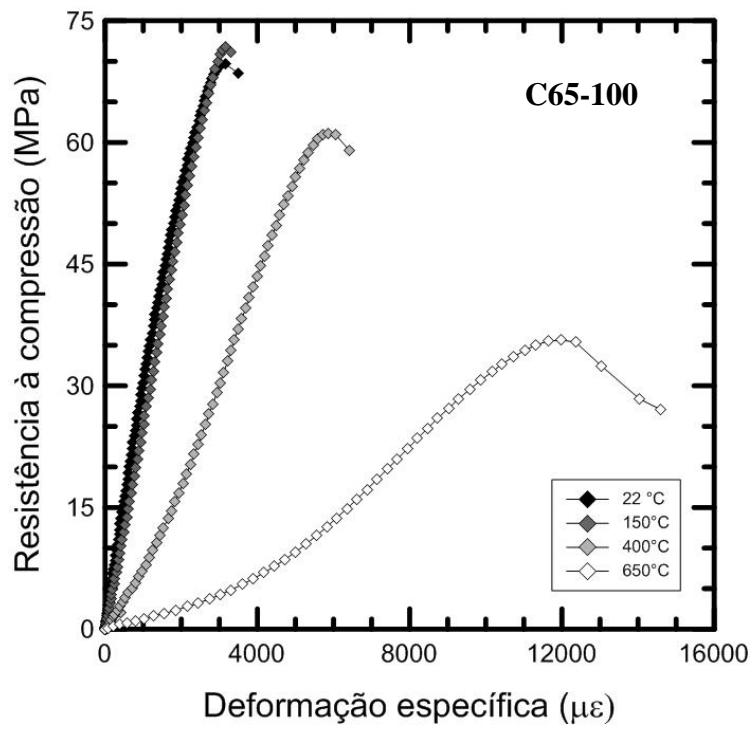
As curvas típicas tensão-deformação obtidas para os concretos C65-00, C65-50 e C65-100 são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9. As demais curvas encontram-se no Anexo A. Os resultados médios da resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação axial de pico dos concretos C65 são mostrados na Tabela 5.2.



**Figura 5.7** - Curvas tensão-deformação para o concreto C65-00 submetido a diferentes temperaturas.



**Figura 5.8** - Curvas tensão-deformação para o concreto C65-50 submetido a diferentes temperaturas.

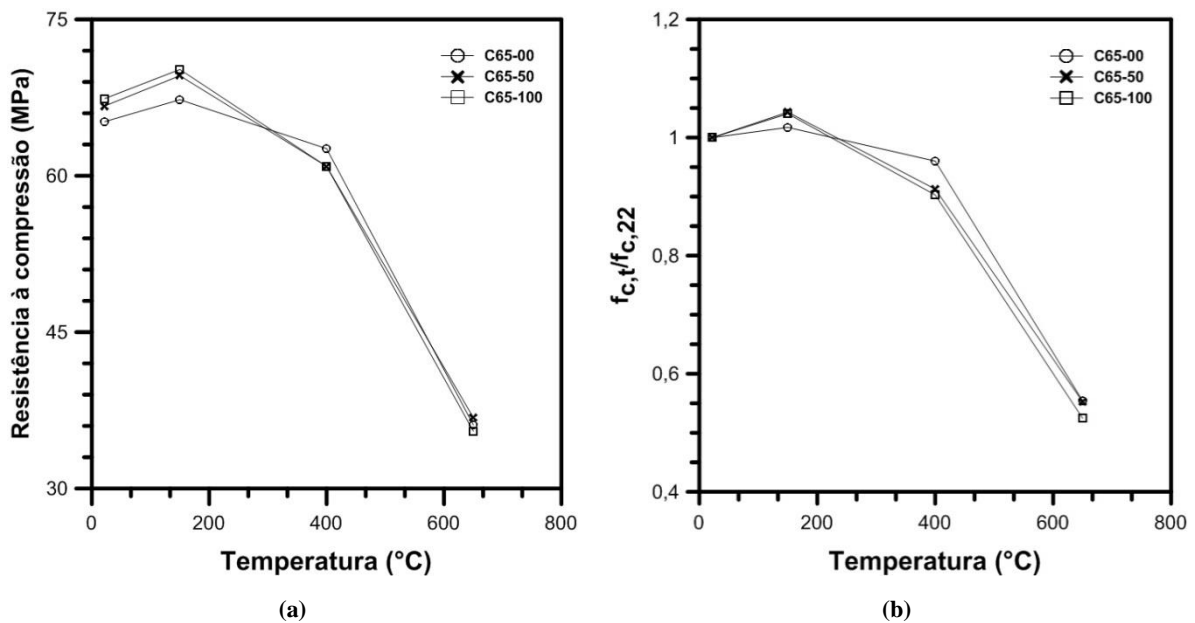


**Figura 5.9** - Curvas tensão-deformação para o concreto C65-100 submetido a diferentes temperaturas.

**Tabela 5.2** - Resultados médios das propriedades dos concretos C65 sob cargas de compressão axial, após serem submetidos a diferentes temperaturas.

Misturas	Temperatura	$f_c$ (MPa) – CV (%)	$\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ ) – CV (%)	E (GPa) – CV (%)
<b>C65-00</b>	22 °C	65,2 (3,5)	2661,2 (1,1)	30,7 (2,3)
	150 °C	67,3 (3,9)	2701,8 (2,6)	28,1 (2,2)
	400 °C	62,6 (3,1)	4881,3 (1,8)	16,0 (5,0)
	650 °C	36,1 (4,7)	11884,8 (7,2)	5,4 (2,4)
<b>C65-50</b>	22 °C	66,7 (1,6)	2917,5 (1,0)	30,6 (1,8)
	150 °C	69,6 (2,7)	3144,9 (0,4)	27,4 (1,7)
	400 °C	60,9 (4,1)	5491,3 (1,9)	14,5 (7,7)
	650 °C	36,8 (4,9)	11531,0 (2,6)	5,5 (4,5)
<b>C65-100</b>	22 °C	67,4 (3,5)	2796,7 (8,2)	30,7 (2,9)
	150 °C	70,2 (3,9)	2852,9 (1,8)	28,0 (5,4)
	400 °C	60,9 (3,1)	5810,8 (0,4)	14,2 (2,9)
	650 °C	35,5 (4,7)	11992,8 (4,0)	5,6 (3,0)

Assim como observado para os concretos de resistência normal, nota-se que o aumento da temperatura afetou fortemente as curvas de tensão-deformação dos concretos de alto desempenho. Após a exposição a 150°C, a resistência à compressão das três misturas também aumentou para o caso dos concretos de alto desempenho, mas com variações menores. As reduções apresentadas após exposição às temperaturas de 400 e 650 °C foram semelhantes para as duas classes de concreto. Na Figura 5.10 apresenta-se a variação da resistência à compressão com a temperatura para os concretos C65-00, C65-50 e C65-100.



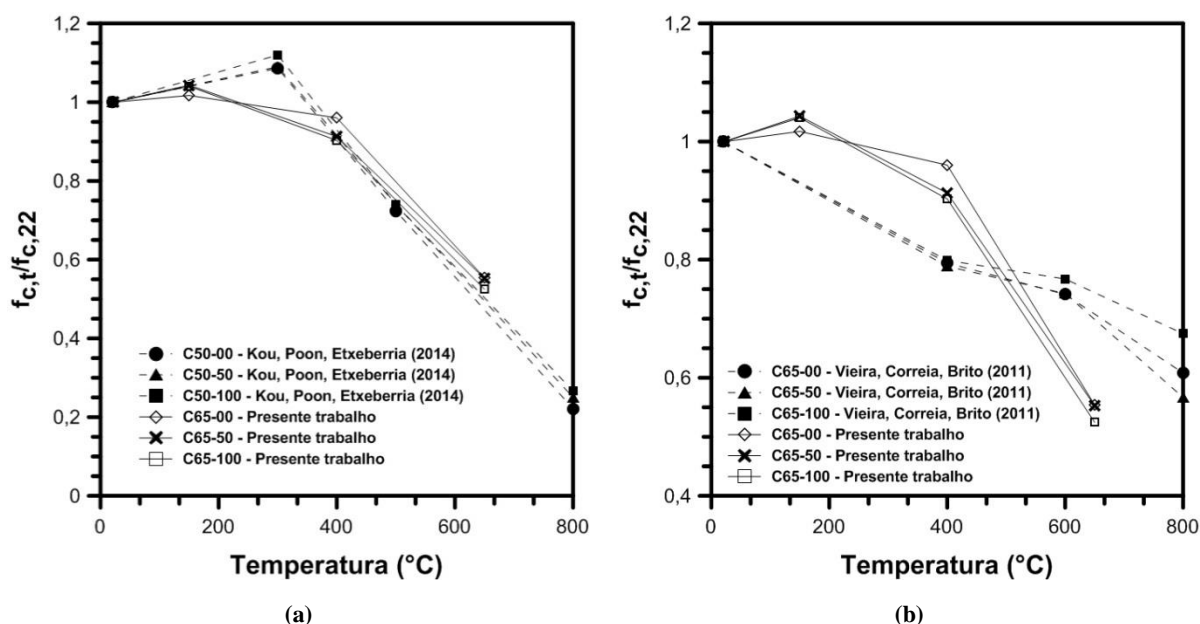
**Figura 5.10** – Comportamento da resistência à compressão dos concretos em função da temperatura: (a) variação da resistência à compressão com a temperatura; (b) relação entre as resistências à compressão residuais e iniciais.

Os resultados médios apresentados pelos três concretos aos 22 °C são considerados, segundo as análises estatísticas, como iguais. Apesar da pequena variação (inferior a 5%), após serem submetidos a 150 °C, apenas as misturas C65-50 e C65-100 possuem resistências à compressão residuais estatisticamente iguais e maiores do que a de referência.

Quando expostos a temperatura de 400 °C observou-se uma redução na resistência à compressão para as três misturas (de 4% para o concreto de referência e de 8,7 e 9,7% para os concretos C65-50 e C65-100, respectivamente). Aos 650 °C a resistência à compressão de todas as misturas sofreu uma redução na ordem de 45-47% da resistência inicial, com a redução um pouco maior sendo observada para a mistura com 100% de ARC.

Comportamento semelhante ao obtido neste trabalho foi observado por Kou, Poon e Etxeberria (2014) para concretos de alta resistência com teores de substituição de 0, 50% e 100% de agregado reciclado de concreto e submetidos às temperaturas de 300, 500 e 800 °C por 4 horas, com taxa de aquecimento de 5 °C/min. Na Figura 5.11 (a) é possível observar que os concretos produzidos pelos autores apresentaram aumento de resistência à compressão até o aquecimento a 200 °C e que a mistura produzida apenas com agregado reciclado mostrou um desempenho ligeiramente superior. No entanto,

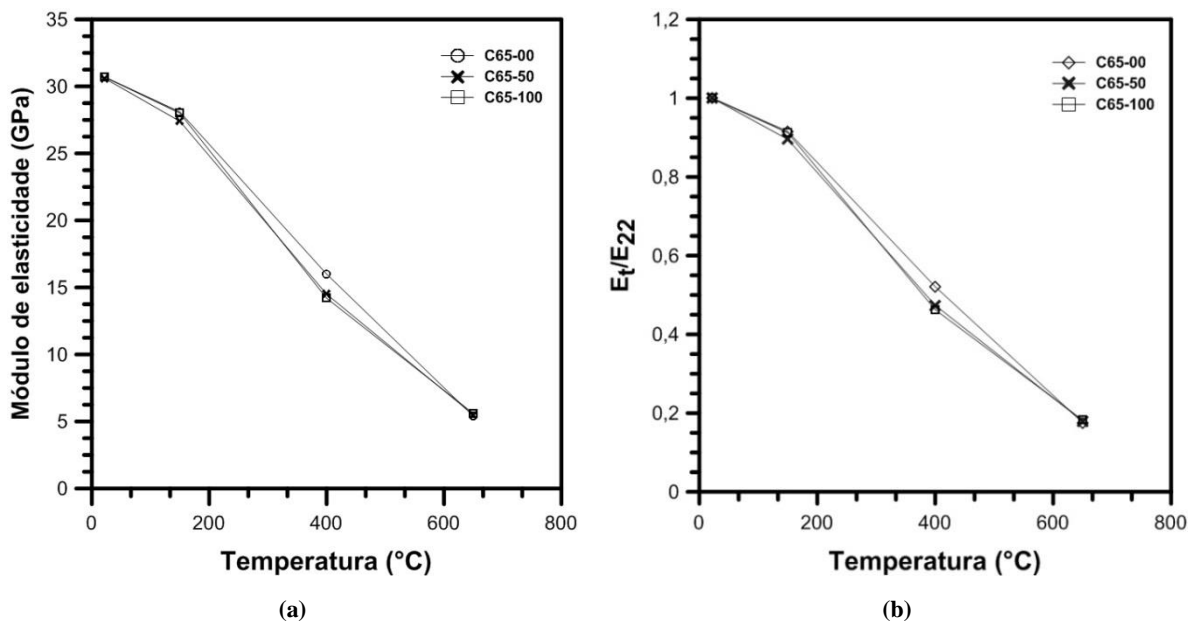
quando submetidos a temperaturas maiores esses concretos apresentaram diminuição nos valores de resistência à compressão, com variações semelhantes para os três teores de agregado reciclado estudados.



**Figura 5.11** – Comparação entre os resultados do presente estudo e os resultados obtidos por: (a) Kou, Poon e Etxebarria (2014); (b) Vieira, Correia e Brito (2011).

Na Figura 5.11 (b) apresenta-se uma comparação entre os resultados observados nesta pesquisa e os resultados encontrados por Vieira, Correia e Brito (2011) para concretos de alta resistência produzidos com agregados reciclados submetidos a 400, 600 e 800 °C por 1 hora. Nota-se que, assim como para os resultados apresentados no presente estudo, as temperaturas superiores a 400 °C promovem uma expressiva redução da resistência à compressão dos concretos.

A Figura 5.12 mostra a variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura e a relação entre os módulos residuais e iniciais para as misturas C65-00, C65-50 e C65-100. É possível notar que a redução nos módulos de elasticidade é muito semelhante entre as misturas estudadas e que a maior redução observada ocorreu entre as temperaturas de 150 e 400 °C. Os módulos de elasticidade das três misturas podem ser considerados estatisticamente iguais na temperatura ambiente e após a exposição a 150 e 650 °C. O concreto C65-00 apresentou resultados ligeiramente melhores após o aquecimento a 400 °C que os concretos produzidos com utilização parcial ou total de brita ARC e, de acordo com a análise estatística, para essa temperatura, o módulo de elasticidade dessa mistura é considerado diferente dos demais.



**Figura 5.12** - Comportamento do módulo de elasticidade dos concretos em função da temperatura: (a) variação do módulo de elasticidade com a temperatura; (b) relação entre módulos de elasticidade residuais e iniciais.

### 5.1.2 Comportamento sob carga de tração por compressão diametral

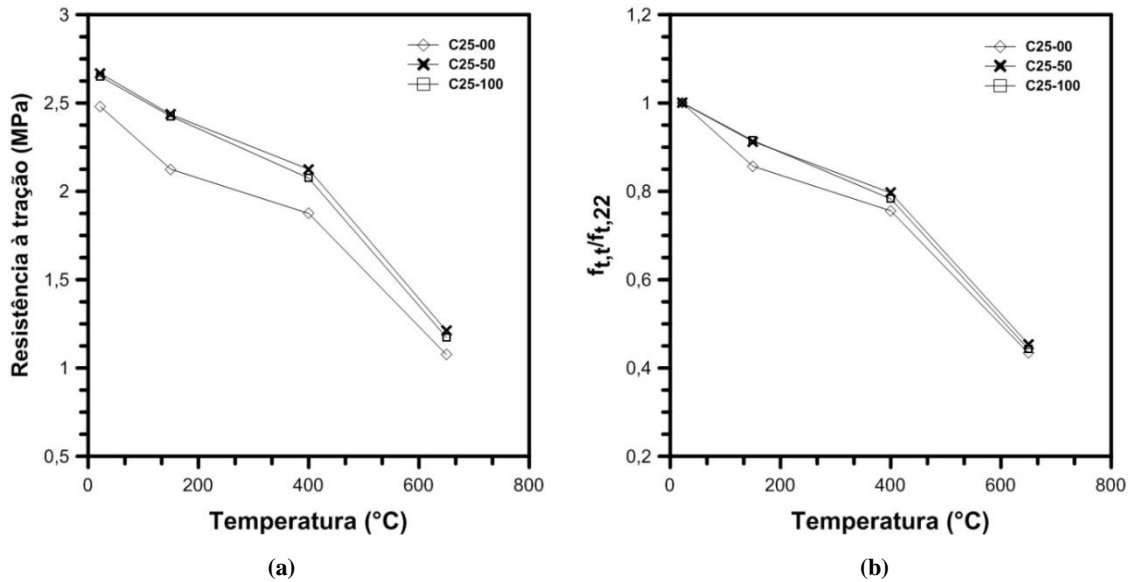
Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral antes e após o aquecimento dos concretos de resistência normal são apresentados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Valores médios da resistência à tração por compressão diametral para os concretos C25.

Temperatura	Resistência à tração por compressão diametral (MPa) – CV (%)		
	C25-00	C25-50	C25-100
22 °C	2,3 (3,6)	2,7 (6,7)	2,7 (8,5)
150 °C	2,1 (4,6)	2,4 (6,0)	2,4 (6,8)
400 °C	1,9 (3,0)	2,1 (3,6)	2,1 (7,2)
650 °C	1,1 (6,8)	1,2 (2,9)	1,2 (5,4)

Observando os resultados médios, nota-se que a exposição a 150, 400 e 650 °C provocou redução nos valores da tração por compressão diametral dos concretos. Para a classe de resistência C25, todas as misturas apresentaram valores, na temperatura de

ambiente, estatisticamente iguais, mas a tendência indica melhora nos concretos reciclados. Essa análise indica também que as resistências à tração apresentada pelas três misturas podem ser consideradas iguais em todas as faixas de temperatura estudadas. A variação da resistência à tração por compressão diametral com a temperatura é apresentada na Figura 5.13, para os concretos C25-00, C25-50 e C25-100.



**Figura 5.13** - (a) Variação da tração por compressão diametral com a temperatura; (b) relação entre as trações por compressão diametral residuais e iniciais.

Observa-se que conforme aumentou a temperatura, maiores foram as reduções nos valores dessa propriedade e que as taxas de redução apresentadas entre as misturas foram, em geral, similares. Em termos quantitativos, após exposição a 150 °C o concreto C25-00 apresentou redução de cerca de 14% enquanto que as misturas C25-50 e C25-100 apresentaram redução de 8,7 e 8,5%, respectivamente. A 400 °C a redução de resistência à tração foi na ordem de 24,4% para o concreto de referência e em torno de 21% para os concretos reciclados. Já para a temperatura de 650 °C, a redução foi semelhante para as três misturas (cerca de 55%).

Esse comportamento é diferente do observado por Sarhat e Sherwood (2013), que indicou que a medida que a temperatura de exposição aumentou de 250 para 500 °C houve aumento na resistência a tração dos concretos com teores de agregado reciclado de 75 e 100%, enquanto que os concretos convencionais exibiram redução nessa propriedade com o aumento da temperatura.

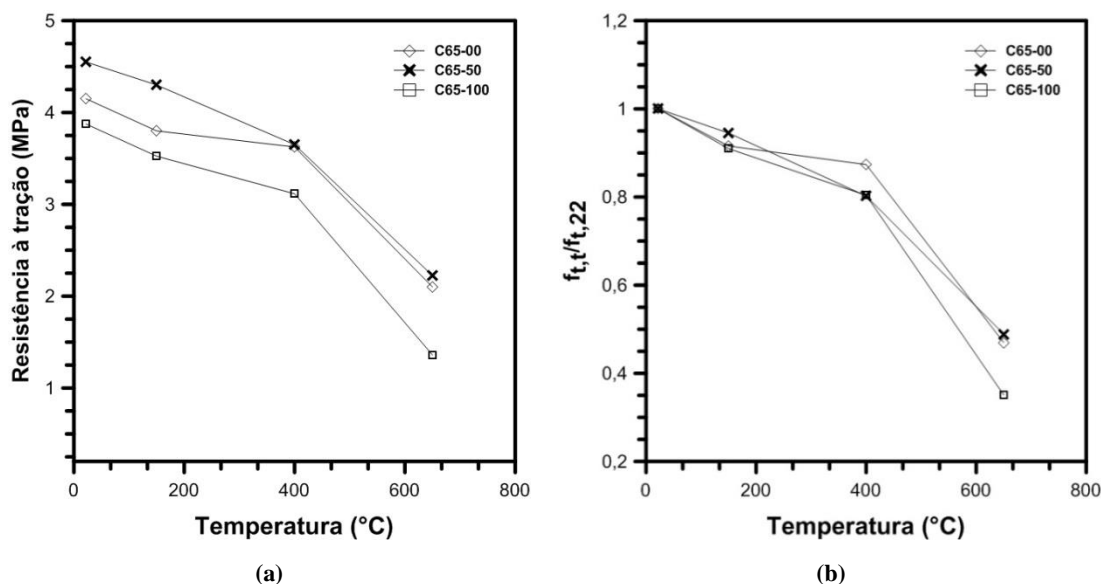
Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral antes e após o aquecimento dos concretos de resistência de alto desempenho são apresentados na



Tabela 5.4. A variação dessa propriedade com a temperatura é apresentada na Figura 5.14, para os concretos C65-00, C65-50 e C65-100.

**Tabela 5.4** - Valores médios da resistência à tração por compressão diametral para os concretos C65.

Temperatura	Resistência à tração por compressão diametral (MPa) – CV (%)		
	C65-00	C65-50	C65-100
22 °C	4,1 (6,3)	4,5 (5,2)	3,9 (3,9)
150 °C	3,7 (4,2)	4,3 (6,2)	3,5 (3,5)
400 °C	3,6 (5,0)	3,6 (6,5)	3,0 (5,1)
650 °C	2,1 (4,9)	2,3 (2,6)	1,3 (1,3)



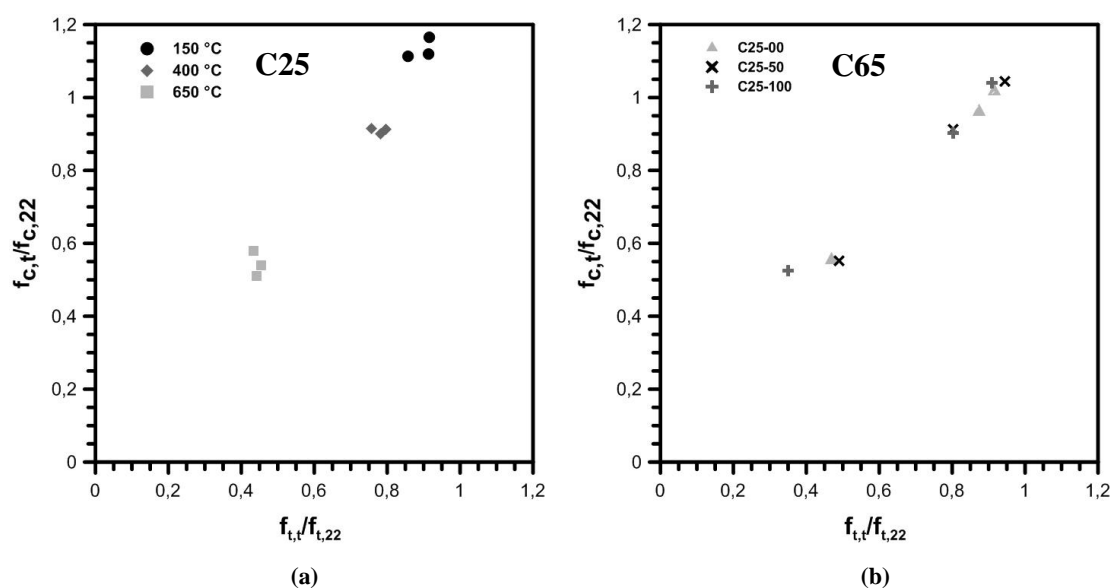
**Figura 5.14** - (a) Variação da tração por compressão diametral com a temperatura; (b) relação entre as trações por compressão diametral residuais e iniciais.

Os concretos de classe C65-00 e C65-100 apresentaram reduções semelhantes quando submetidos a 150 °C (na ordem de 9%), enquanto a mistura C65-50 mostrou redução um pouco menor, 5,5%. No entanto, após a exposição a 400 °C os concretos reciclados demonstraram diminuição de resistência à compressão diametral mais acentuada, onde o concreto convencional teve sua resistência diminuída em 12,6% enquanto os reciclados apresentaram resultados similares, com queda de aproximadamente 19,5%. Após a exposição a 650 °C, a mistura C65-100 apresentou desempenho inferior as demais misturas de mesma classe, com perda de resistência 13% maior que as demais. Segundo

Laneyrie et al. (2016) esse comportamento pode estar relacionado com o fato de o concreto com agregado reciclado, por apresentar maior número de interfaces, em consequência da argamassa antiga aderida presente no ARC, poder apresentar maior desenvolvimento de fissuras que resultem na redução da resistência a tração da mistura.

Os resultados obtidos por Vieira, Correia e Brito (2011) também não indicaram uma tendência para a influência do teor de agregado reciclado na resistência à tração residual de concretos de alta resistência. A 400 °C os concretos com 50% e 100% de agregado reciclado apresentaram redução maior que o concreto de referência. A 600 °C a substituição de 50% de agregado natural por reciclado provocou a maior redução entre os concretos, enquanto após a exposição a 800 °C o concreto produzido apenas com agregado reciclado registrou queda no valor dessa propriedade significativamente maior que os demais.

A análise da relação entre as variações apresentadas na resistência à compressão diametral e a resistência à compressão é mostrada na Figura 5.15. É possível observar que a resistência à tração é mais sensível que a resistência à compressão aos efeitos da temperatura, com maior redução dos seus valores médios. Esse comportamento também foi observado por outros autores (CHEN *et al.*, 2014; VIEIRA; CORREIA; BRITO, 2011) e é atribuído às micro e macro-fissuras que surgem nos concretos com o aumento da temperatura.



**Figura 5.15** – Relação entre a normalização da resistência à tração e resistência à compressão.

### 5.1.3 Propriedades físicas do concreto

A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por imersão para os concretos após a exposição dos mesmos a diferentes temperaturas.

**Tabela 5.5** – Valores médios de absorção de água dos concretos.

Misturas	Absorção de água (%) – CV (%)			
	22 °C	150 °C	400 °C	650 °C
<b>C25-00</b>	4,0 (1,8)	5,4 (1,4)	6,9 (3,2)	9,0 (0,5)
<b>C25-50</b>	4,4 (2,8)	5,5 (2,8)	7,0 (1,5)	10,9 (2,6)
<b>C25-100</b>	5,8 (6,9)	7,1 (1,2)	8,6 (1,2)	11,0 (0,7)
<b>C65-00</b>	2,5 (2,2)	4,3 (0,6)	5,4 (0,8)	8,1 (0,8)
<b>C65-50</b>	3,8 (2,1)	5,6 (2,9)	6,7 (1,0)	9,6 (0,5)
<b>C65-100</b>	4,6 (5,6)	6,8 (1,6)	8,2 (2,3)	11,5 (0,7)

Os resultados indicam que a incorporação de ARC nos concretos aumentou a absorção de água dos concretos estudados e que quanto maior o teor de utilização de agregado reciclado, maior é a absorção apresentadas pelos respectivos concretos. Resultados reportados por Amario (2015) indicam o mesmo comportamento para os concretos de classe C25. Para a classe C65, no entanto, a autora observou que o teor de agregado reciclado de concreto não provocou mudanças significativas nessa propriedade para teores de substituição de até 60%.

Os resultados obtidos indicam que quanto mais alta a temperatura de exposição, maior foi a variação registrada nos valores de absorção e que, em geral, os concretos de classe C65 foram influenciados de forma mais acentuada pela elevação da temperatura do que os de classe C25.

Para os concretos de classe de resistência normal, quanto maior o teor de utilização de brita ARC, menores foram as consequências sofridas em função da exposição das amostras a altas temperaturas. Após exposição a 150 °C, por exemplo, enquanto o concreto C25-00 teve aumento de taxa de absorção em torno de 35% as misturas C25-

50 e C25-100 apresentaram aumento em torno de 25% e 22%, respectivamente. Esse comportamento também foi observado para a temperatura de 400 °C e de 650 °C.

Assim como observado com o concreto C25, o concreto produzido apenas com agregado natural registrou maior absorção de água do que os concretos contendo ARC. As misturas C65-50 e C65-100 apresentaram, no entanto, resultados bastante similares.

Os resultados encontrados para as taxas de índice de vazios dos concretos são apresentados na Tabela 5.6. Assim como observado nos resultados de absorção de água, quanto maior o volume de agregado reciclado presente no concreto maior foi o índice de vazios apresentado por este.

**Tabela 5.6** - Valores médios de índice de vazios dos concretos.

Misturas	Índice de vazios (%) – CV (%)			
	22 °C	150 °C	400 °C	650 °C
<b>C25-00</b>	9,0 (1,2)	11,7 (1,3)	14,8 (4,2)	18,7 (0,6)
<b>C25-50</b>	7,2 (2,8)	11,3 (1,2)	14,7 (1,0)	17,7 (1,0)
<b>C25-100</b>	12,9 (6,6)	16,0 (6,2)	17,4 (4,1)	23,0 (1,6)
<b>C65-00</b>	6,0 (8,0)	10,1 (0,6)	12,4 (0,8)	18,0 (0,4)
<b>C65-50</b>	7,0 (3,2)	12,7 (3,3)	14,9 (0,9)	21,0 (0,5)
<b>C65-100</b>	10,3 (6,7)	15,1 (1,2)	17,9 (1,9)	24,3 (1,0)

O aquecimento a altas temperaturas também provocou mudanças nessa propriedade e o valor dos índices de vazios sofreu acréscimos crescentes conforme se elevou a temperatura de exposição dos concretos. Esses aumentos relativos foram mais críticos para os concretos de alta resistência, com acréscimos mais significativos a partir de 400°C, em razão, principalmente, do processo de decomposição dos produtos de hidratação e da microfissuração decorrente das incompatibilidades térmicas entre os constituintes do concreto.

Para os concretos da classe C25, quanto maior o volume de agregado reciclado menor foi o efeito sentido pelo concreto no valor do índice de vazios. Já para os concretos da

classe C65, a substituição total dos agregados graúdos também resultou em variações menores no índice de vazios dos concretos.

Kou, Poon e Etxeberria observaram que a porosidade e o diâmetro médio de poros dos concretos de alta resistência aumentaram após a exposição a altas temperaturas e que esse efeito de forma mais crítica pelo concreto de referência e que quando maior o teor de agregado reciclado na mistura menor foi o impacto do aumento da temperatura na porosidade. Os autores associam o melhor comportamento do concreto reciclado, em relação à porosidade, a maior porosidade do agregado reciclado que impede o acúmulo de vapor e conseqüentemente pressão, diminuindo a quantidade de fissuras internas.

A argamassa aderida presente no agregado reciclado fez com que a massa específica dos concretos contendo ARC fosse menor do que a do concreto de referência. Quanto maior o teor de utilização de agregados reciclados nos concretos, menores foram os valores de massa específica dos mesmos (Tabela 5.7).

**Tabela 5.7** - Valores médios de massa específica dos concretos.

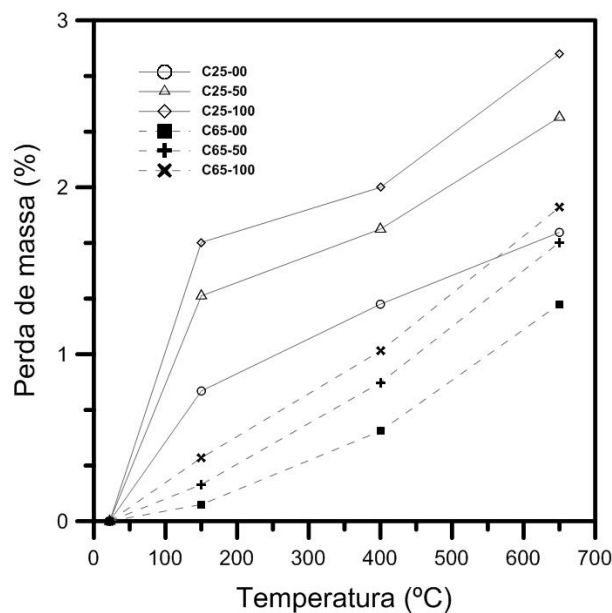
Misturas	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) – CV (%)			
	22 °C	150 °C	400 °C	650 °C
<b>C25-00</b>	2231,2 (0,8)	2139,7 (1,1)	2129,2 (0,9)	2081,0 (0,1)
<b>C25-50</b>	2179,4 (0,9)	2083,9 (6,8)	2050,6 (1,1)	1970,8 (2,6)
<b>C25-100</b>	2021,0 (2,0)	1913,9 (2,2)	1903,7 (2,3)	1895,2 (2,1)
<b>C65-00</b>	2331,8 (1,6)	2330,0 (0,1)	2277,6 (0,1)	2213,8 (1,0)
<b>C65-50</b>	2269,1 (0,9)	2247,7 (0,4)	2236,5 (0,1)	2178,2 (0,03)
<b>C65-100</b>	2232,7 (0,9)	2203,3 (0,5)	2175,7 (0,4)	2106,1 (0,3)

A exposição a temperaturas elevadas provocou redução nos valores de massa específica, tendo os concretos da classe C25 apresentado reduções mais acentuadas do que os de classe C65 em suas massas específicas. O teor de agregado reciclado, no entanto, não influenciou nos resultados apresentados pelos concretos após o aquecimento, já que a redução da massa específica foi similar entre os concretos de mesma classe para todos os níveis de temperatura analisados.

O processo de aquecimento das amostras resultou na perda de massa das mesmas. A Tabela 5.8 apresenta as taxas de perda de massa dos concretos após a exposição às temperaturas estudadas. Observa-se que a perda de massa foi mais crítica para os concretos de classe C25 e, que para essa classe de resistência a perda foi maior entre 22°C e 150°C, enquanto as misturas C65 foram mais afetadas entre 400°C e 650°C. No entanto, em ambas as classes de resistência, conforme se aumentou o teor de agregado reciclado maior foi a perda de massa apresentada pelos concretos (Figura 5.16).

**Tabela 5.8** – Perda de massa apresentada pelas amostras após o aquecimento.

Misturas	Perda de massa (%) – CV (%)		
	150 °C	400 °C	650 °C
<b>C25-00</b>	0,78 (8,0)	1,31 (4,3)	1,73 (3,9)
<b>C25-50</b>	1,35 (1,7)	1,75 (3,9)	2,42 (4,5)
<b>C25-100</b>	1,67 (5,7)	2,03 (0,3)	2,81 (0,54)
<b>C65-00</b>	0,10 (2,9)	0,54 (9,0)	1,30 (4,1)
<b>C65-50</b>	0,22 (6,9)	0,83 (5,2)	1,67 (1,3)
<b>C65-100</b>	0,38 (4,3)	1,02 (2,0)	1,88 (6,5)



**Figura 5.16** – Taxas de perda de massa das misturas nas respectivas temperaturas.

### 5.1.4 Correlação entre a argamassa aderida e as propriedades físicas e mecânicas do concreto

No caso dos concretos produzidos com agregado reciclado de concreto, quanto maior o teor de substituição, menor é a quantidade de rocha natural graúda na mistura e maior a quantidade de argamassa. A Tabela 5.9 apresenta o volume de agregado graúdo natural total ( $V_{NAT}$ ), de argamassa aderida (antiga) ( $V_{AA}$ ), de argamassa nova ( $V_{AN}$ ), de argamassa total ( $V_{AT}$ ) e a relação  $V_{NAT}/V_{AT}$  correspondente a cada mistura, calculados a partir da taxa de argamassa aderida determinada pela análise de imagens.

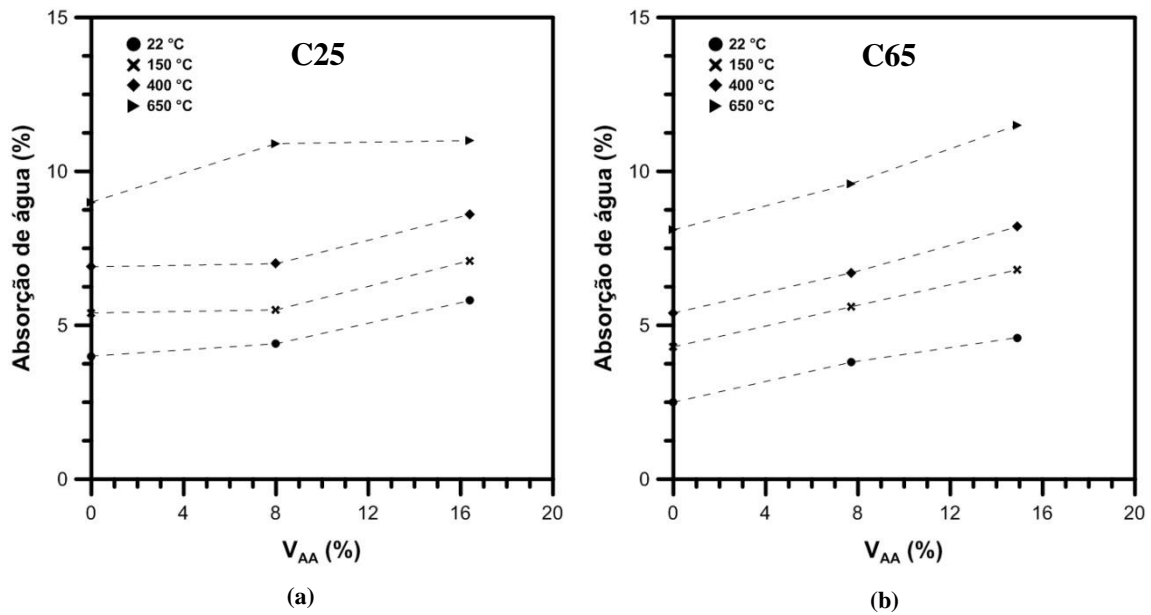
Observa-se que o volume de argamassa total aumenta de 64% para 78,4% e de 66% para 81% para os concretos da classe C25 e C65, respectivamente, quando o teor de agregado reciclado na mistura varia de 0% (referência) até 100%. Como consequência desse aumento, o volume de agregado graúdo natural total presente nas misturas diminui reduzindo a relação  $V_{NAT}/V_{AT}$  de 0,54 para 0,25 e de 0,50 para 0,22 para os concretos da classe C25 e C65, respectivamente.

**Tabela 5.9** – Volume de agregado graúdo natural total, de argamassa aderida, de argamassa nova e de argamassa total de cada mistura de concreto.

Misturas	$V_{NAT}$ (%)	$V_{AA}$ (%)	$V_{AN}$ (%)	$V_{AT}$ (%)	$V_{NAT}/V_{AT}$
<b>C25-00</b>	35	0,0	64,0	64,0	0,54
<b>C25-50</b>	26	8,0	65,0	73,0	0,35
<b>C25-100</b>	20	16,4	62,0	78,4	0,25
<b>C65-00</b>	33	0,0	66,0	66,0	0,50
<b>C65-50</b>	26	7,7	65,0	72,7	0,36
<b>C65-100</b>	18	15,0	66,0	81,0	0,22

Apresenta-se na Figura 5.17 a relação entre o volume de argamassa aderida nos ARC ( $V_{AA}$ ) presente na mistura e a taxa de absorção apresentada pelos concretos de classe de resistência normal e alto desempenho antes após a submissão dos mesmos a altas temperaturas. Os resultados mostram que embora para temperaturas de até 400 °C a presença de um teor de argamassa aderida de cerca de 8% não muda expressivamente a absorção de água dos concretos de resistência normal isso já ocorre para o concreto de

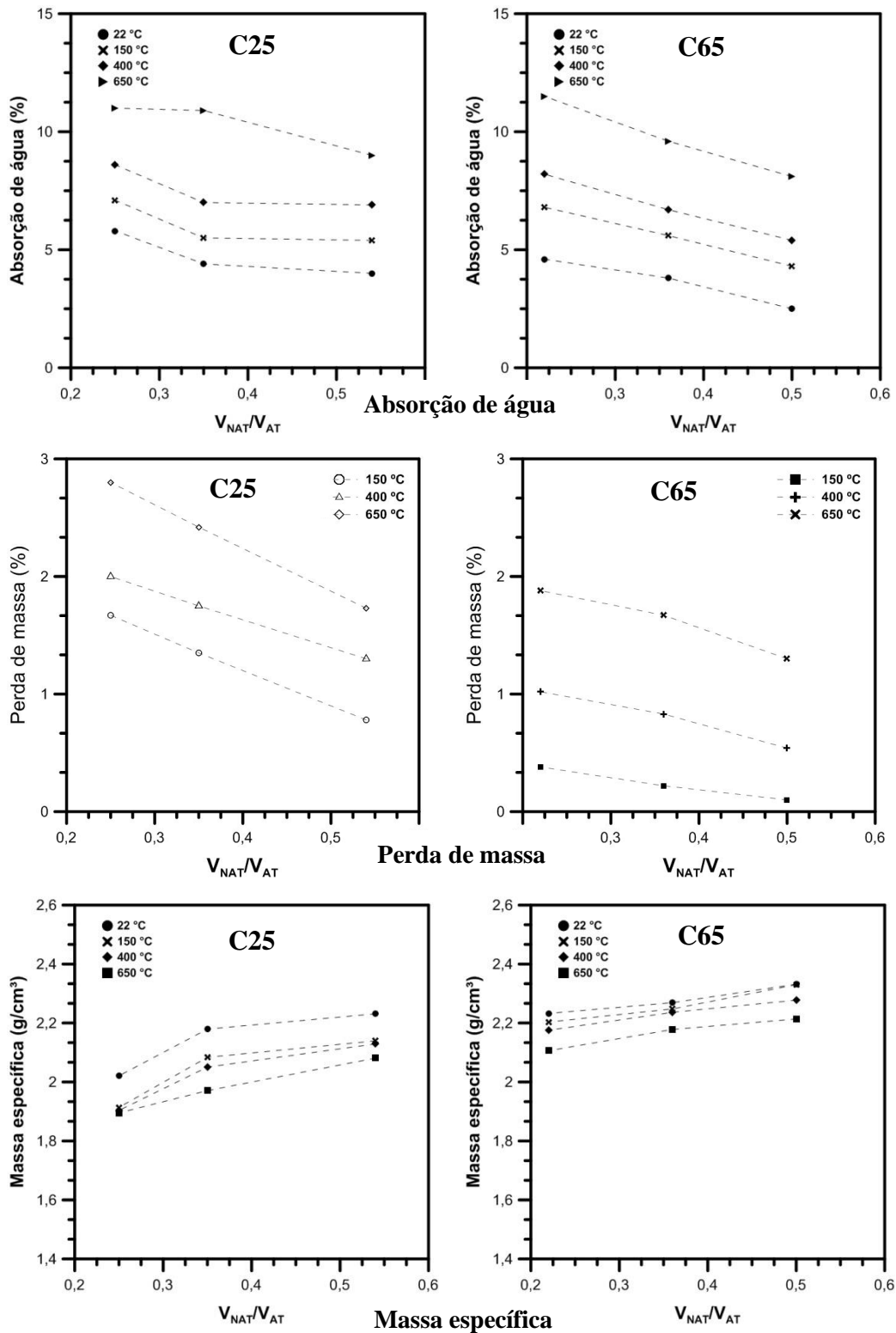
alto desempenho. Quando o teor de argamassa aderida presente vai a cerca de 16% um incremento mais expressivo na absorção é observado para ambos os concretos submetidos temperaturas de até 400°C. Quando os concretos são expostos a temperatura de 650 °C, a presença da argamassa aderida, mesmo no seu menor teor, já influencia a absorção de água dos concretos, sendo esse efeito mais pronunciado para o concreto de alto desempenho.



**Figura 5.17** – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e a taxa de absorção de água apresentada pelo mesmo: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.

Na Figura 5.18 - a apresenta-se a variação da absorção de água, massa específica e perda de massa dos concretos com a relação  $V_{NAT}/V_{AT}$  para as diferentes temperaturas estudadas. Os resultados obtidos mostram que as propriedades físicas apresentadas pelo concreto de alto desempenho são mais sensíveis a essa relação do que o concreto de resistência normal, para todas as temperaturas estudadas (incluindo a temperatura ambiente).

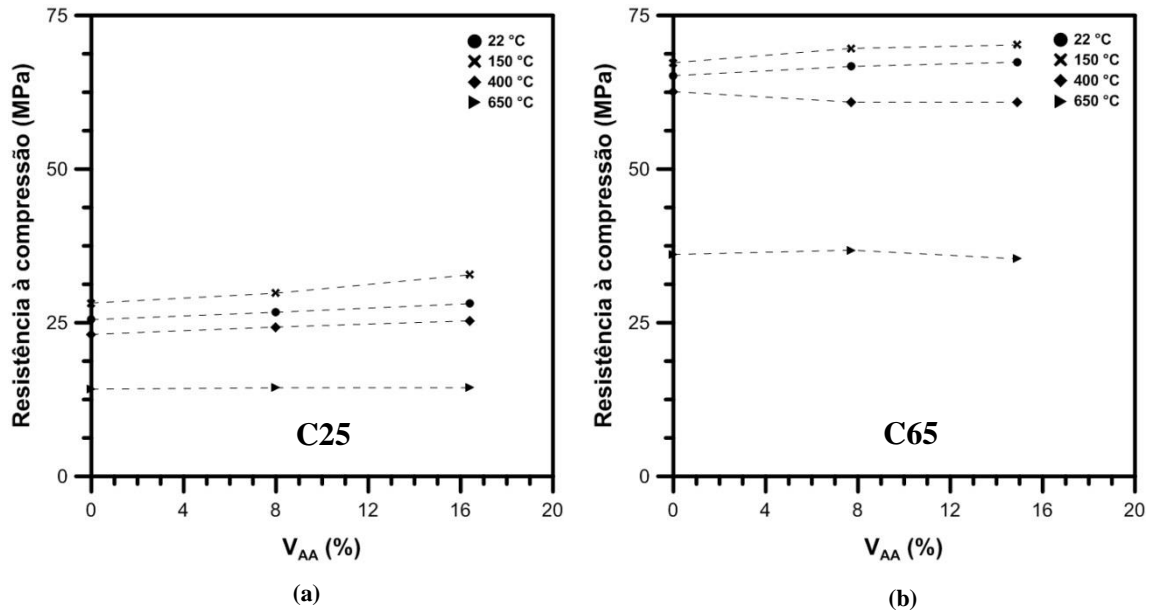




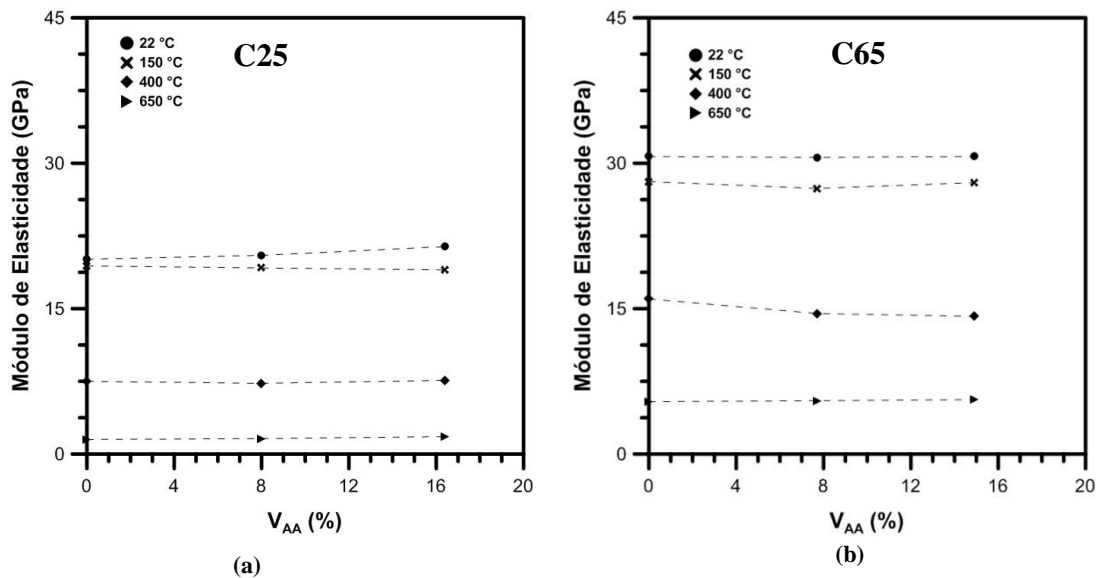
**Figura 5.18** – Correlação entre o volume de agregado gráúdo natural e o volume de argamassa total na mistura e as propriedades físicas do concreto.

Em relação à resistência à compressão, os resultados apresentados na Figura 5.19 indicam que a quantidade de argamassa aderida antiga presente no concreto não afeta de forma significativa as resistências obtidas pelos concretos para as duas classes de

concreto e temperaturas estudadas. Os módulos de elasticidade dos concretos também não variaram significativamente com o volume de argamassa aderida, a Figura 5.20 apresenta a correlação entre essas propriedades para C25 e C65.



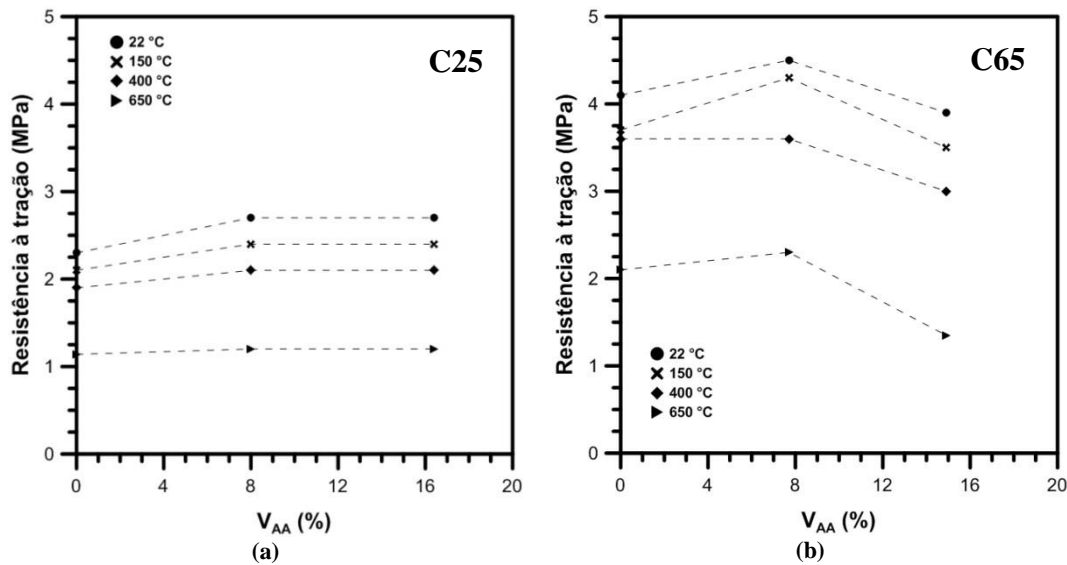
**Figura 5.19** – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e a resistência à compressão apresentada pelo mesmo: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.



**Figura 5.20** – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e o módulo de elasticidade apresentada pelo mesmo: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral (ver Figura 5.21) pode-se observar comportamentos muito distintos entre os concretos C25 e C65. Enquanto os concretos de resistência normal sofreram pequena influência da argamassa aderida, os concretos de alta resistência mostram um acréscimo de resistência para teores de  $V_{AA}$  de

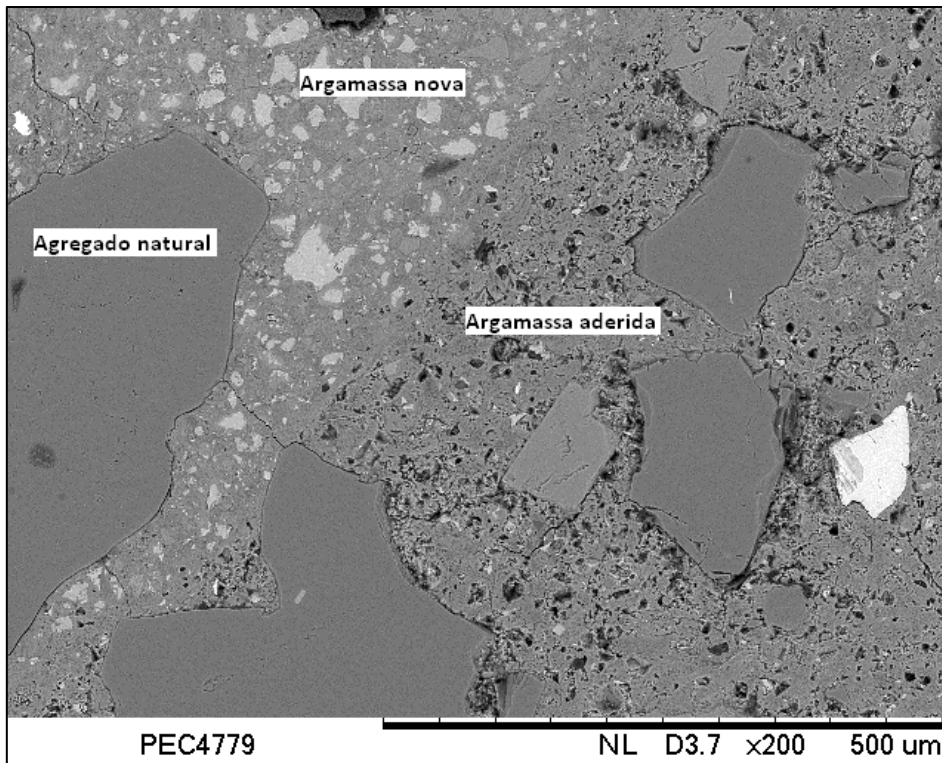
até 8% e, a partir desse teor, uma redução de resistência para todas as temperaturas estudadas.



**Figura 5.21** – Relação entre o volume de argamassa aderida presente no concreto e a resistência à tração por compressão diametral apresentada pelos concretos: (a) 25MPa; (b) 65 MPa.

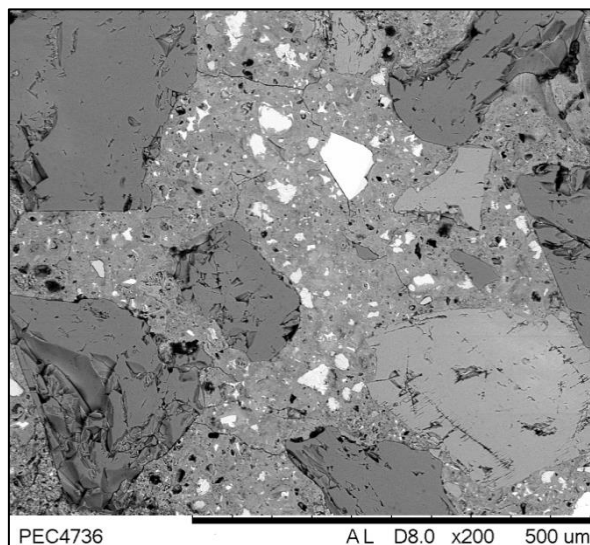
### 5.1.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram que a estrutura do concreto produzido com agregado reciclado de concreto é, de fato, mais complexa do que a do concreto contendo apenas agregado natural. As três principais interfaces presentes no concreto reciclado são: interface entre a argamassa antiga e nova e as interfaces entre o agregado graúdo natural e a argamassa antiga e nova são mostrados na Figura 5.22.

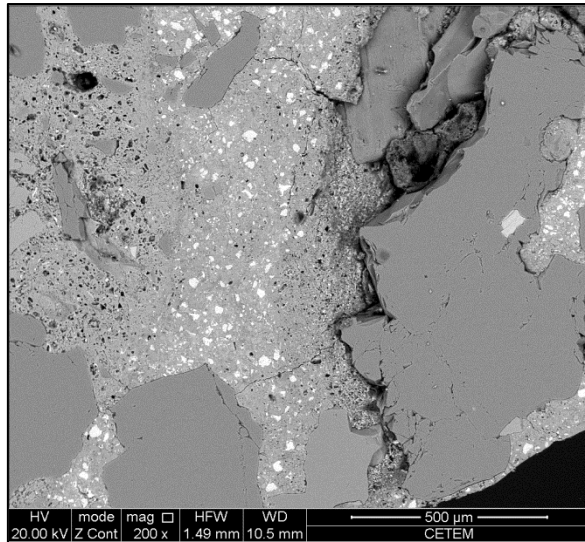


**Figura 5.22** – Interfaces apresentadas pelo concreto contendo ARC (imagem da superfície de fratura).

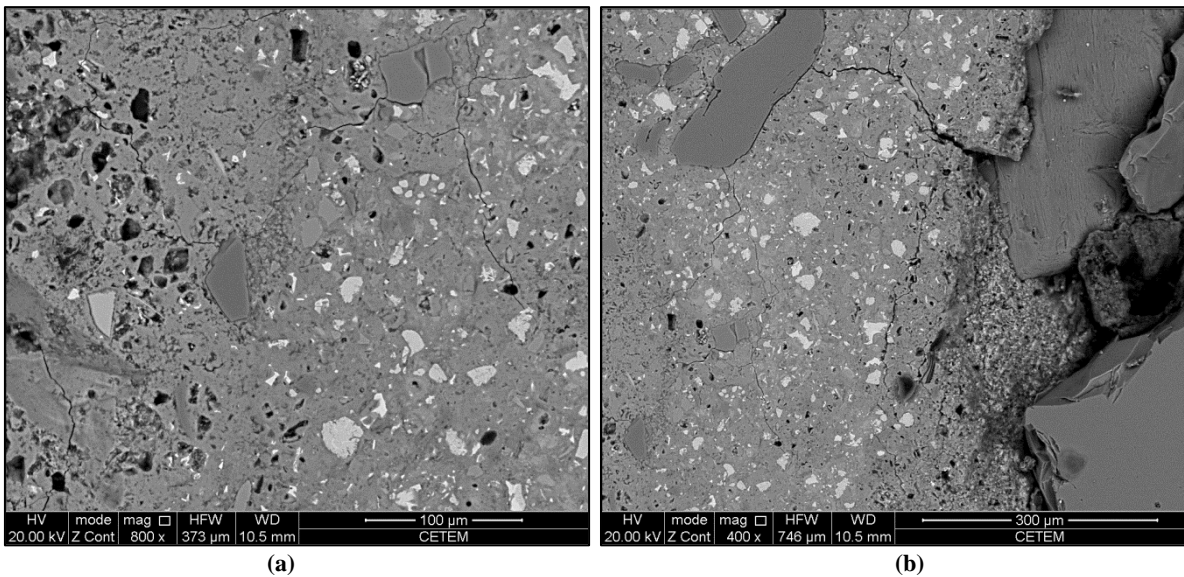
Observando-se as Figuras 5.23 e 5.24 percebe-se que a argamassa aderida do concreto reciclado aparenta ser mais porosa que a argamassa nova e que existem microfissuras e indícios de descolamentos entre a argamassa antiga e o agregado do ARC. As imagens referem-se aos concretos da classe C25 sem exposição a altas temperaturas e maiores investigações com observações em mais pontos são necessárias para se possa assegurar as observações iniciais feitas no presente estudo.



**Figura 5.23** – Concreto convencional das misturas C25 na temperatura de 22 °C (imagem da superfície de fratura).

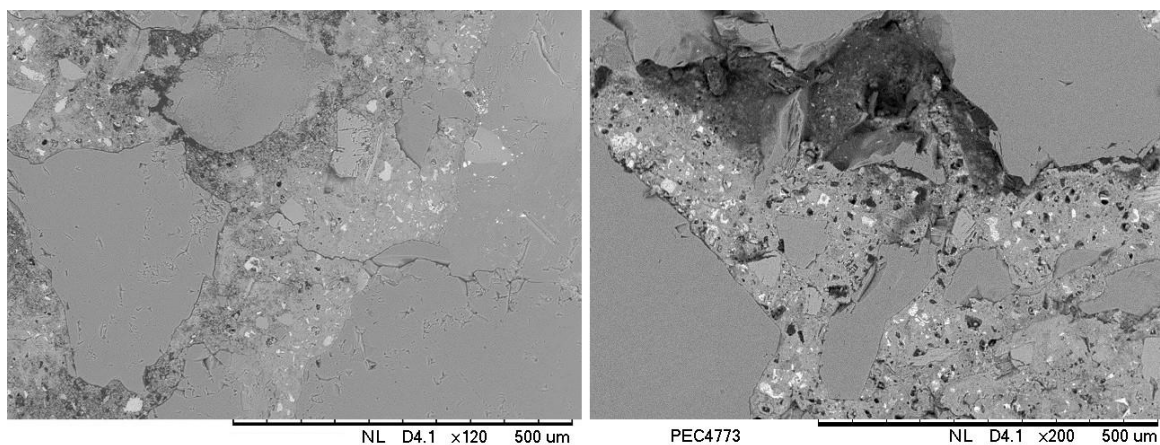


**Figura 5.24** – Concreto reciclado das misturas C25 na temperatura de 22 °C (imagem da superfície de fratura).



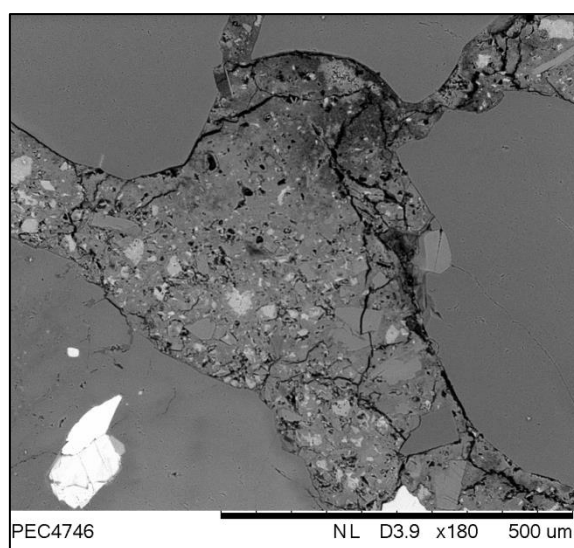
**Figura 5.25** – (a) Interface entre as diferentes argamassa no concreto reciclado (imagens da superfície de fratura); (b) detalhe da fragmentação entre argamassa aderida e agregado graúdo natural.

Na Figura 5.26 apresenta-se micrografias dos concretos de resistência normal após exposição a 150 °C. Observando-se as imagens não se observa diferenças significativas na microestrutura dos concretos expostos a 150 °C e as observadas a temperatura ambiente.

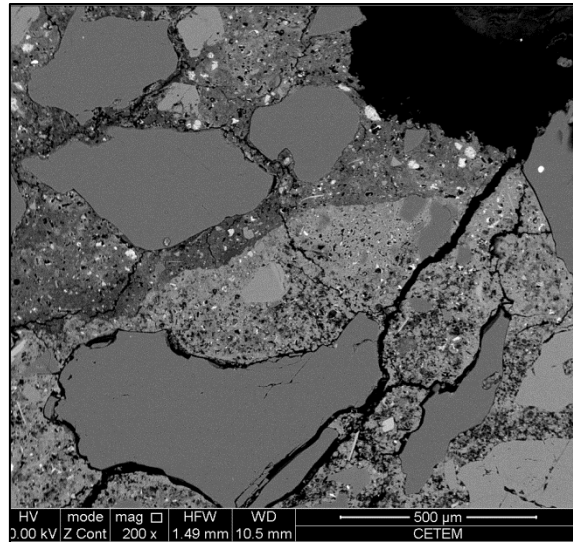


**Figura 5.26** – Comparação da microestrutura das misturas C25 na temperatura de 150 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado.

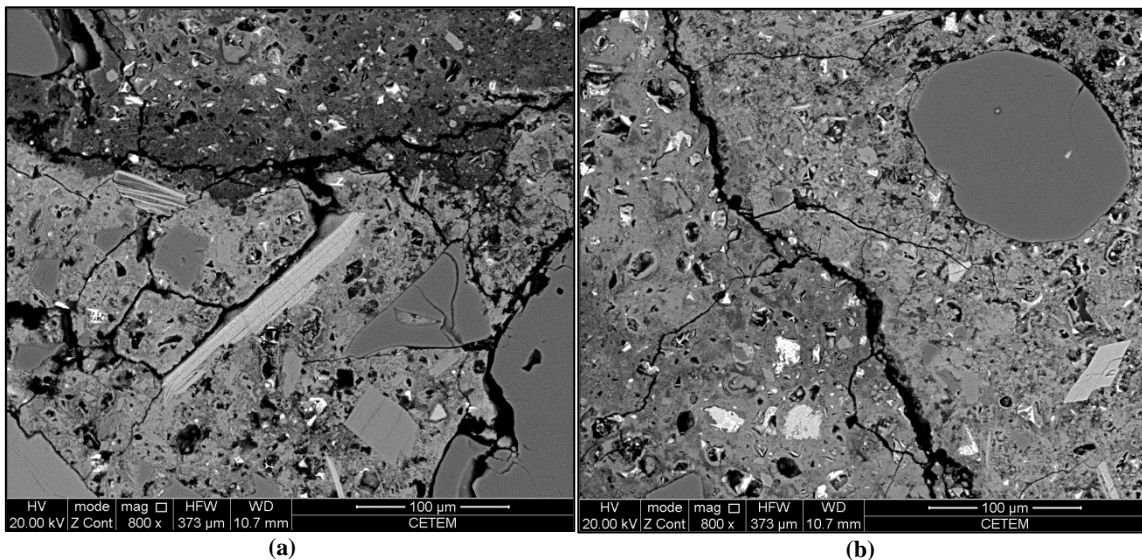
Após a exposição a 400 °C observou-se maior fissuração e descolamento nas interfaces entre argamassa e agregado das amostras investigadas para ambos os concretos (ver Figuras 5.27, 5.28 e 5.29). As fissuras e descolamentos ocorrem possivelmente como consequência da expansão dos agregados e retração da pasta de cimento devido à desidratação das pastas de cimento.



**Figura 5.27** - Concreto convencional das misturas C25 na temperatura de 400 °C (imagem da superfície de fratura).

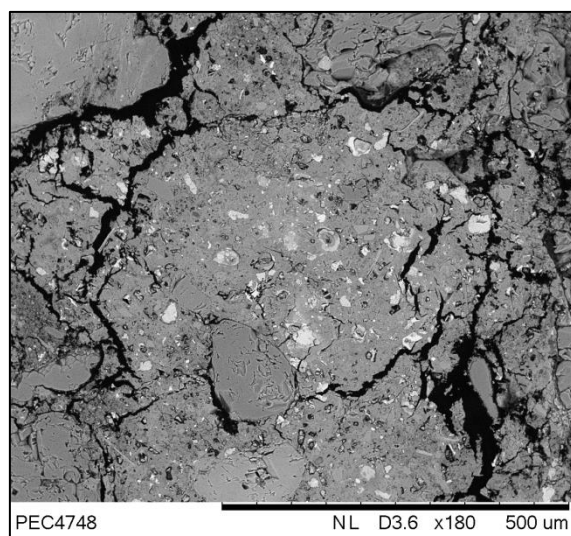


**Figura 5.28** - Concreto reciclado das misturas C25 na temperatura de 400 °C (imagem da superfície de fratura).

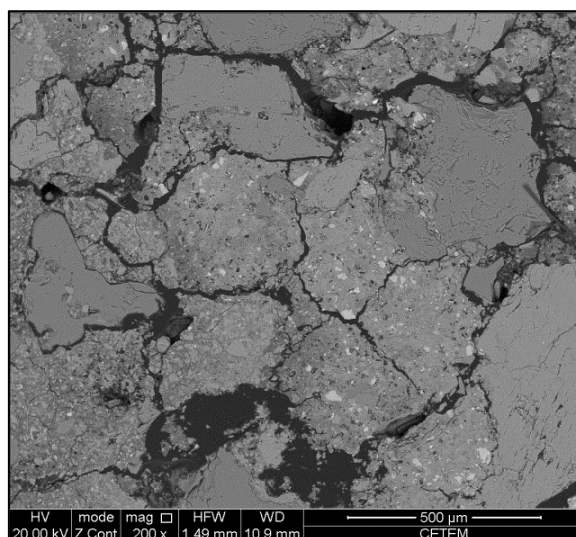


**Figura 5.29** – Fissuras apresentadas pelo concreto reciclado na interface entre argamassa antiga e nova, após ser submetido a 400 °C (imagens da superfície de fratura).

Como pode ser observado nas Figuras 5.30 e 5.31, a exposição a 650 °C provocou o surgimento de maior número de fissuras nos concretos, com grande desprendimento entre o agregado gráúdo e a argamassa. Para a amostra de concreto reciclado analisada, a grande fragmentação tornou difícil diferenciar a argamassa aderida da argamassa nova do concreto novo. A grande redução no comportamento mecânico, assim como o aumento nas taxas de absorção de água e índice de vazios após o aquecimento é consequência do alto nível de dano observado nessas amostras.



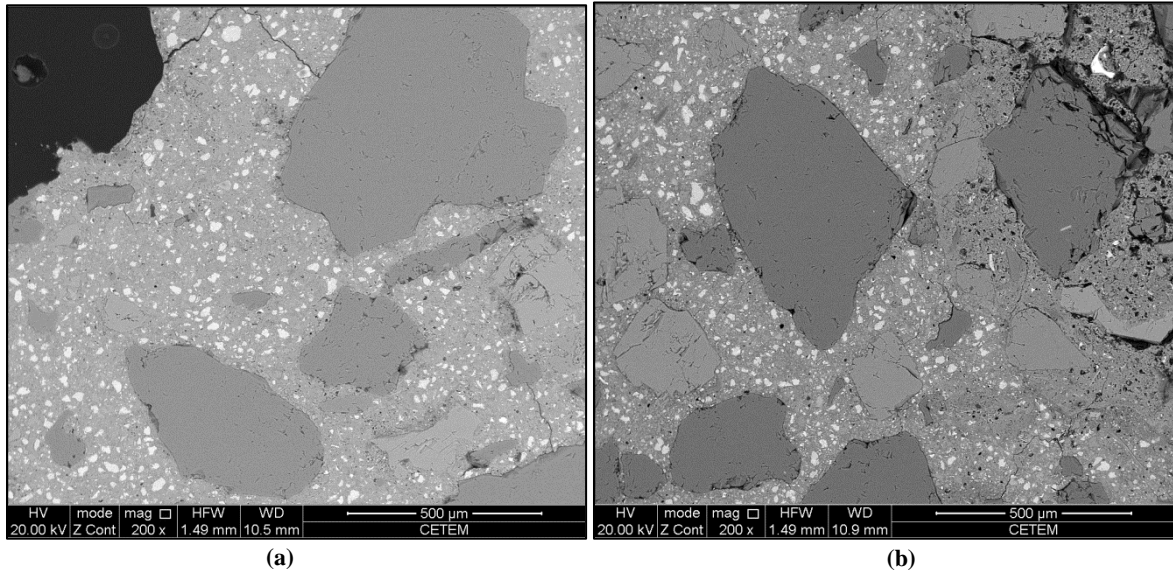
**Figura 5.30** - Concreto convencional das misturas C25 na temperatura de 650 °C (imagem da superfície de fratura).



**Figura 5.31** - Concreto reciclado das misturas C25 na temperatura de 650 °C (imagem da superfície de fratura).

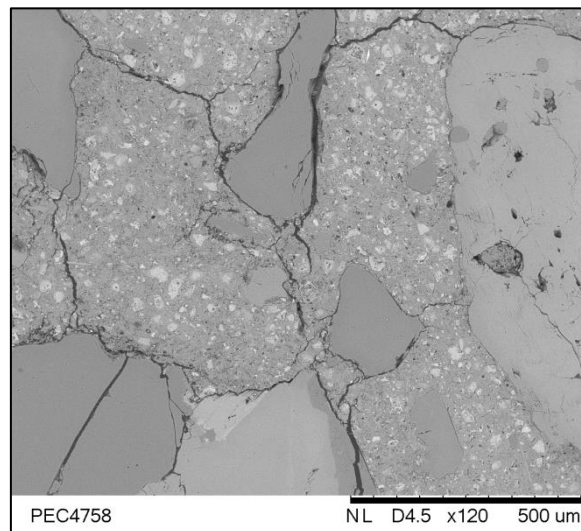
A Figura 5.32 apresenta-se as superfícies fraturadas dos concretos C65 aos 22 °C. Assim como nos concretos de classe normal, nas amostras dos concretos de alta resistência é possível visualizar as mesmas interfaces presentes no concreto contendo ARC (Figura 5.32-b). É possível observar também que a microestrutura porosa é mais densa nessas argamassas.



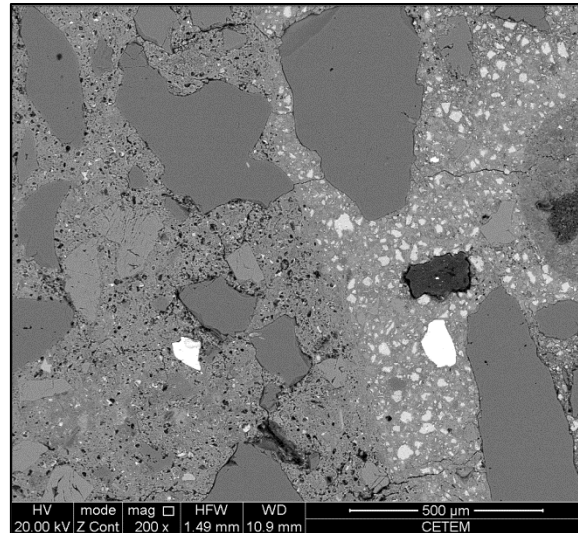


**Figura 5.32** – Comparação da microestrutura das misturas C65 na temperatura de 22 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado.

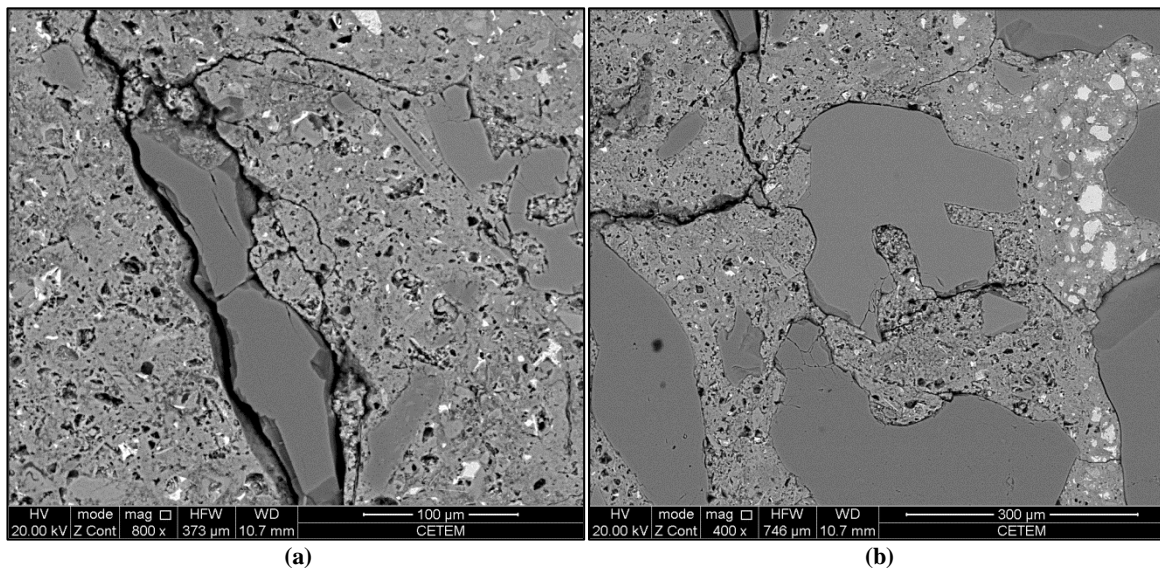
As Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam imagens da amostra do concreto convencional e reciclado após ser exposto a 150 °C. Nota-se pelas imagens obtidas que existe uma significativa fissuração na interface agregado-argamassa e que, em alguns casos nota-se o desprendimento do agregado da argamassa.



**Figura 5.33** - Concreto convencional das misturas C65 na temperatura de 150 °C (imagem da superfície de fratura).

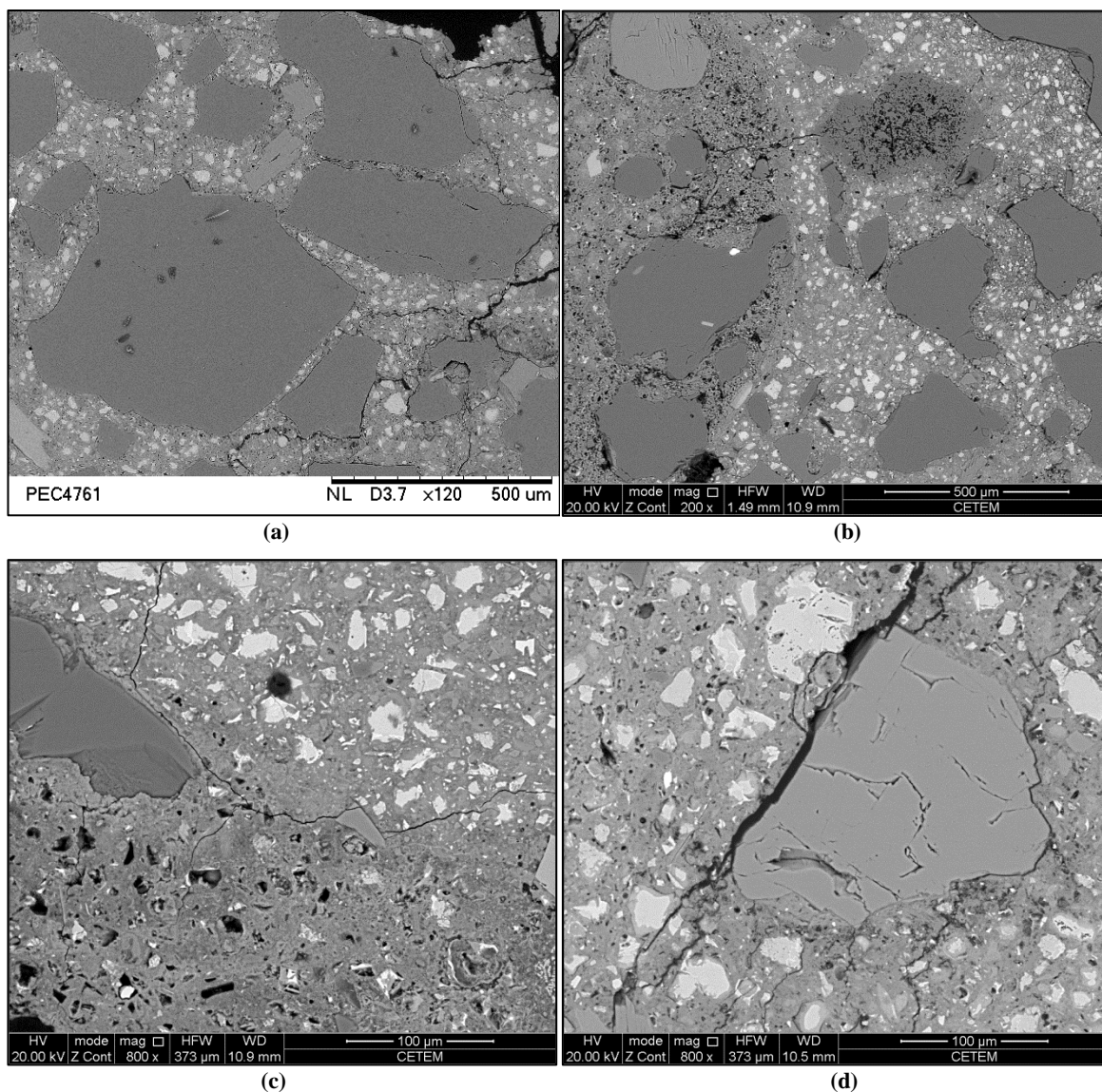


**Figura 5.34** - Concreto reciclado das misturas C65 na temperatura de 150 °C (imagem da superfície de fratura).



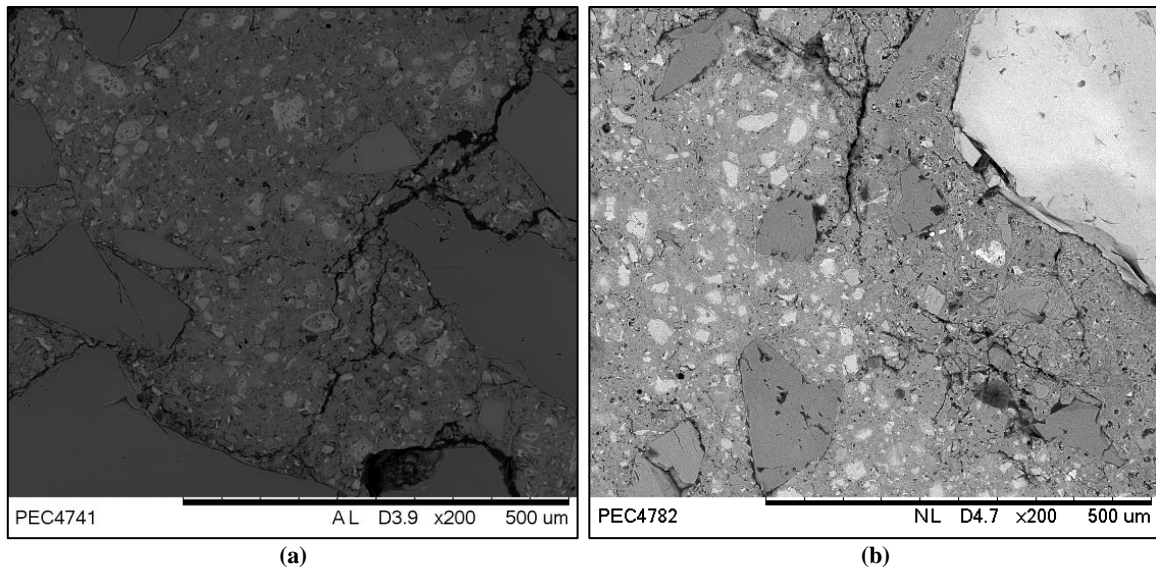
**Figura 5.35** – Exemplos de fissuras entre o agregado natural e a argamassa aderida (imagens da superfície de fratura).

Após exposição a 400 °C o nível de fissuração é um pouco maior (Figura 5.36-a e Figura 5.36-b), o que pode explicar a redução observada na resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, que diminuem a partir dessa temperatura. Pode-se identificar fissuras entre os agregados naturais e as argamassas nova e antiga, assim como entre o agregado reciclado e a argamassa nova.

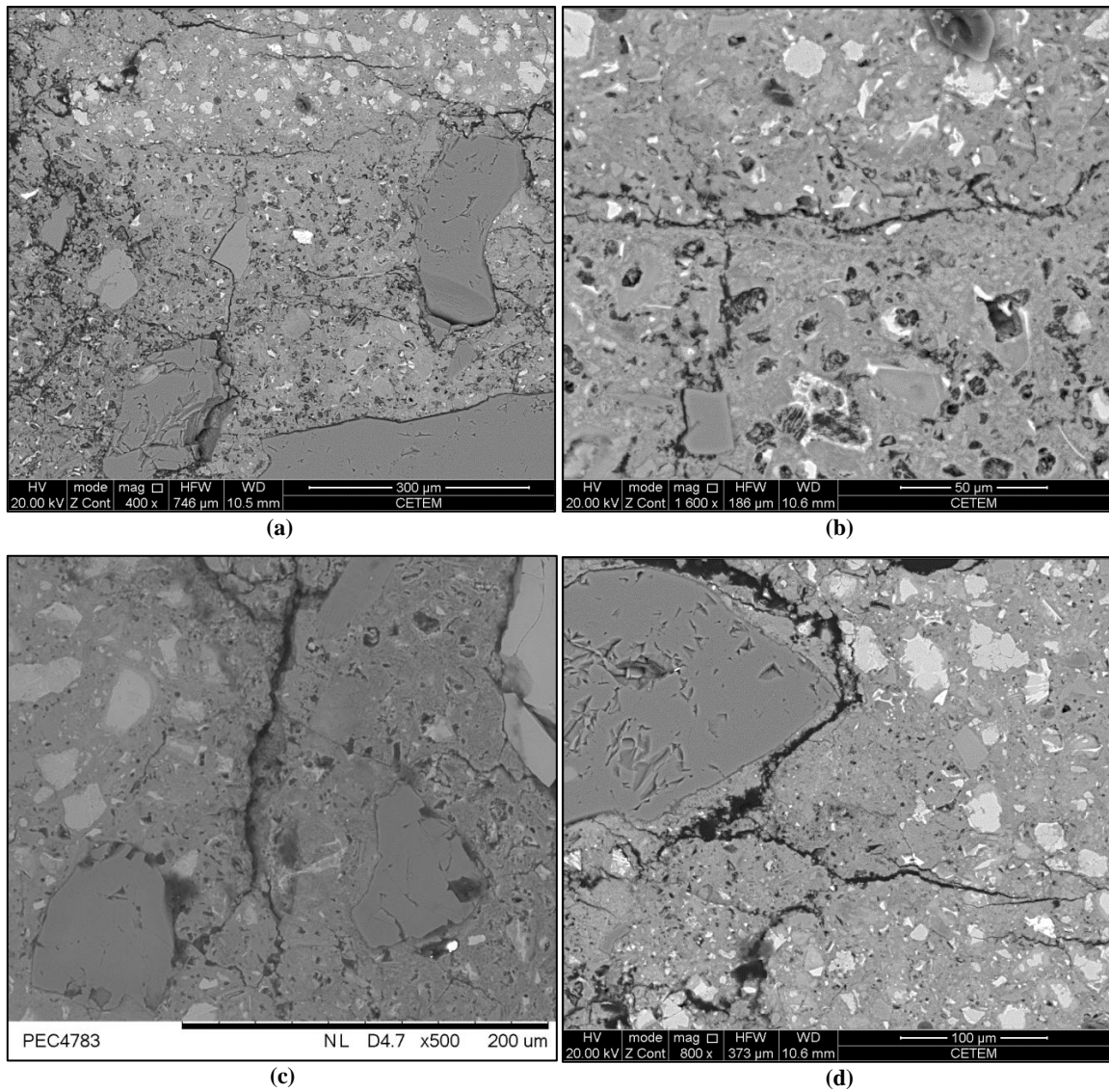


**Figura 5.36** – Comparação da microestrutura das misturas C65 na temperatura de 400 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado; (c) fissura entre agregado reciclado e argamassa nova; (d) fissura entre argamassa e agregado.

Quando submetidos a 650 °C, os concretos de alto desempenho apresentaram fissuração nas interfaces existentes no concreto (Figura 5.37). Microfissuras entre a argamassa nova e a antiga, assim como descolamento entre o agregado graúdo natural e a argamassa velha podem ser observados (ver Figura 5.38).



**Figura 5.37** – Comparação da microestrutura das misturas C65 na temperatura de 650 °C (imagens da superfície de fratura): (a) concreto convencional; (b) concreto reciclado.



**Figura 5.38** – Fissuras apresentadas pelo concreto reciclado de classe C65, após ser submetido a 650 °C (imagens da superfície de fratura).

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados conclui-se que:

- A utilização de agregado reciclado de concreto na produção de concretos de resistência normal e de alta resistência não influenciou no desempenho mecânico do concreto após exposição a altas temperaturas. Quanto às propriedades físicas, em geral, a presença de agregado reciclado diminuiu ligeiramente o impacto do aquecimento sobre os valores de absorção de água e índice de vazios dos concretos.
- A dosagem pelo método do empacotamento compressível (MEC), que considerou as diferentes propriedades apresentadas entre os agregados naturais e reciclados, possibilitou a produção de concretos reciclados com propriedades mecânicas semelhantes ao concreto convencional.
- Quando submetidos a altas temperaturas, notou-se grandes mudanças nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos. O aquecimento a 150 °C provocou aumento na resistência à compressão de todas as misturas, para ambas as classes de resistências. Após exposição a 400 °C e 650 °C, a resistência à compressão dos concretos diminuiu.
- O módulo de elasticidade foi a propriedade mecânica mais afetada pelo aquecimento, as misturas C25 apresentaram reduções maiores em comparação com as misturas C65. A redução nos valores do módulo de elasticidade foi similar para os teores de 0, 50 e 100% de agregado.
- A resistência à tração das misturas reduziu conforme se aumentou a temperatura de exposição. Para as misturas de classe C25 não houve qualquer influência do agregado reciclado na resistência à tração residual, com variações muito próximas entre os concretos. No entanto para a classe C65 não se pode concluir se o agregado reciclado influencia de alguma forma nessa resposta térmica, pois a 150 °C, C65-50 apresenta reduções menores que as demais misturas, a 400 °C não há diferença

significativa entre as variações apresentadas pelas misturas e a 650 °C C65-100 exibiu resistência à tração residual inferior.

- Em relação às propriedades físicas, o volume de argamassa aderida presente nos agregados reciclados de concretos provocou grandes diferenças entre os concretos com diferentes teores de brita ARC, onde as taxas de absorção de água e índice de vazios apresentadas tornaram-se mais elevadas conforme se aumentou o volume de agregado reciclado. Enquanto a massa específica comportou-se de maneira inversa, em razão da argamassa aderida ser um material mais poroso e leve que a rocha natural, o aumento do volume desse material proporcionou ao concreto massa específica de menor valor.
- O aquecimento provocou grandes acréscimos às taxas de absorção de água e índice de vazios. Os concretos de alta resistência são mais afetados pelo aquecimento que os concretos de resistência normal, no entanto o teor de brita ARC utilizado proporciona efeito semelhante em ambas às classes. De acordo com os resultados, quanto maior o teor de agregado reciclado presente na mistura, menores os acréscimos nas taxas de absorção de água e índice de vazios.

De forma geral, conclui-se que a variação do teor de agregado reciclado não apresentou influência significativa no comportamento pós-aquecimento das propriedades mecânicas dos concretos de mesma classe. Enquanto que para as propriedades físicas, a incorporação do agregado reciclado de concreto promoveu impactos ligeiramente menores. Além disso as diferenças atribuídas a presença dos agregados reciclados foram, em geral, similares em ambas as classes de resistência. Acredita-se que o agregado pode ser utilizado em diferentes teores para a produção de concretos de resistência normal e de alto desempenho, sem que isso afete de maneira negativa as propriedades mecânicas e físicas quando estes são expostos a temperaturas elevadas, desde que o processo de produção do agregado reciclado de concreto e o método de dosagem, com considerações adequadas das propriedades do material reciclado, sejam devidamente aplicados.

## **6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para a continuidade deste trabalho propõe-se analisar a influência dos agregados reciclados de concretos para os mesmos teores e resistência e para tempo de exposição mais longo.

A avaliação do comportamento mecânico de concretos reciclados durante o aquecimento.

O estudo da influência do teor de agregado reciclado de concreto em outros tamanhos (granulometrias maiores e menores tais como agregado miúdo e em tamanho de filler), no desempenho pós-aquecimento de concretos é relevante e também deve ser investigado.

Propõe-se ainda o estudo da origem dos agregados bem como a avaliação do efeito da temperatura na interface concreto reciclado-barras de aço.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2016, *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. São Paulo, Brasil.

AL ROUSAN, T. M., 2005, *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. Tese de Doutorado, Texas AM University.

ABBAS, A.; FATHIFAZ, G.; ISGOR, O. B.; RAZAQPUR, A. G.; FOURNIOR, B.; FOO, S., 2007. “Proposed Method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates”. *Journal of ASTM International*, vol. 5.

ABBAS, A.; FATHIFAZ, G.; ISGOR, O. B.; RAZAQPUR, A. G.; FOURNIOR, B.; FOO, S.; ZAVADIL, R., 2009. “Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis”. *Materials Characterization*, vol. 5, pp. 716 – 728.

AMARIO, M., 2015, *Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AMARIO, M.; RANGEL, C. S.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D., 2017. “Optimization of Normal and High Strength Recycled Aggregate Concrete mixtures by using packing model”. *Cement and Concrete Composites*.

BRITO, J.; FERREIRA, J.; PACHECO, J.; SOARES, D.; GUERREIRO, M., 2016. “Structural material mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete”. *Journal of Building Engineering*, v, 6, pp. 1-16.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: *Cimento Portland com Alta Resistencia Inicial*. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: *Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensãodeformação*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica* Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10004: *Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15114: *Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15116: *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: *Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo*. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: *Determinação da absorção de água em agregados miúdos*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: *Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L., 2015, “Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants”. *Construction and Building Materials*, v. 77, pp. 357-369.

BRITO, J.; SAIKIA, N., 2013. “Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste”. *Springer London Heidelberg, New York Dordrecht*.

BUTLER, L., 2012. “Evaluation of Recycled Concrete Aggregate Performance in Structural Concrete”. Tese de Doutorado, University of Waterloo, Ontario, Canadá.

CABRAL, A. E. B., 2007, *Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados considerando-se a variabilidade da composição do RCD*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J., 2003, “Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction”. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 9, pp. 1633-1644.

CASUCCIO, M.; TORRIJOS, M. C.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R., 2008, “Failure mechanism of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 22, pp. 1500-1506.

CHAN, Y. N.; PENG, G. F.; ANSON, M., 1998. “Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures”. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, pp. 23-27.

CHEN, G. M.; HE, Y. H.; YANG, H.; CHEN, J. F.; GUO, Y. C., 2014, “Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures”. *Construction and Building Materials*, v. 71, pp. 1-15.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução CONAMA nº 307, 5 de julho de 2002.

CORDEIRO, G. C., 2006, *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CREE, D.; GREEN, M.; NOUMOWÉ, A., 2013, “Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review”. *Construction and Building Materials*, v. 45, pp. 208-223.

DA SILVA, M. A., 2015, *Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos autoádensáveis de alto desempenho contendo seixo rolado*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DE LARRARD, F., 1999, “Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach”. *Modern Concrete Technology Series*, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999.

DONG, H.; CAO, W.; BIAN, J.; ZHANG, J., 2014, “The fire resistance performance of recycled aggregate concrete columns with different concrete compressive strengths”. *Construction and Building Materials*, v. 7, n. 12, pp. 7843-7860.

ERGUN, A.; KURKLU, G.; BASPINAR, S., 2016. “The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature”. *Construction and Building Materials*, v. 112, pp. 691-698.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E., 2005, “Microstructure of fire-damaged concrete. A case study”. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 2, pp. 255-259.

GUPTA, A.; MANDAL, S; GHOSH, S., 2012. “Recycled aggregate concrete exposed to elevated temperature”. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 7.

HAGER, I., 2013. “Behaviour of cement concrete at high temperature”. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, v. 61, nº 1.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P., 1992. “Manual de Dosagem e Controle do Concreto”. São Paulo; PINI; Brasília; SENAI. 349p.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A., 2008. “Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate”. *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 872-877.

KODUR, V. K. R.; SULTAN, M. A., 2003. “Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 101-107.

KOU, S. C.; POON, C. S.; ETXEBERRIA, M., 2014, “Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures”. *Cement and Concrete Composites*, v. 53, pp. 73-82.

LANEYRIE, C.; BEAUCOUR, A. L.; GREEN, M. F.; HEBERT, R. L.; LEDESERT, B.; NOUMOWE, A., 2016, “Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures”. *Construction and Building Materials*, v. 111, pp. 368-378.

LEITE, M. B., 2001, *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

LIMA, C.; CAGGIANO, A.; FAELLA, C.; MARTINELLI, E.; PEPE, M.; REALFONZO, R., 2013, “Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash”. *Construction and Building Materials*, v. 47, pp. 547-559.

LIU, Y.; WANG, W.; CHEN, Y. F.; JI, H., 2016, “Residual stress-strain relationship for thermal insulation concrete with recycled aggregate after high temperature exposure”. *Construction and Building Materials*, v. 129, pp. 37-47.

LOTFY, A.; AL-FAYEZ, M., 2015, “Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate”. *Cement and Concrete Composites*, v. 61, pp. 36-43.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P., 2013, “Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição”. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 1, n. 2, pp. 176-188.

- MARTÍNEZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTÍNEZ, F. F.; SÁNCHEZ, A. R., 2016, “Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication”. *Journal of Cleaner Production*, v. 118, pp. 162-169.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. “Concreto: estrutura, propriedades e materiais”. São Paulo. PINI, 2008.
- MENDES, A.; SANJAVAN, J. G.; GATES, W. P.; COLLINS, F., 2012. “The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event”. *Construction and Building Materials*, v.34, p.1067-1074.
- MIRANDA, C. R., 2008, *Pastas de cimento de alta compactidade para poços de petróleo - Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química*. Tese de doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. P., 2011, “A Ação do fogo sobre os componentes do concreto”. *Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 32, n. 1, pp. 47-55.
- MOREIRA, L. H. H., 2011, *Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, Brasil.
- OMARY, S.; GHORBEL, E.; WAEDEH, G., 2016. “Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties”. *Construction and Building Materials*, v.108, p.163-174.
- PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S., 2009. “Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v.23, p.829-836.
- PEDROZO, R. F. E., 2008, *Influencia da Substituição do Agregado Miúdo Natural por Agregado Reciclado Fino em Propriedades de Argamassas e Concretos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

PENG, G.; HUANG, Z., 2006. "Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures". *Construction and Building Materials*, v.22, p.593-599.

PEPE, M., 2015. *A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications*. Tese de Doutorado, Università degli Studi di Salerno, Departamento de Engenharia Civil, Salerno, Italia

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E., 2014. "Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete". *Construction and Building Materials*, v.69, p.124-132.

RANGEL, C. S., 2015, *Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

REIS, C. N. S. 2009, *Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil.

SARHAT, S. R.; SHERWOOD, E. G., 2012. "Residual mechanical response of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures". *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 11, pp. 1721-1730.

SEO, D. S., CHOI, H. B., 2014. "Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar". *Construction and Building Materials*, v. 59, pp. 72-77.

TRIGO, A. P. M., 2012. *Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlo, SP, Brasil.

VAZ, A. P. R., 2013, *Comportamento de vigas reforçadas submetidas a carregamento cíclico*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VELASCO, R. V., 2002, *Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VIEIRA, J. P. B.; CORREIA, J. R.; BRITO, J., 2011. “Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates”. *Cement and Concrete Composites*, v. 41, pp. 533 - 541.

WENDT, S. C., 2006, *Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

YANG, H.; QIN, Y.; LIAO, Y.; CHEN, W., 2016, “Shear behavior of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures”. *Construction and Building Materials*, v. 106, pp. 374-381.

YÜZER, N.; AKÖZ, F.; ÖZTÜRK, L. D., 2004, “Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature”. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 10, pp. 1803-1807.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN,E., 2003. “Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete”. *Cement & Concrete Composites*, v. 25, pp. 223–232

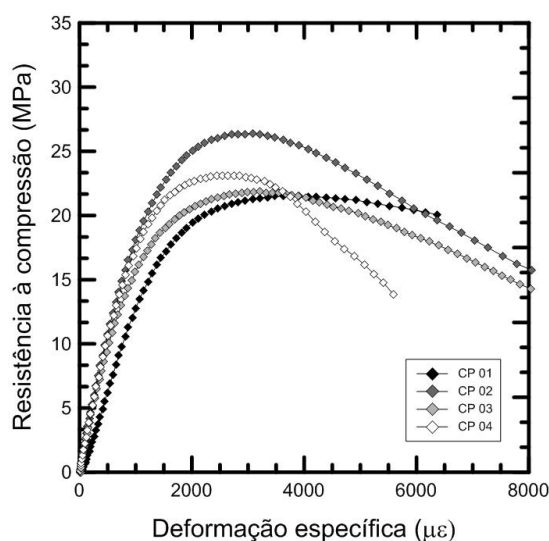
ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A., 2009, “Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature”. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 5, pp. 2047-2052.

ZHU, L.; DAI, J.; BAI, G.; ZHANG, F., 2015, “Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks”. *Construction and Building Materials*, v. 94, pp. 620-628.

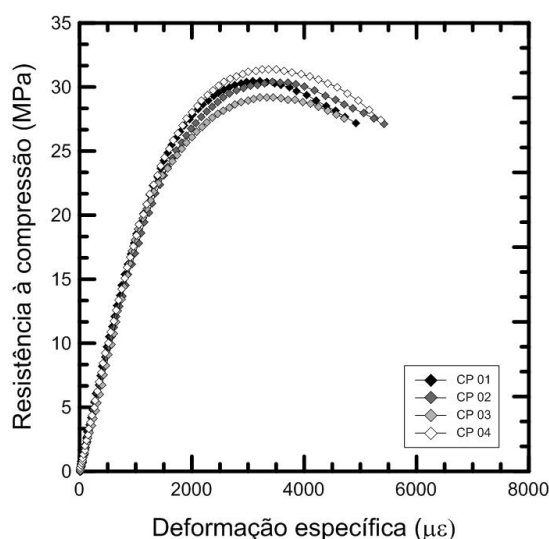


# ANEXO A – COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

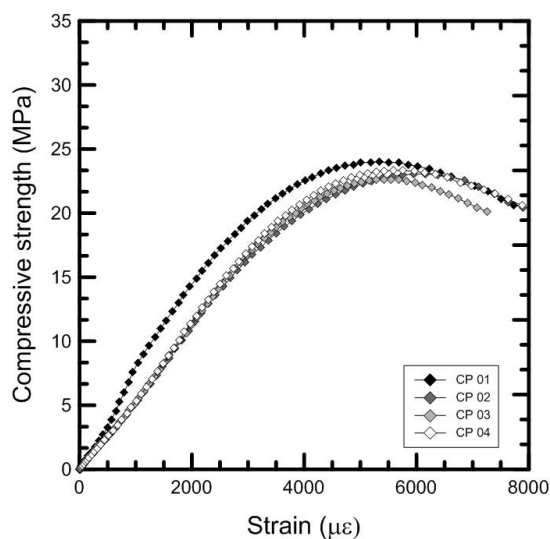
As curvas de tensão *versus* deformação de cada corpo-de-prova exposto aos níveis de temperatura estudados após 28 dias de idade, utilizado para os cálculos dos valores médios dos concretos em estudo ensaiados sob compressão uniaxial podem ser observadas da Figura A1 a Figura A 24.



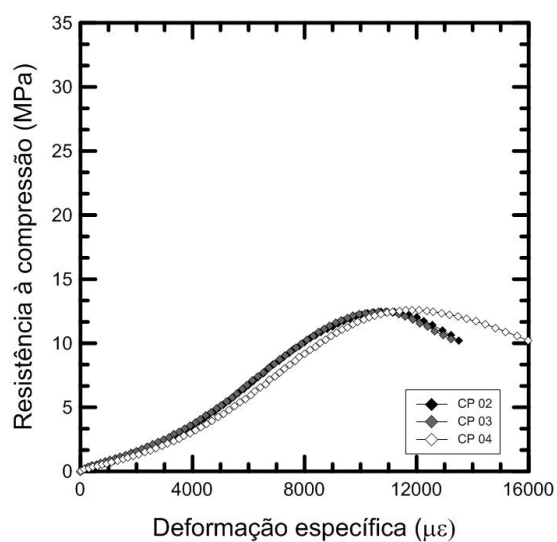
**Figura A 1** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-00, na temperatura de 22 °C.



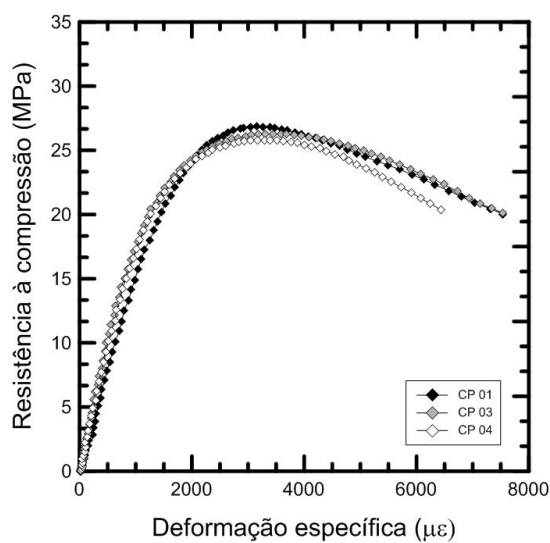
**Figura A 2** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-00, na temperatura de 150 °C.



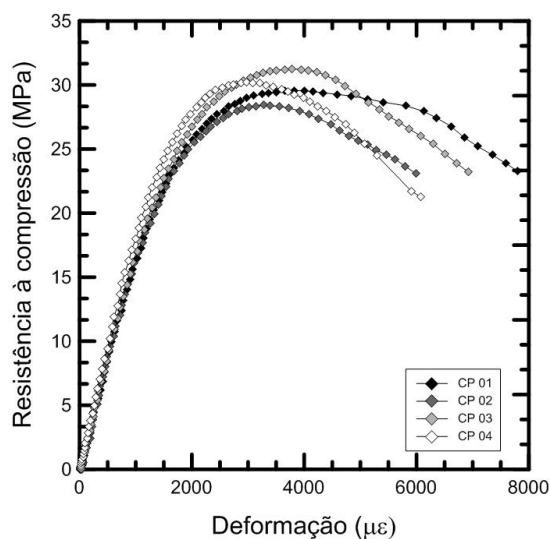
**Figura A 3** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-00, na temperatura de 400 °C.



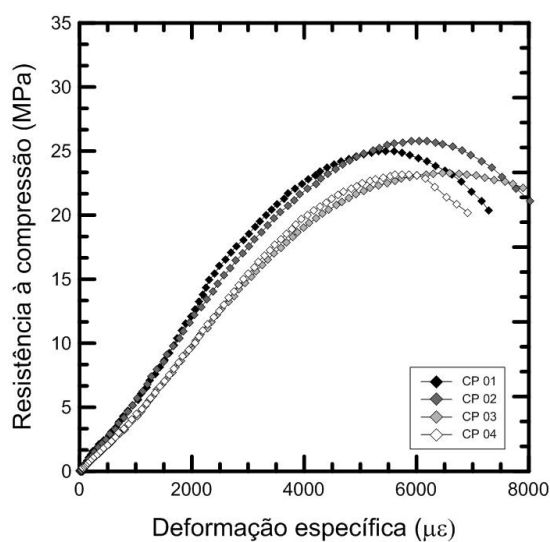
**Figura A 4** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-00, na temperatura de 650 °C.



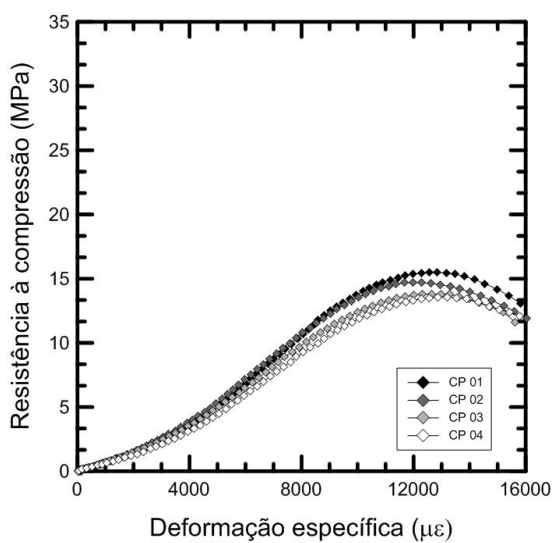
**Figura A 5** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-50, na temperatura de 22 °C.



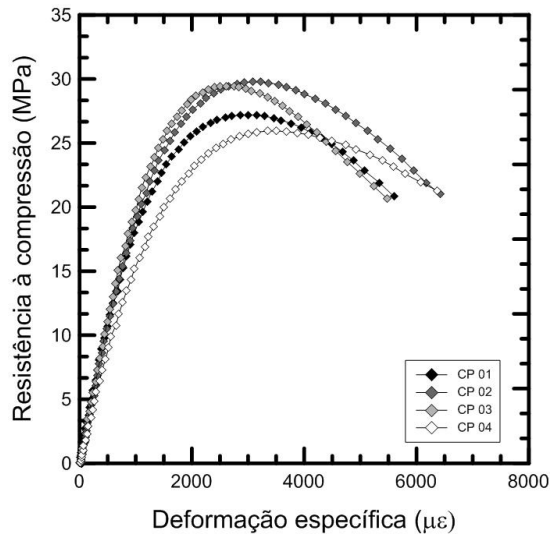
**Figura A 6** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-50, na temperatura de 150 °C.



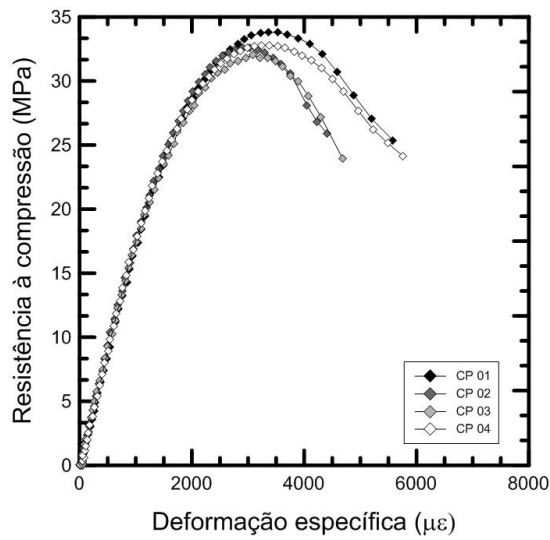
**Figura A 7** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-50, na temperatura de 400 °C.



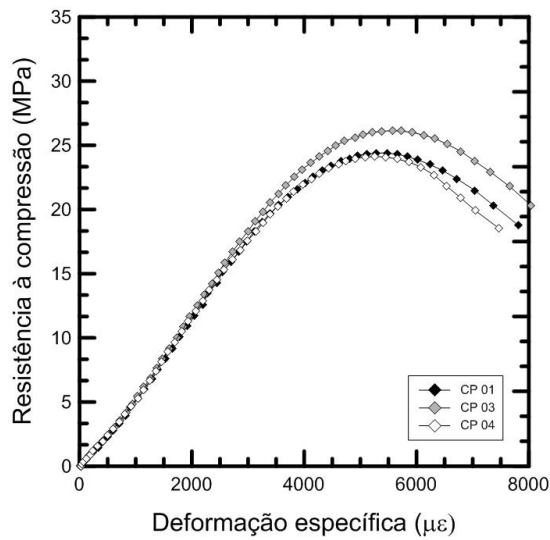
**Figura A 8** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-50, na temperatura de 650 °C.



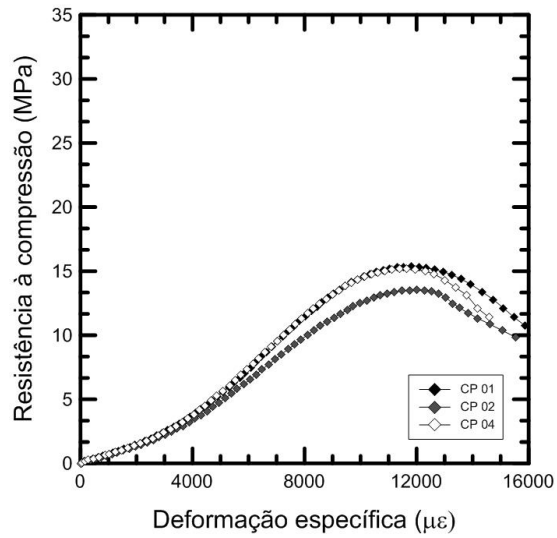
**Figura A 9** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-100, na temperatura de 22 °C.



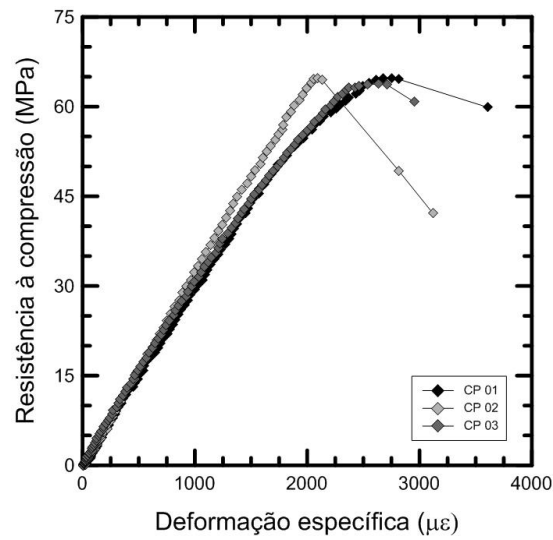
**Figura A 10** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-100, na temperatura de 150 °C.



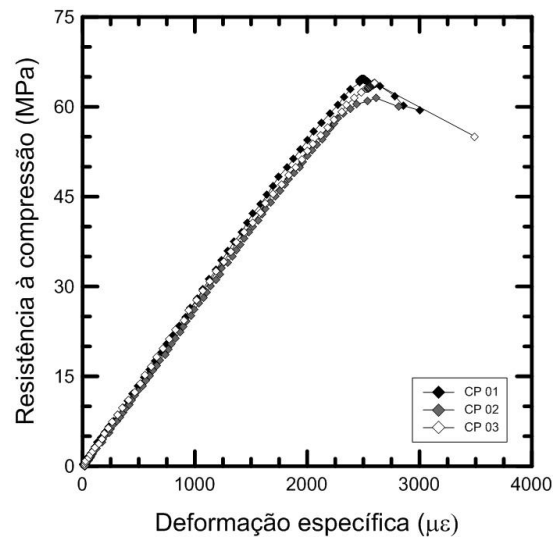
**Figura A 11** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-100, na temperatura de 400 °C.



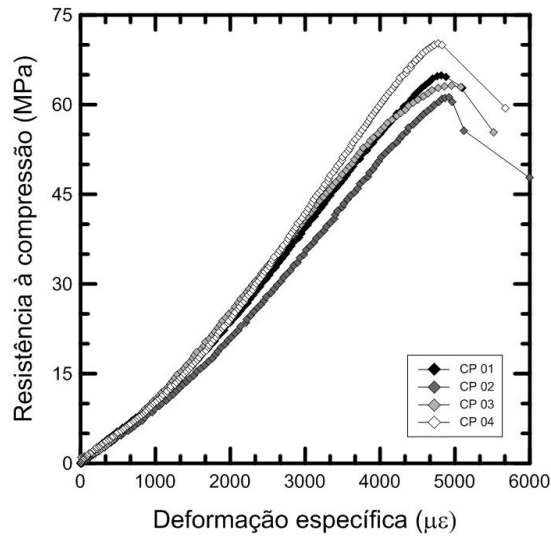
**Figura A 12** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C25-100, na temperatura de 650 °C.



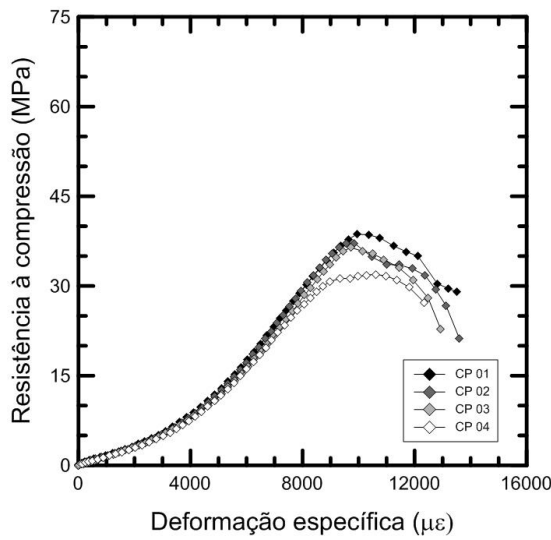
**Figura A 13** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-00, na temperatura de 22 °C.



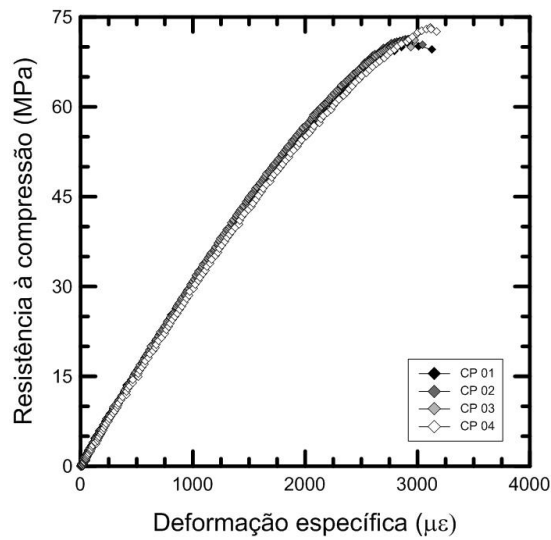
**Figura A 14** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-00, na temperatura de 150 °C.



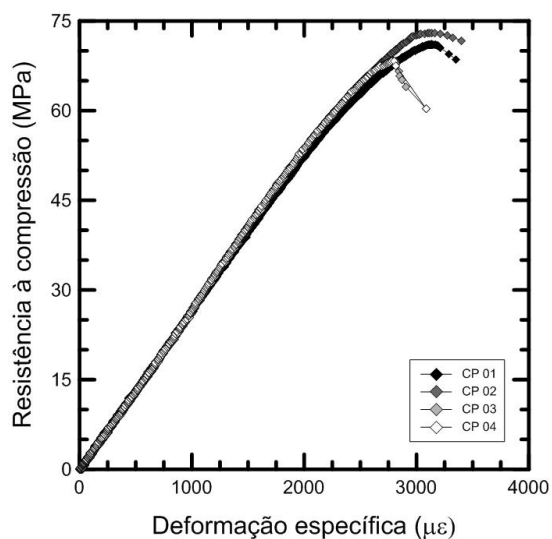
**Figura A 15** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-00, na temperatura de 400 °C.



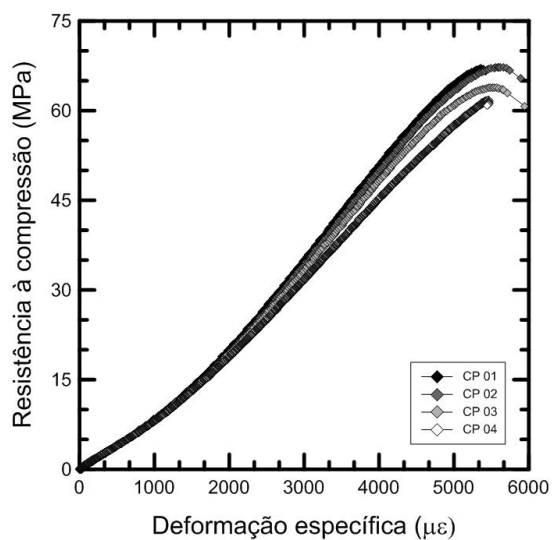
**Figura A 16** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-00, na temperatura de 650 °C.



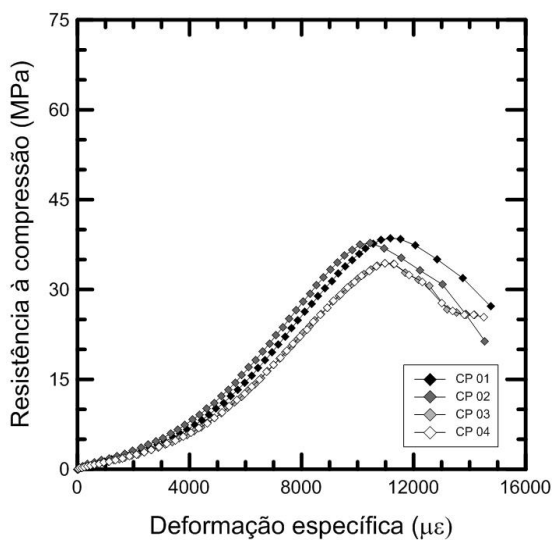
**Figura A 17** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-50, na temperatura de 22 °C.



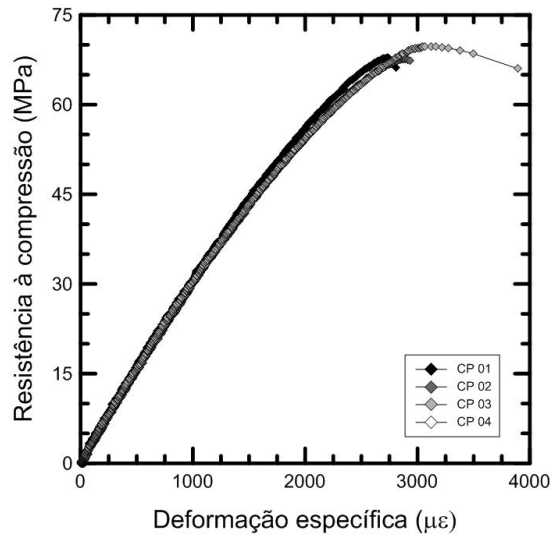
**Figura A 18** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-50, na temperatura de 150 °C.



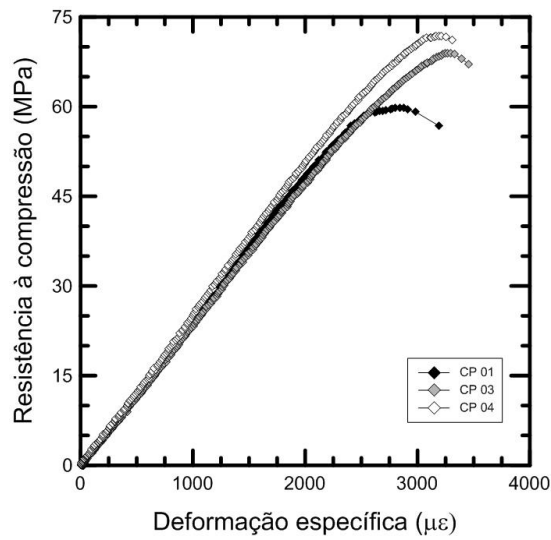
**Figura A 19** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-50, na temperatura de 400 °C.



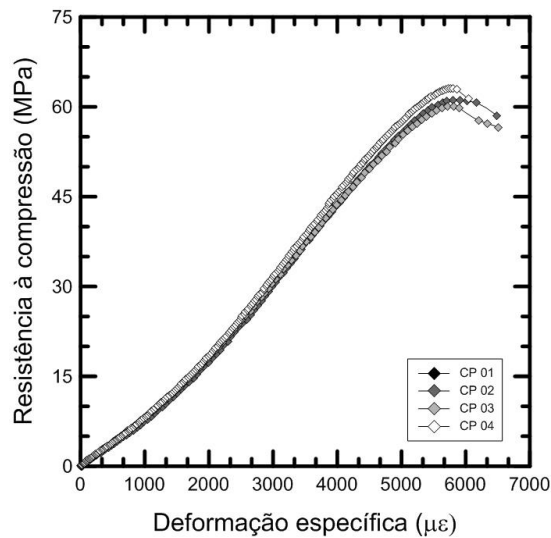
**Figura A 20** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-50, na temperatura de 650 °C.



**Figura A 21** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C55-100, na temperatura de 22 °C.

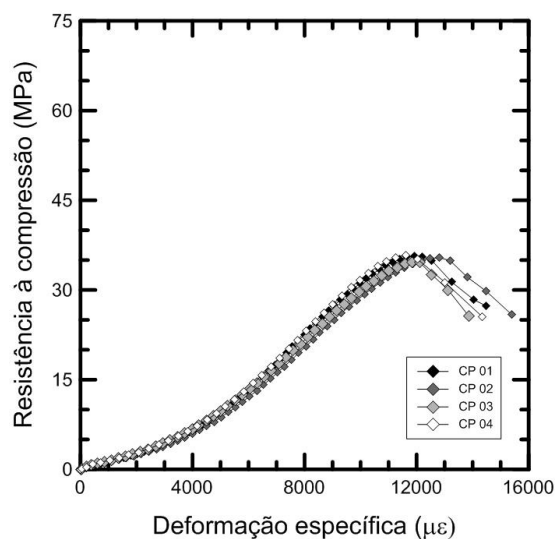


**Figura A 22** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-100, na temperatura de 150 °C.



**Figura A 23** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-100, na temperatura de 400 °C.





**Figura A 24** – Curvas tensão x deformação dos concretos do traço C65-100, na temperatura de 650 °C.

## **ANEXO B – IMAGENS DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS ENSAIO DE COMPRESSÃO**

Imagens dos corpos-de-prova após os ensaios são apresentadas na Figura B 1 e na Figura B 2.

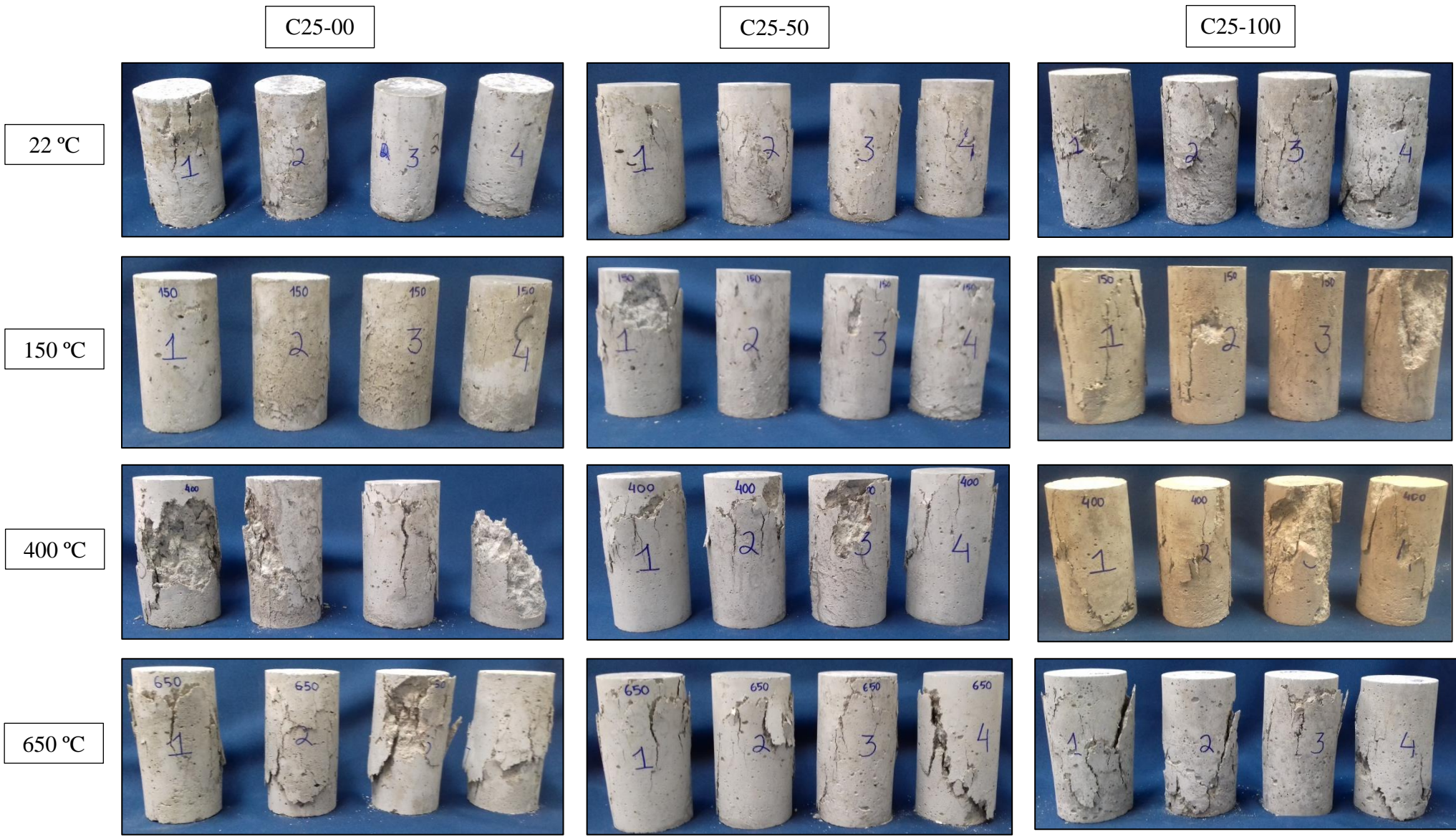


Figura B 1 – Corpos-de-prova após ensaio de compressão dos concretos de classe de resistência C25.

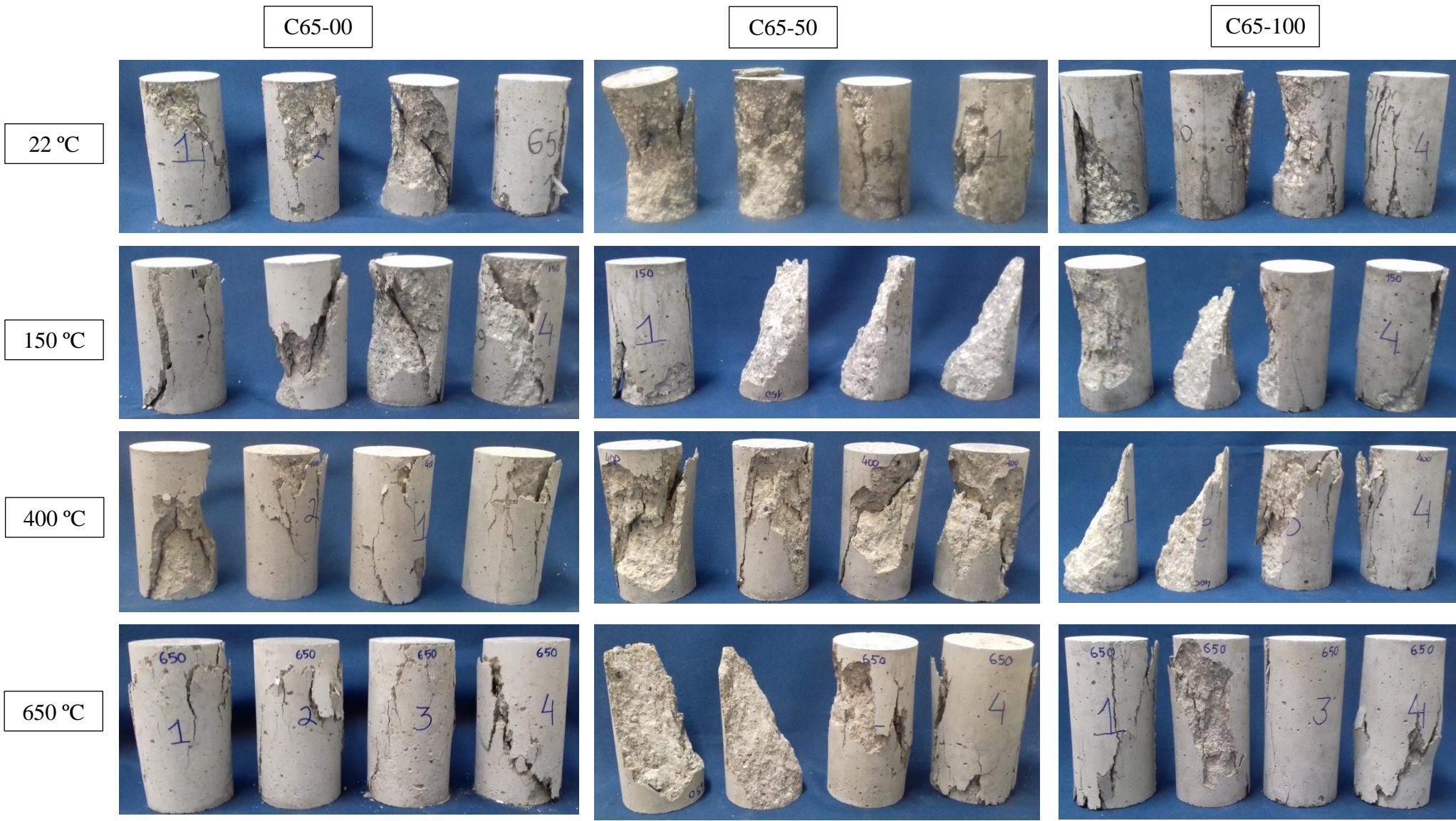
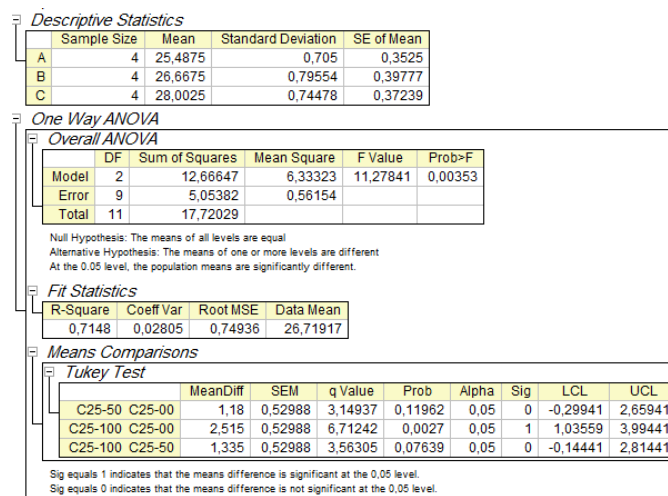


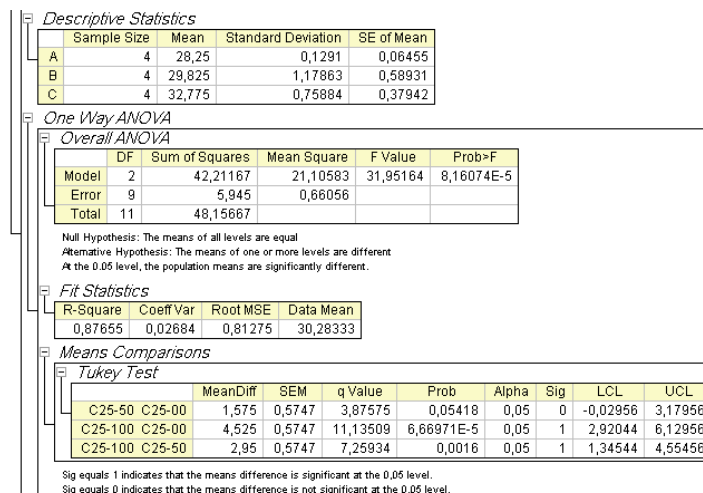
Figura B 2 - Corpos-de-prova após ensaio de compressão dos concretos de classe de resistência C65.

# ANEXO C – ANÁLISE ESTATÍSTICA

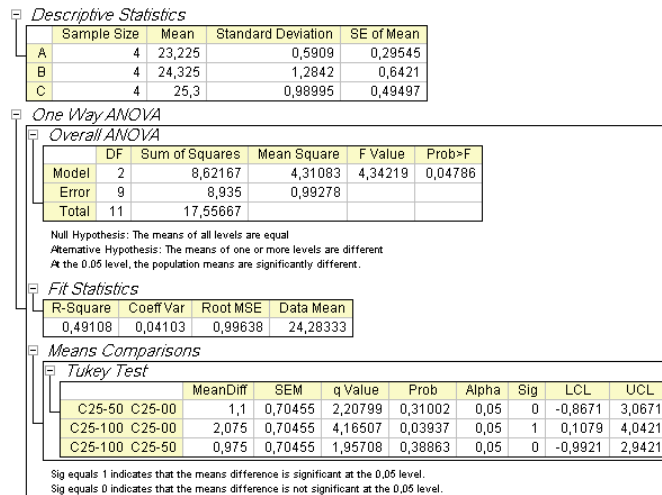
A comparação entre os diferentes resultados para propriedades com 3 ou mais corpos-de-prova foi realizada por análise de variância (ANOVA) como auxílio do *software OriginPro 8*, com nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ), pelo teste de comparação de médias de Tukey. Os resultados das análises estatísticas são apresentados da Figura C 1 a Figura C 32.



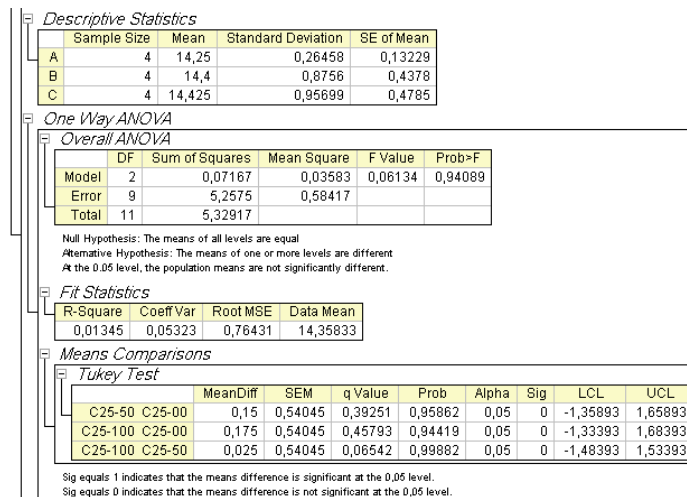
**Figura C 1** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 22 °C.



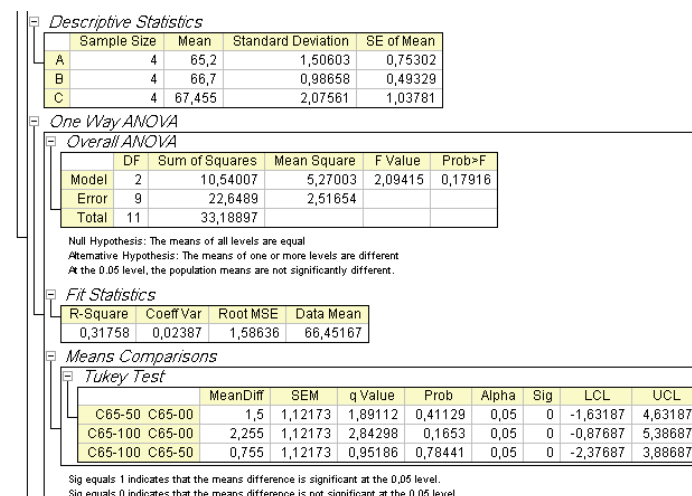
**Figura C 2** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 150 °C.



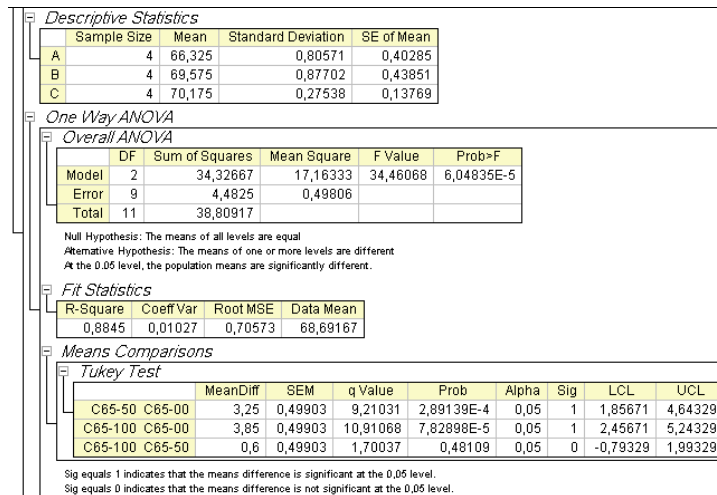
**Figura C 3** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 400 °C.



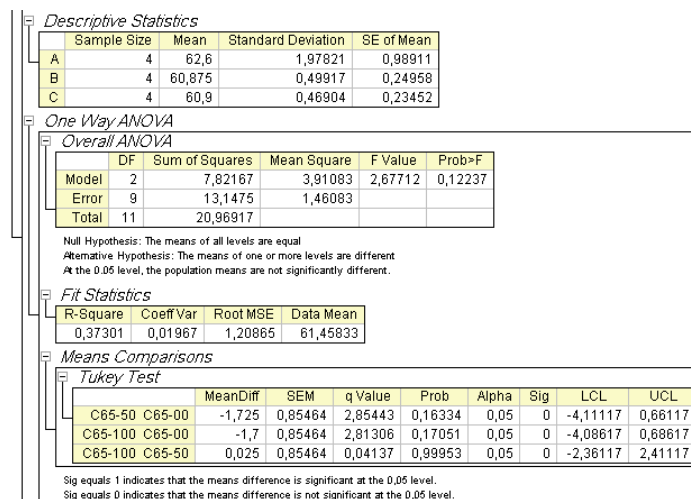
**Figura C 4** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 650 °C.



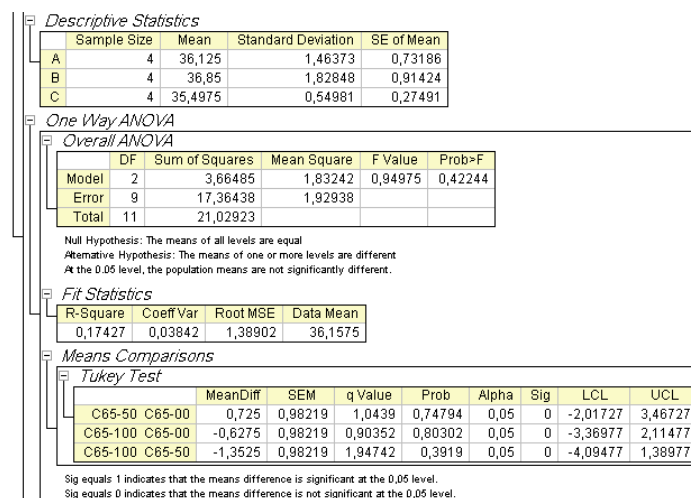
**Figura C 5** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 22 °C.



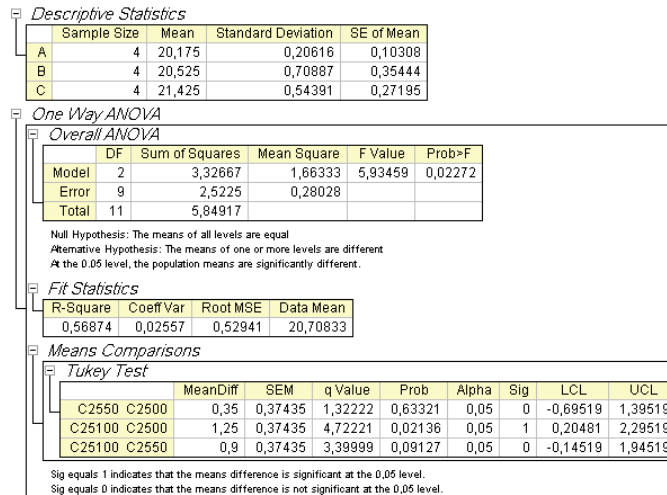
**Figura C 6** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 150 °C.



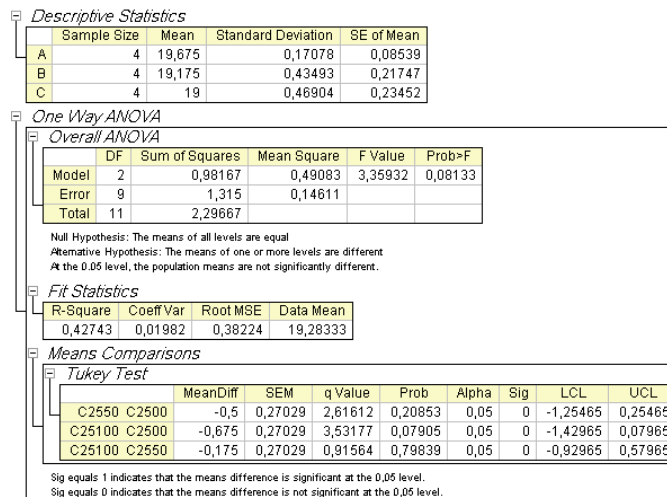
**Figura C 7** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 400 °C.



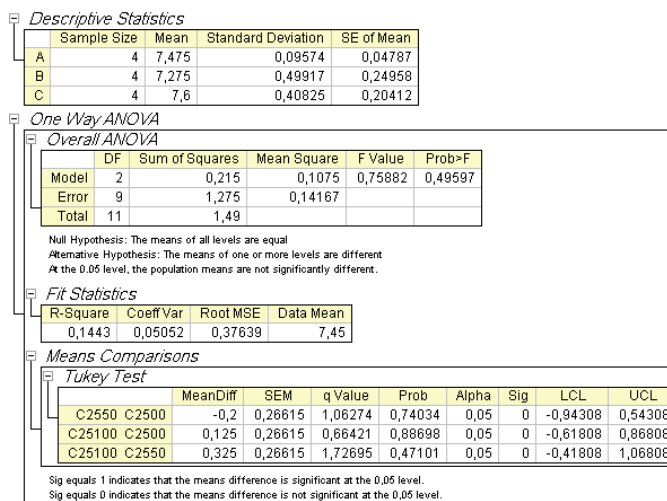
**Figura C 8** - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 650 °C.



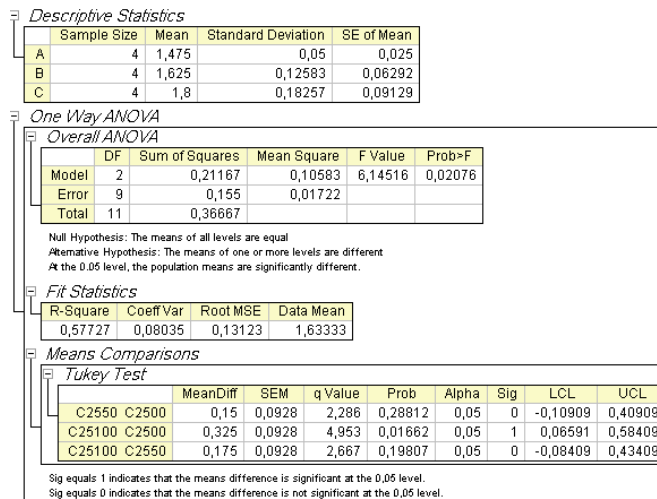
**Figura C 9** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 22 °C.



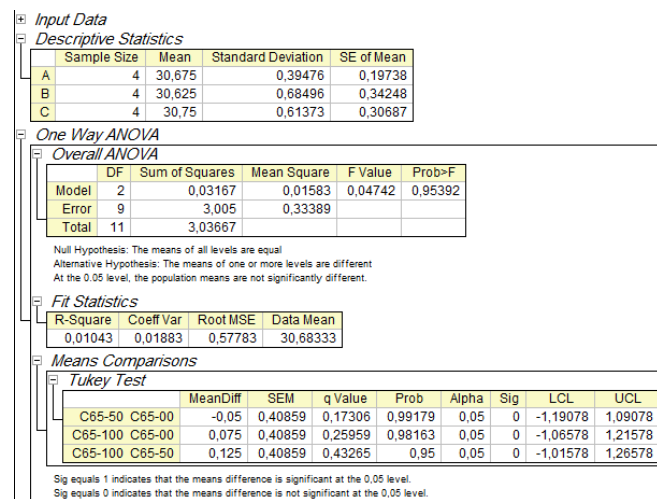
**Figura C 10** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 150 °C.



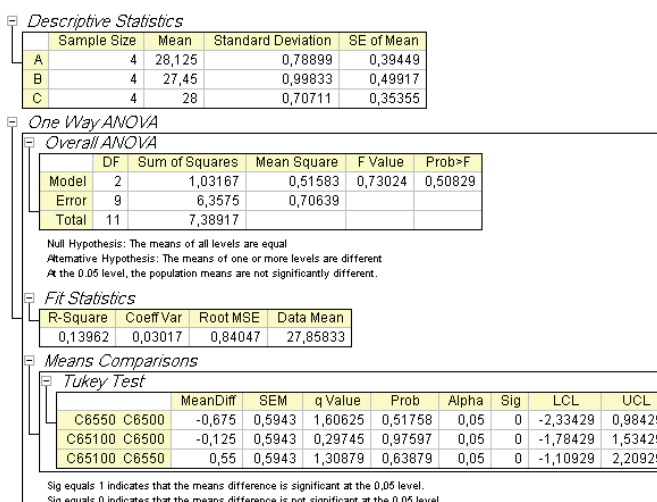
**Figura C 11** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 400 °C.



**Figura C 12** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 650 °C.

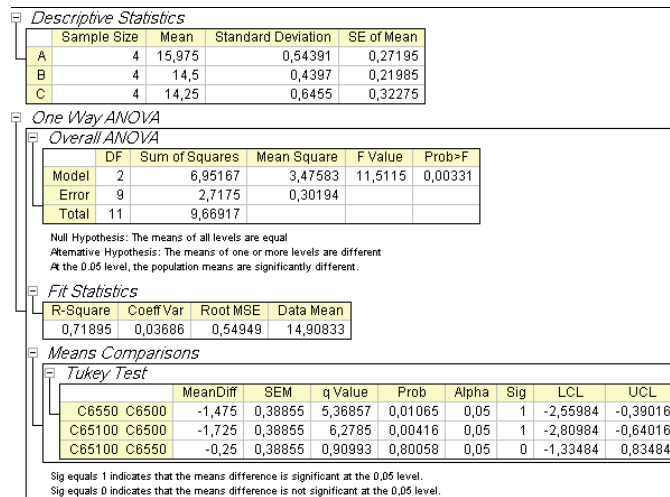


**Figura C 13** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 22 °C.

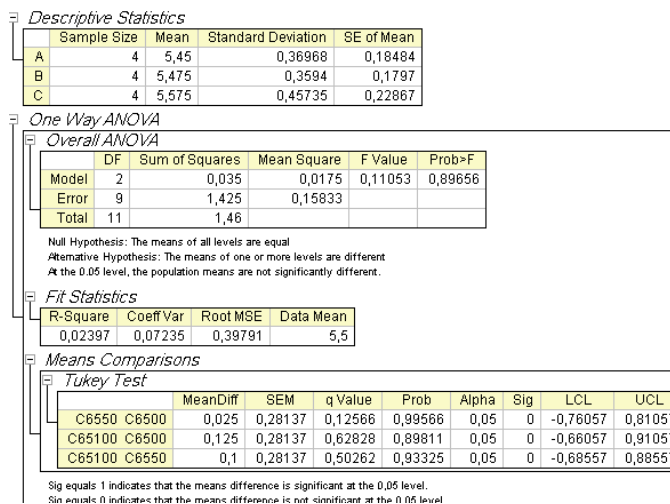


**Figura C 14** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 150 °C.

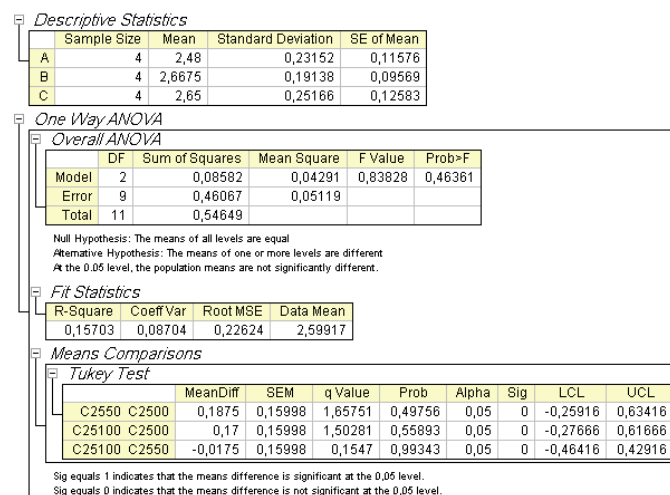




**Figura C 15** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 400 °C.



**Figura C 16** - Análise estatística do módulo de elasticidade aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 650 °C.



**Figura C 17** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 22°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	2,125	0,09574	0,04787
B	4	2,435	0,45118	0,22559
C	4	2,425	0,17078	0,08539

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,24827	0,12413	1,53948	0,26605
Error	9	0,7257	0,08063		
Total	11	0,97397			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,2549	0,12196	0,28396	2,32833

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C2550 C2500	0,31	0,20079	2,18341	0,31718	0,05	0	-0,25061	0,87061
C25100 C2500	0,3	0,20079	2,11297	0,33834	0,05	0	-0,26061	0,86061
C25100 C2550	-0,01	0,20079	0,07043	0,98863	0,05	0	-0,57061	0,55061

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

**Figura C 18** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 150°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	1,875	0,09574	0,04787
B	4	2,125	0,09574	0,04787
C	4	2,075	0,263	0,1315

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,14	0,07	2,4	0,1461
Error	9	0,2625	0,02917		
Total	11	0,4025			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,34783	0,08434	0,17078	2,025

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C2550 C2500	0,25	0,12076	2,9277	0,1513	0,05	0	-0,08717	0,58717
C25100 C2500	0,2	0,12076	2,34216	0,2731	0,05	0	-0,13717	0,53717
C25100 C2550	-0,05	0,12076	0,58554	0,91074	0,05	0	-0,38717	0,28717

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

**Figura C 19** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 400°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	1,075	0,12819	0,0641
B	4	1,21	0,13317	0,06658
C	4	1,1725	0,10243	0,05121

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,03885	0,01942	1,30491	0,31796
Error	9	0,13397	0,01489		
Total	11	0,17282			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,22479	0,10586	0,12201	1,1525

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C2550 C2500	0,135	0,08627	2,21296	0,30859	0,05	0	-0,10588	0,37588
C25100 C2500	0,0975	0,08627	1,59825	0,52074	0,05	0	-0,14338	0,33838
C25100 C2550	-0,0375	0,08627	0,61471	0,90219	0,05	0	-0,27838	0,20338

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

**Figura C 20** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C25, na temperatura de 650°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	4,15	0,23805	0,11902
B	4	4,55	0,19149	0,09574
C	4	3,875	0,09574	0,04787

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,92167	0,46083	13,4878	0,00196
Error	9	0,3075	0,03417		
Total	11	1,22917			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,74983	0,0441	0,18484	4,19167

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C6550 C6500	0,4	0,1307	4,32801	0,0329	0,05	1	0,03508	0,76492
C65100 C6500	-0,275	0,1307	2,97551	0,14388	0,05	0	-0,63992	0,08992
C65100 C6550	-0,675	0,1307	7,30352	0,00153	0,05	1	-1,03992	-0,31008

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0.05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0.05 level.

**Figura C 21** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 22°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	3,8	0,08165	0,04082
B	4	4,3	0,2582	0,1291
C	4	3,525	0,53151	0,26575

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	1,235	0,6175	5,20609	0,03146
Error	9	1,0675	0,11861		
Total	11	2,3025			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,53637	0,08888	0,3444	3,875

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C6550 C6500	0,5	0,24353	2,9036	0,15517	0,05	0	-0,17993	1,17993
C65100 C6500	-0,275	0,24353	1,59698	0,52124	0,05	0	-0,95493	0,40493
C65100 C6550	-0,775	0,24353	4,50059	0,02722	0,05	1	-1,45493	-0,09507

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0.05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0.05 level.

**Figura C 22** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 150°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	3,625	0,12583	0,06292
B	4	3,65	0,26458	0,13229
C	4	3,115	0,23	0,115

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,72927	0,36463	7,88491	0,01051
Error	9	0,4162	0,04624		
Total	11	1,14547			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,63665	0,06209	0,21505	3,46333

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C6550 C6500	0,025	0,15206	0,23251	0,98523	0,05	0	-0,39955	0,44955
C65100 C6500	-0,51	0,15206	4,74319	0,02088	0,05	1	-0,93455	-0,08545
C65100 C6550	-0,535	0,15206	4,9757	0,01622	0,05	1	-0,95955	-0,11045

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0.05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0.05 level.

**Figura C 23** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 400°C.

**Descriptive Statistics**

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
A	4	1,95	0,1291	0,06455
B	4	2,225	0,29861	0,1493
C	4	1,36	0,08981	0,04491

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	1,5626	0,7813	20,57858	4,3913E-4
Error	9	0,3417	0,03797		
Total	11	1,9043			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal  
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different  
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,82056	0,10561	0,19485	1,845

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C6550 C6500	0,275	0,13778	2,82268	0,16882	0,05	0	-0,10968	0,65968
C65100 C6500	-0,59	0,13778	6,05593	0,00521	0,05	1	-0,97468	-0,20532
C65100 C6550	-0,865	0,13778	8,87861	3,80237E-4	0,05	1	-1,24968	-0,48032

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0.05 level.  
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0.05 level.

**Figura C 24** - Análise estatística da resistência à tração aos 28 dias da classe C65, na temperatura de 650°C.