



EFEITO DE FINOS RECICLADOS DE CONCRETO (FRC) DE DIFERENTES
ORIGENS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE
MATRIZES CIMENTÍCIAS

Gabriela de Castro Polisseni

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

Abril de 2018

EFEITO DE FINOS RECICLADOS DE CONCRETO (FRC) DE DIFERENTES
ORIGENS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE
MATRIZES CIMENTÍCIAS

Gabriela de Castro Polisseni

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.

Prof. Camila Aparecida Abelha Rocha, D.Sc.

Prof. Thiago Melo Grabois, D. Sc.

Dr. Marco Pepe, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2018

Polisseni, Gabriela de Castro

Efeito de finos reciclados de concreto (FRC) de diferentes origens nas propriedades físico-químicas e mecânicas de matrizes cimentícias / Gabriela de Castro Polisseni. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XXIII, 184 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 170-184.

1. Finos reciclados de concreto 2. Propriedades físico-químicas e mecânica 3. Pasta de cimento 4. Concretos I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Dedico este trabalho a minha amiga, dupla,
Gabriella Puente.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Eduardo, meu professor e inspiração na Engenharia, pelo incentivo e apoio sempre. A minha mãe, Maria Lúcia, minha MB, pelo apoio, amor incondicional, pelas inúmeras correções deste estudo, pela paciência e dedicação a me ajudar! A minha irmã Izabela, pelo carinho, amizade e força e pelo meu pedacinho de luz no fim dessa caminhada, Helena Orita, minha pequena! Agradeço a minha avó Angelina e a minha segunda mãe Dina pela fé.

Aos familiares, amigos e amigas por acreditarem em mim, que torceram pelo meu sucesso e pela compreensão das ausências nos momentos de estudo.

Ao meu orientador, Romildo, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, por me permitir a fazer parte da família Numats e pela confiança depositada em mim.

Ao Neven e todos os amigos que fiz na TU Darmstadt, meu muito obrigado pelos ensinamentos transmitidos, pela disponibilidade em me receber, pelos ensaios realizados e ajuda na pesquisa.

Ao programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da COPPE e a todos os professores pelos ensinamentos recebidos.

A todos os técnicos e funcionários do NUMATS: Luzidelle, Adailton, Alessandro, Bruna, Alex, Marcelo, Anderson, Marcos, Claudinha, Dalva e muitos outros colegas, obrigada pelo cuidado, carinho, e ajuda em todos os momentos. Vocês foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos do Numats, em especial, a minha dupla, companheira, maravilhosa, Gabi Puente, por dividir histórias, conversas, ensinamentos, risadas, casa, momentos de “dá nada não” e “vai ser ótimo!”. Te amo amiga! Obrigada por fazer parte na minha vida e deixar esse mestrado com mais ranço, mas mesmo assim, mais leve. Sem você não sei se chegaria aonde cheguei! Ao Yassin, obrigada pelos desabafos e apoio, sempre disposto a ajudar a todos! Obrigada pelo bom humor e por deixar o dia mais positivo sempre! Ao maravilhoso Lucas, o goiano mais carioca que existe! Obrigada por ser mais uma inspiração no meio acadêmico! À Camila, pelos ensinamentos, amizade,

apoio e materiais doados. Aos amigos Jéssica, Carol Goulart, Vanessa, Dani, Ioiô, Ani, Fabiana, Yasmim, Pedro, Nath Andrade, Liu, Nath Julião, Renata, Amanda, Rayane, Bruno, Mônica, Alfredo, Tamara, Carol, Mayara, Nina, e todos aqueles que fizeram parte dos meus dias no Numats, pela amizade, ajuda e contribuição para meu crescimento pessoal e acadêmico! Com vocês, a caminhada se tornou mais alegre e mais leve!

Aos amigos e companheiros do mestrado PEC, em especial ao grupo de carona, Halina (dova maravilhosa), Ana Paula, Samanta e Verônica. A idas e vindas ao fundão foram, com certeza, mais divertidas e mais seguras com vocês.

À 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.)

EFEITO DE FINOS RECICLADOS DE CONCRETO (FRC) DE DIFERENTES
ORIGENS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE
MATRIZES CIMENTÍCIAS

Gabriela de Castro Polisseni

Abril/2018

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Durante a produção de agregado graúdo reciclado de concreto também há geração de agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), que contém finos reciclados de granulometria inferior a 150 μm (FRC). Dependendo da origem, granulometria e composição química e mineralógica, os FRC podem funcionar não apenas como material de preenchimento (fíller) mas também apresentar propriedades cimentícias, devido à presença de grãos de cimento não hidratado em sua composição. O presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos físico-químicos-mecânicos da adição de FRC de três diferentes origens em pastas e concretos. A primeira etapa da pesquisa consiste na avaliação da influência dos FRC de diferentes tamanhos médios de partículas (65 μm e 22 μm), como substitutos parciais do cimento (5%, 10% e 15%, em massa) em pastas de cimento Portland. As propriedades estudadas são a reologia, hidratação, microestrutura e comportamento mecânico das misturas. Na segunda etapa, analisa-se os efeitos dos FRC adicionados como fíller em concretos de classe C25 e como finos presentes na composição de AMRC em concretos de classe C30. Os resultados obtidos indicam que os FRC de diferentes origens apresentam baixo potencial cimentício e que quando usados em altos teores de substituição resultam na redução da cinética de hidratação e do comportamento mecânica das pastas. O uso dos FRC como fíller mostra que a origem afeta ligeiramente o comportamento dos concretos e que a utilização de FRC como parte da areia reciclada (AMRC) resulta em misturas de mesma trabalhabilidade e comportamento mecânico do concreto de referência.

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

EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF RECYCLED CONCRETE POWDER (RCP)
ON THE PHYSICO-CHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT
MATRIXES

Gabriela de Castro Polisseni

April/2018

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

During the recycling process procedure of recycled concrete coarses aggregates, it also produces recycled concrete fines aggregate (RCFA), which have recycled concrete powders particles smaller than 150 μm , called here as recycled concrete powders (RCP). Depending on the origin, particle size distribution and chemical and mineralogical composition, the RCP might have a filler effect and may also have cementitious properties due to the presence of unhydrated cement grains in their composition. The aim of this study is to evaluate the physical-chemical-mechanical effects of the addition of three different sources of RCP in cement pastes and concretes. The first stage of the research is to evaluate the influence of RCP of two different average particle sizes (65 μm and 22 μm) as partial replacement of cement (5%, 10% and 15%, wt%) in cement pastes. The properties investigated are related to rheology, hydration, microstructure and mechanical behavior. The second step is to analyse the effects of RCP as filler on concretes with 25 MPa compressive strength at 28 days and also as powders present in the composition of RCFA on concretes with 30 MPa compressive strength at 28 days. The results indicate RCP of different sources presented poor cementitious properties. In addition, high replacement ratio results on reduction of the hydration kinetics and on the mechanical behavior on cement pastes. The application of RCP as filler on concretes shows that the source slightly affects the mechanical and workability behavior. The use of RCP as part of AMRC constituent results in mixtures with similar workability and mechanical behavior of the reference concrete.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
SUMÁRIO.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE GRÁFICOS.....	xviii
ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO	4
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	7
2.1 DEFINIÇÃO, ORIGEM, COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	7
2.2 BENEFICIAMENTO DOS RCD E PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	10
2.3 FINOS DE RCD – ESTADO DA ARTE	15
2.3.1 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS FINOS DE RCD	15
2.3.2 APLICAÇÃO DE FRC	19
3 MATERIAIS CIMENTÍCIOS	28
3.1 REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	28
3.2 ADIÇÕES MINERAIS	34
3.2.1 FILLER.....	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	43
	ix

4.2	PRODUÇÃO, PENEIRAMENTO E HOMOGENEIZAÇÃO DOS FRC	43
4.3	MATERIAIS UTILIZADOS	50
4.4	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	51
4.4.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	51
4.4.2	MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	52
4.4.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	53
4.4.4	ANÁLISE MINERALÓGICA	53
4.4.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	54
4.4.6	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE.....	54
4.4.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	55
4.4.8	COMPACIDADE.....	55
4.4.9	COMPATIBILIDADE E O PONTO DE SATURAÇÃO DO SUPERPLASTIFICANTE.....	59
4.5	PASTAS CIMENTÍCIAS – DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA	60
4.6	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS	63
4.6.1	REOLOGIA.....	63
4.6.2	ESTUDO DA HIDRATAÇÃO DAS PASTAS	67
4.6.3	POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	74
4.6.4	ENSAIOS MECÂNICOS.....	76
4.6.5	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	79
4.7	ESTUDO DE CASO – CONCRETOS CONTENDO FRC	80
4.7.1	CALIBRAÇÃO DOS PARAMETROS “p” E “q”.....	81
4.7.2	DOSAGEM, PRODUÇÃO E CURA DOS CONCRETOS	83
4.7.3	ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE.....	87
4.7.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAL.....	88
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	90

5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	90
5.1.1	CP V ARI, FRC-150 e S-150	90
5.1.2	FRC-100 e S-100.....	103
5.1.3	AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS.....	108
5.2	ROPIEDADES DA PASTA DE REFERÊNCIA E DAS PASTAS COM FRC-150 e S-150	110
5.2.1	REOLOGIA.....	110
5.2.2	ESTUDO DE HIDRATAÇÃO.....	115
5.2.3	MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	126
5.2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	127
5.2.5	POROSIMETRIA.....	140
5.3	PROPRIEDADES DA DAS PASTAS COM FRC-100 e S-100.....	143
5.3.1	REOLOGIA.....	143
5.3.2	ESTUDO DE HIDRATAÇÃO.....	144
5.3.3	MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	151
5.3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	152
5.3.5	POROSIMETRIA.....	158
5.4	CONSIDERAÇÕES DOS EFEITOS DOS FRC QUANTO AO SEU POTENCIAL RELATIVO.....	160
5.5	APLICAÇÃO DE FRC EM CONCRETOS C25	162
5.5.1	CASO I: Concreto contendo FRC-150.....	162
5.5.2	CASO II: Concreto contendo Areia com FRC-150 tipo LAB	165
5.6	CONSIDERAÇÕES DOS EFEITOS DOS FRC EM CONCRETOS	167
6	CONCLUSÕES.....	168
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	168
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Composição gravimétrica dos RCD em São Paulo e no Rio de Janeiro, respectivamente. Fonte: SMA (2014).....	8
Figura 2.2 – DRX do fino reciclado de concreto analisado por Grabois (2016). Fonte: Grabois (2016).....	19
Figura 2.3 – Representação esquemática da britagem do grão de cimento Portland durante a produção de agregado reciclado. Fonte: Adaptado de Amin <i>et al.</i> (2016).....	20
Figura 3.1 – Hidratação dos componentes do cimento Portland. Fonte: adaptado de Bensted, 2004.....	30
Figura 3.2 – Curva típica do fluxo de calor durante as reações de hidratação de um cimento. Fonte: adaptado de BULLARD <i>et al.</i> , 2011.....	33
Figura 3.3 – Representação esquemática do efeito de nucleação, onde a espessura da camada dos produtos hidratados é representado pela letra “e”. Fonte: Lawrence (2003).....	37
Figura 3.4 – Representação esquemática da hidratação do cimento: (a) cimento Portland sem adição mineral antes da hidratação (b) cimento sem adição mineral depois da hidratação; (c) cimento com adição de micropartículas antes da hidratação (d) cimento com adição de micropartículas depois da hidratação (efeito de diluição); (e) cimento com nano partículas antes da hidratação (efeito filler) (f) cimento com nano partículas depois da hidratação (efeito de nucleação heterogênea e efeito filler). Fonte: Jayapalan, 2013.....	37
Figura 4.1. – Plano experimental da etapa 1: (a) fase I: FRC-150 e (b) fase II: FRC-100.....	41
Figura 4.2 – Plano experimental da etapa 3: concretos contendo FRC-150.....	42
Figura 4.3 – RCD-LAB. (a) Corpos-de-prova produzidos; (b) ruptura dos corpos-de-prova aos 28 dias e (c) concreto rompido. Fonte: Amario <i>et al.</i> , 2018.....	44
Figura 4.4 – (a) RCD-D e (b) RCD-C. Fonte: Amario <i>et al.</i> , 2018.....	45

Figura 4.5 – Processo de britagem. (a) material no britador de mandíbulas Queixada 200; (b) saída do material fino; (c) saída do material grosso. Fonte: Amario <i>et al.</i> , 2018	45
Figura 4.6 – Processo de peneiramento mecânico do material grosso: (a) detalhe do equipamento (b) detalhe de uma saída do peneirador. Fonte: Amario <i>et al.</i> , 2018.....	46
Figura 4.7 – (a) Peneirador mecânico utilizado; (b) frações granulométricas obtidas do novo peneiramento: AMRC e FRC	47
Figura 4.8 – Homogeneização pelo método de pilha alongada.....	49
Figura 4.9 – Peneirador mecânico TYLER RO-TAP8”	49
Figura 4.10 – Ponto de demanda d’água	57
Figura 4.11 – Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração. (a) posição do pistão antes da vibração; (b) posição do pistão após vibração	58
Figura 4.12 – Ensaio de compatibilidade e ponto de saturação do superplastificante: (a) passagem da pasta pelo funil; (b) e (c) instante em que 1000 ml de pasta passam pelo funil.....	59
Figura 4.13 – Ensaio de mini-espalhamento para medir o índice de consistência das pastas. (a) Detalhe do mini tronco de cone (b) medição do espalhamento; (c) aspecto da pasta de cimento	60
Figura 4.14 – Moldagem dos corpos-de-prova.....	63
Figura 4.15 – Equipamento Brookfield modelo DV-III Ultra.....	64
Figura 4.16 – Curva típica tensão de cisalhamento <i>versus</i> tempo. Fonte: adaptado de BARNES e NGUYEN, 2001	65
Figura 4.17 – Interpretação do fluxo de calor durante a hidratação de pasta de referência	68
Figura 4.18 – Equipamento UCA.....	68
Figura 4.19 – Curva típica do ensaio de UCA. Fonte: Rocha (2015).....	70
Figura 4.20 – Análise da curva típica da velocidade do pulso ultrassônica para a P_REF	71
Figura 4.21 – Gráfico típico da análise termogravimétrica de uma pasta de cimento Portland CP V ARI.....	72
Figura 4.22 – Curvas tradicionais de porosimetria por intrusão de mercúrio. Fonte: adaptado ALIGIZAKI, 2002	76

Figura 4.23 – (a) detalhe do porta-amostra com corpo-de-prova encaixado; (b) posicionamento do porta-amostra com os LVDTs para o ensaio compressão axial.....	77
Figura 4.24 – Ensaio de compressão diametral	79
Figura 4.25 – Adensamento dos corpos-de-prova em mesa vibratória	87
Figura 4.26 – Medição do abatimento de tronco de cone.....	87
Figura 4.27 – Ensaio de compressão axial dos concretos na Shimadzu UH F-1000kN.	88
Figura 5.1 – Fotomicrografia MEV das amostras aumentadas em x200 (a) CP V ARI; (b) LAB-150; (c) D-150; (d) C-150; (e) S-150	92
Figura 5.2 – Fotomicrografia MEV de pequenas partículas na superfície de partículas maiores do C-150 (a) x500 e (b) x800.....	93
Figura 5.3 – Fotomicrografia MEV do C-150 (a) x1000; (b) x4000 (c) EDS da partícula de cimento hidratado assinalada.....	94
Figura 5.4 – (a) Fotomicrografia da amostra LAB-150 (x4000); (b) EDS da microclina	98
Figura 5.5 – (a) Fotomicrografia da amostra D-150 (x1000); (b) EDS do grão de cimento hidratado assinalado e (c) EDS do grão de biotita assinalado.	99
Figura 5.6 – Fotomicrografia MEV das amostras aumentadas em x1000 (a) CP V ARI; (b) LAB-100; (c) D-100; (d) C-100; (e) S-100	105
Figura 5.7 – Fotomicrografia MEV de um grão formado parte por cimento hidratado e parte por quartzo da amostra C-100 (x4000).....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Revisão da literatura da composição química de finos de RCD.....	18
Tabela 3.1 – Composição do cimento Portland. Fonte: Mehta e Montero, 2008.....	29
Tabela 4.1 – Composição do concreto original do RCD-LAB.....	44
Tabela 4.2 – Propriedades do superplastificante GLENIUM 51. Fonte: BASF.....	51
Tabela 4.3 – Consumo de materiais para a produção de 1m ³ de pasta e seu respectivo índice de consistência	62
Tabela 4.4 – Classificação do tamanho de poros de uma pasta de cimento hidratada e suas propriedades afetadas. Fonte: adaptado de Mindess <i>et al.</i> (2002).....	75
Tabela 4.5 – Consumo de material para produção de traço rico (TR) e traço pobre (TP) em kg/m ³ de mistura produzida.	82
Tabela 4.6 – Resistência à compressão das misturas utilizadas para a calibração dos parâmetros "p" e "q".	82
Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros "p" e "q" obtidos pelo <i>software Betonlab Pro 3</i> . 83	
Tabela 4.8 – Caso de estudo I: dosagens finais calculadas pelo <i>Betonlab Pro 3</i> em kg/m ³ de mistura produzida.	84
Tabela 4.9 – Caso de estudo I: propriedades dos concretos calculados pelo <i>Betonlab Pro 3</i>	84
Tabela 4.10 – Caso de estudo II: dosagens finais calculadas pelo <i>Betonlab Pro 3</i> em kg/m ³ de mistura produzida.	85
Tabela 4.11 – Caso de estudo II: propriedades dos concretos calculados pelo <i>Betonlab Pro 3</i>	86
Tabela 5.1 – Propriedades físicas e granulométricas dos materiais	91
Tabela 5.2 – Composição química dos materiais	95
Tabela 5.3 – Conteúdo percentual calculado na base inicial de cada material (em%).	102
Tabela 5.4 – Propriedades físicas e granulométricas dos materiais	104
Tabela 5.5 – Conteúdo percentual calculado na base inicial de cada material (em%).	108
Tabela 5.6 – Características dos agregados	109
Tabela 5.7 – Média dos resultados do ensaio de espalhamento	110
Tabela 5.8 – Limite de escoamento para as pastas P_REF e pastas com FRC-150 com os respectivos coeficientes de variação (em%)	113

Tabela 5.9 – Dados dos períodos de hidratação e de calor acumulado das pastas estudadas.....	115
Tabela 5.10 – Patamar de percolação e inclinação das retas obtidas durante a regressão linear na região intermediária das reações de hidratação	121
Tabela 5.11 – Conteúdo percentual da pasta de referência e das pastas com 5% de FRC-150 e S-150, calculados na base inicial de cimento (em%).....	125
Tabela 5.12 – Resultados de absorção de água (A), índice de vazios (Iv) e massa específica real (ρ) das amostras curadas com substituições de 5% de FRC e sílica inerte	127
Tabela 5.13 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 1 dia	129
Tabela 5.14 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 7 dias.....	131
Tabela 5.15 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 28 dias.....	133
Tabela 5.16 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 63 dias.....	135
Tabela 5.17 – Valores médios de resistência à tração por compressão diametral para as pastas curadas em diferentes idades com os respectivos coeficientes de variação (CV%)	139
Tabela 5.18 – Relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial para as pastas curadas em diferentes idades.....	139
Tabela 5.19 – Classificação da porosidade das pastas curadas aos 28 dias.....	141
Tabela 5.20 – Diâmetro crítico (Dcr) e diâmetro limite (Dl) das pastas estudadas.....	143
Tabela 5.21 – Média dos resultados do ensaio de espalhamento	144

Tabela 5.22 – Dados dos períodos de hidratação e calor acumulado das pastas estudadas	146
Tabela 5.23 – Conteúdo percentual das pastas com 5% de FRC-100 e S-100 calculados na base inicial de cimento Portland (em%)	150
Tabela 5.24 – Resultados de absorção de água (A), índice de vazios (Iv) e massa específica real (ρ) das amostras curadas com substituições de 5% de FRC e sílica inerte	151
Tabela 5.25 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-100 e S-100	154
Tabela 5.26 – Classificação da porosidade das pastas curadas a 28 dias	159
Tabela 5.27 – Diâmetro crítico e diâmetro limite (threshold) das pastas estudadas	159
Tabela 5.28 – Abatimento experimental dos concretos com FRC-150.....	162
Tabela 5.29 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para os concretos com FRC-150.....	164
Tabela 5.30 – Abatimento experimental dos concretos de referência, com areia reciclada com finos e sem finos.....	165
Tabela 5.31 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para os concretos com FRC-150.....	165

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Granulometria dos RCD das partículas areia reciclada contendo finos FRC	46
Gráfico 4.2 – Quantificação de fração gerada no processo de beneficiamento de cada RCD	48
Gráfico 5.1 – Curvas granulométricas do Cimento CP V ARI, dos finos FRC-150 e da sílica inerte S-150	91
Gráfico 5.2 – Difratoograma da sílica inerte S-150	96
Gráfico 5.3 – Difratoograma DRX do CP V ARI	96
Gráfico 5.4 – Difratoograma dos FRC-150	97
Gráfico 5.5 – Análise térmica (TG/DTG/DSC) do cimento CP V ARI, FRC-150 e S-150	100
Gráfico 5.6 – Ponto de saturação e compatibilidade do superplastificante GLENIUM 51	102
Gráfico 5.7 – Curvas granulométricas do Cimento Portland CP V ARI, dos finos FRC-100 e da sílica inerte S-100	104
Gráfico 5.8 – Difratoograma dos FRC-100	106
Gráfico 5.9 – Análise térmica (TG/DTG/DSC) do cimento CP V ARI, FRC-100 e S-100	107
Gráfico 5.10 – Distribuição granulométrica dos agregados	109
Gráfico 5.11 – Curva de tensão de cisalhamento <i>versus</i> tempo das pastas P_REF em comparação com as pastas com (a) 5%; (b) 10%; (c) 15% dos FRC-150.....	112
Gráfico 5.12 – Tensão de cisalhamento <i>versus</i> teor de substituição de FRC-150.....	114
Gráfico 5.13 – Relação entre a tensão de cisalhamento e o espalhamento	114
Gráfico 5.14 – Curva de liberação de calor da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (c) 10% e (e) 15% de substituição; Calor acumulado durante tempo total de ensaio (160h) para a mistura de referência e misturas com (b) 5% (d) 10% e (f) 15% de substituição	117
Gráfico 5.15 – Curva de liberação de calor durante 24 horas para a pasta de referência e misturas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição.....	118

Gráfico 5.16 – Curvas velocidade do pulso ultrassônico <i>versus</i> tempo de cura em escala logarítmica: misturas contendo (a) 5%; (b) 10% e (c) 15% de substituição	120
Gráfico 5.17 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 1 dia de cura.....	123
Gráfico 5.18 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 28 dias de cura	124
Gráfico 5.19 – (a) Conteúdo de água combinada total e (b) CH para as pastas com FRC-150	126
Gráfico 5.20 – Tensão <i>versus</i> deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 1 dia	128
Gráfico 5.21 – Tensão <i>versus</i> deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 7 dias	130
Gráfico 5.22 – Tensão <i>versus</i> deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 28 dias	132
Gráfico 5.23 – Tensão <i>versus</i> deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5%, (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 63 dias	134
Gráfico 5.24 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com (a) LAB-150, (b) D-150, (c) C-150.....	136
Gráfico 5.25 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com S-150.....	137
Gráfico 5.26 – Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento da pasta de referência e misturas com (a) LAB-150, (b) D-150, (c) C-150 e (d) S-150 aos 28 dias	138
Gráfico 5.27 – Crescimento da resistência à tração por compressão diametral em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com (a) 5%, (b) 10% e (c) 15%	140
Gráfico 5.28 – Distribuição de tamanho de poros da mistura de referência e pastas contendo (a) 5%; (b) 10%; (c)15% de substituição.....	142
Gráfico 5.29 – (a) Curva de liberação de calor durante 160 horas; Calor acumulado durante tempo total de ensaio (160h); (c) Curva de liberação de calor durante 24 horas para a mistura de referência e misturas com 5% de FRC-100 e S-100	145
Gráfico 5.30 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 1 dia de cura.....	148

Gráfico 5.31 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 28 dias de cura	149
Gráfico 5.32 – (a) Conteúdo de água combinada total e (b) CH para as pastas com FRC-150	150
Gráfico 5.33 – Tensão <i>versus</i> deformação da pasta de referência e das pastas com 5% de substituição de FRC-100 e S-100 para (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias e (d) 63 dias..	153
Gráfico 5.34 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com (a) FRC-LAB, (b) FRC-D e (c) FRC-C	156
Gráfico 5.35 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com S-150 e S-100.....	157
Gráfico 5.36 – Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento da pasta de referência e misturas com Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento da pasta de referência e misturas com (a) LAB-100, (b) D-100, (c) C-100 e (d) S-100 aos 28 dias	158
Gráfico 5.37 – Distribuição de tamanho de poros da mistura de referênciae pastas contendo FRC-100.....	159
Gráfico 5.38 – Tensão <i>versus</i> deformação dos concretos com FRC-150 para (a) 1 dia; (b) 7 dias e (c) 28 dias	163
Gráfico 5.39 –Eficiência das misturas em relação ao fator água/c para 28 dias	164
Gráfico 5.40 – Tensão <i>versus</i> deformação dos concretos com FRC-150 para (a) 1 dia; (b) 7 dias e (c) 28 dias	166
Gráfico 5.41 –Eficiência das misturas em relação ao fator água/c para 28 dias	167

ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Aef/c	Relação gua efetiva cimento
AGRC	Agregado graúdo reciclado de concreto
AMRC	Agregado miúdo reciclado de concreto
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção
ANOVA	Análise de variância
ARC	Agregado reciclado de concreto
ARM	Agregado reciclado misto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C-100	FRC proveniente do RCD-C de granulometria inferior a 0,100 mm
C-150	FRC proveniente do RCD-C de granulometria inferior a 0,150 mm
C_A-F	Areia reciclada proveniente do RCD-C contendo finos C-150
CCE	Comitê da Comunidade Europeia
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C ₃ A	Aluminato de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
C ₄ AF	Ferroalumianto tetracálcico
C ₄ ASH ₁₂	Monossulfato
C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂	Etringita
C _g	Capilares grandes
CH	Portlandita (Hidróxido de cálcio)
C _m	Capilares médios
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
C ₂ S	Belita (Silicato tricálcico)

C ₃ S	Alita (Silicato dicálcico)
C \bar{S} H ₂	Sulfato de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CV	Coefficiente de variação
D-100	FRC proveniente do RCD-D de granulometria inferior a 0,100 mm
D-150	FRC proveniente do RCD-D de granulometria inferior a 0,150 mm
D_A-F	Areia reciclada proveniente do RCD-D contendo finos D-150
D _{cr}	Diâmetro crítico
D _l	Diâmetro limite
DRX	Difração de Raio X
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
DTG	Derivada da termogravimetria
EDS	Espectrometria de Raio X
EPA	<i>Environmental Protection Agency – Unites States</i>
F _c	Resistência à compressão
FRC	Finos reciclados de concreto
FRC-C	Fino resíduo de concreto gerado durante o beneficiamento do RCD-C
FRC-D	Fino resíduo de concreto gerado durante o beneficiamento do RCD-D
FRC-LAB	Fino resíduo de concreto gerado durante o beneficiamento do RCD-LAB
FRC-150	Finos reciclados de concreto com granulometria inferior a 0,150 mm
FRC-100	Finos reciclados de concreto com granulometria inferior a 0,100 mm
FRX	Fluorescência de Raio X
F _t	Resistência à tração
H ₂ O	Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAB-100	FRC proveniente do RCD-LAB de granulometria inferior a 0,100 mm
LAB-150	FRC proveniente do RCD-LAB de granulometria inferior a 0,150 mm
LAB_A-F	Areia reciclada proveniente do RCD-LAB contendo finos LAB-150
LabEST	Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro
LTM	Laboratório de Tecnologia Mineral
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>

MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
NTC	<i>New Technology Consulting</i>
P	Parâmetro relacionado à interface pasta-agregado
PAIC	Pesquisa Anual da Indústria da Construção
Pp	Patamar de percolação
Q	Parâmetro relacionado à resistência intrínseca do agregado
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCD-C	RCD de origem de concretos provenientes de caminhão betoneiras da concreteira Supermix
RCD-D	RCD fornecido pela usina de reciclagem FOCCUS de São Paulo
RCD-LAB	RCD de origem de corpos-de-prova de concretos produzidos no laboratório
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages</i>
SEA	Secretaria de Estado do Ambiente do Rio de Janeiro
SMA	Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SP	Superplastificante
TG	Termogravimetria
TP	Traço pobre
TR	Traço rico
UCA	<i>Ultrasonic Cement Analyser</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento da construção civil é importante para a infraestrutura e a economia dos países. A Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC), de 2014, mostra o expressivo papel da construção civil na economia brasileira, onde as empresas do setor foram responsáveis por obras e serviços no valor de R\$ 382 bilhões (IBGE, 2014). Contudo, este setor também é responsável por muitos impactos ambientais, como a exploração irracional de recursos naturais, emissão de gases poluentes e grande geração de resíduos.

Segundo dados da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção (ANEPAC), em 2014, o setor da construção no Brasil teve uma demanda de 741 milhões de toneladas de agregados, sendo 59% de areia e 41% brita. O consumo per capita de 2014 foi de 3,7 toneladas/habitante. No mesmo ano, a demanda mundial de agregados foi de 45 bilhões de toneladas (ANEPAC, 2015).

Outra matéria-prima bastante utilizada na indústria construção civil é o cimento Portland. O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2016) mostrou que no Brasil, em 2016, foram consumidos aproximadamente 58 milhões de toneladas. Segundo a *United States Geological Survey* (USGS, 2017), em 2016, a China foi o maior produtor de cimento Portland no mundo, fabricando um total de 2,4 bilhões de toneladas (representando 58% do total da produção mundial), seguindo pela Índia (290 milhões de toneladas) e o Estados Unidos (85,9 milhões de toneladas). O processo de fabricação do cimento Portland é considerado agressivo ao meio ambiente, visto que ele é responsável por 8-9% da emissão de CO₂ mundial e consumo de 3% de energia (PBL, 2016; MONTEIRO *et al.*, 2017). Wray *apud* Gastaldi (2015) estima que as indústrias de cimento Portland de países europeus sejam responsáveis por 0,87 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) emitido por tonelada de cimento Portland produzida. No Brasil, este valor é um pouco menor, já que a matriz energética brasileira é baseada em

hidroelétricas, diferente daquela dos países europeus. Segundo Gonçalves *et al.* (2006), para cada tonelada de cimento Portland produzido, 0,65 tonelada de CO₂ é gerada.

Os volumes de resíduos gerados pelo setor da Construção civil também são expressivos. A pesquisa do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil de 2016 (ABRELEPE, 2016) mostra que só em 2016 foram coletados cerca de 45,1 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) e esta quantidade provavelmente é maior ainda, visto que esta pesquisa coleta apenas dados de resíduos lançados ou abandonados nos logradouros públicos. Segundo a *Waste Statistics* (2017), em 2014, os países europeus foram responsáveis pela geração de 891 milhões de toneladas de RCD, sendo a indústria da construção civil considerada a maior responsável pela geração de resíduos, seguida pelas indústrias de mineração. Neste mesmo ano, foram gerados 534 milhões de toneladas de RCD nos Estados Unidos, sendo 90% proveniente de demolição e 10% de origem da construção (EPA, 2016).

Neste contexto, o beneficiamento de RCD para produção de agregados reciclados é uma alternativa em potencial para mitigar impactos ambientais, principalmente, quanto ao alto consumo de agregados minerais, geração de entulhos e redução da vida útil de aterros sanitários. Esta preocupação com a construção sustentável de modo a alcançar “economia circular” tem incentivado países desenvolvidos e países em desenvolvimento a criarem políticas, normas e regulamentações para a reciclagem e reutilização de RCD como agregados reciclados. Em 2008, por exemplo, o Comitê da Comunidade Europeia (CCE) adotou uma diretriz, a qual determina que os países europeus reutilizem no mínimo 70% dos RCD gerados até 2020 (EC, 2008).

No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 de 2002 (CONAMA, 2002) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos oriundos da construção civil de modo a gerenciar os processos nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos mesmos. Em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou cinco normas específicas para os RCD, que determinam os requisitos necessários para a implantação e operação de áreas de transbordo e triagem, aterros e áreas de reciclagem (ABNT NBR 15112, 2004; ABNT NBR 15113, 2004; ABNT NBR 15114,

2004) e visam a regulamentação da utilização dos resíduos da construção civil como agregados reciclados (ABNT NBR 15114, 2004; ABNT NBR 15115, 2004; ABNT NBR 15116, 2004). Vale ressaltar que apesar da norma ABNT NBR 15116 (2004) permitir a substituição parcial ou total dos agregados convencionais, ela pode ser considerada conservadora quando comparada às normas de outros países, visto que permite o uso de agregados reciclados (de concreto ou mistos) apenas em pavimentação ou em concretos sem função estruturais (classe C10 ou C15).

A literatura mostra que, dentre os diversos tipos de RCD, os resíduos de concreto são os que apresentam maior potencial para serem utilizados como agregados reciclados de concreto (ARC) e vem encorajando a pesquisa da aplicação em concretos estruturais (AMARIO, 2015; RANGEL, 2015; PEPE, 2015; SILVA, 2017; ANDRADE, 2018).

Durante o processo de produção de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) também há produção de agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), o qual contem finos reciclados de concreto (FRC), material de granulometria inferior a 150 µm. A norma ABNT NBR 15116 (2004) classifica o AMRC assim como a norma ABNT NBR 7211 (2009): material passante na peneira de 4,75 mm e retido na peneira de 0,150 mm. Deste modo, durante o processo de beneficiamento do RCD é necessário a separação dos AMRC produzidos e dos FRC. Sabe-se que a presença de finos em geral é indesejável no agregado miúdo natural, pois, quando estes são presentes em grandes quantidades, afetam a trabalhabilidade da mistura, exigindo maior consumo de água, o que, por sua vez, reduz a resistência da mistura. Além disso, os finos também podem apresentar matéria orgânica na sua composição, a qual também influenciará negativamente a pega e o endurecimento das argamassas e concretos, diminuindo a aderência do agregado com a pasta cimentícia, reduzindo também a resistência da mistura (NEVILLE, 1995). Deste modo, a presença de finos presentes em agregados reciclados é limitada. A norma ABNT NBR 7211 (2009) estabelece que a quantidade máxima de material fino que passa através da peneira 0,075 mm por lavagem relativa à massa de agregado miúdo é de 3%, para concretos submetidos a desgaste superficial, e 5%, para concretos protegidos a desgaste superficial. No caso de agregado graúdo, essa quantidade é de 1% em relação à massa de agregado graúdo. Quanto a presença de

impurezas orgânicas, a norma ABNT NBR 7211 (2009) estipula um limite máximo de 10% relativa à massa do agregado miúdo. Já a norma ABNT NBR 15116 (2004) estabelece que a quantidade máxima de material fino passante na peneira 0,075 mm é de 15% para AMRC e de 10% para AGRC. Estes fatores dificultam a aplicação direta da ARMC produzida, aumentando os gastos de tempo e de energia na separação de ARMC e FRC. Com a separação do ARMC e FRC, o Setor da Construção Civil passa a buscar alternativas para o reuso de FRC, de modo a ter um aproveitamento integral do RCD.

Estudos recentes mostram que os FRC gerados durante a produção de ARC podem ser considerados como adição mineral em potencial, visto que eles podem atuar em matrizes cimentícias como material de preenchimento (filler) e também podem apresentar propriedades cimentícias, devido à presença de grãos de cimento não hidratado em sua composição. No entanto, são poucos e limitados os estudos que avaliam a influência da origem do resíduo de concreto nas características físico-químicas de FRC, bem como a influência e o efeito dos finos reciclados de diferentes origens em propriedades de matrizes cimentícias. Acredita-se que os FRC, assim como os ARC, podem ter suas propriedades influenciadas pela origem do RCD.

Nesta pesquisa investigou-se os efeitos de três FRC de origens distintas em duas matrizes cimentícias: (i) pastas de cimento e (ii) concretos. Os três FRC utilizados neste estudo são chamados de FRC-LAB, FRC-D e FRC-C. O FRC-LAB é proveniente de corpos-de-prova de concreto produzidos de maneira controlada no laboratório; o FRC-D é procedente de resíduos de demolição de diferentes concretos sem especificações da usina de reciclagem Foccus (São Paulo); e o FRC-C é oriundo de restos de diferentes misturas de concretos obtidas após a lavagem de caminhões betoneiras, sem especificação.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo é avaliar os efeitos físico-químicos-mecânicos de finos reciclados de concretos de granulometria inferior a 150 μm (FRC-150) originários de três diferentes origens (“LAB”, “D” e “C”) em duas matrizes cimentícias: (i) pastas cimentícias e (ii) concretos.

No caso das pastas cimentícias, os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência do teor de substituição (0, 5, 10, e 15% em massa) de cimento Portland por FRC de diferentes origens;
- Analisar o efeito da granulometria dos FRC no seu potencial como material cimentício, comparando-os com um material inerte (sílica) de granulometrias similares;
- Estudar os efeitos físicos e químicos dos diferentes FRC na reologia, hidratação, comportamento mecânico e microestrutura de pastas cimentícias.

No caso dos concretos, os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência da origem dos FRC utilizados como filler na produção de concretos estruturais de classe C25;
- Verificar a ação do FRC presente na areia reciclada proveniente do RCD “LAB” na produção de concretos estruturais de classe C30 com 25% de substituição da areia natural.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é composta por sete capítulos.

Capítulo 1: Introdução ao tema estudado, contendo as considerações iniciais, contextualização da pesquisa, motivação para a escolha do tema e os objetivos do estudo.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre os resíduos de construção e demolição (RCD), com ênfase no estado da arte de finos reciclados de RCD.

Capítulo 3: Revisão bibliográfica sobre a composição e hidratação do cimento Portland e adições minerais.

Capítulo 4: Apresentação do plano experimental, com as etapas e materiais a serem utilizados, dos métodos empregados nos ensaios de caracterização dos materiais e

nos ensaios para a determinação das propriedades físico-químicas e mecânicas das matrizes cimentícias estudadas.

Capítulo 5: Apresentação e análise da caracterização dos materiais e dos resultados obtidos para as propriedades físicas, químicas e mecânicas das matrizes cimentícias estudadas.

Capítulo 6: Neste capítulo apresenta-se as principais conclusões de estudo, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 7: Referências bibliográficas.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 DEFINIÇÃO, ORIGEM, COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A Resolução n° 307 do CONAMA (CONAMA, 2002) e a norma brasileira ABNT NBR 15116 (2004) definem os resíduos de construção civil como sendo todos os materiais “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos”.

O resíduo é considerado um material extremamente heterogêneo e de composição bem complexa. Ele é composto por restos e fragmentos de materiais cerâmicos, tais como tijolos e blocos, madeira, concreto, vidro, gesso, aço, plástico, papel, resinas, colas, tintas, pavimento asfáltico, solos, metais, e outros materiais.

A composição do resíduo varia de acordo com o tipo de técnica construtiva utilizada, tipo de obra (residencial, industrial ou infraestrutura), materiais disponíveis no local e região, época do ano, fase em que a obra se encontra, entre outros. A Figura 2.1 ilustra a composição de resíduos gerados, comparando as diferenças de duas grandes cidades brasileiras: em São Paulo, a maioria do resíduo gerado é composta de solos e materiais cerâmicos; no Rio de Janeiro 50% dos RCD provêm de concretos.

Leite (2001) também destaca a importância da origem do resíduo: se o resíduo é de construção, ou seja, de materiais provenientes de atividades relacionadas à construção de edifícios, reformas e reparos em residências, edificações comerciais, industriais e outras estruturas; ou se é resíduo de demolição, como materiais provenientes da destruição da construção e de outras estruturas; ou ainda se ele é proveniente da junção de resíduos de construção e de demolição.

Além dessas duas fontes de resíduos, existem outras causas que geram RCD, entre elas, catástrofes naturais ou artificiais, usinas de concreto pré-misturado e fabricação de pré-moldados e blocos. Os RCD são produzidos em praticamente todo ciclo de vida da obra (LEVY, 1997).

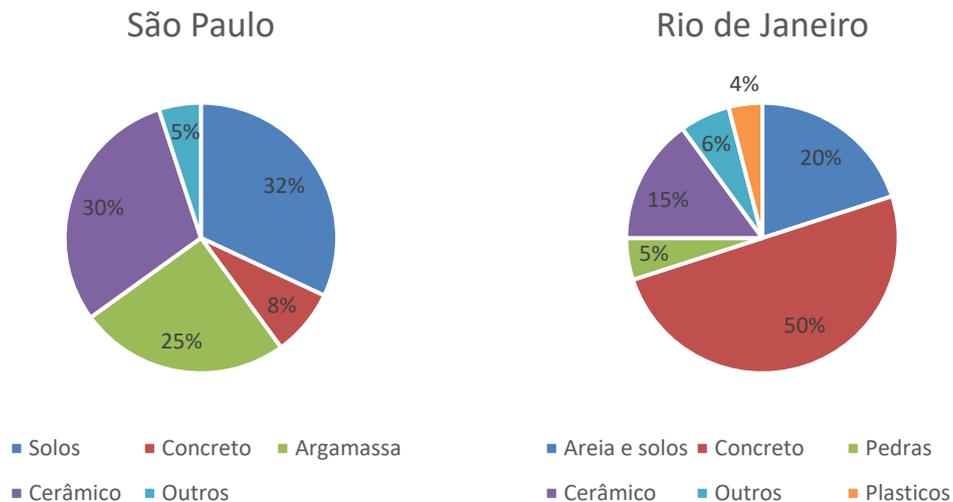


Figura 2.1 – Composição gravimétrica dos RCD em São Paulo e no Rio de Janeiro, respectivamente. Fonte: SMA (2014)

A classificação dos RCD é de grande importância, uma vez que ela definirá o correto destino e manuseio desses materiais. A norma ABNT NBR 10004 (2004) – “Resíduos sólidos – Classificação” propõe uma classificação do ponto de vista de risco ambiental, já que diz respeito ao potencial risco à saúde pública. Segundo esta norma, os resíduos sólidos são classificados pela presença de contaminantes em: classe I (resíduos perigosos) e classe II (resíduos não perigosos). Os resíduos sólidos da classe II ainda são divididos em: classe II A, para material não inerte, e classe II B, para material inerte.

São considerados resíduos sólidos da classe I aqueles que são caracterizados como inflamáveis, corrosíveis, reativos, tóxicos e patogênicos (ABNT NBR 10004, 2004). Os RCD são classificados como resíduos sólidos classe II B, pois, em geral, considera-se que eles possuam componentes minerais não poluentes e sejam praticamente inertes quimicamente.

Entretanto, alguns estudos indicam que esta classificação pode ser equivocada. Segundo Leite (2011), os RCD são materiais pesados e de grande volume que, quando depositados em locais inapropriados, podem servir como verdadeiros depósitos para outros tipos de resíduos, o que pode levar a contaminação dos mesmos. Além disso, os RCD também podem conter materiais perigosos, como tintas ou substâncias de tratamento de superfícies, solventes, entre outros, que podem percolar pelo solo

contaminando-o (FEDERLE *apud* PENG *et al.* 1997; TORRING, 1998). Ademais, os RCD podem ser contaminados ainda pela presença de amianto ou metais pesados (DORSTHORST e HENDRIKS, 2000 *apud* LEITE, 2001).

Deste modo, Zordan (1997) ressalta que os RCD, independente da sua origem e dos materiais constituintes, devem ser submetidos a testes de solubilização e de lixiviação, propostos pela NBR 10004 (2004), de maneira a garantir que estes não sejam realmente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública.

Os resíduos da construção civil são classificados pela resolução do CONAMA nº 307 (2002) e pela NBR 15116 (2004) em:

- Classe A: resíduos que podem ser reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como por exemplo, componentes cerâmicos (blocos, telhas, tijolos, placas de revestimento, e outros), argamassa, concreto (peças pré-moldadas ou não) ou solo provenientes de terraplanagem;
- Classe B: resíduos recicláveis que são usados para outras destinações sem ser como agregados, tais como plásticos, papel, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias, gesso, entre outros;
- Classe C: resíduos que não são economicamente viáveis ou aqueles para os quais não seja possível fazer sua reciclagem ou recuperação devido à falta de desenvolvimento de tecnologias;
- Classe D: resíduos considerados como perigosos, tais como tintas, solventes, óleos e outros; resíduos que estejam contaminados ou resíduos que podem ser nocivos à saúde. Não podem ser reaproveitados.

A NBR 15116 (2004, p. 2) define agregado reciclado como “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação de obras de edificação e infraestrutura”. Esta norma faz a seguinte classificação:

- Agregado de resíduo de concreto (ARC): agregado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto em sua fração gráuda por no mínimo 90% em massa de resíduos a base de cimento e rochas;

- Agregado de resíduo misto (ARM): agregados obtidos do beneficiamento de resíduo de classe A, composto em sua fração grávida de menos de 90% em massa de resíduos a base de cimento e rochas.

A RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) apresenta outro tipo de classificação de agregados reciclados, definida pelo comitê RILEM 121-DRG (1994):

- Tipo I: agregados de origem cerâmica, tais como tijolos e telhas;
- Tipo II: agregados provenientes de concretos, argamassas e pastas;
- Tipo III: agregados oriundos de misturas de pelo menos 80% de agregados naturais com agregados reciclados do tipo I e II, sendo que a quantidade de tipo I deve obrigatoriamente ser inferior a 10%.

Segundo Ricci (2007) além da classificação granulométrica do material, no Brasil é comum a classificação visual do RCD, a qual separa o resíduo manualmente pela diferença de cor, forma ou textura da partícula. As usinas de reciclagem classificam os agregados reciclados em agregados de composição cimentícia, para aqueles de cor cinza, e em agregados de composição cerâmica, para aqueles de cor predominante vermelha. E ainda existem outras classificações de agregados reciclados que são definidas de acordo com cada país por meio de normas e especificações (PEPE, 2015).

2.2 BENEFICIAMENTO DOS RCD E PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

Atualmente, a reciclagem de concretos e outros materiais de construção vem ganhando cada vez mais importância devido à divulgação do conceito de construção sustentável, incentivando e possibilitando a adoção de políticas de proteção ambiental capazes de combater os impactos gerados.

A resolução n° 307 do Conama (2002) define reciclagem como o reaproveitamento do resíduo após este ter sido submetido a um processo de

beneficiamento. Desta maneira, a reciclagem de RCD permite sua utilização como um agregado reciclado para um concreto novo.

Pacheco-Torgal *et al.* (2013) afirmam que a reciclagem de RCD possui três objetivos principais:

- Separar os resíduos misturados (madeira, plásticos e aço, entre outros) dos agregados, de forma a permitir seu reuso, reciclagem e deposição segura;
- Triturar, moer e classificar os agregados produzidos de maneira a alcançar diferentes frações granulométricas que serão utilizadas na construção;
- Remover os materiais contaminantes, como por exemplo: amianto, gesso, metais pesados e outros.

O processo de beneficiamento envolve desde a coleta e o transporte dos RCD, passando pelo processo de separação, contemplando desde as etapas de cominuição, separação granulométrica e concentração, até a estocagem para sua utilização posterior. O beneficiamento de RCD é similar ao processo de produção de agregados naturais, sendo possível a utilização dos mesmos equipamentos nos dois processos (HANSEN, 1992; QUEBAUD, 1996; PIETERSEN *et al.*, 1998).

Segundo Pepe (2015), a etapa de separação depende do tipo de origem do RCD (construção, demolição ou construção e demolição) e do tipo de processo de demolição (geral ou seletiva). Na demolição geral a etapa de separação é realizada de acordo com a inspeção visual, dividindo os resíduos por cores com auxílio de máquinas específicas. Caso seja adotado o processo de demolição seletiva, os diferentes constituintes dos resíduos são originalmente separados.

Os processos de cominuição, separação por granulometria e concentração são descritos a seguir.

- *Cominuição ou fragmentação*

A cominuição, também denominada fragmentação, envolve operações para a redução do tamanho do resíduo através de processos de britagem ou moagem, dependendo da granulometria do material (GONÇALVES, 2011). A britagem é

realizada para produzir agregados graúdos, enquanto que a moagem tem como finalidade produz grãos mais finos, como os agregados miúdos (AMARIO, 2015).

As operações de cominuição consomem grande quantidade de energia e são de alto custo (GONÇALVES, 2011). Pode-se realizar a cominuição em mais de uma etapa, dependendo da necessidade de fragmentação do RCD. Deste modo, são utilizados os termos “Britagem primária” e “Britagem secundária”, onde pode-se reutilizar o mesmo equipamento para o processo de cominuição ou um equipamento diferente (AMARIO, 2015).

Existem diversos equipamentos utilizados neste processo, tais como: britador de impacto, britador de mandíbulas, britador giratório, britador de rolos, moinho de bolas, de barras, de martelos e vibratório. Os mais utilizados são o britador de impacto e de mandíbulas. Estes equipamentos são descritos a seguir:

Britador de impacto: utilizado para materiais friáveis, no qual o equipamento quebra o material por meio de choque de martelos fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas (DE LIMA, 1999). Apresenta como principais vantagens a alta redução das peças britadas, gerando uma quantidade de finos razoável, produção de grãos de forma cúbica e com boas características mecânicas e baixa emissão de ruído (DE LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996; MAULTZSCH e MELLMANN, 1998). Porém, Gonçalves (2011) afirma que quando comparados com os agregados produzidos pelo britador de mandíbula, eles possuem qualidade inferior, além de apresentarem alto custo de manutenção, devido ao alto desgaste (HANSEN, 1992).

Britador de mandíbula: opera sob o princípio do esmagamento das partículas, onde o material é comprimido entre uma superfície fixa e outra móvel. Segundo Leite (2001), da quantidade total de material processado, apenas 20% seriam produzidos com partículas inferior a 4,75 mm. Schoon *et al.* (2015) afirmam que utilizando-se os britadores de mandíbula produz 50% para cada tipo de fração granulométrica. Este autor ainda ressalta grande quantidade de pó (micropartículas menores que 0,075 mm) seria gerado. Segundo Hansen (1992), este equipamento é o mais indicado para o uso de agregados graúdos reciclados em concreto, visto que ele é capaz de proporcionar uma distribuição granulométrica adequada destes materiais. Entretanto, ele apresenta também apresenta desvantagens, tais como, a necessidade de uma segunda britagem, o

que aumenta o custo do processo de produção de agregados reciclados (DE LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996), além da menor produtividade do que os britadores de impacto (PINTO, 1997) e a alta emissão de ruído (DE LIMA, 1999).

Britador de cone: também conhecido como cone de britagem, ele é utilizado em britagem secundária, apenas para materiais com diâmetro máximo de 200 mm (LEITE, 2001; GONÇALVES, 2011). Produz grãos cúbicos e grande quantidade de finos (BRITO FILHO, 1999).

Britador de rolos: geralmente é mais utilizado em britagem secundária e realiza a fragmentação dos RCD por meio da compressão das partículas entre dois cilindros que giram em sentidos contrários.

Moinho de martelo: também são conhecidos como moinhos rotativos ou britadores cilíndros. O esmagamento do material é feito através de martelos ou cilindros de impacto e eles possuem uma grelha na saída, por onde sai grande quantidade de material fino. Os agregados de dimensões maiores ficam no compartimento de britagem (DE LIMA, 1999). Este tipo de moinho produz pouco agregado graúdo e grande quantidade de material fino, sendo pouco utilizado na produção de agregados reciclados (LEVY, 1997).

Segundo Ballista (2003), existem dois tipos de circuitos no processo de britagem: circuito aberto ou circuito fechado. No circuito aberto, o material passa apenas uma vez pelo britador, independente dos requisitos de granulometria. Já no circuito fechado, o material passa de forma contínua até atingir o tamanho desejado.

Deste modo, para se obter a fração granulométrica do agregado reciclado desejado, é muito importante a escolha adequada dos equipamentos utilizados no processo de cominuição de RCD, pois eles irão interferir e definir as propriedades finais do agregado produzido, na quantidade de fração granulométrica e também no custo de produção.

- *Separação por granulometria*

Na etapa de separação por granulometria os agregados produzidos são subdivididos de acordo com seu tamanho, com auxílio de peneiradores ou classificadores, retirando os pós remanescentes gerados (AMARIO, 2015; PEPE, 2015).

O processo de peneiramento pode ser realizado a seco ou por via úmida. Geralmente, as usinas de reciclagem separam os agregados em duas frações: agregado miúdo, de dimensão menor que 4,75 mm, e agregado graúdo, grãos maiores que 4,75 mm. O processo por via úmida é utilizado para melhor separação dos agregados miúdos, facilitando a passagem dos finos presentes no material (TENÓRIO, 2007).

O processo de separação do RCD por via úmida gera menor quantidade de pó, benéfico para os agregados graúdos, que ficam praticamente livres de impurezas (JUNGMANN e QUINDT, 1998).

LOO (1998) apresenta um outro sistema de separação que visa separar as partículas de cimento da fração miúda dos agregados reciclados. Este processo é conhecido como KEMA-DECO e o material final apresenta aproximadamente 40% de partículas menores que 1 mm, das quais as frações menores que 0,150 mm são ricas em cimento. Esta separação ocorre em três estágios: primeiramente, faz a britagem e peneiramento do resíduo até se obter partículas com diâmetro menor que 40 mm; em seguida este material é levado a temperatura entre 650 e 700 °C por 4 horas; por fim, o material é resfriado, desaglomerado, moído e repenetrado, separando as diferentes frações granulométricas. Apesar de ser uma boa alternativa para a produção da fração muito fina do resíduo, este sistema apresenta como desvantagem grande emissão de CO₂, alto consumo de energia.

Os classificadores são utilizados mais para remover as impurezas dos agregados reciclados, que tendem a se concentrar nas frações mais finas do material. Como estas impurezas são compostas por materiais mais leves, utilizam-se classificadores pneumáticos, os quais conseguem remover as partículas leves através de uma corrente de ar (GONÇALVES, 2011).

- *Concentração*

Esta etapa tem como objetivo remover os contaminantes presentes no resíduo que, por serem impurezas, podem prejudicar a qualidade final do agregado reciclado. A concentração pode ser realizada por catação (baseada na cor e/ou na forma), separação magnética, separação em meio denso e flotação (segundo sua densidade), entre outros. (RICCI, 2007)

Segundo Pepe (2015), uma última etapa pode ser feita para os agregados graúdos gerados, denominada de moagem autógena. Esta moagem foi desenvolvida por Pepe (2015) com o objetivo de remover a argamassa aderida da superfície do agregado reciclado de modo a melhorar as propriedades intrínsecas dos agregados.

2.3 FINOS DE RCD – ESTADO DA ARTE

2.3.1 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS FINOS DE RCD

Durante o processo de britagem e peneiramento no beneficiamento de RCD, além de serem produzidos os agregados reciclados (graúdo e miúdo), também ocorre a geração de pó, material fino de granulometria inferior a 150 μm . A destinação final dos finos reciclados também é uma relevante questão ambiental a ser considerada e o setor da construção civil passa a buscar alternativas também para o reuso destes materiais, de modo a ter um aproveitamento integral do RCD. Nesta pesquisa, os finos reciclados de RCD são considerados como todo material que apresenta fração granulométrica inferior a 150 μm , gerados durante a produção de agregados reciclado e é dada ênfase para os finos reciclados provenientes de resíduos de concreto.

Segundo Schoon *et al.* (2015), a forma como essas frações finas de RCD são geradas, influenciará diretamente na composição granulométrica, na composição química e na quantidade total de finos produzidos. Consequentemente, as propriedades intrínsecas dos finos dependerá do processo de produção utilizado. Por exemplo,

KWON *et al.* (2015) verificaram que até cerca de 65% do RCD original pode ser referente à fração fina de RCD. Entretanto, este valor pode variar de acordo com o tipo de tecnologia adotada no processo de beneficiamento do resíduo, tipo de RCD utilizado e localização geográfica.

- *Distribuição de tamanho de partículas*

Segundo De Lima (1999), a composição granulométrica dos agregados reciclados depende da origem do RCD, dos equipamentos utilizados durante o processo de beneficiamento do resíduo, bem como da granulometria do resíduo original e outros fatores. Desta maneira, a curva granulométrica será específica para cada tipo de agregado produzido.

Acredita-se que a curva granulométrica dos finos de RCD também será específica para cada tipo de finos gerado durante o processo de produção de agregado reciclado, visto que estes também estão sujeitos aos mesmos fatores que influenciam a granulometria do agregado reciclado.

- *Massa específica, absorção e superfície específica*

Quanto a massa específica dos finos reciclados, Nelfia *et al.* (2016) acreditam que o processo de britagem e peneiramento fornecerá um pó de características próximas do RCD original e, desta maneira, a densidade do fino reciclado é quase igual a densidade do RCD original.

Para o caso específico de finos reciclados de concreto (FRC), Kim e Choi (2012) afirmam que a baixa massa específica dos FRC seja devido a presença de hidratos na sua superfície, os quais contém poros capilares muito finos. Isto também explica o fato dos finos de concreto reciclado serem mais porosos e conseqüentemente apresentarem uma maior área superficial.

Valores encontrados na literatura mostram que a massa específica pode variar entre 2,08 g/cm³ (Shui *et al.*, 2008) e 2,56 g/cm³ (GRABOIS, 2016). Florea *et al.* (2014) encontraram diferentes valores de massa específica de FRC, dependendo da temperatura de tratamento: quanto maior a temperatura, maior foi a massa específica (sendo 2,52 g/cm³ a 20 °C e 2,89 g/cm³ a 1100 °C).

De acordo com Shui *et al.* (2009), os finos reciclados apresentam grande absorção de água, devido a suas partículas serem formadas por diversas camadas em forma de escama. Esta morfologia escamosa pode ser atribuída à aglomeração das partículas de finos reciclados, o que pode permitir que a água adicionada à mistura fique presa entre as camadas das partículas, diminuindo a trabalhabilidade da mistura. Segundo Nelfia *et al.* (2016), a alta área de superfície e porosidade dos finos de RCD leva à alta absorção de água.

- *Composição química e mineralógica*

Segundo Cardoza *et al.* (2016), os finos de RCD são compostos principalmente por resíduo de argamassa e pasta de cimento endurecidos que ficam aderidos aos agregados e, em alguns casos, podem apresentar ainda resíduos de pós de tijolos cerâmicos, gessos e outros materiais, caso sejam originários de agregados mistos.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo da composição química de finos de RCD. Nota-se que os principais componentes químicos encontrados nos finos são cálcio e quartzo e a porcentagem de cada constituinte vai depender da origem do RCD. Pode-se observar que os autores Rui e Zhonghe (2013; 2014), Boudali *et al.* (2016) e Gastaldi (2015) utilizaram pasta de cimento endurecido para a produção de finos, enquanto que os autores Florea, Ning e Brouwers (2014), Kim e Choi (2012), Schoon *et al.* (2015), e Grabois (2016) utilizaram concretos. Os autores Cardoza *et al.* (2016) utilizaram um resíduo misto. Nota-se que os finos produzidos a partir de pasta de cimento endurecido apresentam maior composição de cálcio, variando de 58,64 a 48,93%, enquanto que finos produzidos a partir de resíduo de concreto e resíduo mistos apresentam maior quantidade de quartzo, variando de 58,55 a 44,56%. Além disso, com exceção dos autores Rui e Zhonghe (2013; 2014) que apresentaram uma baixa perda por calcinação de 3,42%, todos os outros autores encontraram uma grande perda ao fogo destes materiais, variando de 17,1 a 25,3%.

A Figura 2.3 apresenta a análise de DRX de FRC utilizados por Grabois (2016). Nota-se que estes finos de concreto reciclado apresentam quartzo, biotita ($(K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2)$), albita ($NaAlSi_3O_8$) e sanidina ($KAlSi_3O_8$) como principais fases cristalinas. Eles também apresentam portlandita e calcita, o que indica a presença de grãos de cimento hidratado nos FRC.

KWON *et al.* (2015) constataram que quanto maior a quantidade de SiO₂ na forma cristalina de quartzo, menor será sua reatividade com CaO.

Tabela 2.1 – Revisão da literatura da composição química de finos de RCD

Óxidos (%)	Kim e Choi (2012)	Rui e Zhonghe (2013; 2014)	Florea, Ning e Bruowers (2014)	Schoon <i>et al.</i> (2015)	Gastaldi <i>et al.</i> (2015)	Cardoza <i>et al.</i> (2016)	Boudali <i>et al.</i> (2016)	Grabois (2016)
CaO	11,82	58,64	32,8	22,99	51,1	19,88	48,93	29,59
SiO₂	58,55	22,27	44,6	44,61	14,7	45,97	18,37	44,56
Al₂O₃	10,35	5,16	2,3	5,86	3,9	6,77	2,69	11,59
SO₃	0,44	2,71	1,0	1,24	0,8	0,39	1,37	2,51
Fe₂O₃	4,64	3,54	1,4	4,06	1,7	2,52	2,13	4,90
K₂O	-	0,43	-	0,97	0,7	1,73	0,42	3,70
MgO	1,52	0,24	0,7	1,44	1,1	1,86	1,93	-
Na₂O	-	0,26	-	0,48	0,2	0,52	0,18	-
SrO	-	-	-	-	-	-	-	-
P₂O₅	-	-	-	0,20	-	0,12	-	1,89
TiO₂	-	-	-	0,32	-	0,32	0,19	0,81
MnO	-	-	-	-	-	0,07	-	-
Cr₂O₃	-	-	-	-	-	0,04	0,12	-
NiO	-	-	-	-	-	0,08	-	-
Mn₃O₄	-	-	-	-	-	-	0,37	-
PPC*	NA**	3,42	17,1	17,40	25,3	19,29	NA**	17,76

*PPC: perda por calcinação; **NA: não informado.

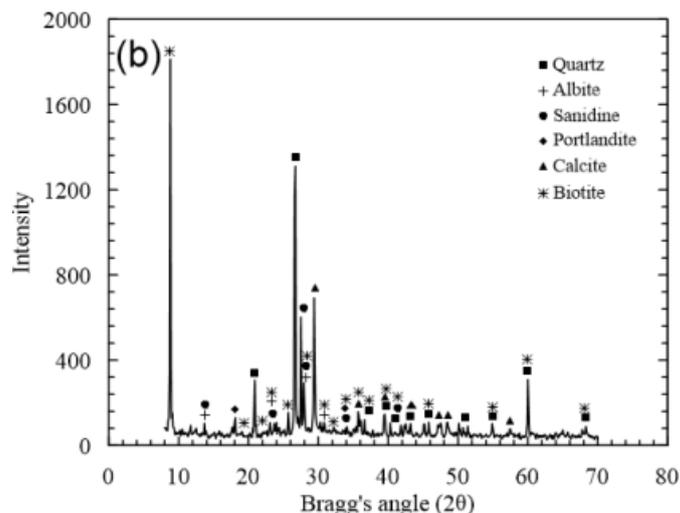


Figura 2.2 – DRX do fino reciclado de concreto analisado por Grabois (2016). Fonte: Grabois (2016)

2.3.2 APLICAÇÃO DE FRC

Ribas (2014) afirma que os agregados de RCD geralmente apresentam maior quantidade de finos de granulometria menor que 75 μm que agregados naturais. Esses finos são indesejáveis na composição dos agregados reciclados, visto que aumentam a demanda de água na mistura, podendo prejudicar a trabalhabilidade e a resistência mecânica do novo concreto, além de afetar outras propriedades do mesmo. Entretanto, esta fração fina de RCD, devido ao seu potencial como adição mineral ou material cimentício suplementar para substituir parcialmente o cimento, tem sido pesquisada, devido a possibilidade de apresentar grãos de cimento não hidratados em sua composição, o que lhe confere características cimentícias (AMIN *et al.* 2016).

Segundo Neville (1995), as reações de hidratação somente ocorrem na superfície do grão de cimento Portland, prosseguindo lentamente para o seu interior (processo de difusão). Deste modo, durante o processo de beneficiamento de RCD, a quebra de grãos de cimento pode expor esta parte do grão ainda anidra (Figura 2.4) que, quando adicionada a água, é capaz de sofrer reidratação. Além disso, os finos de RCD também podem ser responsáveis por preencher espaços vazios entre as partículas maiores aumentando a densidade de empacotamento e, desta forma, reduzindo o volume de vazios do concreto (Kwan, Ng e Huen, 2014).

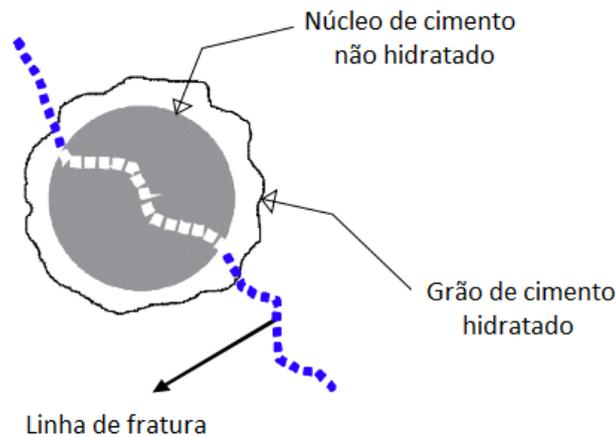


Figura 2.3 – Representação esquemática da britagem do grão de cimento Portland durante a produção de agregado reciclado. Fonte: Adaptado de Amin *et al.* (2016)

Vale ressaltar que existem finos reciclados de concreto, provenientes do beneficiamento de agregados de concreto reciclado (ACR) e finos reciclados mistos, gerados durante o processo de fabricação de agregados mistos reciclados (AMR). Neste estudo, apenas é destacado o estado da arte de finos reciclados de concreto (FRC).

Diversos estudos têm sido feitos sobre a influência dos FRC como material substituto ao cimento em misturas cimentícias. Kasami *et al.* (2001) *apud* Zhu *et al.* (2016), por exemplo, investigaram a utilização de FRC em concreto alto adensável. Verificou-se que, embora a retração por secagem possa aumentar, as propriedades do concreto alto adensável podem ser melhoradas pela adição de finos de concreto reciclado junto a escória de alto forno.

Shui *et al.* (2008) investigaram o uso de FRC de dimensão menor que 75 μm em argamassas. Os FRC utilizados passaram por um tratamento térmico em diferentes temperaturas (200, 500 e 800 $^{\circ}\text{C}$), de forma que, após o tratamento térmico, eles apresentassem em sua composição o gel C-S-H desidratado (silicato de cálcio amorfo), CaO, e parte do hidróxido de cálcio original ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Deste modo, os autores acreditavam que, em presença de água, este material poderia sofrer reidratação restaurando os produtos de hidratação, tais como gel C-S-H, etringita e portlandita. Eles constataram que a composição dos FRC dependia da temperatura na qual era feito o tratamento térmico e que as argamassas produzidas com FRC tratados apresentaram menor desempenho do que as originais. Isto ocorreu porque, provavelmente, houve

menor densidade de empacotamento e menor grau de cristalização dos novos hidratos quando comparados aos hidratos do FRC original. Estes autores também adicionaram cinza volante aos FRC, as quais contribuíram para o aumento das propriedades mecânicas das argamassas.

Kim e Choi (2012) estudaram FRC com diferentes granulometrias (diâmetros médios de 90 e 176 μm). Produziram argamassas cimentícias com fator água/aglomerante de 0,55% e substituição de 0, 15, 30 e 45% do cimento pelos FRC. Verificaram que à medida que em se aumentava o teor de substituição, havia perda da trabalhabilidade da mistura, com a hidratação adiada por cerca de duas horas em relação à mistura de referência. Além disso, menor era a resistência à compressão da argamassa, podendo diminuir em até 73% em comparação àquela sem substituição, sugerindo que estes finos não apresentam reatividade. Deste modo, estes autores sugerem que pesquisas futuras utilizem teor de substituição abaixo de 15%.

Braga, Brito e Veiga (2014) verificaram a viabilidade de FRC triturados (menores que 150 μm) em substituição de 15% de cimento (em volume) no desempenho de argamassas com diferentes traços. Constataram que houve aumento da trabalhabilidade nas argamassas que possuíam FRC, sendo possível reduzir a água de amassamento da mistura. Quanto ao desempenho mecânico, argamassas de traço 1:5 com adição de finos tiveram um aumento na compressão axial de 30%. Entretanto, a mistura 1:6 com adição de finos apresentou uma redução na resistência à compressão de 23%. Na flexão, a substituição do cimento pelos finos afetou negativamente sua resistência, a qual teve uma redução de 14% e 50% para as misturas 1:5 e 1:6 com finos, respectivamente. A absorção de água da argamassa analisada no teste de capilaridade mostrou decréscimo de 30% e 31% no coeficiente de absorção capilar para as misturas com finos de 1:5 e 1:6, respectivamente. E a resistência à aderência da argamassa de 1:5 com finos apresentou um aumento de 6% em relação a mesma mistura sem presença de finos.

Rui e Zhongh (2013) estudaram finos de reciclado provenientes de corpos de provas cúbicos ou prismáticos de pastas de cimento que foram submetidos anteriormente a ensaios mecânicos em laboratórios. A pasta de cimento endurecida foi moída até chegarem a granulometria inferior a 75 μm . Em seguida, este material sofreu

um tratamento térmico (650 °C), de modo a desidratar a pasta de cimento original, desfazendo os produtos de hidratação anteriormente formados. Foram produzidas pastas com substituição de 0 a 30% de cimento pelos finos de cimento reciclado para ensaios de água de consistência normal, e pastas com substituição de 0 a 15% para ensaios de compressão em misturas com fator água/aglomerante de 0,3 e 0,5% de superplastificante. Os autores verificaram que quanto maior o teor de substituição, maior quantidade de água era necessária para se obter a mesma consistência. Quanto a resistência à compressão, até aproximadamente 10,5% de substituição ocorreu melhora da resistência, e, após este valor, a resistência caiu. Estes resultados, segundo os autores, estão relacionados ao fato que as partículas de FRC serem bem finas e funcionarem como filler preenchendo os poros, além de promoverem o efeito de nucleação. Entretanto, a adição de grande quantidade destes materiais reduz um maior consumo de cimento na mistura e também aumenta a viscosidade da pasta, o que pode levar ao aumento da porosidade e conseqüentemente redução da resistência mecânica.

Florea; Ning; Bruowers (2014) estudaram argamassas substituindo parte do cimento por FRC obtidos de fragmentos de concretos britados pelo britador de mandíbula. Estas argamassas continham só cimento ou também apresentavam adições de escória de alto forno e cinza volante. Nesta pesquisa, os autores utilizaram FRC de dimensão menor que 150 µm, os quais passaram ou não por vários tratamentos térmicos de diferentes temperaturas para desidratação de cimento já hidratados. Os autores concluíram que a maioria das amostras de argamassas contendo FRC apresentaram melhor resistência à compressão, o que sugere que a adição de FRC contribui para o seu desempenho mecânico. O melhor resultado foi observado nos FRC tratados a 800 °C com substituição de 20% (em peso) do cimento. Eles ainda observaram que os FRC tratados termicamente eram reativos e se comportavam de maneira semelhante às cinzas volantes. No entanto, os FRC tratados a 500 °C não tiveram um resultado tão eficiente: com 20% de substituição em massa, a resistência da argamassa teve uma perda considerável. Outra consideração importante deste estudo é em relação à atividade pozolânica dos FRC utilizados, o que ocorreu em todas as amostras tratadas termicamente, quando estas foram combinadas com escória granulada. Ao substituir 10% em peso de cimento misto (30% de cimento mais 70% de escória) pelos FRC tratados termicamente, a resistência da argamassa curada a 28 dias melhorou de 15 a

20%, provavelmente devido ao elevado teor de cal presente. Os autores também concluíram que a melhora no desempenho mecânico deve ser justificável não só pela reidratação dos FRC que foram tratados termicamente, mas também pelo efeito filler dos FRC. Eles sugeriram ser necessários desenvolver estudos mais aprofundados que verifiquem de fato a possibilidade de ocorrência do efeito filler, juntamente com a otimização da dosagem das misturas em termo de tamanho de partícula e do fator água/aglomerante.

Boudali *et al.* (2016) testaram durabilidade de concretos auto-adensáveis com FRC obtidos da britagem e moagem de resíduo de concreto de demolição. Os FRC apresentavam granulometria inferior a 80 μm e foram incorporados nas misturas de concreto auto-adensáveis contendo cimento e agregados naturais e reciclados com fator água/cimento de 0,5. Também foram produzidas estas mesmas misturas com uma pozolana natural no lugar do FRC. Verificou-se que misturas contendo FRC apresentavam melhora na resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades.

Cardoza *et al.* (2016), estudaram as propriedades reológicas e mecânicas, bem como a durabilidade de argamassas e concretos produzidos com agregados de resíduo misto (ARM) contendo 6% de finos de RCD de granulometria menor que 63 μm . Constataram baixa reatividade dos finos de RCD pelo ensaio de calorimetria isotérmica, o qual produziu pastas cimentícias com fator água/cimento de 0,42 e 0% e 30% de substituição (em massa) do cimento pelos finos de RCD e também pelo quartzo (material inerte). Os autores constataram que as pastas produzidas com 30% de finos e quartzo inerte apresentaram um aumento do calor de hidratação por grama de cimento devido ao efeito de diluição provocado pela adição destes materiais. Além disso, a mistura com finos reciclados apresentou um ligeiro aumento de calor acumulado total em relação a pasta com filler inerte, o que mostra que estes finos apresentavam uma pequena reatividade. No estado fresco, a reologia da matriz foi afetada negativamente pela presença de finos, que demandava maior quantidade de água para atingir a mesma consistência. Isto se deve ao fato destes finos absorverem muita água. Entretanto, a água efetiva das misturas foi corrigida com a utilização de superplastificante, afim de obter a mesma consistência e analisar as propriedades mecânicas com o mesmo fator água/cimento. No estado endurecido, observou-se um refinamento da estrutura porosa,

onde as pastas com finos de RCD tiveram a porosidade total reduzida, menor quantidade de mesoporos e maior quantidade de microporos, além de diminuir a conectividade entre eles. Deste modo, a durabilidade foi melhorada devido a menor permeabilidade das misturas. Também verificou-se melhora na resistência à compressão nos concretos produzidos com finos e agregados reciclados, o que foi associado ao fato dos finos de RCD funcionarem como filler preenchendo os vazios e também por apresentarem alguma reatividade pozolânica e alguns grãos de cimento não hidratados, melhorando a zona de transição entre a pasta e os agregados.

Zhu *et al.* (2016) substituíram parcialmente a sílica ativa e o cimento de concreto de pós reativos por FRC a fim de desenvolver um concreto de alto desempenho em favor do meio ambiente, e, além disso, de baixo custo. Eles utilizaram finos de tamanho médio de 31,4 μm com grande quantidade de partículas ultrafinas de 10 μm . Considerando os resultados obtidos quanto à fluidez, resistência, durabilidade, custo e redução de impactos ambientais, o estudo sugere que os FRC possam ser utilizados para substituir a sílica e o cimento parcialmente. Os autores concluíram que com o aumento da razão água/aglomerante, a consistência do concreto aumentou, enquanto que as resistências à flexão e à compressão diminuíram. À medida em que a taxa de substituição de sílica ativa aumentava, a consistência diminuía ligeiramente, e as resistências à compressão e à flexão tendiam a diminuir também. A retração por secagem e a resistência à penetração de cloreto também diminuía e, mesmo que fosse feita uma substituição total pelos FRC, a durabilidade ainda era considerada aceitável. O estudo sugere, portanto, uma razão água/aglomerante entre 0,18 e 0,20.

Grabois (2016) comparou diferentes tipos de finos a serem usados como material cimentício suplementar em pastas de cimento. Neste estudo, produziu-se pastas de cimento com relação água/materiais cimentícios de 0,4 e 10% de substituição (em massa) de FRC, dois tipos diferentes de materiais cerâmicos e quartzo. Todos estes materiais apresentavam granulometria inferior a 75 μm . O estudo mostrou que a substituição de FRC pelo cimento contribui para o efeito de diluição, o que acelera a hidratação da pasta, entretanto, os FRC apresentavam baixa reatividade contendo pouco grãos de cimento não hidratado. Apesar disto, observou-se uma melhora da resistência à compressão nas idades de 28 e 90 dias. Quanto a microestrutura da pasta, as adições de FRC não afetaram a sua porosidade.

Nelfia *et al.* (2016) propõem em seu estudo o uso de FRC (de granulometria inferior a 80 μm) como adição mineral em argamassas. Os FRC eram originários de corpos de prova que continham cimento, agregados e cinza volante que foram estocados durante 5 anos e, após o processo de produção dos agregados reciclados, obteve-se aproximadamente 60% de finos em relação a massa inicial de concreto. Produziu-se argamassas com 0, 25, 50 e 75% de substituição do cimento (em volume) por finos reciclados ou filler calcário e com uma fração volumétrica fixa de areia de 54%. Estes autores concluíram que os finos reciclados do concreto estudado apresentavam baixo teor de cimento não hidratado (menos de 4%), não possuindo nenhuma reatividade. Entretanto, eles desempenhavam um papel semelhante ao filler calcário durante a hidratação da argamassa. Para os autores, o cimento pode ser substituído por finos de concreto reciclado em até 25% (em volume) sem alterar o desempenho físico e mecânico de argamassas.

Segundo Topic e Prosek (2017), a introdução de uma fração mais fina de concreto reciclado na mistura deve ser produzida nas mesmas condições térmicas do clínquer de cimento. Porém, este processo requer muita quantidade de energia e alta liberação de CO_2 , mesmo considerando que esta seja mais baixa da produção do clínquer convencional. Estes autores investigaram o uso de FRC, originários de dormentes ferroviários e com granulometria menor que 130 μm (diâmetro médio de 12 μm), como possível material de substituição de aglomerantes capazes de contribuir para o efeito filler em compósitos. O cimento utilizado na produção das misturas apresentava um diâmetro médio de 18 μm). Descobriu-se que os FRC podem servir como um filler em potencial pois, apesar de serem grãos com granulometria maior que sua definição, estes materiais possuem também uma quantidade de grãos muito mais finos que o cimento, que fariam, assim, o efeito de empacotamento. Foram produzidas pastas cimentícias com substituições de 5 a 25% (em peso) a fim de estudar suas propriedades micro-estruturais. Concluíram que todas as pastas nas quais haviam feito substituição parcial do cimento apresentaram maior calor de hidratação, provavelmente devido à presença de grãos não hidratados de cimento. Além disso, a pasta com 25% de substituição foi a que obteve maior retração, devido à menor densidade dos FRC em relação ao cimento, o que resultou em um módulo de elasticidade menor. Uma das soluções propostas pelos autores é o uso de superplastificante, melhorando, assim, o

processo de cura. Os módulos de elasticidade e rigidez diminuíram cerca de 35%, consequência da menor densidade da pasta de cimento. Isto fez com que pastas nas quais havia presença de FRC apresentassem maior número de poros. O melhor desempenho mecânico foi para pasta com 10% de substituição, a qual aumentou 10% sua resistência à flexão, causado provavelmente pela reatividade dos finos reciclados e seu efeito filler.

Além de estudos em pastas, argamassas e concretos, autores como Schoon *et al.* (2015) avaliaram a eficiência da fração FRC (dimensão menor que 63 μm) como matéria-prima alternativa para a produção do clínquer do cimento. Eles analisaram amostras provenientes de três usinas de reciclagem, de modo a investigar se os processos de produção e a origem do material reciclado influenciariam diretamente nas propriedades do novo clínquer produzido. Os resultados deste estudo indicaram que, apesar do processo de produção e origem do RCD influenciar diretamente nas propriedades dos FRC, o novo clínquer produzido não tinha suas propriedades mineralógicas bastante afetadas. Deste modo, os FRC podem ser usados como matéria prima alternativa para a produção de clínquer.

Gastaldi *et al.* (2015) também estudaram a possibilidade de se utilizar resíduo de cimento hidratado como componente alternativo para a produção de um novo clínquer. Os finos de cimento hidratado, considerados como subproduto de uma separação eficiente das frações mais finas de agregados reciclados de concreto, passaram por um tratamento de secagem para chegar à mesma composição química do clínquer. Os autores constataram que essas partículas finas de cimento hidratado poderiam substituir os minerais naturais presentes no clínquer, reduzindo o consumo de materiais não renováveis, bem como o teor de CO_2 emitido no processo de produção do cimento. Os autores produziram amostras com substituição parcial de 30% e 55% em massa em pastas cimentícias. Eles constataram que com o grau de substituição de 30% foi possível desenvolver um novo clínquer para cimento com menor liberação de CO_2 : cerca de um terço a menos se produzido um clínquer com materiais naturais.

Com estes estudos, pode-se perceber que a contribuição da fração de FRC em concretos, argamassas e pastas e até mesmo como matéria-prima para produção de clínquer vai depender da origem do resíduo, composição química e mineralógica, bem

como do grau de finura deste material. Os FRC podem preencher os vazios entre os grãos de cimento, contribuindo para melhorar a densidade de empacotamento da matriz cimentícia, o que reduz a absorção de água e a conectividade de poros no estado endurecido (efeito filler). Além disso, partículas muito finas, partículas de resíduos calcinados e grãos de cimento não hidratados contidos nos finos de RCD podem apresentar propriedades reativas e ligantes, que também contribuem para a resistência mecânica (efeito químico).

3 MATERIAIS CIMENTÍCIOS

3.1 REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland é um aglomerante hidráulico, ou seja, possui propriedades adesivas e coesivas que, quando entra em contato com a água, promove a união entre as partículas sólidas. Ele é basicamente constituído pela mistura de materiais calcários, como rocha calcária ou calcita, argilas ou xistos, sendo assim, ele possui concentrações de óxido de cálcio (60 a 67%), óxido de silício (17 a 25%), óxido de alumínio (3 a 8%) e pouca quantidade de óxido de ferro (0,5 a 6%) em sua composição. Além disso, existem cimentos que também podem apresentar adições minerais em sua composição, tais como escória de alto forno, pozolana e filler calcário. (LIMA, 2006)

A produção do Cimento Portland consiste basicamente na mistura e aquecimento das suas matérias-primas a uma temperatura de 1450 °C, que formam um material semifundido denominado clínquer. Após seu resfriamento, adiciona-se uma em pequena quantidade (< 3%) de gesso (sulfato de cálcio) e este material é finamente moído (granulometria menor que 75 µm) para a obtenção do cimento Portland. Os gessos podem ser encontrados de diversas formas, tais como gipsita, também denominada como sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$), hemidrato ou sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4) e são adicionados à moagem do clínquer com o objetivo de controlar a hidratação inicial do cimento, evitando o endurecimento instantâneo da mistura (MEHTA E MONTERO, 2008).

O Cimento Portland apresenta quatro principais compostos: silicato tricálcico ou alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}$ ou C_3S), silicato dicálcico ou belita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}$ ou C_2S), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A) e ferroaluminato tetracálcico ou ferrita ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF). A proporção destes compostos pode variar de acordo com o tipo de cimento obtido durante o processo de produção. Geralmente, suas quantidades no cimento variam entre 45-60%, 15-30% 6-12% e 6-8%, para alita, belita, aluminato tricálcico e ferrita, respectivamente. (MEHTA E MONTERO, 2008).

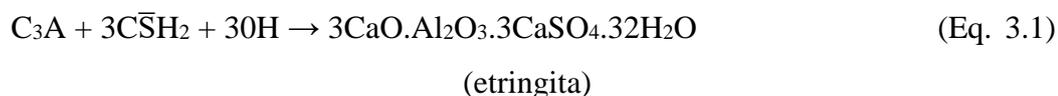
A Tabela 3.1 apresenta os principais compostos do cimento Portland com suas devidas abreviaturas químicas.

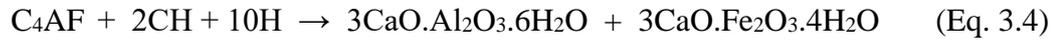
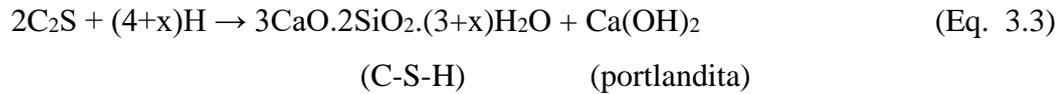
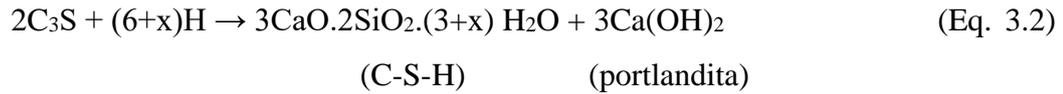
Tabela 3.1 – Composição do cimento Portland. Fonte: Mehta e Montero, 2008

Nome do composto	Composição	Abreviação	Proporção
Silicato tricálcico (alita)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	45-60%
Silicato dicálcico (belita)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	15-30%
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6-12%
Ferroaluminato			
tetracálcico (Ferrita)	4CaO. Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	6-8%
Outros	CaSO ₄ , álcalis (Na ₂ O, K ₂ O) MgO, cal livre (CaO), silicatos e aluminatos, etc		<12%

A reação de hidratação do cimento Portland ocorre quando seus componentes entram em contato com a água (H), sendo caracterizada por um conjunto de reações químicas individuais de hidratação que podem ocorrer tanto em paralelo quanto sucessivamente, ou ainda em uma combinação mais complexa. Isto se deve ao fato de que o cimento Portland é formado por uma mistura de vários compostos em diferentes quantidades e estes sofrem hidratação em diferentes velocidades. Por isto, estas reações, que são exotérmicas e termo-ativadas, são consideradas interdependentes, possuindo cinéticas diferentes e são responsáveis pela formação de produtos diferentes. Deste modo, o processo de hidratação do cimento Portland é considerado um processo de alta complexidade, sendo necessária a discussão das reações de hidratação de cada um dos componentes. Vale ressaltar ainda que o processo de hidratação depende do tipo e da granulometria do cimento, da relação água cimento, da temperatura de cura e da presença de aditivos químicos e minerais (GONÇALVES, TOLEDO FILHO e FAIRBAIN, 2006).

Segundo Dweck *et al.* (2016), as principais reações de hidratação do cimento são:





A Figura 3.1 ilustra o progresso de hidratação dos principais compostos do cimento com o decorrer do tempo. Observa-se que os aluminatos se hidratam mais rapidamente que os silicatos. Sendo a reação de hidratação dos aluminatos imediata, estes componentes são responsáveis pelo enrijecimento e solidificação da pasta (pega), enquanto que os silicatos atuam nas características da pasta após o endurecimento, como no desenvolvimento da resistência (MEHTA E MONTERO, 2018).

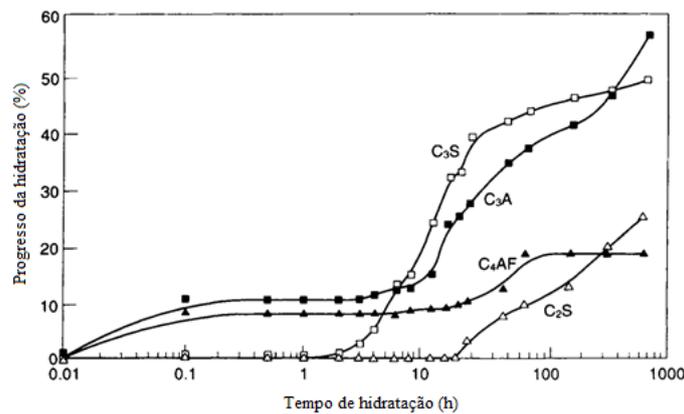


Figura 3.1 – Hidratação dos componentes do cimento Portland. Fonte: adaptado de Bensted, 2004

Durante a reação de hidratação do C₃A (Equação 3.1), esse reage com a água e também com a gipsita presente no cimento Portland, liberando grande quantidade de calor. Nos primeiros 30 minutos, ocorre a formação do produto conhecido como etringita (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O ou C₃A \bar{S} ₃H₃₂ ou AF_t). A etringita apresenta um formato cristalino na forma de pequenas agulhas e elas se depositam na superfície das partículas de C₃A que ainda não reagiram, criando assim uma camada de baixa permeabilidade (YOUNG *et al.*, 1998). A etringita contribui para o enrijecimento, a pega e o desenvolvimento da resistência inicial da mistura. A presença de C \bar{S} H₂ evita a reação abrupta do C₃A com a água durante a hidratação e retardar a pega da mistura.

Após esta primeira etapa ocorre uma diminuição da liberação do calor e sua duração pode variar dependendo da quantidade de sulfato presente no meio (TAYLOR, 1997). Nesta etapa, ocorre a desaceleração da hidratação do C_3A , porém, este mecanismo de retardo da reação ainda não é bem conhecido. Existem algumas teorias que tentam explicar este fenômeno. Uma delas é que o retardo da reação é causado pela formação de uma camada de difusão em volta da superfície do C_3A durante a produção da etringita. Outra teoria diz respeito ao surgimento de outras fases, como, por exemplo, o Af_m (monossulfato de cálcio hidratado), as quais retardariam a reação do C_3A (BULLARD *et al.*, 2011).

Quando todo o sulfato de cálcio é consumido e a concentração de íons aluminatos aumenta (devido às novas hidratações de C_3A e C_4AF e à liberação de Al que estava na parte mais interna dos grãos de cimento), a etringita se torna instável e é gradualmente convertida em cristais de monossulfato ($C_4A\bar{S}3H18$ ou AF_m), que é o produto final da hidratação do aluminato (BULLARD *et al.*, 2011). O AF_m geralmente é produzido em estágios tardios da hidratação (de 12 a 36 horas) e em reações de temperatura ambiente (RAMACHANDRAN, 1995).

As quantidades de etringita e monossulfato em idades avançadas da pasta depende da relação sulfato de cálcio e íons de aluminatos (Al). Enquanto houver mais Al disponível para a reação com o sulfato, todo o sulfato será convertido em monossulfato. Entretanto, se houver excesso de sulfato, a pasta passará a apresentar uma mistura de etringita e monossulfato. Caso tenha maior quantidade de sulfato disponível no sistema, a pasta será composta por mais etringita e menos monossulfato (ROCHA, 2015).

A hidratação do C_4AF (Equação 3.4) é semelhante ao aluminato descrito anteriormente, porém sua reatividade é mais lenta. A reação de hidratação do C_4AF ocorre com o aumento do teor de alumina e gera um produto de composição química diferente, porém, com estrutura cristalina semelhante à etringita e ao monossulfato. Durante as primeiras idades é possível identificar a presença de etringita e monossulfato no cimento hidratado devido à formação de cristais na forma de agulhas prismáticas curtas e finas placas hexagonais, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A etringita e o monossulfato representam de 15-20% da composição da pasta hidratada e são considerados compostos secundários na participação do desempenho microestrutural e das propriedades das misturas.

As reações de hidratação dos silicatos (Equações 3.2 e 3.3) apresentam como produto de hidratação o silicato hidratado de cálcio (C-S-H) e o hidróxido de cálcio ou portlandita (Ca(OH)_2 ou CH). Além da diferença no tempo em que começam a reações de hidratação, as reações de hidratação dos silicatos também diferem na quantidade de CH produzida e na cinética: o C_2S só começa a se hidratar após dez horas da adição da água, produzindo menos CH e com menor velocidade de hidratação. Por isso, o C_3S é considerado responsável pela resistência inicial da mistura endurecida e também pelo aumento de sua resistência final, enquanto que o C_2S contribui apenas no aumento da resistência em idades avançadas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O CH representa 20-25% do volume de sólidos da pasta, enquanto que o principal produto de hidratação, o C-S-H, representa 50-60% (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O C-S-H constitui a fase ligante mais importante das reações de hidratação, pois é principal hidrato responsável pela resistência de uma pasta em seu estado endurecido. Este hidrato apresenta estrutura cristalina imprecisa e nem sempre possui a composição química fixa, sendo sua estequiometria variável de acordo com a relação molar Ca/Si (de 1,5 a 2,0) e dependendo da composição do cimento Portland, da relação água/cimento, da temperatura e da idade de hidratação. A composição aproximada $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ é utilizada nos cálculos estequiométricos, porém, utiliza-se a notação C-S-H para indicar esta variabilidade molar. Ele é um composto amorfo ou pobremente cristalino, de forma porosa, com características de um gel rígido (TAYLOR, 1990).

Segundo Odler (1998), o processo de hidratação pode ser dividido em quatro etapas: período de pré-indução; período de indução ou dormência; período de aceleração ou pós-indução; e período de desaceleração (Figura 3.2).

O período de pré-indução (I) ocorre durante as primeiras horas de reação e é caracterizado por uma alta velocidade de liberação de calor e intenso pico exotérmico (1) devido a dissolução do C_3S e C_3A e a grande formação de etringita. Apesar de ser um período intenso, esta etapa só ocorre durante poucos minutos, formando os primeiros silicatos de cálcio hidratados (BULLARD *et al.*, 2011).

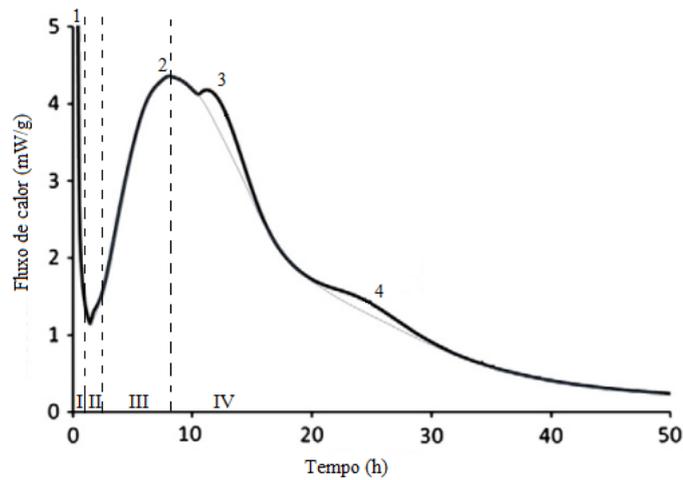


Figura 3.2 – Curva típica do fluxo de calor durante as reações de hidratação de um cimento.
Fonte: adaptado de BULLARD *et al.*, 2011

Após este período de pré-indução, ocorre a diminuição da velocidade de reação de hidratação. O fluxo de calor decresce e há um retardo na hidratação, caracterizando o período chamado de indução ou dormência (II). Existem diferentes hipóteses para explicar este fenômeno que causa o retardo na taxa de hidratação (TAYLOR, 1997; ODLER, 1998; BULLARD *et al.*, 2011).

Dentre estas teorias existe uma denominada “Hipótese da barreira metaestável”, a qual considera que a queda da velocidade de reação é consequência da rápida produção de C-S-H em volta dos grãos de C_3S não hidratados, formando deste modo uma fina camada metaestável e contínua (JENNINGS e PRATT, 1979). Estes autores supõem, ainda, que esta camada funcionaria como uma barreira separando as fases anidras da solução aquosa, o que impediria a migração da água para a parte interna do grão, dificultando a continuidade de hidratação. O período de indução acaba somente se esta barreira for rompida, o que poderia acontecer se solução presente entre a barreira e o grão de C_3S gerasse uma pressão osmótica (ODLER, 1998). Outros autores assumem a “Hipótese da nucleação do CH”, na qual supõem-se que o CH se dissolve na solução, não conseguindo se precipitar devido ao aumento da concentração de íons de silicato na superfície dos núcleos de CH. Somente cessaria o período de dormência quando a concentração de CH fosse alta o suficiente para superar este efeito (ODLER, 1998).

A taxa de reação se eleva novamente, ocorrendo o período de aceleração (III), o qual é caracterizado pelo segundo pico exotérmico (2). Este pico é referente à máxima

geração de calor devido as reações de hidratação do C₂S e, principalmente, do C₃S, onde ocorre a dissolução destas fases com a formação de C-S-H e a precipitação da CH. O pico 3 é referente ao ponto de exaustão do sulfato de cálcio, o qual ocorre a aceleração da hidratação das fases aluminato e o principal produto formado é a etringita, formada a partir do sulfato previamente absorvido no C-S-H (BULLARD *et al.*, 2011).

Por fim, ocorre a desaceleração (IV), caracterizada pela desaceleração da reação de maneira gradual, onde os grãos maiores de C₃S são substituídos por C-S-H, através de um processo controlado pela difusão, e os grãos menores reagem por completo por dissolução e precipitação (TAYLOR, 1990). Neste período podem ainda aparecer um pequeno pico (4), provavelmente relacionados à formação de mais etringita e de fases de monossulfato (BULLARD *et al.*, 2011).

Deste modo, cada componente do cimento contribui de maneira diferente para o desempenho final do material cimentício. A quantificação dos produtos hidratados e determinação de água livre e combinada, bem como o calor acumulado durante a hidratação são parâmetros importantes para se ter um indicativo da velocidade de hidratação e da reatividade ou não das adições minerais.

3.2 ADIÇÕES MINERAIS

O uso de adições minerais vem ganhando cada vez mais espaço dentro da Indústria da Construção Civil com finalidade de se dar um destino final adequado a estes materiais e reduzir o consumo de cimento Portland, o qual é responsável por grandes impactos ambientais durante sua fabricação (JOHN *et al.*, 2011; FLORES, 2017). Estas adições podem ser materiais inertes (fillers) ou reativos, de origens naturais (pozolanas naturais) ou provenientes de resíduos industriais (pozolanas artificiais) e subprodutos de outras atividades (rejeito de minério e finos de concreto reciclado).

As adições minerais entram na matriz cimentícia como material de substituição parcial do cimento a fim de proporcionar um desempenho tecnológico diferenciado, melhorando propriedades físico-química-mecânicas e a durabilidade das misturas produzidas. Estes materiais são capazes de promover efeitos químicos e/ou físicos

durante a hidratação do cimento (LAWRENCE *et al.*, 2003) e a intensidade destes efeitos depende do tipo de adição mineral, bem como de sua composição mineralógica, o teor de substituição e o tamanho das partículas.

O efeito químico ocorre devido à reatividade das adições minerais. A incorporação de pozolanas amorfas em matrizes cimentícias promove a chamada reação pozolânica (Equação 3.5), na qual a pozolana reage com água e o hidróxido de cálcio formado pela hidratação do C3S e C2S, produzindo C-S-H. Com isto, tem-se aumento efetivo da resistência mecânica dos materiais cimentícios e, com o consumo de hidróxido de cálcio na reação, ocorre a redução do pH da matriz, aumentando a durabilidade do material em meios ácidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008). SHVARZMAN *et al.* (2003) explicam que a atividade pozolânica depende da composição mineralógica do material, da quantidade presente de fases ativa da pozolanas, do grau de desidroxilação, da área específica do material, da composição do cimento, da razão de pozolana/cal (CaO) na mistura, da razão água/sólido da mistura e da temperatura.



Existem três tipos de efeitos físicos causados pelas adições minerais: efeito de diluição; efeito da distribuição de tamanhos de partículas ou efeito filler; e efeito de nucleação heterogênea (LAWRENCE *et al.*, 2003).

O efeito de diluição do cimento está ligado ao teor de substituição parcial do cimento e ao tamanho da partícula do aditivo mineral. Quando se tem um grande teor de substituição, a mistura apresenta menor quantidade de cimento e, conseqüentemente, terá um aumento da relação água efetiva/cimento, o que também provocará em uma menor quantidade de produtos de hidratação formados (LAWRENCE *et al.*, 2003). Em relação ao tamanho das partículas das adições, se estas forem iguais ou maiores do que as partículas do cimento, ocorrerá redução da taxa de hidratação, provocando um aumento na porosidade da mistura (JAYAPALAN, 2013).

O efeito filler é geralmente promovido por adições inertes que apresentam granulometrias muito finas, ultrafinas e/ou manométricas. Essas micro-partículas atuam como material de preenchimento, ocupando os vazios existentes entre as partículas de

cimento dispersas, melhorando o empacotamento de esqueleto granular. No estado fresco, elas atuam na redução do tamanho dos poros, tornando-se uma mistura mais trabalhável e compacta. O empacotamento da mistura não depende apenas do tamanho das partículas, mas também do formato, da distribuição granulométrica e a área de superfície específica (SHVARZMAN *et al.*, 2003). Quanto mais fina é a adição mineral, melhor o empacotamento da mistura (FONTES, 2008).

Antes de comentar o efeito de nucleação é importante entender que o mecanismo de hidratação se passa em duas fases. Primeiramente, ocorre a dissolução das fases anidras do cimento, levando a precipitação dos produtos formados ao longo da superfície das partículas de cimento. Com o decorrer da reação de hidratação, mais hidratos são produzidos, depositando-se nas superfícies das partículas de cimento e nos poros, sendo que a camada de produtos hidratados formada na superfície se torna cada vez mais espessa, o que dificulta a hidratação da parte interna do grão (ainda anidra). A partir deste momento, há uma transição do mecanismo de hidratação, que passa a ser um processo de difusão iônica: a água difunde, através da camada de hidratos, para atingir os grãos anidros mais internos, dando continuidade às reações de hidratação com crescimento gradual de hidratos sobre a superfície externa (LAWRENCE *et al.*, 2003).

Segundo LAWRENCE *et al.* (2003) as adições minerais são capazes de reduzir a espessura da camada gerada pelos hidratos através de uma nucleação em volta de partículas de cimento, facilitando a difusão de água para a parte interna e aumentando, assim, a hidratação do cimento (Figura 3.3). Esse efeito depende do tamanho e da quantidade de partículas das adições minerais: quanto menor o tamanho da partícula, melhor o mecanismo de nucleação e quanto maior quantidade de aditivos minerais, maior a probabilidade de se formarem os sítios de nucleação próximos à partícula do cimento.

A Figura 3.4 ilustra os efeitos físicos causados pela substituição parcial de cimento por micro e nano partículas. Nas Figuras 3.4.a e 3.4.b representam uma pasta cimentícia sem adição mineral antes e outra depois da reação de hidratação, respectivamente. A Figura 3.4.c indica que parte do cimento foi substituído por adições micrométricas (com tamanho igual ou maior do que as partículas de cimento). A Figura 3.4.d mostra o efeito de diluição causado pela adição dessas partículas. Neste caso, a

taxa de reação de hidratação será menor, pois há redução da quantidade total do cimento disponível, bem como aumento da distância entre partículas. A Figura 3.4.e representa adições de menor tamanho do que os grãos de cimento Portland preenchendo os vazios (efeito filler). As reações de hidratação são aceleradas (devido ao efeito de nucleação) são indicadas na Figura 3.4.f.

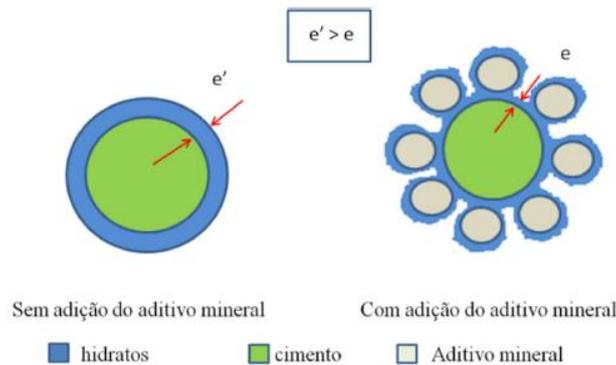


Figura 3.3 – Representação esquemática do efeito de nucleação, onde a espessura da camada dos produtos hidratados é representado pela letra “e”. Fonte: Lawrence (2003)

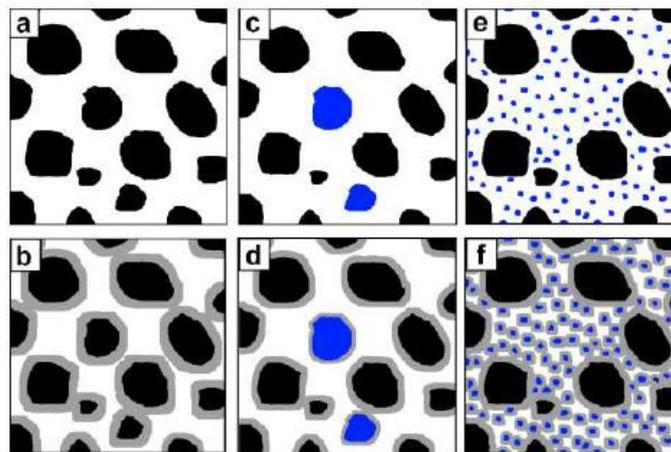


Figura 3.4 – Representação esquemática da hidratação do cimento: (a) cimento Portland sem adição mineral antes da hidratação (b) cimento sem adição mineral depois da hidratação; (c) cimento com adição de micropartículas antes da hidratação (d) cimento com adição de micropartículas depois da hidratação (efeito de diluição); (e) cimento com nano partículas antes da hidratação (efeito filler) (f) cimento com nano partículas depois da hidratação (efeito de nucleação heterogênea e efeito filler). Fonte: Jayapalan, 2013

3.2.1 FILLER

Segundo Petrucci (1979), filler é todo material passante na peneira de 0,075 mm definida pela norma ABNT NM ISO 3310-2 (1997). Soares (2010) considera adições

minerais com efeito filler, ou simplesmente filler, como material finamente moído, de diâmetro médio próximo ao do cimento, que possui característica física capaz de beneficiar algumas propriedades de argamassas e concretos, quando em teores menores que 15% em relação à massa de cimento (MOTTA e LEITE, 2000; BARDINI, 2008). A norma NBR 11578 (ABNT, 1991) limita a adição de filler entre 6-10% para os cimentos Portland composto com filler (CP II-F) e entre 0-10% para os cimentos Portland composto com escória de alto forno (CP II-E) ou com material pozzolânico (CP II-Z). Já a norma NBR 5733 (1991) especifica que o CP V ARI pode apresentar até 5% de material carbonático.

O filler mineral é constituído de partículas provenientes da britagem de agregados graúdos e/ou miúdos, como pó de pedra, filler de calcário, quartzo ou outro tipo de material carbonático; ou de outras fontes como, por exemplo, cal hidratada, cimento, etc (BARDINI, 2008; 2013).

Estes materiais são capazes de melhorar o comportamento reológico, propriedades físicas e mecânicas, e a durabilidade de misturas cimentícias. A adição de fillers modifica o tempo de pega e permite melhor trabalhabilidade do material no estado fresco, há aumento da plasticidade sem aumentar o consumo de água da mistura, reduzindo assim, a segregação e a exsudação da mistura (BARDINI, 2008; SOARES, 2010). Os fillers também provocam efeitos de densificação na matriz. Como material de enchimento, eles são capazes de refinar o esqueleto granular, preenchendo os vazios, reduzindo o tamanho e o volume de poros maiores e a conectividade entre eles. Deste modo, eles também promovem a impermeabilidade da mistura e beneficiam a durabilidade dos materiais, dificultando a entrada de agentes agressivos no seu interior (POGGIALI, 2010).

Além disso, os fillers podem promover um incremento na resistência à compressão do material, dependendo da finura e do tipo de matriz (pasta, argamassa e concreto) (GOLDMAN E BENTUR, 1992 apud FONTES, 2008; MOTTA e LEITE, 2000). Eles também são capazes de melhorar a resistência à ação do congelamento, a resistência à fissuração térmica, devido ao baixo calor de hidratação, e resistência ao envelhecimento (BARDINI, 2008; SOARES, 2010).

Segundo Lawrence *et al.* (2003), quando incorporamos fillers de tamanho de partículas na ordem de micrômetros às misturas cimentícias, estes melhoram o empacotamento dos grãos pois funcionam como sítios de nucleação, favorecendo a hidratação do cimento. Consequentemente, teremos uma otimização das propriedades mecânicas e de durabilidade do material.

O emprego de adições minerais como material substituto ao cimento além de promover melhoras das propriedades físico-químico-mecânicas e da durabilidade das matrizes cimentícias, também traz benefícios econômicos e ambientais, com a redução do consumo energético e emissão de gás carbônico na produção do cimento e reaproveitamento de resíduos como forma de adições minerais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

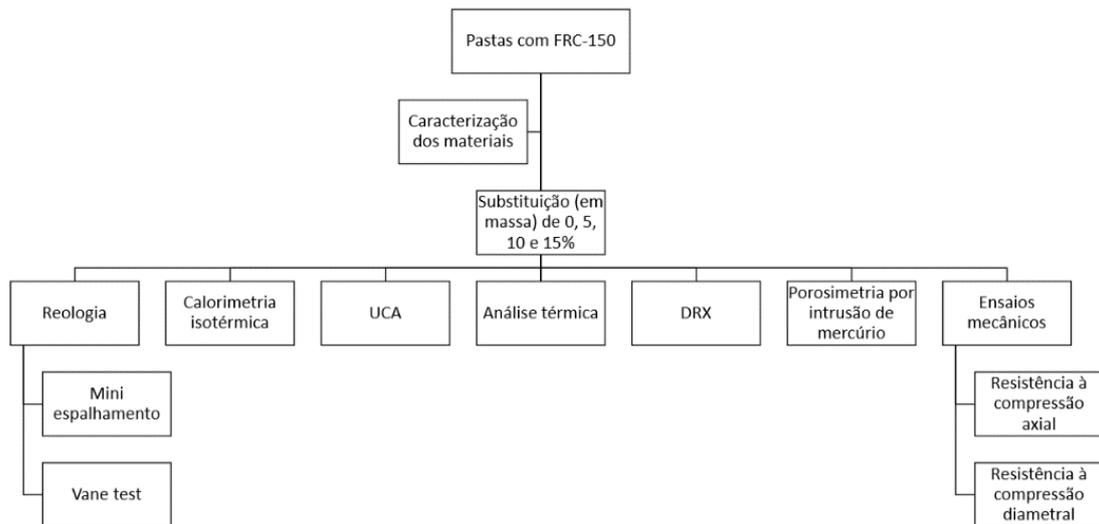
Neste capítulo são apresentados o processo de produção e peneiramento de diferentes tipos de finos reciclado de concreto (FRC), os materiais utilizados para a confecção das pastas cimentícias e concretos, bem como a descrição de ensaios e equipamentos utilizados na sua caracterização. Também são descritos os métodos de dosagem, preparo e cura das pastas e concretos, além dos procedimentos adotados para o estudo tanto no estado fresco quanto endurecido.

Nesta pesquisa foram utilizados três FRC de diferentes origens: “LAB”, proveniente de corpos-de-prova de concreto produzidos de maneira controlada no laboratório; “D”, procedente de resíduo de demolição de diferentes concretos sem especificações da usina de reciclagem Foccus (São Paulo); e “C”, oriundo de restos de diferentes misturas de concretos obtidas pela lavagem de caminhões betoneiras, sem especificação. O plano experimental baseou-se na granulometria dos diferentes FRC estudados e no tipo de matriz cimentícia estudada, sendo dividido em duas etapas.

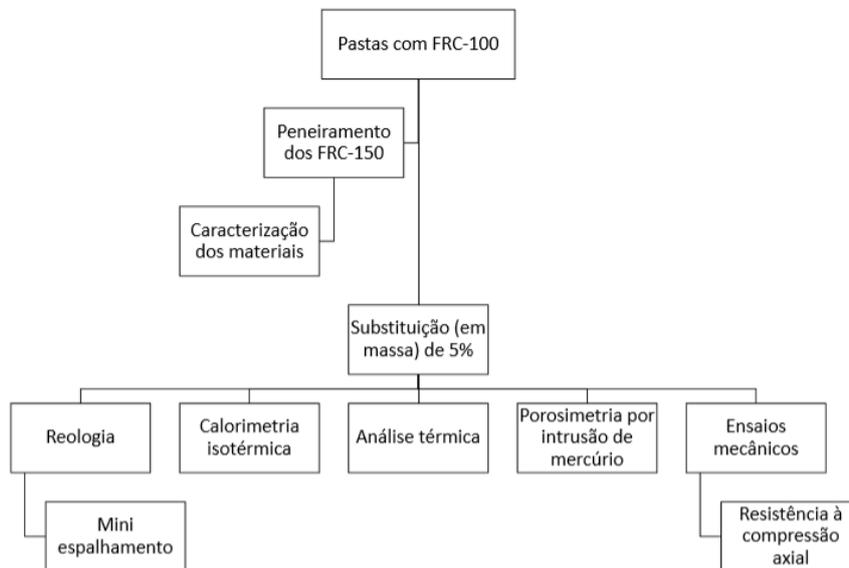
Na primeira etapa realizou-se o estudo em pastas cimentícias, de modo a estudar os efeitos químicos e físicos dos FRC em um sistema mais puro possível. Esta etapa foi subdividida em duas fases, de acordo com a granulometria dos FRC estudados.

Na fase I (Figura 4.1.a) tem-se o estudo dos FRC cuja granulometria é inferior a $150\ \mu\text{m}$. O uso de FRC de granulometria menor que $150\ \mu\text{m}$ é justificável, visto que eles são subprodutos direto do peneiramento dos agregados miúdo reciclados durante o processo de beneficiamento de RCD, não necessitando maior gasto de energia e tempo para sua produção e, evitando, assim, ainda maiores impactos ambientais durante a produção de agregados reciclados. Nesta pesquisa, os FRC de granulometria inferior a $150\ \mu\text{m}$ são chamados de FRC-150. Foram produzidas pastas com substituição parcial do cimento Portland (0, 5%, 10% e 15% de substituição em massa) por FRC-150. Na fase II da primeira etapa (Figura 4.1.b), peneirou-se os FRC de granulometria inferior a $150\ \mu\text{m}$ afim de retirar os grãos mais grossos dos FRC-150 e obter uma granulometria dentro da faixa granulométrica do cimento, são chamados agora de FRC-100. Foram produzidas pastas com 5% de substituição (em massa) do cimento Portland por FRC-

100. Nesta primeira etapa a reologia, hidratação, comportamento mecânico e estrutura porosa das pastas produzidas foram estudadas, comparando os FRC com um material inerte (sílica inerte) de granulometria similar de cada granulometria estudada, para melhor entendimento das propriedades físico-químicas dos FRC. Nesta pesquisa, a sílica inerte de granulometria inferior a 150 μm e inferior a 100 μm é denominada S-150 e S-100, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.1. – Plano experimental da etapa 1: (a) fase I: FRC-150 e (b) fase II: FRC-100

Na segunda etapa (Figura 4.2), baseou-se em dois estudos de caso no uso de FRC-150 em concretos. Foram realizadas dosagens científicas, aplicando o conceito de método de empacotamento compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999), com auxílio do *software Betonlab Pro 3*.

No primeiro estudo de caso (caso I), produziu-se três concretos de classe C25 com adição de uma quantidade fixa de FRC-150 de diferentes origens, de modo a avaliar o efeito da origem dos FRC-150 em concretos. O consumo de cimento estabelecido foi de aproximadamente 280 kg/m^3 e adicionou-se 20 kg/m^3 de FRC-150. Os FRC-150 foram considerados como adição de fíller sem reatividade em função dos resultados da primeira etapa de estudo.

O estudo de caso II avalia a influência do FRC-150 tipo “LAB” em concretos com 25% de substituição da areia natural pela areia reciclada contendo os finos, comparando-o com um concreto de referência (sem presença de finos e areia reciclada) e um concreto com 25% de areia reciclada sem presença de finos. Neste caso os FRC-150 foram considerados como parte da areia reciclada.

Em ambos os casos, os concretos produzidos foram avaliados quanto ao seu comportamento no estado fresco (ensaio de abatimento de tronco de cone – *slump test*) e estado endurecido (comportamento mecânico pelo ensaio de resistência à compressão axial).

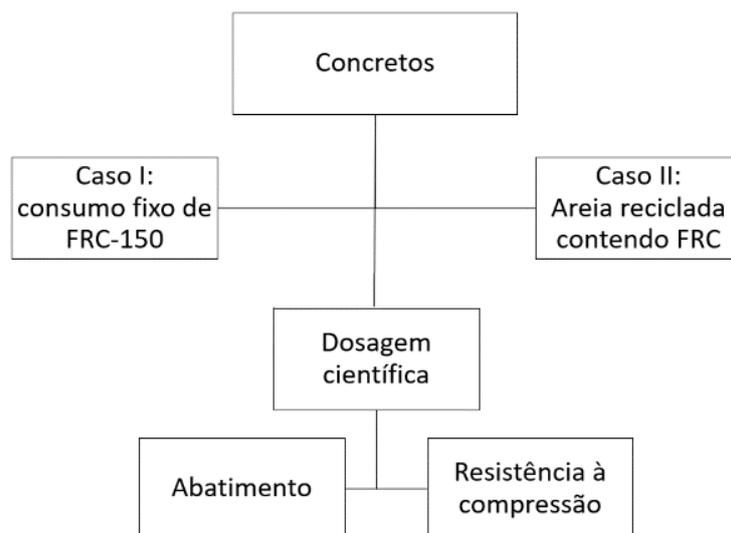


Figura 4.2 – Plano experimental da etapa 3: concretos contendo FRC-150

4.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As propriedades de pastas e de concretos avaliadas com repetição de ensaios iguais (3 ou mais determinações) foram tratadas estatisticamente para validação dos resultados experimentais obtidos, com auxílio do *software* PAST 2.7.

Foi utilizada a análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), seguido pelo teste de comparação de médias de Tukey. Este teste permite avaliar qualquer discrepância entre duas médias de tratamentos e é baseado na Diferença Mínima Significativa (DMS), onde a estatística do teste é dada de acordo com a Equação 4.1.

$$\Delta = \sqrt[q]{\frac{QMRes}{r}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

Δ : 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.

4.2 PRODUÇÃO, PENEIRAMENTO E HOMOGENEIZAÇÃO DOS FRC

Neste estudo os FRC estudados são subproduto do processo de produção de agregados reciclados de três tipos de RCD diferentes. Foram utilizadas 7 toneladas de cada RCD afim de simular uma produção de agregados reciclados em escala industrial. Os RCD eram provenientes de diferentes origens: RCD-LAB, RCD-D e RCD-C.

O RCD-LAB (Figura 4.3) é proveniente de corpos-de-prova produzidos de forma controlada por Amario *et al.* (2018) no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST) da COPPE/UFRJ, e rompidos aos 28 dias de cura.

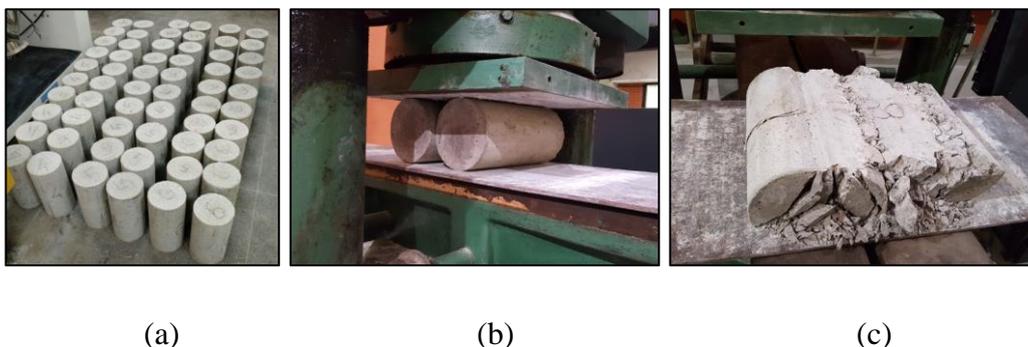


Figura 4.3 – RCD-LAB. (a) Corpos-de-prova produzidos; (b) ruptura dos corpos-de-prova aos 28 dias e (c) concreto rompido. Fonte: Amario *et al.*, 2018

A Tabela 4.1 apresenta a composição do concreto que originou o RCD-LAB. Além disso, algumas características deste concreto são listadas abaixo:

- Cimento Portland utilizado: CP V ARI;
- Fator água/cimento: 0,60;
- Dimensão máxima do agregado: 9,5 mm;
- Abatimento: 200 mm;
- Concreto classe C30;
- Resistência à compressão aos 28 dias: 32,8 MPa;
- Módulo de elasticidade aos 28 dias: 22,3 GPa;
- Idade do concreto: 28 dias;

Tabela 4.1 – Composição do concreto original do RCD-LAB

Materiais	Composição (kg/m³)
Cimento Portland	353,0
Areia natural	815,2
Brita 0 natural	894,5
Superplastificante Glenium	3,5
Água	211,4

O RCD-D (Figura 4.4.a) é proveniente de um conjunto de resíduos de demolição da usina de reciclagem Foccus (Praia Grande, SP). É composto pela mistura de diferentes concretos e não apresenta nenhuma informação técnica, sendo a idade dos concretos indeterminada. O RCD-C (Figura 4.4.b) é resultante de um conjunto de restos de concretos da lavagem de caminhões betoneiras da usina de concreto Supermix (Rio de Janeiro, RJ). É composto de diferentes concretos no estado fresco e não apresenta nenhuma informação técnica, porém, a idade dos concretos britados foi de 28 dias.



(a)



(b)

Figura 4.4 – (a) RCD-D e (b) RCD-C. Fonte: Amario *et al.*, 2018

O processo de cominuição foi feito por Amario *et al.* (2018), com auxílio de um britador de mandíbulas (Queixada 200), no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST) da COPPE/UFRJ. Nesta etapa há a saída de um material grosso e duas saídas de um material fino sem granulometria definida (Figura 4.5).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5 – Processo de britagem. (a) material no britador de mandíbulas Queixada 200; (b) saída do material fino; (c) saída do material grosso. Fonte: Amario *et al.*, 2018

Após a britagem, o material fino foi armazenado e apenas o material grosso foi peneirado em um peneirador mecânico no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Foi utilizado as peneiras de 19 mm, 9,5 mm e 4,75 mm (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Processo de peneiramento mecânico do material grosso: (a) detalhe do equipamento (b) detalhe de uma saída do peneirador. Fonte: Amario *et al.*, 2018

As frações finas provenientes das duas saídas do britador e o material passante na peneira de 4,75 mm proveniente do peneirador mecânico foram homogeneizados. São chamados de LAB_A-F, D_A-F e C_A-F as areias contendo finos reciclados provenientes do RCD-LAB, RCD-D e RCD-C, respectivamente. O Gráfico 4.1 apresenta a granulometria destas areias contendo finos, que foi feita de acordo com a norma ABNT NBR NM 248 (2003). Nota-se que a quantidade de material passante na peneira de 150 μm foi de 13,3%, 10,0 e 6,8% de “LAB”, “D” e “C”, respectivamente.

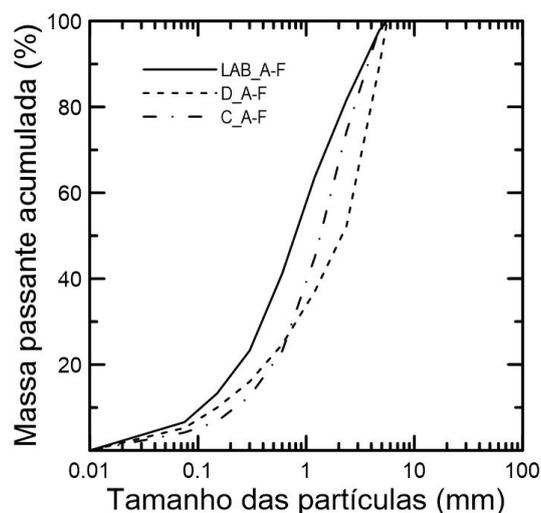


Gráfico 4.1 – Granulometria dos RCD das partículas areia reciclada contendo finos FRC

As areias contendo finos foram peneirados novamente em um peneirador mecânico, utilizando agora as peneiras de 4,75 mm e 0,150 mm de abertura (Figura 4.7), afim de obter as areias dentro da granulometria especificada pela norma ABNT NBR 7211 (2009).

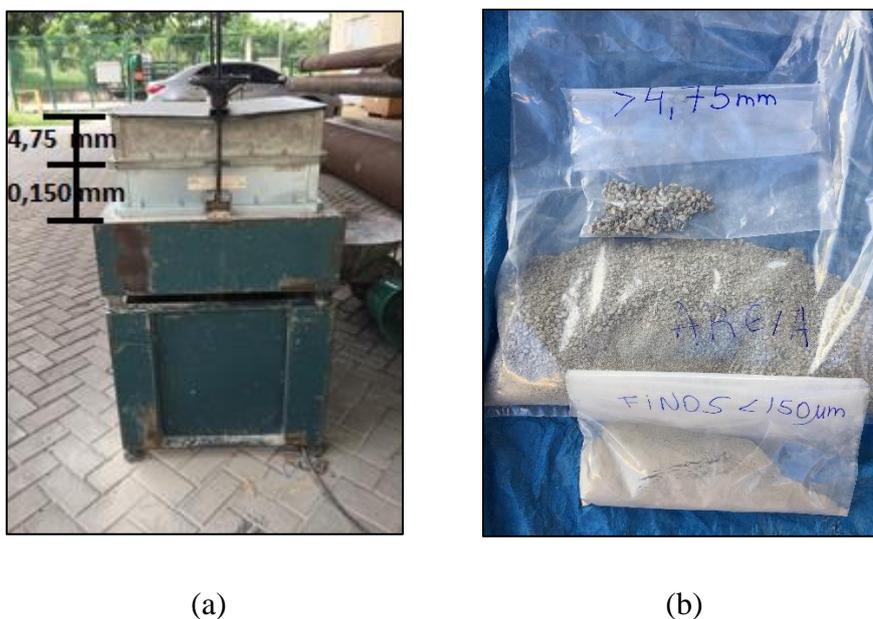


Figura 4.7 – (a) Peneirador mecânico utilizado; (b) frações granulométricas obtidas do novo peneiramento: AMRC e FRC

Os materiais passantes na peneira de 4,75 mm e retido na peneira de 0,150 mm foram classificados como agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC) e os materiais passantes na peneira de 0,150 mm foram denominados como finos reciclados de concreto (FRC-150), respectivamente.

Neste estudo, utilizou-se os três tipos de FRC-150 (“LAB”, “D” e “C”), chamados de LAB-150, D-150 e C-150; a areia proveniente do RCD-LAB contendo finos FRC-150, denominada de LAB_A-F e a areia sem finos do RCD-LAB, chamada de LAB_A. Todos estes materiais foram armazenados em local apropriado para desenvolvimento desta pesquisa.

A quantificação de todas as frações granulométricas do processo de beneficiamento de RCD é mostrada no Gráfico 4.2. A denominação de brita 0 e brita 1 são referentes a agregados graúdos de dimensão máxima de 9,5 mm e 19 mm, respectivamente. As perdas são aquelas que ocorrem durante todo o processo de

beneficiamento do resíduo (britagem e peneiramento). Pode-se identificar que a parcela de FRC produzida varia apenas de 2% a 4%. Este baixo percentual de FRC ocorre devido ao equipamento escolhido para a etapa de britagem (britador de mandíbulas), que privilegia a produção de agregado graúdo conforme visto no Item 2.2. Somente foi possível contabilizar a perda do RCD-LAB, visto que somente se conhecia a quantidade inicial deste material. As perdas dos RCD-D e RCD-C foram então estipuladas para uma mesma quantidade de material inicial (aproximadamente 7000 kg).

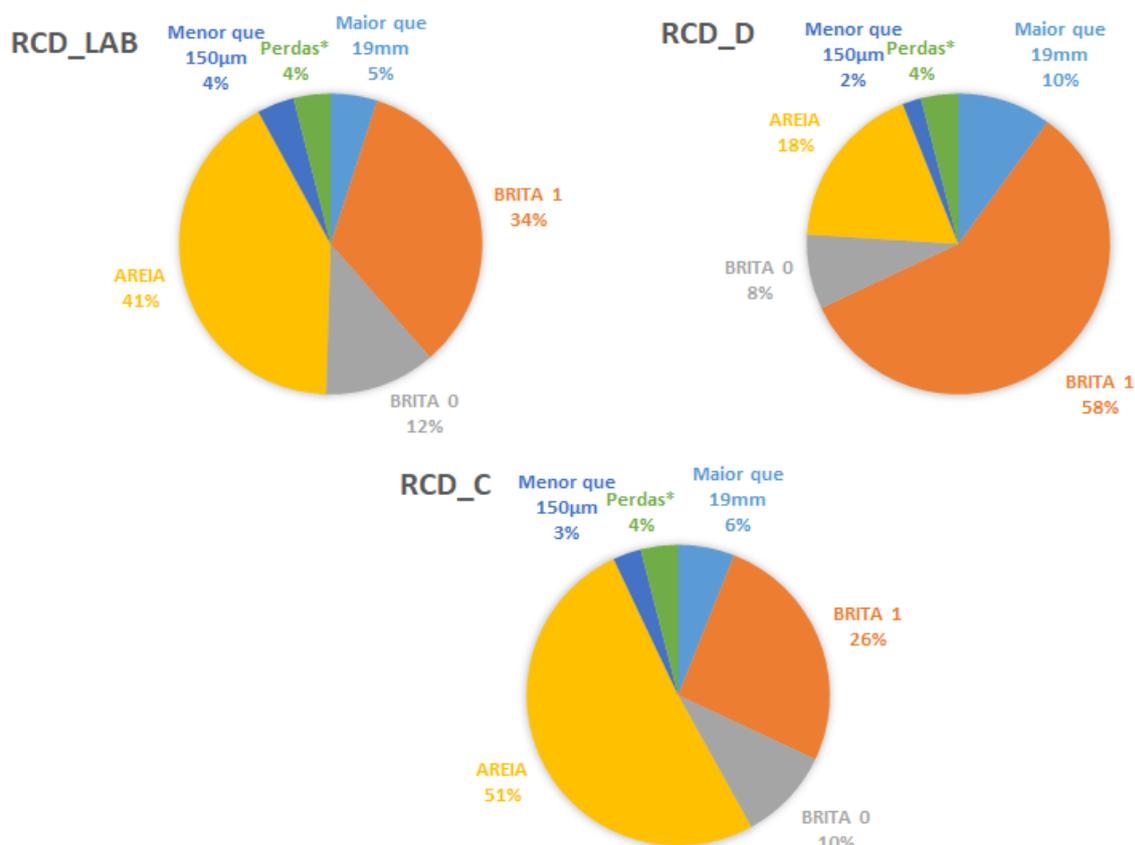


Gráfico 4.2 – Quantificação de fração gerada no processo de beneficiamento de cada RCD

Após a separação do AMRC e do FRC-150, realizou-se homogeneização dos FRC-150 pelo método conhecido como pilha alongada. Este procedimento propõe espalhar o material formando uma pilha, sempre na mesma quantidade e alterando o sentido de lançamento. Após distribuir o material em diversas camadas, separa-se o material disposto nas pontas da pilha e faz um novo lançamento. A pilha final pode ser vista na Figura 4.8.

Após esta primeira etapa, peneirou-se os FRC-150 novamente, de modo a eliminar as partículas mais grossas e garantir um material dentro da faixa granulométrica do cimento. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ, com um conjunto de peneiras de abertura de 0,150 mm, 0,106 mm, 0,075 mm, 0,053 mm e 0,038 m e utilizou-se o equipamento TYLER RO-TAP 8” para promover a vibração das amostras durante 20 minutos (Figura 4.9). Utilizou-se o material passante da peneira de 0,038 mm, o qual foi denominado como FRC-100. Quarteou-se este material para sua homogeneização.



Figura 4.8 – Homogeneização pelo método de pilha alongada



Figura 4.9 – Peneirador mecânico TYLER RO-TAP8”

Ao longo do estudo os FRC referentes ao material passante da peneira de 150 μm e da peneira de 38 μm foram definidos como “FRC-150” e “FRC-100”, respectivamente, podendo eles ser: LAB-150 e LAB-100; D-150 e D-100; C-150 e C-100.

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Na confecção das pastas utilizou-se o cimento Portland CP V ARI de alta resistência inicial, FRC de diferentes origens, sílica inerte (quartzo moído) e água deionizada. A procedência destes materiais é descrita a seguir:

- Cimento Portland CP V ARI – Cimento Portland produzido pela fábrica de cimento LafargeHolcim em conformidade com a ABNT NBR 5733 (1991) e pertencentes ao mesmo lote de produção;
- FRC-LAB – Fino resíduo de concreto gerado durante o beneficiamento do RCD-LAB.
- FRC-D – Fino resíduo de concreto gerado durante o beneficiamento do RCD-D.
- FRC-C – Fino resíduo de concreto gerado durante o beneficiamento do RCD-C.
- Sílica – Quartzo moído proveniente da moagem da sílica conhecida comercialmente por sílica 120#, da Mineração Jundu (São Paulo). Utilizaram-se dois tipos de granulometria: S-150 e S-100 (respeitando a mesma nomenclatura granulométrica dos FRC-150 e FRC-100, respectivamente);
- Água deionizada.

O uso do CP V ARI é justificável, visto que este cimento é considerado um cimento puro, o qual geralmente não contém adições, podendo apresentar no máximo 5% de adição em massa de material carbonático. Além disso, a escolha deste cimento CP V ARI foi baseada no fato de que o concreto do RCD-LAB foi produzido com o mesmo tipo de cimento Portland.

A escolha da sílica como material de comparação aos FRC é justificável pelo fato deste material ser inerte, que não irá apresentar efeitos químicos que possam contribuir para a reação de hidratação. Desta maneira, pretende-se comparar os FRC como material inerte e verificar se estes possuem alguma reatividade.

Na dosagem de concretos, além de terem sido utilizados o cimento Portland CP VARI e os FRC-150 descritos acima, também foram utilizados quatro tipos de agregados, o AMRC denominado A_LAB, o qual não contém finos FRC-150, a areia contendo finos (LAB_A-F) e a areia natural (quartzosa proveniente do Rio Guandu, Rio de Janeiro), agregado graúdo (brita 0 natural de dimensão máxima de 9,5 mm e de origem granítica), aditivo superplastificante Glenium 51 (produzido pela empresa BASF) e água proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

As características do superplastificante são apresentados na Tabela 4.2, as quais foram fornecidas pelo fabricante. Foram utilizados valores médios da densidade e do teor de sólidos do superplastificante para os cálculos da dosagem.

Tabela 4.2 – Propriedades do superplastificante GLENIUM 51. Fonte: BASF

Tipo	Éter policarboxilato
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 – 7
Densidade	1,067 – 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 – 31,5

4.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

4.4.1.1 Cimento Portland CP VARI, FRC e sílica inerte

Determinou-se a granulometria dos materiais pelo granulômetro a laser Malvern Mastersizer® 2000 do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Todas as amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas e resfriadas no dessecador por 2 horas. As temperaturas de secagem foram de 60 ± 5 °C e de 100 ± 5 °C para todas as granulometrias dos FRC e da sílica, respectivamente.

Esta menor temperatura de secagem (60 ± 5 °C) para os materiais FRC foi adotada para não danificar a natureza dos mesmos, de modo a conservar os produtos

hidratados formados em temperaturas superiores a 60 °C e não aumentar a porosidade dos grãos. Esta temperatura de secagem foi utilizada para todos os ensaios de caracterização dos FRC descritos neste capítulo.

No ensaio de granulometria, foi adotado o mesmo procedimento realizado por Cordeiro (2006). Realizaram-se os ensaios com lente 100 (0,5 – 180 µm), álcool etílico absoluto P.A. para o cimento Portland CP V ARI e os FRC, e água para a sílica. Utilizou-se ultrassom para melhor dispersão das partículas durante 60 segundos. A quantidade de material utilizada foi determinada de forma que a taxa de obscuração medida pelo equipamento atingisse o valor entre 10% e 20%.

4.4.1.2 *Agregados naturais*

As granulometrias da areia natural e do agregado graúdo natural foram feitas de acordo com a norma ABNT NBR NM 248 (2003). As amostras foram previamente secas em estufa à temperatura de 100 ± 5 °C por 24 horas. O peneiramento foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ, com auxílio do equipamento TYLER RO-TAP 8” para promover a agitação mecânica do conjunto de peneiras durante 15 minutos.

4.4.2 **MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA**

4.4.2.1 *Cimento Portland CP V ARI, FRC e sílica inerte*

Para esta pesquisa foi utilizado o método do picnômetro a gás hélio, modelo Accupyc da Micromeritics. Este equipamento determina o volume verdadeiro de sólidos por variação da pressão do gás em uma câmara de volume conhecido. Foram utilizadas duas amostras de cada material e adotou-se a média. Todas as amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas e resfriadas no dessecador por duas horas. As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

4.4.2.2 *Agregados naturais*

Os ensaios de massa específica e a absorção de água do agregado miúdo foram realizados de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR NM 52 (2009) e ABNT NBR NM 30 (2009), respectivamente. Para o agregado graúdo, a determinação destas propriedades foi feita de acordo com os procedimentos descritos na norma ABNT NBR NM 53 (2009). Todas as amostras foram previamente secas em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas.

4.4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para a determinação da composição química do cimento Portland CP V ARI, FRC e sílica inerte foram realizados ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX). Todas as amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas e resfriadas no dessecador por 2 horas. Foi utilizado o equipamento WDS-2, modelo AXIOS Max (Panalytical), localizado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). As amostras foram pulverizadas e foi realizada a prensagem do material com auxílio da prensa automática VANEONX® da empresa FLUXANA. Utilizou-se o ácido bórico (H_3BO_3) como aglomerante na proporção de 1:0,3, ou seja, 0,6 g do ácido para 2,0 g da amostra.

Também foi feita a determinação da perda por calcinação (PPC) das amostras, utilizando o equipamento Leco TGA-701, localizado no CETEM. Os resultados são expressos em percentual e normalizados a 100% com a composição química de óxidos determinada pelo ensaio de FRX.

4.4.4 ANÁLISE MINERALÓGICA

A Difração de Raio X (DRX) permite determinar a composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes no CP V ARI, FRC e sílica inerte. A DRX qualitativa foi realizada para identificar as fases cristalinas presentes. Foi utilizado o difratômetro BRUKER, modelo D8 FOCUS, com radiação $\text{Cu-K}\alpha$, $\lambda = 0,179021$ nm, gerador operado a 40 kV e 40 mA do Laboratório do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

As amostras foram refinadas até se tornarem um pó com auxílio de um almofariz e pistilo e em seguida, foram compactadas no porta-amostras com ajuda de uma lâmina de vidro.

4.4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

As análises termogravimétricas dos materiais anidros (CP V ARI, FRC e sílica inerte) foram realizadas no equipamento SDT Q600 TA Instruments no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Para a amostra de cimento Portland CP V ARI e de sílica inerte, foi feito um aquecimento com taxa de aquecimento constante de 10 °C/min até 1000 °C e foi utilizado nitrogênio como gás de arraste, com vazão de 100 mL/min.

Como os FRC são fragmentos compostos por cimento endurecido e pó de agregados, foi adotada a seguinte metodologia: (i) primeiramente foi feita uma rampa de aquecimento até 35 °C que se manteve em temperatura constante por 60 minutos; (ii) as amostras foram aquecidas com taxa de aquecimento constante de 10 °C/min até 1000 °C. Em todas as amostras foi utilizado o nitrogênio como gás de arraste, com vazão de 100 mL/min. A massa para cada amostra foi de aproximadamente 10 mg e foi utilizado um cadinho aberto de platina.

4.4.6 SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE

A avaliação da superfície específica dos materiais é muito importante, pois mesmo que os materiais apresentem granulometria similar, eles também podem apresentar superfícies específicas diferentes em decorrência de vazios interiores, da morfologia e da rugosidade das partículas.

O método Blaine foi utilizado, descrito pela norma ABNT NBR 16372 (2015), para analisar a superfície específica do cimento Portland CP V ARI, FRC e sílica inerte. Todas as amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas e resfriadas no dessecador por 2 horas. Os ensaios foram realizados no equipamento de finura Blaine da

empresa Soltest do Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UF RJ.

4.4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada com objetivo principal de visualizar e investigar a morfologia e o tamanho das partículas do cimento Portland CP V ARI, FRC e sílica inerte. Utilizou-se o microscópio MEV modelo Zeiss EVO LS séries do Laboratório de microanálises da TU Darmstadt (Alemanha), por de elétrons secundários, com o microscópio operando a 20 kV em alto vácuo. As amostras foram aderidas ao porta-amostra por meio de um adesivo condutor de carbono e recobertas com ouro a fim de melhorar a resolução topográfica da imagem.

A Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) foi utilizada a fim de complementar o estudo de caracterização microscópica dos materiais. Esta técnica permite obter informações de composição química em pontos específicos da amostra.

4.4.8 COMPACIDADE

Um dos parâmetros de entrada na dosagem científica de concretos utilizando o Método de Empacotamento Compressível (MEC) é a compacidade experimental dos materiais. Deste modo, foi determinada a compacidade do cimento Portland CP V ARI pelo ensaio de demanda d'água e a compacidade dos agregados naturais e dos FRC-150 foi determinada pelo ensaio de compactação mecânica e vibração (DE LARRARD, 1999).

4.4.8.1 Demanda d'água

O procedimento de ensaio de demanda d'água foi desenvolvido por De Larrard (1999) e consiste em quantificar a água que é progressivamente adicionada ao material seco até que este apresente o máximo de empacotamento de suas partículas. Durante o ensaio é possível observar quatro fases: (i) estado seco, caracterizado pelo alto teor de vazios do material; (ii) estado pendular, ocorre com o aumento da quantidade de água

no sistema, onde o material passa a apresentar pequenas pontes líquidas entre os seus grãos e a tensão superficial da água tende a unir os grãos; (iii) estado funicular, o qual acontece quando todos os grãos do material se encontram molhados por água, mas ainda há presença de bolhas no interior da mistura; e (iv) estado capilar, caracterizado por uma pasta homogênea e sem umidade na parede do misturador e é considerado como o ponto de empacotamento máximo de partículas (ponto de demanda d'água). Após o estado capilar, qualquer adição de água provoca o afastamento das partículas, reduzindo assim a compacidade do material (MIRANDA, 2008).

Neste ensaio, adotou-se o mesmo procedimento de Cordeiro (2006), utilizando um misturador planetário de 2 litros de capacidade, onde foram inseridas 350 g de cimento Portland CP V ARI e foi adicionada uma pequena quantidade de água inicial com o misturador na velocidade baixa. Em seguida, foram adicionadas novas quantidades de água e desta vez em velocidade alta até que se observasse o estado capilar. O tempo médio de ensaio foi de 10 minutos. Segundo Cordeiro (2006), no ponto de demanda d'água é possível observar três partes separadas e bem definidas do material homogêneo (Figura 4.10).

A compacidade experimental do ensaio de demanda d'água é calculado segundo a Equação 4.1 descrita a seguir.

$$C = \frac{1}{1 + \delta \times \frac{ma}{m}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

C : compacidade experimental;

δ : massa específica do material (g/cm^3);

ma : massa de água (g);

m : massa de material igual a 350 g.



Figura 4.10 – Ponto de demanda d'água

4.4.8.2 Compactação mecânica e vibração

Segundo Amario (2015), a determinação da compacidade dos materiais que apresentam partículas maiores que 100 μm é feita por meio do ensaio de compactação mecânica e vibração.

Este ensaio é descrito por De Larrard (1999). Ele utiliza um volume padrão de material que é despejado em um cilindro metálico, de 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, e este é preso a uma mesa vibratória, com frequência de 68 Hz, onde é aplicada uma pressão de 10 kPa através de um pistão maciço de peso equivalente de 200 N. Após o posicionamento do pistão, registra-se a altura do conjunto com auxílio do catetômetro. Em seguida, a mesa vibratória é acionada durante de 2 minutos. Após a vibração, é feita a releitura do conjunto agora compactado. Utilizou-se 3 kg de FRC-150, 3 kg de agregados miúdos e 6,5 kg de agregados graúdos. As etapas deste ensaio são ilustradas na Figura 4.11.

Vale ressaltar que os agregados miúdo e graúdo foram subdivididos em classes de modo a se obter um resultado mais preciso da compacidade (AMARIO, 2015; RANGEL, 2015; SILVA, 2017). Foi adotada a mesma subdivisão de classes proposta por Amario (2015). O agregado graúdo foi dividido em classe 1 (correspondente aos grãos maiores que 7,93 mm; classe 2 (para grãos entre 6,30 e 7,93 mm) e classe 3

(partículas menores que 6,30 mm). O agregado miúdo foi dividido em classe 1 (grãos maiores que 2,36 mm); classe 2 (correspondente às partículas de dimensões entre 1,18 e 2,36 mm); classe 3 (grãos menores que 1,18 mm). Os FRC-150 não foram subdivididos, visto que estes já apresentavam uma granulometria muito pequena.



(a)



(b)

Figura 4.11 – Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração. (a) posição do pistão antes da vibração; (b) posição do pistão após vibração

A compacidade experimental é calculada pela Equação 4.2.

$$C = \frac{4 \times Ms}{\pi \times Dc^2 \times h \times \delta} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

C : compacidade experimental;

Ms : massa de material seco (kg);

Dc : diâmetro interno do cilindro (cm);

h : altura da camada de material compactada ao final do ensaio (cm);

δ : massa específica do material (kg/m^3)

4.4.9 COMPATIBILIDADE E O PONTO DE SATURAÇÃO DO SUPERPLASTIFICANTE

A compatibilidade e o ponto de saturação do superplastificante também são dados de entrada no *software Betonlab Pro 3*. Estes parâmetros foram determinados pelo ensaio de escoamento de pastas em cone de Marsh de acordo com os procedimentos de De Larrard (1999). O ensaio consiste em produzir 1000 ml de pasta de cimento e água, variando os teores de sólidos de superplastificante em relação à massa de cimento e medindo o tempo de escoamento quando esta é vertida em um funil com abertura de 5 mm de diâmetro. As etapas do ensaio são apresentadas na Figura 4.12.

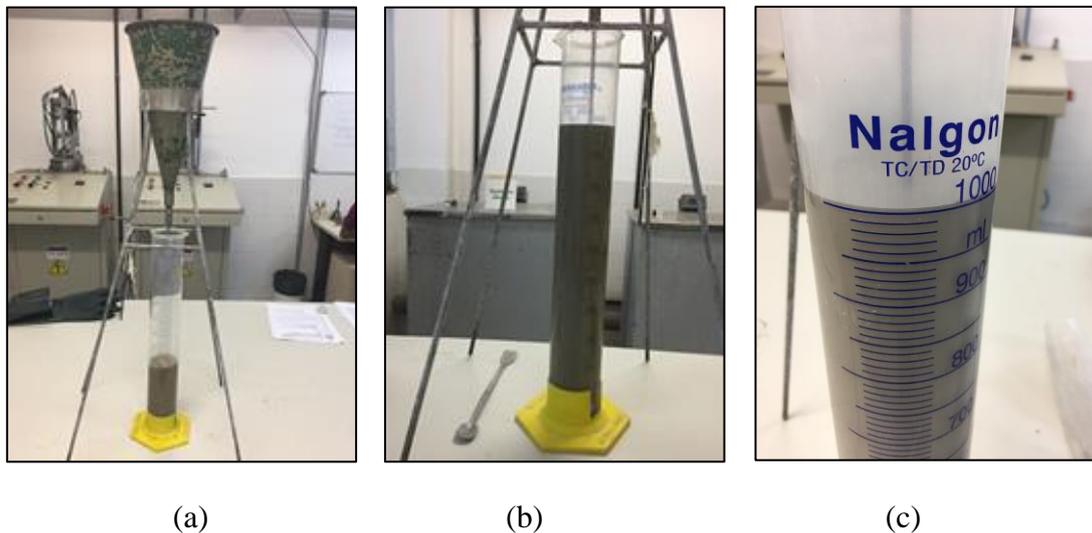


Figura 4.12 – Ensaio de compatibilidade e ponto de saturação do superplastificante: (a) passagem da pasta pelo funil; (b) e (c) instante em que 1000 ml de pasta passam pelo funil

Esse ensaio corresponde ao máximo grau de dispersão das partículas de cimento provocado pelo aditivo superplastificante. Qualquer adição do teor de aditivo acima deste valor não influenciará significativamente na dispersão das partículas do material (AMARIO, 2015). O ponto de saturação é expresso como o percentual da fração sólida de aditivo químico em relação à massa total de cimento.

4.5 PASTAS CIMENTÍCIAS – DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

A primeira parte deste estudo foi realizado em pastas cimentícias, de modo a verificar a incorporação dos FRC como materiais cimentícios em um sistema puro. Desta maneira, foram produzidas 17 misturas substituindo parcialmente o cimento Portland CP V ARI pelos FRC. A pasta produzida apenas com cimento e água recebeu o nome de P_REF. As demais pastas adotaram a seguinte nomenclatura P_“Y”_“X”, onde “Y” e “X” representam os materiais utilizados na substituição do cimento Portland CP V ARI de acordo com a sua granulometria e a porcentagem de substituição, respectivamente. Deste modo, Y pode ser LAB-150, D-150, C-150, S-150, LAB-100, D-100, C-100 ou S-100, e X pode ser 5, 10 ou 15. A escolha destes teores baseou-se nos estudos apresentados por diversos autores (conforme apresentado no item 2.3.2). As pastas com FRC-150 e S-150 foram produzidas para todas as porcentagens, enquanto que pastas com FRC-100 e S-100 foram utilizados apenas 5% de substituição em massa.

Antes de se iniciar a dosagem das pastas, um estudo preliminar foi realizado para definir a trabalhabilidade das misturas das pastas de referência (contendo somente cimento e água) e pastas com FRC-150. Nesta etapa, foram executados ensaios de espalhamento com mini-tronco de cone, a fim de se definir o fator água/materiais sólidos utilizado, sendo os materiais sólidos considerados como a soma da quantidade de cimento Portland CP V ARI e dos FRC-150 da mistura. O ensaio utiliza um pequeno molde tronco-cônico de 60 mm de altura e diâmetro interno superior de 20 mm e inferior de 40 mm, o qual deve ser preenchido com a pasta, e ele é removido de baixo para cima, verificando a abertura diametral da pasta, conforme a Figura 4.13.

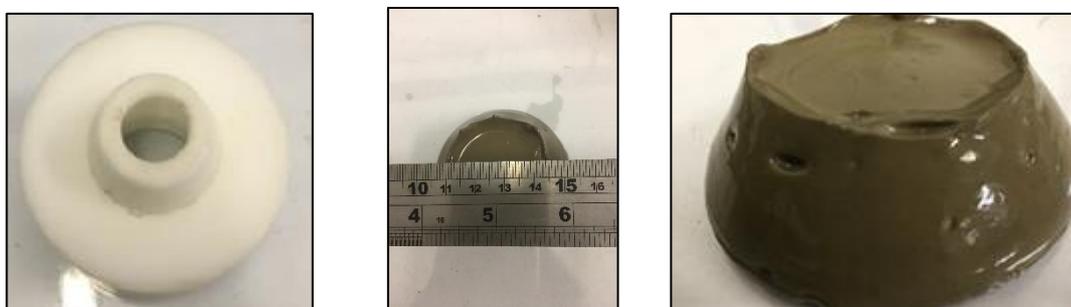


Figura 4.13 – Ensaio de mini-espalhamento para medir o índice de consistência das pastas. (a) Detalhe do mini tronco de cone (b) medição do espalhamento; (c) aspecto da pasta de cimento

Inicialmente, adotou-se o fator água/materiais sólidos médio de 0,40, de modo a garantir que todas as misturas apresentassem boa trabalhabilidade para a moldagem dos corpos-de-prova. Este fator água/materiais sólidos inicial foi definido com base no fator adotado por Grabois (2016).

No ensaio de mini-espalhamento, utilizou-se o misturador Chandler de 1l de capacidade para produzir 300 ml de pasta. O método de preparo de pastas foi adaptada de Cordeiro (2006) seguindo as etapas descritas a seguir: (i) mistura da água com os materiais sólidos em velocidade baixa [(1000 ± 50) rpm] durante 2,5 minutos; (ii) parada de 1 minuto (iii) mistura em velocidade alta [(3000 ± 50) rpm] durante mais 2,5 minutos. O cimento Portland CP V ARI e FRC-150 foram pesados em recipientes isolados, sendo homogeneizados num mesmo recipiente antes de serem adicionados à mistura. Eles foram colocados no misturador com ajuda de um funil durante os 30 segundos iniciais.

Adotou-se o índice de consistência 55±10 mm, referente a pasta P_REF, como parâmetro de controle para a preparação das outras pastas. A composição das pastas é apresentada na Tabela 4.3. Observa-se que para a substituição parcial de 5%, independente da granulometria do material substituto, a composição é a mesma.

Posteriormente também foram realizados ensaios de mini espalhamento para as misturas com FRC-100, S-150 e S-100, afim de verificar e garantir o índice de consistência semelhante com a pasta de referência e com FRC-150 e S-150.

A energia de mistura utilizada no ensaio de mini espalhamento foi calculada em função da rotação e do tempo de mistura de cada rotação, segundo a Equação 4.3, desenvolvida por VORKINN e SANDERS (1993). A energia de mistura encontrada foi de 3,34 kJ/kg.

$$\frac{E}{M} = \frac{k}{V} \cdot \sum \left[\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot rpm}{60} \right)^2 \cdot t \right] \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde:

E – Energia de mistura, em quilojoules (kJ);

M – Massa da pasta, em quilogramas (kg);

k – Constante determinada experimentalmente, que é igual a $6,1 \times 10^{-8}$;

V – Volume de pasta, em litros (l);

t – Tempo de mistura, em segundos (s).

Tabela 4.3 – Consumo de materiais para a produção de 1m^3 de pasta e seu respectivo índice de consistência

Pasta	Cimento CP V ARI (kg/m ³)	Material de substituição (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Fator água/materiais sólidos
P_REF	1398	-	559	0,40
P_LAB-150_5	1321	70	556	0,40
P_LAB-150_10	1245	138	553	0,40
P_LAB-150_15	1170	206	551	0,40
P_LAB-100_5	1321	70	556	0,40
P_D-150_5	1321	70	557	0,40
P_D-150_10	1247	139	554	0,40
P_D-150_15	1172	207	552	0,40
P_D-100_5	1321	70	557	0,40
P_C-150_5	1320	69	556	0,40
P_C-150_10	1243	138	552	0,40
P_C-150_15	1167	206	549	0,40
P_C-100_5	1320	69	556	0,40
P_S-150_5	1322	70	557	0,40
P_S-150_10	1247	139	554	0,40
P_S-150_15	1173	207	552	0,40
P_S-100_5	1322	70	557	0,40

Neste estudo, as pastas foram produzidas de modo a garantir a mesma energia de mistura. Deste modo, a Equação 4.3 foi usada para calcular novas velocidades e novos tempos de mistura de acordo com o volume produzido. Diferentes misturadores de paleta com rotação foram utilizados de acordo com o volume desejado. Para as misturas de volume inferior a 600ml foi utilizado o misturador modelo 3060 Chandler, de capacidade de 1 litro e, quando necessário um volume maior, o modelo utilizado foi o 3070 Chandler, de capacidade de 4 litros. Todas estas dosagens foram realizadas em sala climatizada a $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Para determinação de propriedades no estado endurecido, foram moldados corpos-de-prova cilíndrico de 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura, utilizando-se moldes de PVC (Figura 4.14). Ver-teu-se a mistura nos moldes em uma única camada e utilizou-se um bastão metálico para ajudar a retirar as bolhas de ar formadas. Também se fez o adensamento das misturas manualmente, batendo o molde levemente contra a bancada. A cura das pastas foi feita em câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas até o desmolde ou até a idade de ensaio.



Figura 4.14 – Moldagem dos corpos-de-prova

4.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS

4.6.1 REOLOGIA

As propriedades reológicas (viscosidade e limite de escoamento) foram determinadas pelo mini espalhamento de tronco de cone e *Vane Test*. Utilizou-se o reômetro Brookfield modelo DV-III Ultra e uma palheta de geometria em forma de cruz (vane spindle), denominada V-72 (Figura 4.15). Conforme o manual do equipamento, o tipo de palheta é definido de modo a garantir que o torque máximo gerado pela resistência da mistura seja entre 10 e 100% e somente valores nesta faixa são considerados como resultados confiáveis. Estes testes foram realizados para as misturas P_REF e todas as pastas contendo FRC-150.



Figura 4.15 – Equipamento Brookfield modelo DV-III Ultra

Produziram-se 400 ml de pasta, conforme descrito no Item 4.5, adaptando o tempo e a velocidade de mistura de modo a conservar a energia de mistura. Em seguida, as pastas foram homogeneizadas durante 20 minutos no consistômetro atmosférico a 27 °C. Aferiu-se a temperatura das pastas antes de se iniciar o ensaio, de modo a garantir que ela estivesse a 27 ± 1 °C. Esta temperatura foi adotada, visto que ela é a mesma temperatura utilizada no ensaio de calorimetria isotérmica e no ensaio de cinética da hidratação por pulso ultrassônico, permitindo a comparar os efeitos da fluidez da pasta à medida que ocorre a reação de hidratação.

Após o preparo da pasta, esta foi vertida em um bécker de 6,5 cm de diâmetro e 8 cm de altura. Adensou-se a mistura manualmente em duas camadas, batendo levemente o bécker na bancada, de modo a obter total uniformização da superfície. Preenchido o bécker, este foi posicionado na base metálica do equipamento e abaixou-se a palheta até que o nível da amostra correspondesse à marca indicada na parte superior da palheta. Após estes procedimentos, iniciou-se o ensaio. O teste de escoamento foi realizado com a palheta V-72 a uma velocidade de 0,1 rpm, obtendo pontos a cada 5 segundos.

Este método consiste basicamente em submeter a pasta a uma taxa de cisalhamento baixa e constante com de velocidade de 0,1 rpm até ela começar a fluir. Antes de a pasta fluir, ela possui um comportamento linear, ou seja, caso interrompesse a tensão de cisalhamento, a amostra deixaria de apresentar deformação. Com o passar do tempo, a amostra começa a apresentar um comportamento plástico, e a deformação deixa de ser irreversível.

Alguns autores definem este ponto de transição do comportamento elástico para o comportamento plástico de limite de escoamento. Entretanto, é importante ressaltar que na literatura há divergências quanto esta definição. Segundo Barnes e Nguyen (2011), há autores que interpretam o limite de escoamento não como o final do trecho elástico, mas como o valor máximo da tensão de cisalhamento; e ainda existem aqueles que acreditam que o limite de escoamento é dado pela tensão de equilíbrio observada ao final da região de escoamento do fluido.

A Figura 4.16 mostra os diferentes conceitos de limite de escoamento na curva típica de tensão de cisalhamento *versus* tempo para fluidos não-newtonianos, submetidos a uma taxa de deformação constante.

Na literatura, contudo, o conceito mais usual de limite de escoamento para materiais cimentícios é o que o define como a tensão máxima de cisalhamento (BAUER *et al.*, 2007; MAHAUT *et al.*, 2008; SOUSA, 2005). Este foi o conceito adotado neste estudo.

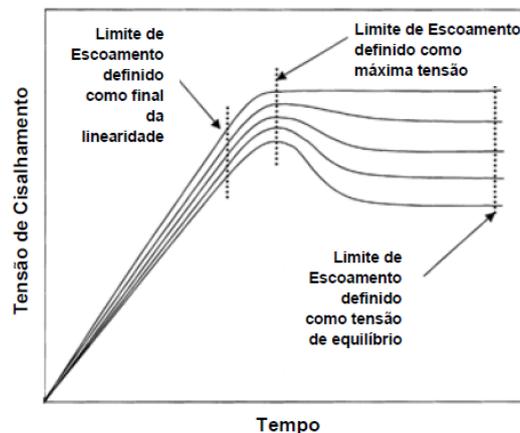


Figura 4.16 – Curva típica tensão de cisalhamento *versus* tempo. Fonte: adaptado de BARNES e NGUYEN, 2001

O limite de escoamento é calculado assumindo-se que a superfície cisalhada pela palheta é a de um cilindro de diâmetro igual à da palheta e que a tensão é uniformemente distribuída em toda esta superfície (NGUYEN e BOGER, 1985). Para o cálculo da taxa de deformação e da tensão de cisalhamento foram utilizadas as Equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$\gamma = \frac{2 \omega R_c^2 R_b^2}{\chi^2 [R_c^2 - R_b^2]} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$\tau = \frac{TK \times YMC \times T}{10} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \Omega \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Onde:

γ : taxa de deformação (s^{-1});

R_c : raio do bécker que contém a amostra (cm);

R_b : raio da palheta (cm)

χ : raio em que a superfície de cisalhamento ocorre, que, para palheta em cruz é igual a R_b (cm);

ω : velocidade angular da palheta (rad/s)

Ω : velocidade de palheta em rpm;

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

TK: constante relacionada com o modelo do reômetro que dada pelo manual do equipamento. Para o modelo HBDV-III Ultra a TK é de 8;

YMC: constante relacionada com as dimensões da palheta, dada pelo manual do equipamento;

T: valor do torque médio medido pelo equipamento (%).

Segundo o manual do fabricante, a palheta utilizada, V-72, possui comprimento de 4,333 cm, 2,167 cm de diâmetro e a constante 'YMC' igual a 2,0.

4.6.2 ESTUDO DA HIDRATAÇÃO DAS PASTAS

4.6.2.1 Calorimetria isotérmica

O ensaio de calorimetria isotérmica foi realizado para medir a taxa de evolução de calor na hidratação das pastas e o seu calor total liberado durante a hidratação. Utilizou-se um calorímetro de condução isotérmico TAM Air de 8 canais independentes (TA Instruments), com precisão de 20 μ W e uma ampola referência com 2,5 g de água deionizada. Neste estudo foram analisadas todas as pastas produzidas.

Uma amostra de aproximadamente 20 ml de pasta foi produzida em um béquer com o auxílio de um bastão de vidro, sendo mexida durante 1 minuto. Com o auxílio de uma seringa, aproximadamente 5 g de pasta foi inserida dentro de uma ampola de vidro. Esta ampola foi selada e colocada dentro do calorímetro a 27 ± 2 °C. Todos estes procedimentos foram cronometrados após o contato da água com o cimento, sendo considerado um tempo máximo de 3 minutos para a preparação da mistura. A duração mínima dos testes foi de 163 horas (aproximadamente 7 dias).

As reações de hidratação do cimento são consideradas exotérmicas e termotativas, visto que liberam calor e são aceleradas pela liberação do mesmo. O ensaio de calorimetria de condução isotérmica permite que a taxa de hidratação do cimento seja monitorada a partir da quantidade de calor liberado na reação, quantificando diretamente o fluxo de calor presente na pasta, mas mantendo o meio externo e a pasta em condições isotérmicas, para que não ocorra a aceleração nas reações químicas provocadas pelo calor liberado (QUARCIONI, 2008).

A Figura 4.17 apresenta uma curva típica de evolução de calor obtida por meio de testes de calorimetria isotérmica de uma pasta de cimento. Conforme descrito no item 3.1, ODLER (1998) caracteriza o processo de hidratação em quatro principais estágios: período de pré-indução (1); período de indução (2); período de aceleração (3); e período de desaceleração (4). Neste estudo, como as amostras foram confeccionadas fora do calorímetro, não foi possível registrar por completo ou com precisão a etapa de pré-indução e, por isto, ela não foi analisada.

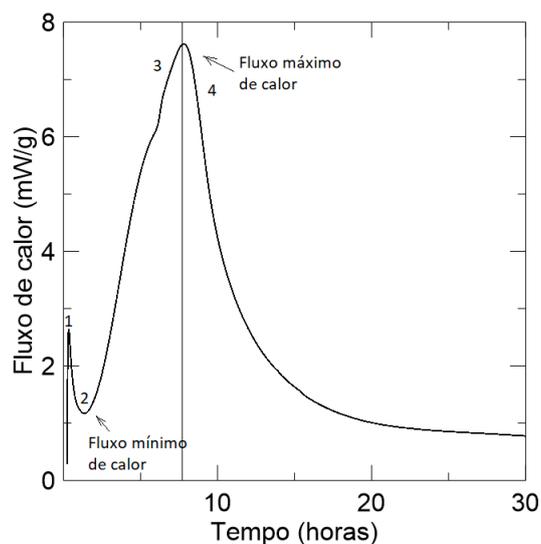


Figura 4.17 – Interpretação do fluxo de calor durante a hidratação de pasta de referência

4.6.2.2 Cinética da hidratação por pulso ultrassônico

O método de medição de pulso ultrassônico foi realizado para a determinação da cinética de hidratação de pastas e do patamar de percolação. Utilizou-se o equipamento *Ultrasonic Cement Analyser* (UCA) (Figura 4.18), da marca Chandler Engineering, modelo 4262 do Laboratório de Estruturas e Materiais (LabEst) da COPPE/UFRJ (Figura 4.20). Este ensaio foi realizado para as pastas P_REF e todas aquelas com FRC-150.



Figura 4.18 – Equipamento UCA

Preparou-se 300 ml de pasta conforme descrito no Item 4.5, adaptando o tempo e velocidade de mistura, conservando a energia de mistura. Em seguida, as pastas foram

homogeneizadas durante 20 minutos no consistômetro atmosférico a 27 °C e, com o uso de um bastão de vidro, retirou-se as bolhas de ar presentes na mistura. Posteriormente, a pasta foi vertida na célula do equipamento. Os ensaios ocorreram a 27 °C e a pressão atmosférica, entretanto, inicialmente foi necessário aplicar uma pequena pressão para começar a aquisição dos dados. A duração do ensaio foi de aproximadamente 163 horas (7 dias).

O equipamento UCA possui transdutores capazes de emitir pulsos ultrassônicos e de medir o tempo transiente, que é o inverso da velocidade ultrassônica dos pulsos no meio. Deste modo, ele permite o acompanhamento contínuo da velocidade da onda ultrassônica e da temperatura da amostra com o tempo, fornecendo ao final do ensaio a curva de velocidade de pulso ultrassônico *versus* tempo.

A velocidade do pulso ultrassônico varia de acordo com as mudanças das propriedades da mistura, desde o estado fluido até o endurecimento da pasta, devido a reação de hidratação do cimento. Com o decorrer desta reação, os produtos hidratados são formados e se depositam nas superfícies das partículas de cimento e nos poros. À medida que esta reação é intensificada, estes produtos se conectam formando um esqueleto sólido poroso, o qual possui características físico-químicas bem diferentes do estado fluido inicial. A transição do material em fase fluida para fase sólida é definida como patamar de percolação (VITORINO, 2012).

A Figura 4.19 apresenta uma curva típica de propagação da velocidade do pulso ultrassônico em uma pasta de cimento. Percebe-se que existem três estágios da hidratação identificados como: período I, período II e período III.

No período I, a mistura (fluida) apresenta somente suspensão de partículas que são consideradas uniformemente dispersas. A velocidade é constante e é em torno de 1490 m/s, que é a mesma velocidade do som na água. Com o decorrer do tempo, a temperatura do meio vai aumentando devido a reação hidratação ser exotérmica, o que faz com que a velocidade do pulso aumente rapidamente. O período II é caracterizado pela aceleração dos produtos de hidratação formados que, à medida que se conectam, transformam a pasta do estado fluido em estado sólido. No período III, o processo de hidratação chega na etapa de difusão controlada e agora a mistura passa a apresentar um alto grau de hidratação, sendo sua velocidade desacelerada, atingindo praticamente um

platô. Os pontos A e B representam o patamar de percolação e o patamar de estabilização, respectivamente.

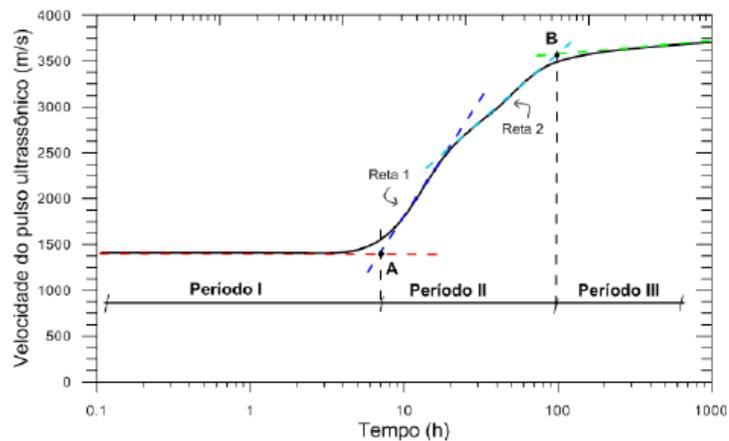


Figura 4.19 – Curva típica do ensaio de UCA. Fonte: Rocha (2015)

Para determinar o patamar de percolação e o patamar de estabilização das reações de hidratação adotou-se o mesmo procedimento de ROCHA (2015), calculando as intersecções das retas traçadas nos trechos lineares (ponto A e B) das curvas de velocidade do pulso ultrassônico x log do tempo.

A Figura 4.20 apresenta a curva típica de evolução da velocidade de propagação do pulso ultrassônico em relação ao tempo da pasta de referência estudada indicando os períodos I e II, o ponto de patamar de percolação, bem como as duas retas (Reta 1 e 2) usadas para o cálculo dos seus coeficientes durante o período II. Percebe-se que as curvas apresentam os períodos de hidratação I e II bem definidos. O período III não pode ser observado, visto que não houve estabilização da curva após a máxima velocidade do pulso ultrassônico.

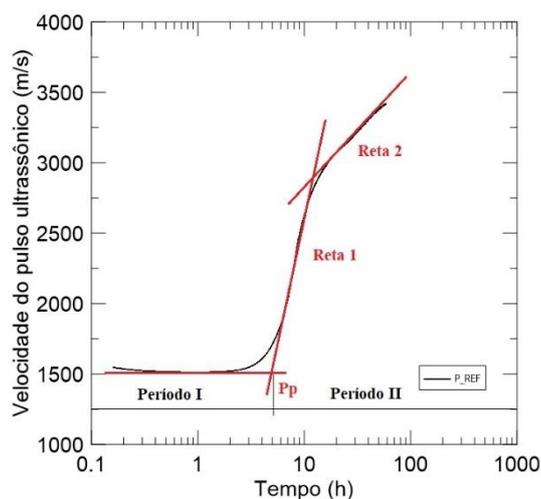


Figura 4.20 – Análise da curva típica da velocidade do pulso ultrassônica para a P_REF

4.6.2.3 Análise termogravimétrica

Após os ensaios mecânicos, que serão descritos mais adiante nesta pesquisa, foram coletadas pequenas amostras fraturadas da parte central dos corpos-de-prova rompidos. Em seguida, estas amostras tiveram sua hidratação interrompida, sendo submersas em álcool isopropílico (P.A.) durante três dias. Posteriormente, elas foram mantidas em estufas a 40 ± 10 °C por mais três dias, e em seguida embaladas a vácuo, sendo mantidas em dessecador até o dia da realização do ensaio. Todos estes procedimentos também foram realizados para os ensaios de DRX e MEV e porosimetria por intrusão de mercúrio nas pastas, descritos mais adiante. Segundo Zhang e Scherer (2011), o álcool isopropílico é o solvente mais eficiente para se interromper a hidratação de pastas cimentícias.

Para o ensaio de análise térmica, as amostras foram moídas até a pulverização das mesmas, utilizando almofariz e pistilo. As análises termogravimétricas das pastas P_REF e todas aquelas com 5% de substituição foram realizadas para as idades de 1 e 28 dias.

Utilizou-se o equipamento SDT Q600 TA Instruments no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. As etapas e condições experimentais foram as mesmas utilizadas para a análise térmica dos FRC: (i) primeiramente fez-se uma rampa de aquecimento até 35 °C para retirar a água livre presente nos materiais e esta foi mantida a temperatura constante por 60 minutos; (ii)

depois as amostras foram aquecidas com taxa de aquecimento constante de 10 °C/min até 1000 °C. Também utilizou-se nitrogênio como gás de arraste, com vazão de 100 mL/min e as massas de cada amostra eram de aproximadamente 10 mg, as quais foram inseridas no cadinho aberto de platina.

A Figura 4.21 apresenta o gráfico típico da análise termogravimétrica de uma pasta de cimento CP V ARI aos 28 dias. Este gráfico apresenta as curvas de perda de massa (TGA), com três perdas significativas, que dão origem aos três picos observados na derivada da perda de massa (DTG).

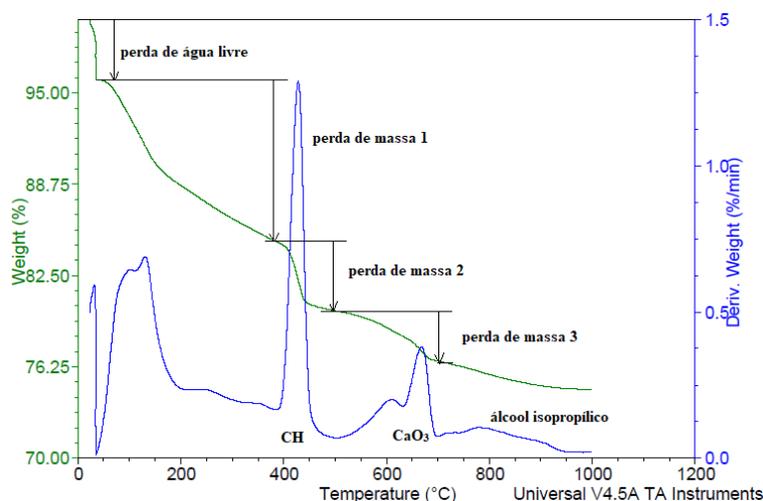


Figura 4.21 – Gráfico típico da análise termogravimétrica de uma pasta de cimento Portland CP V ARI

A primeira perda de massa na curva TGA é referente à desidratação da etringita (AFt), do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de outros produtos hidratados. As desidratações ocorrem nas mesmas faixas de temperaturas e, desta maneira, as curvas se sobrepõem, não sendo possível identificar exatamente o pico máximo de cada composto e nem quantificá-los separadamente (ROCHA, 2015). A segunda perda de massa significativa ocorre a 400°C aproximadamente e corresponde à desidratação da portlandita (CH), cujo pico máximo na DTG ocorre por volta de 435°C. A terceira perda significativa de massa acontece por volta de 500°C e indica à descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO₃) (TAYLOR, 1997). Pela DTG nota-se que existe sobreposição de dois picos referentes a descarbonatação do CaCO₃. Isto se deve provavelmente ao fato de que existem duas fases cristalinas diferentes deste composto. O último pico da DTG é referente à desidratação do álcool isopropílico, mas este pico

não será analisado, visto que este composto foi utilizado somente para interromper a hidratação das pastas.

Utilizou-se o *software TA Instruments Universal Analysis 2000 Version 4.7* para quantificar os produtos presentes nas pastas produzidas. DWECK *et al.*, (2009) afirma que é necessário que as análises térmicas de amostras sejam feitas em base de comparação de massa para se evitar resultados errados do conteúdo de componentes iniciais dos dados das curvas de análise térmica. Desta maneira, os dados das curvas termogravimétricas foram transformados em base de massa inicial de cimento, ou seja, com base na massa de cimento inicial presente nas amostras.

Primeiramente, os dados das curvas termogravimétricas foram transformados em sua própria base calcinada, ou seja, todas as perdas de massa foram divididas pela massa calcinada da amostra, correspondente à temperatura de 1000 °C (Equação 4.7). E em seguida, os dados foram transformados em base de calcinação de cimento (Equação 4.8) e finalmente calculados em base de massa inicial do cimento (Equação 4.9).

$$Mc1 = \frac{\%M \times 100\%}{M_{1000}} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$Mc2 = \frac{Mc1 \times 100}{M_{mat\ c}} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$Mc3 = \frac{M_{cim\ c} \times Mc2}{100} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Onde:

Mc1: massa em base calcinada;

%M: porcentagem de perda de massa em relação à massa inicial da amostra;

M₁₀₀₀: porcentagem de perda de massa a 1000°C.

Mc2: massa em base da massa de cimento calcinada;

%M_{mat c}: porcentagem de perda de massa de cada material (FRC-150, FRC-100, S-150 ou S-100) a 1000 °C obtidos no ensaio de análise térmica dos materiais anidros descritos em 4.4.5;

Mc3: massa em base à massa inicial de cimento;

$\%M_{\text{ciment}}c$: porcentagem de perda de massa de cimento a 1000 °C;

As equações correspondentes à desidratação da Portlandita e a descarbonatação do carbonato de cálcio e a relação estequiométrica de cada uma delas são descritas nas Equações 4.10 e 4.11, respectivamente.



$$100\% \rightarrow 75,68\% + 24,32\%$$



$$100\% \rightarrow 56,00\% + 44,00\%$$

4.6.3 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

A determinação da distribuição dos poros foi realizada no Laboratório da TU Darmstadt (Alemanha), de acordo com o procedimento descrito pela norma ISO 15901-1 (2016). Amostras cúbicas das pastas foram utilizadas, as quais apresentavam um volume de cerca de 1 cm³ e foram extraídas da região central de corpos-de-prova de 25 mm de diâmetro e 100 mm de altura aos 28 dias. Estas amostras foram submetidas ao mesmo processo de interrupção da hidratação e de armazenamento, conforme descrito no Item 4.6.2.3. Todas as pastas foram analisadas, com exceção da P_S-100_5%.

A porosimetria por intrusão de mercúrio é considerada uma das técnicas mais utilizadas na descrição quantitativa da distribuição dos poros de um sólido e é baseada na consideração de que um líquido com elevada tensão superficial, em relação a um sólido poroso, somente penetra no material sob pressão.

Taylor (1997); Beadoin e Marchand (2001) admitem que o poro capilar apresenta forma cilíndrica e que a pressão necessária para a entrada do líquido é dada pela Equação de Washburn, representada na Equação 4.12. Desta maneira, a porosidade e distribuição dos poros no material ensaiado são obtidas a partir do volume de mercúrio intrudido, da pressão externa aplicada e da Equação 4.12.

$$P = \frac{-4 \times \sigma_{Hg} \times \cos \theta}{d} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Onde:

P: pressão externa aplicada;

σ_{Hg} : tensão superficial do mercúrio (0,485 N/m);

θ : ângulo de contato (entre 117° e 141°);

d: diâmetro do poro.

Segundo Mindess *et al.* (2002), as faixas de tamanho de poros podem ser divididas e correlacionadas com algumas propriedades do material ensaiado (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Classificação do tamanho de poros de uma pasta de cimento hidratada e suas propriedades afetadas. Fonte: adaptado de Mindess *et al.* (2002)

Tipo de poros	Diâmetro do poro	Descrição	Propriedades afetadas
Fases hidratadas (poros de gel)	<0,5 nm	Microporos interlamelares	Retração e fluência
	0,5 – 2,5 nm	Microporos	Retração e fluência
	2,5 – 10 nm	Capilares pequenos (gel)	Retração em umidade relativa de 50%
Poros capilares	10 – 50 nm	Capilares médios (mesoporos)	Resistência mecânica, permeabilidade, fluência e retração em alta umidade relativa
	50 – 10000 nm (10 μ m)	Capilares grandes (macroporos)	Resistência mecânica e permeabilidade
Ar incorporado	> 100 μ m		Resistência mecânica

A Figura 4.22 apresenta duas curvas típicas obtidas a partir do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio: da porosidade *versus* o diâmetro e a do volume de mercúrio introduzido *versus* o diâmetro. É possível observar que outros dois parâmetros determinados pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio são o

diâmetro crítico (d_{cr}) e o diâmetro limite (também chamado de *threshold*, d_l). O diâmetro crítico corresponde ao diâmetro máximo do poro conectável e ele é responsável pelo transporte dos fluidos no material poroso. O diâmetro limite é o diâmetro mínimo no qual houve o início da intrusão contínua de mercúrio e há um aumento repentino no volume de mercúrio introduzido (ALIGIZAKI, 2006). O diâmetro crítico é obtido pelo pico máximo da curva de mercúrio acumulado, enquanto que o diâmetro limite é obtido pelo ponto de inflexão da curva de mercúrio acumulado, por meio da intersecção de retas ajustadas aos trechos lineares nesta região.

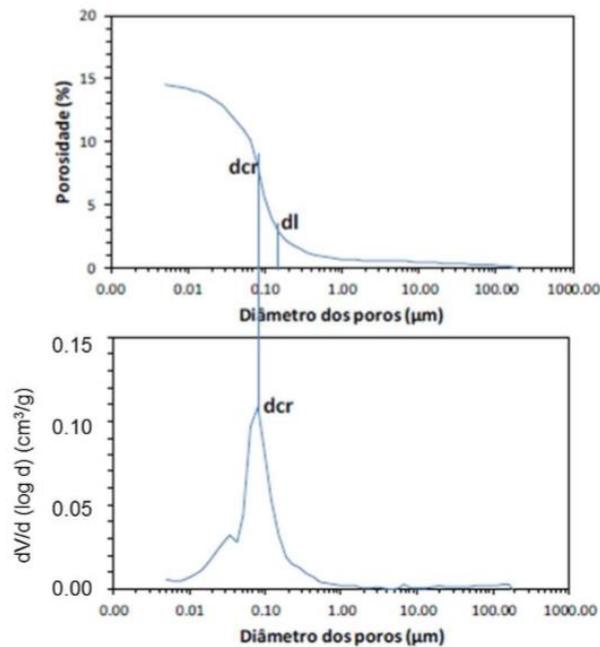


Figura 4.22 – Curvas tradicionais de porosimetria por intrusão de mercúrio. Fonte: adaptado ALIGIZAKI, 2002

4.6.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Para a determinação das propriedades no estado endurecido, foram realizados ensaios de compressão uniaxial e tração por compressão diametral. Os corpos-de-prova moldados eram cilíndricos e possuíam 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e mantidos em câmara úmida até o a realização do ensaio.

4.6.4.1 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão axial das pastas foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. As resistências à compressão foram avaliadas para as idades de 1, 7, 28 e 63 dias, sendo que para cada idade foram ensaiados 4 corpos-de-prova por mistura. Utilizou-se a prensa mecânica Shimadzu, modelo UH-F100 kN (Figura 4.23), e os ensaios foram realizados com base nas prescrições da ABNT NBR 7215 (1997). Aplicou-se o carregamento do ensaio de forma contínua a uma velocidade de 0,1 mm/min, a qual foi mantida constante. Além da carga de ruptura, o comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com o uso de transdutores elétricos (LVDT) para a medição dos deslocamentos longitudinais, conectados à região central dos corpos-de-prova. Os sinais de força e deslocamento foram registrados pelo sistema de aquisição de dados “ADS2000”, de 16 bits, da marca Lynx, com o auxílio do *software* AQ dados.



(a)



(b)

Figura 4.23 – (a) detalhe do porta-amostra com corpo-de-prova encaixado; (b) posicionamento do porta-amostra com os LVDTs para o ensaio compressão axial

Previamente, no dia do ensaio, os corpos-de-prova foram retificados nas suas extremidades de topo e base, com auxílio de um torno mecânico, a fim de evitar a concentração de tensões nas faces e assim permitir uma transferência uniforme dos esforços compressivos.

A partir da curva de tensão *versus* deformação obtida pelo ensaio, calculou-se o módulo de elasticidade de acordo com a ASTM C469 (2002), por meio da Equação 4.13:

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\epsilon_{a2} - \epsilon_{a1})} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Onde:

E: módulo de elasticidade (GPa);

σ_2 : tensão correspondente a 40% da tensão máxima (MPa);

σ_1 : tensão correspondente à deformação ϵ_{a1} (MPa);

ϵ_{a1} : deformação axial igual a 8×10^{-5} mm/mm;

ϵ_{a1} : deformação axial correspondente à tensão σ_2 (mm/mm).

4.6.4.2 Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral das pastas foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. As idades avaliadas foram as mesmas descritas no Item 4.6.3 em corpos-de-prova cilindro de 25 mm de diâmetro por 25 mm de altura, cortados de corpos-de-prova de 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Ensaíram-se 5 corpos-de prova por mistura e idade. A prensa mecânica Shimadzu, modelo UH-F100 KN, foi utilizada e os ensaios foram realizados com base nas prescrições da ABNT NBR 7222 (2011). Aplicou-se o carregamento do ensaio de forma contínua a uma velocidade de 0,3 mm/min, a qual foi mantida constante durante todo o ensaio. (Figura 4.24).

O ensaio de tração por compressão diametral, proposto pelo pesquisador brasileiro Lobo Carneiro (ABNT NBR 7222, 2011), é uma alternativa ao ensaio de tração direta pela sua facilidade de execução. Este ensaio consiste em aplicar um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico (estado plano de deformação).

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação 4.14.

$$f_t = \frac{2P}{D\pi L} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Onde:

f_t : Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

P: Carga de ruptura do corpo-de-prova (N);

D: Diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L: Altura do corpo-de-prova (mm).



Figura 4.24 – Ensaio de compressão diametral

4.6.5 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

O ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica foi realizado de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 9778 (2009). Ensaíram-se três corpos-de-prova cilíndricos (25 mm de diâmetro e 55 mm de altura) para as misturas P_REF e para as misturas com substituição de 5%, aos 28 dias de idade. A temperatura de secagem dos corpos-de-prova foi adequada para 60 ± 5 °C de modo a não degradar nenhuma fase dos FRC e não danificar suas propriedades.

A absorção total, índice de vazios e massa específica foram calculados pelas Equações 4.15 a 4.17. Vale ressaltar que a absorção de água e o índice de vazios estão associados à ocupação de poros permeáveis, porém eles não levam em consideração a facilidade ou não desta ocupação (permeabilidade).

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4.15})$$

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4.16})$$

$$\rho_s = \frac{ms}{msat - mi} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Onde:

A: absorção total de água (%);

msat: massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

ms: massa da amostra seca em estufa (g);

Iv: índice de vazios (%);

mi: massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g);

ρ_s : massa específica seca (g/cm^3).

4.7 ESTUDO DE CASO – CONCRETOS CONTENDO FRC

Com o objetivo de verificar a real aplicação dos diferentes tipos de FRC-150, foram estudados dois tipos de caso:

- Caso I: concretos classe C25 com adição fixa dos três tipos diferentes FRC-150, de modo a avaliar a influência da origem de cada material;
- Caso II: concretos classe C30 produzidos com substituindo 25% da areia natural por areia reciclada contendo finos do RCD-LAB (A_LAB-F) e areia reciclada sem finos do RCD-LAB (A_LAB), de modo a avaliar a influência da presença dos LAB-150 na areia.

O estudo de um concreto com areia reciclada com finos é justificável para avaliar o efeito da presença deste pó na trabalhabilidade e comportamento mecânico dos concretos, além de verificar se é possível utilizar a areia reciclada sem prévia retirada dos finos sem que haja perda nestas propriedades. A não separação do AMRC com os FRC permite que se tenha menores gastos de tempo e energia no processo de beneficiamento de resíduos, contribuindo ainda mais para o meio ambiente, além de facilitar o uso do AMRC em larga escala. Optou-se em utilizar a areia com finos reciclados do tipo LAB, pois, como foi produzido no laboratório, o qual possui características bem conhecidas.

Foi feita uma dosagem científica destes concretos com auxílio do *software Betonlab Pro 3*, baseado no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) proposto por De Larrard (1999). Neste programa é possível obter a configuração de diferentes traços de concreto usando como dados de entrada algumas propriedades e características das matérias primas utilizadas no concreto. Além disso, o *software* também possibilita a otimização destas dosagens, permitindo que o usuário escolha, entre várias outras propriedades, a classe e a consistência de concreto desejado.

4.7.1 CALIBRAÇÃO DOS PARAMETROS “p” E “q”

O *software Betonlab Pro 3* exige como dado de entrada a calibração de dois parâmetros denominados “p” e “q”. O parâmetro “p” é relacionado à aderência da interface pasta-agregado, enquanto que o parâmetro “q” é inversamente proporcional à resistência intrínseca dos agregados. Estes parâmetros são determinados pelo próprio programa de acordo com os dados experimentais de entrada referentes à resistência à compressão de dois traços: traço rico (TR), de alta resistência; e traço pobre (TP), de baixa resistência. Como esta calibração leva em consideração os agregados de maior dimensão da mistura, foram produzidos argamassa e concreto para calibração dos parâmetros do agregado miúdo natural e do agregado graúdo natural, respectivamente. A composição de cada traço utilizado está apresentada na Tabela 4.5.

Para as argamassas, foram moldados 4 corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, enquanto que para os concretos foram moldados 4 corpos-de-prova de 7,5 cm de diâmetro por 15 cm de altura.

O ensaio de compressão axial foi realizado aos 1, 7 e 28 dias de idade, em prensa servocontrolada Shimadzu, modelo UH-F1000kN e velocidade de 0,3 mm/min. Antes do ensaio, as extremidades dos corpos-de-prova foram regularizadas com auxílio de um torno mecânico, de modo a se evitar a concentração de tensões nas faces dos corpos-de-prova.

Tabela 4.5 – Consumo de material para produção de traço rico (TR) e traço pobre (TP) em kg/m³ de mistura produzida.

Traço		Cimento (kg/m ³)	Areia natural (kg/m ³)	Areia A_LAB-F (kg/m ³)	Brita natural (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
Argamassa Natural	TR	600,00	1359,00	-	-	247,34	6,00
	TP	342,00	1558,00	-	-	248,41	3,42
Argamassa A_LAB	TR	600,00	-	1359,00	-	286,63	6,61
	TP	342,00	-	1558,00	-	289,66	3,42
Concreto Natural	TR	503,74	596,70	-	1021,21	201,95	3,21
	TP	254,64	815,59	-	1020,87	191,90	0,56

Os resultados de resistência à compressão para cada mistura são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão das misturas utilizadas para a calibração dos parâmetros "p" e "q".

Traço		Resistência à compressão (MPa)		
		1 dia	7 dias	28 dias
Argamassa Natural	TR	33,38	39,51	61,78
	TP	4,11	9,11	11,40
Argamassa A_LAB-F	TR	40,77	55,28	65,76
	TP	6,70	12,01	16,03
Concreto Natural	TR	26,97	43,34	58,63
	TP	7,52	21,19	24,48

Com base nesses resultados, os parâmetros "p" e "q" foram calibrados pelo programa *Bentolab Pro 3* para todos os agregados utilizados na pesquisa. Os valores calculados estão expostos na Tabela 4.7. Não foi calculado os parâmetros "p" e "q" da areia reciclada contendo finos (A_LAB-F) pois cada fração deste material foi dado de

entrada no *software* separadamente, de modo a entrar os parâmetros referente à areia reciclada A_LAB e finos reciclado LAB-150. Vale ressaltar que na dosagem não foi feita esta separação dos materiais, colocando a areia produzida diretamente da etapa de separação granulométrica realizada no CETEM.

A areia reciclada 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.

Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros "p" e "q" obtidos pelo *software Betonlab Pro 3*.

Mistura	“p”	“q”
Areia natural	1,1256	0,00164
Areia A_LAB	2,3509	0,02741
Brita 0	1,4048	0,00884

4.7.2 DOSAGEM, PRODUÇÃO E CURA DOS CONCRETOS

Para utilização do programa, é necessário pré-estabelecer algumas propriedades de modo a otimizar o traço. Escolheu-se fixar os valores de resistência à compressão aos 28 dias (25 ou 30 MPa, para caso I e II, respectivamente) e compacidade máxima dos grãos. Além disso, no caso I ainda foi definido que o consumo de FRC deveria ser igual a 20,0 kg/m³ e no caso II a quantidade de areia reciclada deveria ser entre 23 a 27% da quantidade total de agregados. Este intervalo percentual permitiu que o programa otimizasse melhor o traço do concreto reciclado para ter aproximadamente 25% de areia reciclada e 75% de areia natural.

Vale ressaltar que no caso I, os FRC-150 foram inseridos no programa como fíller silicoso sem reatividade. Já no caso II, os dados de características do LAB-150 entraram como uma areia fina. Na dosagem experimental utilizou-se a areia A_LAB-F como um todo, não separando os como A_LAB e LAB-150.

Em muitos estudos (AMARIO, 2015; RANGEL, 2015; VELASCO, 2008; POLISSENI *et al.*, 2017) mostraram que o abatimento determinado pelo programa era diferente do valor atingido experimentalmente. Desta maneira, optou-se por deixar este

parâmetro livre no programa, mas definiu-se que experimentalmente todas as misturas deveriam apresentar um abatimento igual a 100 ± 20 mm. Este valor do abatimento foi escolhido de modo a produzir concretos bombeado.

Inicialmente, o teor de superplastificante foi definido como o valor do ponto de saturação, ou seja, 0,4%. Entretanto, os primeiros concretos produzidos apresentaram abatimento fora da faixa determinada ou até mesmo não satisfatórios, com exsudação da água das misturas. Deste modo, o teor de superplastificante foi limitado, devendo ser entre 0,15 para o caso I e igual a 0,12 para o caso II.

No caso I foram produzidas três misturas: C25_LAB-150; C25_D-150; e C25_C-150, que são referentes aos concretos com utilização de finos LAB-150, D-150 e C-150, respectivamente. As dosagens finais utilizadas são descritas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Caso de estudo I: dosagens finais calculadas pelo *Betonlab Pro 3* em kg/m^3 de mistura produzida.

Traço	Cimento (kg/m^3)	FRC-150 (kg/m^3)	Areia natural (kg/m^3)	Brita natural (kg/m^3)	Água (kg/m^3)	Superplastificante (kg/m^3)
C25_LAB-150	279,5	20,0	860,7	945,5	203,1	1,33
C25_D-150	281,2	20,0	859,4	944,2	204,3	1,46
C25_C-150	285,8	20,0	854,5	938,8	206,9	1,36

A Tabela 4.9 apresenta o dos traços calculados. Nota-se que as compacidades de todos os concretos foram iguais.

No caso II foram produzidas duas misturas de concreto: C30_REF e C30_A_LAB-F. O concreto C30_REF é referente a uma mistura de referência, apenas com agregados naturais e sem presença de areia reciclada. Já o concreto C30_A_LAB-F é referente a mistura produzida com agregado graúdo natural, 75% de areia natural e 25 % de areia reciclada com finos reciclados tipo LAB-150.

As dosagens finais utilizadas na moldagem dos diferentes concretos são descritas na Tabela 4.10. A inclusão da areia reciclada no concreto diminuiu o consumo de cimento, provavelmente devido à presença dos FRC e a interface pasta-agregado é melhor, indicada pelo parâmetro “p” (ver Tabela 4.7).

Tabela 4.9 – Caso de estudo I: propriedades dos concretos calculados pelo *Betonlab Pro 3*.

Propriedades	C25_LAB-150	C25_D-150	C25_C-150
Brita 0 / agregados totais (%)	52	52	52
Areia natural / agregados totais (%)	48	48	48
Teor de argamassa (%)	55,1	55,3	55,1
Água efetiva (kg/m³)	188,2	189,4	192,1
Aef/c	0,67	0,66	0,68
SP (%)	0,15	0,15	0,16
Ar incorporado (%)	1,5	1,8	1,7
Massa específica (kg/m³)	2310	2310	2307
Abatimento <i>Betonlab</i> (mm)	95	107	116
fc,28 (MPa)	28	28	28
Compacidade dos grãos	0,7752	0,7752	0,7752

Tabela 4.10 – Caso de estudo II: dosagens finais calculadas pelo *Betonlab Pro 3* em kg/m³ de mistura produzida.

Traço	Cimento (kg/m ³)	A_LAB (kg/m ³)	A_LAB-F (kg/m ³)	Areia natural (kg/m ³)	Brita natural (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)
C30_REF	329,3	-	-	906,8	843,5	219,3	1,25
C30_A_LAB	324,5	197,3	-	696,4	842,1	223,3	1,24
C30_A_LAB-F	324,4	-	203,6	691,5	842,5	222,7	1,05

A Tabela 4.11 apresenta as propriedades calculadas pelo *software* *Betonlab Pro 3* para os traços utilizados. Percebe-se que quantidade de água livre possui uma mínima variação entre as misturas. A compacidade dos grãos foi melhor para o concreto com areia reciclada. Deste modo, espera-se que o concreto com 25% de substituição da areia natural pela reciclada com finos obtenha uma melhor resistência à compressão.

Em ambos os casos, os traços foram escolhidos devido à similaridade nos consumos de materiais e propriedades atingidas, de modo a ter uma comparação mais coerente das propriedades das misturas

Os concretos foram produzidos em sala climatizada a 21 °C ± 1 °C utilizando-se um misturador do tipo betoneira (Figura 4.30). Adotou-se o mesmo procedimento de mistura adotado Amario (2015), adaptando para os concretos com FRC, os quais foram homogeneizados juntos ao cimento. As etapas são descritas a seguir:

- a) Umedecer o misturador com água com um pano úmido;
- b) Misturar os agregados graúdo e miúdo por um minuto;
- c) Adicionar metade da água total da mistura aos agregados, misturando-os por mais um minuto;
- d) Adicionar cimento ou cimento com FRC-150 homogeneizados (no caso I) e misturar por mais um minuto;
- e) Adicionar o restante da água e o superplastificante, misturando-os por mais oito minutos.

Caso os materiais que não tiverem sido homogeneizados corretamente, raspar manualmente com o auxílio de uma colher de pedreiro e misturar novamente por mais 4 minutos.

Tabela 4.11 – Caso de estudo II: propriedades dos concretos calculados pelo *Betonlab Pro 3*.

Propriedades	C30_REF	C30_A_LAB	C30_A_LAB-F
Brita 0 / agregados totais (%)	48	48	48
Areia natural / agregados totais (%)	52	40	39,7
Areia A_LAB / agregados totais (%)	0	12	0
Areia A_LAB-F / agregados totais (%)	0	0	12,3
Teor de argamassa (%)	59,4	59,1	59,1
Água efetiva (kg/m³)	202,1	203,5	202,4
Aef/c	0,62	0,63	0,62
SP (%)	0,12	0,12	0,12
Ar incorporado (%)	1,5	1,9	2,0
Massa específica (kg/m³)	2300	2285	2286
Abatimento <i>Betonlab</i> (mm)	182	11,3	95
fc,28 (MPa)	30	30	30
Compacidade dos grãos	0,7573	0,7557	0,7736

Moldaram-se quatro corpos de prova por idade por mistura utilizando moldes 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura de acordo com a NBR 5738 (2016). Fez-se o adensamento das misturas em duas camadas com auxílio da mesa vibratória (68 Hz), com tempo de vibração de 15 segundos para cada camada (Figura 4.25).

Estes corpos-de-prova foram mantidos nos moldes durante 24 horas, com proteção contra a perda de umidade, sendo cobertos com panos úmidos e mantidos em laboratório com temperatura controlada. Após a desmoldagem, eles 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 de resistência à compressão axial.



Figura 4.25 – Adensamento dos corpos-de-prova em mesa vibratória

4.7.3 ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams (Figura 4.26) foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 67 (1998), de modo a garantir a mesma trabalhabilidade das misturas, a qual foi estimada na faixa de $100\text{ mm} \pm 20\text{ mm}$.



Figura 4.26 – Medição do abatimento de tronco de cone.

4.7.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIXAL

Os ensaios de resistência à compressão axial dos concretos foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. As resistências à compressão foram avaliadas para as idades de 1, 7 e 28 dias, sendo que para cada idade, foram ensaiados 4 corpos-de-prova por mistura. Utilizou-se a prensa mecânica Shimadzu, modelo UH-F1000 kN (Figura 4.26), e os ensaios foram realizados com base nas prescrições das recomendações da NBR 5739 (2007). Aplicou-se o carregamento do ensaio de forma contínua a uma velocidade de 0,1 mm/min, a qual foi mantida constante durante todo o ensaio. Além da carga de ruptura, o comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com o uso de transdutores elétricos (LVDT) para a medição dos deslocamentos longitudinais, conectados à região central dos corpos-de-prova (Figura 4.27). Os sinais de força e deslocamento foram registrados pelo sistema de aquisição de dados “ADS2000”, de 16 bits, da marca Lynx, com o auxílio do *software* AQ dados.

Previamente, no dia do ensaio, os corpos-de-prova foram faceados nas suas extremidades de topo e base, com auxílio de um torno mecânico, a fim de evitar a concentração de tensões nas faces e assim permitir uma transferência uniforme dos esforços compressivos.



Figura 4.27 – Ensaio de compressão axial dos concretos na Shimadzu UH F-1000kN

A partir da curva de tensão *versus* deformação obtida pelo ensaio, calculou-se o módulo de elasticidade de acordo com a ASTM C469 (2002), por meio da Equação 4.18.

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1})} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Onde:

E: módulo de elasticidade (GPa);

σ_2 : tensão correspondente a 40% da tensão máxima (MPa);

σ_1 : tensão correspondente à deformação ε_{a1} (MPa);

ε_{a1} : deformação axial igual a 5×10^{-5} mm/mm;

ε_{a1} : deformação axial correspondente à tensão σ_2 (mm/mm).

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 CP VARI, FRC-150 e S-150

O Gráfico 5.1 mostra a curva de distribuição granulométrica dos materiais estudados. Nota-se que a distribuição de tamanho das partículas dos FRC-150 são bem semelhantes, visto que foi adotado o mesmo procedimento de britagem e peneiramento para obtenção dos FRC-150, comprovando os resultados observados no estudo de FRC de Schoon *et al.* (2015). A sílica inerte utilizada não passou pelo mesmo mecanismo de produção que os FRC e, por isto, ela apresenta uma pequena diferença na granulometria em comparação aos FRC. Entretanto, ainda pode-se considerar que este material apresenta partículas dentro da faixa granulométrica dos FRC-150, o que contribui para avaliar os efeitos dos FRC-150 em propriedades cimentícias, quando estes são comparados a um material inerte.

Os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} são apresentados na Tabela 5.1. Os valores de diâmetro médio dos FRC-150 são bem próximos, sendo 62,8 μm , 63,0 μm e 70,1 μm para LAB-150, D-150 e C-150, respectivamente. Nota-se que a quantidade de material passante na peneira de 75 μm foi de aproximadamente 57%, 53% e 58% de LAB-150, D-150 e C-150, respectivamente, confirmando o alto teor dessas micropartículas geradas no beneficiamento de RCD utilizando o britador de mandíbulas (Schoon *et al.*, 2015). O diâmetro médio da S-150 foi de 74,0 μm e este material apresenta um teor de material menor que 75 μm de aproximadamente 51%. Vale ressaltar que a partir de d_{20} a S-150 apresenta grãos menores que os FRC-150 estudados, o que é comprovado pelo seu d_{10} (6,2 μm). Observa-se ainda que cerca de 65% dos grãos de LAB-150 e C-150 e 60% de D-150 e S-150 são menores ou iguais ao maior tamanho do grão de cimento (90 μm). Os finos LAB-150 e D-150 apresentam 14,5% de grãos de granulometria menor

ou igual as partículas de cimento (14,8 μm), enquanto que o fino tipo C-150 e a sílica S-150 apresentam 13,5% e 16%, respectivamente.

Tabela 5.1 – Propriedades físicas e granulométricas dos materiais

	Tamanho das partículas (μm)			Blaine (m^2/g)	Massa específica (g/cm^3)	Compacidade
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀			
CP V ARI	3,4	14,8	38,9	0,50	3,17	0,590
S-150	6,2	74,0	148,6	0,12	2,66	-
LAB-150	8,9	62,8	161,0	0,31	2,57	0,464
D-150	8,7	70,1	167,6	0,27	2,63	0,496
C-150	10,2	63,0	157,2	0,46	2,48	0,374

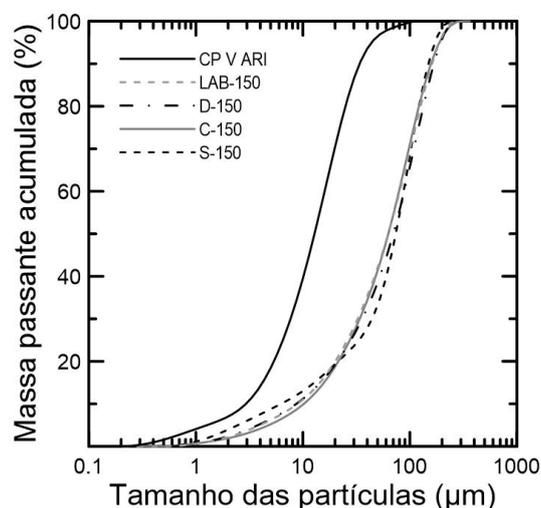
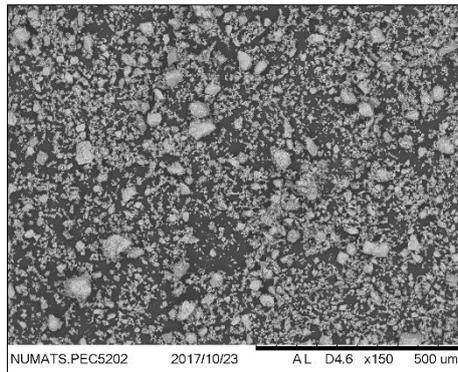


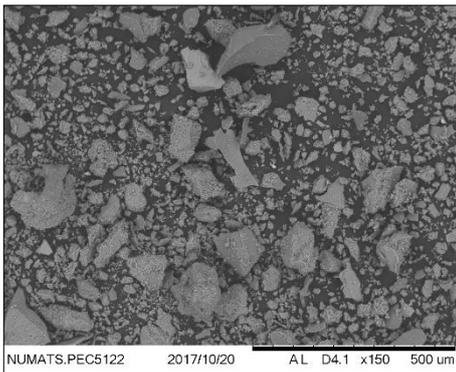
Gráfico 5.1 – Curvas granulométricas do Cimento CP V ARI, dos finos FRC-150 e da sílica inerte S-150

As Figuras 5.1.a-e apresentam a morfologia dos materiais obtidas pela análise de MEV. Ao analisar as Figuras 5.1.b-d, nota-se que os FRC apresentam a existência de grãos de forma irregular e uma ampla gama de tamanhos. Essa irregularidade pode ser consequência da quebra das partículas durante o processo de beneficiamento dos RCD (procedimento de britagem e peneiramento mostrado no Item 4.2). Além disso, a variedade de tamanho pode estar associada aos tipos de grãos presentes no FRC, visto que eles são formados por grãos de cimento hidratado e não hidratados, partículas de

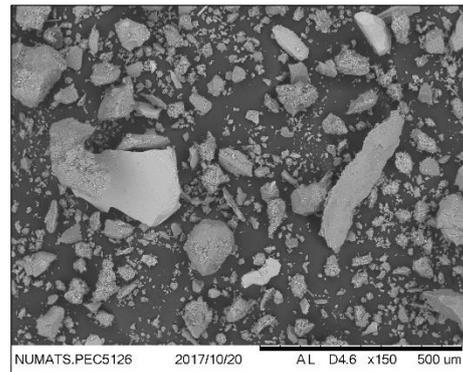
minerais dos agregados e também por grãos de pasta de cimento endurecido junto com o agregado mineral.



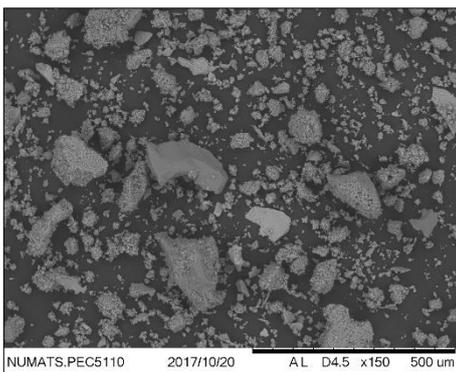
(a)



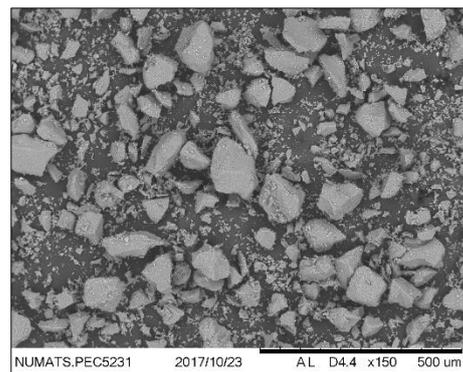
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.1 – Fotomicrografia MEV das amostras aumentadas em x200 (a) CP V ARI; (b) LAB-150; (c) D-150; (d) C-150; (e) S-150

Observa-se que os grãos de quartzo do S-150 (Figura 5.1.e) são caracterizados por partículas de forma poliédrica, com faces relativamente planas e formato angular, sub-angular ou sub-arredondada, tal como verificado por Bezerra (2017). Desta maneira, acredita-se que as partículas maiores dos FRC, as quais possuem morfologia semelhante às partículas de S-150, são grãos de minerais silicatos provenientes dos agregados, e que as partículas menores são grãos de cimento endurecido ou de cimento não hidratado.

Apesar da distribuição granulométrica semelhante, os FRC-150 apresentam diferentes áreas de superfície específica Blaine (Tabela 5.1). Enquanto que os finos LAB-150 e D-150 apresentaram superfície específica Blaine similares (ou seja, $0,31 \text{ m}^2/\text{g}$ e $0,27 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente), o C-150 apresentou área de superfície maior ($0,46 \text{ m}^2/\text{g}$). Isto pode estar associado à presença de pequenas partículas na superfície de grãos maiores (ver Figura 5.2) e à presença de muitos vazios (ver Figura 5.3).

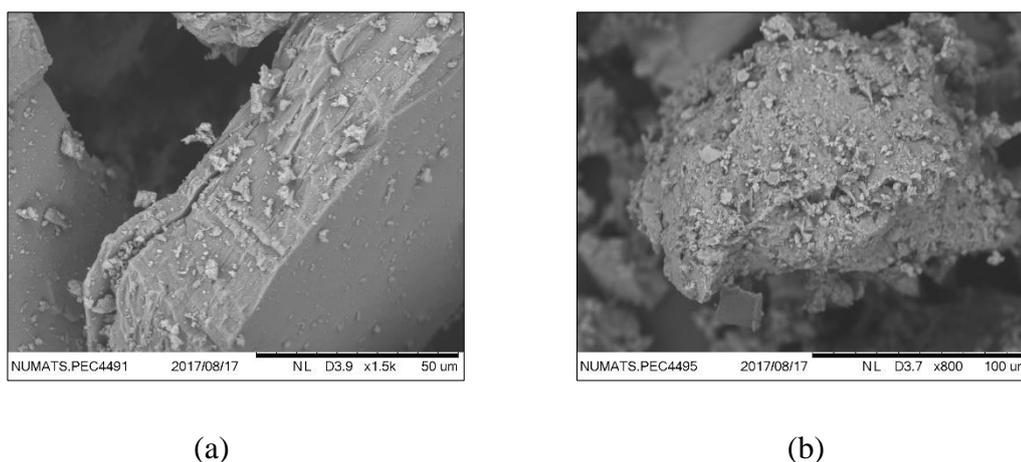
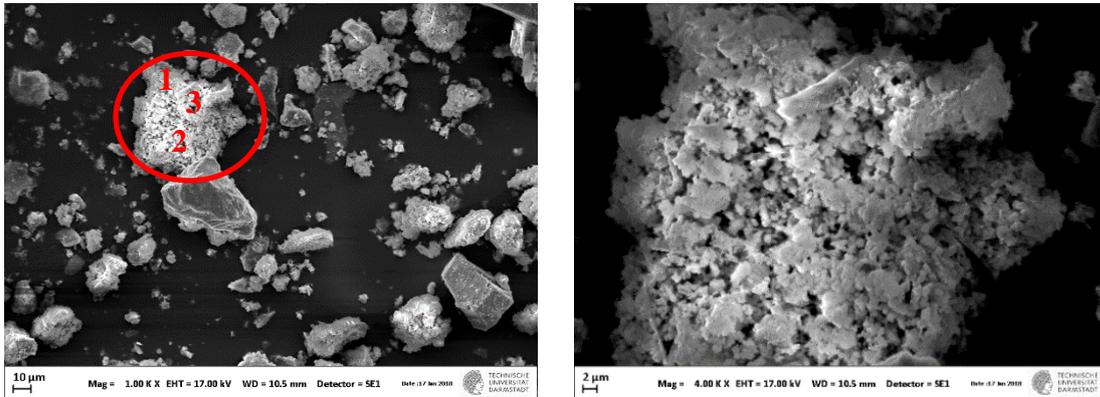


Figura 5.2 – Fotomicrografia MEV de pequenas partículas na superfície de partículas maiores do C-150 (a) x500 e (b) x800

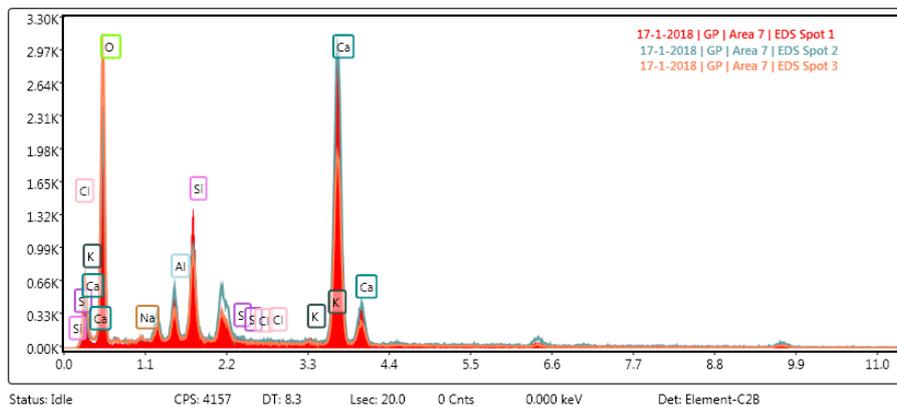
A Figura 5.3 apresenta um grão de cimento hidratado do C-150, formado por diversas camadas escamosas com muitos vazios. Esta morfologia escamosa pode estar associada a alta absorção do finos reciclados (SHUI, CHEN E ZHANG, 2009; NELFIA-OKSRI *et al.*, 2016). Desta maneira, acredita-se que o C-150 apresenta maior absorção que os outros FRC-150. Além disso, este fino apresenta a menor massa específica ($2,48 \text{ g}/\text{cm}^3$), o que também pode indicar alta absorção, devido à maior relação água/cimento deste RCD original. Deste modo, a maior absorção, porosidade e

rugosidade das partículas do C-100 está relacionado à origem do RCD-C, que é originário de restos de concretos usinados obtidos pelas lavagens caminhões betoneiras.



(a)

(b)



(c)

Figura 5.3 – Fotomicrografia MEV do C-150 (a) x1000; (b) x4000 (c) EDS da partícula de cimento hidratado assinalada

A Tabela 5.2 apresenta a composição química dos materiais com a respectiva perda por calcinação (PPC). A maior presença de óxidos de SiO_2 nos FRC corrobora com a caracterização encontrada por autores que utilizaram em seus estudos finos de concreto reciclado (GASTALDI *et al.*, 2015; BOUDALI *et al.*, 2016; GRABOIS, 2016). Nota-se que o D-150 apresenta maior quantidade de sílica em sua composição (46,0%). Isto pode estar relacionado ao fato de que o D-150 pode ter sido produzido com maior quantidade de agregados que LAB-150 e C-150. Além disso, acredita-se que grande presença de SiO_2 na amostra D-150 faz com que este material apresente a menor superfície específica Blaine ($0,27 \text{ m}^2/\text{g}$) e a maior massa específica ($2,63 \text{ g}/\text{cm}^3$) em

relação aos outros FRC-150, resultados já discutidos acima. Vale ressaltar que o C-150 tem menor teor de sílica (32,9%) que os outros dois finos, registrando a superfície específica mais alta, pois, como também já se sabe, os produtos hidratados geralmente apresentam uma superfície específica maior em comparação ao quartzo inerte (Shui *et al.*, 2008).

Tabela 5.2 – Composição química dos materiais

Óxidos (%)	CP V ARI	LAB-150	D-150	C-150	S-150
CaO	63,6	30,3	17,7	30,3	0,04
SiO₂	17,6	36,8	46,0	32,9	96,1
Al₂O₃	5,1	8,8	12,6	10,2	2,5
SO₃	3,9	2,2	1,2	1,9	0,01
Fe₂O₃	2,9	2,8	2,9	2,5	0,42
K₂O	0,85	2,3	2,4	1,2	0,25
MgO	0,72	0,92	2,4	3,1	0,10
Na₂O	0,29	0,97	2,0	0,86	0,17
SrO	0,27	0,14	< 0,1	0,10	-
P₂O₅	0,27	0,31	0,25	0,16	< 0,1
TiO₂	0,22	0,38	0,47	0,46	0,11
MnO	0,12	< 0,1	0,12	0,26	< 0,1
PPC*	3,9	13,9	11,6	15,8	0,18

A difratograma da sílica inerte é apresentada no Gráfico 5.2. Nota-se que o quartzo é a principal fase encontrada, corroborando o resultado de composição química apresentado na Tabela 5.2. Percebe-se, ainda, que há uma pequena contaminação de córidron, a qual ocorre provavelmente devida o processo de micronização da sílica 120# para uma granulometria similar aos FRC-150.

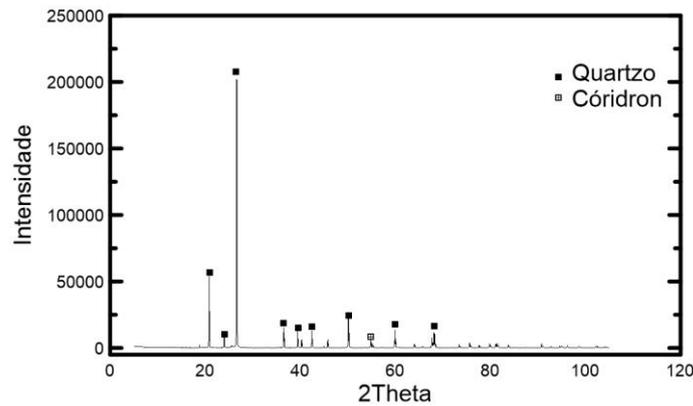


Gráfico 5.2 – Difratograma da sílica inerte S-150

O Gráfico 5.3 apresenta a difratograma obtida do cimento onde foram identificados os picos das principais fases anidras, tendo como principal pico a C_2S e apresentando muitos picos de C_3S , corroborando com os resultados obtidos na composição química do cimento Portland CP V ARI.

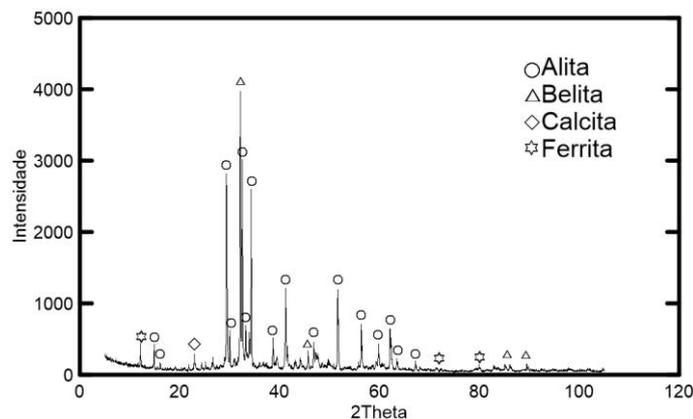


Gráfico 5.3 – Difratograma DRX do CP V ARI

O Gráfico 5.4 apresenta o DRX qualitativo dos FRC-150. Observa-se que todos os FRC-150 têm o quartzo como principal fase cristalina e eles também apresentam uma grande quantidade de picos referentes a compostos silicatos, como biotita, microclina e muscovita. É importante ressaltar que os difratogramas também mostram a presença das fases portlandita, etringita e calcita, o que indica a existência de grãos de cimento hidratado. Além disso, as fases alita e belita também são evidenciadas na difratograma, indicando que os FRC-150 apresentam fases anidras do cimento, embora estas sejam em

menor quantidade. Em particular o D-150 apresenta o maior pico de quartzo em relação aos outros FRC, o que confirma a maior presença de SiO₂ na sua composição química.

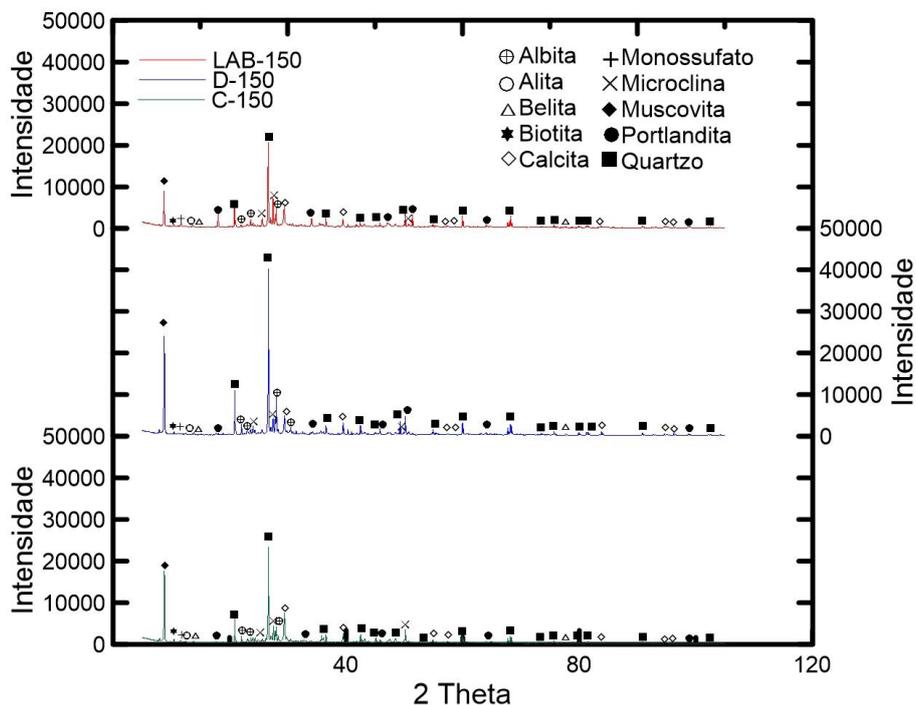
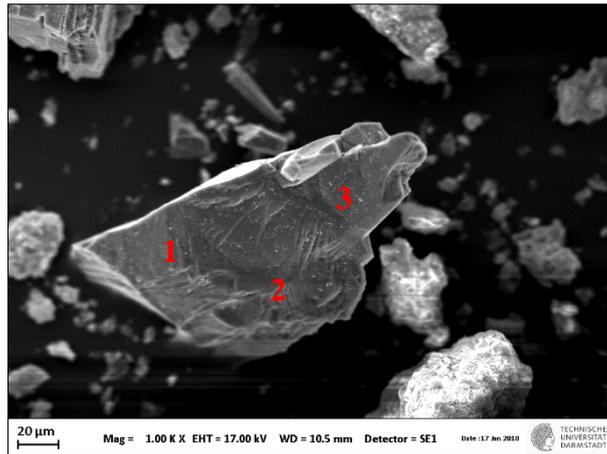


Gráfico 5.4 – Difratoograma dos FRC-150

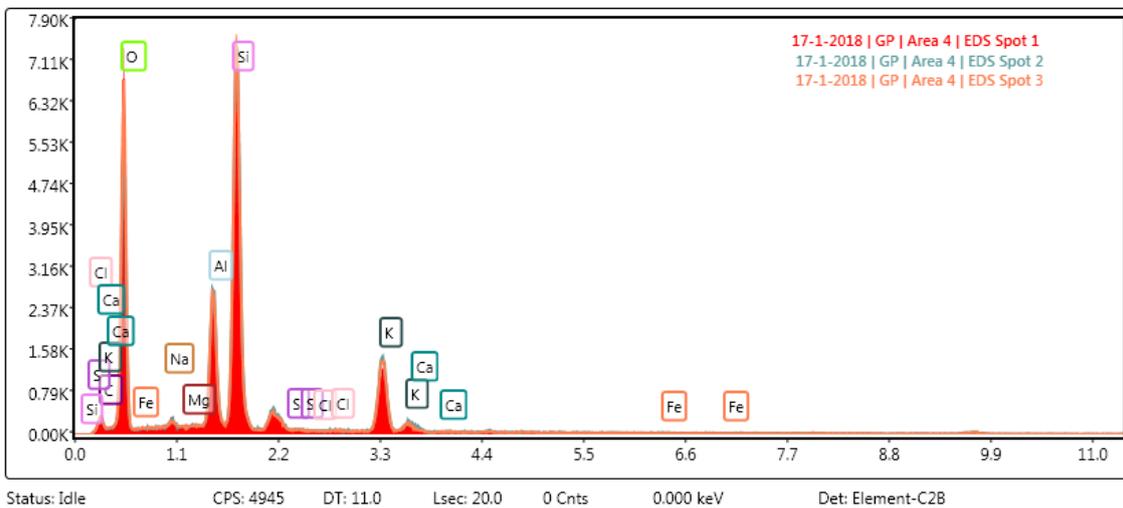
As análises de MEV e EDS confirmam a presença de produtos hidratados e minerais presentes nos FRC encontrados pela análise de DRX. A Figura 5.4 apresenta um grão de formato plano alongado cujo EDS mostra que ele é composto principalmente de 28,39% de Si, 43,43% de O, 11,95% de K e 10,40% de Al, sendo possivelmente um grão de microclina.

O EDS da Figura 5.5 mostra uma composição química do cimento hidratado composto principalmente de Ca (60,40%), O (13,84%) e Si (6,25%), classificando-o como um silicato hidratado, enquanto que o grão assinalado apresenta uma composição química principalmente de 29,52% de Fe 19,98% de Si, 17,32 de O, 9,89% de Al e 1,96% de Mg, sendo possivelmente uma partícula de biotita.

A partir das análises de MEV é possível confirmar que os FRC-150 em estudo são compostos por grande quantidade de quartzo, proveniente da britagem dos agregados graúdos e dos agregados miúdos, grãos de cimento hidratado e uma pequena quantidade de cimento não hidratado.

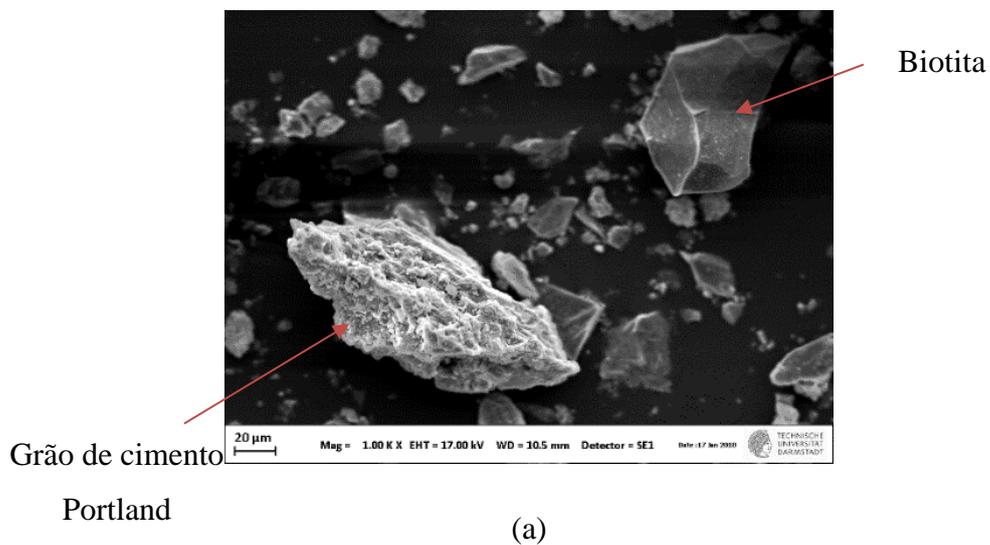


(a)

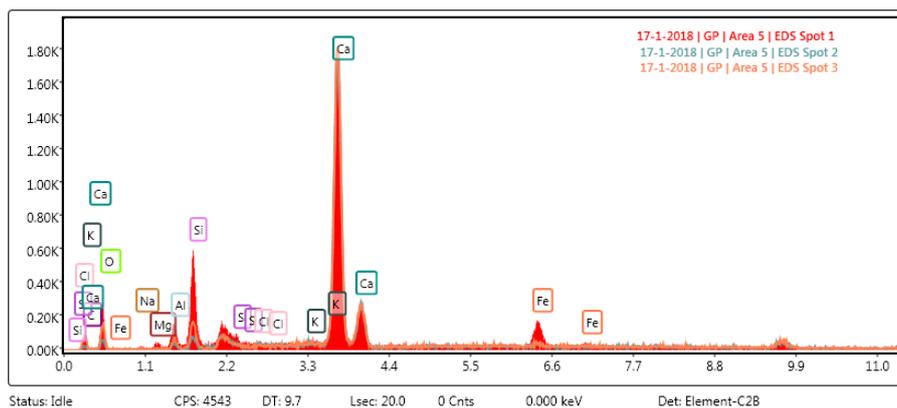


(b)

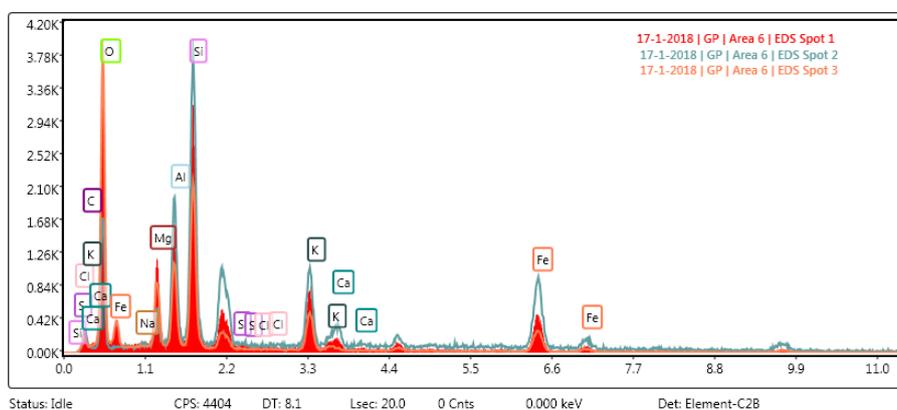
Figura 5.4 – (a) Fotomicrografia da amostra LAB-150 (x4000); (b) EDS da microclina



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5 – (a) Fotomicrografia da amostra D-150 (x1000); (b) EDS do grão de cimento hidratado assinalado e (c) EDS do grão de biotita assinalado.

O Gráfico 5.5 apresenta o termograma com curvas de perda de massa (TG) e derivada da perda de massa (DTG) e Calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos materiais. Observa-se que a amostra de S-150 é realmente inerte, uma vez que ela é uma reta constante e não apresenta nenhuma perda de massa durante sua análise.

Em relação a DTG percebe-se a ocorrência de três picos principais. Entre as temperaturas de 35 e 230 °C ocorreu o pico 1, referente a desidratação da torbemorita (C-S-H), decomposição da etringita, da gipsita e dos aluminatos de cálcio hidratados. Entre 380 °C e 460 °C ocorreu a segunda perda de massa principal (pico 2), correspondente à desidroxilação do hidróxido de cálcio (CH). O terceiro pico (3), entre 600 e 800 °C, indica a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO₃).

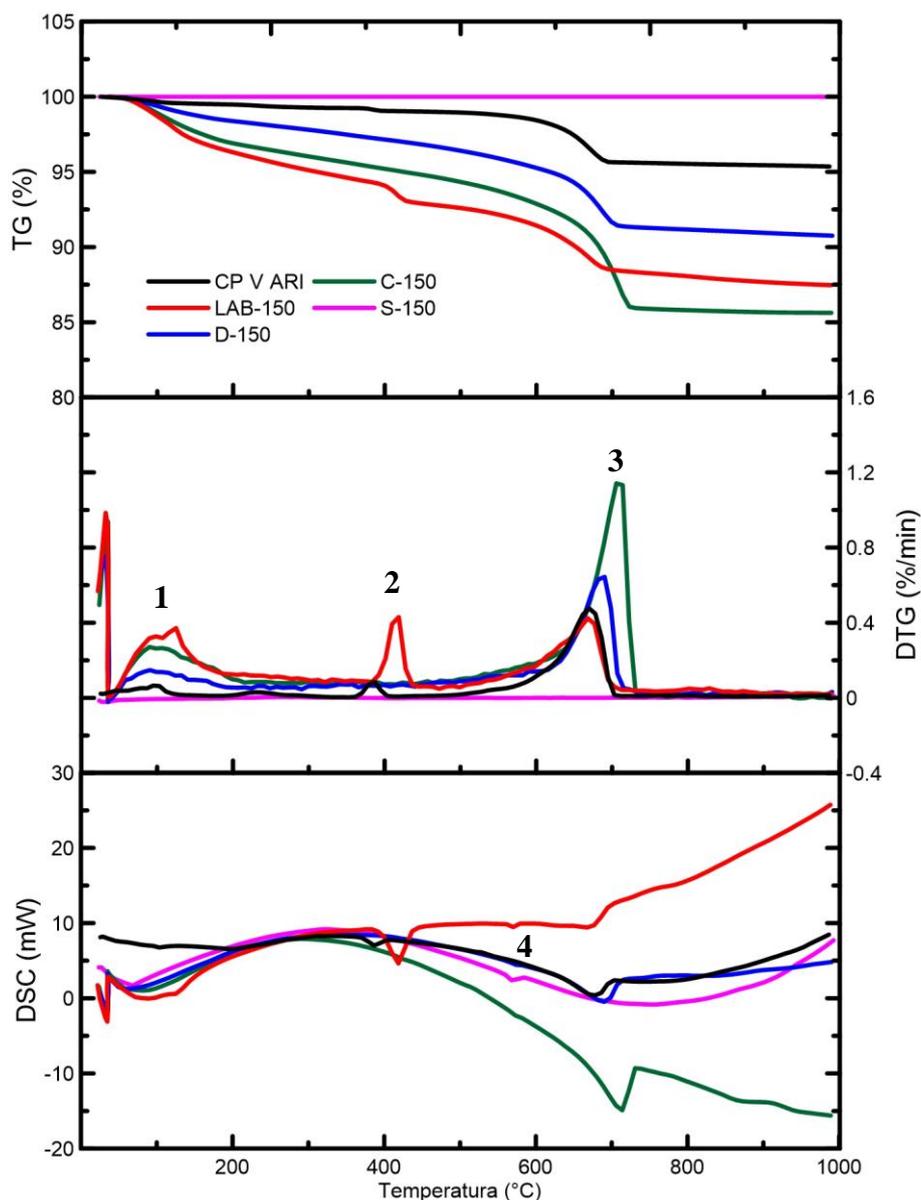


Gráfico 5.5 – Análise térmica (TG/DTG/DSC) do cimento CP V ARI, FRC-150 e S-150

Na análise de DSC, a amostra de sílica inerte apresentou um pico bem evidente (pico 4), a aproximadamente a 570 °C. Este pico indica um rearranjo cristalino das partículas de quartzo presentes nestes materiais, onde ocorre um fluxo de calor endotérmico devido a transição estrutural de α -quartzo para β -quartzo. Os FRC também apresentaram este mesmo pico, comprovando a presença de quartzo na amostra, o que também foi evidenciado por Florea (2013) em seus finos reciclados. Foi possível estipular a quantidade de quartzo presente em cada amostra de FRC pelo cálculo da entalpia de transição de α -quartzo para β -quartzo (pico 4). Segundo Sheffield (1994), a entalpia de transição de α -quartzo de um quartzo puro é de 1,57 cal/g. Desta maneira, as

porcentagens de quartzo presentes no LAB-150, D-150 e C-150 foram 14,09%, 17,25% e 6,64%, respectivamente. Nota-se que o D-150 apresenta a maior porcentagem de quartzo, confirmando os resultados das análises química e mineralógica já apresentadas. Vale ressaltar que esta porcentagem de quartzo dos FRC é referente a quantidade de quartzo proveniente do cimento e dos agregados graúdo e miúdo utilizados nos concretos originais de RCD, sendo difícil a interpretação de qual percentual é referente a cada material.

A Tabela 5.3 apresenta o percentual de perda de massa calculado na base inicial de cada material, onde foram verificadas as perdas de massa de cada pico da DTG, a quantidade de água combinada total, Portlandita (CH) presente e carbonato de cálcio (CaCO_3). Nota-se que para o D-150 e o C-150, os picos 1 e 2 da DTG foram bem baixos, indicando que estes tipos de FRC apresentaram menor teor de água combinada para o C-S-H e etringita (ou seja, 1,68% e 3,37%, respectivamente) e menor quantidade de Portlandita (ou seja, 1,56% e 1,19%, respectivamente). Isto pode estar relacionado ao fato que o D-150 e C-150 possuíam pouco cimento na mistura original e/ou pozolanas que, em função da reação pozolânica, consumiram o CH presente no cimento (pico 2). Observa-se também que o LAB-150 é o FRC que possui maior quantidade de produtos hidratados, apresentando 7,17% de água combinada total, enquanto que o D-150 e C-150 apresentam 3,10% e 5,10%, respectivamente. A baixa porcentagem de água quimicamente ligada do fino D-150 pode estar relacionada ao fato deste fino apresentar maior quantidade de quartzo em sua composição, evidenciado pela análise de DRX e cálculo de quartzo pelo DSC, ou ainda à maior quantidade de cimentos não hidratados quando comparado aos outros FRC-150 utilizados.

Além disso, a análise de DTG mostra que a perda de massa referente à descarbonatação (pico 3) do FRC-C (9,01%) é maior do que nos FRC-LAB e FRC-D (4,47% e 5,63%, respectivamente). Isto também é comprovado pela maior perda por calcinação (15,8%) como visto na Tabela 5.1, o que pode indicar que o C-150 apresenta maior porcentagem de material carbonático, proveniente de adições ou de agregados, ou maior quantidade de cimento hidratado e cal, quando comparado com o LAB-150 ou D-150. Outra hipótese para explicar esta alta perda de massa na descarbonatação é que ela pode ser referente ao tipo de cimento utilizado, o qual pode possuir grande quantidade de CaCO_3 em sua composição.

Tabela 5.3 – Conteúdo percentual calculado na base inicial de cada material (em%)

Amostra	H ₂ O da desidratação da tobermorita, etringita e gipsita (35 a 200 °C)	H ₂ O da CH	CO ₂ do CaCO ₃	Água quimicamente ligada total	CH	CaCO ₃
CP V ARI	0,44	0,28	3,42	0,92	0,82	7,80
LAB-150	4,07	1,55	4,47	7,17	6,37	10,20
D-150	1,68	1,04	5,63	3,10	1,56	12,80
C-150	3,37	1,44	9,01	5,10	1,19	20,50

O cimento Portland CP V ARI apresenta um pouco de água quimicamente ligada (0,92%), provavelmente devido a uma hidratação incipiente, que pode ter ocorrido durante o transporte, o armazenamento e o manuseio do material; ela é considerada inevitável. A grande quantidade de CaCO₃ presente no cimento (7,80%) mostrada pelo pico elevado (3) na DTG também evidencia a adição de filler calcário no CP V ARI, confirmando a grande quantidade de picos de calcita na análise de DRX do cimento Portland utilizado. Além disso, a quantidade de CO₂ presente no CaCO₃ (3,42%) é bem próxima do valor encontrado de perda por calcinação (3,9%).

O Gráfico 5.6 mostra o ponto de saturação do superplastificante com o cimento Portland CP V ARI. Observa-se que estes materiais são compatíveis entre si, pois as curvas dos tempos de leitura estão próximas umas das outras. O ponto de saturação correspondeu a 0,4% de sólidos do dispersante em relação à massa de cimento.

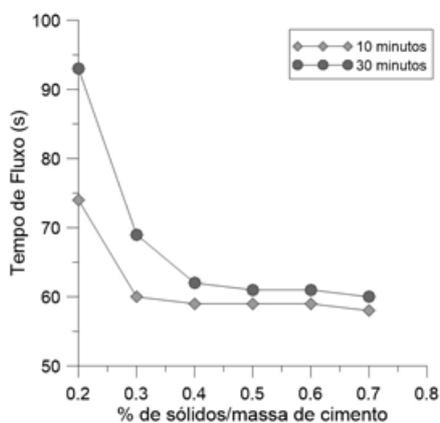


Gráfico 5.6 – Ponto de saturação e compatibilidade do superplastificante GLENIUM 51

5.1.2 FRC-100 e S-100

Os FRC-150 e S-150 foram peneirados novamente para obtenção dos materiais FRC-100 e S-100, respectivamente. Estes materiais possuem distribuição de tamanho de partículas dentro da faixa granulométrica do cimento utilizado, apresentando 99,73% das suas partículas menores que 100 μm , como mostra o Gráfico 5.7. No peneiramento foram eliminadas partículas grossas dos FRC-150 e da sílica inerte, e agora os diâmetros médios são 23,4 μm , 21,6 μm , 20,9 μm e 24,1 μm para LAB-100, D-100, C-100 e S-100, conforme indicado na Tabela 5.4. Nota-se que 35% das partículas de C-100 apresentam dimensões menores ou iguais ao diâmetro médio do cimento estudado, enquanto que para LAB-100, D-100 e S-100, este valor é de 31%, 33% e 33%, respectivamente. Vale ressaltar que a partir de 3 μm os finos tipo LAB-100 e D-100 apresentam tamanho menores que o fino tipo C-100. Observa-se que sílica apresenta cerca de 23% das partículas da S-100 são menores que 10 μm sendo menores que os FRC-100 estudados e este material ainda apresenta aproximadamente 4% de partículas entre 2 μm e 3,5 μm de diâmetro menores do que o cimento estudado, confirmado pelo seu d_{10} (2,9 μm).

Os resultados de área de superfície específica Blaine são apresentados na Tabela 5.4. Com a redução da faixa granulométrica, os materiais apresentaram maior superfície específica. Como já discutido para os casos de FRC-150, esse aumento de área Blaine pode estar relacionado ao aumento de acúmulo de pequenas partículas sobrepostas às partículas maiores e também à eliminação de partículas de quartzo, ou o aumento do número de partículas de cimento hidratado.

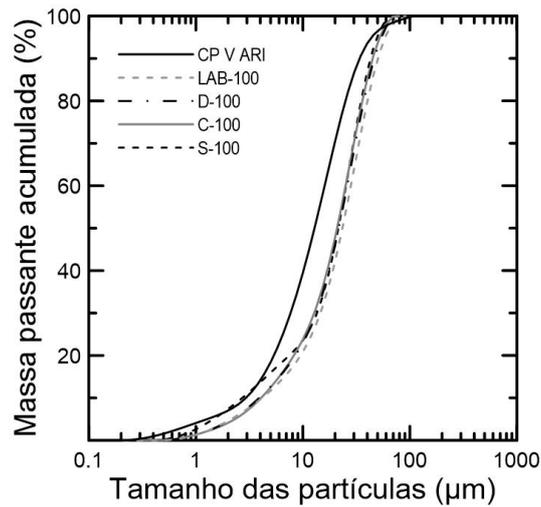
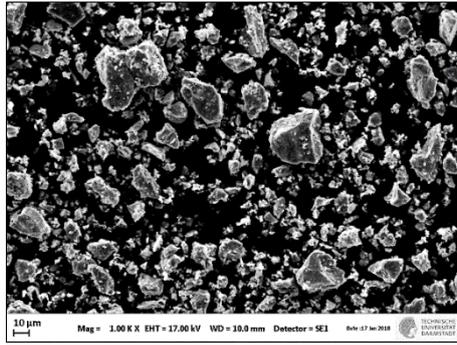


Gráfico 5.7 – Curvas granulométricas do Cimento Portland CP V ARI, dos finos FRC-100 e da sílica inerte S-100

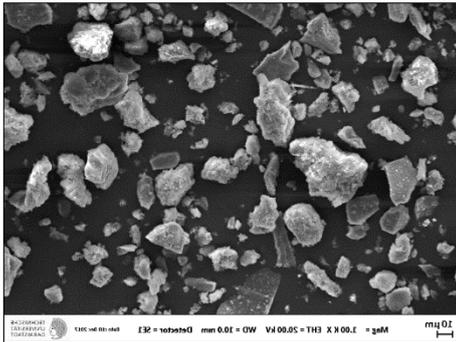
Tabela 5.4 – Propriedades físicas e granulométricas dos materiais

	Tamanho das partículas (µm)			Blaine (m ² /g)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	
CP V ARI	3,4	14,8	38,9	0,50
LAB-100	4,2	23,4	50,2	0,51
D-100	3,9	21,6	46,4	0,59
C-100	4,1	20,9	44,8	0,46
S-100	2,9	24,1	58,2	0,30

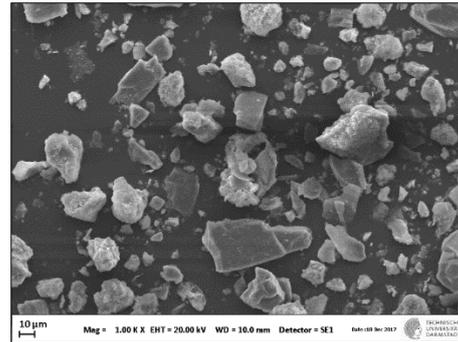
As Figuras 5.6.a-e apresentam a morfologia dos materiais obtida pela análise de MEV e a Figura 5.7 mostra um grão do C-100 que é formado pela junção de uma partícula de quartzo com o grão de cimento hidratado proveniente da pasta.



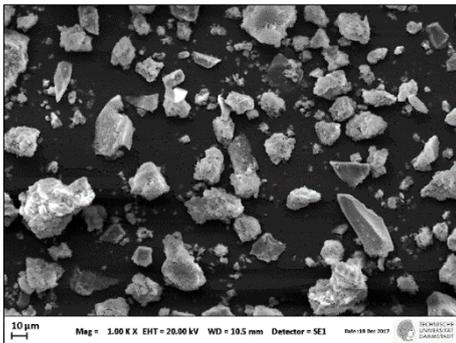
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.6 – Fotomicrografia MEV das amostras aumentadas em x1000 (a) CP V ARI; (b) LAB-100; (c) D-100; (d) C-100; (e) S-100

O Gráfico 5.8 apresenta a difratograma obtida pela análise de DRX dos FRC-100. Assim como os FRC-150, eles também apresentam uma grande quantidade de picos referentes a compostos minerais, produtos de hidratação e uma pequena parcela de fases anidras do cimento (alita e belita). Verificou-se que a eliminação de partículas grandes está relacionada à exclusão de uma parcela de grãos de silicatos. Entretanto,

observa-se que o pico cristalino de quartzo ainda é a principal fase cristilina encontrada nos FRC-100, embora quando comparados ao pico cristalino dos FRC-150, este tenha diminuído, principalmente para o D-100. Estes resultados confirmam a alta superfície específica Blaine.

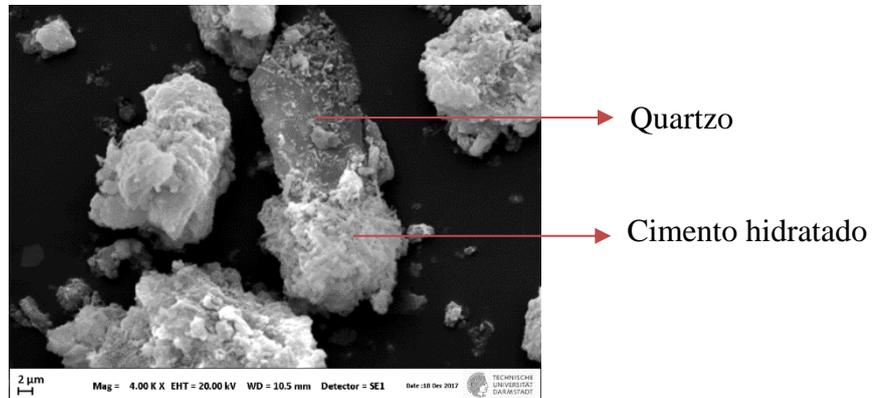


Figura 5.7 – Fotomicrografia MEV de um grão formado parte por cimento hidratado e parte por quartzo da amostra C-100 (x4000)

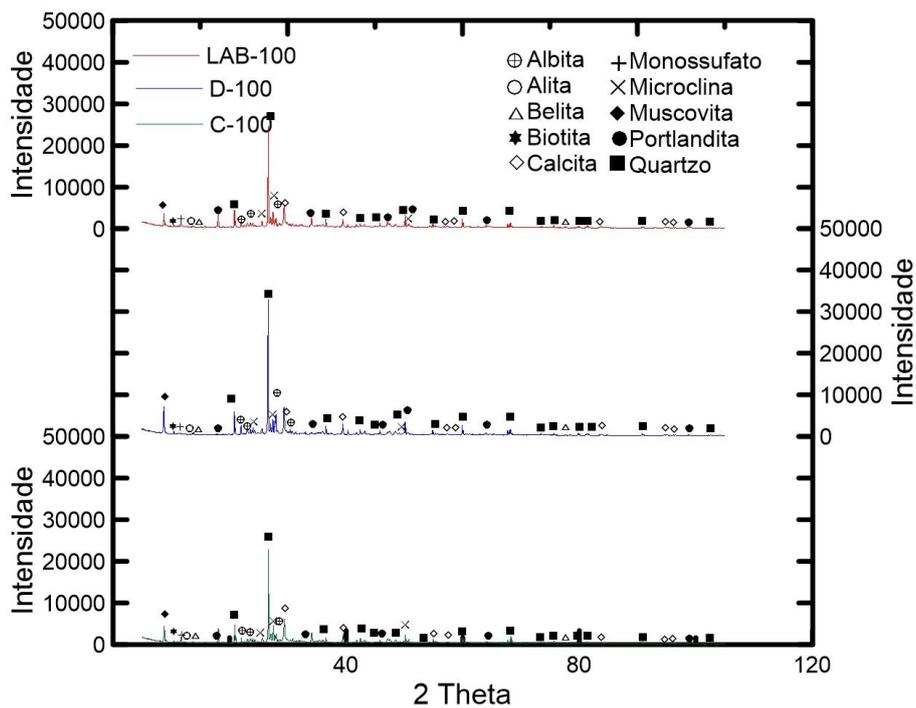


Gráfico 5.8 – Difratoograma dos FRC-100

O Gráfico 5.9 apresenta o termograma com curvas de perda de massa (TG) e derivada da perda de massa (DTG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos

materiais. Mais uma vez este ensaio confirma que a sílica usada, independentemente da granulometria, é um material inerte.

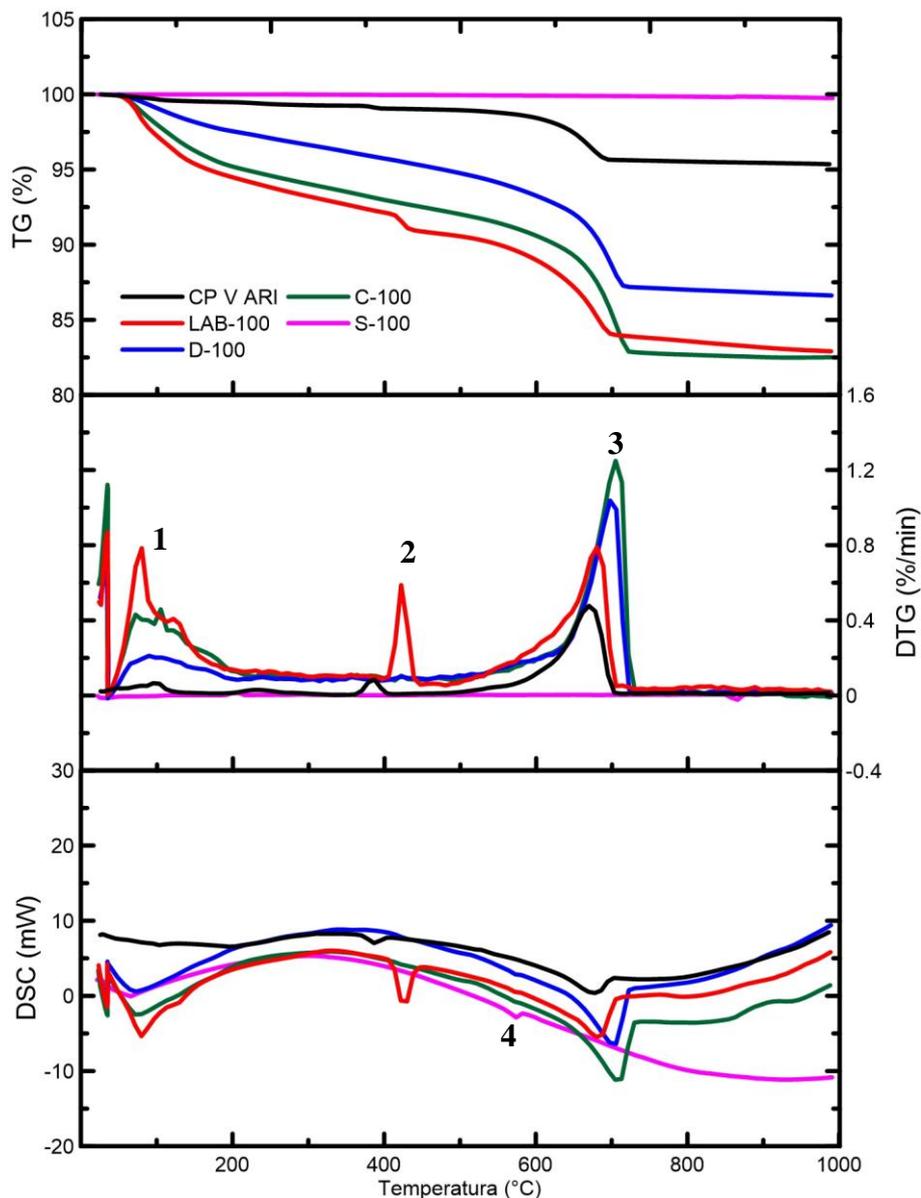


Gráfico 5.9 – Análise térmica (TG/DTG/DSC) do cimento CP V ARI, FRC-100 e S-100

As porcentagens de quartzo presentes no LAB-100, D-100 e C-100 foram 8,40%, 9,05% e 3,48%, respectivamente, confirmando a redução da quantidade de quartzo presente nos FRC discutida na análise de DRX.

A Tabela 5.5 apresenta o percentual calculado na base de massa inicial de cada material, onde se verificou as perdas de massa de cada fase de reação. Percebe-se que a quantidade de água quimicamente ligada aumentou com a redução da granulometria dos

materiais, confirmando a maior presença de produtos hidratados com a eliminação de partículas de quartzo. O LAB-100, assim como o LAB-150, apresentou maior quantidade de água quimicamente ligada (9,18%), indicando grande quantidade de produtos hidratados em sua composição e o fino D-100, assim como o D-150, apresentou menor quantidade de água quimicamente ligada, o que pode ser associado à maior quantidade de quartzo em sua composição, verificado pela análise de DRX e cálculo de quartzo pelo DSC, ou ao fato deste fino apresentar maior quantidade de cimentos não hidratados.

Tabela 5.5 – Conteúdo percentual calculado na base inicial de cada material (em%)

Amostra	H ₂ O da desidratação da tobermorita, etringita e gipsita (35 a 200 °C)	H ₂ O da CH	CO ₂ do CaCO ₃	Água quimicamente ligada total	CH	CaCO ₃
CP VARI	0,44	0,28	3,42	0,92	0,82	7,80
LAB-100	5,92	1,91	6,89	9,18	5,55	15,70
D-100	2,52	1,78	8,14	4,69	1,60	18,50
C-100	5,11	1,99	9,80	7,38	1,15	22,30

5.1.3 AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

O Gráfico 5.10 mostra a curva de granulometria para os agregados e a Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de absorção, massa específica e compactidade. Observa-se que a areia A_LAB-F apresenta grande quantidade de finos, visto que ela não foi submetida ao peneiramento para remoção dos finos LAB-150. Como apresentado no item 5.1.1, os finos LAB-150 apresentam 57% de material passante na peneira de 75 µm em sua composição, desta maneira, eles representam um total de 7,6% na massa total da areia reciclada LAB_A-F, dentro do limite permitido pela norma ABNT NBR 15116 (menor que 10% para AMRC). Entretanto, vale ressaltar que esta norma apresenta os requisitos para agregado reciclado destinado apenas ao preparo de concreto sem função estrutural.

Nota-se que a massa específica da areia A_LAB é menor quando comparada à areia natural, conseqüentemente este material apresenta alta absorção. Segundo ANDRADE (2018), isto é consequência da grande presença de pasta de cimento aderida na areia reciclada.

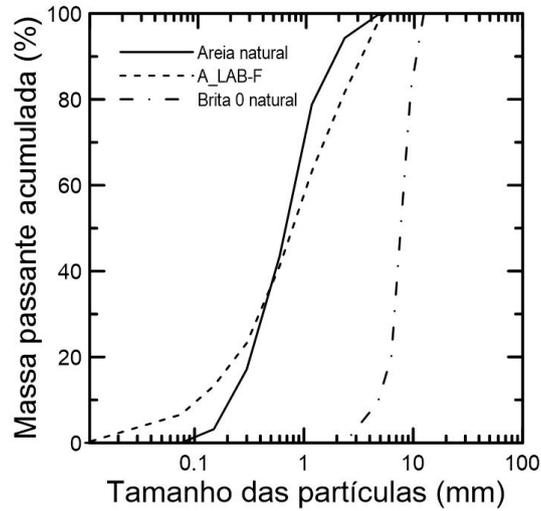


Gráfico 5.10 – Distribuição granulométrica dos agregados

Tabela 5.6 – Características dos agregados

		Brita 0 natural	Areia natural	Areia LAB_A
Absorção (%)		1,16	0,57	4,4
Massa específica (g/cm³)		2,61	2,58	2,43
Compacidade	Classe 1	0,544	0,672	0,523
	Classe 2	0,548	0,616	0,535
	Classe 3	0,560	0,625	0,602

5.2 PROPRIEDADES DA PASTA DE REFERÊNCIA E DAS PASTAS COM FRC-150 e S-150

5.2.1 REOLOGIA

5.2.1.1 MINI ESPALHAMENTO

A Tabela 5.7 apresenta os valores de espalhamento obtidos no ensaio de espalhamento no mini-tronco de cone para as pastas estudadas. Nota-se que todas as misturas apresentaram resultados de consistências semelhantes e de acordo com o espalhamento de referência pré-determinado (50 ± 10 mm).

Tabela 5.7 – Média dos resultados do ensaio de espalhamento

Pasta	Índice de consistência (mm)
P_REF	$55 \pm 0,5$
P_LAB-150_5	$54 \pm 0,2$
P_LAB-150_10	$65 \pm 0,1$
P_LAB-150_15	$61 \pm 0,2$
P_D-150_5	$54 \pm 0,2$
P_D-150_10	$60 \pm 0,2$
P_D-150_15	$61 \pm 0,3$
P_C-150_5	$50 \pm 0,5$
P_C-150_10	$50 \pm 0,5$
P_C-150_15	$45 \pm 0,5$
P_S-150_5	$54 \pm 0,1$
P_S-150_10	$64 \pm 0,2$
P_S-150_15	$60 \pm 0,2$

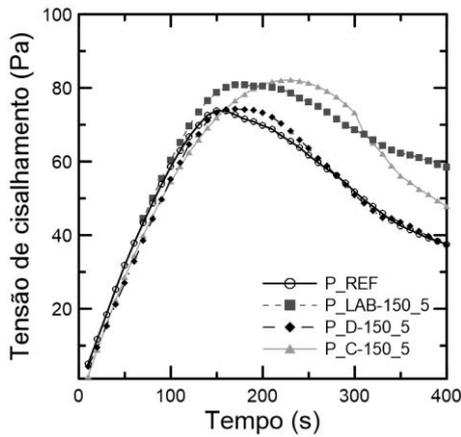
Os resultados expostos na Tabela 5.7 mostram que as pastas produzidas com C-150 apresentaram menor espalhamento. Isso confirma a alta absorção de água do C-150, já discutida nos resultados de caracterização do item 5.1. Com apenas 5% de substituição do cimento pelos LAB-150, D-150 ocorre uma pequena redução do

espalhamento, enquanto que à medida que aumenta a porcentagem de substituição, 10% e 15%, ocorre o aumento do espalhamento das misturas. Por exemplo, a adição de 5% de LAB-150 reduziu o espalhamento da mistura de referência em 1,82%, enquanto que para a adição de 10% e 15% houve um aumento de 18,18% e 10,91%, respectivamente. O mesmo ocorreu para as pastas produzidas com a sílica inerte, mostrando que os finos tipo LAB-150 e D-150 influenciam a consistência da pasta cimentícia de maneira semelhante à sílica inerte, enquanto que o C-150, por apresentar maior área específica e devido a presença de vazios, absorve e rouba a água da mistura.

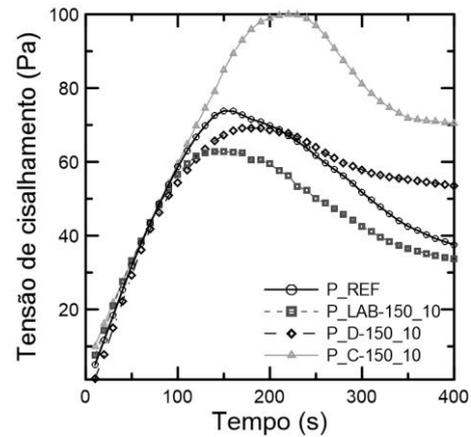
5.2.1.2 VANE TEST

As curvas de tensão de cisalhamento *versus* tempo são apresentadas nos Gráficos 5.11. Nota-se que para misturas com apenas 5% de substituição, a pasta com D-150 teve curva semelhante à pasta de referência. Em particular para o C-150, na medida em que há a incorporação desse tipo de fino nas pastas, ocorre um acréscimo na tensão de escoamento. Este aumento do limite de escoamento provavelmente é devido a uma adição de partículas mais porosas do C-150 à pasta de cimento, o que acarreta no aumento do atrito entre as partículas e na redução da trabalhabilidade das misturas.

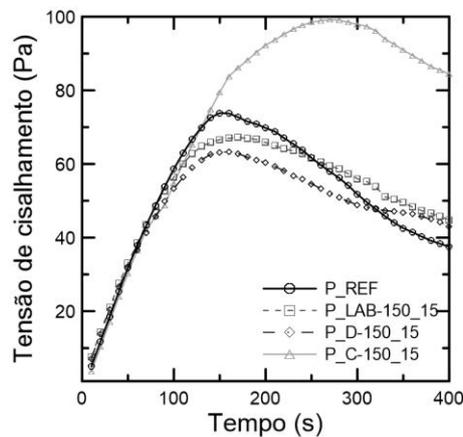
A Tabela 5.8 apresenta os valores médios de torque máximos obtidos para as misturas testadas e mostra que são resultados confiáveis, dentro da faixa de torque máximo. Também são apresentados resultados médios de tensão de escoamento, tempo de ruptura e rotação da palheta, com seus respectivos coeficientes de variação (CV). Os limites de escoamento foram determinados pelos picos de tensão de cisalhamento obtidos pelos Gráficos 5.11.a-c. A rotação da palheta é definida como a quantidade de rotação que esta realizou até que a estrutura se rompesse, ou seja, é a velocidade de rotação (0,1 rpm) multiplicada pelo tempo de ruptura. Ao se comparar a tensão de escoamento das misturas com adição de 5% de LAB-150, D-150 e C-150 obteve-se resultados médios de 78,58 Pa, 72,51 Pa e 85,21 Pa, respectivamente, enquanto que a mistura de referência apresentou 76,14 Pa. Nota-se que a tensão é um pouco menor para o D-150, podendo este valor estar relacionado ao fato do D-150 ter uma área superficial menor, como já discutido no item 5.1.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.11 – Curva de tensão de cisalhamento *versus* tempo das pastas P_REF em comparação com as pastas com (a) 5%; (b) 10%; (c) 15% dos FRC-150

Ao se analisar o Gráfico 5.11.c, observa-se que para o maior tempo necessário para o rompimento da estrutura ocorre quando houve o maior teor máximo de substituição. Os dados da Tabela 5.8 mostram que para a pasta P_REF a palheta gira $59,40^\circ$ até que a estrutura se rompa. Já para as misturas P_LAB-150_15, P_D-150_15 e P_C-150_15, a palheta chega a girar $63,00^\circ$ e $64,80^\circ$ e $102,60^\circ$, respectivamente. É importante notar que isto também ocorre para 5% e 10% de substituição do C-150 e não só para o teor máximo de substituição, confirmando a diminuição da trabalhabilidade das misturas com C-150.

Tabela 5.8 – Limite de escoamento para as pastas P_REF e pastas com FRC-150 com os respectivos coeficientes de variação (em%)

Mistura	Torque máximo (%) – CV%	Limite de escoamento (Pa) – CV%	Tempo de ruptura (s) – CV%	Rotação da palheta (°) – CV%
P_REF	47,59 – 3,01	76,14 – 3,01	165 – 9,09	59,40 – 9,09
P_LAB-150_5	49,12 – 2,94	78,58 – 2,94	165 – 3,03	59,40 – 3,03
P_LAB-150_10	39,22 – 0,01	62,74 – 0,01	160 – 6,25	57,60 – 6,26
P_LAB-150_15	42,75 – 1,73	68,40 – 1,73	175 – 2,86	63,00 – 2,86
P_D-150_5	45,32 – 2,41	72,51 – 2,41	155 – 3,23	55,80 – 3,23
P_D-150_10	42,96 – 0,68	68,74 – 0,68	165 – 9,09	59,40 – 9,09
P_D-150_15	40,21 – 1,65	64,33 – 1,65	180 – 11,11	64,80 – 11,11
P_C-150_5	53,26 – 2,56	85,21 – 2,56	225 – 2,22	81,00 – 2,22
P_C-150_10	58,59 – 0,63	93,74 – 0,63	245 – 2,04	88,20 – 2,04
P_C-150_15	57,99 – 4,05	97,05 – 1,33	285 – 5,26	102,60 – 5,26

O Gráfico 5.12 mostra a variação do limite de escoamento com a porcentagem de substituição de cada tipo de FRC-150. Observa-se que para o C-150, quanto maior o teor de substituição, maior é o limite de escoamento, e o contrário acontece com o D-150. Para o LAB-150 tem-se que para 5% de substituição o limite de escoamento aumenta em relação a P_REF, porém, para maiores teores de substituição, o limite de escoamento é menor que P_REF. Estes resultados mostram-se semelhantes quando comparados àqueles obtidos no ensaio de mini espalhamento de tronco de cone. Pode-se dizer que o fino tipo C-150 apresenta grande absorção, enquanto que os finos LAB-150 e D-150 provocam um efeito de diluição das pastas.

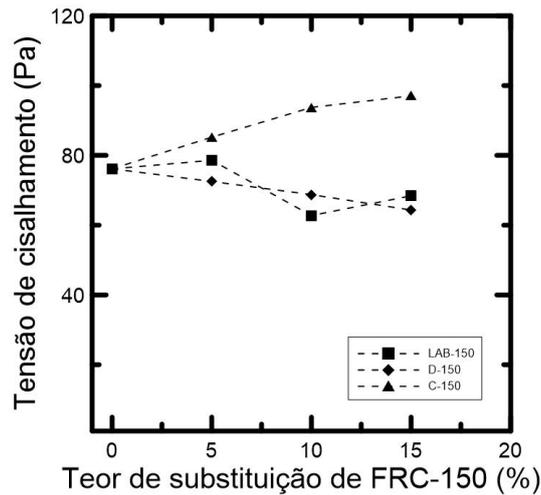


Gráfico 5.12 – Tensão de cisalhamento *versus* teor de substituição de FRC-150

O Gráfico 5.13 apresenta a relação da tensão de cisalhamento com o diâmetro obtido pelo ensaio de espalhamento para pastas com FRC-150. Segundo De Larrard (1999), quando a tensão de escoamento aumenta, o espalhamento diminui e vice-versa. Os resultados obtidos para as pastas produzidas confirmam tal comportamento. A análise estatística mostra que as misturas de referência e contendo 5% de LAB-150 e D-150 são estatisticamente iguais.

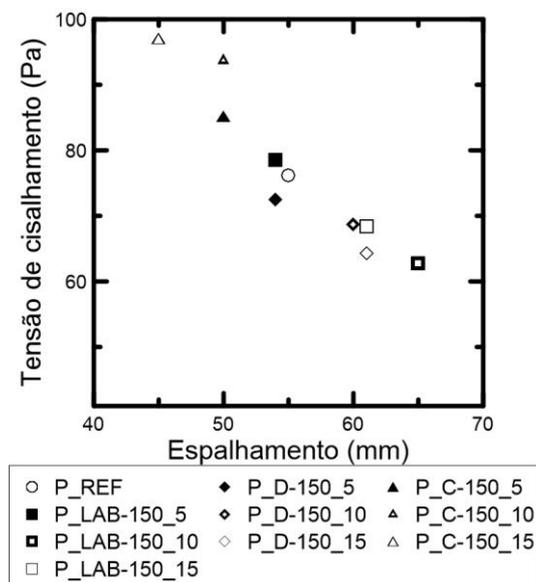


Gráfico 5.13 – Relação entre a tensão de cisalhamento e o espalhamento

5.2.2 ESTUDO DE HIDRATAÇÃO

5.2.2.1 ENSAIO DE CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

No Gráfico 5.14 são apresentadas as curvas de fluxo de calor *versus* tempo e calor acumulado *versus* tempo, obtidas no tempo total de ensaio de calorimetria isotérmica a 27 °C (160 horas), e a Tabela 5.9 mostra um resumo as características do período de indução, do período de aceleração e o calor acumulado total das pastas. O ensaio da pasta P_C-150_15 não foi concluído devido a um problema técnico. Deste modo, as misturas foram analisadas até 24 horas de ensaio (período de indução e de aceleração concluídos) para melhor entendimento e compreensão do efeito dos FRC nas pastas cimentícias durante o período de indução e de aceleração (ver Gráficos 5.15).

Tabela 5.9 – Dados dos períodos de hidratação e de calor acumulado das pastas estudadas

	Período de Indução		Período de aceleração				Calor total acumulado (J/g)	
	Duração (h)	Fluxo de calor mínimo (mW/g)	Início (h)	Fim (h)	Duração (h)	Taxa de reação k		Fluxo de calor máximo (mW/g)
P_REF	1,26	1,12	1,99	7,93	5,94	1,38	7,62	343
P_LAB-150_5	1,64	1,11	1,97	7,86	5,89	1,15	7,25	335
P_LAB-150_10	1,75	1,03	2,17	7,99	5,82	1,11	6,87	322
P_LAB-150_15	1,91	0,96	2,30	8,04	5,74	1,06	6,48	307
P_D-150_5	0,79	1,22	1,57	7,71	6,14	1,07	7,24	315
P_D-150_10	1,25	1,22	1,77	7,69	5,92	1,05	7,00	303
P_D-150_15	1,20	1,25	1,72	7,53	5,81	1,00	6,78	291
P_C-150_5	1,32	1,47	1,77	7,48	5,71	1,09	7,38	334
P_C-150_10	0,95	1,51	1,58	7,19	5,61	0,99	6,86	312
P_C-150_15	0,45	1,12	0,73	7,76	7,03	0,85	6,86	264*
P_S-150_5	0,72	0,70	1,11	8,45	7,34	0,92	7,15	328
P_S-150_10	0,64	0,52	1,05	8,60	7,54	0,82	6,43	322
P_S-150_15	0,91	0,70	1,27	8,91	7,64	0,77	6,33	308

*Ensaio não foi completado. Calor acumulado até 44h de em saio.

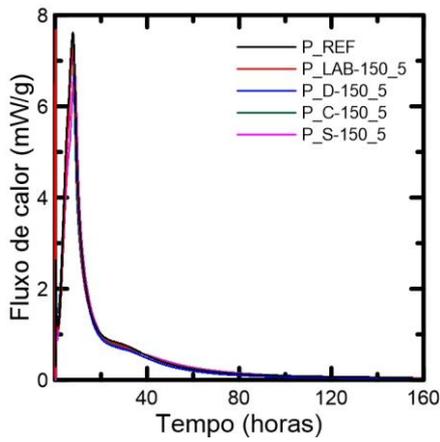
Verificou-se que o início do período de dormência é retardado com a presença de LAB-150 para todas os teores utilizados. À medida em que se aumenta o teor de substituição do cimento pelo fino LAB-150, maior é a duração do período de dormência, sendo de 1,64 min para 5%, 1,75 min para 10% e 1,91 para 15% em relação

a mistura de referência. Já para as pastas com D-150 e C-150 tiveram seu período de dormência acelerado, exceto para a pasta P_C-150_5 que aumentou e a pasta P_D-150_10 que permaneceu praticamente constante. O período de dormência menor para as pastas com S-150 deve-se provavelmente ao fato deste material apresentar partículas menores que 20% de partículas mais finas que 20 μm em relação aos FRC-150 estudados, conforme discutido no item 5.1.1.

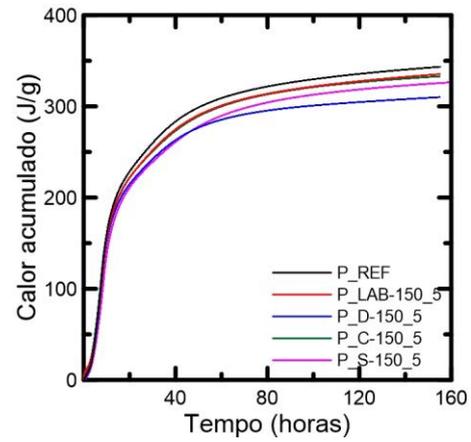
No fim do período de aceleração, as pastas apresentaram o pico referente à hidratação do C_3S seguido do pico referente à exaustão do sulfato de cálcio, caracterizado pela hidratação dos aluminatos. Nota-se que a intensidade do pico referente à exaustão do sulfato foi reduzida a medida em que o teor de substituição de FRC-150 e S-150 foi aumentado, com exceção da mistura com 15% de C-150, a qual apresentou o mesmo fluxo máximo de calor que a mistura com 10% de C-150. Acredita-se que os FRC-150 tenham provocado um efeito de diluição nas misturas nos primeiros minutos, já que, com a substituição do cimento por estes materiais, ocorre um aumento da água efetiva do sistema, provocando a redução da quantidade de produtos hidratados formados. Além disso, como essas adições possuem grãos maiores do que as partículas do cimento, há redução da taxa de hidratação, corroborando com os dados já descritos por Lawrence *et al.* (2013).

Para as misturas contendo o mesmo teor de substituição, vale ressaltar que aquelas com FRC-150 apresentam maiores fluxo de calor máximo se comparados com a sílica inerte. Isto mostra que os FRC-150 não são completamente inertes, apresentando uma pequena reatividade, comprovando a presença de fases não hidratadas apresentadas pela análise de DRX discutida no item 5.1.1.

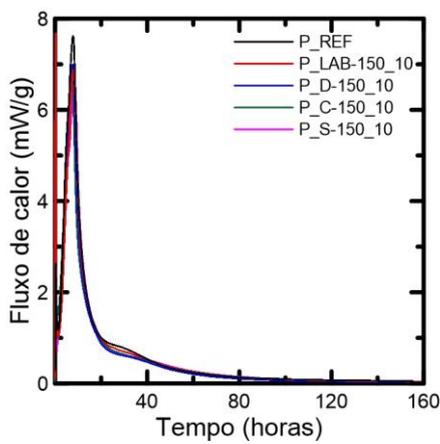
No fim do período de desaceleração, observa-se que o pico relativo à formação da fase de monossulfato (Figura 5.14). Para as misturas com 5% de adições, este pico ocorre praticamente no mesmo tempo que o pico da mistura de referência. Entretanto, à medida em que se aumenta o teor de adições, este pico é deslocado para a esquerda, indicando que a produção de monossulfato ocorre mais lentamente, à medida em que se aumenta a quantidade de FRC-150 e S-150.



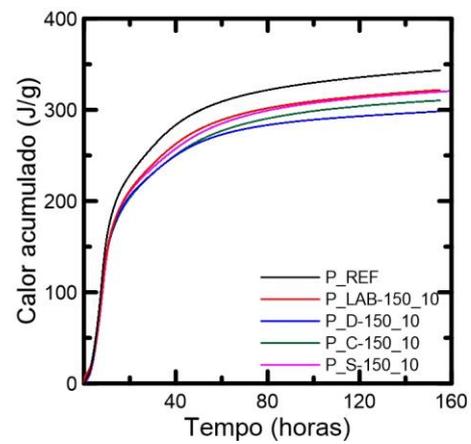
(a)



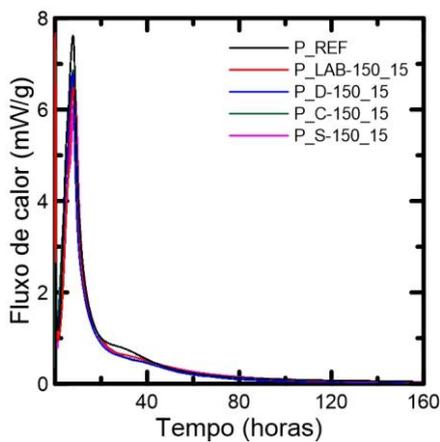
(b)



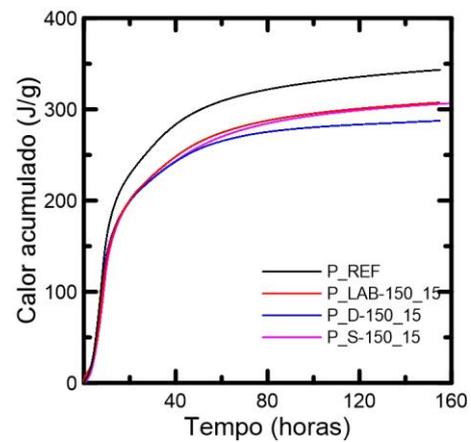
(c)



(d)

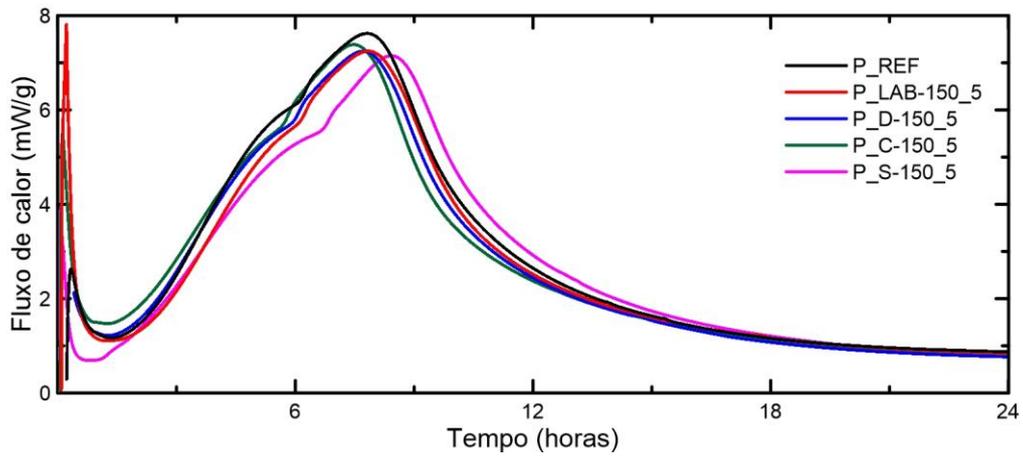


(e)

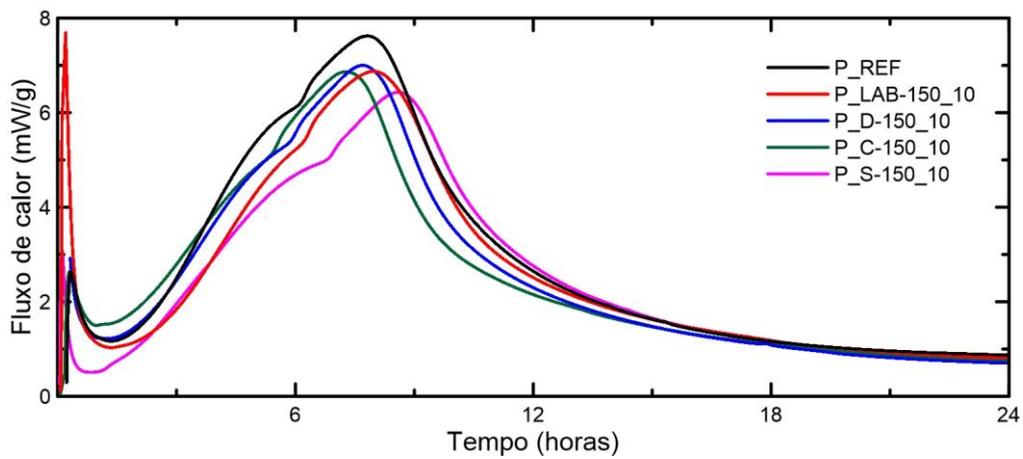


(f)

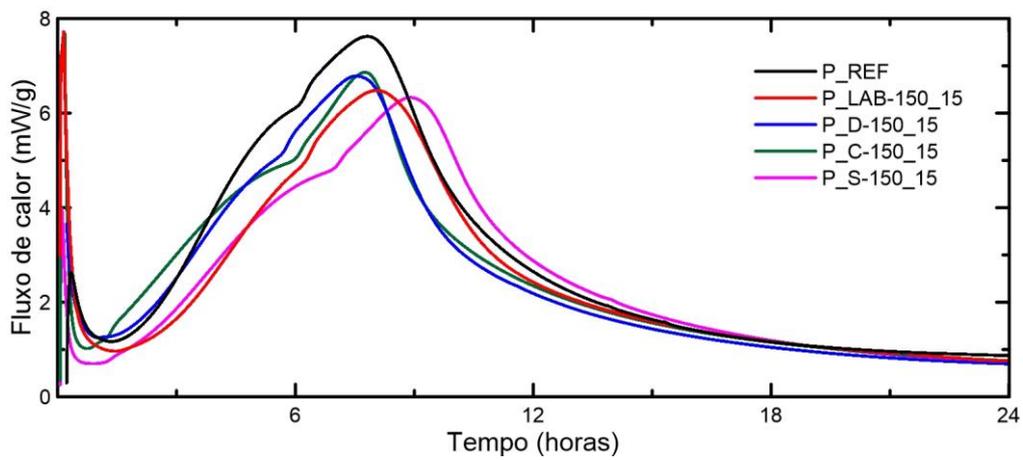
Gráfico 5.14 – Curva de liberação de calor da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (c) 10% e (e) 15% de substituição; Calor acumulado durante tempo total de ensaio (160h) para a mistura de referência e misturas com (b) 5% (d) 10% e (f) 15% de substituição



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.15 – Curva de liberação de calor durante 24 horas para a pasta de referência e misturas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição

O calor total acumulado foi reduzido com o aumento do teor de substituição de FRC-150 e S-150 em relação à pasta de referência. Vale ressaltar que para as pastas com LAB-150, o calor total acumulado não foi proporcional ao teor de substituição do material, indicando que este material pode ser um pouco mais reativo se comparado com os finos D-150 e C-150 e o material inerte S-150. Para as pastas com 5%, 10% e 15% de LAB-150, o fluxo de calor máximo foi reduzido em 2,33%, 6,12% e 10,50%, respectivamente. Já as pastas com 5%, 10% e 15% de D-150, o fluxo de calor máximo foi reduzido em 8,16%, 11,66% e 15,16%, respectivamente. Isto mostra que o fino D-150 não apresenta maiores presenças de grãos não hidratados, não confirmando a hipótese proposta na caracterização destes materiais (item 5.1.1). As pastas com 5% e 15% de C-150 também tiveram um decréscimo do calor máximo acumulado, mas sendo praticamente igual ao teor de substituição, sendo de 4,37% e 9,03%, respectivamente. Na pasta P_C-150_15, cujo ensaio foi incompleto, há uma tendência de o calor total acumulado ser maior do que para a mistura P_C-150_10 e menor do que para as outras misturas contendo C-150. Deste modo, quanto à origem dos finos, observa-se que os finos com LAB-150 e C-150 apresentaram melhor calor acumulado em relação ao D-150. Isto pode estar relacionado ao fato de que o fino tipo D-150 apresenta maior quantidade de quartzo em sua composição.

Assim como os resultados observados nas argamassas estudadas por Kim e Choi (2012), os resultados do ensaio de calorimetria isotérmica mostram que os FRC-150 estudados possuem baixa reatividade, retardando a hidratação. Isto pode ser consequência do tamanho destes materiais e também da baixa presença de grãos de cimento não hidratados observados pelo ensaio de DRX, discutido no item 5.1.

5.2.2.2 DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO POR PULSO ULTRASSÔNICO

As curvas de evolução da velocidade de propagação do pulso ultrassônico em relação ao tempo de cura são apresentadas no Gráfico 5.16 para as pastas com FRC-150 em comparação à mistura de referência. Observa-se que a velocidade do pulso ultrassônico no período I permaneceu constante (aproximadamente 1500 m/s) até o tempo em que ocorre o patamar de percolação. Após o ponto de pega, tem-se a aceleração da hidratação (período II), que se caracterizou por uma dupla inclinação

(retas 1 e 2). Segundo Siqueira (2014), essa dupla inclinação no período de aceleração pode ser consequência da cinética de hidratação na formação dos diversos produtos hidratação.

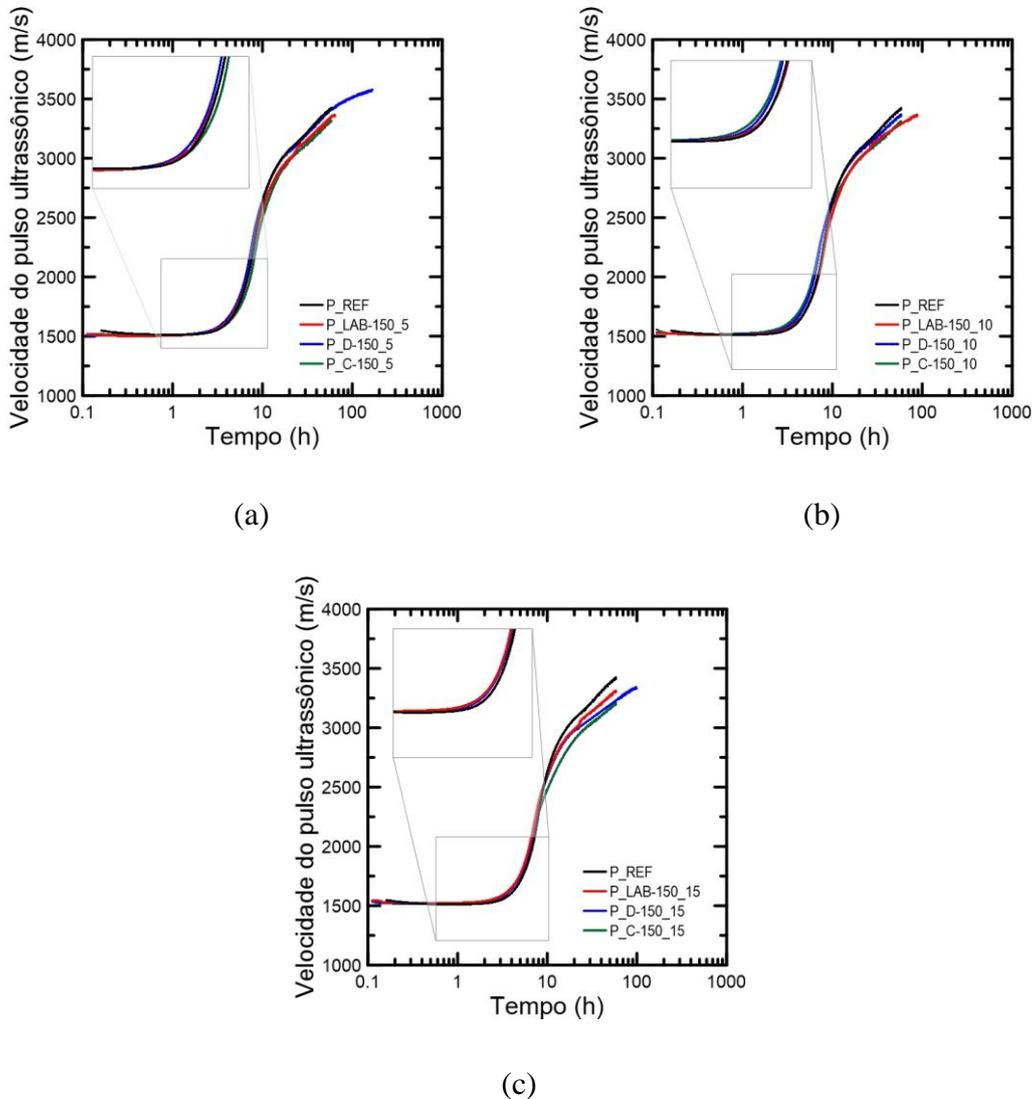


Gráfico 5.16 – Curvas velocidade do pulso ultrassônico *versus* tempo de cura em escala logarítmica: misturas contendo (a) 5%; (b) 10% e (c) 15% de substituição

A Tabela 5.10 mostra o patamar de percolação, bem como com os coeficientes de inclinação das retas 1 e 2 para a mistura de referência e para as misturas produzidas com FRC-150. Cada valor apresentado refere-se apenas ao resultado de um único ensaio. Não foi possível identificar o patamar de estabilização, visto que este não foi alcançado com 7 dias de ensaio.

Ao se observar os dados da Tabela 5.10, nota-se que para as misturas com LAB-150 com teor de substituição de 5% e 10% o tempo correspondente ao ponto de patamar de percolação fica praticamente constante (aumento de 1% e 0,32%, respectivamente). Já com 15% de substituição do cimento por LAB-150 ocorre aumento da velocidade do pulso ultrassônico, reduzindo o período I e alcançando o patamar de percolação mais rapidamente (redução de 7,12%). A Tabela 5.9 mostra que, enquanto que o tempo correspondente ao patamar de percolação foi de 309 min para a mistura de referência, para as misturas com LAB-150 este tempo variou entre 287 e 312 min. Independentemente do teor de substituição do cimento pelo D-150 utilizado, há redução do período I e diminuição do tempo para alcançar o patamar de percolação, reduzindo-o em 4,56%, 7,12% e 8,09% para as misturas com 5%, 10% e 15% de substituição, respectivamente. Isto também ocorre para as pastas com 10% e 15% de C-150, reduzindo o tempo em 13,59% e 11,65%, respectivamente. Nota-se que com 5% de substituição do cimento por C-150 ocorre um efeito neutro em relação ao patamar de percolação. Acredita-se que a alta absorção dos finos C-150 seja responsável pela redução do tempo para se atingir o patamar de percolação, visto que este fino rouba a água do sistema. Isto mostra que há uma tendência de que adições com alto teores de substituição (15%) dos FRC-150 provocam a redução do tempo para ocorrer o patamar de percolação, corroborando com os resultados da calorimetria isotérmica.

Tabela 5.10 – Patamar de percolação e inclinação das retas obtidas durante a regressão linear na região intermediária das reações de hidratação

	Patamar de percolação (min)	Inclinação das retas no período II	
		Coef. reta 1	Coef. reta 2
P_REF	309	3943	779
P_LAB-150_5	312	3853	753
P_LAB-150_10	310	3583	780
P_LAB-150_15	287	3759	692
P_D-150_5	295	3991	764
P_D-150_10	287	3895	687
P_D-150_15	284	3655	569
P_C-150_5	309	3879	731
P_C-150_10	267	3620	699
P_C-150_15	273	2842	676

No período II, a inclinação da reta 1 é maior para todas as misturas estudadas em relação a reta 2. A mistura de referência apresentou um valor de coeficiente da reta 1 de 3943, enquanto para as misturas contendo FRC-150 a inclinação da reta 1 foi menor, variando de 3583 a 3991 (exceto para a mistura P_C-150_15, que foi de 2842). Ainda na curva do período II, é possível observar que houve uma redução da velocidade do pulso, sendo caracterizado pelo coeficiente da reta 2. A mistura de referência apresentou um valor de coeficiente da reta 2 de 779, enquanto que para as misturas contendo FRC-150 a inclinação da reta 2 foi menor, variando de 569 a 764 (exceto para a mistura P_LAB-150_10, que foi de 780). Como a inclinação das retas 1 e 2 são menores para as pastas com adição de FRC-150, conclui-se que a presença dos finos retarda a hidratação durante a etapa de aceleração, o que corrobora os resultados apresentados no ensaio de calorimetria isotérmica. Ainda é possível observar que no final do período II da curva, a partir de 80h de ensaio, há tendência da intensidade da velocidade do pulso ultrassônico ser reduzida com o aumento do teor dos FRC-150 em estudo.

5.2.2.3 IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS PRODUTOS HIDRATADOS POR ANÁLISE TÉRMICA

Os Gráficos 5.17 e 5.18 apresentam os resultados das análises térmicas realizadas nas pastas curadas a 1 e 28 dias, respectivamente, em comparação à análise térmica do cimento anidro.

Nas curvas TG e DTG, observa-se perda de massa inicial devido à evaporação da água livre existente nas pastas. A primeira perda de massa ocorreu entre 35 e 220 °C, referente à desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita, gesso e aluminato de cálcio (picos sobrepostos). Nota-se que para 1 dia de cura a pasta produzida com 5% de fino C-150 apresenta um pico maior referente à decomposição do C-S-H. Já para 28 dias, as pastas produzidas com 5% de D-150 e S-150 apresentaram maior pico de decomposição do C-S-H. Entre 400 e 480 °C houve a desidroxilação da portlandita. A terceira perda de massa ocorre entre 585 a 800 °C. Segundo Da Cunha *et al.* (2011), na temperatura a 600 °C inicia-se a descarbonatação do carbonato de cálcio presente no cimento CP V ARI. O pico referente à descarbonatação do CaCO₃ pode ser visto como a junção de dois picos que se sobrepõem. Assim, acredita-se que a descarbonatação que ocorre no primeiro pico pode ser referente à carbonatação das

pastas, sendo que esta última pode ocorrer tanto durante o preparo de amostras como também na presença de CaCO_3 na composição pertencente aos agregados e/ou cimento presentes no FRC.

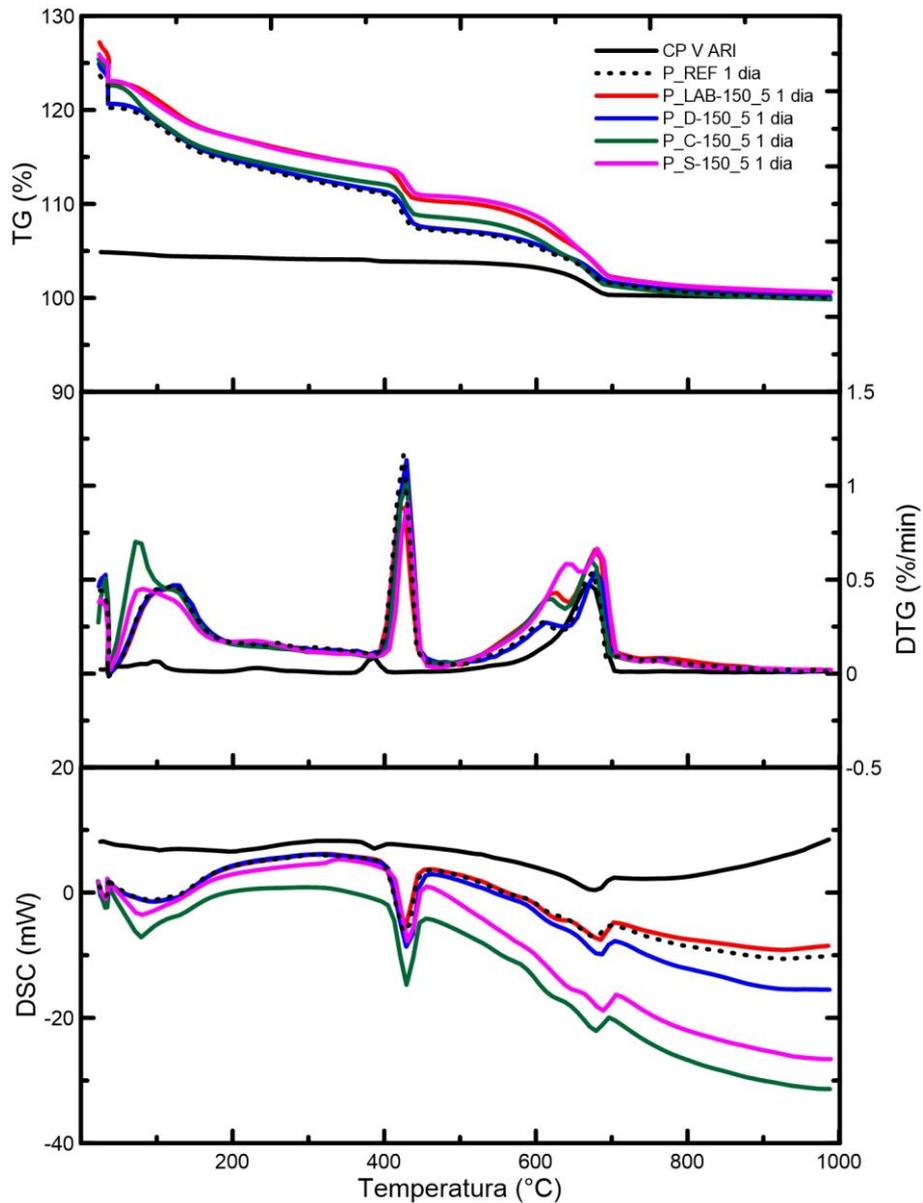


Gráfico 5.17 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 1 dia de cura

Quando se compara a curva DTG do cimento anidro com as misturas percebe-se que há um retardo na curva de desidratação do hidróxido de cálcio. Segundo Bezerra (2017), isto é consequência da forte força que existe entre as partículas das pastas

cimentícias, fazendo com que este sistema requeira maior energia (calor) para iniciar a desidroxilação.

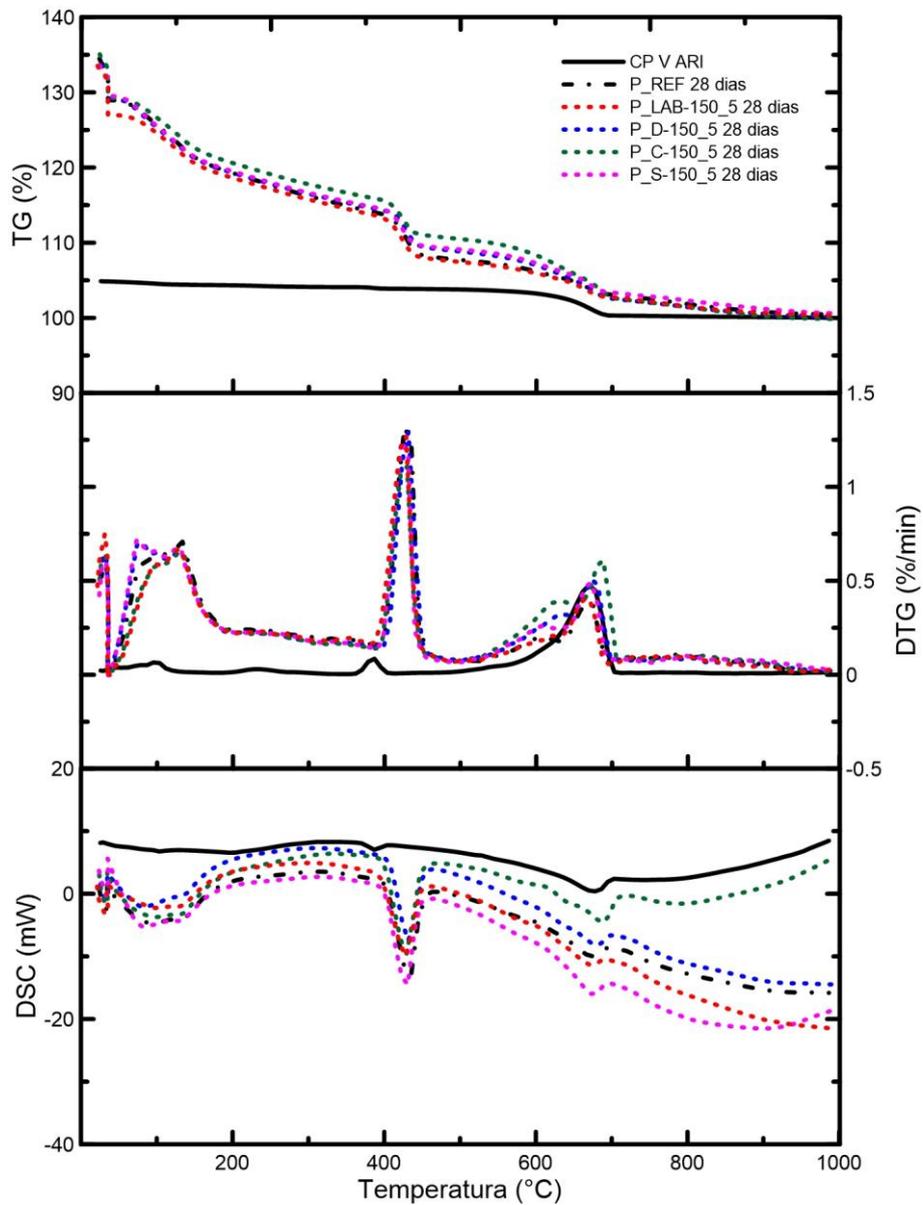


Gráfico 5.18 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 28 dias de cura

Na curva DSC a área dos picos referentes as três perdas de massa indicam a energia para desfazer as ligações e ter a desidratação ou descarbonatação de cada pico. Com 1 dia de cura, pela pasta com 5% de FRC-150 apresentar maior quantidade de C-S-H e etringita formado, ele gasta maior energia para desfazer estas ligações.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados do percentual de água livre, água da desidratação do C-S-H, etringita e gipsita, água combinada da CH, água combinada total, CH e carbonato de cálcio, calculados na base inicial da massa de cimento. A água livre presente nas amostras é água residual que não foi removida completamente durante a interrupção da hidratação. A porcentagem de água livre aumenta com o tempo devido ao endurecimento da pasta, que vai se tornando cada vez mais densa e passa a ser cada vez mais difícil removê-la.

Tabela 5.11 – Conteúdo percentual da pasta de referência e das pastas com 5% de FRC-150 e S-150, calculados na base inicial de cimento (em%)

Pasta	Idade (dias)	H ₂ O livre	H ₂ O do C-S-H, etringita e gipsita	H ₂ O da CH	H ₂ O combinada total	CH	CaCO ₃
P_REF	1	3,28	5,64	3,99	12,47	16,38	12,09
	28	5,23	9,41	5,90	20,04	24,25	10,27
P_LAB-150_5	1	4,28	6,10	3,67	12,48	15,07	18,56
	28	6,50	8,73	6,25	19,33	25,69	10,80
P_D-150_5	1	4,28	6,21	4,24	13,34	17,44	13,07
	28	4,46	10,21	5,47	20,20	22,50	14,72
P_C-150_5	1	2,53	7,39	3,38	12,86	13,90	8,64
	28	5,80	9,22	5,26	18,54	21,62	18,72
P_S-150_5	1	2,79	5,49	2,86	11,33	11,76	12,98
	28	4,00	6,13	5,21	19,29	21,42	5,77

Com a adição de 5% de FRC-150 em 1 dia de cura a quantidade de água combinada total se manteve praticamente constante, exceto para a mistura com D-150 que teve um aumento em relação à mistura de referência de 6,98%. Já a mistura com S-150 teve uma redução de 9,14%. Isto pode indicar que os FRC-150 provocam um efeito físico de diluição nas pastas nas primeiras idades e que estas não são completamente inertes, confirmando os resultados do estudo de calorimetria.

Ao se considerar o mesmo tipo de pasta, tem-se que o aumento do tempo leva a um incremento na quantidade de água combinada total (ver Gráfico 5.19.a), consequência do aumento dos produtos hidratados formados com o progresso das reações de hidratação, como é o caso do aumento da quantidade de Portlandita. Comparando-se os resultados das pastas com adições e da pasta de referência, a quantidade de água combinada total é praticamente constante, tendo uma leve diferença. Isto pode indicar que a adição de 5% dos finos não modifica tanto os produtos formados quando estes substituem o cimento.

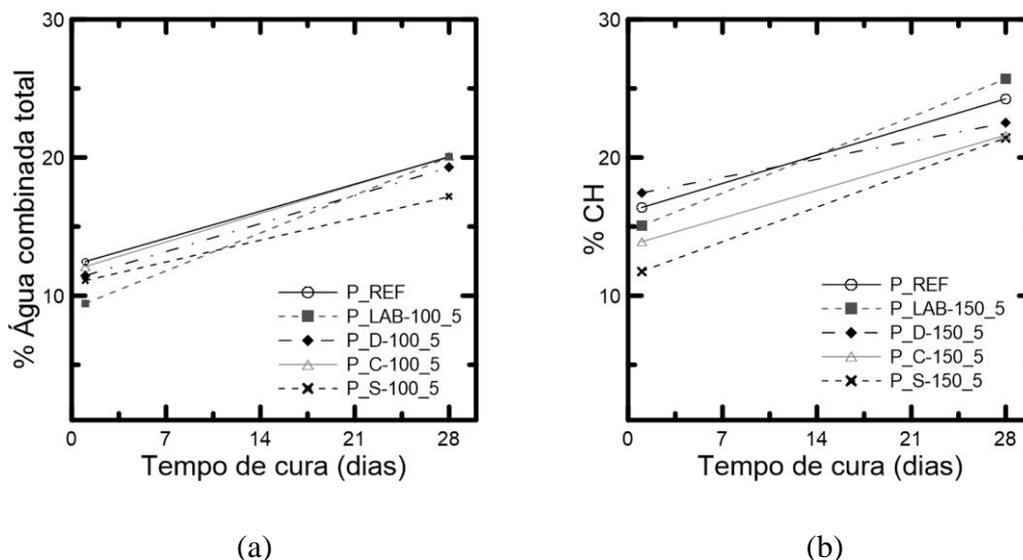


Gráfico 5.19 – (a) Conteúdo de água combinada total e (b) CH para as pastas com FRC-150

Apesar da pasta contendo D-150 aos 28 dias apresentar um leve aumento de quantidade de água combinada total e água combinada do C-S-H, etringita e gipsita, a pasta contendo 5% de LAB-150 apresentou maior quantidade de água combinada de portlandita (25,69%). Segundo Rocha (2015), como o cimento Portland CP V ARI utilizado nas pastas é composto basicamente de C_3S e C_2S , a quantidade de Portlandita das pastas indica diretamente o seu grau de hidratação. Deste modo, a maior quantidade de Portlandita na pasta com 5% de LAB-150 indica que esta estava mais hidratada para 28 dias (Gráficos 5.19.b).

5.2.3 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

A Tabela 5.12 apresenta os resultados de absorção total (A), índice de vazios (Iv) e massa específica real (ρ) com seus respectivos coeficientes de variação (%) para as pastas P_REF e pastas com as substituições de 5%, de cimento por FRC-150 e S-150.

As análises estatísticas mostraram que 5% de LAB-150 apresentou um aumento considerável em relação à mistura de referência tanto na absorção de água quanto no índice de vazios. Nota-se que o índice de vazios da mistura contendo C-150 teve um crescimento expressivo, embora sua absorção tenha sido considerada estatisticamente

igual à de referência. Os resultados de massa específica das pastas mostraram que ocorre um aumento significativo na massa específica real das pastas com 5% de D-150 e C-150. O maior valor de índice de vazios das pastas produzidas com C-150 corrobora com a maior massa específica real que pode ser associada a grande quantidade de produtos hidratados de baixa densidade quando se comparado às outras pastas com FRC.

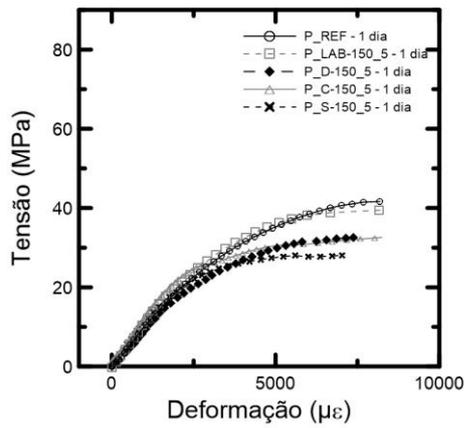
Tabela 5.12 – Resultados de absorção de água (A), índice de vazios (Iv) e massa específica real (ρ) das amostras curadas com substituições de 5% de FRC e sílica inerte

Mistura	A(%) – CV (%)	Iv (%) – CV (%)	ρ (g/cm ³) – CV (%)
P_REF	14,36 – 0,67	24,89 – 1,32	2,31 – 1,93
P_LAB-150_5	15,18 – 2,32	26,55 – 2,33	2,38 – 0,85
P_D-150_5	14,41 – 0,99	25,82 – 1,65	2,42 – 1,25
P_C-150_5	14,59 – 0,75	26,73 – 0,92	2,50 – 1,02
P_S-150_5	14,00 – 1,72	24,76 – 1,22	2,35 - 0,18

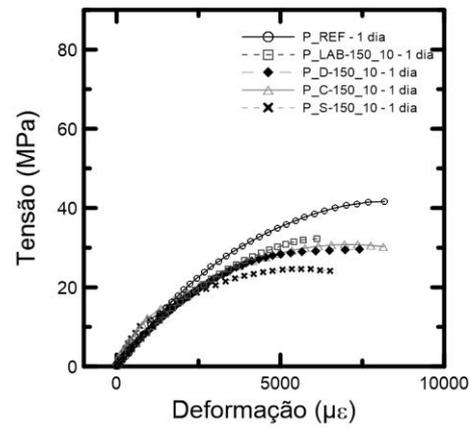
5.2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.2.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

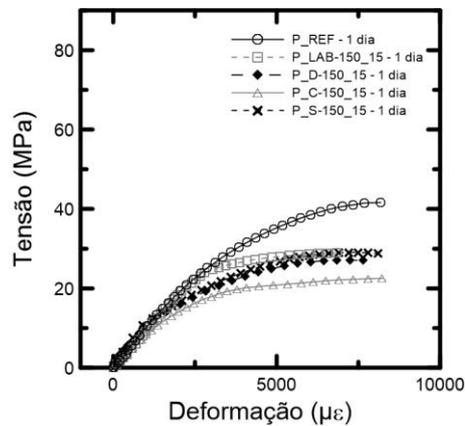
O Gráficos 5.20 a 5.23 apresentam as curvas típicas tensão *versus* deformação das pastas durante 1, 7, 28 e 63 dias. As Tabelas 5.13 a 5.16 apresentam os valores médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade com seus respectivos coeficientes de variação (CV).



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.20 – Tensão versus deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 1 dia

A análise estatística mostrou que para 1 dia a adição de FRC-150 e S-150 promoveu uma redução significativa da resistência à compressão axial em relação à mistura de referência, sendo esta redução maior quanto maiores os teores de substituição. O módulo de elasticidade da mistura de referência para 1 dia foi de 10,50 GPa, sendo estaticamente iguais para todas as misturas com LAB-150. As misturas produzidas com D-150 também são consideradas iguais à referência, exceto para a mistura com 15% de substituição, a qual apresentou uma redução de 14,38%. As misturas com 5% e 15% de C-150 e 10% de S-150 também tiveram uma redução considerável. Observa-se uma tendência de o módulo de elasticidade reduzir com o aumento do teor de substituição. As pastas tiveram alta deformação de pico, variando de

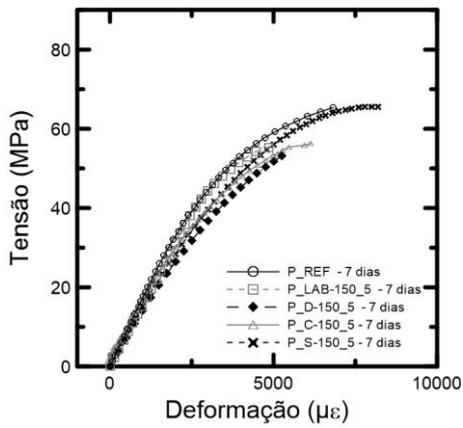
6515,39 $\mu\epsilon$ a 8884,92 $\mu\epsilon$ para as misturas com FRC-150 enquanto que a mistura de referência apresentou uma deformação de pico de 7978,50 $\mu\epsilon$.

Comparando as misturas de mesmo teor de FRC-150 de diferentes origens, nota-se que as misturas contendo LAB-150 apresentaram melhor resultado para 1 dia de cura, principalmente para 5% de substituição.

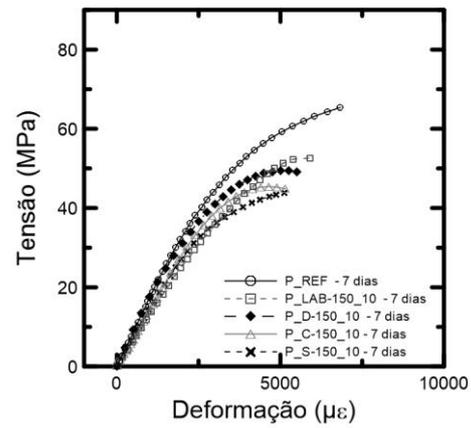
Tabela 5.13 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 1 dia

1 dia			
Pastas	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
P_REF	44,22 – 3,78	7978,50 – 6,66	10,50 – 0,89
P_LAB-150_5	39,66 – 2,91	7456,38 – 4,42	11,42 – 2,43
P_LAB-150_10	32,03 – 1,98	6515,39 – 4,28	9,05 – 3,93
P_LAB-150_15	28,47 – 4,42	7033,40 – 5,47	9,91 – 1,65
P_D-150_5	32,52 – 1,46	7593,13 – 2,81	11,28 – 3,16
P_D-150_10	30,31 – 3,51	7543,03 – 1,97	10,00 – 5,84
P_D-150_15	26,36 – 1,62	7190,29 – 3,14	8,99 – 7,35
P_C-150_5	33,07 – 1,85	8884,92 – 2,24	12,54 – 3,29
P_C-150_10	30,90 – 3,79	8582,19 – 2,92	11,63 – 6,07
P_C-150_15	19,81 – 2,84	8811,91 – 5,17	8,55 – 4,63
P_S-150_5	31,54 – 3,13	7251,11 – 2,70	11,09 – 3,36
P_S-150_10	24,81 – 3,08	6588,00 – 2,62	12,38 – 2,06
P_S-150_15	28,25 – 2,44	8561,39 – 4,90	11,54 – 3,57

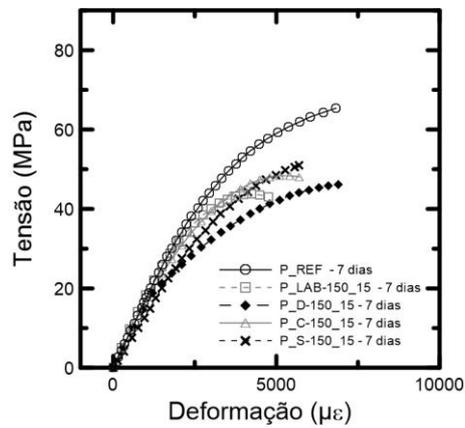
Com 7 dias a adição de FRC-150 e S-150 também provocou redução significativa na resistência à compressão axial, exceto para a mistura com 5% de S-150. Assim como em 1 dia, as análises mostraram que há uma tendência na redução da resistência com a inclusão de maior porcentagem de FRC-150 ou S-150. Os módulos foram considerados estaticamente diferentes para as misturas com 10% para todas as misturas estudadas e para misturas com 15% de substituição de cimento por D-150 e S-150. Ainda nesta idade constata-se que as pastas apresentaram altas deformações de pico, variando de 6963,50 $\mu\epsilon$ a 4840,44 $\mu\epsilon$, sendo estas menores que àsquelas de 1 dia.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.21 – Tensão versus deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 7 dias

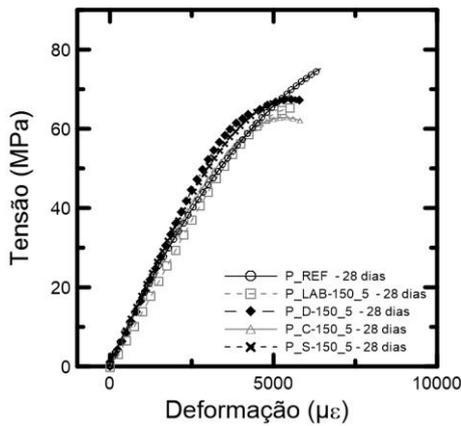
Assim como 1 dia de cura, as pastas produzidas com LAB-150 também apresentaram melhor resultado em relação às pastas produzidas com os outros FRC-150 de diferentes origens (com exceção de 15% de D-150, que apresentou o melhor resultado).

Tabela 5.14 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 7 dias

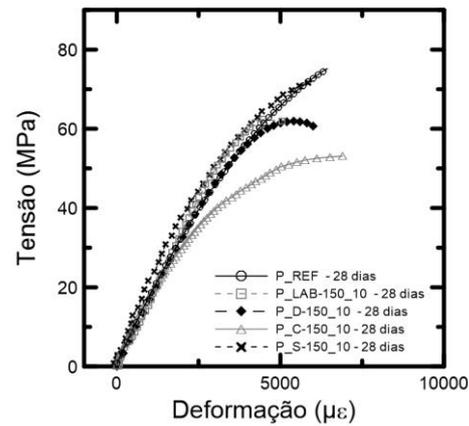
7 dias			
Pastas	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
P_REF	66,65 – 2,45	6849,67 – 3,30	16,05 – 4,58
P_LAB-150_5	54,58 – 1,37	5162,22 – 3,53	15,50 – 2,42
P_LAB-150_10	55,02 – 3,35	5911,06 – 3,22	13,55 – 4,24
P_LAB-150_15	42,78 – 3,73	4840,44 – 2,14	14,44 – 5,20
P_D-150_5	51,97 – 3,58	5490,42 – 2,61	14,89 – 1,04
P_D-150_10	49,82 – 3,04	5274,57 – 2,60	13,68 – 0,60
P_D-150_15	47,58 – 0,94	6963,50 – 6,54	13,38 – 3,74
P_C-150_5	54,06 – 4,94	6366,19 – 7,13	14,13 – 5,69
P_C-150_10	44,23 – 1,66	5119,20 – 2,13	14,25 – 1,99
P_C-150_15	47,58 – 0,94	5600,79 – 3,34	14,54 – 2,41
P_S-150_5	65,12 – 1,49	6685,08 – 1,55	16,05 – 0,71
P_S-150_10	45,95 – 3,52	5252,67 – 0,72	13,37 – 3,43
P_S-150_15	51,72 – 2,09	5752,29 – 2,24	13,53 – 4,77

Aos 28 dias de cura, as pastas produzidas com 5% de qualquer tipo de FRC-150 não apresentaram diferenças significativas entre elas. As misturas com 10% de substituição foram semelhantes, exceto para a mistura com C-150, que apresentou uma redução considerada, sendo de 19,62% e 11,22% em relação à pasta com LAB-150 e D-150, respectivamente. Acredita-se que este valor esteja relacionado à alta absorção de água deste material observados nos ensaios de reologia. Já as misturas com 15% de adição não apresentaram diferenças entre elas.

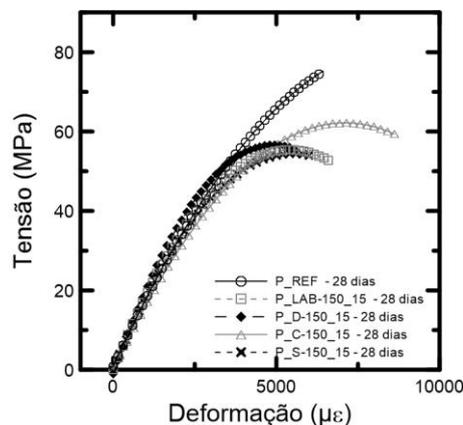
Vale ressaltar que para 28 dias a intrusão dos FRC-150 na matriz cimentícia não reduziu apenas o valor do teor adicionado. Por exemplo, a inclusão de 5% de LAB-150, D-150 e C-150 provocou uma queda da resistência de 11,88%, 15,72%, 16,91%, respectivamente. Já para 10% a resistência é reduzida em 18,70%, 18,47%, 28,21%, respectivamente. E com 15% de substituição estes valores caem para 25,24%, 20,68%, 27,38%, respectivamente. Isto pode ser um indicativo que independente da origem dos FRC-150 estudados, eles provocam redução da resistência na matriz cimentícia, mostrando que estes materiais apresentam baixa ou nenhuma reatividade. Entretanto, pode-se dizer que o fino tipo C-150 apresenta um pior comportamento quando comparado aos outros finos estudados.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.22 – Tensão versus deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5% (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 28 dias

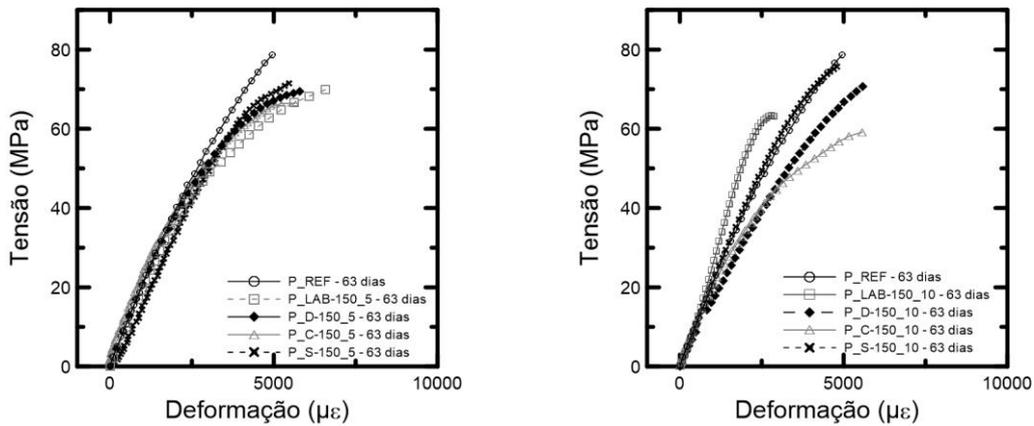
O módulo de elasticidade aos 28 dias permaneceu praticamente igual, exceto para as misturas com 5% de C-150, que teve uma redução expressiva significativamente. Além disso, verificou-se que nesta idade as deformações de pico foram menores quando comparadas às idades recentes, sendo de 6312,18 $\mu\epsilon$ para a mistura de referência, enquanto que as misturas com adições variam de 4051,42 $\mu\epsilon$ a 7059,03 $\mu\epsilon$.

Tabela 5.15 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 28 dias

28 dias			
Pastas	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
P_REF	74,17 – 1,52	6312,18 – 1,69	17,35 – 0,72
P_LAB-150_5	65,36 – 1,29	5653,57 – 8,45	18,92 – 1,38
P_LAB-150_10	60,30 – 3,05	4051,42 – 1,82	17,42 – 2,44
P_LAB-150_15	55,45 – 1,54	4414,73 – 2,65	16,86 – 3,47
P_D-150_5	62,51 – 3,11	5488,57 – 2,89	19,09 – 2,44
P_D-150_10	60,47 – 3,55	5300,42 – 6,09	16,70 – 3,55
P_D-150_15	58,83 – 3,94	5390,23 – 3,26	16,88 – 0,17
P_C-150_5	61,63 – 3,33	5840,86 – 3,85	19,77 – 1,90
P_C-150_10	53,25 – 2,83	6885,57 – 2,79	16,67 – 4,15
P_C-150_15	55,14 – 3,69	7059,03 – 2,91	17,31 – 6,78
P_S-150_5	67,25 – 3,50	5806,86 – 5,73	17,03 – 5,49
P_S-150_10	68,43 – 2,33	5973,81 – 1,30	18,35 – 1,03
P_S-150_15	53,86 – 2,08	6054,68 – 2,24	16,46 – 4,25

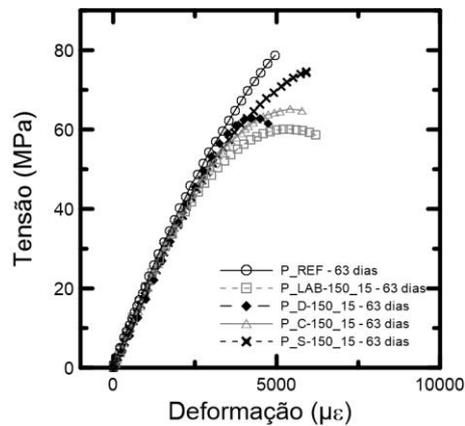
Para a idade mais avançada estudada, algumas misturas tiveram um aumento significativo da resistência com o avanço de 28 para 63 dias de cura. A mistura de referência teve um aumento significativo da resistência de 28 para 63 dias de 7,55%, enquanto que as misturas com 5% de LAB-150 e 10% de D-150 tiveram um acréscimo de 5,26% e 20,65%, respectivamente. Na mistura com C-150, percebe-se que a pequena adição de 5% de C-150 não provocou grandes mudanças no aumento da resistência para estas idades, entretanto, com o aumento do teor de substituição para 10% e 15% houve um aumento de 12,24% e 14,20%, respectivamente.

Com 63 dias, a maioria das pastas sofre uma ruptura frágil devido ao alto valor de resistência à compressão. Apenas os resultados de resistência à compressão das pastas com 10% de D-150 e 10% e 15% de S-150 foram estatisticamente iguais à mistura de referência. Os módulos de elasticidade também foram considerados similares, exceto para a mistura com 10% de substituição do cimento por D-150, a qual teve uma redução expressiva de 13,07%. A deformação de pico da referência caiu para 5296,37 $\mu\epsilon$ e as deformações das pastas produzidas com FRC-150 variaram de 4547,12 $\mu\epsilon$ a 7122,30 $\mu\epsilon$.



(a)

(b)



(c)

Gráfico 5.23 – Tensão versus deformação da pasta de referência e das pastas com (a) 5%, (b) 10% e (c) 15% de substituição de FRC-150 e S-150 para 63 dias

Comparando as origens dos FRC utilizados, aos 63 dias os resultados das misturas com D-150 apresentaram melhores valores de resistência à compressão, com exceção da mistura com 5%, perdendo para a pasta com LAB-150.

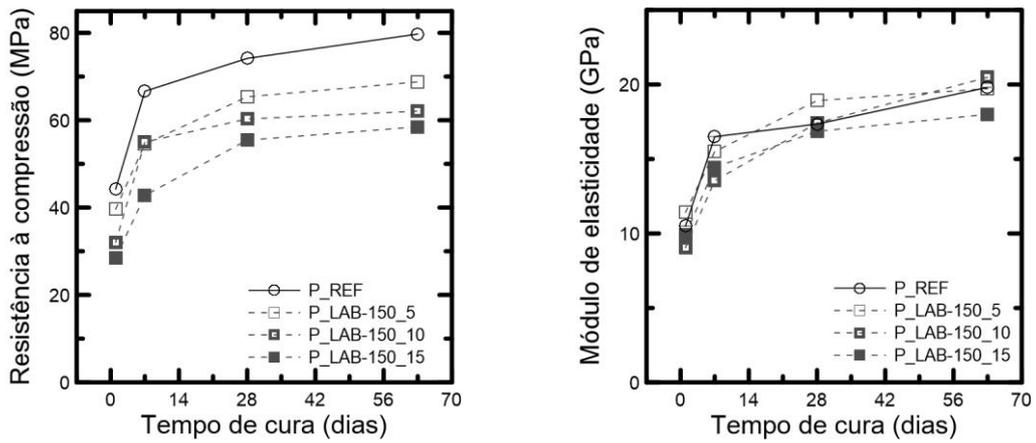
Observou-se que para todas as misturas com FRC-150 e em todas as idades de cura avaliadas, as resistências à compressão foram menores do que a da pasta de referência. Esta redução na resistência está em consonância com a menor formação de produtos hidratados indicada nos ensaios de calorimetria isotérmica até 7 dias. Isto era esperado, visto que as misturas apresentam redução do teor de cimento com a inclusão de materiais inertes, pouco reativos, que provocam o efeito de diluição.

Tabela 5.16 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-150 e S-150 com 63 dias

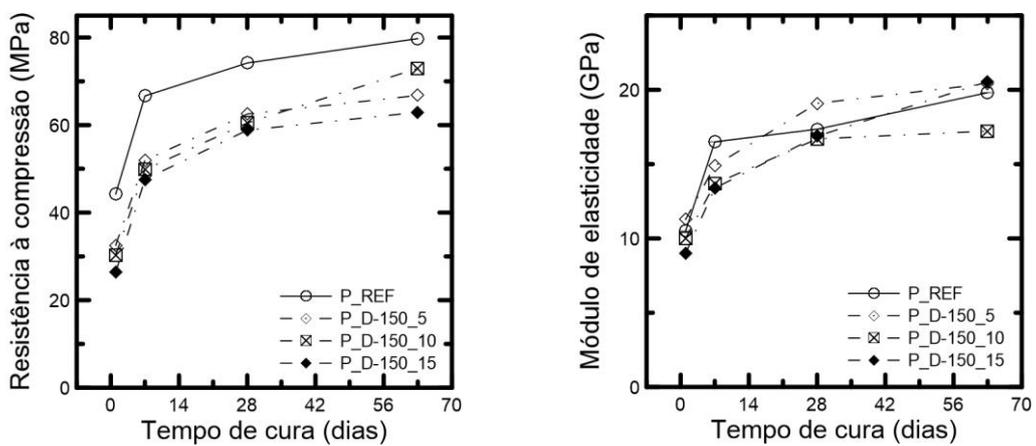
63 dias			
Pastas	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
P_REF	79,74 – 2,45	5296,37 – 2,60	19,81 – 0,59
P_LAB-150_5	68,79 – 2,88	7122,30 – 5,54	19,72 – 2,48
P_LAB-150_10	62,10 – 2,07	5910,57 – 8,93	20,49 – 2,01
P_LAB-150_15	58,49 – 4,68	4547,12 – 2,65	18,00 – 0,23
P_D-150_5	66,78 – 2,35	5926,25 – 3,62	20,42 – 3,55
P_D-150_10	72,96 – 1,14	5685,73 – 7,55	17,22 – 1,61
P_D-150_15	62,91 – 1,74	4903,91 – 5,66	20,56 – 7,85
P_C-150_5	65,90 – 3,07	5883,30 – 1,70	20,30 – 0,86
P_C-150_10	59,77 – 2,22	5807,70 – 2,89	20,65 – 2,22
P_C-150_15	62,97 – 2,29	5242,40 – 1,73	18,72 – 2,00
P_S-150_5	71,13 – 6,54	5577,24 – 6,62	17,79 – 2,34
P_S-150_10	75,05 – 1,09	5979,90 – 4,62	19,07 – 1,20
P_S-150_15	74,06 – 3,46	5905,38 – 2,51	19,09 – 3,80

Os Gráficos 5.24 apresentam um resumo do crescimento da resistência à compressão axial e do módulo elástico para cada adição com seu respectivo teor de substituição em função da idade de cura. Estes resultados do comportamento mecânico podem ser um indicativo que independente da origem dos FRC-150 estudados, eles provocam redução da resistência na matriz cimentícia, mostrando que estes materiais apresentam baixa ou nenhuma reatividade. Entretanto, pode-se dizer que o fino tipo C-150 apresenta um pior comportamento quando comparado aos outros finos estudados.

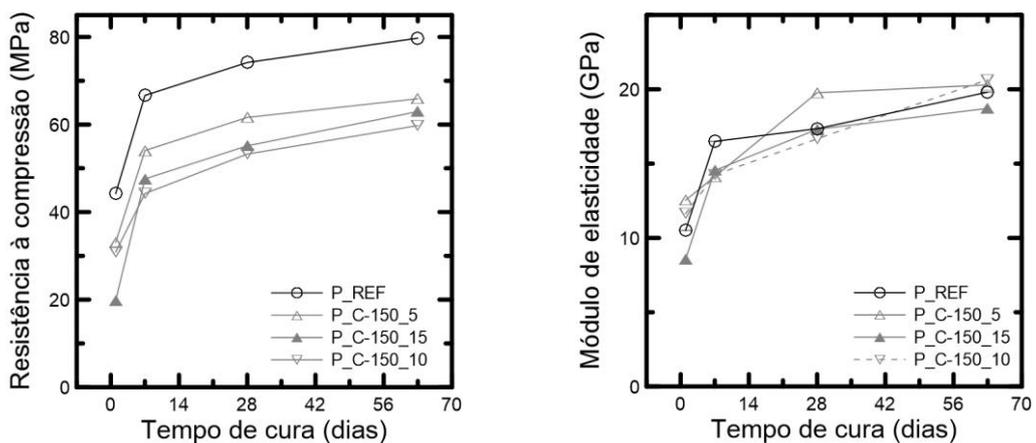
Os Gráficos 5.25 apresentam o crescimento da resistência à compressão axial e do módulo elástico para as misturas produzidas com sílica inerte. Os altos valores de resistência de todas as idades estudadas das pastas produzidas com S-150 podem estar relacionados ao fato deste material apresentar partículas menores que 20% de partículas mais finas que 20 μm em relação aos FRC-150 estudados, conforme discutido no item 5.1.1. Entretanto ele ainda é significativamente diferente em relação à mistura de referência, pois se trata de uma inclusão de um material não reativo.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.24 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com (a) LAB-150, (b) D-150, (c) C-150

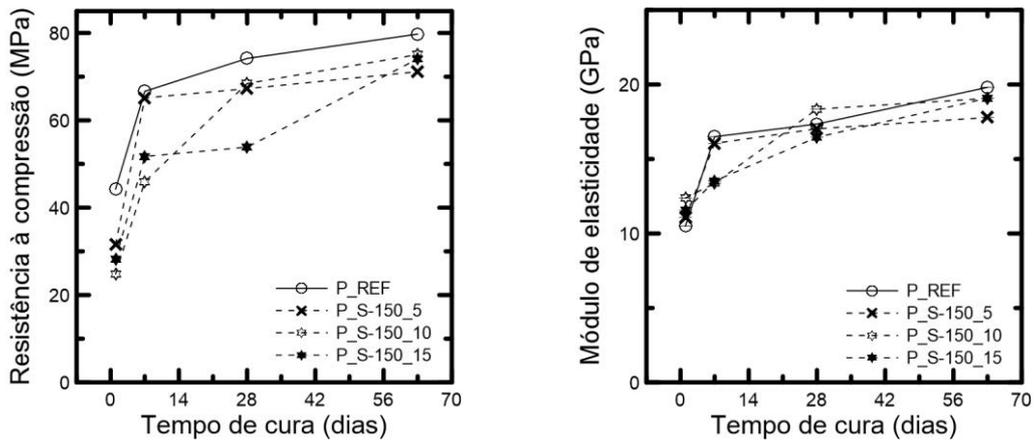
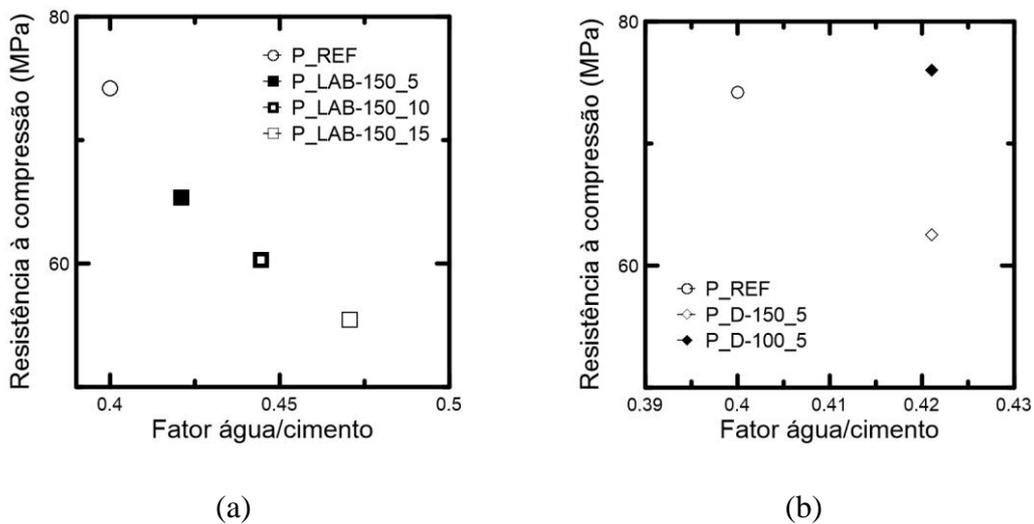
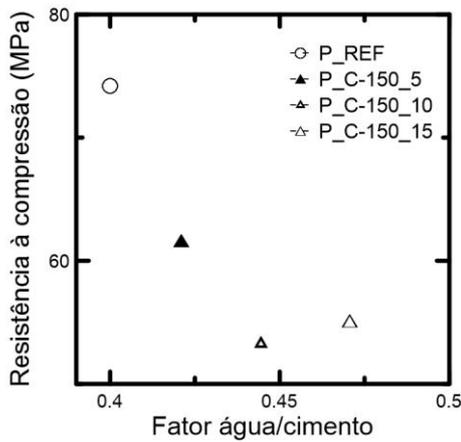


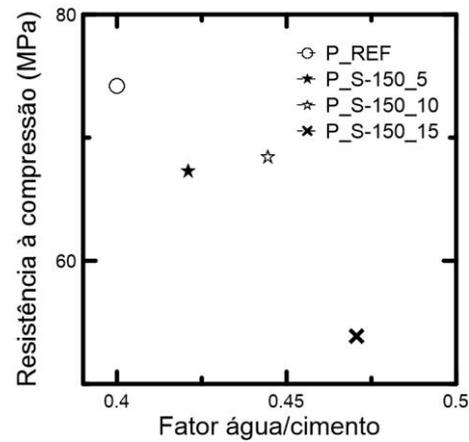
Gráfico 5.25 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com S-150

Outra análise que deve ser considerada na resistência à compressão é que agora sabe-se que o fator água/cimento para as misturas com 5%, 10% e 15% são diferentes da mistura de referência pois os FRC-150 são materiais que apresentam baixa ou nenhuma reatividade. Desta maneira, enquanto que a mistura de referência apresenta fator água/cimento de 0,40, as misturas com 5%, 10% e 15% apresentam água/cimento de 0,42, 0,44 e 0,47 respectivamente. Isto também evidencia os menores valores da resistência para maiores teores de substituição, pois, pela lei de Abrams, quanto maior o fator água/cimento, menor é a resistência (ver Gráfico 5.26).





(c)



(d)

Gráfico 5.26 – Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento da pasta de referência e misturas com (a) LAB-150, (b) D-150, (c) C-150 e (d) S-150 aos 28 dias

5.2.4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 5.17 apresenta os valores médios de resistência à tração por compressão diametral com seus respectivos coeficientes de variação (CV). De modo geral, verificou-se que a resistência à tração por compressão diametral seguiu a mesma tendência que a resistência por compressão axial, com o decorrer do tempo de cura ocorreu o aumento da resistência (ver Gráfico 5.27) e com o aumento do percentual de substituição há redução da resistência à tração para o mesmo tipo de adição utilizada.

Observou-se que para 28 dias, apenas o resultado de resistência à tração por compressão diametral da pasta produzida com 5% de LAB-150 foi estatisticamente igual à mistura de referência. Esta pasta, quando comparada à outras misturas com adições de FRC-150, também foi a que apresentou melhor resultado.

As pastas produzidas com LAB-150 e D-150 tiveram a redução da resistência de tração com o aumento do teor de substituição, que também foi observado para o caso da resistência à compressão. Contraditoriamente, quanto maior o teor utilizado do fino tipo C-150, maior foi a resistência alcançada.

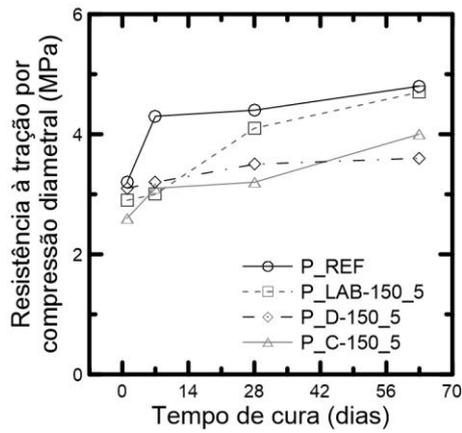
Tabela 5.17 – Valores médios de resistência à tração por compressão diametral para as pastas curadas em diferentes idades com os respectivos coeficientes de variação (CV%)

Resistência à tração por compressão diametral (MPa) – CV%				
Pastas	1 dia	7 dias	28 dias	63 dias
P_REF	3,2 – 3,3	4,3 – 2,8	4,4 – 4,1	4,8 – 3,1
P_LAB-150_5	2,9 – 3,3	3,0 – 3,4	4,1 – 4,8	4,7 – 4,3
P_LAB-150_10	3,0 – 6,8	3,5 – 6,8	3,6 – 6,6	3,9 – 6,0
P_LAB-150_15	2,3 – 7,9	2,7 – 5,3	3,6 – 3,9	3,9 – 2,1
P_D-150_5	3,1 – 3,4	3,2 – 3,6	3,5 – 2,4	3,6 – 7,1
P_D-150_10	2,6 – 8,9	3,0 – 6,1	3,2 – 5,9	4,0 – 5,6
P_D-150_15	2,5 – 2,4	3,1 – 4,8	3,3 – 4,5	3,8 – 3,4
P_C-150_5	2,6 – 3,1	3,1 – 4,7	3,2 – 4,2	4,0 – 8,8
P_C-150_10	2,6 – 2,9	3,2 – 2,2	3,4 – 2,8	5,0 – 8,1
P_C-150_15	2,7 – 5,7	3,4 – 5,2	3,6 – 2,7	3,9 – 1,6

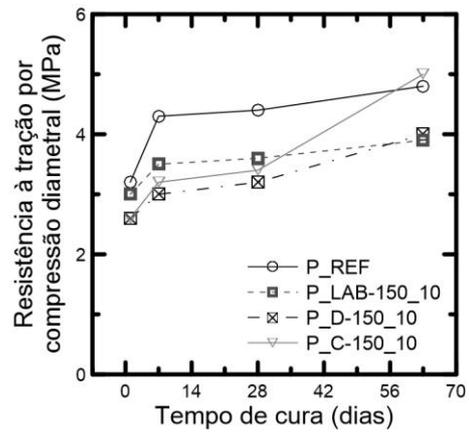
A Tabela 5.18 mostra a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência por compressão axial (ft/fc) nas diferentes idades avaliadas. Para 28 dias, a relação de ft/fc da pasta de referência foi de 5,93%, enquanto que para as misturas produzidas com FRC-150 variou de 5,19% a 6,49%. Percebe-se que o ft/fc diminui com o aumento da resistência.

Tabela 5.18 – Relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial para as pastas curadas em diferentes idades

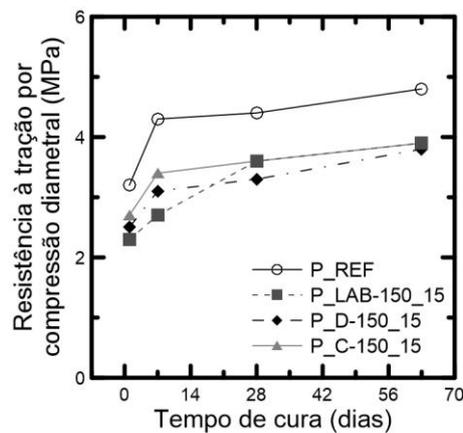
ft/fc (%)				
Pastas	1 dia	7 dias	28 dias	63 dias
P_REF	7,96	6,45	5,93	6,02
P_LAB-150_5	7,31	5,50	5,97	5,96
P_LAB-150_10	9,37	6,36	5,97	6,28
P_LAB-150_15	8,08	6,31	6,49	6,67
P_D-150_5	9,53	6,16	5,60	5,39
P_D-150_10	8,58	6,02	5,29	5,48
P_D-150_15	9,48	6,74	5,61	6,04
P_C-150_5	7,86	5,73	5,19	6,07
P_C-150_10	8,41	7,23	6,38	8,37
P_C-150_15	13,63	7,15	6,53	6,19



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.27 – Crescimento da resistência à tração por compressão diametral em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com (a) 5%, (b) 10% e (c) 15%

5.2.5 POROSIMETRIA

A porosidade das pastas aferidas aos 28 dias é classificada em faixas de tamanho e é mostrada nas curvas de distribuição de tamanho de poros no Gráfico 5.28 e na Tabela 5.19. Nota-se que em relação ao diâmetro dos poros, os resultados obtidos indicam que as pastas possuem predominantemente poros capilares grandes e capilares médios.

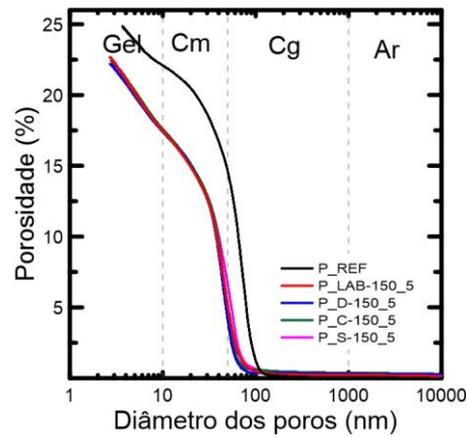
Tabela 5.19 – Classificação da porosidade das pastas curadas aos 28 dias

	Gel (%)	Capilares médios (%)	Capilares grandes (%)	Ar (%)	Porosidade total (%)
P_REF	2,77	7,48	14,59	0,02	24,86
P_LAB-150_5	5,2	12,28	4,95	0,22	22,65
P_LAB-150_10	5,96	14,74	3,87	0,22	24,79
P_LAB-150_15	6,05	14,47	4,77	0,16	25,45
P_D-150_5	4,7	13,31	3,80	0,30	22,11
P_D-150_10	4,87	13,4	6,12	0,18	24,57
P_D-150_15	5,44	13,09	6,61	0,24	25,38
P_C-150_5	4,86	12,76	4,46	0,37	22,45
P_C-150_10	5,47	13,18	4,53	0,16	23,34
P_C-150_15	6,36	14,24	4,41	0,51	25,52
P_S-150_5	4,53	10,93	6,42	0,23	22,11
P_S-150_10	4,66	14,19	4,44	0,21	23,50
P_S-150_15	6,32	15,28	1,97	0,23	23,80

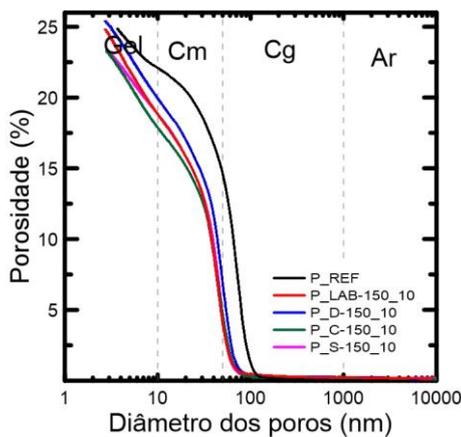
A porosidade foi aferida até o diâmetro de poro 3,7 nm para a mistura P_REF, enquanto que as outras misturas, o diâmetro mínimo do poro foi de 2,8 nm, ambos contemplando uma pequena parte dos poros das fases hidratadas (gel). Em todos os ensaios a pressão máxima aplicada durante o procedimento foi de 400 MPa.

Com as curvas obtidas, observou-se um substancial refinamento de poros com a adição de FRC e da sílica inerte, com a redução dos poros capilares grandes e formação de poros capilares médios e gel. Nota-se que, tanto com a adição de FRC-150, quanto de sílica inerte na matriz cimentícia, fez-se com que estes materiais preenchessem os poros capilares grandes da pasta de referência (14,59%) transformando-os em poros capilares médios nas pastas com adição. Por exemplo, as pastas P_LAB-150_5, P_LAB-150_10, P_LAB-150_15 apresentaram 12,28%, 14,74% e 14,47% para poros capilares grandes e 4,95%, 3,87% e 4,77% para poros capilares médios, respectivamente.

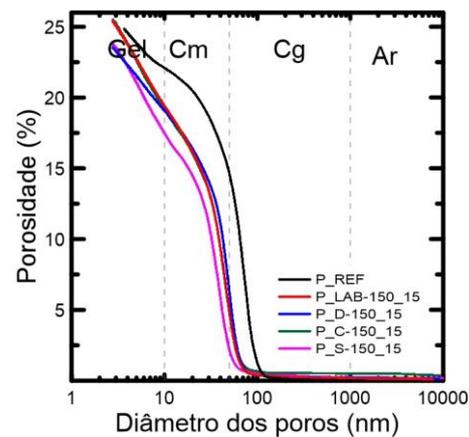
Observa-se que a porosidade total variou de 22,11% a 25,38%. Para 5% de substituição, as misturas apresentaram um decréscimo de até 11% na porosidade, enquanto que pastas com 15% de substituição tiveram um acréscimo menores que 3%, independente da natureza dos FRC-150.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.28 – Distribuição de tamanho de poros da mistura de referência e pastas contendo (a) 5%; (b) 10%; (c) 15% de substituição

As pastas com S-150 tiveram sua porosidade total reduzida, independente do teor de substituição utilizado, indicando aumento da eficiência da resistência mecânica em relação aos FRC-150. Comparando os teores de substituição, quanto maior o teor de substituição maior é a porosidade da pasta, corroborando com os resultados de resistência à compressão axial. Entretanto são necessários maiores estudos para melhor compreensão dos resultados pois que pode estar relacionado ao empacotamento das misturas secas.

Vale ressaltar que os resultados da porosidade por intrusão de mercúrio foram bem semelhantes aos resultados da porosidade acessível à água do ensaio de índice de vazios (ver Tabela 5.12).

Observando-se os dados da Tabela 5.20, o diâmetro crítico reduziu com a adição de FRC ou sílica nas pastas. Este fato indica que a rede de poros conectados nas pastas com adições é composta principalmente por poros menores do que o observado na P_REF, comprovando os dados da Tabela 5.19.

Tabela 5.20 – Diâmetro crítico (Dcr) e diâmetro limite (DI) das pastas estudadas

	Dcr (nm)	DI (nm)
P_REF	65,6	43,7
P_LAB-150_5	46,0	18,6
P_LAB-150_10	48,0	16,2
P_LAB-150_15	49,0	18,1
P_D-150_5	39,2	20,9
P_D-150_10	49,8	19,0
P_D-150_15	51,6	20,8
P_C-150_5	48,8	19,9
P_C-150_10	47,7	19,8
P_C-150_15	50,2	18,6
P_S-150_5	54,6	24,9
P_S-150_10	47,8	21,2
P_S-150_15	41,7	22,0

5.3 PROPRIEDADES DA DAS PASTAS COM FRC-100 e S-100

5.3.1 REOLOGIA

5.3.1.1 MINI ESPALHAMENTO

A Tabela 5.21 apresenta os valores de espalhamento obtidos no ensaio de espalhamento no mini-tronco de cone. Ao se comparar os resultados obtidos com os resultados das pastas com materiais de granulometria inferior a 150 μm (ver Tabela 5.7), percebeu-se que a exclusão de partículas grossas não alterou muito a trabalhabilidade das pastas e o índice de consistência também foi bem próximo da mistura de referência, exceto para a pasta com 5% de C-100, a qual possui um espalhamento um pouco menor devido à alta absorção desse tipo de finos.

Os resultados mostram que as pastas produzidas com diferentes FRC-100 e S-100 também possuem consistências semelhantes entre elas, tendo um espalhamento dentro da faixa de referência (50 ± 10 mm).

Tabela 5.21 – Média dos resultados do ensaio de espalhamento

Pasta	Índice de consistência (mm)
P_REF	$55 \pm 0,5$
P_LAB-100_5	$55 \pm 0,1$
P_D-100_5	$54 \pm 0,1$
P_C-100_5	$45 \pm 0,4$
P_S-100_5	$55 \pm 0,1$

5.3.2 ESTUDO DE HIDRATAÇÃO

5.3.2.1 ENSAIO DE CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

Os Gráficos 5.29 apresentam as curvas de fluxo de calor *versus* tempo e calor acumulado *versus* tempo obtidas no tempo total de ensaio de calorimetria isotérmica a 27 °C (160 horas) e a Tabela 5.22 mostra as características do período de indução, do período de aceleração e o calor acumulado total das pastas com FRC-100 e S-100. Devido a problemas técnicos, o ensaio da pasta P_S-38_5, assim como a pasta com 15% de C-150, não foi concluído. As misturas foram analisadas até 24 horas de ensaio (período de indução e aceleração concluídos (ver Gráfico 5.29.c).

Observou-se que a redução da faixa granulométrica para FRC-100 nas misturas fez com que o período de indução fosse reduzido, tanto em relação à mistura de referência quanto em relação às misturas com 5% de FRC-150 (ver Tabela 5.9). Por exemplo, para as misturas contendo 5% de LAB-100, D-100, C-100, reduziu-se em 62,69%, 54,6%, 72,22% e 38,10%, em relação à pasta de referência; e 71,34%, 27,85%, 73,48% em relação às misturas contendo 5% de cada tipo de FRC-150, respectivamente. A mistura com S-100 teve uma redução de 38,10% em relação à mistura de referência e aumentou 8,33% em relação à pasta produzida com 5% de S-150. Isto mostra que a partículas de FRC de faixa granulométrica similar ao cimento Portland fazem com que a

hidratação ocorra mais rapidamente, muito provavelmente devido ao efeito de nucleação destes materiais.

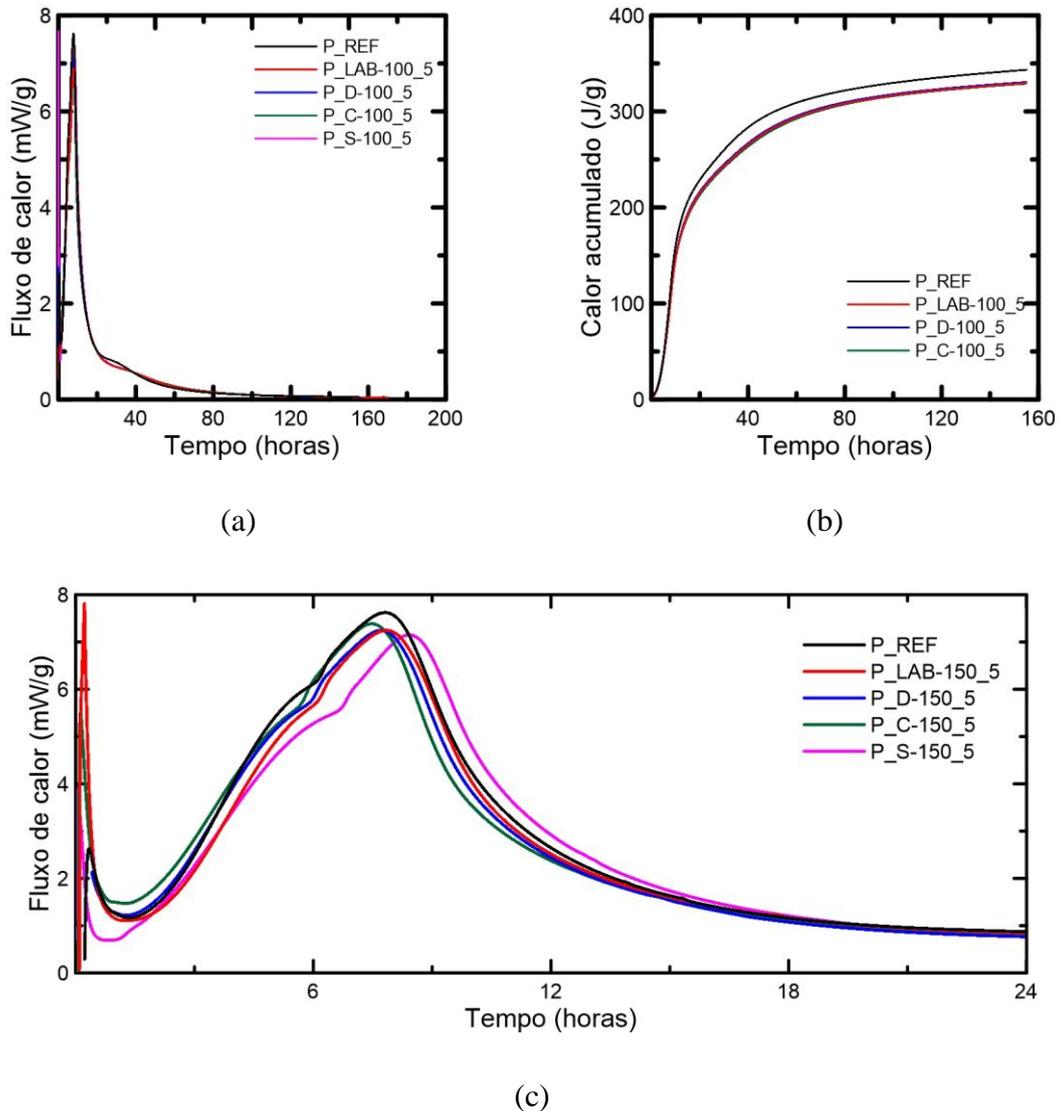


Gráfico 5.29 – (a) Curva de liberação de calor durante 160 horas; Calor acumulado durante tempo total de ensaio (160h); (c) Curva de liberação de calor durante 24 horas para a mistura de referência e misturas com 5% de FRC-100 e S-100

Contudo, no período de aceleração notou-se que todas as pastas com FRC-100 apresentaram redução da inclinação da curva no período de aceleração tendo, portanto, a taxa de reação reduzida, sendo menor em comparação à pasta de referência e também às pastas produzidas com 5% das adições de FRC-150. A taxa de reação, em relação à mistura de referência, reduziu em 34,06%, 32,61%, 35,51% e 30,43% para as pastas com 5% de LAB-100, D-100, C-100 e S-100, respectivamente. Apesar disto, observou-

se aumento na duração do período de aceleração em relação à mistura de referência e também das misturas com 5% de FRC-150 (ver Tabela 5.9).

Tabela 5.22 – Dados dos períodos de hidratação e calor acumulado das pastas estudadas

	Período de Indução		Período de aceleração				Calor total acumulado (J/g)	
	Duração (h)	Fluxo de calor (mW/g)	Início (h)	Fim (h)	Duração (h)	Taxa de reação k		Fluxo de calor máximo (mW/g)
P_REF	1,26	1,12	1,99	7,93	5,94	1,38	7,62	343
P_LAB-100_5	0,47	1,03	1,17	7,99	6,82	0,91	6,91	332
P_D-100_5	0,57	1,05	1,33	8,07	6,74	0,93	7,09	333
P_C-100_5	0,35	1,20	1,11	7,71	6,59	0,89	7,04	331
P_S-100_5	0,78	0,82	1,16	8,23	7,07	0,96	7,33	285*

* Ensaio não foi completado. Calor acumulado até 44h de ensaio.

No fim do período de aceleração, as pastas também apresentaram o pico referente à hidratação do C₃S e à exaustão do sulfato de cálcio, caracterizado pela hidratação dos aluminatos. Notou-se que a intensidade do pico referente à exaustão do sulfato foi reduzida, como também observado com as pastas com FRC-150, sendo ainda menores quando comparadas com pastas com 5% com adição de material de granulometria até 150 µm (ver Tabela 5.9). Entretanto, a taxa máxima foi bastante semelhante entre os FRC-100 estudados.

A taxa de reação da mistura com sílica inerte foi maior quando comparada aos FRC-100. Isto é esperado visto que a sílica inerte apresenta 23% de partículas menores que 10 µm que são menores que os FRC-100 estudados, conforme apresentado no item 5.1.2.

O calor total acumulado das pastas foi reduzido em relação à pasta de referência, sendo menores que o teor de adição de LAB-100 (3,21%), D-100 (2,92%) e C-100 (3,50%), o que indica que a redução da granulometria aumentou a reatividade dos finos estudados, sendo melhor para o tipo D-100. Além disso, é importante notar que para a pasta produzida com D-100, teve um aumento de 5,71% no calor total acumulado em relação a mistura com D-150. Isto pode ter ocorrido pela redução da quantidade de quartzo presentes nos finos D-100 e pode indicar que a pasta com 5% de adição de D-100 apresentará maior quantidade de produtos hidratados em relação à pasta com 5% de

adição de D-150. Em relação à origem dos FRC-100, percebe-se que o calor acumulado total não variou muito entre eles, indicando que para a mesma granulometria a uma pequena porcentagem de substituição a origem do RCD não influenciou o ensaio de calorimetria.

Como o ensaio não foi concluído para a pasta P_S-38_5 não há como afirmar o valor total de calor acumulado. Mas é possível observar que há uma tendência de o fluxo de calor máximo também ser maior, quando comparado às misturas com S-150 e FRC-100 menor, quando comparado à mistura de referência.

5.3.2.2 IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS PRODUTOS HIDRATADOS POR ANÁLISE TÉRMICA

Os Gráficos 5.30 e 5.31 apresentam os resultados das análises térmicas realizadas nas pastas hidratadas durante 1 e 28 dias, respectivamente, em comparação a análise térmica do cimento Portland anidro. Assim como no caso das misturas com FRC-150, elas foram transformadas em relação à base inicial da massa de cimento Portland utilizado.

São observadas as mesmas perdas de massa e de picos da DTG e DSC na mesma faixa de temperatura das misturas de referência e produzidas com FRC-150 e S-150. Quando se compara a curva da DTG do cimento Portland anidro com as misturas analisadas, elas também apresentam retardo na curva de desidratação do hidróxido de cálcio.

A Tabela 5.23 apresenta os resultados do percentual de água livre, água da desidratação do C-S-H, etringita e gipsita, água combinada da CH, água combinada total, CH e carbonato de cálcio, calculados na base inicial da massa de cimento Portland.

Quando comparados à pasta de referência, tem-se que os resultados de água combinada total para 1 dia das pastas diminuíram em 24,30%, 8,18%, 2,87% e 11,07% para LAB-100, D-100, C-100 e S-100, respectivamente. Em relação à granulometria, as pastas produzidas com 5% de LAB-100, D-100, C-100 e S-100 também foram reduzidas em 24,36%, 14,17%, 5,83% e 2,12% em relação às misturas de mesmo

material de maior granulometria (FRC-150 e S-150). Isto comprova a menor taxa de reação do estudo de calorimetria isotérmica em relação à mistura de referência e às misturas com FRC-150 e S-150.

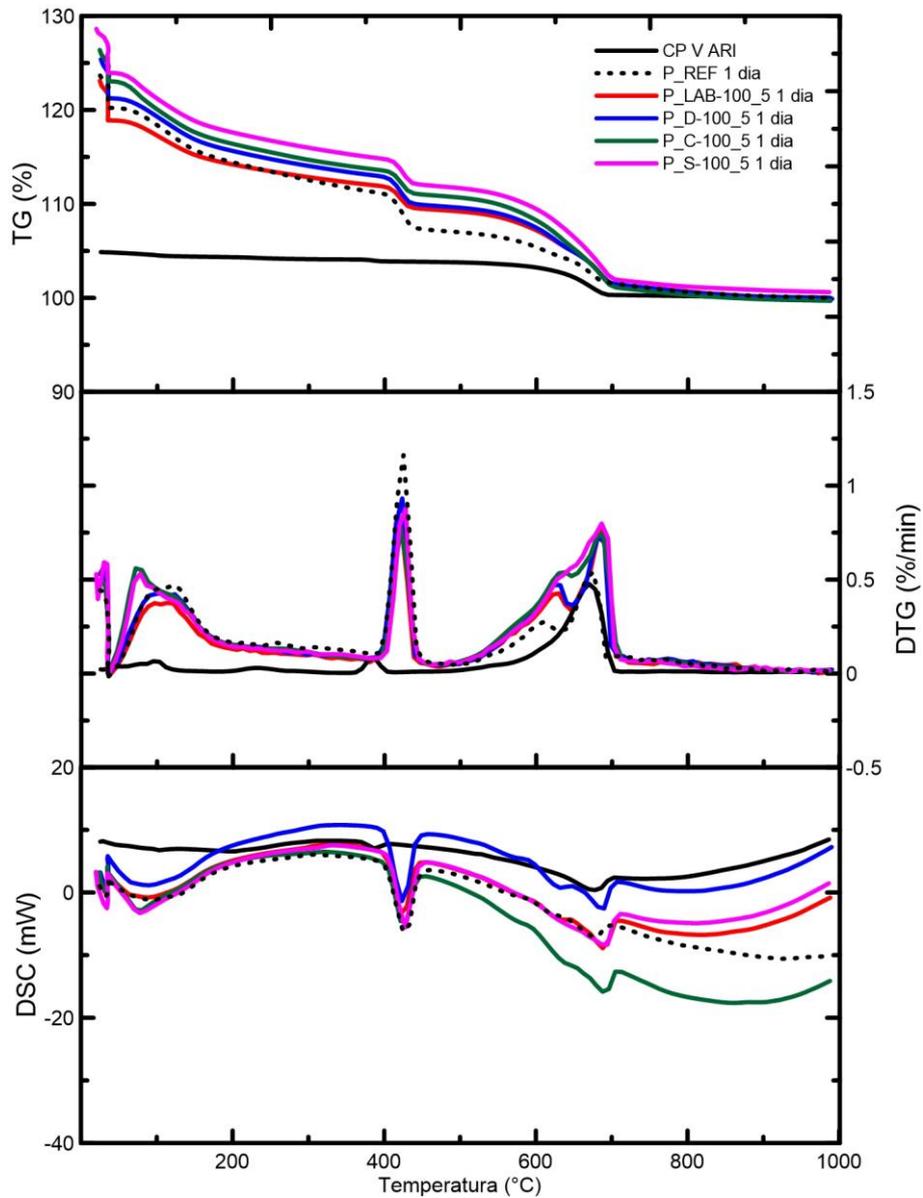


Gráfico 5.30 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 1 dia de cura

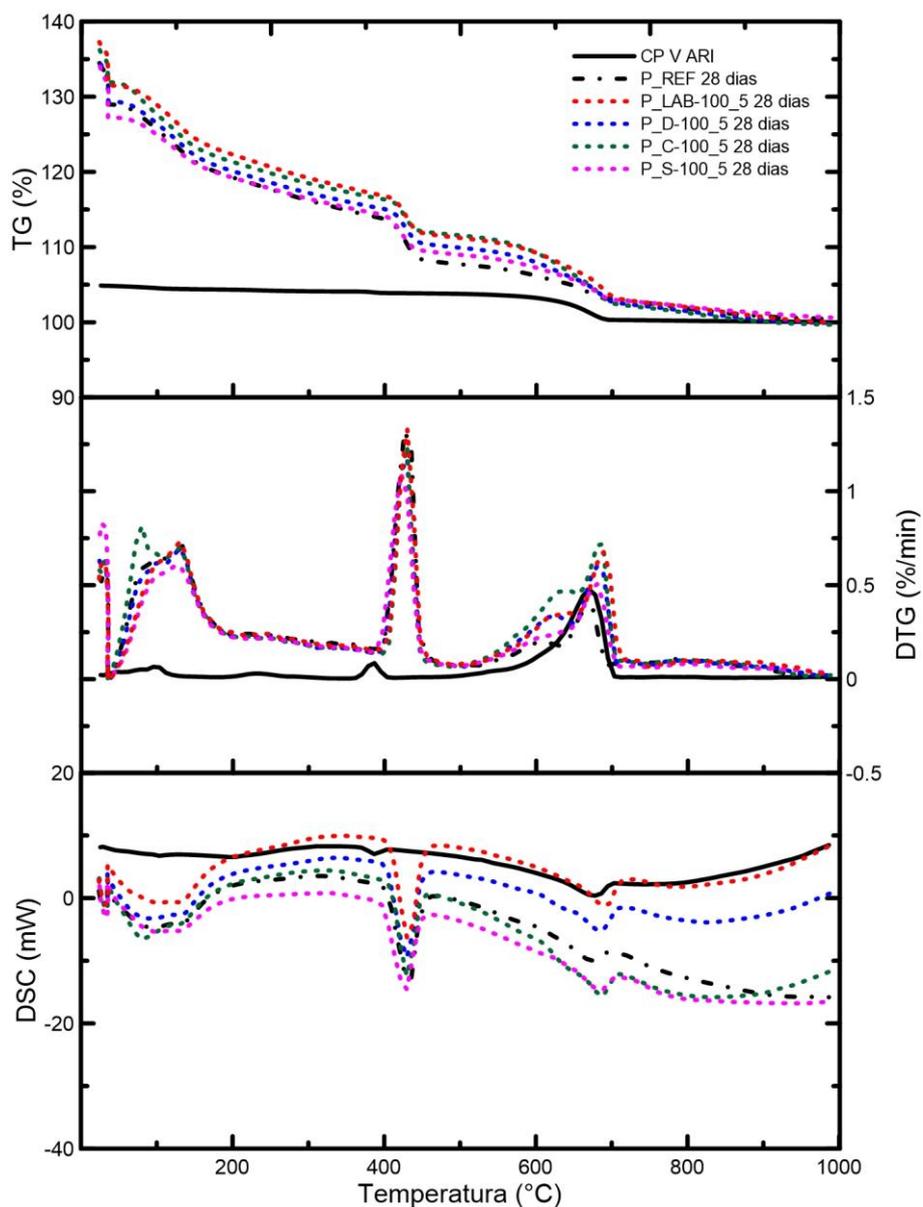


Gráfico 5.31 – Análise térmica para pastas de referência e pastas com 5% de substituição de FRC-150 e S-150 a 28 dias de cura

Com o decorrer do tempo, há continuidade da reação de hidratação e formação de mais produtos hidratados (ver Gráfico 5.32.a), porém a quantidade de água quimicamente ligada das misturas com FRC-100 foi levemente menor do que a pasta de referência e sendo praticamente igual às misturas com 5% de FRC-150. Isto pode indicar que a adição de 5% dos finos não modifica tanto os produtos formados quando estes substituem o cimento.

A mistura com S-100 teve menor quantidade de água combinada aos 28 dias de cura, sendo 14,32% menor em relação à mistura de referência. Isto pode mostrar que os FRC-100, assim como os FRC-150 também apresentam alguma reatividade, não sendo completamente inertes, corroborando com os resultados das análises de DRX.

Tabela 5.23 – Conteúdo percentual das pastas com 5% de FRC-100 e S-100 calculados na base inicial de cimento Portland (em%)

Pasta	Idade (dias)	H ₂ O livre	H ₂ O do C-S-H, etringita e gipsita	H ₂ O da CH	H ₂ O combinada total	CH	CaCO ₃
P_REF	1	3,28	5,64	3,99	12,47	16,38	12,09
	28	5,23	9,41	5,90	20,04	24,25	10,27
P_LAB-100_5	1	4,19	5,11	2,59	9,44	10,63	18,69
	28	5,75	9,65	5,63	20,03	23,14	19,16
P_D-100_5	1	4,13	5,96	3,32	11,45	13,64	19,55
	28	4,89	9,78	5,20	19,28	21,39	17,28
P_C-100_5	1	3,33	6,96	2,79	12,11	11,45	22,66
	28	4,28	11,01	4,70	20,09	19,32	21,48
P_S-100_5	1	4,64	6,13	2,78	11,09	11,45	15,50
	28	6,74	7,91	5,21	17,17	21,43	6,45

O Gráfico 5.32.b mostra que a quantidade de Portladita para a pasta de referência foi maior em relação às outras pastas, indicando que ela estava mais hidratada. Isto também ocorre quando estas misturas são comparadas àquelas de granulometria maior (ver Tabela 5.11).

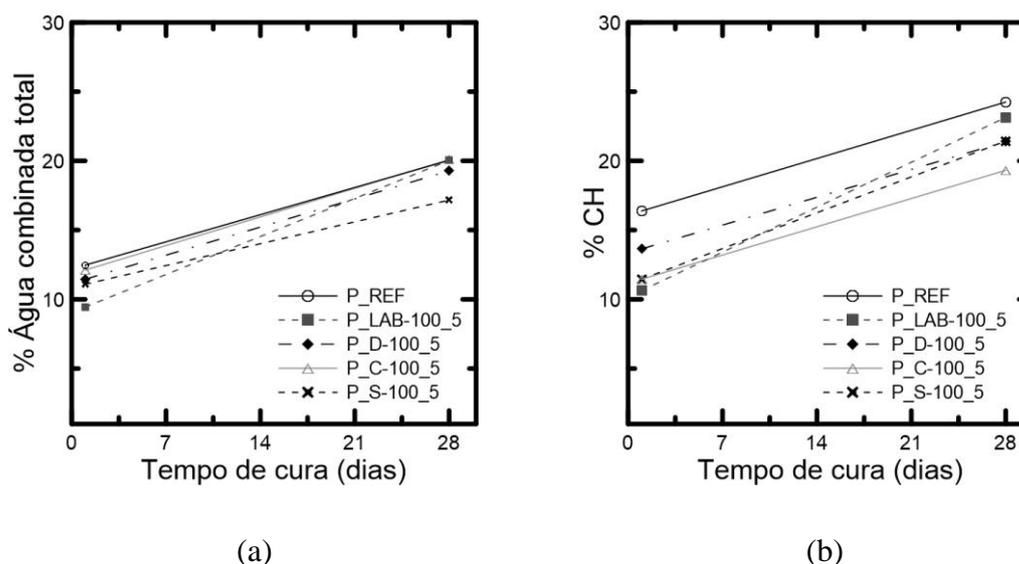


Gráfico 5.32 – (a) Conteúdo de água combinada total e (b) CH para as pastas com FRC-150

5.3.3 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

A Tabela 5.24 apresenta os resultados de absorção total (A), índice de vazios (Iv) e massa específica real (ρ) com seus respectivos coeficientes de variação (%) para as pastas P_REF e pastas com as substituições de 5%, de cimento Portland por FRC-100 e S-100.

Tabela 5.24 – Resultados de absorção de água (A), índice de vazios (Iv) e massa específica real (ρ) das amostras curadas com substituições de 5% de FRC e sílica inerte

Mistura	A(%) – CV (%)	Iv (%) – CV (%)	ρ (g/cm ³) – CV (%)
P_LAB-100_5	15,64 – 0,32	26,38 – 1,19	2,29 – 1,91
P_D-100_5	15,48 – 0,40	26,39 – 1,16	2,32 – 1,82
P_C-100_5	15,56 – 0,54	26,51 – 1,27	2,32 – 1,19
P_S-100_5	16,67 – 2,94	28,66 – 2,31	2,41 – 0,61

As análises estatísticas mostraram que todas as pastas produzidas com FRC-100 e S-100 apresentaram um aumento significativo no índice de vazios das pastas em relação à mistura de referência, crescendo em 8,91%, 7,80%, 8,36% e 16,09% para pastas produzidas com LAB-100, D-100, C-100 e S-100, respectivamente. As pastas produzidas com FRC-100 não apresentaram diferenças entre si, sendo consideradas diferentes estatisticamente da pasta com S-100. Os resultados de massa específica real das pastas mostraram que as pastas com FRC-100 não possuem diferença significativa entre si nem em comparação à mistura de referência.

Para as diferentes granulometrias, quando comparadas as misturas com o mesmo teor de substituição do cimento Portland para os mesmos tipos de FRC, a massa específica do D-100 e do C-100 reduziu consideravelmente (4,13% e 7,20%, respectivamente), quando comparadas as misturas produzidas com D-150 e C-150, respectivamente. Já os índices de vazios não foram considerados diferentes, exceto para a mistura com S-100 a qual teve um aumento significativo de 15,75%. Quanto à absorção de água, apenas a mistura com LAB teve uma mesma absorção, independente da granulometria utilizada. Os outros materiais apresentaram redução da absorção

quando se reduziu sua granulometria. Isto pode indicar que com a redução da granulometria das adições, elas densificaram matriz, preenchendo vazios.

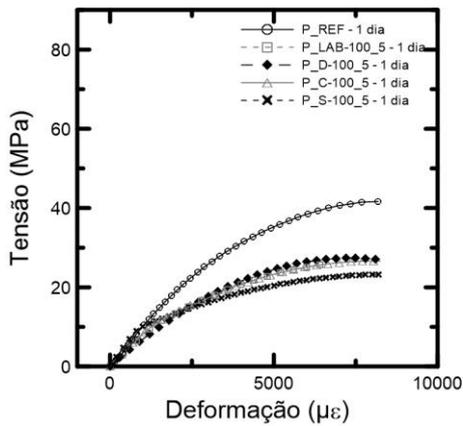
5.3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

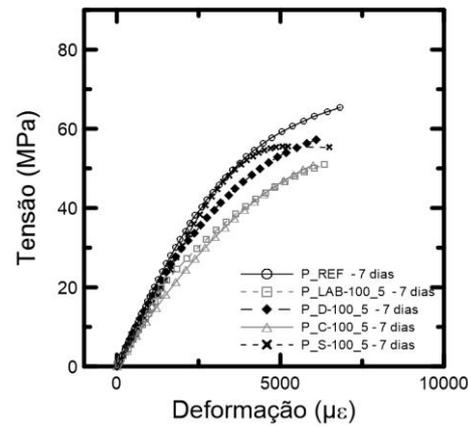
O Gráfico 5.33 apresenta as curvas típicas tensão *versus* deformação das pastas durante 1, 7, 28 e 63 dias, e a Tabela 5.25 apresenta os valores médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade com seus respectivos coeficientes de variação (CV).

A análise estatística mostrou que para a primeira idade avaliada (1 dia) a adição de FRC-100 e S-100, assim como no caso das pastas com adições de 5% de FRC-150 e S-150, houve uma redução significativa da resistência à compressão axial em relação à mistura de referência. Por exemplo, para 1 dia, as pastas produzidas com LAB-100, D-100, C-100 e S-100 perderam 41,27%, 38,53%, 40,59%, e 45,25%, respectivamente, na resistência em relação à referência. Considerando a granulometria, as pastas produzidas com FRC-100 e S-100 também foram consideradas estatisticamente diferentes. Obteve-se redução de 34,52%, 16,42%, 20,56% e 23,24% para as pastas LAB-100, D-100, C-100 e S-100, respectivamente, em relação às pastas produzidas com 5% do mesmo material granulometria inferior a 150 μm . Para esta idade, as pastas produzidas com FRC-100 e S-100 foram consideradas estatisticamente iguais entre si.

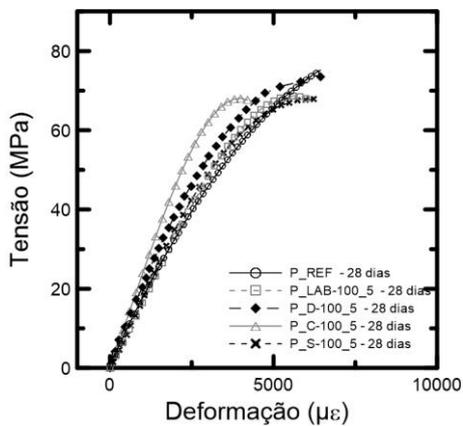
Os módulos de elasticidade em 1 dia tiveram um aumento significativo com a adição de 5% de FRC-100 em relação à mistura de referência e as misturas com 5% de LAB-00 e D-100 apresentaram módulos estatisticamente iguais. A mistura com S-100 apresentou módulo similar à referência. Para esta idade, as misturas tiveram altas deformações de pico, variando de 6510,89 $\mu\epsilon$ a 8634,90 $\mu\epsilon$.



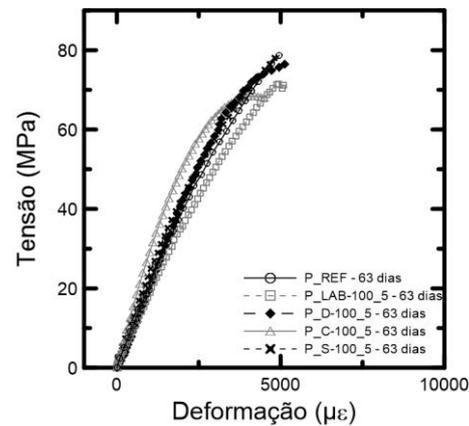
(a)



(b)



(c)



(d)

Gráfico 5.33 – Tensão *versus* deformação da pasta de referência e das pastas com 5% de substituição de FRC-100 e S-100 para (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias e (d) 63 dias

Aos 7 dias as pastas também foram consideradas diferentes estatisticamente à referência. Entretanto, as pastas com 5% de LAB-100 e LAB-150 foram consideradas estatisticamente iguais, bem como a mistura com 5% de D-150 e D-100 e a mistura com 5% de C-150 e C-100. A pasta com 5% de S-100 foi 12,82% menor que àquela produzida com 5% de S-150. Nesta idade, os módulos elásticos foram estatisticamente iguais à mistura de referência (com exceção da mistura P_C-100_5, a qual teve redução de 21,68%). Em relação as misturas produzidas com FRC-150 e S-150, eles foram considerados estatisticamente iguais. As misturas apresentaram grandes deformações máximas, variando de 5511,34 $\mu\epsilon$ a 6352,60 $\mu\epsilon$.

Tabela 5.25 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para as pastas de referência e as pastas com 5% de substituição do cimento Portland CP V ARI pelos FRC-100 e S-100

Pastas	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
1 dia			
P_REF	44,22 – 3,78	7978,50 – 6,66	10,50 – 0,89
P_LAB-100_5	25,97 – 2,54	6510,89 – 6,66	13,95 – 4,89
P_D-100_5	27,18 – 2,25	7994,16 – 1,64	12,46 – 0,43
P_C-100_5	26,27 – 5,08	7892,12 – 4,67	7,90 – 2,89
P_S-100_5	24,21 – 2,14	8634,90 – 2,55	10,19 – 2,40
7 dias			
P_REF	66,65 – 2,45	6849,67 – 3,30	16,05 – 4,58
P_LAB-100_5	50,72 – 2,87	6352,60 – 3,11	15,35 – 4,52
P_D-100_5	54,75 – 3,74	6311,07 – 2,47	15,57 – 0,68
P_C-100_5	49,00 – 1,96	6180,08 – 2,10	12,57 – 3,34
P_S-100_5	56,77 – 3,77	5511,34 – 2,37	14,71 – 1,76
28 dias			
P_REF	74,17 – 1,52	6312,18 – 1,69	17,35 – 0,72
P_LAB-100_5	68,44 – 3,31	5610,49 – 1,34	17,41 – 2,53
P_D-100_5	76,01 – 1,76	6625,13 – 3,50	18,57 – 3,09
P_C-100_5	67,63 – 1,29	4050,91 – 5,98	17,35 – 0,61
P_S-100_5	69,80 – 4,35	6414,16 – 4,69	17,92 – 4,47
63 dias			
P_REF	79,74 – 2,45	5296,37 – 2,60	19,81 – 0,59
P_LAB-100_5	71,59 – 3,63	4912,36 – 2,18	17,97 – 3,80
P_D-100_5	79,74 – 1,83	5198,59 – 7,98	18,57 – 2,51
P_C-100_5	76,90 – 2,10	4267,65 – 3,11	19,23 – 2,76
P_S-100_5	84,21 – 2,14	6870,85 – 1,16	19,42 – 6,97

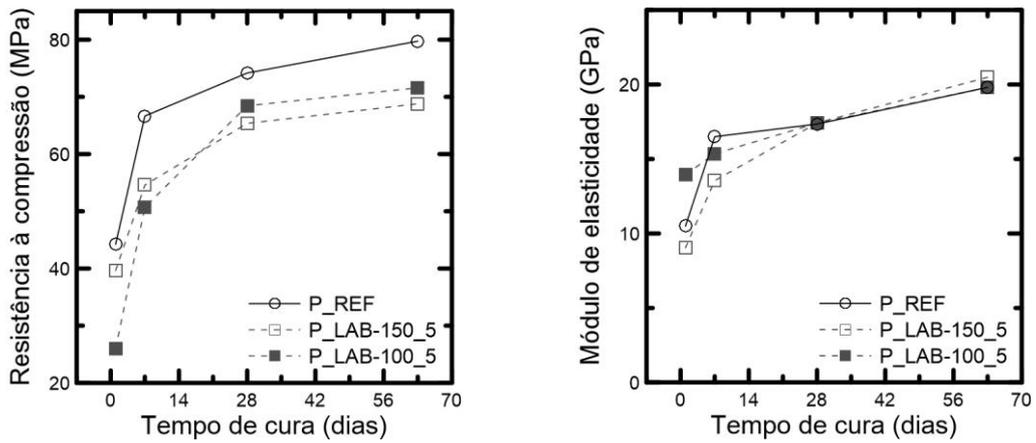
Aos 28 dias de cura, as pastas produzidas com 5% de qualquer tipo de FRC-100 não apresentaram diferenças significativas entre elas nem em relação à pasta de referência. Em relação às misturas de mesmo tipo de adição com o mesmo teor de substituição, a pasta com finos D-100 apresentou variação do resultado da resistência a 28 dias em relação à pasta com D-150, crescimento expressivo de 21,60%. Enquanto que as pastas com LAB-100, C-100 e S-100 tiveram um aumento de 4,73%, 4,86% e 3,79% em relação às misturas com LAB-150, C-150 e S-150, respectivamente. Isto mostra que a redução da granulometria dos provocou um aumento na resistência do material, sendo mais expressivo no FRC-D. Isto pode estar relacionado com a redução de quartzo e aumento da área superficial desse tipo de fino. Os módulos elásticos das pastas com 5% de FRC-100 e S-100 foram considerados estatisticamente iguais à

mistura de referência e as deformações de pico variaram de 4050,91 $\mu\epsilon$ a 6625,13 $\mu\epsilon$, sendo a menor para a mistura com 5% de C-100.

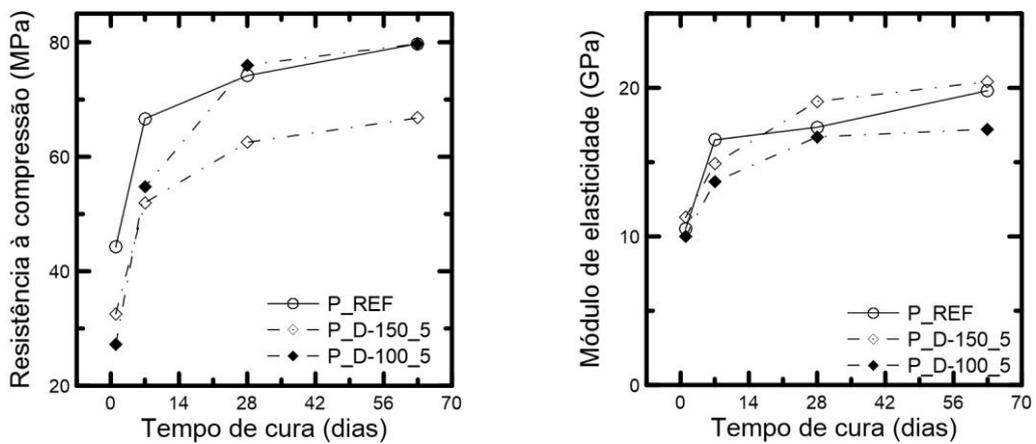
As pastas com FRC-100 estudadas, com exceção da produzida com LAB-100, apresentaram um crescimento significativo de 28 para 63 dias: obteve-se um aumento de 4,91%, 13,71% e 20,64% para as pastas com D-100, C-100 e S-100, respectivamente, enquanto que a referência apresentou um crescimento de 7,55%.

Aos 63 dias as misturas apresentaram um rompimento frágil devida ao alto valor de resistência. As pastas com C-100, D-100 e S-100 apresentaram resistências iguais estatisticamente à mistura de referência, somente a pasta com 5% de LAB-100 apresentou uma redução significativa de 10,22%. Comparando a granulometria dos materiais para o mesmo teor de pasta produzidas, apenas as pastas com 5% de LAB-100 e LAB-150 tiveram resistência iguais. As pastas produzidas com D-100, C-100 e S-100 apresentaram um aumento significativo de 19,41%, 16,69% e 18,39%, respectivamente, em relação às misturas com D-150, C-150 e S-150. Os módulos elásticos foram semelhantes para as misturas com adições de FRC-100, S-100 e a pasta de referência, bem como para as misturas com 5% de FRC-150 e S-150 (com exceção da mistura D-100, que apresentou módulo 9,06% menor que a mistura D-150). As deformações máximas variaram de 4267,65 $\mu\epsilon$ a 6870,85 $\mu\epsilon$.

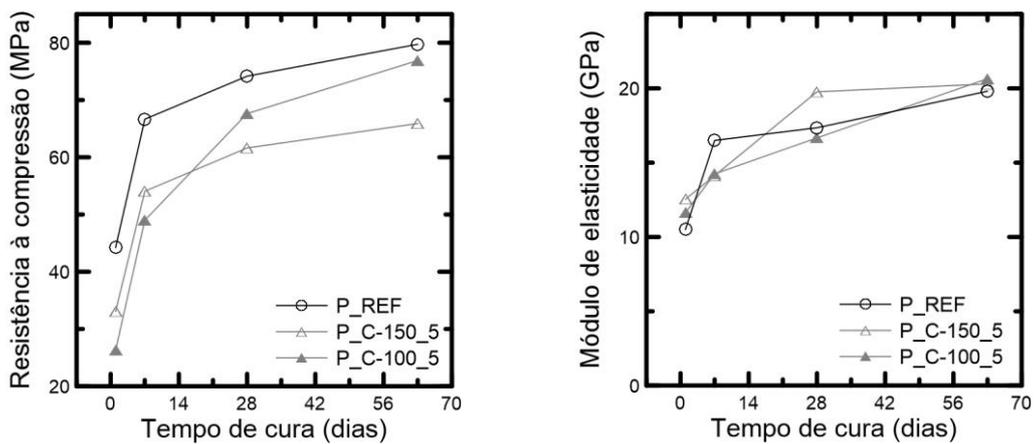
Os Gráficos 5.34 apresentam um resumo do crescimento da resistência à compressão axial e do módulo elástico para cada adição em função da idade de cura e em relação às misturas de mesmo teor do seu respectivo FRC-150. Estes resultados mostram que a redução da granulometria melhorou a performance de resistência à compressão das pastas produzidas, que pode estar relacionado a um aumento na reatividade destes materiais ou melhor empacotamento da mistura. Pode-se dizer que os finos tipo D-100 e C-100 apresenta uma melhora em relação ao D-150 e C-150, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.34 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com (a) FRC-LAB, (b) FRC-D e (c) FRC-C

Os Gráficos 5.35 apresentam o crescimento da resistência à compressão axial e do módulo elástico para as misturas produzidas com sílica inerte. Os altos valores de resistência de todas as idades estudadas podem estar relacionados ao fato deste material apresentar partículas mais finas que os FRC-100 e o cimento CP V ARI estudados, conforme discutido no item 5.1.1, que pode ter provocado um melhor efeito de empacotamento na mistura, principalmente para 63 dias.

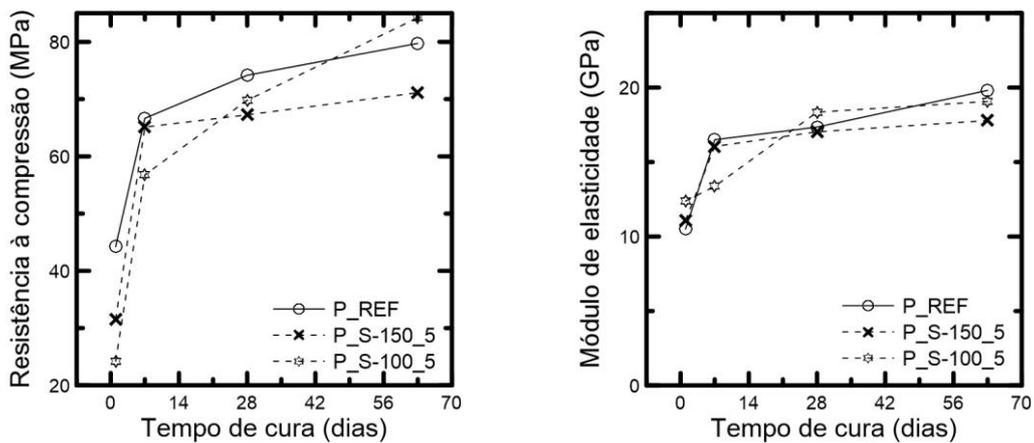


Gráfico 5.35 – Crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos dias de cura da pasta de referências e pastas com S-150 e S-100

Outra análise que deve ser considerada na resistência à compressão é em relação ao fator água/cimento. A redução da granulometria melhorou a resistências das pastas para o mesmo fator água/cimento (Gráfico 5.36), sendo o melhor resultado da pasta com 5% de D-100.

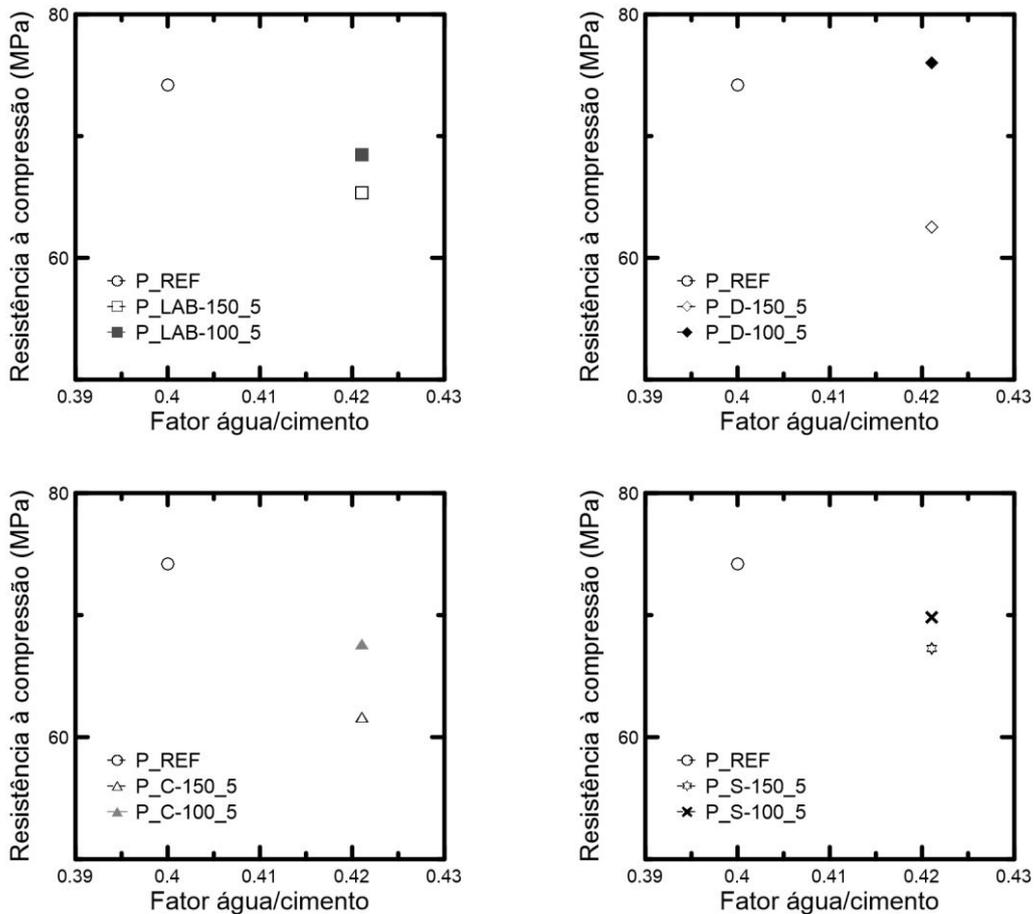


Gráfico 5.36 – Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento da pasta de referência e misturas com Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento da pasta de referência e misturas com (a) LAB-100, (b) D-100, (c) C-100 e (d) S-100 aos 28 dias

5.3.5 POROSIMETRIA

A porosidade das pastas aferidas aos 28 dias é classificada em faixas de tamanho e é mostrada nas curvas de distribuição de tamanho de poros no Gráfico 5.37 e na Tabela 5.26. Nota-se que a adição de finos de granulometria menor que 100 μm , faz com que a porosimetria total seja reduzida e as pastas apresentam porosidade total bastante similar à mistura de referência. As misturas com LAB-100 e C-100 não apresentaram o refinamento dos poros que foram observados nas misturas com FRC-150. Entretanto, observou-se que para a mistura com D-100 houve um grande refinamento dos poros e que as outras misturas apresentaram distribuição de poros semelhantes à referência, comprovando a alta resistência mecânica desta mistura.

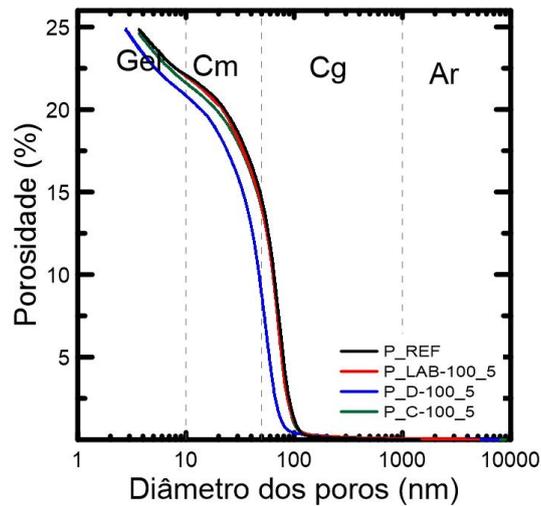


Gráfico 5.37 – Distribuição de tamanho de poros da mistura de referência e pastas contendo FRC-100

Tabela 5.26 – Classificação da porosidade das pastas curadas a 28 dias

	Gel (%)	Capilares médios (%)	Capilares grandes (%)	Ar (%)	Porosidade total (%)
P_REF	2,77	7,48	14,59	0,02	24,86
P_LAB-100_5	2,84	7,87	14,07	0,06	24,84
P_D-100_5	4,05	12,02	8,77	0,05	24,89
P_C-100_5	3	7,59	13,97	0,05	24,61

Ao analisar os dados da Tabela 5.27, verificou-se que o diâmetro crítico reduziu com a adição de D-100 e aumentou para as misturas com LAB-100 e C100. Este fato indica que a mistura com 5% de D-100 apresenta uma rede de poros conectados, composta principalmente por poros menores, comprovando os resultados mecânicos.

Tabela 5.27 – Diâmetro crítico e diâmetro limite (threshold) das pastas estudadas

	Diâmetro crítico (nm)	Diâmetro limite (nm)
P_REF	65,6	43,7
P_LAB-100_5	70,9	37,5
P_D-100_5	48,1	29,9
P_C-100_5	69,6	39,1

5.4 CONSIDERAÇÕES DOS EFEITOS DOS FRC QUANTO AO SEU POTENCIAL REATIVO

Com base nos resultados apresentados nos estudos realizados em pastas, conclui-se que:

- A origem dos RCD influencia as propriedades intrínsecas dos FRC estudados, como por exemplo, superfície específica Baline, massa específica, composição química e mineralógica;
- Os FRC eram compostos por grandes quantidades de minerais silicatos, como biotita, microclima e muscovita, produtos hidratados de pasta de cimento endurecida e uma pequena parcela de fases anidras alita e belita, evidenciando a baixa propriedade cimentícias dos mesmos;
- O fino tipo LAB-150 apresentou maior quantidade de produtos hidratados na sua composição, enquanto que o fino tipo D-150 apresentou maior quantidade de sílica;
- Com a redução da granulometria ocorreu a redução da quantidade de quartzo e o aumento da quantidade de pasta de cimento hidratado na composição dos finos;
- As pastas com finos LAB-150 e D-150 apresentaram comportamento reológico semelhante à mistura sem presença de finos para os teores de 10% e 5%;
- A pasta produzida com C -150 apresentou perda da trabalhabilidade desde o teor de 5%, devido a sua maior absorção, porosidade e rugosidade;
- A presença de FRC-150, independentemente da origem, provocou um efeito de diluição, diminuindo a cinética de hidratação e o calor acumulado total;
- Com a redução da granulometria, os FRC-100 provocam uma aceleração do período de dormência;

- Independente da origem dos FRC, a redução da granulometria provocou um pequeno efeito de nucleação das pastas com 5% de FRC-100 nas primeiras horas;
- A redução do calor total acumulado para a pasta com 5% de LAB-150 não foi proporcional ao teor de substituição do material, indicando que este material pode ser um pouco mais reativo se comparado com os finos D-150 e C-150;
- As misturas com 5% de FRC-100 apresentaram redução da cinética de hidratação similar às pastas produzidas com 5% de FRC-150. O calor acumulado foi reduzido de maneira semelhante para os três tipos de FRC-100. O calor acumulado total das pastas produzidas em D-100 e C-100 foram maiores quando comparados às pastas produzidas com 5% de FRC-150, evidenciando melhoras na reatividade destes materiais com a redução da granulometria;
- O aumento no teor dos diferentes FRC-150 nas misturas promoveu uma redução na resistência à compressão axial em relação à pasta de referência;
- A pasta produzida com 5% de LAB-150 apresentou melhor resultado em relação aos finos de diferentes origens. Os módulos elásticos não foram afetados significativamente com a adição dos finos independentemente da origem;
- Com a redução da granulometria, há a melhora da resistência à compressão axial;
- A pasta produzida com D-100 obteve melhor resultado de resistência à compressão axial, que é comprovada pelo refinamento dos poros obtidos pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- As porosidades das pastas foram bem semelhantes independentemente do teor de substituição e da origem do FRC-150. O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio apresentou resultados consistentes com a análise de índice de vazios para pastas produzidas com 5% de substituição.

5.5 APLICAÇÃO DE FRC EM CONCRETOS C25

5.5.1 CASO I: Concreto contendo FRC-150

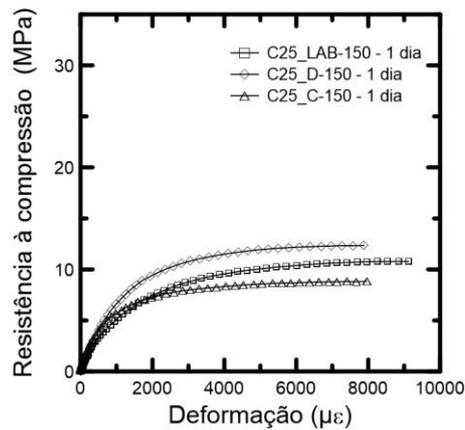
A Tabela 5.28 apresenta os valores obtidos experimentalmente pelo ensaio de abatimento de tronco de cone. Percebe-se que os concretos apresentam praticamente a mesma trabalhabilidade e dentro da faixa de abatimento pré-estabelecida (100 ± 20 mm).

Tabela 5.28 – Abatimento experimental dos concretos com FRC-150

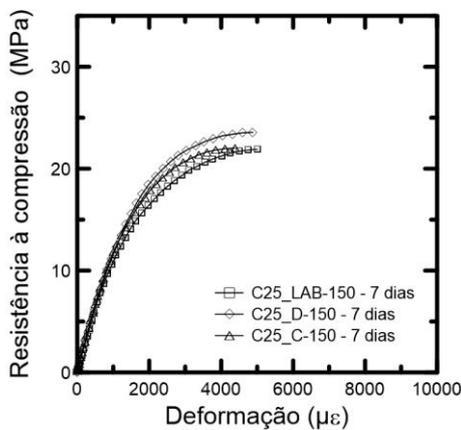
Abatimento experimental (mm)	
C25_LAB-150	90
C25_D-150	80
C25_C-150	85

Os Gráficos 5.38 apresentam as curvas de tensão *versus* deformação para os concretos estudados e a Tabela 5.29 apresenta os valores médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade com seus respectivos coeficientes de variação (CV).

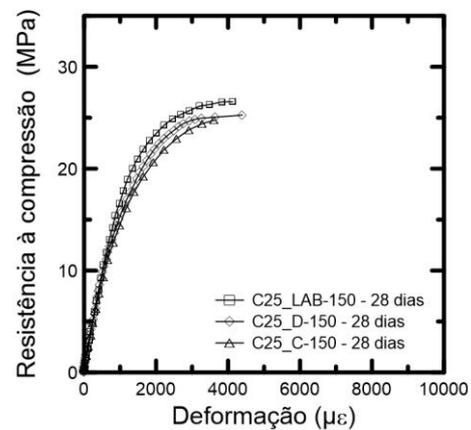
Nota-se que todos os concretos apresentam grandes deformações para 1 dia e, com o aumento do tempo, ocorre o aumento da resistência e queda da deformação de pico. Aos 28 dias os concretos alcançaram a resistência prevista pelo *software*, sendo os concretos C25_D-150 e C25_C-150 considerados iguais estatisticamente. O concreto produzido com LAB-150 apresentou melhor resistência com um aumento significativo de 6,80% e 8,53% em relação ao concreto com D-150 e C-150, respectivamente. Os módulos de elasticidade de todas as misturas são estatisticamente iguais a 28 dias.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.38 – Tensão versus deformação dos concretos com FRC-150 para (a) 1 dia; (b) 7 dias e (c) 28 dias

Vale ressaltar que os finos LAB-150, D-150 e C-150 apresentam 57%, 53% e 58%, respectivamente, de material passante na peneira de 75 μm , um valor muito acima do permitido pela norma ABNT NBR 15116 (de 10 a 15%). Além disso, esta norma é apenas para a produção de concreto não estrutural e este resultado mostra que é possível produzir um concreto estrutural classe C25 com uma grande quantidade de material passante na peneira de 75 μm e ainda sim alcançar o desempenho mecânico desejado, desde que seja feita uma dosagem científica levando em conta as propriedades intrínsecas dos materiais utilizados.

Tabela 5.29 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para os concretos com FRC-150

Concretos	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
1 dia			
C25_LAB-150	11,12 – 3,87	9334,80 – 1,16	5,59 – 1,00
C25_D-150	11,93 – 2,29	6653,26 – 5,31	7,67 – 1,83
C25_C-150	9,49 – 4, 82	8292,28 – 1,78	5,66 – 4,20
7 dias			
C25_LAB-150	22,09 – 3,20	5034,36 – 3,11	12,19 – 3,49
C25_D-150	22,94 – 2,86	4911,59 – 1,59	12,65 – 1,00
C25_C-150	21,63 – 1,11	4382,07 – 3,43	11,38 – 1,57
28 dias			
C25_LAB-150	26,74 – 1,16	4432,22 – 3,24	18,30 – 0,90
C25_D-150	25,02 – 0,59	4557,77 – 5,10	17,81 – 1,54
C25_C-150	24,58 – 0, 95	3897,72 – 3,77	18,27 – 0,64

O Gráfico 5.39 mostra a eficiência dos concretos com presença de finos em relação ao fator água efetiva/cimento. Nota-se que o concreto produzido com LAB-150 apresentou melhor desempenho quando comparado aos demais concretos produzidos com FRC-150 e o mesmo foi observado no comportamento mecânico das pastas cimentícias estudadas com FRC-150.

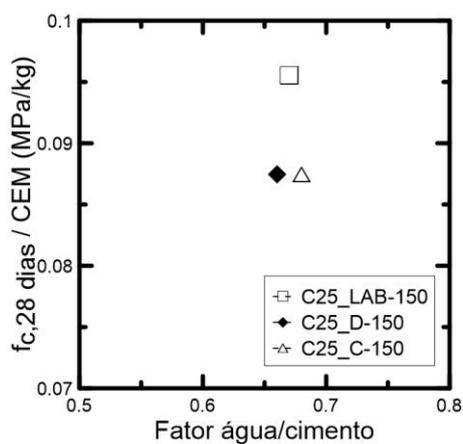


Gráfico 5.39 –Eficiência das misturas em relação ao fator água/c para 28 dias

5.5.2 CASO II: Concreto contendo Areia com FRC-150 tipo LAB

A Tabela 5.30 apresenta os valores obtidos experimentalmente pelo ensaio de abatimento de tronco de cone. Percebe-se que os concretos apresentam praticamente a mesma trabalhabilidade e dentro da faixa de abatimento pré-estabelecida (100 ± 20 mm).

Tabela 5.30 – Abatimento experimental dos concretos de referência, com areia reciclada com finos e sem finos

Abatimento experimental (mm)	
C30_REF	85
C30_A_LAB	80
C30_A_LAB-F	80

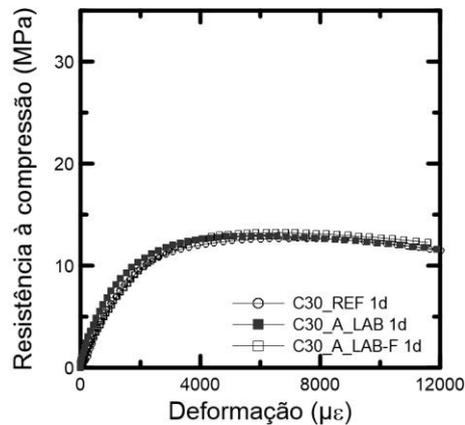
O Gráfico 5.40 apresenta as curvas de tensão *versus* deformação para os concretos estudados e a Tabela 5.31 apresenta os valores médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade com seus respectivos coeficientes de variação (CV).

Tabela 5.31 – Valores médios de resistência à compressão, deformação de pico na compressão e módulo de elasticidade para os concretos com FRC-150

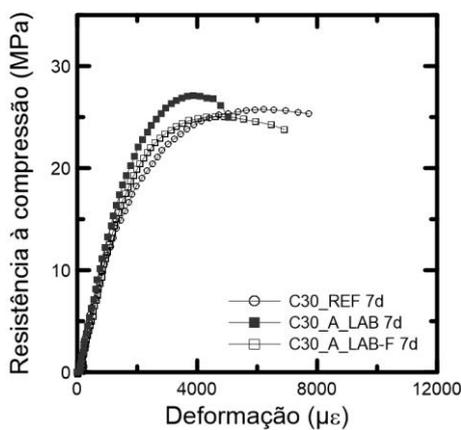
Concretos	Resistência à compressão (MPa) – CV (%)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$) – CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa) – CV (%)
1 dia			
C30_REF	12,68 – 3,72	6815,76 – 3,00	9,73 – 1,04
C30_A_LAB	12,90 – 3,65	5837,52 – 4,67	9,68 – 4,10
C30_A_LAB-F	13,26 – 4,59	6646,80 – 5,13	8,98 – 2,21
7 dias			
C30_REF	25,76 – 2,66	5887,73 – 5,33	18,53 – 4,25
C30_A_LAB	27,09 – 1,33	4002,55 – 5,46	18,84 – 1,39
C30_A_LAB-F	26,76 – 0,37	4893,88 – 5,99	18,84 – 1,39
28 dias			
C30_REF	30,49 – 4,76	5472,79 – 5,14	22,69 – 1,19
C30_A_LAB	31,96 – 3,30	4177,85 – 2,87	22,94 – 5,84
C30_A_LAB-F	31,34 – 3,19	5176,37 – 5,13	22,00 – 2,61

Os concretos apresentaram resistência à compressão e módulo de elasticidade similares com 1 dia de cura, sendo considerados iguais pela análise estatística. A alta resistência para esta idade deve-se ao uso de um cimento de alta resistência inicial (CP

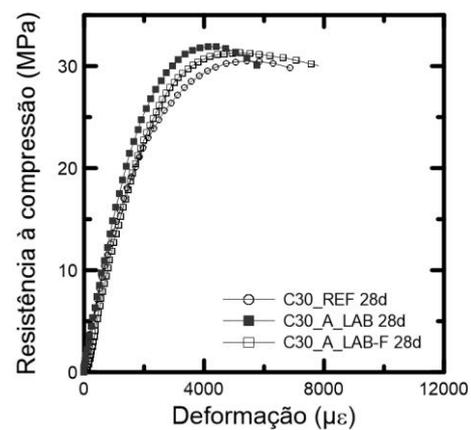
V ARI). As deformações de pico oscilaram, sendo a maior deformação de pico do concreto de C30_REF (6815,76 $\mu\epsilon$) e a menor do concreto C30_A_LAB (5837,52 $\mu\epsilon$).



(a)



(b)



(c)

Gráfico 5.40 – Tensão versus deformação dos concretos com FRC-150 para (a) 1 dia; (b) 7 dias e (c) 28 dias

Aos 7 dias as misturas possuem resistências à compressão e módulo de elasticidade estatisticamente iguais, enquanto a deformação de pico possui grande variação, variando de 4002,55 $\mu\epsilon$ a 5887,73 $\mu\epsilon$.

Aos 28 dias os concretos apresentaram a resistência prevista pelo *software* e, a partir da análise estatística realizada, foi possível constatar que de fato não se apresentaram diferenças significativas. Os módulos de elasticidade também são estatisticamente iguais, diferentemente das deformações de pico, que variaram de 4177,

85 $\mu\epsilon$ a 5472,79 $\mu\epsilon$. Nota-se que a presença de finos da areia A_LAB-F não influencia significativamente as propriedades mecânicas, podendo ser utilizado na produção de concretos com aproximadamente 25% de substituição.

O Gráfico 5.39 mostra a melhor eficiência do concreto com presença da areia reciclada e areia reciclada contendo finos em relação ao fator água efetiva/cimento.

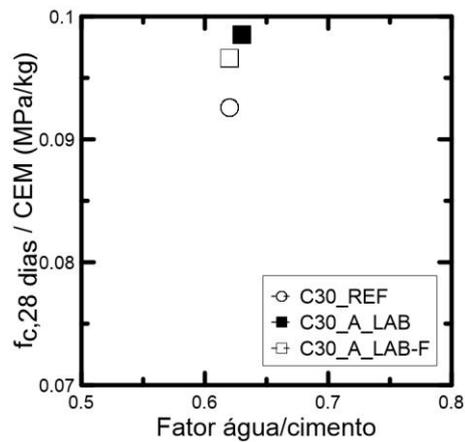


Gráfico 5.41 –Eficiência das misturas em relação ao fator água/c para 28 dias

5.6 CONSIDERAÇÕES DOS EFEITOS DOS FRC EM CONCRETOS

Com base nos resultados apresentados nos estudos realizados em concretos, conclui-se que:

- A origem dos FRC-150 não influenciou a trabalhabilidade dos concretos produzidos;
- O concreto com finos LAB-150 apresentou melhor desempenho em relação aos demais;
- A presença de LAB-150 na areia reciclada não prejudicou o desempenho mecânico do concreto produzido com 25% de areia reciclada.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos conclui-se que:

- A origem do RCD influencia nas características de superfície específica Baline, massa específica, composição química e mineralógica dos FRC;
- Os FRC estudados apresentam baixa propriedade cimentícia;
- Os FRC retardam a cinética de hidratação;
- A redução da granulometria aumenta o potencial reativo dos FRC;
- O concreto contendo fino LAB-150 e D-150 apresentaram melhor desempenho mecânico;
- Não é necessário fazer a remoção dos finos da areia reciclada. A produção de concretos com 25% de substituição da areia reciclada sem separação dos finos LAB, pode ser realizada de forma a otimizar o processo de beneficiamento do resíduo.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade desta pesquisa propõe-se:

- Determinar a compactidade seca das pastas estudadas;
- Determinar, a partir da análise metodológica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), o impacto ambiental dos concretos produzidos com FRC;
- Estudar propriedades reológicas, físico-químicas, mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com os diferentes FRC;
- Estudar o uso de FRC com outras adições pozolânicas em matrizes cimentícias;

- Realizar um tratamento térmico ou carbonatação (atmosférica ou supercrítica) nos FRC e avaliar a reatividade dos produtos obtidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIGIZAKI, K., 2006, *Pore structure of cement-base materials – Testing, interpretation and requirements*. 1 ed. New York, Taylor & Francis, 2006.

AMARIO, M. *Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de construção (ARC)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2015. f. 213. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

AMARIO, M.; RANGEL, S. C.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, D. R. *Processo de produção de agregados reciclados de concreto: estudo de caso em escala industrial*. In: Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, 3, 2018, Coimbra, Portugal. 9f. 2018.

AMIN, A. F. M. S.; HASNAT, A.; KHAN, A. H.; ASHIQUZZAMAN, M. (2015). *Residual Cementing Property in Recycled Fines and Coarse Aggregates: Occurrence and Quantification*. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001472. American Society of Civil Engineers, 2016.

ANDRADE, P. G. *Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado miúdo de resíduo de concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2018. f. 138. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), 2015, “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil-2015”. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO (ANEPAC). Mercado de agregado no Brasil. Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção. *Relatório*. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/8-mercado-de-agregados-no-brasil>>. Acesso em: Fevereiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 5733: *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro, 1991.

_____, NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.

_____, NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2016.

_____, NBR 7215: *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

_____, NBR 7222: *Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

_____, NBR 8522: *Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____, NBR 10004: *Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

_____, NBR 11578: *Cimento Portland composto - Especificação*, Rio de Janeiro, 2004.

_____, NBR 15113: *Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 2004.

_____, NBR 15116: *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural*. Rio de Janeiro, 2004.

_____, NBR 16372: *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro, 2015.

_____, NBR ISO 15901: *Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry*. Rio de Janeiro, 2016.

_____, NBR NM ISO 3310: *Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação – Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada*. Rio de Janeiro, 2010.

_____, NBR NM 18: *Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo*. Rio de Janeiro, 2012.

_____, NBR NM 23: *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2001.

_____, NBR NM 30: *Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2001.

_____, NBR NM 52: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

_____, NBR NM 67: *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998.

_____, NBR NM 248: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

_____, NBR NM 53: *Agregado graúdo – Determinação da massa específica aparente e absorção de água*, Rio de Janeiro, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) – C469: *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poissons Ratio of Concrete in Compression*. Philadelphia, 1987.

BALLISTA, L. P. *Microconcretos Leves Estruturais com Agregados Graúdos Reciclados Modificados com Látex Estireno-Butadieno – Estudo das Propriedades Físicas, Mecânicas e de Durabilidade*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

BARDINI, V. S. D. S. *Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica*. Dissertação (Mestrado em). f. 162. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BARNES, H. A.; NGUYEN, Q. D. (2000). *Rotating vane rheometry - a review*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 98, n. 1, p.1-14, 2001.

BAUER, E.; SOUZA, J.G.G.; GUIMARÃES, E.A.; SILVA, F.G.S. 2005. Study of the laboratory Vane test on mortars. *Building and Environment*, v.42, n.1, p.86-92, 2007.

BEADOIN, J. J.; MARCHAND, J. Pore structure. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEADOIN, J. J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*. New Jersey: Noyes Publications, 2001. p. 528-628.

BENSTED, J. Special cements. In: HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4. ed. New York: Elsevier Science & Technology Books, 2004. Cap. 14.

BRAGA, M.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. (2011). Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates. *Materials and Structures*. v. 47, p. 171–182, 2014. DOI 10.1617/s11527-013-0053-1.

BRITO FILHO, J. A. *Cidades versus entulho*. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, 1999, p.56-67.

BOUDALI, S. KERDAL, E. D.; AVED, K.; ABDULSALAM, B.; SOLIMAN, M. A. (2015). Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. *Construction and Building Materials*, v.124 p.705-713. 2016.

BULLARD, J. W.; HAMLIN, M.J.; LIVINGSTONE A. R.; NONAT, A.; SCHERER, W. G.; SCHWEITZER S. J.; SCRIVENER, L. K.; THOMAS, J. J. (2010). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1208-1223, 2011.

CARDOZA, C. T.; LINSEL, S.; DIAZ, A. A.; MORALES, O. R.; HERNÁNDEZ, M. F. J. Influence of very fine fraction of mixed recycled aggregates on the mechanical properties and durability of mortars and concretes. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, n. 81, p. 81-92, 2016.

CARRIJO, M. P. *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. 2005. f. 129. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

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

CORDEIRO, C. G. *Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto*. 2006. f. 445. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro, 2006.

DAHLBO, H., BACHÉR, J., LÄHTINEN, K., JOUTTIJÄRVI, T., SUOHEIMO, P., MATTILA, T., SIRONEN, S., MYLLYMAA, T., SARAMÄKI, K. (2014). Construction and demolition waste management - A holistic evaluation of environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 107, p. 333-341, 2015.

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

DE LIMA, J. A. R. *Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*. p. 246. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

DWECK, J.; MELCHERT, M. B. M.; CARTLEDGE, K. F.; LEONARDO, S. R. TOLEDO FILHO, D. R. (2016). A comparative study of hydration kinetics of different cements by thermogravimetry on calcined mass basis. *Jornal Therm. Anal. Calorim.*, 2016. DOI 10.1007/s10973-016-6080-8.

EUROPEAN COMMISSION (EC), 2008. *Directive 2008/98/CE of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives*. Official Journal of the European Union, 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2017. *Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report*, Disponível em: <www.epa.gov/smm/advancing-sustainable-materials-management-facts-and-figures-report> Acesso em: Fevereiro, 2018.

FLIZIKOWSKI, C. L. *Estimativa de emissão de dióxido de carbono na construção civil e neutralização com espécies florestais: um estudo de caso*. 2012. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

FLOREA, M. V. A.; NING, Z.; BROUWERS, H. J. H. (2013). Activation of liberated concrete fines and their application in mortars. *Construction and Building Materials*, v.50 p.1-12. 2014.

FLORES, Y. C. *Incorporação de aditivos minerais comerciais e produzidos por moagem otimizada nas diferentes escalas de tamanho e natureza em pastas visando aplicação na cimentação de poços de petróleo*. p. 173. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

FONTES, C. M. A. *Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho*. p. 273. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

GASTALDI, D.; CANONICO, F.; CAPELLI, L.; BUZZI, L.; BOCCALERI, E.; IRICO, S. (2014). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Ciment & Concrete composites*. v.61, p.29-35, 2015.

GONÇALVES, P. J. *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial*. 2005, f. 236. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro, 2005.

GONÇALVES, S. M. *Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos*

concretos. 2011, f. 116. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, 2011.

GONÇALVES, P. J.; TOLEDO FILHO, D. R.; FAIRBAIRN R. M. E. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. *Ambiente Construído*. v. 6, n. 4, p. 83-94. Porto Alegre, 2006.

GRABOIS, M. T. *Experimental fracture mechanics of cement based materials: a new methodology for the accurate measurement of material toughness*. 2016. f. 112. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

HANSEN, T. C. *Recycled of demolished concrete and masonry*. London: Chapman & Hall, 1992. f. 316. *Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete*, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4. ed. New York: Elsevier Science & Technology Books, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa anual da indústria da construção (PAIC)*. Rio de Janeiro, 2014.

JAYAPALAN, A. R. P. *Properties of cement-based materials in the presence of nano and microparticle additives*. Ph. D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA, 2013

JENNINGS, H.M.; PRATT, P.L. An experimental argument for the existence of a protective membrane surrounding Portland cement during the induction period, *Cement and Concrete Research*, v.9, n. 4, p.501-506, 1979.

JOHN, V. M.; SILVA, V. G.; AGOPYAN, V. Agenda 21: uma proposta de discussão para o construbussines brasileiro. *II Encontro Nacional e I Encontro Latino americano sobre edificações e comunidades sustentáveis*, 2 e 1, 2001, Canela. ANTAC/UFRGS, Canela-RS, p. 91-98, 2001.

JUNGMANN, A. QUINDT, J. Allgig® - Technology for separation of building rubble. In: *DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.) Sustainable*

Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas Telford Pub., 1998, p. 197-203.

KIM, Y. J.; CHOI, W. Y. (2010). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*. v. 30 p. 500–504, 2012.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN K. Y. (2013). Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. v. 61 p. 270-277, 2014.

KWON, E; JAECHOL, A.; BONGSUK, C.; DONGCHEON, P. (2014). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, v.83 p.174-180. 2015.

LAWRENCE, P., CYR, M., M., RINGOT, E. (2003). Mineral admixtures in mortars - effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 939-1947, 2003.

LEITE, B. M. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. f. 270. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. 1997. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

LIMA, F. M. D. *Avaliação do comportamento reológico de pastas de cimento para poços de petróleo com adição de plastificantes*. 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia d Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

LOO, W. V. Closing the concrete loop – from reuse to recycling. In: *DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.) Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London: Thomas Telford Pub., 1998, p. 83-97.

MAHAUT, F.; MOKÉDDEM, S.; CHATEAU, X.; ROUSSEL, N.; OVARLEZ, G. 2008. Effect of coarse particles volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v.38, p. 1276-1285, 2008.

MAULTZSCH, M.; MELLMANN, G. Properties of large scale processed building rubble with respect to the reuse as aggregate in concrete. In: *DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LUMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London: Thomas Telford Pub., 1998, p. 99-107.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINDESS, S., YOUNG, J. F., DARWIN, D., 2002, *Concrete*. 2 ed. New Jersey, Prentice Hall, 2002.

MIRANDA, C. R. *Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo - Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química*. 2008. 290 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2008.

MONTEIRO, M. J. P.; MILLER, A. S; HORVATH, A. *Towards sustainable concrete*. *Nature Materials*, v. 16 p. 698-699, 2017. DOI:10.1038/nmat4930.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: *Congresso pan-americano de engenharia de trânsito e transporte*, 11., 2000, Gramado. Gramado, 1998. p.1007-1017.

NELFIA, O. L.; MAHIEUX, P. Y.; AMIRI, O. TURCRY, Ph.; LUX, J. (2015). Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials. *Materials and Structures*. v. 49 p. 3239–3251, 2016.

NEVILLE, A. M. (1995). *Properties of concrete*, 4th Ed., Pearson Education, England, U.K.

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. (). Direct yield stress measurement with the vane method. *Journal of Rheology*, v.29, n.3, p.335-347, 1985.

ODLER, I., Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement, In: Hewlett, P. C. (ed), *Lea's Chemistry of cement and Concrete*, 4 ed., chapter 6, Oxford, Inglaterra, Elsevier Inc., 1998.

PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DEBRITO, J., *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, number 47, Woodhead Publishing Limited, pp. 25-52, Philadelphia, USA, 2013.

PBL NETHERLANDS ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY. Trends in global CO₂ emissions, 2016. *Report*. Disponível em: <<http://edgar.jrc.ec.europa.eu> or <http://www.pbl.nl/en/trends-in-global-co2-emissions>> Acesso em: Fevereiro, 2018.

PENG, C. L.; SCORPIO, D. E.; KIBERT, C. J. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. *Construction Management and Economics*, n. 15, p. 49-58, 1997.

PEPE, M. *A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications*. 2016. 167f. Tese (doutorado em Engenharia Civil), Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile, Salerno, Italia, 2016.

PETRUCCI, R. G. E. *Concreto de cimento Portland*. 6ª edição. Porto Alegre: Editora Gloro, 1979, (Enciclopédia técnica universal globo).

PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. L. A.; HENDRIKS, C. F. Application of recycled aggregates in concretes: experiences from the Netherlands. p. 131-146. *Three-Day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry*. Ottawa, Canada, 1998.

PINTO, T. P. *Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. Tese (Doutorado em Engenharia). 1999. 189 f. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

POGGIALI, F. S. J. *Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland e com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar*. p. 150. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) UFMG, Belo Horizonte, 2010.

POLISSENI, C. G.; ANDRADE, P. G.; AMARIO, M.; TOLEDO FILHO, D. R. Dosagem científica de concreto com agregado de resíduo de concreto. In: *Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção – ENARC*, 5, 2017, Fortaleza. Fortaleza. p. 606-620.

QUARCIONI, V. A. *Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento: estudo em pasta*. 2008. f. 172. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). USP. São Paulo, 2008.

QUEBAUD, M. *Caracterisation des granulats recyclés étude de la composition et tu comportement des bétons incluant ces granulats*. França, 1996. f.247, Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Université d'Artois. Béthune, 1996.

RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete Admixtures Handbook*. 2. ed. Ontario: Noyes Publications, 1995.

RANGEL, S. C. *Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2015. f. 214. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

RIBAS, F. L. *Influência da cominuição da fração cerâmica dos Resíduos de construção e demolição na sua atividade pozolânica e nas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade de argamassas de cimento*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) 2014. f. 368. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro, 2014.

RICCI, G., 2007, *Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação*. 2007. f. 188. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, SYSTEMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES (RILEM) TC 21-DRG, 1994, "Specifications for Concrete with Recycled Aggregates". *Materials and Structures*, v. 27. p. 557-559.

ROCHA, C.A.A. *Influência da pressão e temperatura de cura e da adição de NaCl e KCl no comportamento de pastas para cimentação de poços de petróleo*. Tese (doutorado em Engenharia Civil), 2015, f. 211. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro, 2015.

RUI, Y.; SHUI, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*. v. 49, p. 841-851, 2013.

_____. (2014). Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*. v. 78, p. 202-207, 2014.

SANTIAGO, R. Q. E. *Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). 2008. f. 168. Feira de Santana, 2008.

SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. Z.; CARDOSO, A. C. F. Gestão de resíduos da construção civil. *Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, 11, 2004, Florianópolis, UFSC. Florianópolis, 13 p., 2004.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE SÃO PAULO (SMA). Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo – versão preliminar, volume 1, panorama. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/>>. Acesso em: Março, 2017.

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO (SEA). Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro – Relatório Síntese – 2013. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/sea>>. Acesso em: Março, 2017.

ŠEPS, K.; BROUKALOVÁ, I, Properties of cement based composite with fine ground recycled concrete. *Advanced Materials Research*. v.1000 p.110–113, 2014.

SCHOON, J.; BUYSSER, D. K.; DRIESSCHE, V. I.; BELIE, D. N. (2013). Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production. *Cement & Concrete Composites*. v.58 p. 70–80, 2015.

SILVA, B. J. *Comportamento sob altas temperaturas de concretos com agregados reciclados de concreto*. 2017. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Número das indústrias. Consumo Regional 2016. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: Fevereiro, 2018.

SOARES, S. M. M. N. *Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado em), UFMG, Belo Horizonte, MG, 2010.

SOUSA, J. G. G. *Contribuição ao estudo das propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco*. Tese (Doutorado em Estruturas e construção civil), Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2005.

SHUI, Z.; XUAN, D.; WAN, H.; CAO, B. (2007). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*. v. 22 p.1723–1729, 2008.

SHUI, Z.; XUAN, D.; CHEN, W.; YU, R.; ZHANG, R. (2007). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*. v. 23, p. 531-537, 2009.

SHVARZMAN, A., KOVLER, K., GRADER, G., SHTER, G. (2003). The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, *Advances in Cement Research*, v. 33, p. 405-416, 2003

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TENÓRIO, L. J. J. *Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais*. 2007. f. 138. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas. Maceio, 2007.

TOPIC J.; PROŠEK, Z. *Properties and microstructure of cement paste including recycled concrete powder*. *Acta Polytechnica* v.57(1) p.49–57, 2017. Disponível em: <http://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap>. Acesso em: Março, 2017.

TORRING, M. Management of construction and demolition waste streams. Disponível em: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB8592>. Acesso em: Novembro, 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/70180197>>. Acesso em: Fevereiro, 2018.

VELASCO, R. V. *Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas*. 2008. 388 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

VITORINO, F.C. *Caracterização experimental de pastas cimentícias contendo polímero SBR em pó e microfibras de volastonita*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2012.

VORKINN, P.B & SANDERS, G.S., Cement Slurry Qualification, Field Mixing and Quality Assurance Procedures for Coiled-Tubing Squeeze Operations in Prudhoe Bay, Alaska. SPE 26089, 1993.

WASTE STATISTICS, 2017. Eurostat Statistics Explained, Disponível em: <www.ec.europa.eu> Acesso em: Fevereiro, 2018.

WERLE, A. P. *Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2010. f. 162. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010.

YOUNG, J. F., MINDESS, S., GRAY, R. J., BENTUR, A., *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*, 1 ed., New Jersey, Prentice Hall, 1998.

ZHANG, J.; SCHERER, G. W. (2010). Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1024-1036, 2011.

ZHU, P.; MAO, X. Q.; WENJUN, Q.; ZONGYANG, L.; ZHONGGUO, J. M. (2016). Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*. v.113 p. 246–254, 2016.

ZORDAN, S. E. *A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto*. 1997. f. 140. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campinas, 1997.