

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

HUESLEI GRISON SOARES

**APROVEITAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO
DE PRECISÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Caxias do Sul

2019

HUESLEI GRISON SOARES

**APROVEITAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO
DE PRECISÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Materiais de Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon

Coorientador: Prof. Dr. Cleber Rodrigo de Lima Lessa

CAXIAS DO SUL

2019

HUESLEI GRISON SOARES

**APROVEITAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO
DE PRECISÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Trabalho final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andre Zimmer - IFRS

Prof. Dr. Daniela Lupinacci Villanova – IFRS

Prof. Dr. Janete Eunice Zorzi - UCS

Orientador: Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon - IFRS

Apresentado e aprovado em: 11, de outubro de 2019.

Local da defesa: IFRS – Campus Farroupilha

DEDICATÓRIA

A minha esposa Patrícia Treviso e a minha filha recém-nascida Lívia Treviso Soares, pela compreensão, incentivo, apoio, e por despertar em mim uma evolução constante.

Aos meus pais, pelos valores transmitidos ao longo da vida. Principalmente a minha mãe por sempre incentivar o meu desenvolvimento intelectual.

E a Deus, por abençoar e iluminar meus passos, permitindo a realização de meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por permitir que tudo isso se tornasse realidade.

À minha esposa Patrícia Treviso e minha filha recém-nascida Livia Treviso Soares pela paciência, compreensão, amor, carinho e incentivo prestado em todos os momentos.

Aos meus pais, pelos valores transmitidos ao longo da vida. Principalmente a minha mãe por sempre me apoiar e incentivar a continuar, acima de tudo.

A todos os professores e colaboradores do Instituto Federal do Rio Grande do Sul. Em especial aos professores Dr. Cleber Rodrigo de Lima Lessa pela orientação, ensino, incentivo e oportunidade de desenvolvimento deste trabalho. Ao professor Dr. André Zimmer, pelos ensinamentos, orientação e ajuda prestada na realização dos testes no início deste trabalho. Ao professor Prof. Dr. Douglas Alexandre Simon por assumir a orientação do trabalho em sua reta final. Aos colaboradores Joseane Cristina Kunrath Stroeher e Nivaldo José Moser pelo apoio nos ensaios realizados.

Ao instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Caxias do Sul e Campus Feliz, por disponibilizar os Laboratórios de Tecnologia e Pesquisa para a realização dos ensaios de laboratório.

A empresa Microinox por fornece toda a casca cerâmica do processo de fundição de precisão usada no trabalho.

A empresa Supermix por ceder o laboratório e auxiliar nos ensaios realizados. Em especial ao técnico Guilherme da Silva pelo apoio nos ensaios realizados.

A todos os amigos, e colegas que contribuíram para realização deste trabalho, através de incentivos, ajuda e apoio nos momentos de dificuldades.

RESUMO

Em virtude dos grandes volumes de resíduos, provenientes dos moldes cerâmicos, produzidos pela fundição de precisão, que ultrapassaram o montante de 3.000 toneladas apenas no ano de 2016 no Rio Grande do Sul, este resíduo se tornou um passivo ambiental devido à grande dificuldade de ser incorporado ao processo produtivo, acabando por ser depositado em aterros industriais pela maioria das empresas, gerando um alto custo e um grande prejuízo ambiental (SOARES, 2018, pg. 28). A presente pesquisa teve como objetivo estudar a viabilidade técnica do aproveitamento deste resíduo, denominado casca cerâmica, na substituição parcial ou total dos componentes (brita, areia e cimento) em concretos de alta resistência de 500 Kgf/cm² (50 MPa), utilizados na construção civil. Em corpos de prova (CPs) de concreto com e sem resíduo foram realizados os ensaios de: pozolanicidade, índice de consistência do concreto no estado fresco, absorção de água por capilaridade e por imersão e ensaio de resistência à compressão. Os resultados mostram uma grande semelhança entre o concreto padrão sem adições e o concreto com a incorporação do resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão (RCCF). Evidenciando seu grande potencial de uso, quando substituído 100 % do agregado graúdo, 50 % do agregado miúdo e até 20 % do cimento Portland, projeta-se benefícios econômicos e ambientais para as empresas de fundição e da construção civil com a adoção desta tecnologia.

Palavras-chave: Resíduos de moldes cerâmicos; Fundição de precisão; Concreto de alta resistência; Aproveitamento de resíduo.

ABSTRACT

Due to the large volumes of waste from ceramic molds produced by the investment casting, which exceeded 3,000 tons in 2016 only in Rio Grande do Sul, this waste becomes an environmental liability due to the great difficulty of being reincorporated into the production process and ends up being deposited in industrial landfills by most companies, generating a high cost and a great environmental damage. This research aimed to study the technical feasibility of using this residue, named as ceramic shell, replacing totally or partially the components (gravel, sand and cement) in high strength concrete of 500Kgf. / cm² (50 MPa), used in construction. In concrete specimens (CPs) with and without residue, the following tests were carried out: pozzolanicity, fresh concrete consistency index, water absorption by capillarity and immersion and also compressive strength test. The results show great similarity between the standard concrete without additions and the concrete with the incorporation of the investment casting ceramic shell residue (RCCF). Highlighting its great potential for use, when 100 % of coarse aggregate, 50 % of fine aggregate and up to 20 % of Portland cement are replaced, economic and environmental benefits are projected for foundry and construction companies with the adoption of this technology.

Keywords: Waste of ceramic molds; Investment Casting; High strength concrete; Utilization of waste.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Etapas do processo de fundição de precisão..... | 19 |
| Figura 2: Difração de raios X da casca cerâmica do processo de fundição de precisão por Camacho..... | 23 |
| Figura 3: Difração de raios X da casca cerâmica do processo de fundição de precisão por Machado. | 24 |
| Figura 4: Representação do efeito “filler” das pozolanas no concreto. Esquerda – concreto sem pozolana (porosidade excessiva). Direita – concreto com pozolana (finas partículas de pozolana preenchem os poros)..... | 27 |
| Figura 5: Ilustração da interface entre os agregados e a pasta de cimento..... | 36 |
| Figura 6: Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão (RCCF) em lascas. | 46 |
| Figura 7: Materiais para a execução dos concretos. (a) Agregado graúdo natural (brita). (b) RCCF-brita depois de peneirado em faixas granulométricas semelhante ao agregado natural..... | 47 |
| Figura 8: Materiais para a execução dos concretos. (a) Agregado miúdo natural (areia). (b) RCCF-areia depois de peneirado em faixas granulométricas semelhante ao agregado miúdo..... | 47 |
| Figura 9: Materiais para a execução dos concretos. (a) Cimento Portland. (b) RCCF-cimento após processado no moinho de bolas. | 48 |
| Figura 10: Corpos de prova (CPs) para ensaio de pozolanicidade..... | 49 |
| Figura 11: Betoneira usada para misturar componentes do concreto. | 52 |
| Figura 12: Ensaio abatimento do tronco cone..... | 53 |
| Figura 13: Corpos de prova (CPs) após cura de 28 dias..... | 54 |
| Figura 14: CPs imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio..... | 54 |
| Figura 15: Retífica para CPs..... | 55 |
| Figura 16: Prensa Hidráulica..... | 55 |
| Figura 17: Faixas granulométricas obtidas, para o agregado graúdo natural (brita) e o RCCF-brita..... | 59 |
| Figura 18: Faixas granulométricas obtidas, para o agregado miúdo natural (areia) e o RCCF-areia..... | 60 |
| Figura 19: Resultado da difração de raios X do RCCF..... | 63 |
| Figura 20: Grau de escoamento (<i>slump test</i>) do concreto no estado fresco com e sem adição de água e aditivo plastificante, quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita. | 65 |
| Figura 21: Grau de escoamento (<i>slump test</i>) do concreto no estado fresco com e sem adição de água e aditivo plastificante, quando substituída a areia natural pelo RCCF-areia. | 66 |
| Figura 22: Grau de escoamento (<i>slump test</i>) do concreto no estado fresco, quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento..... | 66 |
| Figura 23: Resultados da resistência à compressão depois de 3, 7 e 28 dias de cura, quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 24: Resultados da resistência à compressão depois de 3, 7 e 28 dias de cura, quando substituída a areia natural pelo RCCF-areia..... | 69 |
| Figura 25: Resultados da resistência à compressão depois de 3, 7 e 28 dias de cura, quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento. | 71 |
| Figura 26: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura quando substituída brita natural pelo RCCF-brita..... | 72 |
| Figura 27: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura quando substituída areia natural pelo RCCF-areia..... | 72 |
| Figura 28: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento. | 73 |
| Figura 29: Resultado do ensaio de absorção de água por imersão após 28 dias de cura quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita..... | 73 |
| Figura 30: Resultado do ensaio de absorção de água por imersão após 28 dias de cura quando substituída a brita natural pelo RCCF-areia..... | 74 |
| Figura 31: Resultado do ensaio de absorção de água por imersão após 28 dias de cura quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento. | 75 |
| Figura 32: Imagem macroscópica do RCCF. | 75 |
| Figura 33: Concreto rompido após 28 dias de cura. (a) CP com 100 % de RCCF – brita em substituição da brita. (b) CP com 100 % de RCCF-areia em substituição da areia. | 76 |
| Figura 34: Casca cerâmica do processo de fundição de precisão ampliada 5X. | 77 |
| Figura 35: Micrografia do concreto com 100 % de RCCF-brita em substituição da brita aumento de 10X..... | 78 |
| Figura 36: Micrografia do concreto com 100 % de RCCF-areia em substituição da areia aumento de 10X..... | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Limites usuais da composição do cimento Portland. | 25 |
| Tabela 2: Resultados do ensaio granulométrico do agregado graúdo natural (brita)..... | 40 |
| Tabela 3: Características físicas do agregado graúdo natural (brita) | 40 |
| Tabela 4: Resultados do ensaio granulométrico do RCCF-brita..... | 41 |
| Tabela 5: Características físicas do agregado graúdo RCCF-brita..... | 42 |
| Tabela 6: Resultados do ensaio granulométrico do agregado miúdo natural (areia). | 42 |
| Tabela 7: Características físicas do agregado miúdo natural (areia)..... | 43 |
| Tabela 8: Resultados do ensaio granulométrico do RCCF-areia..... | 44 |
| Tabela 9: Características físicas do agregado miúdo do RCCF-areia | 44 |
| Tabela 10: Teor de argamassa por tamanho de brita..... | 50 |
| Tabela 11: Quantidade de água por tamanho de brita. | 50 |
| Tabela 12: Traço usado para o concreto em estudo. | 51 |
| Tabela 13: Comparação de algumas propriedades físicas encontradas para os agregados usados na pesquisa. | 60 |
| Tabela 14: Comparação de algumas propriedades físicas entre o cimento Portland e o RCCF-cimento. | 61 |
| Tabela 15: Resultado da fluorescência de raios X (FRX) do RCCF. | 62 |
| Tabela 16: Índice de atividade pozolânica do resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão..... | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS

A = Absorção de água, em porcentagem;

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP = Corpo de Prova

d_1 = Massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

d_2 = Massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

d_a = Massa específica do agregado aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

d_s = Massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

d = Massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

E_v = Índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem;

F_c = Fator de correção da peneira utilizada no ensaio, determinado de acordo com o disposto na ABNT NBR NM ISSO 3310-1.

I_F = Índice de finura do cimento, expresso em porcentagem (%);

m_1 = Massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

m_2 = Massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

m_a = Massa em água da amostra, em gramas;

m_{ar} = Massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r = Massa do recipiente vazio, em quilogramas;

m_s = Massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m = Massa ao ar da amostra seca em estufa, em gramas;

ρ_a = Massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico;

ρ_{ap} = Massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

ρ_w = Massa específica de água, em quilogramas por metro cúbico;

ρ = Massa específica do material ensaiado, em gramas por centímetro cúbico;

r = Cimento retido na peneira 75 μm , expresso em gramas (g);

RCCF = Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão;

RCCF-areia = Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão cominuído e peneirado com granulometria semelhante a areia natural;

RCCF-brita = Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão cominuído e peneirado com granulometria semelhante à brita natural;

RCCF-cimento = Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão cominuído até atingir finura menor que o cimento Portland;

V_a = Volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos:

V = Volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$), em centímetros cúbicos.

V_f = Volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_r = Volume do recipiente, em metros cúbicos;

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 2.1 FUNDIÇÃO | 17 |
| 2.2 FUNDIÇÃO DE PRECISÃO..... | 18 |
| 2.3 CASCA CERÂMICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO | 19 |
| 2.4 CIMENTO PORTLAND..... | 24 |
| 2.5 MATERIAIS POZOLÂNICOS..... | 26 |
| 2.6 AGREGADOS..... | 28 |
| 2.7 CONCRETOS | 29 |
| 2.7.1 Aditivos superplastificantes | 30 |
| 2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM | 31 |
| 2.9 RESÍDUOS SÓLIDOS | 31 |
| 2.10 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NO CONCRETO | 33 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1 MATERIAIS | 39 |
| 3.1.1 Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão (RCCF) | 39 |
| 3.1.2 Agregado graúdo (brita) | 39 |
| 3.1.3 RCCF cominuído como agregado graúdo (RCCF-brita) | 41 |
| 3.1.4 Agregado miúdo (areia) | 42 |
| 3.1.5 RCCF cominuído como agregado miúdo (RCCF-areia) | 43 |
| 3.1.6 Cimento Portland | 45 |
| 3.1.7 RCCF cominuído como cimento (RCCF-cimento) | 45 |
| 3.1.8 Água | 45 |
| 3.1.9 Superplastificante | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2 MÉTODOS | 46 |
| 3.2.1 Processamento do Resíduo da casca cerâmica..... | 46 |
| 3.2.2 Fluorescência de raios X (FRX)..... | 48 |
| 3.2.3 Difração de raios X (DRX)..... | 48 |
| 3.2.4 Avaliação do índice de atividade pozolânicas do RCCF..... | 49 |
| 3.2.5 Dosagem de materiais. | 49 |
| 3.2.6 Procedimento para executar o concreto | 52 |
| 3.2.7 Montagem e cura dos corpos de prova (CPs) | 53 |
| 3.2.8 Ensaio de resistência à compressão..... | 55 |
| 3.2.9 Ensaio de absoção de água por capilaridade..... | 56 |
| 3.2.10 Ensaio de absorção de água por imersão..... | 56 |
| 3.2.11 Análise macroscópica dos concretos e do RCCF..... | 57 |
| 3.2.12 Microscopia ótica dos concretos e do RCCF. | 57 |
| 3.2.12 Análise estatística dos resultados de resistência à compressão | 58 |
| 4 RESULTADOS..... | 59 |
| 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS | 59 |
| 4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX) DO RCCF..... | 61 |
| 4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) DO RCCF | 62 |
| 4.4 AVALIAÇÃO DO RCCF COMO POZOLANA | 63 |
| 4.5 AVALIAÇÃO DO GRAU DE ESCOAMENTO | 64 |
| 4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS | 67 |
| 4.7.1 Substituição do agregado graúdo pelo RCCF-brita | 67 |
| 4.7.2 Substituição do agregado miúdo pelo RCCF-areia..... | 69 |
| 4.7.3 Substituição do cimento pelo RCCF-cimento..... | 70 |
| 4.7 AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE | 71 |
| 4.8 AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO..... | 73 |
| 4.9 ANÁLISE MACROSCÓPICA..... | 75 |
| 4.10 ANÁLISE DE MICROSCOPIA..... | 76 |
| 5 CONCLUSÕES | 80 |

| | |
|--|-----------|
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 82 |
| REFERÊNCIAS..... | 83 |
| ANEXO – A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 3 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A BRITA PELO RCCF-BRITA..... | 87 |
| ANEXO – B - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 7 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A BRITA PELO RCCF-BRITA..... | 88 |
| ANEXO – C - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A BRITA PELO RCCF-BRITA..... | 89 |
| ANEXO – D - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 3 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A AREIA PELO RCCF-AREIA. | 90 |
| ANEXO – E - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 7 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A AREIA PELO RCCF-AREIA. | 91 |
| ANEXO – F - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A AREIA PELO RCCF-AREIA. | 92 |
| ANEXO – G - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 3 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDO O CIMENTO PELO RCCF-CIMENTO. | 93 |
| ANEXO – H - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 7 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDO O CIMENTO PELO RCCF-CIMENTO. | 94 |
| ANEXO – I - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDO O CIMENTO PELO RCCF-CIMENTO. | 95 |

1 INTRODUÇÃO

A fundição de precisão, também chamada de fundição por cera perdida, microfusão ou *Investment Casting*, apesar de ser um dos mais antigos processos de fundição, permanece em crescente desenvolvimento, sendo aplicada com sucesso para produção de fundidos de arte por vários séculos, até hoje usada em aplicações de alta tecnologia. O processo difundiu-se da China para a Índia, Egito, África e Europa, sendo também utilizado por colombianos e astecas (MACHADO, 2001).

Existe um mercado de alto potencial para o processo de fundição de precisão, e acredita-se que continuará apresentando crescimento, principalmente, em aplicações de alta tecnologia, produzindo peças para diversos setores (automobilístico, têxtil, alimentício, entre outros), sendo a maioria em ligas ferrosas (MACHADO, 2001, pg. 9).

Esse processo vem ganhando mercado devido à grande precisão obtida em seu produto final, por atender a desafios tecnológicos na área de qualidade e redução de custos de fabricação, permitindo obter peças simples e complexas, com diversos tipos de ligas, alta qualidade superficial e tolerâncias dimensionais estreitas, possibilitando eliminar uma série de operações de usinagem e soldagem.

O Brasil tem cerca de 33 fundições que trabalham com este processo, sendo a maioria de pequeno e médio porte, estando concentradas nas regiões Sul e Sudeste (ABIFA, 2015).

O processo de fundição de precisão consiste basicamente em aplicar lama com pó cerâmico e partículas de material refratário granulado (estuco) em torno de um modelo consumível, normalmente de cera. Este processo é realizado várias vezes até se obter um molde cerâmico com camada desejada, então a cera é fundida e retirada de dentro do molde que é calcinado para obter rigidez e receber o metal líquido (MACHADO,2001).

Ao fim deste processo este vaso cerâmico é quebrado, gerando um resíduo denominado casca refratária ou casca cerâmica, tornando-se um sólido de grande volume e com poucas possibilidades de ser reutilizado no processo, visto que seu grande número de componentes dificulta a sua separação e sua inserção no processo, que sem as características originais, prejudicaria o desempenho.

A gestão deste resíduo sólido torna-se um custo para a empresa, visto que o único fim a ser dado são os aterros industriais, que normalmente ficam distantes do processo produtivo.

É notório o grande prejuízo ambiental em função de um grande volume de resíduo estar simplesmente sendo aterrado, podendo ser reciclado e utilizado como matéria-prima em outros processos produtivos.

O consumo aparente de cimento, em 2013, chegou a 71,0 milhões de toneladas consumidas em todo o território nacional. Isso significou um consumo per capita de 353 kg/hab/ano (SNIC, 2013).

A indústria de cimento produz cerca de 2,6 bilhões de toneladas de cimento por ano, sendo seu maior uso para a produção de concreto, que é o material mais usado pelo homem no mundo. Para produzir uma tonelada de cimento, é necessário o equivalente a 60 a 130 kg de combustível e 110 kWh de energia elétrica, com isso a indústria do cimento é responsável por 5 % do CO₂ produzido pelo homem em escala mundial (CSI, 2018).

O concreto demanda uma grande quantidade de materiais inertes, como a areia e a brita. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma atividade que causa danos ao meio ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de estabilidade (BIANCHINI *et. al*, 2005 apud TEDESCO, 2016).

Uma alternativa bastante atraente para a reciclagem do resíduo da casca cerâmica da fundição de precisão (RCCF) seria a substituição total ou parcial dos materiais do concreto utilizados na construção civil, como os agregados e o cimento, visto que inúmeros estudos vêm demonstrando as potencialidades na substituição destes componentes do concreto por resíduos cerâmicos. Desta forma, seria dado um fim ecologicamente correto ao RCCF, que além de proporcionar grandes benefícios às empresas de fundição, trariam um ganho ambiental com a diminuição da extração de recursos naturais do meio, redução no consumo de energia, como uma considerável redução nas emissões das indústrias de cimento, possibilitando a geração de recursos financeiros, diminuindo o custo na matéria-prima da construção civil e resolvendo o problema de descarte das fundições de precisão.

1.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem por objetivo analisar propriedades do concreto de alta resistência 500 kgf/cm² (50 MPa), quando são substituídos seus componentes (agregados e cimento) pelo resíduo da casca cerâmica da fundição de precisão (RCCF).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o RCCF na forma de agregado graúdo, miúdo e cimento por meio da análise de massas e granulometria;
- Caracterizar o RCCF de acordo com sua composição química e suas estruturas cristalinas;
- Avaliar a pozzolanicidade do RCCF;
- Substituir os agregados graúdo e miúdo do concreto pelo RCCF nas proporções de 25 %, 50 %, 75 %, 100 %;
- Substituir o cimento Portland do concreto pelo RCCF nas proporções de 10 %, 20 %, 30 %;
- Avaliar as propriedades de consistência com e sem a adição de plastificante nos concretos com e sem RCCF;
- Medir a quantidade de água absorvida nos concretos com e sem RCCF;
- Mensurar os efeitos causados pela substituição dos materiais pelo RCCF na resistência à compressão;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDIÇÃO

A técnica de fundição é o processo pelo qual um metal fundido é vertido na cavidade de um molde com o formato da peça desejada e, após a solidificação, o metal assume a forma de molde. A fundição é empregada quando a forma final da peça é muito grande ou complicada e outro processo seria impraticável, ou quando a liga específica tem alta resistência impossibilitando a conformação por meio de trabalho a quente ou a frio, ou ainda quando comparado com outros processos de fabricação, a fundição é o processo mais econômico (CALLISTER e RETHWISCH, 2012, pg. 357).

Historicamente, a fundição está presente entre os homens a mais de quatro milênios a.C. com a fabricação dos primeiros objetos de cobre, ouro, prata, entre outros, contudo somente há mais de quatro décadas a fundição de metais e suas ligas tem sido pesquisada com metodologia científica (FERREIRA, 2010, pg. 2).

A indústria de fundição no Brasil produziu, em 2014 aproximadamente 2,737 milhões de toneladas de fundidos, ocupando o lugar de 7º produtor mundial, empregando, em 2015, cerca de 58.000 trabalhadores, faturando 5,5 bilhões de dólares. Com aproximadamente 1200 empresas, a maioria de pequeno e médio porte, o país possui uma capacidade instalada de 4.000 toneladas/ano (ABIFA, 2016).

Segundo Ferreira (2010, pg. 5), os processos de fundição podem ser classificados de acordo com a natureza dos materiais utilizados na confecção dos moldes e modelos, onde o molde que serve para apenas uma única peça seja considerado “perdido” e o molde que dá origem a uma série de peças seja considerado molde “permanente”, o mesmo princípio é utilizado para os modelos em “perdidos e permanentes”.

A fundição de precisão também conhecida como fundição por cera perdida, microfusão, *investment casting*, *lost wax*, será detalhada no tópico seguinte.

2.2 FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

O processo de fundição de precisão, apesar de ser um dos mais antigos processos de fundição, com vestígios de 4000 a.C., está em crescente desenvolvimento, principalmente por atender a desafios tecnológicos na área de qualidade e redução de custos de fabricação final, permitindo obter peças com alta qualidade superficial e tolerâncias dimensionais estreitas, possibilitando eliminar uma série de operações de usinagem, soldagem, encaixes (MACHADO, pg. 9, 2001).

Dentre os processos de fundição, a fundição de precisão é uma das que possuem maior aporte tecnológico, competindo com produtos usinados ou conformados a partir de pós (SOARES, 2000, pg. 38).

Segundo Ferreira (2010, pg. 7) o processo de fundição de precisão se aplica a uma diversa gama de ligas metálicas ferrosas, não-ferrosas e super-ligas, com peças de pequenas dimensões podendo chegar a peças com pesos superiores a 300 Kg, com dimensões maiores que 1000 mm lineares e seções de espessuras 1,5 mm com reprodução muito detalhista.

Ainda conforme Machado (2001), o processo de fundição de precisão consiste basicamente em aplicar lama com pó cerâmico e partículas de material refratário granulado (estuco), em torno de um modelo consumível, normalmente de cera, originando assim o nome de fundição por cera perdida. Para a produção dos moldes há dois métodos distintos: molde sólido e casca cerâmica. Sendo, os moldes sólidos mais comuns para a área odontológica e de joias e as cascas cerâmicas mais utilizadas industrialmente.

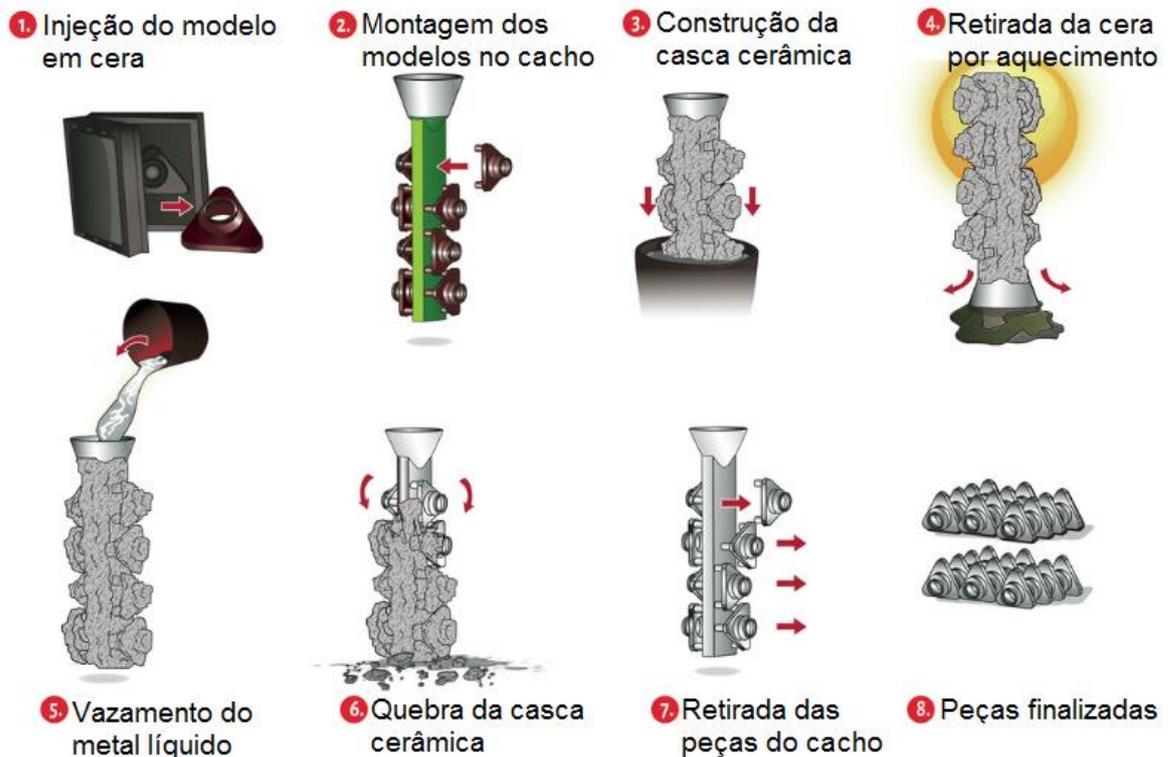
As etapas do processo de fundição de precisão, segundo *Investement Casting Institute* (2017), são:

- Injeção de cera fundida em uma matriz, normalmente de metal, com a cavidade da peça, conforme Figura 1- 1;
- As peças em cera solidificadas, quando, pequenas são montadas em um cacho ou árvore, conforme Figura 1 - 2;
- Produção do molde ou casca cerâmica mediante a imersão do cacho de cera no banho de lama cerâmica e posterior mergulho em material refratário granulado

(estuco), repetindo o processo até a obtenção da camada desejada, conforme Figura 1 - 3;

- O cacho com as peças é aquecido para a retirada da cera e o molde, posteriormente é aquecido para sua sinterização, conforme Figura 1 - 4;
- Vazamento do metal fundido no interior do molde conforme Figura 1 - 5;
- Quebra do molde de casca cerâmica (manual ou mecânico), conforme Figura 1 - 6;
- Após solidificação as peças são cortadas da árvore conforme Figura 1 - 7;
- Acabamento final e inspeção, conforme Figura 1 - 8;

Figura 1: Etapas do processo de fundição de precisão



Fonte: Adaptado de *Investment Casting Institute* (2017)

2.3 CASCA CERÂMICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Na fundição de precisão o molde de casca cerâmica é produzido por uma série de sucessivas imersões, de forma manual ou automatizada, em um banho de pasta cerâmica e posterior deposição de partículas refratárias. Estes dois processos são

repetidos e intercalados por secagem em ambientes com temperatura e umidade controlados até se obter a camada desejada (FERREIRA, 2010).

A casca pode chegar a mais de 15 camadas, conforme o tamanho do cacho e o metal a ser vazado, e sua espessura varia, normalmente, de 5 a 16 mm, devendo resistir à saída da cera sob ação do calor e ao vazamento do metal fundido a altas temperaturas e sua posterior solidificação (MACHADO, 2001).

No banho em um tanque de pasta de cerâmica fluidizada, a árvore é imersa e sujeita a movimentos de rotação para garantir uma total cobertura dos modelos de cera e uniformidade, sendo depois retirada do tanque e rotacionada para o escoamento do excesso de lama. Logo após a cobertura de lama o cacho é revestido de partículas de material refratário sendo depositadas pela projeção em chuveiros ou em banhos fluidizados em tanques com ar soprado, de cima para baixo, promovendo a flutuação das partículas. Após cada camada refratária o aglomerante passa por secagem em local com temperatura e umidade controladas para a posterior deposição da camada seguinte (FERREIRA, 2010).

Normalmente nas primeiras camadas são usados materiais mais finos tanto nas lamas quanto na estucagem, para proporcionar um molde com superfície interna mais lisa. As demais camadas usam materiais de grãos maiores para promover maior resistência e permeabilidade da casca (MACHADO, 2001).

Segundo Machado (2001), os materiais comumente usados para a lama são refratários na forma de pós, aglomerantes, agentes de molhamento, nucleantes e antiespumantes. Para as partículas de revestimento são usados materiais refratários de variadas granulometrias.

Como refratários, emprega-se comumente:

- Sílico-aluminoso - Compostos por cristais de mulita e sílica amorfa, com um teor de alumina entre 42 a 72 %; os materiais são sinterizados, triturados e usados na forma de pós para a lama e em grãos para o estuco.
- Alumina – Obtida a partir da bauxita, mais refratária que a sílica ou que a mulita, de baixa reatividade com os metais, sendo comumente usada para super-ligas (FERREIRA, 2010).

- Critobalita (SiO_2) – sílica de alta pureza e baixo ponto de fusão, usada para não-ferrosos em indústrias de joias e próteses dentárias.
- Sílica fundida – obtida geralmente pela fusão de areias de quartzo natural seguida de solidificação e trituração, utilizada como material para a lama e como estuco para ligas ferrosas e não ferrosas.
- Quartzo (99,5 % SiO_2) – material refratário de baixo custo e grande disponibilidade, porém com utilização limitada devido ao elevado coeficiente de expansão térmica.
- Zircônia – presente na natureza na forma de areia, normalmente com 67,1 % ZrO_2 e 32,9 % SiO_2 , é usada como pó nas lamas de primeira e segunda camada e como estuco de baixa granulometria na primeira camada, normalmente através de chuveiros, devido a sua alta densidade. Sendo usado normalmente nas primeiras camadas por apresentar baixa reatividade com a maioria dos metais e ligas (MACHADO, 2001).

Como aglomerantes podem ser empregados:

- Sílica coloidal – é obtido por trocas iônicas na remoção de íons de sódio do silicato de sódio, sendo o aglomerante mais comumente usado, consistindo em uma dispersão coloidal de partículas esféricas de sílica em água. Sua principal desvantagem é a quantidade de água, que aumenta o tempo de secagem (FERREIRA, 2010).
- Silicato de etila - é formado pela reação de tetracloreto de sílica com o álcool etílico, que por si só não tem propriedades aglomerantes, mas em contato com a água reage por hidrólise e forma ácidos silicosos capazes de condensação formando um gel coerente que apresenta propriedades aglomerantes. Devido à presença de álcool, apresenta um tempo de secagem mais rápido (FERREIRA, 2010).
- Outros aglomerantes - devido à criação de novas ligas foram desenvolvidos novos aglomerantes à base de alumina coloidal e de zircônia coloidal, entretanto ambos apresentam propriedades aglomerantes inferiores aos de sílica coloidal à temperatura ambiente.

Também são utilizados os seguintes aditivos:

- Agentes de molhamento: também chamados de surfactantes, diminuem a tensão superficial da lama e permitem que as árvores em cera sejam molhadas com mais facilidade.

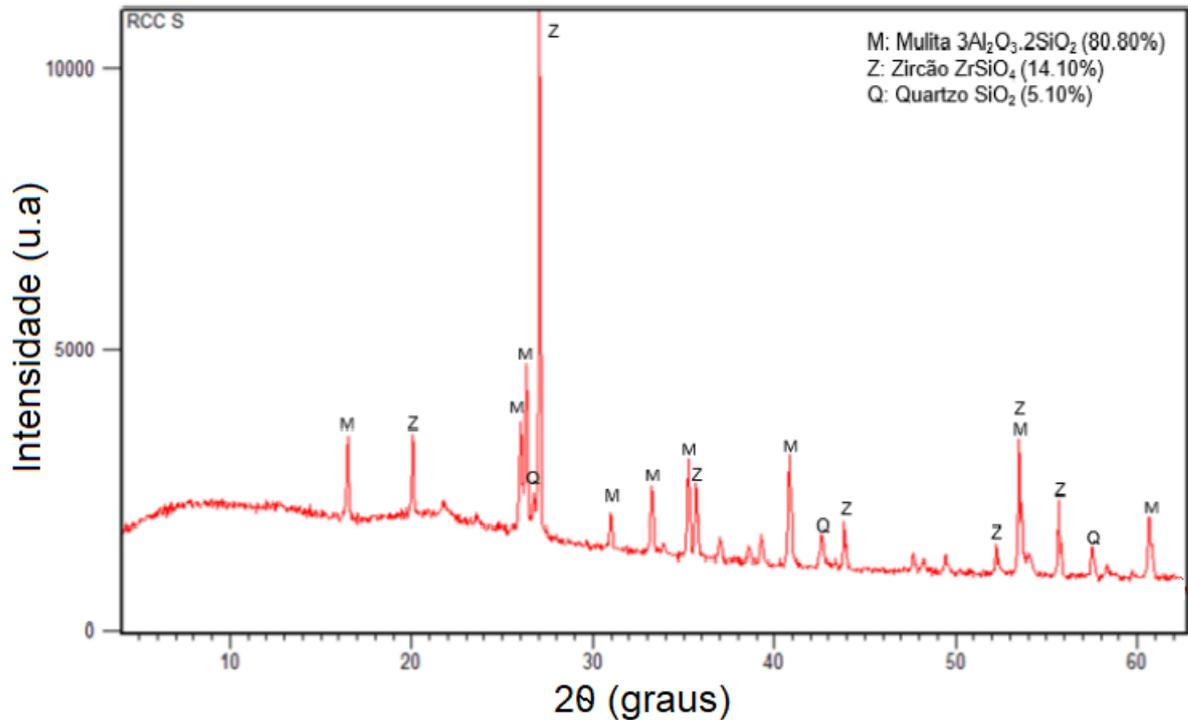
- Antiespumantes: normalmente orgânicos, adicionados, em geral, na primeira lama para evitar que o ar fique retido no banho e que sejam formadas bolhas sobre a cera quando os cachos são mergulhados.
- Agentes nucleantes: são adicionados nas lamas para refinar o tamanho de grão na superfície do metal.

Ainda conforme Machado (2001) após a obtenção da camada da casca cerâmica ocorre a remoção do modelo do interior do molde, sendo esta a operação que submete a casca às maiores tensões, devido à expansão térmica da cera dos modelos. Para a fusão da cera existem vários métodos, apresentando maior sucesso as autoclaves, que permitem a recuperação da cera devido à baixa temperatura de operação na ordem de 170 °C, e a queima rápida em fornos a altas temperaturas que por vezes queimam e deterioram a cera impedindo sua recuperação.

O molde cerâmico após a retirada da cera é aquecido em um forno a temperaturas entre 870 °C a 1095 °C para a remoção dos resíduos de cera e qualquer outro aditivo orgânico adicionado à pasta cerâmica. Nesta temperatura ocorre a sinterização da casca cerâmica aumentando sua resistência mecânica. No final do processo, o molde deve apresentar elevada resistência mecânica para resistir ao vazamento do metal fundido e possuir certa permeabilidade que permita a saída de ar do interior de suas cavidades (FERREIRA, 2010).

Em caracterização química da casca cerâmica do processo de fundição de precisão, realizada por Camacho (2016) foi encontrado como principais componentes em análise de fluorescência de raios X, $\text{SiO}_2 = 49,22 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 40,92 \%$ e $\text{Zr} = 4,82 \%$. Já na análise de difração de raios X (Figura 2), os materiais encontrados foram a mulita ($3.\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$) = 80,8 %, zircão (ZrSiO_4) = 14,1 % e o quartzo (SiO_2) = 5,1 %, onde um alo de amorfismo fica evidente com deslocamento da linha entre os ângulos 0 e 15°, correspondendo a fração de sílica eletrofundida (amorfa) que não cristalizou e o restante do material apresenta estrutura cristalina.

Figura 2: Difração de raios X da casca cerâmica do processo de fundição de precisão por Camacho.

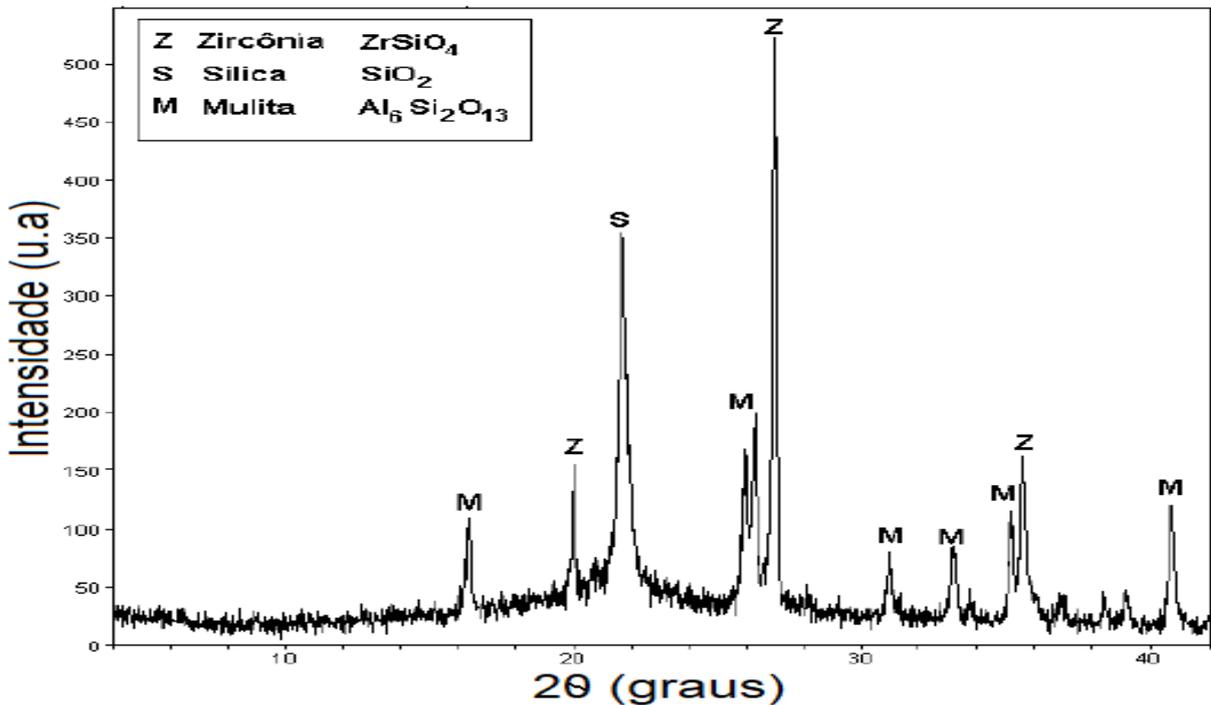


Fonte: Adaptado de Camacho (2016).

A casca cerâmica do processo de fundição de precisão foi estudada por Machado (2016), mostrando como principais componentes da casca cerâmica o $\text{SiO}_2 = 56,49\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30,65\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,65\%$, $\text{CaO} = 2,59\%$ e $\text{ZrO}_2 = 2,06\%$.

Em pesquisa realizada por Machado (2013), obteve como resultados da caracterização da casca cerâmica do processo de fundição de precisão, principais componentes $\text{SiO}_2 = 74,70\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17,48\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,89\%$ e $\text{ZrO}_2 = 4,50\%$. Em ensaio de difração de raios X (Figura 3), o espectro apresentou picos que correspondem às fases cristalinas de sílica (SiO_2), mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e zirconita (ZrSiO_4), que além das fases cristalinas identificadas, apresenta um domo de amorfização entre 18° e 28° , que pode ser atribuído à presença de sílica reativa. O resíduo em estudo apresentou massa específica aparente de $2,59\text{ g/ml}$ e sua atividade pozolânica teve um índice de $79,98\%$.

Figura 3: Difração de raios X da casca cerâmica do processo de fundição de precisão por Machado.



Fonte: Adaptado de Machado (2013).

2.4 CIMENTO PORTLAND

Segundo Neville (2016, pg. 2), os cimentos Portland são descritos como materiais com propriedades adesivas e coesivas tornando-o capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta, sendo denominados hidráulicos, em virtude da propriedade de reagir quimicamente com a água e endurecer, sendo amplamente usados na construção civil combinados com materiais cerâmicos como pedras, areia, tijolos, blocos, etc. Historicamente, a utilização de materiais com estas propriedades é bastante antiga, sendo usado por Egípcios, Gregos e Romanos.

O processo de fabricação do cimento Portland, segundo Neville (2016, pg. 3), inicia a partir da moagem e mistura da matéria-prima de seus componentes nas proporções necessárias e posterior queima a temperaturas até cerca de 1450 °C em grandes fornos rotativos. O material é sinterizado e parcialmente fundido, formando esferas chamadas de clínquer, que após resfriamento recebe a adição de uma pequena adição de sulfato de cálcio, quando então o material é moído até se tornar um pó bastante fino.

Os principais constituintes do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), representando, geralmente de 95 a 96 % do total de seus componentes (BAUER, pg. 35, 2013).

Neville (2016) apresenta uma ideia geral da composição química média dos cimentos Portland:

Tabela 1: Limites usuais da composição do cimento Portland.

| Óxido | Teor (%) |
|----------------------------------|-----------|
| CaO | 60 – 67 |
| SiO ₂ | 17 – 25 |
| Al ₂ O ₃ | 3 – 8 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,5 – 6,0 |
| MgO | 0,5 – 4,0 |
| Álcalis (como Na ₂ O) | 0,3 – 1,2 |
| SO ₃ | 2,0 – 3,5 |

Fonte: Neville (2016).

Conforme Bauer (2013, pg 40), no processo de fabricação dos cimentos ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que resultam nos seguintes componentes:

- silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$), composto de maior quantidade, responsável pela resistência, principalmente até o primeiro mês de cura, sendo o segundo componente em liberação de calor e propriedades de pega, forma cristais retangulares;
- silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$), influencia no processo de endurecimento nas idades mais avançadas de um ano ou mais, com pouca liberação de calor e propriedades de pega;
- aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$), sua quantidade é relativamente pequena, sua reação em contato com a água é violenta, contribuindo para a resistência principalmente no primeiro dia, com maior liberação de calor dentre os componentes e responsável pela aceleração da mudança do estado de fluido para rígido, forma um material intersticial prismático, frequentemente apresenta-se em forma de placas;

- ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$), não contribui para a resistência, com pouca liberação de calor;

A pega do cimento compreende a mudança de estado de fluido para rígido, devido ao processo de hidratação seletivo dos compostos do cimento. Os dois compostos que reagem primeiramente são o C_3A e o C_3S que contribuem para essa mudança de estado. Com a adição de sulfato de cálcio (CaSO_4) a formação do aluminato tricálcico é atrasada, retardando o enrijecimento do concreto. (NEVILLE, 2016, pg 19).

Ainda segundo Bauer (2013, pg 45), o cimento Portland, usualmente apresenta densidade absoluta de $3,15 \text{ g/cm}^3$, densidade aparente de $1,5 \text{ g/cm}^3$. A norma que rege o ensaio de massa específica é ABNT NBR 16605:2017.

A finura do cimento é um fator que influencia na velocidade da reação de hidratação, contribuindo também na qualidade da pasta, argamassa e concretos. O aumento de finura melhora a resistência, diminui a segregação, aumenta a impermeabilidade e a trabalhabilidade. O índice de finura é obtido pela norma ABNT NBR 11579:2013 (NEVILLE, 2016, pg. 20).

2.5 MATERIAIS POZOLÂNICOS

As pozolanas, em sua origem natural, vem de rochas sedimentares de natureza ácida de origem vulcânica, formadas por uma mistura mais ou menos homogênea de materiais argilosos, siltes e areias, que contém um elevado teor de sílica reativa (SiO_2) (BAUER, 2013, pg. 59).

As pozolanas podem ser de origem natural ou artificial desde que contenham sílica em forma reativa. O principal material artificial é a cinza volante, que é a cinza precipitada elétrica ou mecanicamente a partir dos gases de combustão de usinas termoelétricas a carvão mineral. Já as naturais mais encontradas são: cinza vulcânica, pumicita, cherts, folhelhos opalinos, terras diatomáceas calcinadas, argila calcinada e cinza da casca de arroz (NEVILLE, 2016, pg. 85).

O uso das pozolanas nos cimentos melhora muitas das qualidades desse material, como a consistência, impermeabilidade, resistência ao ataque por águas sulfatada do mar, além de diminuir o calor de hidratação e reduzir os custos de

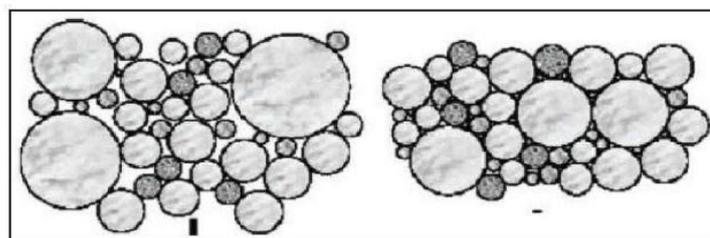
produção. De modo geral, cerca de 20 a 40 % do cimento utilizado nos concretos podem ser substituídos por pozolanas sem diminuição da resistência mecânica final e com diversas melhorias nas qualidades do produto (BAUER, 2013, pg. 59).

É fundamental que a pozolana esteja finamente moída, pois somente assim a sílica pode se combinar com o hidróxido de cálcio e apresentar propriedades cimentícias. Segundo a norma ASTM 618-08a, a pozolana é um material silicoso ou sílicoaluminoso, por si só, possui pouca ou nenhuma reatividade cimentícia, mas, quando finamente moída e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, formando compostos cimentícios.

A norma NBR 12653:2015 estabelece critérios para pozolanas, sendo que sua composição química deve apresentar mais de 70 % de $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, não ultrapassar a quantidade de 4 % do composto de SO_3 , sua finura deve apresentar no máximo 34 % retido na peneira de 45 μm e seu índice de pozolanicidade deve ser maior que 75 %.

Além das reações químicas da pozolana no concreto, reações físicas também são evidenciadas na segmentação dos poros e no refino da matriz. No decorrer de sua cura torna a pasta mais densa e compacta (efeito “filler”), resultando em um concreto com microestrutura mais uniforme e homogênea (Figura 2) (MACHADO, 2013, pg. 19).

Figura 4: Representação do efeito “filler” das pozolanas no concreto. Esquerda – concreto sem pozolana (porosidade excessiva). Direita – concreto com pozolana (finas partículas de pozolana preenchem os poros)



Fonte: Machado (2013)

Conforme estudado por Machado (2013, pg. 80), o resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão apresenta propriedades de uma pozolana apresentando alto teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 acima dos 70 % exigidos.

2.6 AGREGADOS

Na composição do concreto os agregados representam $\frac{3}{4}$ de seu volume, são mais baratos que o cimento e procura-se utilizá-los em maior quantidade possível para reduzir os custos. Não sendo a economia a única razão para seu uso, eles promovem vantagens técnicas consideráveis ao concreto como uma maior estabilidade de volume e maior durabilidade que a pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016, pg. 111).

Segundo a norma NBR 7211:2009, os agregados graúdos são aqueles cujas partículas passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm, e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, e os agregados miúdos são os que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm em ensaio realizado com a ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

A norma ASTM C 294-05 cita os minerais mais comuns encontrados nos agregados, como minerais de sílica (quartzo, opala, calcedônia, tridimita, cristobalita), feldspatos, minerais ferromagnéticos, minerais micáceos, minerais argilosos, zeólitos, minerais carbonáticos, minerais sulfáticos, minerais de sulfeto de ferro, minerais de óxido de ferro. Já conforme o tipo de rocha os agregados são separados em basalto, granito, calcário, xisto, flint, arenito, porfírico, gabro, hornfels, quartzito.

Um importante fator entre os agregados e a pasta de cimento é a sua aderência, que ocorre, devido à rugosidade da superfície dos agregados, em que superfícies mais rugosa, porosas e mineralogicamente heterogêneas apresentam um maior intertravamento mecânico, em geral em uma boa aderência os CPs de concreto, que após o seu rompimento em ensaio de compressão apresentam algumas partículas de agregado rompidas e outras, em maior número, arrancadas da pasta (NEVILLE, 2016, pg. 123).

Um segundo fator importante nos agregados é sua resistência, onde a resistência à compressão do concreto não pode ser muito mais elevada que a sua resistência. Em média, um agregado de boa resistência à compressão apresenta

aproximadamente 200 MPa, porém existem excelentes agregados com resistências na faixa de 80 MPa, podendo ser observado que a resistência do concreto não se dá somente pela resistência mecânica do agregado, mas também, em grau considerável, a sua absorção e as suas características de aderência (NEVILLE, 2016, pg. 125).

2.7 CONCRETOS

O concreto é o material mais utilizado na construção civil e este composto é obtido a partir da mistura de agregados, normalmente brita e areia, cimento e água, podendo ainda conter aditivos, pigmentos, adições minerais, agregados especiais e fibras. De suma importância são as proporções de seus componentes, que ditam as propriedades mecânicas, físicas e sua durabilidade, além das características de trabalhabilidade, capacidade de facilitar transporte, lançamento e adensamento.

No concreto, para Isaia (2011), o cimento Portland, quando misturado com a água em certa quantidade, forma uma pasta fluida que envolve as partículas de agregados com diversas dimensões, que nas primeiras horas, apresenta-se em um estado físico capaz de ser moldado nas mais variadas formas geométricas. Com o passar do tempo, a mistura endurece por meio das reações químicas entre a água e o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torná-lo um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição. Atualmente, no Brasil, são produzidos cerca de 20 milhões de m³ de concreto/ano em Centrais de Concreto, denominadas Empresas de Serviços de Concretagem.

A água, importante para que ocorra a hidratação do cimento, é também responsável por inúmeros aspectos como a trabalhabilidade, pega, retração por secagem, carbonatação, não devendo conter substâncias orgânicas indesejáveis, sendo normalmente usada a água potável (NEVILLE, 2016, pg. 191).

A trabalhabilidade no concreto pode ser definida como a quantidade de energia interna útil necessária para produzir o adensamento completo, ou também como a propriedade que determina a facilidade e a homogeneidade com que podem ser misturados, lançados, adensados e acabados os concretos recém-misturados. O principal fator que afeta a trabalhabilidade do concreto é relação água/cimento, onde quanto maior for a proporção de água para formar a pasta, maior será a sua trabalhabilidade. Porém a quantidade de água influencia negativamente na resistência mecânica do concreto, conforme a “Lei de Abrams” (NEVILLE, 2016, pg.199).

Até o presente momento não existe um método que avalie diretamente a trabalhabilidade, contudo existem alguns ensaios que tentam correlacioná-la com alguma medida física. O ensaio de abatimento de tronco cone é um deles, porém o mesmo não mede a trabalhabilidade e sim a consistência do concreto, sendo usado como medida de associação com a trabalhabilidade (NEVILLE, 2016, pg.199).

A pega do concreto se refere à mudança de estado, de fluido para rígido, sendo diretamente influenciada pela temperatura e umidade, que se difere de endurecimento, que é o ganho de resistência após a pega (NEVILLE, 2016, pg. 212).

2.7.1 Aditivos superplastificantes

Os aditivos podem ser definidos como produtos químicos que adicionados em quantidades máximas de 5 %, em relação à massa de cimento, conferindo consideráveis vantagens tanto físicas como econômicas ao concreto, aumentando a trabalhabilidade, melhorando o adensamento, reduzindo o consumo de cimento (NEVILLE, 2016, pg. 270).

Os superplastificantes são aditivos redutores de água, normalmente de polímeros orgânicos solúveis em água e são sintetizados por processos de polimerização, que produzem longas moléculas de elevada massa molecular. A principal ação das longas moléculas é de envolver as partículas de cimento e repelir umas das outras, resultando na defloculação e na dispersão das partículas de cimento. As principais categorias de superplastificantes são os condensados sulfonados de melamina-formaldeído, condensados sulfonados de naftaleno-formaldeído, lignossulfonados modificados e outros como ésteres de ácido sulfônico e ésteres de carboidratos. São usados no concreto com o intuito de reduzir a quantidade de água e melhorar sua trabalhabilidade (NEVILLE, 2016, pg. 271).

Segundo a norma NBR 11768/2011 os superplastificantes são aditivos que reduzem a adição de água em até 20 %, sem perda de resistência mecânica e trabalhabilidade (SANTOS, 2014, pg. 14).

2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM

Segundo Recena (2011), como dosagem do concreto entende-se o processo através do qual são escolhidos os materiais, determinando a melhor proporção entre cimento, agregados, aditivos e adições, com o objetivo de obter um material que atenda a determinados requisitos físicos, químicos e mecânicos, ao menor custo possível.

A dosagem do concreto tem por objetivo determinar a quantidade de cada material que irá compor a mistura, levando em consideração três parâmetros fundamentais: a relação água-cimento, o teor de água sobre o total de materiais secos e o teor de argamassa.

Estes parâmetros definem as características dos concretos como: resistência mecânica, densidade, trabalhabilidade, índice de absorção de água, resistividade e permeabilidade.

A trabalhabilidade é um fator fundamental para a utilização do concreto e está relacionada diretamente com a constituição da mistura formada por pasta (cimento + água + ar), a qual se incorpora o agregado miúdo. Quanto mais trabalhável for, maior será sua fluidez, desde que não ocorra a separação de seus constituintes.

Segundo a lei de Abrams, a resistência mecânica de concretos trabalháveis é inversamente proporcional a relação água-cimento, segundo uma função logarítmica. Deste modo, a relação água-cimento torna-se um fator fundamental para a mistura, visto que influenciam diretamente em parâmetros essenciais dos concretos.

2.9 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2018), a Lei nº 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, além de ser atualizada contém instrumentos que permitem avanço no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos em virtude do manejo inadequado dos resíduos sólidos gerados atualmente no Brasil, compartilhando a responsabilidade da geração destes entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, cidadão e serviço de manejo.

No Brasil, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008) revelou que, dos municípios brasileiros, apenas 22,54 % possuem aterros controlados e 27,68 % aterros sanitários e só 11,56 % têm unidade de triagem de resíduos recicláveis e 0,61 %

têm unidade de tratamento por incineração. Esta prática de descarte inadequada provoca sérias e danosas consequências à saúde pública e ao meio ambiente (IBGE – PNSB, 2008).

A norma NBR 10004/2004 trouxe uma melhor aplicação dos conceitos empregados na classificação dos resíduos e de seu entendimento de maneira geral, sendo seu objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes possam ser gerenciados adequadamente. Uma grande quantidade de resíduos sólidos é gerada diariamente por diversos setores produtivos, o que tem levado muitos pesquisadores a estudar formas de minimizar problemas atendendo questões técnicas, econômicas, sociais e ambientais (SERPA, 2007).

Conforme a norma brasileira NBR N° 10.004 de 2003, são denominados resíduos sólidos, materiais em seus estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São divididos em dois grandes grupos, os da Classe I e os da Classe II, como segue:

- Resíduos classe I – Perigosos: Aqueles que apresentam periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podendo apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente.

- Resíduos classe II - Não perigosos, subdivididos em:

- Resíduos classe II A - Não inertes: Que podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Segundo Machado (2013), a casca cerâmica é classificada de acordo com as prescrições da norma NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo não perigoso e não inerte – (classe II A).

2.10 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NO CONCRETO

Segundo o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC, 2013), em seu relatório anual, em 2013 o Brasil consumiu 71 milhões de toneladas de cimento, alcançando um consumo per capita de 353 kg/hab/ano. O mesmo relatório mostra a China como maior produtor mundial ultrapassando os 2 bilhões de toneladas no ano de 2012 e o Brasil ocupando a 5° posição.

A indústria de cimento produz cerca de 2,6 bilhões de toneladas de cimento por ano, sendo seu maior uso para a produção de concreto que é o material mais usado pelo homem no mundo. Para produzir uma tonelada de cimento, é necessário o equivalente a 60 a 130 kg de combustível e 110 kWh de energia elétrica, com isso a indústria do cimento é responsável por 5 % do CO₂ produzido pelo Homem em escala mundial (CSI, 2018).

O concreto demanda uma grande quantidade de materiais inertes, como a areia e a brita. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma atividade que causa danos ao meio ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de estabilidade (BIANCHINI *et. al*, 2005 apud TEDESCO, 2016).

Uma alternativa bastante atraente para a reciclagem destes resíduos seria a substituição total ou parcial dos materiais presentes no concreto utilizado na construção civil, como os agregados e o cimento. Além de proporcionar grandes benefícios ambientais com a diminuição da retirada de recursos naturais do meio, traria também grande redução no consumo de energia, como uma considerável redução nas emissões de CO₂, possibilitando a geração de recursos financeiros, diminuindo o custo na matéria prima da construção civil e resolvendo o problema de descarte.

Cordeiro e Désir (2010) pesquisaram a substituição do cimento Portland em 5 %, 10 % e 15 %, pela argila caulínica calcinada a 650° C, demonstrando que o resíduo tem como principais componentes SiO₂, Al₂O₃, Fe₃O₂, representando mais de 75 % de sua composição. Seu tamanho de partícula é de 8,5 µm e sua atividade pozolânica chega a 94 %. A substituição de 15 % do cimento Portland pela argila caulínica calcinada propicia um aumento na resistência à compressão de até 40 % após 28 dias de cura e 43% após 91 dias de cura. Esse comportamento é atribuindo

a ação conjunta de reações pozolânicas, efeito *filler* e aceleração das reações de hidratação do cimento Portland.

Amankwah, Bediako, Kankam (2014) estudaram a influência da argila calcinada de dois depósitos distintos: Mankranso (tipo I) e Tanoso (tipo II), como substituição de até 30 % do cimento Portland, em concretos de 25 Mpa, 30 Mpa e 40 Mpa, demonstrando o seu alto grau de pozolanicidade, onde sua composição química apresentou como elementos principais o SiO_2 com mais de 62 %, o Al_2O_3 com mais de 14 % e o Fe_3O_2 aproximadamente 4 %. Os autores afirmam que, com a adição desta pozolana, ocorre uma queda no grau de escoamento e nas idades iniciais de 7 e 28 dias de cura, o concreto com substituição do cimento pela argila, tiveram queda de resistência à compressão, em virtude da pozolana ter um efeito mais lento no concreto. Concluem a pesquisa, indicando o uso de ambas as argilas calcinadas até o teor de 20 % de substituição, evidenciando um aumento na resistência à compressão, após os 56 dias de cura.

Em pesquisas realizadas por Cordeiro, Toledo, Fairbairn (2009), foram investigadas as influências da substituição do cimento Portland, em 10 %, 15 % e 20 %, pela cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono, em concretos de 25 Mpa e 60 Mpa. Os pesquisadores notaram queda expressiva no grau de escoamento do concreto quando adicionado o resíduo, em decorrência de sua elevada superfície específica, corrigindo este efeito com a adição de superplastificante. O material apresentou alto teor de SiO_2 , com mais de 80 %, um tamanho de partícula inferior a 10 μm e um índice de atividade pozolânica de 109 %, reforçando a ideia do seu grau de pozolanicidade. Cabe ressaltar que o emprego da cinza residual em substituição do cimento, até o teor de 20 % proporciona incrementos significativos nos valores de resistência à compressão, tanto para os concretos convencionais quanto para os de alta resistência.

Segundo Paula *et al.* (2009), em análises do potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição de 10 %, 20 % e 30 % do cimento Portland, demonstra que o material apresenta mais de 83% de SiO_2 e seu índice de atividade pozolana ultrapassa os 75 %. Seus resultados evidenciam que a substituição do cimento pelo resíduo aumenta a absorção de água, já os ensaios de compressão aos 28 dias indicaram a viabilidade de substituição de até 20 % de cimento pelo bagaço

da cana de açúcar queimado, sem prejuízo da resistência mecânica no ensaio de compressão.

Estudos realizados por Aliabdo (2016), utilizando resíduos de vidro, na substituição de cimento, em concretos de 33 Mpa e 45 Mpa, nos percentuais de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 %, mostram que o pó de vidro apresenta propriedades tanto físicas como químicas que o enquadra como uma pozolana. Quando substituído o cimento, provoca uma redução no grau de escoamento do concreto, devido ao aumento do teor de material fino que aumenta a coesão da mistura. Nos ensaios de resistência à compressão, os concretos com 33 MPa tiveram aumento de resistência até 15 % de substituição, já os concretos de 45 MPa tiveram aumento de resistência até os 25 % de substituição.

Conforme estudado por Machado (2013, pg. 80), o resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão apresenta propriedades de uma pozolana apresentando alto teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 acima dos 70 % exigidos.

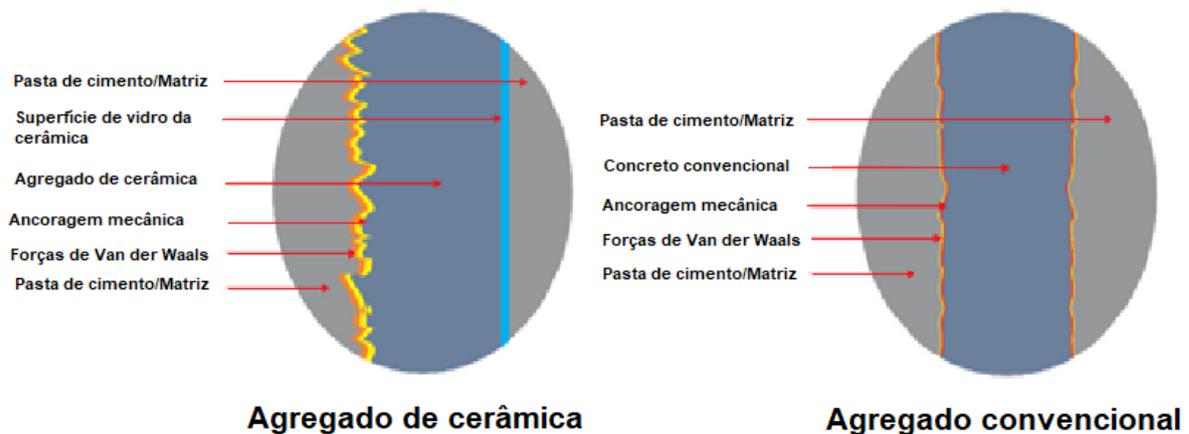
Elçi (2015) em estudos utilizando resíduos de revestimentos cerâmicos de pisos e paredes como agregado graúdo na produção de concreto, evidencia que ambos apresentam maior porosidade, conseqüentemente uma maior absorção de água. Nota também, queda no grau de escoamento quando usado o resíduo em substituição da brita e menor aderência entre a pasta de cimento e o resíduo em virtude de sua superfície lisa. Com relação a resistência à compressão, menciona que, o resíduo cerâmico de paredes teve redução quando comparado com o padrão, já o resíduo de piso apresentou um certo acréscimo na resistência.

Anderson et al. (2016), a partir de seus estudos sobre as propriedades mecânicas do concreto utilizando resíduos cerâmicos de pisos, paredes e ladrilhos como agregado graúdo, nas proporções de 25 %, 50 %, 75 % e 100 %, notaram que devido a maior absorção de água do resíduo o mesmo deve ser saturado em água antes de sua utilização para evitar quedas no grau de escoamento. Notaram ainda, no teste de compressão, que na superfície de falha dos concretos com resíduo, ocorreu um descolamento entre o agregado e a pasta de cimento, diferindo do concreto padrão onde a fratura ocorreu também nos agregados, evidenciando uma melhor aderência. Contudo o uso do resíduo como um substituto para o agregado graúdo em concreto é certamente viável, visto que os comportamentos mecânicos

testados exibiram razoavelmente mínimas respostas positivas e negativas em relação ao concreto sem resíduo, que permite a previsibilidade adequada para uso na prática.

Rashid K. *et al.* (2017) estudou um concreto sustentável de 22 Mpa de resistência, com a substituição de 10 %, 20 % e 30 % dos agregados graúdos por resíduos cerâmicos, evidenciando que, com a adição de resíduo no concreto, há uma redução na trabalhabilidade, relata que a principal causa desta redução é a maior absorção de água do resíduo. Ocorre também um aumento na resistência à compressão conforme é substituído agregado natural pelo resíduo, o autor atrela este ganho primeiramente a absorção de água do resíduo que contribuir para uma melhor hidratação do cimento, segundo pela superfície do agregado apresentar maior rugosidade consequentemente um melhor inter-travamento das partículas (Figura 5) e um terceiro ponto é a superfície porosa do resíduo favorecer a penetração de produtos hidratados do cimento favorecendo a fixação química.

Figura 5: Ilustração da interface entre os agregados e a pasta de cimento.

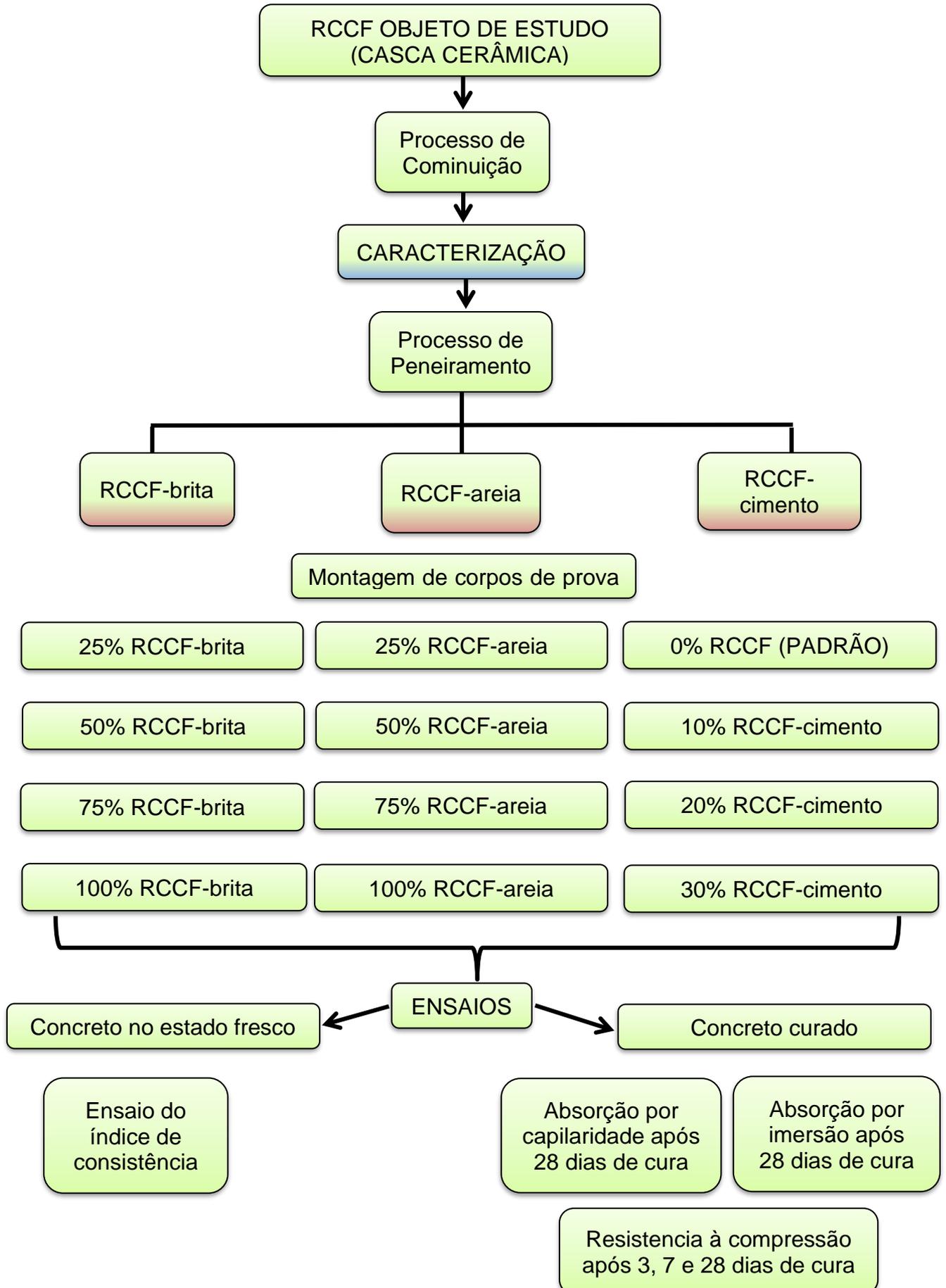


Fonte: Adaptado de Rashid (2017).

Torkittikul e Chaipanich (2010) em estudos avaliando a utilização de resíduos cerâmicos como substituição do agregado miúdo nas proporções de 50 % e 100 %, em concretos de 40 MPa de resistência, notaram que a trabalhabilidade do concreto é reduzida em 39,2 % com a substituído 100 % do agregado miúdo, mencionam que esta redução se dá em função da superfície do resíduo ser mais

áspera e angular que conseqüentemente dificulta o deslizamento entre as partículas. Obtiveram também um aumento na resistência à compressão, onde com 50 % de substituição ocasionou um acréscimo de 7,5 % e com 100 % um acréscimo de 4 %, em comparação com o concreto referência, isso se dá também em função da superfície mais áspera.

3 MATERIAIS E MÉTODOS



3.1 MATERIAIS

A seguir são especificados e caracterizados os materiais utilizados no programa experimental.

3.1.1 Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão (RCCF)

A casca cerâmica utilizada no presente trabalho foi fornecida por uma empresa atuante na área de fundição de precisão, no município de Caxias do Sul – RS.

3.1.2 Agregado graúdo (brita)

A brita número zero, que passou por um processo de lavagem de modo a remover a maior quantidade possível de materiais pulverulentos e substâncias nocivas que pudessem influenciar nos resultados da pesquisa. Foi previamente seca em estufa a 105 °C por 24 horas, de modo a remover toda a umidade presente.

O agregado graúdo é de rochas basálticas – basalto do tipo A – da região serrana do (RS). Trata-se de uma rocha de cor cinza-claro e fratura lamelar, obtida no comércio local no município de Caxias do Sul (RS), resultou em uma granulometria dentro dos padrões mencionados na norma ABNT NBR 7211:2019.

Seguindo na norma a ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, foi realizado o ensaio de granulometria onde foram encontrados os seguintes resultados (Tabela 2).

Tabela 2: Resultados do ensaio granulométrico do agregado graúdo natural (brita).

| AGREGADO GRAÚDO (BRITA NATURAL) | | | | |
|---|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Abertura das peneiras (mm) (ABNT NBR NM ISO 3310-1) malha (mm) | Percentual de massa retida | | | |
| | (ABNT NBR 7211:2009) | | Amostra | |
| | zona utilizável acumulada | | Média retida acumulada (%) | Média retida (%) |
| | Inferior | Superior | | |
| 12,5 | 0 | 5 | 1 | 1 |
| 9,5 | 2 | 15 ² | 16 | 16 |
| 6,3 | 40 ² | 65 ² | 59 | 44 |
| 4,75 | 80 ² | 100 | 85 | 26 |
| 2,36 | 92 | 100 | 99 | 14 |
| 0 | 95 | 100 | 100 | 1 |
| Módulo de finura encontrado: 6,56 | | | | |
| Nota: 2 - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados. Esta variação também pode estar distribuída em vários desses limites. | | | | |
| ABNT NBR 7211:2009 – Agregados para concreto especificação. | | | | |
| ABNT NBR NM ISO 3310-1 – Peneiras para ensaio, requisitos técnicos e verificação. | | | | |

As características físicas do agregado graúdo natural foram obtidos seguindo as normas ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 53:2009, apresentando os resultados que seguem (Tabela 3).

Tabela 3: Características físicas do agregado graúdo natural (brita)

| Propriedades físicas do agregado graúdo (brita) | |
|---|------------------|
| Item avaliado | Resultado |
| Massa unitária (kg/cm ³) | 1303,41 |
| Dimensão máxima (mm) | 12,5 |
| Índice de volume de vazios (%) | 47,74 |
| Absorção de água (%) | 2,10 |
| Massa específica aparente seca (g/cm ³) | 2,60 |
| Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³) | 2,65 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,84 |
| ABNT NBR NM 45:2006 - Massa unitária e o volume de vazios. | |
| ABNT NBR NM 53:2009 - Massa específica, massa específica aparente e absorção de água. | |

3.1.3 RCCF cominuído como agregado graúdo (RCCF-brita)

Seguindo na norma a ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, foi realizado o ensaio de granulometria, no Laboratório do IFRS campus Caxias do Sul, com o RCCF devidamente cominuído e peneirado, encontrando os seguintes resultados (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados do ensaio granulométrico do RCCF-brita.

| RCCF-brita | | | | |
|---|---|-----------------|---------------|--------------|
| Abertura das peneiras (mm) (ABNT NBR NM ISO 3310-1) malha(mm) | Percentual de massa retida | | | |
| | (ABNT NBR 7211:2009) zona utilizável acumulada | | Amostra | |
| | Inferior | Superior | Média retida | Média retida |
| | | | acumulada (%) | (%) |
| 12,5 | 0 | 5 | 1 | 1 |
| 9,5 | 2 | 15 ² | 17 | 16 |
| 6,3 | 40 ² | 65 ² | 52 | 35 |
| 4,75 | 80 ² | 100 | 78 | 27 |
| 2,36 | 95 | 100 | 99 | 21 |
| Fundo | 100 | 100 | 100 | 0 |
| Módulo de finura encontrado: 6,44 | | | | |

Nota: 2 - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados. Esta variação também pode estar distribuída em vários desses limites.

ABNT NBR 7211:2009 – Agregados para concreto especificação.

ABNT NBR NM ISO 3310-1 – Peneiras para ensaio, requisitos técnicos e verificação.

As características físicas do RCCF-brita foram obtidas seguindo as normas ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 53:2009, no Laboratório do IFRS campus Caxias do Sul, apresentando os resultados que seguem (Tabela 5).

Conforme Tabelas 4 e 5, é possível observar que o RCCF-brita possui granulometria dentro dos padrões exigidos, onde seu módulo de finura ficou em 6,44, sua dimensão máxima é 12,5 mm.

Tabela 5: Características físicas do agregado graúdo RCCF-brita

| Propriedades físicas do RCCF-brita | |
|---|------------------|
| Item avaliado | Resultado |
| Massa unitária (kg/cm ³) | 1012,53 |
| Dimensão máxima (mm) | 12,5 |
| Índice de volume de vazios (%) | 49,25 |
| Absorção de água (%) | 9,30 |
| Massa específica aparente seca (g/cm ³) | 2,00 |
| Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³) | 2,20 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,29 |
| ABNT NBR NM 45:2006 - Massa unitária e o volume de vazios. | |
| ABNT NBR NM 53:2009 - Massa específica, massa específica aparente e absorção de água. | |

3.1.4 Agregado miúdo (areia)

No estudo foi usada a areia média, que foi previamente seca em estufa a 105 °C por 24 horas, de modo a remover toda a umidade presente.

Tabela 6: Resultados do ensaio granulométrico do agregado miúdo natural (areia).

| AGREGADO MIÚDO (AREIA NATURAL) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Abertura das peneiras (mm) (ABNT NBR NM ISO 3310-1) malha (mm) | Percentual de massa retida | | | | | |
| | (ABNT NBR 7211:2009) | | | | Amostra | |
| | Limites inferiores | | Limites superiores | | Média retida acum. (%) | Média retida (%) |
| | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável | | |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 7 | 1 | 1 |
| 4,75 | 0 | 0 | 5 | 10 | 1 | 1 |
| 2,36 | 0 | 10 | 20 | 25 | 6 | 5 |
| 1,18 | 5 | 20 | 30 | 50 | 20 | 13 |
| 0,6 | 15 | 35 | 55 | 70 | 48 | 28 |
| 0,3 | 50 | 65 | 85 | 95 | 67 | 19 |
| 0,15 | 85 | 90 | 95 | 100 | 91 | 24 |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 9 |
| Módulo de finura encontrado: 2,34 | | | | | | |
| Notas: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. | | | | | | |
| O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. | | | | | | |
| O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50. | | | | | | |
| ABNT NBR 7211:2009 – Agregados para concreto especificação. | | | | | | |
| ABNT NBR NM ISO 3310-1 – Peneiras para ensaio, requisitos técnicos e verificação. | | | | | | |

A partir da areia média de origem quartzosa obtida no comércio local, seguindo a norma a ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, foi realizado o ensaio de granulometria, no Laboratório do IFRS campus Caxias do Sul, onde foram encontrados os resultados conforme Tabela 6.

As características físicas do agregado miúdo natural foram realizadas seguindo as normas ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 52:2009, no Laboratório do IFRS campus Caxias do Sul, cujo resultados são mencionados a seguir (Tabela 7).

Tabela 7: Características físicas do agregado miúdo natural (areia).

| Propriedades físicas do Agregado Miúdo | |
|--|------------------|
| Item avaliado | Resultado |
| Massa unitária (kg/cm ³) | 1739,01 |
| Índice de volume de vazios (%) | 28,66 |
| Massa específica aparente seca (g/cm ³) | 2,44 |
| Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³) | 2,53 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,69 |
| ABNT NBR NM 45:2006 - Massa unitária e o volume de vazios. | |
| ABNT NBR NM 52:2009 - Massa específica, massa específica aparente. | |

Conforme as Tabelas 6 e 7, é possível observar que o agregado miúdo possui granulometria dentro dos padrões exigidos, sendo que o seu módulo de finura encontrado é de 2,34, o enquadra na zona ótima e sua massa específica é 2,69 g/cm³.

3.1.5 RCCF cominuído como agregado miúdo (RCCF-areia)

Seguindo norma ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, foi realizado o ensaio de granulometria, no Laboratório do IFRS campus Caxias do Sul, com o RCCF devidamente cominuído e peneirado, encontrando os seguintes resultados (Tabela 8).

Tabela 8: Resultados do ensaio granulométrico do RCCF-areia.

| RCCF-areia | | | | | | |
|--|----------------------------|------------|--------------------|-----------------|------------------------|------------------|
| Abertura das peneiras (mm) (ABNT NBR NM ISO 3310-1) malha (mm) | Percentual de massa retida | | | | | |
| | (ABNT NBR 7211:2009) | | | | Amostra | |
| | Limites inferiores | | Limites superiores | | Média retida acum. (%) | Média retida (%) |
| | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável | | |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| 4,75 | 0 | 0 | 5 | 10 | 0 | 0 |
| 2,36 | 0 | 10 | 20 | 25 | 11 | 11 |
| 1,18 | 5 | 20 | 30 | 50 | 25 | 14 |
| 0,6 | 15 | 35 | 55 | 70 | 59 | 34 |
| 0,3 | 50 | 65 | 85 | 95 | 73 | 14 |
| 0,15 | 85 | 90 | 95 | 100 | 83 | 11 |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 16 |
| Módulo de finura encontrado: 2,51 | | | | | | |

Notas: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

ABNT NBR 7211:2009 – Agregados para concreto especificação.

ABNT NBR NM ISO 3310-1 – Peneiras para ensaio, requisitos técnicos e verificação.

As características físicas do RCCF-areia foram obtidas seguindo as normas ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 52:2009, no Laboratório do IFRS campus Caxias do Sul, apresentando os resultados que seguem (Tabela 9).

Tabela 9: Características físicas do agregado miúdo do RCCF-areia

| Propriedades físicas do RCCF-areia | |
|--|-----------|
| Item avaliado | Resultado |
| Massa unitária (kg/cm ³) | 1250,01 |
| Índice de volume de vazios (%) | 36,22 |
| Massa específica aparente seca (g/cm ³) | 1,96 |
| Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³) | 2,22 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,29 |
| ABNT NBR NM 45:2006 - Massa unitária e o volume de vazios. | |
| ABNT NBR NM 52:2009 - Massa específica, massa específica aparente. | |

Conforme as Tabelas 8 e 9, é possível observar que o RCCF-areia possui granulometria dentro dos padrões exigidos, seu módulo de finura ficou em 2,51, o enquadrando na zona ótima e sua massa específica é 2,29 g/cm³.

3.1.6 Cimento Portland

Utilizou-se no presente trabalho o cimento Portland (CP V – ARI) de alta resistência inicial, sem adições, sendo este indicado para obras e peças que exijam altas resistências nas primeiras horas, como para a produção de artefatos de cimento, como blocos para alvenaria e pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, entre outros. Seu desempenho é alcançado devido a uma variação na dosagem de calcário e argila na produção do clínquer e pela sua reduzida finura, sendo obtido no comércio local.

Seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR 16605:2017, foi obtida a massa específica do Cimento Portland CP V – ARI de $3,07 \text{ g/cm}^3$. Para a determinação do módulo de finura por meio da peneira $75 \mu\text{m}$ (nº200), foram seguidos os procedimentos da norma ABNT NBR 11579:2013 obtendo-se uma retenção de 12 % e por fim a norma ABNT NBR 9202:1985 foi usada para medir a finura por meio da peneira $45 \mu\text{m}$ apresentando 54 % de retenção.

3.1.7 RCCF cominuído como cimento (RCCF-cimento)

Após o devido processamento do RCCF, o mesmo foi avaliado da mesma forma do cimento Portland, sendo que a sua massa específica apresentou o valor de $2,64 \text{ g/cm}^3$, 0 % de retenção na peneira de $75 \mu\text{m}$ e apenas 23 % de retenção na peneira de $45 \mu\text{m}$.

3.1.8 Água

A água utilizada foi da empresa SAMAE, situada em Caxias do Sul – RS, responsável pela sua distribuição e tratamento. Apresentou segundo relatório mensal de dezembro de 2017, uma turbidez de 0,22 unT, cor de 2,1 uH, uma quantidade de cloro de 0,96 mg/L, fluoretos na ordem de 0,71 mg/L e pH 7,0.

3.1.9 Superplastificante

Com o intuito de compensar a perda de trabalhabilidade do concreto devido à adição de resíduo, foi usado um superplastificante Miraflo 929 produzido por GCP *Applied Technologies Inc*, com base química de lignossulfonatos e policarboxilato.

3.2 MÉTODOS

São descritos a seguir os métodos utilizados para execução dos ensaios.

3.2.1 Processamento do Resíduo da casca cerâmica

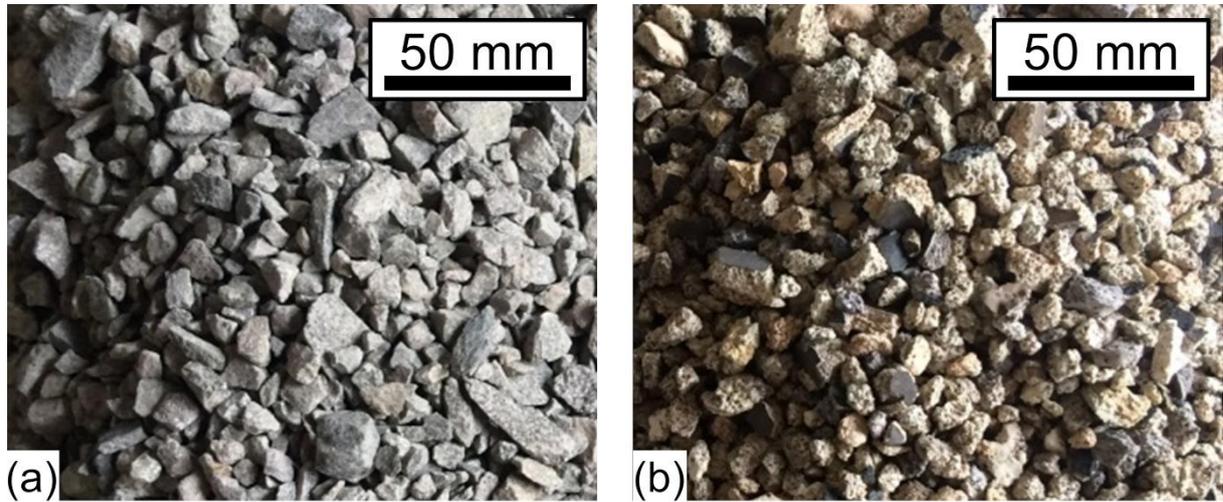
Coletado o RCCF, em forma de lascas (Figura 6), após ruptura para retirada da peça fundida. Iniciou-se em um primeiro momento o processo de cominuição, para reduzir o resíduo às granulometrias semelhantes aos materiais comumente utilizados no concreto.

Figura 6: Resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão (RCCF) em lascas.



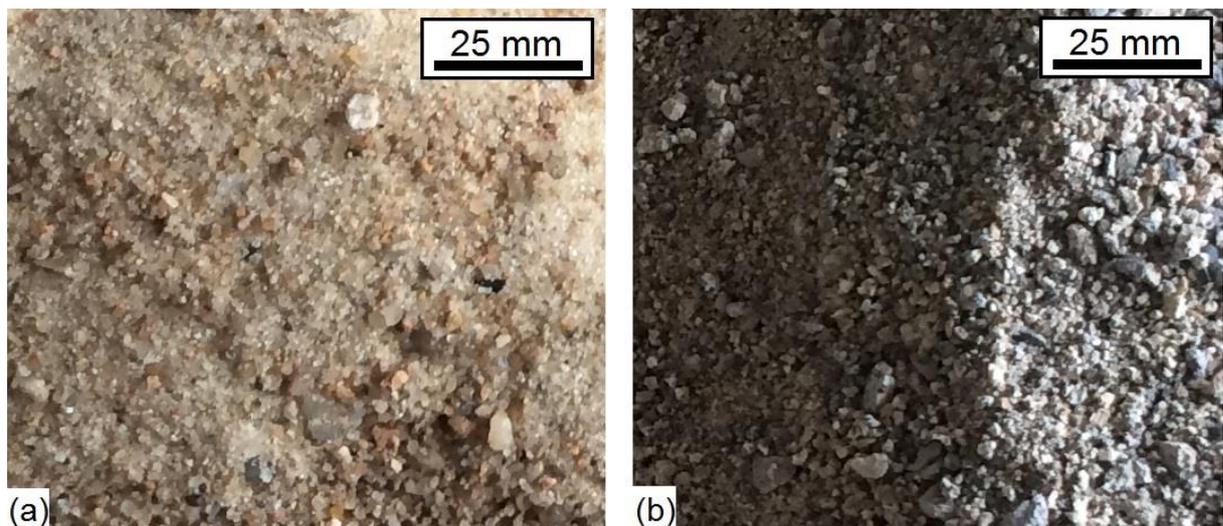
Sobre uma mesa de aço, o RCCF foi cominuído manualmente com o auxílio de um socador, em duas fases, sendo reduzido a uma brita grosseira e posteriormente peneirado com malhas de 12,5 mm (passante) e posterior 2,36 mm (retido), utilizando-se o RCCF que ficou entre estas faixas granulométricas, denominando-o de RCCF-brita.

Figura 7: Materiais para a execução dos concretos. (a) Agregado graúdo natural (brita). (b) RCCF-brita depois de peneirado em faixas granulométricas semelhante ao agregado natural.



Do mesmo modo, após 3 fases de cominuição manual, o RCCF foi peneirado nas malhas 4,75 mm (passante) e 0,150 mm (retido). O material entre estas faixas foi utilizado na pesquisa e denominado RCCF-areia.

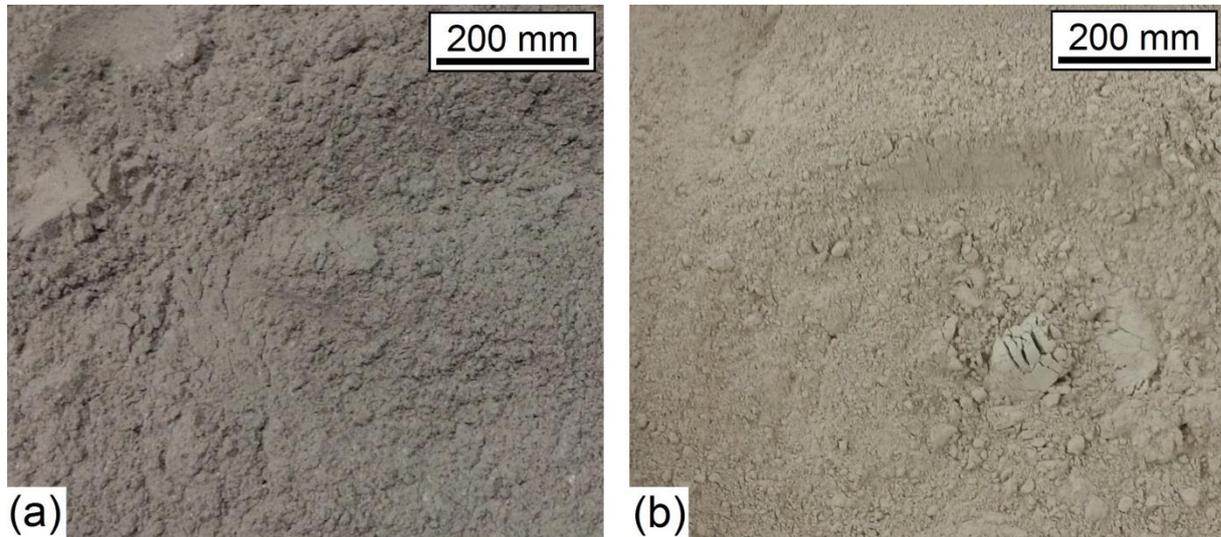
Figura 8: Materiais para a execução dos concretos. (a) Agregado miúdo natural (areia). (b) RCCF-areia depois de peneirado em faixas granulométricas semelhante ao agregado miúdo.



Por fim, o restante do material passou pela cominuição em um moinho de martelo, em seguida foi processado no moinho de bolas em frações de 500 gramas por 1 hora até atingir uma finura com mais de 66 % abaixo de 45 μ m. Este material foi

usado na pesquisa em substituição do cimento Portland, sendo denominado de RCCF-cimento.

Figura 9: Materiais para a execução dos concretos. (a) Cimento Portland. (b) RCCF-cimento após processado no moinho de bolas.



3.2.2 Fluorescência de raios X (FRX).

As análises de Fluorescência de raio X (FRX) foram realizadas em espectrômetro da marca Shimadzu, modelo XRF – 1800, com fonte de radiação de Rh, potência de 4 kW, operado em 40 kV e 80 mA. Esta técnica é efetuada em planilhas obtidas a partir de uma mistura de 3 g de amostra e 3 g de ligante (ácido bórico), compactadas a 20 MPa de pressão, em prensa hidráulica. É possível identificar e quantificar (desde que comparados com as intensidades das linhas espectrais de padrões), quase todos os elementos com número atômico. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais cerâmicos (LACER – UFRGS).

3.2.3 Difração de raios X (DRX).

A difração de raios X consiste no método de análise que revela informações sobre as estruturas cristalinas dos materiais, através do espalhamento elástico de raios X por estruturas que possuem ordenamento de longo alcance. Para a determinação das fases e o grau de cristalinidade do resíduo foi utilizado um

difratômetro de raios X da marca Philips, modelo X Pert, com fonte de radiação Cu-K α , e as fases cristalinas foram identificadas com o auxílio do software X Pert HighScore, através de comparação do difratograma da amostra. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais cerâmicos (LACER – UFRGS).

3.2.4 Avaliação do índice de atividade pozolânicas do RCCF.

Além dos requisitos químicos e da finura do RCCF após processamento, foi avaliada perda de resistência à compressão com a substituição de 35 % do cimento pelo resíduo, seguindo a norma ABNT NBR 5752:1996, onde os materiais foram misturados manualmente para a produção de seis CPs de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, sendo três CPs de referência sem a adição de RCCF-cimento e três com a substituição do cimento pelo RCCF-cimento.

Após 28 dias de cura, em solução saturada em hidróxido de cálcio, os CPs foram rompidos, conforme ABNT NBR 7215:1996, em prensa hidráulica.

Figura 10: Corpos de prova (CPs) para ensaio de pozolanicidade.



3.2.5 Dosagem de materiais.

Para dosar os materiais na composição de um concreto de alta resistência de 500 kgf/cm² (50 MPa), foi utilizado o método CIENTEC, RECENA (2011). Por ter sido estudado e avaliado em função dos materiais encontrados no estado do Rio Grande

do Sul, visto que os materiais utilizados podem variar de região para região do país. Em função do baixo fator água/cimento obtido no cálculo, proposto pelo método, o concreto apresentou baixa plasticidade, deste modo, este fator foi ajustado para que no ensaio de tronco cone se obtivesse um grau de escoamento entre as faixas de 110+/- 30 mm.

No método o primeiro passo é definir o teor de argamassa em função do tamanho de brita usado, sendo considerado para o cálculo a brita “0”, cujo teor de argamassa a ser usado ficou em 60 %, segundo a Tabela 10.

Tabela 10: Teor de argamassa por tamanho de brita.

| Natureza da rocha | Classificação da brita | Teor da argamassa (%) |
|-------------------|------------------------|-----------------------|
| Basalto | 0 | 60 |
| | 1 | 55 |
| | 2 | 53 |
| | 3 | 51 |

Fonte: Recena (2011)

Classificando a Brita como número “0”, o teor de água sobre o total de materiais secos usados foi de 10,2 % sendo obtido na Tabela 11, em função da brita utilizada.

Tabela 11: Quantidade de água por tamanho de brita.

| Tipo de cimento | Classificação da brita | H (%) |
|------------------------------------|------------------------|-------|
| Alta resistência inicial (CP V) | 0 | 10,2 |
| | 1 | 9,60 |
| | 2 | 9,40 |
| | 3 | 9,20 |

Fonte: Recena (2011)

Para o cálculo da relação água-cimento para um concreto de 50 kgf/m² com cimento (CP V - ARI), usou-se a seguinte equação:

$$a/c = \frac{2,15 - \log fck}{1,27} \quad (\text{Equação 1})$$

Seguindo a equação apresentada no método, se obtém um fator de água/cimento de $0,36 \frac{a}{c}$. Como a mistura apresentou baixa trabalhabilidade com este fator de água-cimento, o mesmo foi ajustado para $0,45 \frac{a}{c}$.

Segundo Recena (2011) para o cálculo do traço, usa-se “m” como a soma da proporção de areia “a”, mais a proporção de agregado graúdo “p”, no traço unitário em massa, a quantidade de água usa-se o “H” da Tabela 11 com base na brita “0”, sendo para este caso o 10,2 %. Segue a equação:

$$1 + m = \frac{100 \times \frac{a}{c}}{H} \quad (\text{Equação 2})$$

$1 + m$ = soma da areia, brita e cimento;

m = agregados (areia e brita);

H = percentual de água (tabela 7);

$\frac{a}{c}$ = fator água/cimento;

Substituindo os valores conforme tabelas sugeridas, tem-se a quantidade total de materiais secos em 4,41, sendo uma parte de cimento e 3,41 partes de agregados. Se 100 % do material é 4,41 e o cimento representando uma parte, obtém-se um percentual de cimento de 22,67 %.

Para a brita “0” o teor de argamassa é de 60 %, subtraindo da quantidade de cimento a areia, representa 37,33 %. Restando um percentual de 40 % de brita. Chegando ao traço demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12: Traço usado para o concreto em estudo.

| Material | % | Traço | Massa (kg) |
|--------------|-------|-------|------------|
| Cimento | 22,67 | 1 | 9,748 |
| Areia | 37,33 | 1,64 | 16,058 |
| Brita | 40 | 1,76 | 17,200 |
| Água/cimento | - | 0,45 | 4,386 |

Em função da adição de RCCF reduzir a plasticidade do concreto, foi adicionado com referência ao RCCF substituído, 0,61 % de plastificante e 1,2 % de água em massa para os concretos com substituição da brita, já para os concretos com

a troca da areia pelo de RCCF foram adicionados 0,61 % de plastificante e 4 % de água em massa. Na troca de cimento pelo resíduo não foi adicionado plastificante.

3.2.6 Procedimento para executar o concreto

Em virtude de pequenas variações na quantidade de água, ou até mesmo no modo de adição dos materiais influenciarem diretamente nas propriedades do concreto, foi criado o seguinte procedimento para execução dos concretos:

- Calcular a quantidade de material necessária, a cada composição, para a montagem dos CPs desejados, utilizando o método CIENTEC;
- Secar os agregados miúdo e graúdo em estufa a 105 °C por 24h;
- Pesar os materiais conforme os valores obtidos nos cálculos do método CIENTEC;
- Molhar toda a superfície interna da betoneira, deixando sua abertura virada para baixo por 3 minutos, de modo que seja removido o excesso de água;
- Colocar a betoneira em modo de trabalho e ligá-la (Figura 11);

Figura 11: Betoneira usada para misturar componentes do concreto.



- Adicionar os materiais na seguinte ordem: 1º agregado graúdo; 2º agregado miúdo; 3º 1/3 do cimento, 4º 1/3 da água com aditivo caso necessário;
- Deixar misturar por 1 minuto e adicionar o restante do cimento e água;

- Misturar por mais 4 minutos, desligar e remover todo material aglomerado nas superfícies internas da betoneira;
- Misturar por mais 3 minutos.
- Após a execução completa do concreto foi seguida a Norma ABNT NBR NM 67:1998, para determinar a consistência do concreto pelo abatimento do tronco cone em concretos com e sem aditivo superplastificante (Figura 12).

Figura 12: Ensaio abatimento do tronco cone



3.2.7 Montagem e cura dos corpos de prova (CPs)

Seguindo os procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 5738:2015, foram montados, para cada composição, com adensamento manual, 10 CPs com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura para execução do ensaio de resistência à compressão. Além de 10 CPs no diâmetro de 50 mm por 100 mm de altura para os demais ensaios (Figura 13).

Figura 13: Corpos de prova (CPs) após cura de 28 dias.



Todos os CPs foram curados em temperatura ambiente e armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (Figura 14).

Figura 14: CPs imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio.



3.2.8 Ensaio de resistência à compressão

Decorridos 3, 7 e 28 dias de cura os CPs foram rompidos seguindo a norma ABNT NBR 5739:2018, sendo retificadas as extremidades (Figura 15), para posterior rompimento na prensa hidráulica (Figura 16).

Figura 15: Retífica para CPs



Figura 16: Prensa Hidráulica.



Para o cálculo da resistência foi usada a equação 3:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Equação 3})$$

f_c = Resistência à compressão, em MPa;

F = Força máxima alcançada, em N;

D = Diâmetro do CP, em mm.

3.2.9 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 9779:2012, após 28 dias de cura em imersão em hidróxido de cálcio, os CPs foram secos em estufa a 105 °C por 72 h e pesados após o seu resfriamento em temperatura ambiente. Na sequência foram postos sobre uma tela dentro de um recipiente que foi completado com água até atingir 10 mm do CP.

Os CPs foram pesados no período de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. O resultado do ensaio de capilaridade é obtido pela divisão entre a diferença de massas seca e em contato com a água, pela área da seção transversal da superfície do CPs (Equação 4):

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

C = coeficiente de capilaridade, em g/cm²;

A = massa do CP em contato com água, em g;

B = massa do CP seco, em g;

S = área da base do CP, em cm²;

3.2.10 Ensaio de absorção de água por imersão

Segundo a norma ABNT NBR 9778:2009, após 28 dias de cura em imersão em hidróxido de cálcio, os CPs foram secos em estufa a 105 °C por 72 h e pesados após

o seu resfriamento em temperatura ambiente. Na sequência foram postos em recipiente com 1/3 de volume do CP imerso em água nas primeiras 4 horas, 2/3 nas próximas 4 horas e completamente imersos nas 12 horas.

Foram determinadas as massas dos CPs, enxutos por toalha, decorridas 24, 48 e 72 horas de imersão. Em seguida, foram imersos em água e levados à fervura por 5 horas, seguido de nova pesagem após resfriamento.

Foi usada a equação 5 para o cálculo da absorção de água por imersão:

$$Ab_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

Ab_a = Absorção de água por imersão, em %;

M_{sat} = Massa do CP saturado, em g;

M_s = Massa do CP seco em estufa, em g;

3.2.11 Análise macroscópica dos concretos e do RCCF.

Uma lasca do RCCF foi cortada transversalmente e lixada em lixas com granulometrias incrementais de até 1200. Sendo extraídas Imagens de câmera digital desta superfície transversal.

Após o rompimento dos CPs em concreto foram obtidas imagens fotográficas da sessão de ruptura nos concretos com 100 % de RCCF-brita em substituição da brita e 100 % de RCCF-areia em substituição da areia.

3.2.12 Microscopia ótica dos concretos e do RCCF.

Fragmentos de amostras dos concretos com RCCF (em substituição da brita, da areia e do cimento) e sem adições de RCCF foram lixadas em lixas com granulometrias incrementais de até 1200. Em seguida foram lavados e secos. As imagens foram obtidas usando um microscópio Zeiss, modelo Axioscope 5.

3.2.12 Análise estatística dos resultados de resistência à compressão

Métodos estatísticos fornecem diretrizes sobre a confiabilidade e a validade dos resultados fornecendo objetividade ao processo e a tomada de decisão (MONTGOMERY, 2001). No presente trabalho para o ensaio de resistência à compressão foi realizada a análise estatística pelo método de Tukey em um projeto de um fator com grau de confiança de 95 %, no qual para cada formulação foram montados 9 CPs que foram rompidos em trios após 3, 7 e 28 dias de cura, sendo replicado todo o ensaio (portanto, foram obtidas duas replicações para cada condição estudada). As tabelas do resumo dos resultados do controle estatístico se encontram nos anexos de B a J.

4 RESULTADOS

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

No gráfico de faixas granulométricas (Figuras 17 e 18) é possível observar que os agregados (brita natural, RCCF-brita, areia natural e RCCF-areia) se mantiveram dentro das zonas utilizáveis inferior e superior, com pequenas variações, mas dentro da tolerância aceitável segundo a norma ABNT NBR 7211:2019, consequentemente apresentaram um módulo de finura muito próximo um do outro (brita natural = 6,56, RCCF-brita = 6,44, areia natural = 2,34 e RCCF-areia = 2,51) reforçando a ideia da semelhança entre os agregados. As curvas ainda evidenciam que os materiais apresentam granulometria contínua, segundo Neville (2016), para a produção de concretos é desejável, pois permite um melhor arranjo entre as partículas do agregado, aumentando o efeito de empacotamento entre os grãos.

Figura 17: Faixas granulométricas obtidas, para o agregado graúdo natural (brita) e o RCCF-brita.

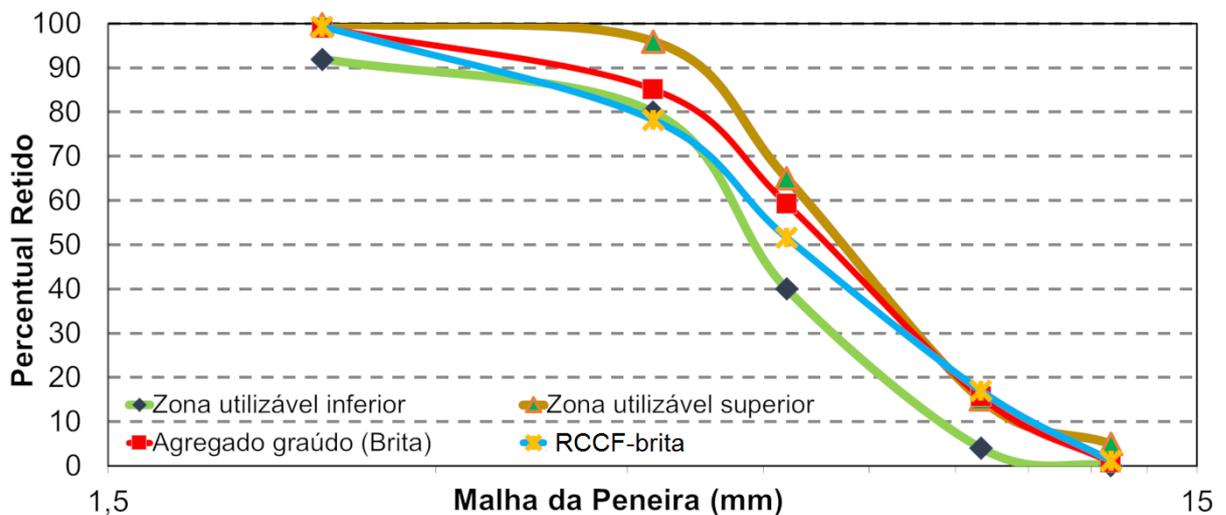
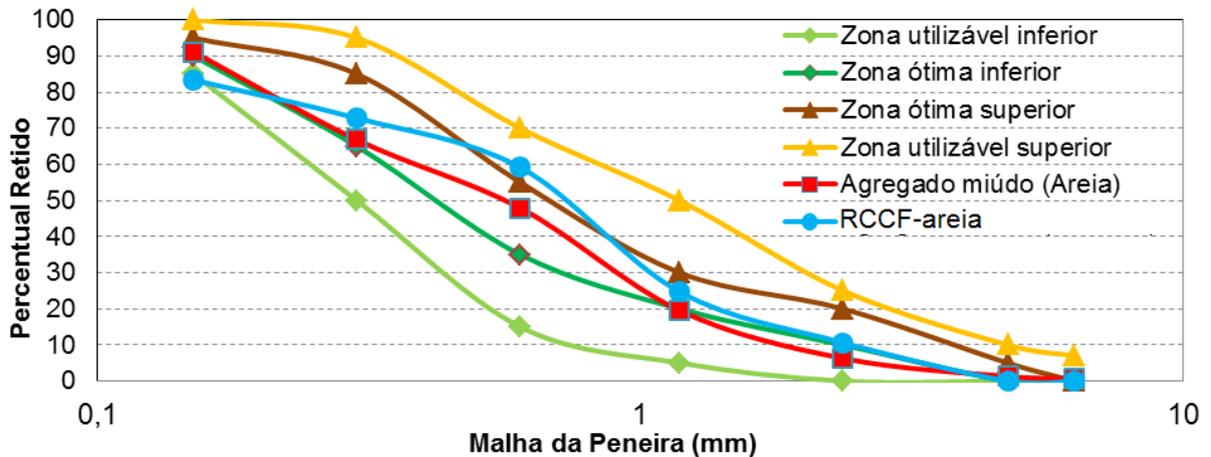


Figura 18: Faixas granulométricas obtidas, para o agregado miúdo natural (areia) e o RCCF-areia.



Comparando as propriedades físicas entre os agregados naturais e o RCCF é possível notar uma menor massa unitária, massa específica, massa específica aparente e massa específica saturada superfície seca dos agregados de RCCF. Isso se dá em função da maior porosidade da casca cerâmica (Tabela 13). Esta porosidade conseqüentemente aumenta o índice de volume de vazios do RCCF-brita e RCCF-areia, que por sua vez influenciam em uma maior absorção de água. Já as dimensões máximas de ambos os agregados graúdos se mantiveram iguais em virtude do controle de peneiramento do resíduo durante o seu processamento.

Tabela 13: Comparação de algumas propriedades físicas encontradas para os agregados usados na pesquisa.

| | Brita | RCCF-brita | Areia | RCCF-areia |
|--|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| Massa unitária (kg/m ³) | 1303,41 | 1012,53 | 1739,01 | 1250,01 |
| Dimensão máxima (mm) | 12,5 | 12,5 | - | - |
| Índice de volume de vazios (%) | 47,74 | 49,25 | 28,66 | 36,22 |
| Absorção de água (%) | 2,10 | 9,30 | - | - |
| Massa esp. aparente seca (g/cm ³) | 2,60 | 2,00 | 2,44 | 1,96 |
| Massa esp. saturada sup. Seca (g/cm ³) | 2,65 | 2,20 | 2,53 | 2,22 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,84 | 2,47 | 2,69 | 2,29 |

ABNT NBR NM 45:2006 - Massa unitária e o volume de vazios;
ABNT NBR NM 53:2009 - Massa específica, massa específica aparente e absorção de água;

Já na análise das propriedades físicas do cimento Portland e do RCCF-cimento é possível notar uma menor massa específica e uma menor finura do RCCF cominuído quando comparado com o cimento (Tabela 14).

Tabela 14: Comparação de algumas propriedades físicas entre o cimento Portland e o RCCF-cimento.

| | Cimento Portland CP V | RCCF-cimento |
|------------------------|------------------------------|------------------------|
| Massa específica | 3,07 g/cm ³ | 2,64 g/cm ³ |
| Índice de finura 75 µm | 12 % | 0 % |
| Finura 45 µm | 54 % | 23 % |

ABNT NBR 16605:2017 - Massa específica;
ABNT NBR 11579:2013 - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm;
ABNT NBR 9202:1985 - Determinação da finura por meio da peneira 45 µm;

4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX) DO RCCF

Os resultados da fluorescência por raios X (Tabela 15), mostram que os principais compostos do RCCF o SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e ZrO₂, correspondendo a 97,7% da composição, confirmando os mesmos componentes utilizados para a fabricação da casca cerâmica do molde que são a sílica coloidal – SiO₂ (aglomerante), mulita - 3Al₂O₃.2SiO₂, areia de zircônio - Zr (refratários) e frações de Fe e Ti provenientes do metal vazado. Quando comparado com a análise realizada por Camacho (2016) é possível notar que o percentual de componentes é semelhante, apenas com variação considerável na quantidade de ZrO₂, que apresentou 4,82 % contra 1,49 % do RCCF desta pesquisa. Já quando confrontado com análises realizadas por Machado (2013) fica mais próxima à semelhança entre os compostos.

Tabela 15: Resultado da fluorescência de raios X (FRX) do RCCF.

| Composto Químico | Teor Encontrado |
|--------------------------------|------------------------|
| SiO ₂ | 56,72% |
| Al ₂ O ₃ | 34,17% |
| Fe ₂ O ₃ | 3,5% |
| TiO ₂ | 2,22% |
| ZrO ₂ | 1,49% |
| K ₂ O | 1,12% |
| CaO | 0,27% |
| P ₂ O ₅ | 0,16% |
| Cr ₂ O ₃ | 0,07% |
| NbO | 0,07% |
| Outros | 0,2% |

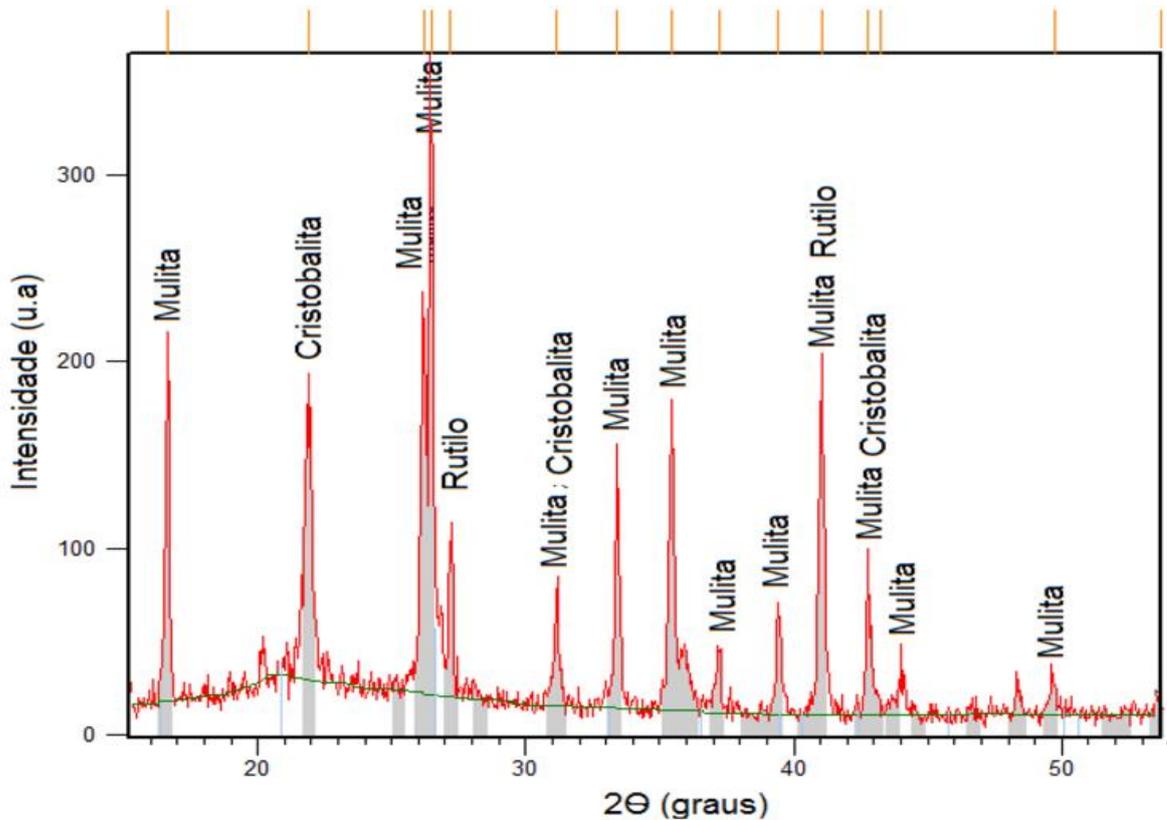
4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) DO RCCF

Na difração de raios X (Figura 19) o espectro apresentou picos bem definidos no difratograma, que correspondem às fases cristalinas da cristobalita (SiO₂), mulita (3Al₂O₃ - 2SiO₂) e rutilo (TiO₂), apresentando também, um alo de amorfismo com deslocamento da linha entre os ângulos 20 e 25°, correspondendo a fração de sílica eletrofundida (amorfa) que não cristalizou no processo de sinterização.

Confrontando com o ensaio de Camacho (2016), nota-se em ambos a presença de mulita, entretanto ocorre uma variação de quartzo para cristobalita, provavelmente em função de uma variação na temperatura de sinterização da casca cerâmica durante o processo de fabricação. Em sua análise nota-se a presença de Zircão, fase que não aparece no difratograma do RCCF em estudo, isto se deve ao fato deste material apresentar uma fração muito pequena de ZrO₂.

Correlacionando os resultados deste ensaio com o difratograma da pesquisa de Machado (2013), fica claro a presença de mulita em ambos, entretanto Machado mostra também a Sílica e a Zirconita, a primeira diverge basicamente em função de uma variação no processo de sinterização, já a segunda em função da menor quantidade de ZrO₂ presente na casca cerâmica deste estudo ficando de acordo com os seus componentes químicos, analisados na FRX.

Figura 19: Resultado da difração de raios X do RCCF.



4.4 AVALIAÇÃO DO RCCF COMO POZOLANA

Segundo Neville (2016), a pozolana é um material silicoso ou sílicoaluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma reatividade cimentícia, mas que, quando finamente moído e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, formando compostos cimentícios. A norma ABNT NBR 12653:2015 fixa o valor mínimo de 34 % retido na peneira de 45 μm para ser considerada uma pozolana. O RCCF-cimento após cominuído apresentou uma retenção de apenas 23 %, estando dentro dos parâmetros mencionados em norma.

No ensaio de atividade pozolânica a argamassa com 35 % de substituição do cimento pelo RCCF-cimento apresentou uma média de resistência à compressão de 23,12 MPa, enquanto a argamassa sem adições teve 28,75 MPa, representando um índice de atividade pozolânico (Tabela 16) de 80,56 % o qual supera o valor mínimo de 75 % mencionado na norma ABNT NBR 12653:2015.

Tabela 16: Índice de atividade pozolânica do resíduo da casca cerâmica do processo de fundição de precisão.

| Argamassas | Resistência à compressão aos 28 dias de cura (MPa) | Índice de atividade pozolânica |
|--------------------------|---|---------------------------------------|
| A – 0 % de RCCF-cimento | 28,75 | 80,56 % |
| B – 35 % de RCCF-cimento | 23,12 | |

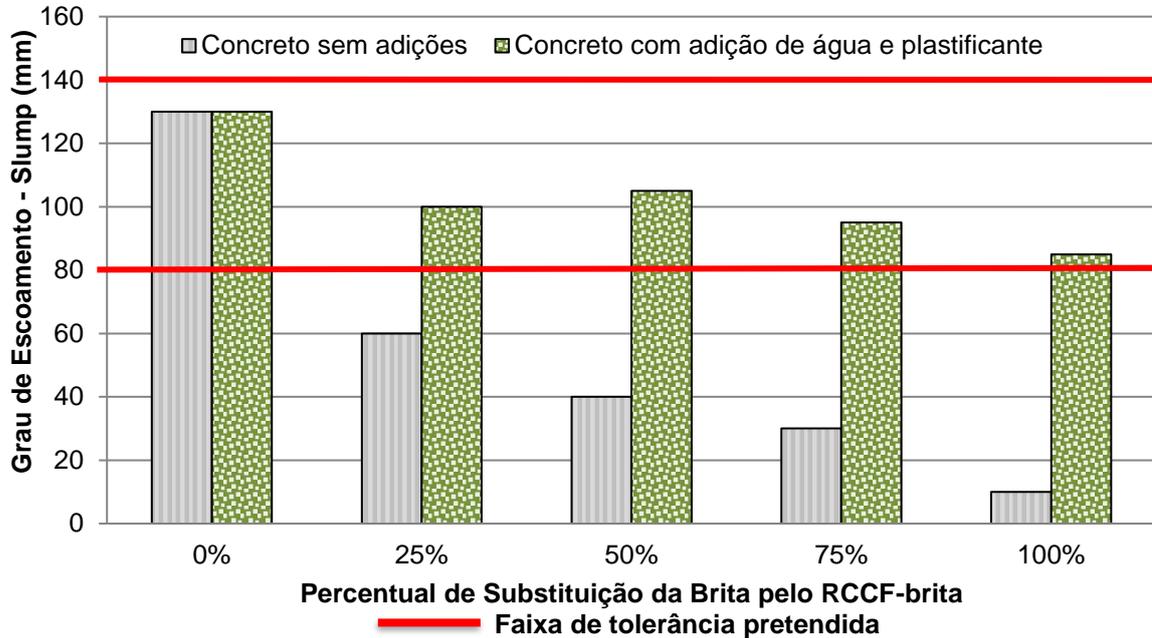
A norma ABNT NBR 12653:2015 também fixa o valor mínimo de 70 % da presença dos compostos de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , o RCCF-cimento apresentou cerca de 94,39 % (Tabela 15), e um valor máximo de 4 % do composto de SO_3 , o RCCF-cimento apresentou cerca de 0,0 % deste composto, estando dentro dos parâmetros mencionados em norma.

4.5 AVALIAÇÃO DO GRAU DE ESCOAMENTO

Quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita, fica evidente que conforme se adiciona, o escoamento é comprometido (Figura 20), chegando a uma redução de até 92 % quando é substituída a brita em sua totalidade, seguindo o mesmo padrão encontrado nos estudos de Anderson et al.(2016, pg. 27), onde trocaram a brita por resíduo cerâmico.

Com a adição de 0,61 % de plastificante e 1,2 % de água, em massa, em função da quantidade de RCCF-brita, foi possível atingir o grau de escoamento dentro das tolerâncias desejadas entre 80 e 140 mm.

Figura 20: Grau de escoamento (*slump test*) do concreto no estado fresco com e sem adição de água e aditivo plastificante, quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita.

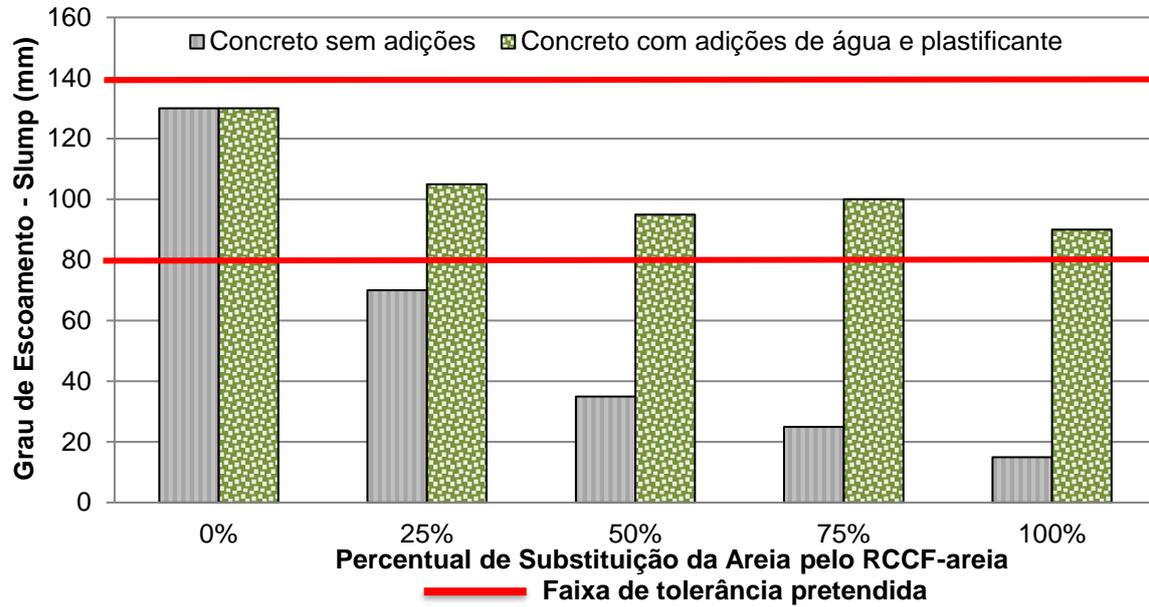


Na substituição da areia natural pelo RCCF-areia, também é possível notar que conforme se adiciona, o escoamento é comprometido (Figura 21), chegando a uma redução de até 88 % quando é substituída a areia em sua totalidade, seguindo o mesmo padrão encontrado nos estudos de Torkittikul e Chaipanich, (2010, pg. 446-447), nos quais se trocou o agregado miúdo por material cerâmico.

Adicionando 0,61% de plastificante e 4% de água, em massa, em função da quantidade de RCCF-areia foi possível atingir o grau de escoamento dentro das tolerâncias desejadas entre 110 ± 30 mm, no qual a quantidade de plastificante adicionada foi a mesma usada nos concretos com substituição da brita, já a adição de água na substituição da areia foi maior.

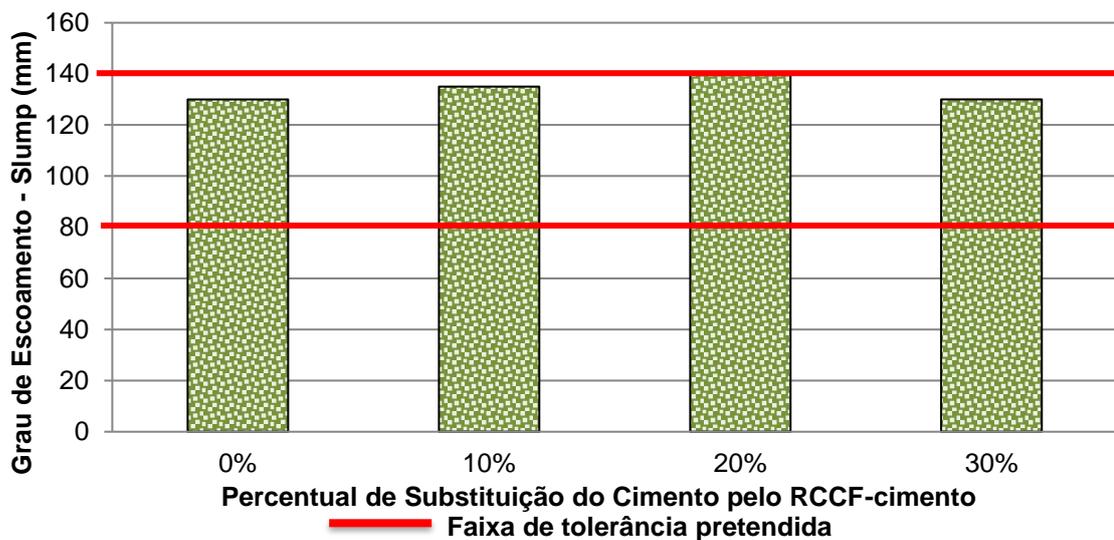
A maior quantidade de água no concreto com substituição do resíduo no formato de areia que foi de 4 %, em comparação com a brita de 1,2 %, se dá em função da areia possuir menor granulometria apresentando maior área de superfície necessitando de mais água para envolver as partículas e aumentar o seu escoamento; entretanto, essa adição de água reduziu a resistência à compressão.

Figura 21: Grau de escoamento (*slump test*) do concreto no estado fresco com e sem adição de água e aditivo plastificante, quando substituída a areia natural pelo RCCF-areia.



Já na substituição de até 30 % do cimento Portland pelo RCCF-cimento não foi notada nenhuma mudança expressiva no grau de escoamento (Figura 22).

Figura 22: Grau de escoamento (*slump test*) do concreto no estado fresco, quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento.



4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

Para cada formulação foram montados 9 CPs, sendo usado o aditivo plastificante apenas quando substituída a areia e a brita, que foram rompidos em trios, após 3, 7 e 28 dias de cura o ensaio foi replicado sendo que os gráficos expressam os valores de resistência média entre as duas replicações.

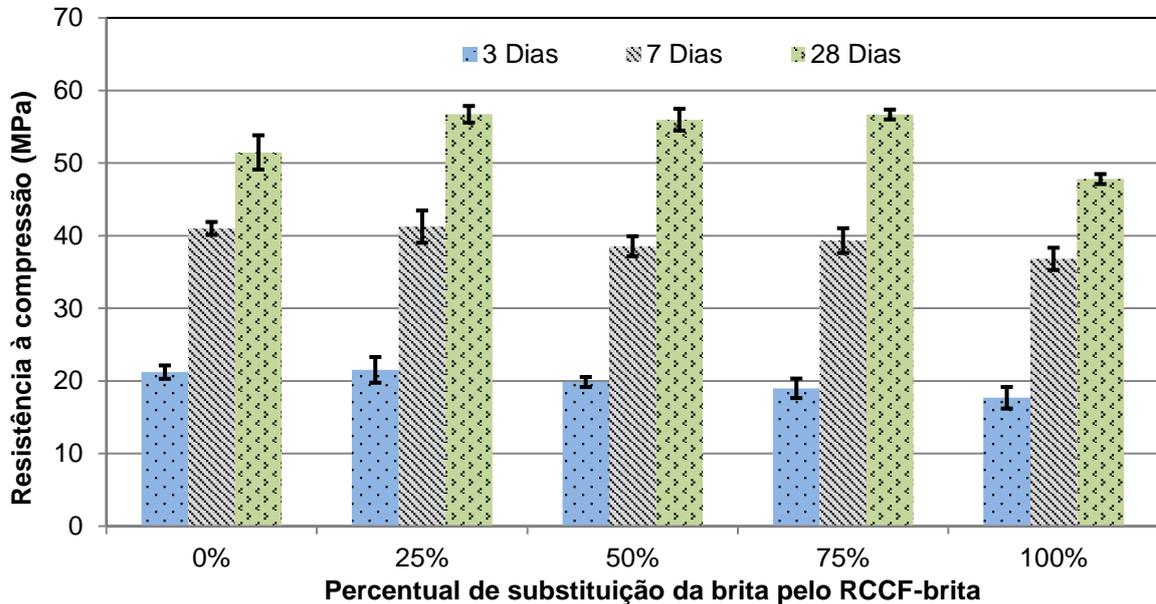
4.7.1 Substituição do agregado graúdo pelo RCCF-brita

Com 3 dias de cura os concretos com 25 % e 50 % de RCCF-brita em substituição da brita ultrapassaram 20 MPa de resistência à compressão sendo estatisticamente, considerados iguais ao concreto referência sem adição de RCCF-brita. Já os concretos com 75 % e 100 % de RCCF-brita, não foram considerados iguais à referência, apresentando respectivamente uma queda de 10 % e 16 % na resistência à compressão.

Decorridos 7 dias de cura os concretos com 50 % e 100 % de substituição da brita pelo RCCF-brita sofreram uma pequena queda na resistência à compressão, sendo 5 % e 8 %, respectivamente, ainda assim podem ser consideradas iguais ao concreto referência sem adição de RCCF-brita.

Ambos os concretos, com substituição do agregado graúdo pelo RCCF-brita, após os 28 dias de cura atingiram a resistência mecânica no ensaio de compressão acima de 50 MPa, conforme (Figura 23), sendo considerados concretos de alta resistência, com exceção do concreto com substituição total da brita pelo RCCF-brita, ficando apenas 3 % abaixo do desejado.

Figura 23: Resultados da resistência à compressão depois de 3, 7 e 28 dias de cura, quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita.



A substituição da brita pelo RCCF-brita até o percentual de 75 % acarretou em um aumento significativo na resistência à compressão dos CPs após 28 dias de cura quando comparados ao padrão sem a adição de RCCF-brita, chegando a um incremento de até 10 %, seguindo um padrão muito semelhante às pesquisas de Rashid *et al.* (2017, pg. 834), que estudou um concreto sustentável com a substituição parcial dos agregados por resíduo cerâmico, evidenciando um aumento na resistência à compressão quando substituiu até 30 % do agregado.

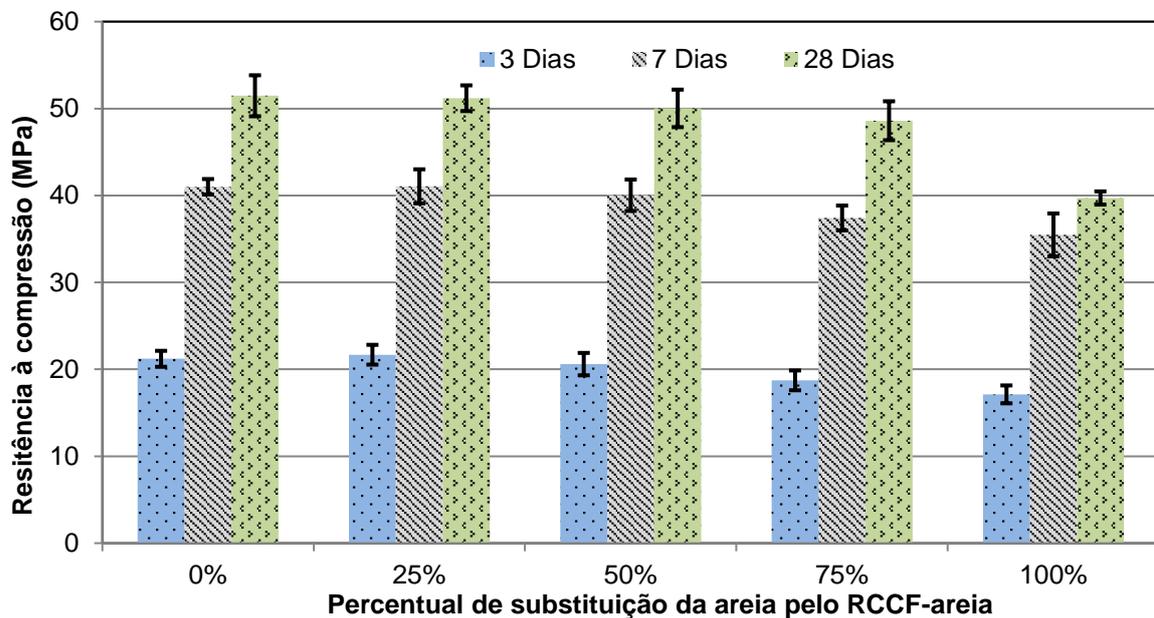
O concreto com substituição total da brita pelo RCCF-brita, decorridos 28 dias de cura, mostrou uma queda de 6 % na resistência à compressão. Isso se dá principalmente devido à adição de água para melhorar o escoamento conforme evidenciado em estudos realizados por Anderson *et al.* (2016, pg. 27), onde afirmam que a adição de água reduz a resistência mecânica dos concretos em função de um aumento na porosidade após sua completa secagem. Ainda assim reforçam que o uso do resíduo cerâmico como um substituto para o agregado graúdo em concretos é certamente viável.

4.7.2 Substituição do agregado miúdo pelo RCCF-areia.

Com 3 dias de cura os concretos com 25 % e 50 % de RCCF-areia em substituição da areia ultrapassaram 20 MPa de resistência à compressão sendo estatisticamente, considerados iguais ao concreto referência sem adição de RCCF-areia. Entretanto os concretos com 75 % e 100 % de RCCF-areia, não foram considerados iguais à referência, apresentando respectivamente uma queda de 12 % e 19 % na resistência à compressão.

Decorridos 7 dias de cura os concretos com 25 % e 50 % de substituição da areia pelo RCCF-areia apresentaram a mesma resistência à compressão do concreto sem adições. Já os concretos com 75 % e 100 % de substituição não são considerados iguais, apresentando uma queda na resistência à compressão, de 9 % e 13,5 % respectivamente.

Figura 24: Resultados da resistência à compressão depois de 3, 7 e 28 dias de cura, quando substituída a areia natural pelo RCCF-areia.



Os concretos, com substituição de 25 % e 50 % do agregado miúdo pelo RCCF-areia, após os 28 dias de cura atingiram a resistência mecânica no ensaio de compressão acima de 50 MPa, conforme (Figura 24), sendo considerados concretos de alta resistência, já o concreto com 75 % de substituição da areia pelo

RCCF-areia, ficou apenas 3 % abaixo do desejado, ainda assim, estatisticamente pode ser considerado igual ao concreto de referência sem adições. Apenas o concreto com substituição total da areia pelo RCCF-areia não pode ser considerado igual ao concreto referência, apresentando uma queda de 23 % na resistência à compressão, seguindo um padrão muito semelhante às pesquisas realizadas por Torkittikul e Chaipanich (2010, pg. 446-447), que estudaram um concreto sustentável com a substituição do agregado miúdo por resíduo cerâmico, evidenciando um aumento na resistência à compressão até o percentual de 50 % e uma posterior queda quando substituído por 100 %.

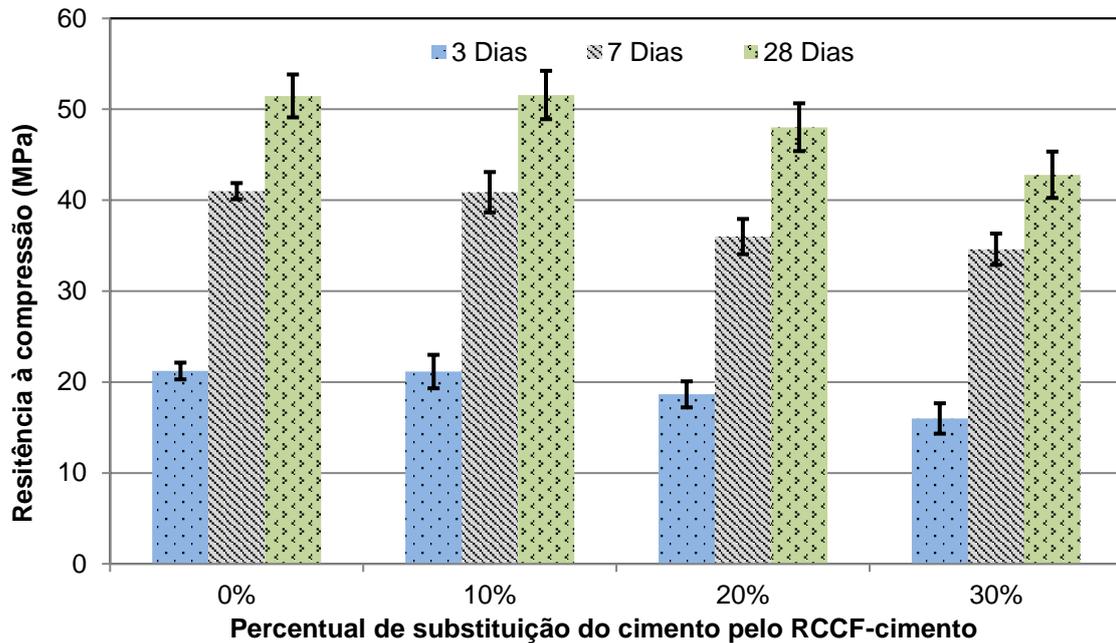
4.7.3 Substituição do cimento pelo RCCF-cimento.

O concreto com substituição de 10 % do cimento pelo RCCF-cimento apresentou uma grande semelhança na resistência à compressão em ambas as idades (3, 7 e 28 dias), quando comparado ao concreto referência sem adições e após os 28 dias de cura alcançou de 50 MPa de resistência à compressão, conforme (Figura 25), sendo considerado concreto de alta resistência, semelhante aos estudos de Aliabdo *et. al.* (2016, pg. 877) e Cordeiro e Désir (2010, pg. 76), que chegaram a obter aumentos na resistência à compressão quando substituído 15 % do cimento por um cerâmico.

Já o concreto com substituição de 20 % do cimento pelo RCCF-cimento apresentou uma queda de 9 % aos 3 dias de cura, 12 % aos 7 dias e 6 % aos 28 dias em relação ao concreto de referência, entretanto, este concreto após 28 dias de cura apresentou uma resistência à compressão de apenas 4 % abaixo dos 50 MPa almejados, podendo, ainda assim estatisticamente, ser considerado um concreto de alta resistência e igual ao concreto sem adição de RCCF-cimento, reafirmando a possibilidade de utilização até este percentual conforme mencionado nas pesquisas de Cordeiro, Toledo, Fairbairn (2009, pg.107), Amankwah, Bediako e Kankam (2014, pg. 418) e Paula *et al.* (2009, pg. 357).

Com 30 % de substituição do cimento pelo RCCF-cimento o concreto em ambas as idades de cura (3, 7 e 28 dias), teve uma queda acentuada em relação ao padrão sem adição de RCCF-cimento, que chegou até 17 % aos 28 dias, não podendo ser considerado igual ao concreto de referência.

Figura 25: Resultados da resistência à compressão depois de 3, 7 e 28 dias de cura, quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento.



4.7 AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

É notório que a quantidade de RCCF adicionado eleva a absorção de água por capilaridade tanto quando é substituída a brita, como também na substituição da areia pelo RCCF (Figuras 26 e 27). Isso é justificado em função da porosidade do RCCF, vindo ao encontro aos estudos de Elçi (2015, pg. 11), que utilizaram resíduos de pisos porcelanato e revestimentos cerâmicos triturados, como agregados na produção de concreto, tendo um aumento na absorção de água e Vieira (2004, pg.60), que utilizou resíduos de construção e demolição triturados, como agregados na produção de concreto, obtendo um aumento na absorção de água.

Figura 26: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura quando substituída brita natural pelo RCCF-brita.

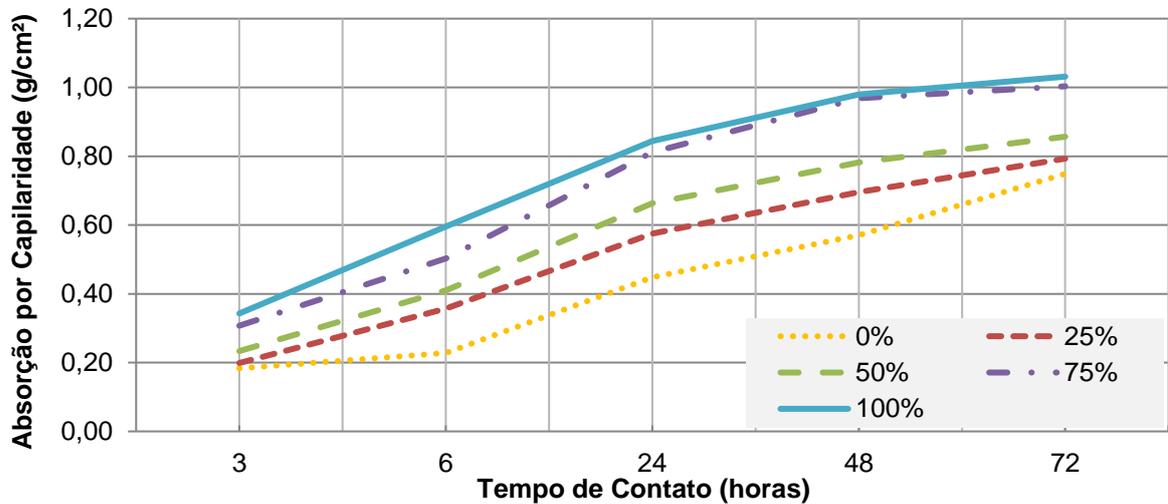
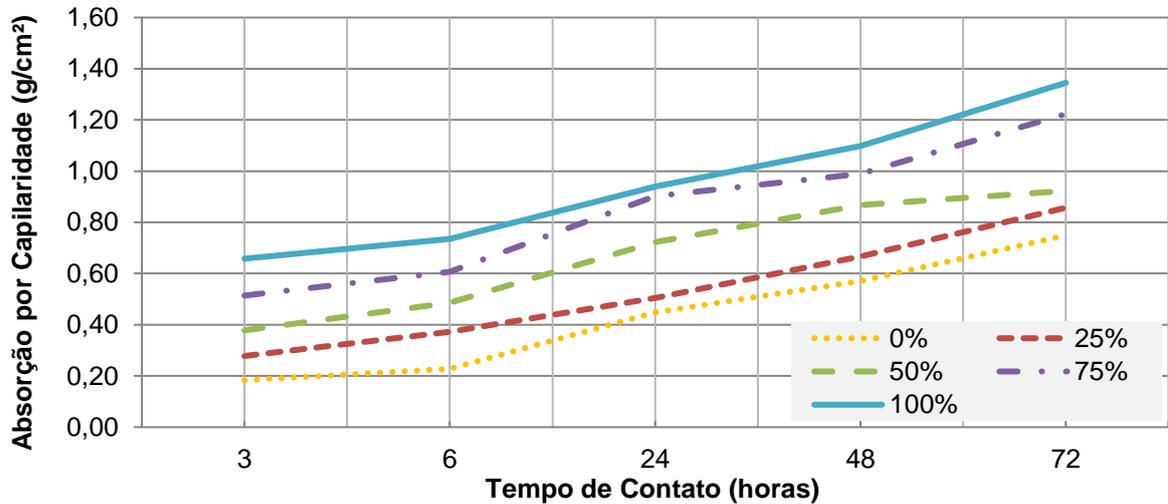
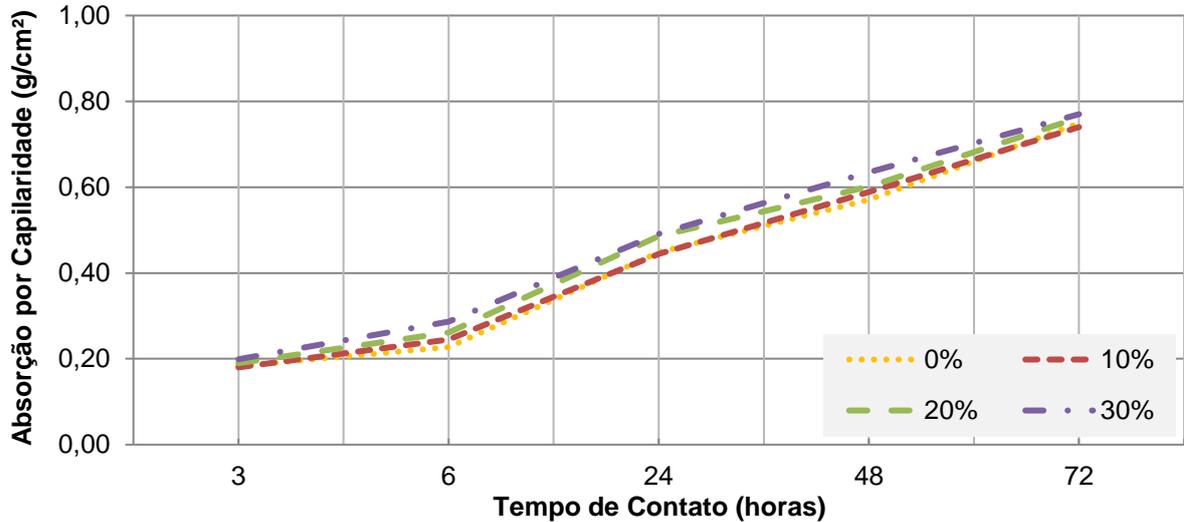


Figura 27: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura quando substituída areia natural pelo RCCF-areia.



No quesito de absorção de água por capilaridade nos concretos com a substituição do cimento pelo RCCF-cimento (Figura 28), as variações encontradas entre o concreto sem adições e o concreto com RCCF-cimento são muito pequenas, não trazendo nenhum prejuízo.

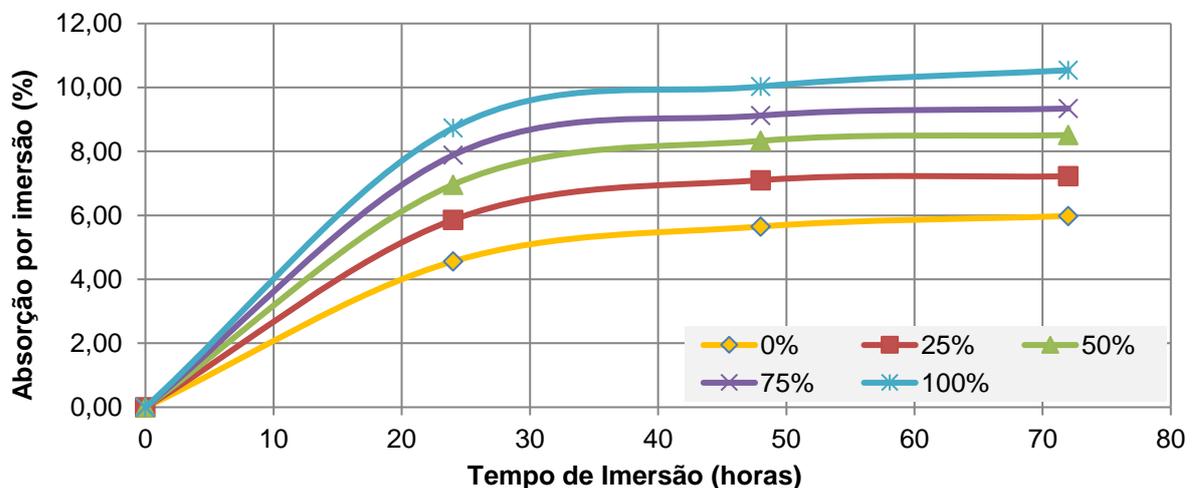
Figura 28: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento.



4.8 AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

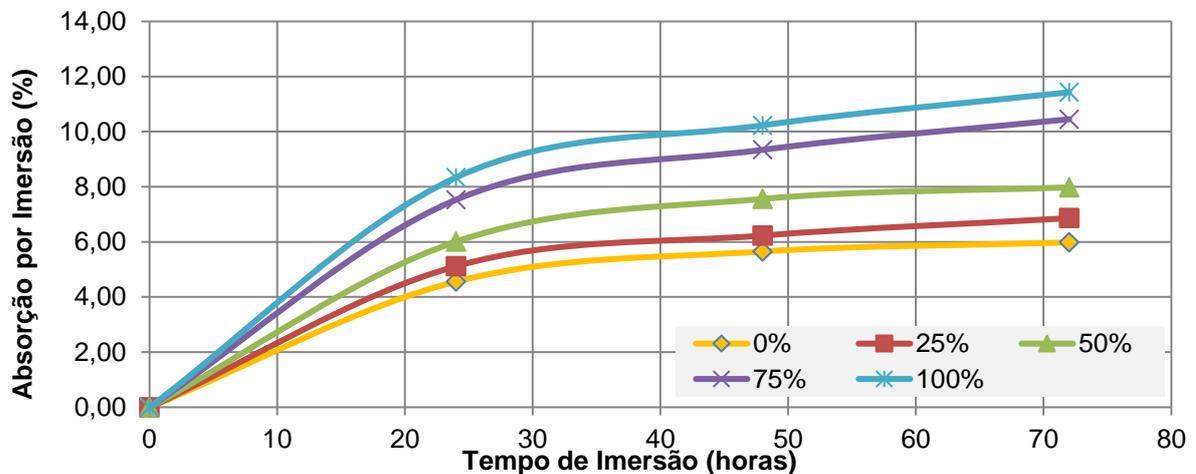
No ensaio de absorção de água por imersão (Figura 29) é seguido o mesmo padrão do ensaio de capilaridade, onde a adição do RCCF-brita provocou um aumento na absorção de água, também justificado pela porosidade do RCCF-brita em questão. Entretanto esta absorção se mostra proporcional à quantidade de RCCF-brita em substituição da brita, diferindo do ensaio de capilaridade que acima dos 50 % de adição teve um pico mais acentuado.

Figura 29: Resultado do ensaio de absorção de água por imersão após 28 dias de cura quando substituída a brita natural pelo RCCF-brita.



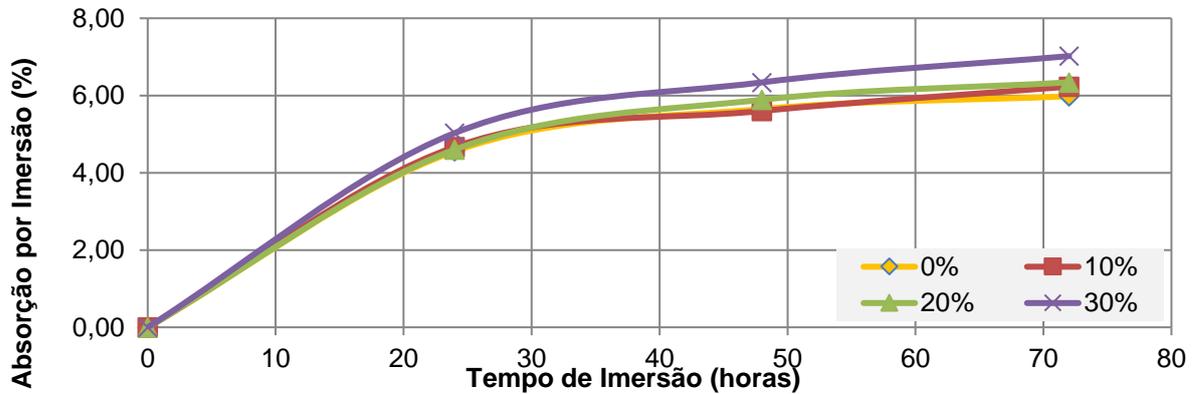
Já quando é substituída a areia pelo RCCF-areia (Figura 30) nos percentuais de 75 % e 100 % uma maior absorção é notada em relação aos concretos com até 50 %, ultrapassando 10 % após 72 horas de imersão, isso se dá devido à porosidade do RCCF-areia e a maior quantidade de água adicionada na mistura. Em contrapartida, os concretos com 25 % e 50 % apresentaram uma pequena variação em relação ao concreto referência.

Figura 30: Resultado do ensaio de absorção de água por imersão após 28 dias de cura quando substituída a brita natural pelo RCCF-areia.



Quando substituído o cimento pelo RCCF-cimento (Figura 31) é possível notar que apenas o concreto com substituição de 30 % do cimento teve uma maior absorção de água representando um acréscimo de 17 % em relação ao padrão sem RCCF-cimento, os demais com 10 % e 20 % tiveram uma absorção muito semelhante ao padrão sem adições.

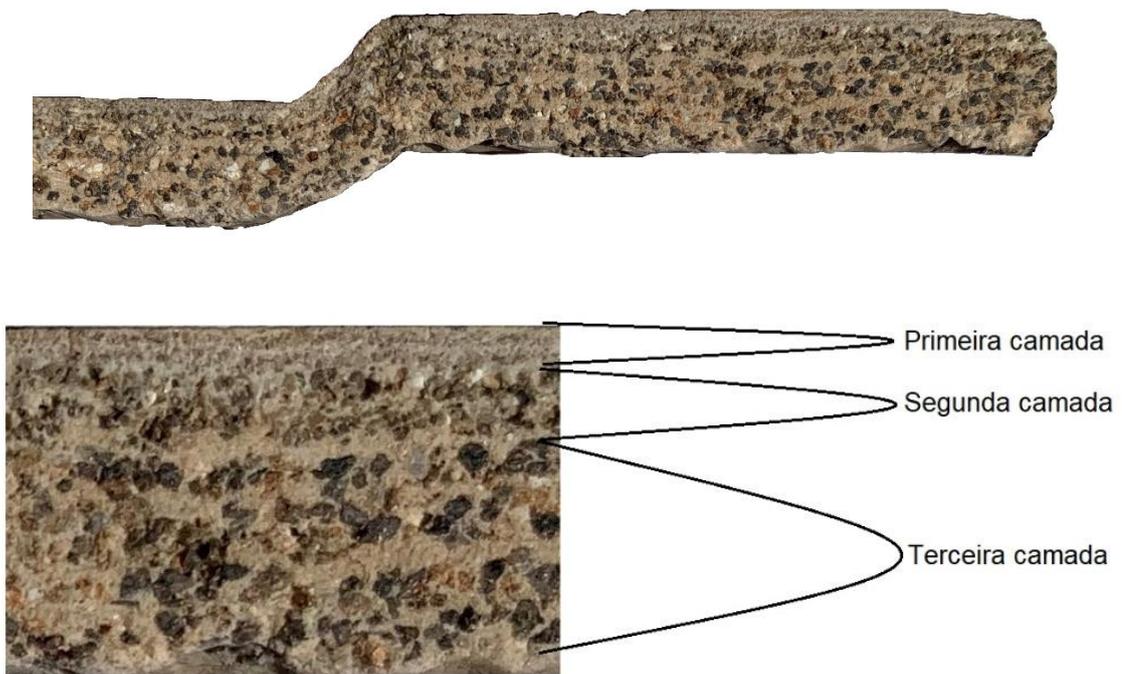
Figura 31: Resultado do ensaio de absorção de água por imersão após 28 dias de cura quando substituído o cimento Portland pelo RCCF-cimento.



4.9 ANÁLISE MACROSCÓPICA

Na (Figura 32) é possível notar as três camadas que compõem o RCCF, sendo: a primeira camada com grão extremamente finos envoltos pela lama refratário. A segunda camada com grão de tamanho médio e por fim na terceira camada os grãos de estuco de maior tamanho, contendo uma maior porosidade.

Figura 32: Imagem macroscópica do RCCF.



Após o rompimento dos CPs decorridos 28 dias de cura é possível notar que tanto no concreto com 100 % do RCCF-brita como no 100 % do RCCF-areia apresentaram excelente aderência a pasta de cimento visto que na interface rompida não existe descolamento dos agregados e sim uma quebra no mesmo sentido em que se rompeu a pasta de cimento (Figura 33).

4.10 ANÁLISE DE MICROSCOPIA

Na (Figura 34) é possível notar que a espessura da primeira camada de zircônia não ultrapassa 0,5 mm, seus grãos ficam em torno de 60 μm e a porosidade também é reduzida, já na segunda camada os grãos são maiores, em torno de 0,2 mm e os poros apresentam dimensões em torno de 0,3 mm.

Figura 33: Concreto rompido após 28 dias de cura. (a) CP com 100 % de RCCF – brita em substituição da brita. (b) CP com 100 % de RCCF-areia em substituição da areia.

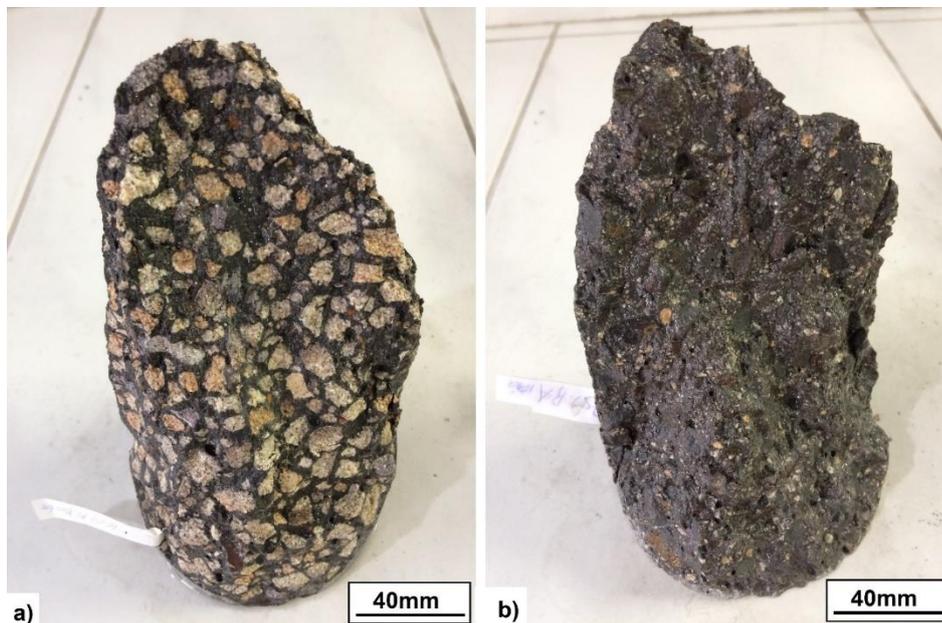
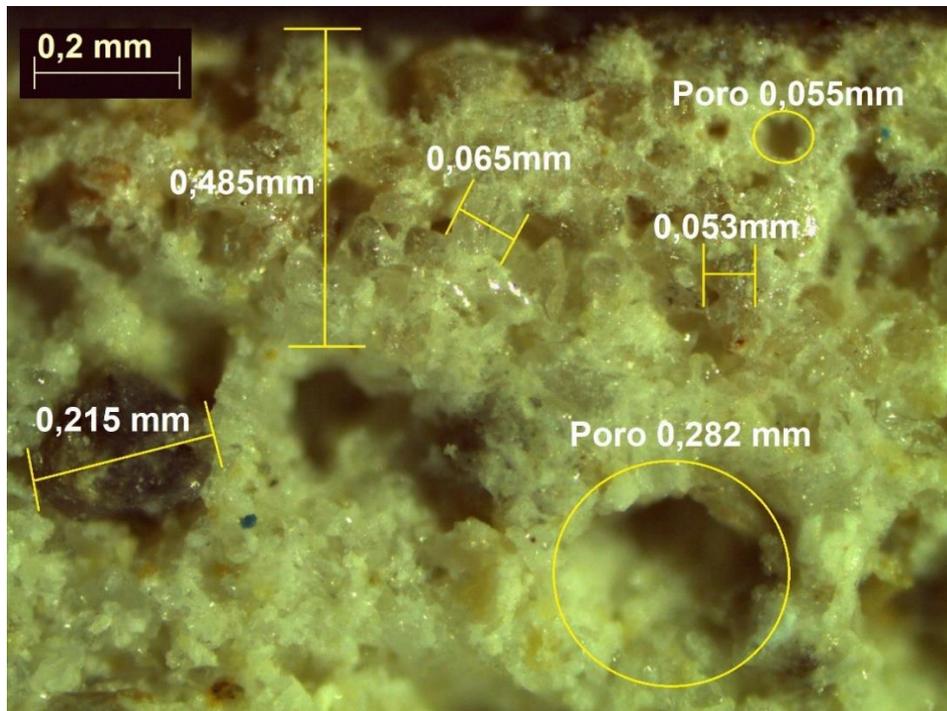
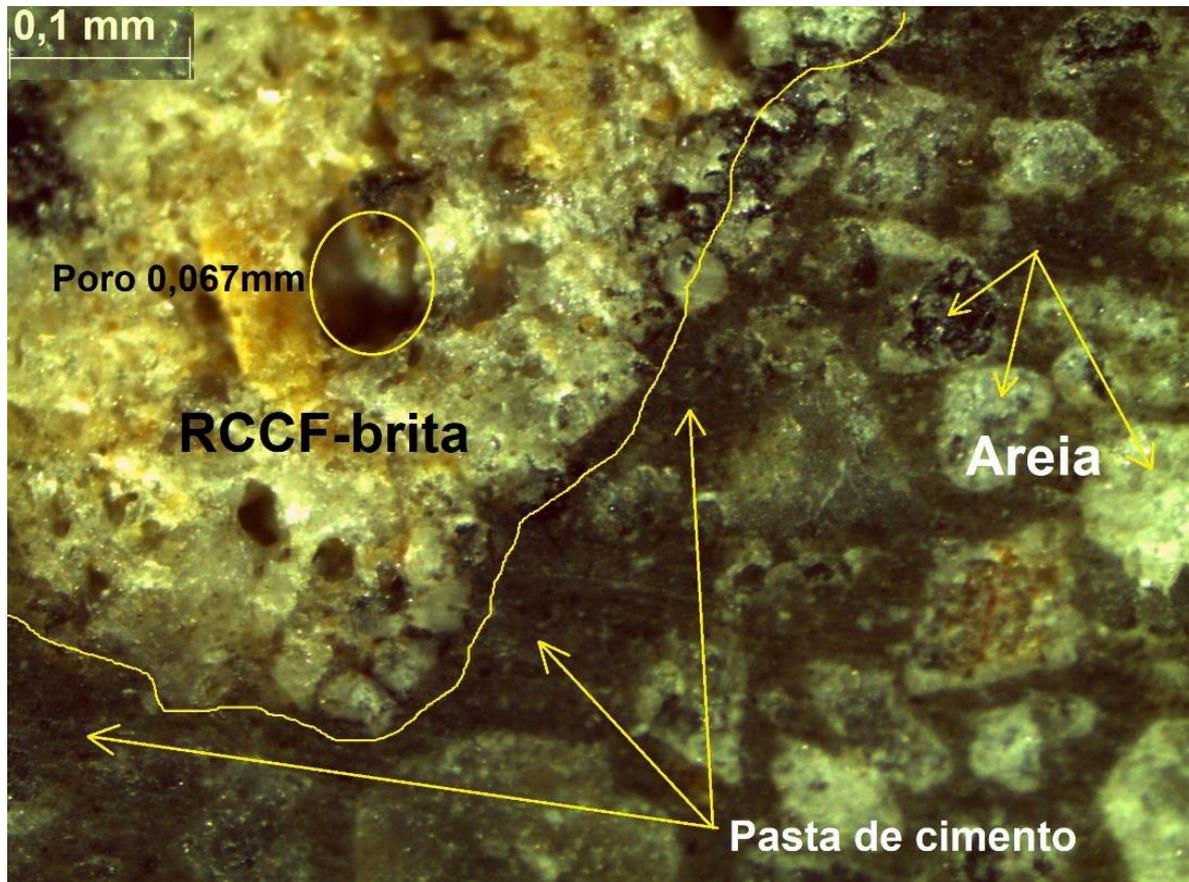


Figura 34: Casca cerâmica do processo de fundição de precisão ampliada 5X.



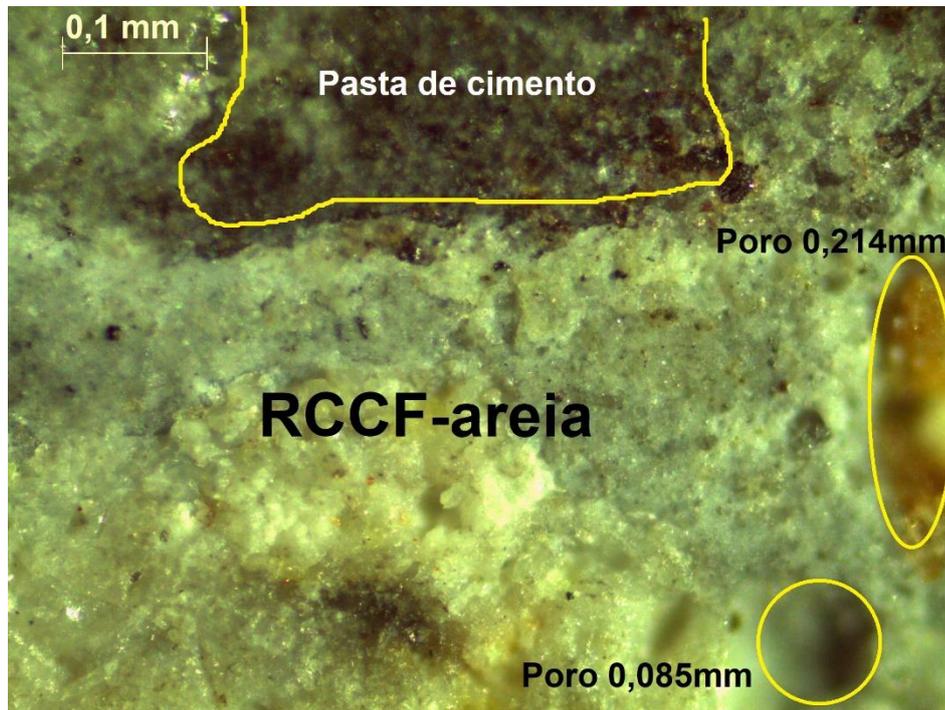
Na (Figura 35) é possível notar na interface entre o RCCF-brita e a pasta de cimento o seu preenchimento total evidenciando a grande aderência entre os dois, justificando o não descolamento do agregado após sua ruptura em ensaio de compressão (figura 33 a). A presença de poros no interior do agregado justifica a maior absorção de água nos ensaios de imersão e capilaridade.

Figura 35: Micrografia do concreto com 100 % de RCCF-brita em substituição da brita aumento de 10X.



Na (Figura 36) nota-se que a pasta de cimento penetrou em uma cavidade do RCCF areia e a interface os dois é totalmente ligada sem nenhum espaço vazio, justificando também sua excelente aderência e o não descolamento do agregado após sua ruptura em ensaio de compressão (figura 33 b). A presença de poros no interior do agregado explica a maior absorção de água nos ensaios de imersão e capilaridade.

Figura 36: Micrografia do concreto com 100 % de RCCF-areia em substituição da areia aumento de 10X.



5 CONCLUSÕES

Após a verificação da utilização do RCCF na substituição total ou parcial dos agregados e do cimento Portland presentes no concreto, foi possível destacar os seguintes pontos:

- Com um processo ajustado de cominuição e peneiramento é possível obter um material com granulometria semelhante aos agregados e ao cimento;
- Em função de o RCCF apresentar menores massas em comparação com os materiais naturais, os concretos com RCCF também apresentarão menor massa específica;
- As características químicas e estruturais do RCCF demonstram que 94,39% da composição do material é SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e seu grau de pozolanicidade chega a 80,56 %;
- Fica evidente a queda do grau de escoamento do concreto com substituição dos agregados pelo RCCF, chegando a uma redução acima de 85%, quando totalmente substituído, entretanto é possível chegar a um grau de escoamento muito semelhante ao concreto sem adições com uma pequena correção na quantidade de água e adição de aditivo superplastificante;
- A substituição do cimento pelo RCCF não causou prejuízos ao grau de escoamento do concreto;
- Os concretos com a presença do RCCF apresentaram uma maior absorção de água quando comparados aos concretos sem adições;
- Principalmente os resultados indicam que, a substituição em sua totalidade, do agregado graúdo, a substituição de até 50 % do agregado miúdo e a substituição de até 20 % do cimento Portland que integram o concreto pelo RCCF, é possível sem causar prejuízos na resistência à compressão, o que torna viável a sua aplicação;
- Com a substituição investigada colocada em prática, é possível fazer uma economia considerável na questão do descarte em aterros;
- Além da economia supracitada, também se destaca a diminuição na utilização de recursos naturais como os agregados (brita e areia) e uma grande redução nas emissões de CO_2 das indústrias cimentícias;

- O aproveitamento do RCCF em concretos vai de encontro com as políticas atuais de produção mais verde;
- A utilização do RCCF em concretos, posta em prática, proporcionará ganhos econômicos às empresas envolvidas e benefícios ambientais, conseqüentemente, um ganho a toda sociedade;

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar alternativas que venham a reduzir a absorção de água nos concretos com RCCF;
- Avaliar as propriedades do concreto quando substituídos os agregados e o cimento em conjunto;
- Analisar os custos de processamento do RCCF;
- Pesquisar em quais linhas de produtos de concreto haverá um maior ganho econômico com o uso do RCCF.

REFERÊNCIAS

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. **Revista ABIFA abril de 2015, ed. 179.** Disponível em: <<http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2015/05/revista-abifa-2015-04.pdf>> Acessado em 29 AGO 2017.

ABIFA 2016 – Guia ABIFA de fundição. Disponível em: <http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2016/09/revista_abifa_193.pdf> Acessado em 29 AGO 2017.

ALIABDO A. A. et al., Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, **Construction and Building Materials**, 124, pg. 866-877, 2016.

AMANKWAH E. O., BEDIAKO M., KANKAM C.K.. Influence of calcined clay pozzolana on strength characteristics of Portland cement concrete, **International Journal of Materials Science and Applications**, 3(6),410-419,January, 2014.

ANDERSON D.J., SMITH S.T., AU F.T.K., Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate, **Construction and Building Materials**, 117, pg. 20 – 28, 2016.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção.** 5º ed.. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CALLISTER, Willian D. Jr. e RETHWISCH David G. **Ciencia e Engenharia de Materias uma Introdução.** 8º ed.. tradução Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica Jose Roberto Moraes d’Almeida. – Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMACHO A. L. D, MORAES C. A. M, MODOLO R. C. E, **Caracterização da casca cerâmica gerada no processo de fundição de precisão. 71º congresso anual da ABM. Rio de Janeiro, 2016**

CORDEIRO G. C., TOLEDO F. R. D., FAIRBAIRN E. M. R.. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto, **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 99-107, out./dez. 2009.

CORDEIRO G.C., DÉsir J.M.. Potencial de argila caulinítica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolanas para concreto de alta resistência, **Cerâmica 56**, pg. 71-76, 2010.

CSI – Cement Sustainability Initiative. **Cement Industry Energy and CO2 Performance**. Disponível em: <https://www.wbcscement.org/pdf/GNR%20dox.pdf>
Acessado em 09 MAI 2018.

CSI – Cement Sustainability Initiative. **Cement Industry Energy and CO2 Performance**. Disponível em: <https://www.wbcscement.org/index.php/about-csi/explore-cement?showall=&start=2> > Acessado em 09 MAI 2018.

ELCI H., Utilization of crushed floor and wall tile wastes as aggregate in concrete production, **Journal of Cleaner Production**, pg. 1 – 11, 2015.

FERREIRA, José M. G. de Carvalho. **Tecnologia da Fundição**. 3. ed.. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf> Acessado em 19 ABR 2018.

ICI - Investment casting Institute. Disponível em: <https://www.investmentcasting.org/> Acessado em 29 AGO 2017.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e tecnologia**.- 1. ed., vol 1 – São Paulo – IBRACON, 2011

Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

MACHADO, C. F., **Reutilização da casca cerâmica do processo de fundição por cera perdida como adição em matrizes cimentícias**. Dissertação (Mestrado), CEFET-MG – Belo Horizonte/MG, 2013.

MACHADO, C. F, MORAVIA, W. G, **Caracterização do resíduo de casca cerâmica do processo de fundição por cera perdida para emprego como pozolana**. 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Curitiba – PR, 2012

MACHADO, Ioná Macedo Leonardo. **Tecnologia básica do processo por cera perdida**. Itaúna: SENAI-DR.MG, 2001.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Contexto e Principais Aspectos da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em :<<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/contextos-e-principais-aspectos>> Acessado em 19 ABR 2018.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>> Acessado em 19 ABR 2018.

Montgomery, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons; 2001.

NETO, Benedito Coutinho. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - São Carlos, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5° ed.. Porto Alegre, 2016.

PAULA M. O. et al., potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.13, n.3, p.353–357, 2009.

RASHID K. et al., Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate, **Construction and Building Materials**, 154, pg. 829 – 840, (2017).

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland** – 3 ed. – Porto Alegre : EDIUCRS, 2011.

RODRIGUES JR., Themistocles. **Dicionário: fundição e tratamentos térmicos**. 1° ed.. São Paulo: T&T, 2003

SANTOS G. Hiperplastificantes e superplastificantes para concreto, **Revista Construchemical**, Ano 3, n. 16, p. 14, set/out, 2014.

SNIC - Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento. **Relatório Anuário 2013**. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf Acessado em 01 AGO 2017.

SOARES, Gloria de Almeida. **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/SR-1, 2000

SOARES H.G, LESSA C. R. L., **Reaproveitamento do resíduo cerâmico do processo de micrufusão na construção civil**. Revista Fundição e matérias-primas. n. 201, pg. 28-33, AGO- 2018.

TEDESCO M., **Estudo da Utilização de Resíduo de Casca Cerâmica da Microfusão no Concreto em Substituição ao Agregado Graúdo e Miúdo Natural**. Dissertação (Mestrado), UFGRS – Porto Alegre – RS, 2016.

TORKITTIKUL P., CHAIPANICH A., Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes, **Cement & Concrete Composites**, 32, pg. 440–449, (2010).

VIEIRA L. G, DAL MOLIN D. C. C., Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Ambiente construído. 2004; 4:47-63.

ANEXO – A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 3 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A BRITA PELO RCCF-BRITA.

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 17,86 | 16,49 | 17,23 | 17,193 | 21,46 |
| 25% | 18,34 | 15,45 | 18,24 | 17,343 | 21,64 |
| 50% | 15,39 | 16,06 | 15,87 | 15,773 | 19,68 |
| 75% | 16,20 | 15,34 | 14,65 | 15,397 | 19,21 |
| 100% | 13,24 | 15,34 | 14,93 | 14,503 | 18,10 |

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 17,68 | 15,49 | 17,23 | 16,800 | 20,97 |
| 25% | 16,24 | 15,87 | 19,34 | 17,150 | 21,40 |
| 50% | 14,87 | 16,87 | 16,39 | 16,043 | 20,02 |
| 75% | 13,65 | 14,22 | 17,20 | 15,023 | 18,75 |
| 100% | 15,93 | 12,34 | 13,24 | 13,837 | 17,27 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Replicações | |
|---|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 21,46 | 20,97 |
| 25% | 21,64 | 21,40 |
| 50% | 19,68 | 20,02 |
| 75% | 19,21 | 18,75 |
| 100% | 18,10 | 17,27 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|--------|----|-------|---------|----------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 20,199 | 4 | 5,049 | 38,2008 | 0,000611 | 5,192167 |
| Dentro dos grupos | 0,660 | 5 | 0,132 | | | |
| Total | 20,860 | 9 | | | | |

ANEXO – B - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 7 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A BRITA PELO RCCF-BRITA.

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 31,87 | 32,25 | 32,93 | 32,350 | 40,37 |
| 25% | 32,56 | 34,38 | 35,22 | 34,053 | 42,50 |
| 50% | 29,34 | 32,45 | 29,87 | 30,553 | 38,13 |
| 75% | 32,56 | 31,24 | 34,52 | 32,773 | 40,90 |
| 100% | 27,78 | 29,85 | 31,34 | 29,657 | 37,01 |

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 31,93 | 33,87 | 34,25 | 33,350 | 41,62 |
| 25% | 33,22 | 28,56 | 34,38 | 32,053 | 40,00 |
| 50% | 30,87 | 30,34 | 32,45 | 31,220 | 38,96 |
| 75% | 32,52 | 32,56 | 29,45 | 31,510 | 39,32 |
| 100% | 28,07 | 30,56 | 29,85 | 29,493 | 36,81 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Replicações | |
|---|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 40,37 | 41,62 |
| 25% | 42,50 | 40,00 |
| 50% | 38,13 | 38,96 |
| 75% | 40,90 | 39,32 |
| 100% | 37,01 | 36,81 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|--------|----|-------|-------|---------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 26,557 | 4 | 6,639 | 6,032 | 0,037 | 5,192 |
| Dentro dos grupos | 5,503 | 5 | 1,100 | | | |
| Total | 32,060 | 9 | | | | |

ANEXO – C - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A BRITA PELO RCCF-BRITA.

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 40,11 | 41,53 | 43,13 | 41,590 | 51,90 |
| 25% | 46,44 | 45,00 | 45,75 | 45,730 | 57,07 |
| 50% | 43,57 | 42,33 | 45,36 | 43,753 | 54,60 |
| 75% | 42,93 | 44,43 | 44,11 | 43,823 | 54,69 |
| 100% | 38,50 | 39,85 | 39,04 | 39,130 | 48,83 |

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 38,60 | 44,56 | 39,53 | 40,897 | 51,04 |
| 25% | 46,41 | 43,40 | 45,70 | 45,170 | 56,37 |
| 50% | 45,17 | 47,66 | 45,01 | 45,947 | 57,34 |
| 75% | 45,62 | 45,87 | 44,79 | 45,427 | 56,69 |
| 100% | 38,59 | 37,51 | 38,80 | 38,300 | 47,80 |

| Quantidade de RCCF-brita em substituição do agregado graúdo | Replicações | |
|---|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 51,90 | 51,04 |
| 25% | 57,07 | 56,37 |
| 50% | 54,60 | 57,34 |
| 75% | 54,69 | 56,69 |
| 100% | 48,83 | 47,80 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|---------|----|--------|--------|---------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 104,375 | 4 | 26,093 | 18,901 | 0,0032 | 5,192 |
| Dentro dos grupos | 6,902 | 5 | 1,380 | | | |
| Total | 111,278 | 9 | | | | |

ANEXO – D - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 3 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A AREIA PELO RCCF-AREIA.

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|--|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 17,86 | 16,49 | 17,23 | 17,193 | 21,46 |
| 25% | 17,67 | 16,23 | 18,34 | 17,413 | 21,73 |
| 50% | 16,35 | 17,89 | 15,45 | 16,563 | 20,67 |
| 75% | 15,78 | 15,34 | 13,67 | 14,930 | 18,63 |
| 100% | 13,12 | 14,24 | 13,27 | 13,543 | 16,90 |

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|--|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 17,68 | 15,49 | 17,23 | 16,800 | 20,97 |
| 25% | 16,12 | 17,34 | 18,53 | 17,330 | 21,63 |
| 50% | 15,23 | 17,89 | 16,21 | 16,443 | 20,52 |
| 75% | 13,89 | 15,12 | 16,23 | 15,080 | 18,82 |
| 100% | 15,34 | 12,45 | 13,89 | 13,893 | 17,34 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Replicações | |
|--|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 21,46 | 20,97 |
| 25% | 21,73 | 21,63 |
| 50% | 20,67 | 20,52 |
| 75% | 18,63 | 18,82 |
| 100% | 16,90 | 17,34 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|--------|----|-------|---------|----------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 28,940 | 4 | 7,235 | 144,700 | 0,000023 | 5,192 |
| Dentro dos grupos | 0,250 | 5 | 0,050 | | | |
| Total | 29,190 | 9 | | | | |

ANEXO – E - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 7 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A AREIA PELO RCCF-AREIA.

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|--|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 31,87 | 32,25 | 32,93 | 32,350 | 40,37 |
| 25% | 35,05 | 33,23 | 31,75 | 33,343 | 41,61 |
| 50% | 31,56 | 34,24 | 30,23 | 32,010 | 39,95 |
| 75% | 29,67 | 28,34 | 31,02 | 29,677 | 37,03 |
| 100% | 30,24 | 25,45 | 30,12 | 28,603 | 35,70 |

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|--|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 31,93 | 33,87 | 34,25 | 33,350 | 41,62 |
| 25% | 34,12 | 33,34 | 29,87 | 32,443 | 40,49 |
| 50% | 30,45 | 33,56 | 32,44 | 32,150 | 40,12 |
| 75% | 28,57 | 31,48 | 30,78 | 30,277 | 37,78 |
| 100% | 25,67 | 29,67 | 29,33 | 28,223 | 35,22 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Replicações | |
|--|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 40,37 | 41,62 |
| 25% | 41,61 | 40,49 |
| 50% | 39,95 | 40,12 |
| 75% | 37,03 | 37,78 |
| 100% | 35,70 | 35,22 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|--------|----|--------|--------|----------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 48,643 | 4 | 12,160 | 33,455 | 0,000839 | 5,192 |
| Dentro dos grupos | 1,817 | 5 | 0,3632 | | | |
| Total | 50,461 | 9 | | | | |

ANEXO – F - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDA A AREIA PELO RCCF-AREIA.

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|--|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 40,11 | 41,53 | 43,13 | 41,590 | 51,90 |
| 25% | 42,89 | 39,17 | 40,85 | 40,970 | 51,13 |
| 50% | 38,47 | 42,21 | 38,14 | 39,607 | 49,43 |
| 75% | 42,31 | 37,70 | 34,56 | 38,190 | 47,66 |
| 100% | 30,73 | 32,28 | 31,20 | 31,403 | 39,19 |

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|--|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 38,60 | 44,56 | 39,53 | 40,897 | 51,04 |
| 25% | 39,92 | 42,09 | 41,18 | 41,063 | 51,24 |
| 50% | 38,22 | 41,34 | 42,12 | 40,560 | 50,62 |
| 75% | 39,71 | 40,27 | 39,11 | 39,697 | 49,54 |
| 100% | 33,06 | 31,66 | 31,98 | 32,233 | 40,23 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF-areia em substituição do agregado miúdo | Replicações | |
|--|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 51,90 | 51,04 |
| 25% | 51,13 | 51,24 |
| 50% | 49,43 | 50,62 |
| 75% | 47,66 | 49,54 |
| 100% | 39,19 | 40,23 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|---------|----|--------|--------|----------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 190,419 | 4 | 47,604 | 70,153 | 0,000140 | 5,192 |
| Dentro dos grupos | 3,392 | 5 | 0,6785 | | | |
| Total | 193,811 | 9 | | | | |

ANEXO – G - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 3 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDO O CIMENTO PELO RCCF-CIMENTO.

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 17,86 | 16,49 | 17,23 | 17,193 | 21,46 |
| 10% | 15,23 | 19,12 | 16,76 | 17,037 | 21,26 |
| 20% | 14,23 | 13,57 | 16,53 | 14,777 | 18,44 |
| 30% | 12,35 | 11,78 | 15,83 | 13,320 | 16,62 |

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 17,68 | 15,49 | 17,23 | 16,800 | 20,97 |
| 10% | 18,68 | 15,24 | 16,67 | 16,863 | 21,04 |
| 20% | 16,23 | 13,67 | 15,40 | 15,100 | 18,84 |
| 30% | 11,08 | 13,38 | 12,44 | 12,300 | 15,35 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Replicações | |
|---|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 21,46 | 20,97 |
| 10% | 21,26 | 21,04 |
| 20% | 18,44 | 18,84 |
| 30% | 16,62 | 15,35 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|--------|----|--------|--------|---------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 36,974 | 3 | 12,324 | 47,613 | 0,00137 | 6,591 |
| Dentro dos grupos | 1,035 | 4 | 0,258 | | | |
| Total | 38,010 | 7 | | | | |

ANEXO – H - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 7 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDO O CIMENTO PELO RCCF-CIMENTO.

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 31,87 | 32,25 | 32,93 | 32,350 | 40,37 |
| 10% | 33,91 | 29,87 | 34,76 | 32,847 | 40,99 |
| 20% | 27,23 | 29,12 | 30,02 | 28,790 | 35,93 |
| 30% | 25,44 | 29,34 | 27,78 | 27,520 | 34,34 |

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 31,93 | 33,87 | 34,25 | 33,350 | 41,62 |
| 10% | 34,23 | 33,12 | 30,67 | 32,673 | 40,77 |
| 20% | 31,07 | 26,25 | 29,41 | 28,910 | 36,08 |
| 30% | 28,12 | 26,38 | 29,33 | 27,943 | 34,87 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Replicações | |
|---|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 40,37 | 41,62 |
| 10% | 40,99 | 40,77 |
| 20% | 35,93 | 36,08 |
| 30% | 34,34 | 34,87 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|--------|----|--------|--------|---------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 65,431 | 3 | 21,810 | 91,559 | 0,00038 | 6,591 |
| Dentro dos grupos | 0,952 | 4 | 0,238 | | | |
| Total | 66,384 | 7 | | | | |

ANEXO – I - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DOS CONCRETOS COM 28 DIAS DE CURA, QUANDO SUBSTITUÍDO O CIMENTO PELO RCCF-CIMENTO.

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Resistência à compressão Replicação 1 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 40,11 | 41,53 | 43,13 | 41,590 | 51,90 |
| 10% | 40,11 | 38,62 | 41,60 | 40,110 | 50,06 |
| 20% | 36,47 | 37,42 | 40,35 | 38,080 | 47,52 |
| 30% | 32,33 | 36,64 | 35,34 | 34,770 | 43,39 |

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Resistência à compressão Replicação 2 | | | | |
|---|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|
| | Toneladas | | | | MPa |
| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média | Média |
| 0% | 38,60 | 44,56 | 39,53 | 40,897 | 51,04 |
| 10% | 38,23 | 43,77 | 45,60 | 42,533 | 53,08 |
| 20% | 36,42 | 37,70 | 42,56 | 38,893 | 48,54 |
| 30% | 35,34 | 35,64 | 30,48 | 33,820 | 42,21 |

Obs.: 3 medidas foram obtidas para cada replicação, sendo considerada a média das medidas de cada replicação para a análise de variância.

| Quantidade de RCCF- cimento em substituição do cimento Portland | Replicações | |
|---|-------------|-------|
| | 1 | 2 |
| 0% | 51,90 | 51,04 |
| 10% | 50,06 | 53,08 |
| 20% | 47,52 | 48,54 |
| 30% | 43,39 | 42,21 |

| ANOVA - Fator único | | | | | | |
|---------------------|---------|----|--------|--------|---------|-----------|
| Alfa | 0,05 | | | | | |
| Origem de variações | SS | df | MS | F | Valor p | F crítico |
| Entre grupos | 101,904 | 3 | 33,968 | 22,038 | 0,00598 | 6,591 |
| Dentro dos grupos | 6,165 | 4 | 1,541 | | | |
| Total | 108,069 | 7 | | | | |