



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

ADRIANO RICARDO BORGES COSTA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO
DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RECICLADO
CERÂMICO DE OBRAS CIVIS**

VOLTA REDONDA

2016



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO
DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE RECICLADO
CERÂMICO DE OBRAS CIVIS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UNIFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais, linha de pesquisa em materiais Cerâmicos.

Aluno:
Adriano Ricardo Borges Costa

Orientador:
Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

**VOLTA REDONDA
2016**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Adriano Ricardo Borges Costa

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE
CONCRETO COM ADIÇÃO DE RECICLADO CERÂMICO DE OBRAS CÍVIS**

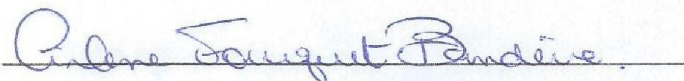
Orientador:

Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

Banca Examinadora



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



Profa. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira



Prof. Dr. Luis Henrique Leme Louro

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

C837d

Costa, Adriano Ricardo Borges
Desenvolvimento e caracterização de compósito de concreto com adição de reciclado cerâmico de obras civis. / Adriano Ricardo Borges Costa
UniFOA, 2016.

166p. : II

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral
Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais,
2016.

1. Materiais – dissertação. 2. Reciclado cerâmico. 3. Engenharia -
Concreto. I. Cabral, Ricardo de Freitas. II. Centro Universitário de Volta
Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, JC, GE, minha Família e a meus Amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Criador, causa primária de todas as coisas, pela Sabedoria e Força de Vontade, recebidos durante todo o Curso de Mestrado;

À minha família, Célia, Riliann e Drielli, meus pais Antônio e Deusdeth, pelo apoio, dedicação, ajuda e paciência nos momentos difíceis;

Aos Profs. Drs., Roberto de Oliveira Magnago, Luiz de Araújo Bicalho e Claudinei dos Santos, pelo ajuda na idealização deste Projeto, e à banca avaliadora, Profs. Drs., Cirlene Fourquet Bandeira e Luis Henrique Leme Louro;

Aos Profs. Drs., Sinara Borborema Gabriel, Daniella Regina Mulinari, Gilberto Carvalho Coelho, Alexandre Alvarenga Palmeira, Alexandre Fernandes Habibe, e a todos demais Professores, pelos conhecimentos e sugestões para este trabalho;

Ao Técnicos dos Laboratórios de Engenharia e de Ciência dos Materiais do UniFOA, Arthur Almeida Bitencourt e Dirceu Hartung de Camargo Coutinho, que tiveram fundamental atuação neste trabalho e que muito me ajudaram na execução dos ensaios;

À Ana Maria, Bruna, todos os demais da Secretaria do MEMAT e Bibliotecários do UniFOA;

A todos os Colegas de Mestrado, que contribuíram com as experiências de seus próprios trabalhos;

Aos pesquisadores de outras instituições de ensino no Brasil e no Planeta, de onde pude estudar suas experiências e bibliografias para embasar e corroborar esta dissertação;

E finalmente, ao meu orientador, Professor Dr. Ricardo de Freitas Cabral, pelos ensinamentos, incentivo, dedicação e paciência, para a concretização desse Projeto.

A todos, meu muito obrigado !

RESUMO

A reciclagem de resíduos de obras civis (concreto, vigas, pilares, pisos, alvenaria, ferragem, etc.) já vêm sendo empregada na construção civil, mas apenas por força de lei (CONAMA, 2005; N° 12.305, 2010) nos grandes centros e apenas por construtoras, pois ainda não foi aceita pela população em geral. Contudo, muitas pesquisas com reciclados foram e já vêm sendo realizadas, tais como Troian (2008), Cabral (2007), Campos (2012), Silva(2012), Oliveira (2012) e Silva (2014). A presente dissertação é um estudo e fomento visando o reaproveitamento de rejeitos “cerâmicos” como agregados para conformar concreto com desempenho viável para atender a construção civil, dentro das normas vigentes da engenharia. O material utilizado foi selecionado de descartes de obra, moído e peneirado dentro da granulometria de britas 1 e 2, sendo depois adicionado como agregado graúdo em percentuais (5%, 10%, 15% e 20%) em substituição parcial da brita, em traços (dosagens) de concreto, conformando corpos de prova do produto final, atendendo as normas da ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR5738 e NM67). Posteriormente, conforme a NBR5739 (2007) os CPs foram levados a ensaios de compressão e tração e rompidos após 14, 21 e 28 dias, tendo sido registrados os percentuais tecnicamente viáveis de 5%,10% e 15%, com suas resistências características médias de 27,1MPa, 26,9MPa e 27,5MPa respectivamente, pouco abaixo da faixa de Eng.^a (15 a 40MPa) (Botelho, 2012) além da durabilidade para grau I, ambientes rurais conforme literatura de concreto armado (NBR9778, 2009). Também foram efetuadas a análise da morfologia via MEV (microscópio eletrônica de varredura) e análise química das fases por difração de raios X. Os resultados mostraram que o compósito é viável para peças com fins não-estruturais, trazendo leveza, resistência e economia. Para peças estruturais há viabilidade mas o uso ainda restrito se deve à superfície vítrea, ponto crítico de resistência ainda não totalmente estudado e à norma NBR15116 (2004). Esta deficiência será sanada através de pesquisas futuras e aprovação técnica da ABNT.

Palavras-Chave: Reciclagem, Cerâmica, Concreto, Engenharia

ABSTRACT

Recycling of Building waste (concrete, beams, pillars, floors, earthenware, ironware, etc.) has been done a lot on Building, but only on wide urban areas by law enforcement (CONAMA, 2005; N° 12.305, 2010) but not accepted by all population yet. Many earthenware researches was and has been done on these practices such as those from Troian (2008), Cabral (2007), Campos (2012), Silva(2012), Oliveira/Silvestre (2012) and Silva(2014). This dissertation is an “earthenware” waste reusing studies, to promote its aggregates recycling to assemble into concrete with viable performance and following NBR5738 and NM67 brazilian engineering standards. Material was selected from construction wastes, crushed and sieved inner 1 and 2 rock measuring size numbers, and then addicted as aggregates in percentages (5%, 10%, 15% and 20%) of natural aggregates substitution, creating a final product proof bodies under ABNT standards procedures (NBR5738 and NM67). Further, under NBR5739 (2007), technical rules, proof-bodies was taken to compression and tensile tests, crushed after 14, 21 and 28 days of cure. It was found viable aggregates percentages of 5%,10% e 15% showing middle resistance behavior values of 27,1MPa, 26,9MPa e 27,5MPa respectively, which are within common engineering range (15 to 40MPa) (Botelho, 2012) and the grade I of durability (rural environments - NBR9778, 2009) as reported in armed concrete literature. It also was done microstructural analyses with MEV (electronic scanning microscope) and chemical phase analyses by X Ray diffraction. The obtained results pointed to a viable product to use in building non-structural concrete works due to its lightness, resistance and economic earnings. For structural purposes it has some real possibilities, but its use is not permitted yet because of NBR15116 (2004) and vitro surfaces which are critical resistance point restrictions. This fault will be resolved, by another new researches and ABNT technical approval.

Keywords: Recycle, Ceramic, Concrete, Engineering

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVO	22
3. JUSTIFICATIVA	23
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
4.1 MATERIAIS DO CONCRETO – HISTÓRIA E PROPRIEDADES	25
4.1.1 Agregados - Propósito e Uso	25
4.1.1.1 Areia	26
4.1.1.2 Cascalho ou Brita.....	27
4.1.2 Cimento - Sua Invenção e Propósito	27
4.1.3 Concreto – A Evolução do Cimento - Propósito e Características	28
4.2 AGREGADOS - CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO	29
4.2.1 Absorção de Água pelos Agregados.....	30
4.2.2 Difratomia dos Agregados	31
4.3 CONFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA DO CONCRETO	31
4.4 RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	33
4.5 DA ARGILA À CERÂMICA – ORIGEM, TRANSFORMAÇÃO E USO	36
4.6 CONCRETO COM USO DE RECICLADOS CERÂMICOS	37
4.6.1 Concreto com Reciclados Cerâmicos – Preparação e Dosagem	37
4.6.2 Concreto com Reciclados Cerâmicos – Conformação dos CPs	38
4.6.3 Concreto com Reciclado Cerâmicos – Ensaios Mecânicos	39
4.6.4 Compósito - Ensaios de Absorção - Índice de Vazios - MEV e DRX.....	40
4.7. CONCRETO COM RECICLADOS CERÂMICOS - RESULTADOS.....	41
5. MATERIAIS E MÉTODOS	44
5.1 ORGANOGRAMA DO PROJETO.....	44
5.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO	45
5.3 MATERIAIS	46
5.3.1 RCD de Revestimento Cerâmico	46
5.3.2 Cimento	46
5.3.3 Brita	48
5.3.4 Areia	48
5.3.5 Resumo dos Materiais utilizados	49
5.4. MÉTODOS.....	50
5.4.1 Propriedades do Concreto e sua Conformação	50
5.4.2 Morfologia Química da Argila.....	54
5.4.3 Morfologia Química do Revestimento Cerâmico.....	55

5.4.4 Procedimentos das Normas de Engenharia	56
5.4.4.1 Características das Fôrmas – NBR5738.....	56
5.4.4.2 Preparação dos Moldes	57
5.4.4.3 Mistura do Concreto e Moldagem dos Corpos de Prova	57
5.4.4.4 Adensamento.....	57
5.4.4.5 Método de Abatimento (<i>Slump</i> - NM67).....	58
5.4.4.6 Local de Armazenagem dos CPs.....	58
5.4.4.7 Lançamento na Câmara Úmida	59
5.4.4.8 Base dos CPs para Ensaio de Resistência Mecânica	59
5.4.4.9 Ensaio Mecânico - Rompimento a “n” dias de Cura	59
5.4.4.10 Índices de Absorção d’água e Vazios - Pesos Específicos.....	59
5.5 LABORATÓRIOS E EQUIPAMENTOS	61
5.5.1 Equipamentos de Moagem e Peneiramento	61
5.5.2 Equipamentos de Mistura e Dosagem do Concreto.....	63
5.5.3 Equipamentos para Conformação dos Corpos de Prova	64
5.5.3.1 Fôrmas para conformação dos Corpos de Prova (CPs)	64
5.5.3.2 Ferramental do Teste de <i>Slump</i> (Cone, Barra e Trena).....	64
5.5.3.3 Tanque para Cura e Saturação de Água dos CPs de Concreto	66
5.5.4 Equipamentos de Ensaio Mecânico	67
5.5.5 Equipamento para o Ensaio de Absorção de Água	67
5.6 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS DO COMPÓSITO.....	69
5.6.1 Moagem da Cerâmica.....	69
5.6.2 Peneiramento dos Materiais	70
5.6.2.1 Peneiramento da Cerâmica	70
5.6.2.2 Peneiramento da Brita	71
5.6.2.3 Peneiramento da Areia	72
5.6.3 Estimativa de Quantidade - Premissas - Traços do Compósito.....	73
5.7 CONFORMAÇÃO DOS CPs COM ADIÇÕES CERÂMICAS	75
5.7.1 Execuções dos Traços com Aditivo Cerâmico	80
5.8. ENSAIOS.....	81
5.8.1 Ensaio de Resistência à Compressão e à Tração	81
5.8.1.1 Ensaio de Resistência à Compressão (axial)	81
5.8.1.2 Ensaio de Resistência à Tração (diametral)	84
5.8.2 Pré-ensaios de Compressão do Compósito - Adições 10% e 20%	87
5.8.3 Ensaio Definitivos de Compressão e Tração do Compósito	88
5.8.3.1 Execução do Ensaio de Compressão Axial - Adição de 0%	88
5.8.3.2 Execução do Ensaio de Tração (Diametral) - Adição de 0%	88

5.8.3.3 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 5%.....	89
5.8.3.4 Ensaio de Compressão do Compósito a 5%.....	89
5.8.3.5 Ensaio de Tração do Compósito a 5%.....	90
5.8.3.6 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 10%.....	90
5.8.3.7 Ensaio de Compressão do Compósito a 10%.....	90
5.8.3.8 Ensaio de Tração do Compósito a 10%.....	90
5.8.3.9 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 15%.....	91
5.8.3.10 Ensaio de Compressão do Compósito a 15%.....	91
5.8.3.11 Ensaio de Tração do Compósito a 15%.....	92
5.8.3.12 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 20%.....	92
5.8.3.13 Ensaio de Compressão do Compósito a 20%.....	92
5.8.3.14 Ensaio de Tração do Compósito a 20%.....	93
5.9 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	94
5.9.1 Ensaio de Absorção de Água.....	94
5.9.2 Cálculo do Índice de Absorção de Água.....	96
5.9.3 Pesos Específicos e Índice de Porosidade ou de Vazios.....	96
5.9.4 Pesos Específicos dos CPs a Seco, Saturados de Água e Real.....	98
5.10 ANÁLISE MEV - CERÂMICA E COMPÓSITO.....	99
5.10.1 Análise MEV - Amostras de Cerâmica e de Compósito.....	100
5.11 ANÁLISE DRX - MATERIAIS E COMPÓSITO.....	101
5.12 CUSTOS DO CONCRETO CONVENCIONAL E ADITIVADO.....	103
5.12.1 Considerações sobre o Custo da Reciclagem de RCD Cerâmico.....	103
5.12.2 Memória de Cálculo do Custo do Concreto.....	103
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	107
6.1 RESULTADOS - PRÉ-ENSAIOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO... ..	107
6.2 RESULTADOS - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	108
6.2.1 Resultados da Adição de 0% de Cerâmica - Compressão (Axial):.....	108
6.2.2 Resultados da Adição de 5% de Cerâmica - Compressão (Axial).....	109
6.2.3 Resultados da Adição de 10% de Cerâmica - Compressão (Axial).....	111
6.2.4 Resultados da Adição de 15% de Cerâmica- Compressão (Axial).....	112
6.2.5 Resultados da Adição de 20% de Cerâmica - Compressão (Axial).....	113
6.2.6 Discussão dos Resultado da Resistência à Compressão (axial).....	114
6.2.7 Resultados da adição a 0% de Cerâmica – Tração (Diametral).....	120
6.2.8 Resultados da adição a 0% de Cerâmica – Tração (Diametral).....	120
6.2.9 Resultados da adição a 10% de Cerâmica – Tração (Diametral).....	120
6.2.10 Resultados da adição a 15% de Cerâmica – Tração (Diametral).....	121
6.2.11 Resultados da adição a 20% de Cerâmica – Tração (Diametral).....	121

6.2.12 Discussão dos Resultados da Resistência à Tração (Diametral)	122
6.3 RESULTADOS - ÍNDICE DE POROSIDADE (DURABILIDADE).....	123
6.3.1 Índice de Vazios das Adições Cerâmicas	131
6.3.2 Discussão dos Resultados do Ensaio de Absorção de Água	133
6.4 RESULTADOS - ANÁLISE MEV – MORFOLOGIA MATERIAIS	135
6.4.1 Resultados do MEV - Revestimento Cerâmico.....	135
6.4.2 Resultados - MEV - Compósito de Concreto	138
6.4.2.1 Amostras de Compósito à 5% - Interface Cerâmica x Concreto.....	138
6.4.2.2 Amostras de Compósito à 5% - Interface Brita x Concreto.....	140
6.4.2.3 Amostras de Compósito à 10% - Interface Cerâmica x Concreto.....	141
6.4.2.4 Amostras de Compósito 10% - Interface Brita x Concreto.....	142
6.4.2.5 Amostras de Compósito à 15% - Interface Cerâmica x Concreto.....	143
6.4.2.6 Amostras de Compósito à 15% - Interface Brita x Concreto.....	144
6.4.3 Discussão dos Resultados do MEV - Cerâmica e Compósito	145
6.5 RESULTADOS - ANÁLISES DRX - MATERIAIS E COMPÓSITO.....	148
6.5.1 Resultados e Discussão – Análise DRX da Cerâmica	148
6.5.2 Resultados e Discussão – Análise DRX da Areia.....	149
6.5.3 Resultados e Discussão – Análise DRX da Brita	150
6.5.4 Resultados e Discussão – Análise DRX do Cimento	151
6.5.5 Resultados e Discussão – Análise DRX do Compósito Final	153
7. CONCLUSÕES FINAIS	155
8. PESQUISAS FUTURAS	157
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	158
GLOSSÁRIO	162
ANEXO 1- EFICIÊNCIA DE ENSAIO	164
ANEXO 2- GRAUS DE EFICIÊNCIA DE ENSAIO.....	165
ANEXO 3- ORÇAMENTO DOS MATERIAIS DO COMPÓSITO	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma do Projeto.....	44
Figura 2 - Fluxo de trabalho	45
Figura 3 - Estrutura do Aço(2a) à esquerda e Concreto(2b) à direita.....	51
Figura 4 - Reação formadora do Concreto por aglutinação	52
Figura 5 - Teste de <i>Slump</i>	58
Figura 6 - Teoria do Cálculo no Ensaio de Compressão Axial.	82
Figura 7 - Teoria do ensaio de Tração (compressão Diametral)	85
Figura 8 - Fluxo do Ensaio de Absorção de Água	94
Figura 9 - Esquema técnico do dispositivo de balança para hidrostática	97
Figura 10 - Aplicações do Compósito em peças Não-Estruturais	119
Figura 11 - Estrutura molecular do Silicatos.....	154
Figura 12 - Treliça de Cargas Pesadas	154
Figura 13 - Folha de Orçamento dos Materiais do Compósito	166

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Agregado Graúdo de RCD Cerâmico fragmentado.....	46
Fotografia 2 - Cimento <i>Portland</i> CP III - 40 RS	47
Fotografia 3 - Britas (1 e 2) utilizadas no compósito	48
Fotografia 4 - Areia média (granulometria Ø2mm).....	48
Fotografia 5 - Cavadeira de ferro para moagem do Revestimento cerâmico	61
Fotografia 6 - Cadinho para moagem do Revestimento Cerâmico.....	61
Fotografia 7 - Granulômetro marca Helvan modelo DM.....	62
Fotografia 8 - Granulômetro marca Manupen de alta capacidade	62
Fotografia 9 - Peneiras marca Soloteste Ø: 9.5mm e 19mm.....	63
Fotografia 10 - Betoneira marca Menegotti modelo 150 litros.....	63
Fotografia 11 - Becker graduado marca Científica para medição da água.	63
Fotografia 12 - Formas Soloteste - Cilíndricas base Ø10cm x altura 20cm	64
Fotografia 13 - Cone e Prancha de Aço para o Teste de <i>Slump</i>	65
Fotografia 14 - Barra de aço (60cm x Ø1,5cm)	65
Fotografia 15 - Trena para medição do abatimento	66
Fotografia 16 - Tanque de Cura e Saturação de Água (Câmara úmida).....	66
Fotografia 17 - Prensa EMIC T1000 – Capacidade: 100MPa	67
Fotografia 18 - Estufa Odontobrás - Secagem de CPs à 105°C	68
Fotografia 19 - Balanças de precisão (a) e (b) para pesagem dos CPs.....	68
Fotografia 20 - Rejeitos de Cerâmica de Revestimento	69
Fotografia 21 - Cerâmica após moagem sem peneiramento	69
Fotografia 22 - Peneiramento da Cerâmica no granulômetro Manupen.....	70
Fotografia 23 - Conferência do Peneiramento (granulometria)	70
Fotografia 24 - Cerâmica já peneirada (Ø9,5mm a Ø19,0mm)	71
Fotografia 25 - Peneiramento da Brita 1 e 2 no Granulômetro Manupen.....	71
Fotografia 26 - Peneiramento preliminar - remoção de Impurezas da areia	72
Fotografia 27 - Peneiramento da Areia – Granulometria Ø2mm	72
Fotografia 28 – Revestimento dos Moldes com Óleo.....	76
Fotografia 29 - Mistura do concreto na betoneira.....	76
Fotografia 30 - Controle do a/c (adição de Água) com Becker graduado.....	77
Fotografia 31- Teste de <i>Slump</i> - Aferição do abatimento	77
Fotografia 32 - Envasamento e Compactação do Concreto nos Moldes	78
Fotografia 33 - a) CPs conformados b) Desmoldagem	79
Fotografia 34 - CPs imersos em Tanque d'água, após 24 de Cura.....	79
Fotografia 35 - Preparação da Prensa EMIC para Ensaio de Compressão	81
Fotografia 36 - Registro de dados do ensaio de compressão no Painel Digital	83
Fotografia 37 - Seqüência de Rompimento - Ensaio de Compressão Axial.....	84
Fotografia 38 - Identificação do CP no Painel - Ensaio de Tração	85
Fotografia 39 - Placas da prensa comprimindo no CP - Ensaio de Tração.....	86
Fotografia 40 - Seqüência de Rompimento - Ensaio de Tração (Diametral)	86
Fotografia 41 - Seqüência de Rompimento do Pré-ensaio de Compressão Axial.....	87
Fotografia 42 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)	88
Fotografia 43 - Seqüência (a),(b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)	89
Fotografia 44 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (axial).....	89
Fotografia 45 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)	90
Fotografia 46 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral).....	91

Fotografia 47 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)	91
Fotografia 48 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)	92
Fotografia 49 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)	93
Fotografia 50 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)	93
Fotografia 51 - CPs em Estufa para secagem.....	95
Fotografia 52 - CPs pesados conforme programação.....	95
Fotografia 53 - Balança de Precisão alterada para Hidrostática	96
Fotografia 54 - Serra mármore com disco de corte	99
Fotografia 55 - Pastilhas de amostra do compósito para análise MEV	99
Fotografia 56 - Microscópio Eletrônico de Varredura	100
Fotografia 57 - Difratômetro XRD6100 - Frente(a) e goniômetro (b).....	101
Fotografia 58 - Preparação de pastilhas do compósito	101
Fotografia 59 - Seqüência de preparação pó de compósito	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resistências à Compressão axial - 0% de Cerâmica	109
Gráfico 2 - Resistências à Compressão axial - 5% de cerâmica	110
Gráfico 3 - Resistências à Compressão axial - 10% de cerâmica	111
Gráfico 4 - Resistências à Compressão axial - 15% de cerâmica	112
Gráfico 5 - Resistências à Compressão axial - 20% de Cerâmica	114
Gráfico 6 - Resumo das Tensões Médias à Compressão (axial)	115
Gráfico 7 - Homogeneidade das Resistências Características.....	117
Gráfico 8 - Saturação de H ₂ O - Adição 0%	123
Gráfico 9 - Saturação de H ₂ O - Adição 5%	124
Gráfico 10 - Saturação de H ₂ O - Adição 10%	125
Gráfico 11 - Saturação de H ₂ O - Adição 15%	126
Gráfico 12 - Saturação de H ₂ O - Adição 20%	127
Gráfico 13 - Resumo das Pesagens do Ensaio Absorção de Água	128
Gráfico 14 - Diferenças dos Pesos Específicos dos CPs	130
Gráfico 15 - Índice de vazios (obtido e ajustado)	132
Gráfico 16 - Difratoograma da Cerâmica utilizado no Compósito.....	148
Gráfico 17 - Difratoograma da Areia média utilizada.....	149
Gráfico 18 - Difratoograma da Brita utilizada.....	150
Gráfico 19 - Difratoograma do Cimento - Amostra 1	151
Gráfico 20 - Difratoograma do Cimento - Amostra 2	152
Gráfico 21 - Difratoograma 0° a 45° do - Compósito Final	153
Gráfico 22 - Difratoograma 45° a 80° do Compósito Final.....	154

LISTA DE MICROGRAFIAS

Micrografia 1 - Cerâmica, amostra 1, imagens de (a) até (h)	135
Micrografia 2 - Cerâmica, amostra 2, imagens de (a) até (h)	137
Micrografia 3 - Amostra 5% Concreto x Cerâmica, ampliações de (a) até (f).....	139
Micrografia 4 - Amostra 5% Concreto x Brita - ampliações de (a) até (f)	140
Micrografia 5 - Amostra 10% Concreto x Cerâmica, ampliações de (a) até (f).....	141
Micrografia 6 - Amostra 10% Concreto x Brita - ampliações de (a) até (f))	142
Micrografia 7 - Amostra 15% Concreto x Cerâmica, ampliações de (a) até (f).....	143
Micrografia 8 - Amostra 15% Concreto x Brita - ampliações de (a) até (f)	144
Micrografia 9 - Amostra 20% Concreto x Cerâmica - ampliações de (a) e (b)	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes dos Cimentos <i>Portland</i>	47
Tabela 2 - Lista de Materiais para confecção do Compósito.....	49
Tabela 3 - Composição Química Básica do Cimento <i>Portland</i>	50
Tabela 4 - Componentes Comuns Constituintes do Concreto.....	51
Tabela 5 - Traço e consumo (litros) para 1m ³ de Concreto.....	53
Tabela 6 - Elementos Constituintes da Cerâmica	55
Tabela 7 - Percentuais de componentes na fabricação das cerâmicas	56
Tabela 8 - Estimativa de Quantidade de CPs por Traço a produzir	73
Tabela 9 - Estimativa de Quantidade mínima total de CPs a produzir	73
Tabela 10 - Premissas para Composição do Compósito	74
Tabela 11 - Proporção Teórica pretendida do Traço para as Adições	74
Tabela 12 - Proporções reais produzidas do Compósito (volume em L=Litros)	80
Tabela 13 - Consumo e Custo do Concreto Convencional	104
Tabela 14 - Custo do Cimento.....	104
Tabela 15 - Custo dos Agregados Convencionais	104
Tabela 16 - Custo de obtenção do Agregado Cerâmico	105
Tabela 17 - Consumo e Custo de Materiais do Concreto Aditivado	105
Tabela 18 - Economia com RCD Cerâmico - Custos Totais e Percentuais.....	106
Tabela 19 - Dados ensaio Compressão axial - 0% aditivo cerâmico.....	109
Tabela 20 - Dados ensaio Compressão axial - 5% aditivo cerâmico.....	110
Tabela 21 - Dados ensaio Compressão axial - 10% aditivo cerâmico.....	111
Tabela 22 - Dados ensaio Compressão - 15% aditivo cerâmico.....	112
Tabela 23 - Dados ensaio Compressão axial - 20% aditivo cerâmico.....	113
Tabela 24 - Valores significativos de Adição Cerâmica.....	116
Tabela 25 - Estatística da Homogeneidade dos Fck.....	117
Tabela 26 - Dados da Resistência à Tração - 0% Cerâmico.....	120
Tabela 27 - Dados da Resistência à Tração - 5% Cerâmico.....	120
Tabela 28 - Dados da resistência à tração - 10% cerâmico	121
Tabela 29 - Dados da resistência à tração - 15% cerâmico	121
Tabela 30 - Dados da resistência à tração - 20% cerâmico	121
Tabela 31 - Saturação de Água na adição de 0% de Cerâmica.....	123
Tabela 32 - Saturação de Água na adição de 5% de Cerâmica.....	124
Tabela 33 - Saturação de Água na adição de 10% de Cerâmica.....	125
Tabela 34 - Saturação de Água na adição de 15% de Cerâmica.....	126
Tabela 35 - Saturação de Água na adição de 20% de cerâmica.....	127
Tabela 36 - Resumo das Pesagens (Seca - Saturada - Hidrostática)	128
Tabela 37 - Pesos específicos médios dos CPs	129
Tabela 38 - Diferença dos Pesos Específicos entre 0% e demais Adições	129
Tabela 39 - Índices Médios de Absorção Água e de Vazios	131
Tabela 40 - Classificação dos Índices de Vazios	131
Tabela 41 - Faixas de Acréscimo ao Iv - Fator Idade.....	132
Tabela 42 - Classificação dos Iv após aplicação do Fator Idade	132
Tabela 43 - Eficiência dos Ensaio	164
Tabela 44 - Graus de Eficiência de Ensaio	165
Tabela 45 - Graus de Eficiência de Ensaio (Estatística).....	165

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- \emptyset = Diâmetro – Símbolo que representa a medida do diâmetro da uma circunferência.
- \approx = Aproximação – É adicionado à esquerda do valor de uma medida física (numérica, função matemática ou dimensão) para representar que o mesmo é inexato mas por ser muito próximo do real, ainda é válida sua aplicação.
- σ = Desvio Padrão (Letra *sigma* do alfabeto grego).
- a/c** = Fator água/cimento – Razão entre o volume de água e o volume de cimento, de uma dosagem ou traço de concreto, que permite controlar a resistência característica (F_{ck}) e a durabilidade do concreto (BOTELHO, 2012).
- Abs.** = Absorção de Água.
- ABNT** = Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ARI** = Alta Resistência Inicial – Uma das categorias de cimento *Portland*.
- CP** = 1. Corpo de prova, objeto de pesquisa feito de uma substância, que passará por testes (ensaios) na engenharia, estes podendo ser destrutivos ou não, gerando resultados para confirmar ou refutar teorias sobre o mesmo. 2. Concreto *Portland* (possui categorias que podem ser vistas na Tabela 1).
- dd** = Dias de Data – Definição ortográfica de dias transcorridos em relação a uma data de referência. No caso deste trabalho, a sigla “dd” significa dias de cura.
- Eng.^a** = Engenharia.
- Desv.** = Desvio.
- DRX** = Difratômetro de raios X – Equipamento para análise da composição química dos componentes de uma porção de matéria.
- F_c** = Resistência característica do concreto (BOTELHO, 2012).
- F_{ck}** = Resistência característica do concreto a compressão depois dd de cura (F=Resistência; c=compressão; k=característica) (BOTELHO, 2012).
- F_{cd}** = Resistência de cálculo do concreto - Corresponde à resistência característica do concreto (F_{ck}) dividida pelo fator de segurança (γ_c). É usado na engenharia para cálculos de edificações (BOTELHO, 2012).
- F_{cj}** = Resistência característica do concreto em “j” dias de cura (Ex.: $F_{c28} = F_{ck}$ à 28 dias de cura) (BOTELHO, 2012).
- Fig.** = Figura.

- F_{tk}** = Resistência característica do concreto à tração depois de curado (F=Resistência; t=tração; k=característica) (BOTELHO, 2012).
- g** = Grama – Unidade de quantidade de massa de um corpo, definida no SI - Sistema Internacional de Unidades, usada em cálculos de Física e Engenharias (GIECK, 1976).
- h** = Hora – Unidade de tempo equivalente a 60min (sessenta minutos) utilizada em cálculos da Matemática, Física e Engenharias.
- I_v** = Índice de Vazios – Permite a classificar a durabilidade do concreto e é obtido através do ensaio de absorção de água.
- JCPDS** = Joint Committee on Powder Diffraction Standard.
- kg** = Quilograma – Unidade de quantidade de massa de um corpo, definida no SI - Sistema Internacional de Unidades, utilizado em cálculos na Física e Engenharias, equivalente à 1.000g (mil gramas) (GIECK, 1976).
- kgf** = Quilograma força - Unidade de intensidade de força ou peso, definida no SI - Sistema Internacional de Unidades, usada em cálculos de Física e Engenharia, equivalente à 1kg m/s².
- kN** = Quilo Newton – Unidade de Pressão chamada de “quilo Newton” equivalente a 100kgf no SI - Sistema Internacional de Unidades, usada em cálculos de Física e Engenharia (ver também “N”) (BOTELHO, 2012; RAMALHO, 1993).
- MEV** = Microscópio Eletrônica de Varredura – Equipamento eletrônico que usa tecnologia de feixe de elétrons secundários, capaz de aumentar uma Imagem “x” vezes (magnitudes) a visão humana, permitindo ampliação microscópica de superfícies de materiais, para análise morfológica e estrutural.
- MPa** = Mega Pascal – Unidade de Intensidade de força, pressão ou tensão (em esforços de compressão ou tração) do SI - Sistema Internacional de Unidades, usada em cálculos de Física e Engenharia, equivale a 1.000kN/m².(mil quilo Newton por metro quadrado) (BOTELHO, 2012).
- N** = Newton – Unidade de intensidade de força ou pressão, do “SI - Sistema Internacional de Unidades”, usada em cálculos de Física e Engenharia, equivalente ao “peso” de um corpo com massa de 0,1kg multiplicado pela “aceleração da gravidade” (símbolo “g”) de ≈9,8m/s². 1N equivale então a ≈0,1kgf (um décimo de quilograma força, kgf). Sigla foi adotada em homenagem ao grande cientista inglês, Sir Isaac Newton (1642-1727) dadas às suas grandes contribuições à Matemática e à Física dentre elas, as “Três

Leis do Movimento”, “Lei da Gravidade” e o “Cálculo Diferencial” (RESNICK/HALLIDAY, 1976; RAMALHO,1993).

NBR = Norma Brasileira – Prefixo que precede os números das Normas ABNT.

Pa = Pascal – Unidade de Pressão ou Tensão (em esforços de compressão ou tração) equivalente a 1 N/m^2 ou $0,1 \text{ kgf/m}^2$. Sigla foi adotada em homenagem ao grande cientista francês Blaise Pascal (1623-1662) por suas contribuições à Matemática e à Física (RESNICK/HALLIDAY, 1976; RAMALHO,1993).

Qt. = Quantidade.

RCD = Rejeitos de Construção e Demolição – Corresponde às sobras e descartes de materiais inservíveis da construção civil (SENAI, 2005).

Ref. = Referencial – Adj. 1. Aquilo que constitui. 2. Que se utiliza como referência para comparação de alguma coisa (XIMENES, 1999).

SAAE = Serviço Autônomo de Água e Esgoto.

Sat. = Saturado em água.

SubHidro.= Pesagem submersa em balança hidrostática.

Sec. = Seco

SENAI = Serviço Nacional da Indústria

Sub. = Submerso

t = Tonelada – Unidade de quantidade de massa de um corpo, definida no SI - Sistema Internacional de Unidades, utilizado em cálculos na Física e Engenharias, equivalente à 1.000kgf (mil quilogramas força) (GIECK, 1976).

γ_c = (*Gama c*) Fator de segurança (coeficiente de minoração) do concreto – Usado nos cálculos de estruturas de concreto, para supor sua resistência menor do que ela realmente é, visando compensar possíveis erros ocorridos nos ensaios mecânicos, em favor da segurança física das obras civis (RAMALHO, 1993).

1. INTRODUÇÃO

Grande volume de rejeitos de construção e demolição (RCD) têm sido gerados há anos nas áreas metropolitanas, em quantidades impactantes e preocupantes. Segundo levantamentos em trabalhos efetuados (SENAI 2005; Cabral, 2009; Campos, 2012) estimativas apontam para rejeitos da ordem de 372 mil t/mês (São Paulo) e 27 mil t/mês (Rio de Janeiro) entre outros centros urbanos de expressão (PORTO, 2008).

A falta de uma destinação correta dos RCDs vem provocando impactos ambientais físicos e biológicos, através de contaminantes inclusos nestes, que podem provocar doenças, prejudicar o solo e rios, enfim, a natureza e a população.

Muitos tipos de reaproveitamento de RCDs (concreto, alvenaria, areia e argamassa, materiais plásticos) já vêm sendo feitos na construção civil, uma vez que já existem empresas especializadas nessas reciclagens. Isto deve ser elogiado pois é um ótimo início de sustentabilidade e serve de exemplo, faltando apenas para a população adotar este tipo de reciclagem.

Vários trabalhos na área de RCDs, inclusive com os cerâmicos, já vêm sendo produzidos por outros profissionais nesta mesma linha, como os de Troian (2008), Cabral (2009), Silva (2012) e Oliveira (2012) assim como diversos debates e congressos sobre reciclagem na construção, por exemplo SENAI,(2005), Naime (2008) e Porto (2008). Inclusive, já há algum tempo, foram criados mecanismos públicos tais a Resolução CONAMA 307 (2014) e a Lei Nº 12.305 (2010) que regulamentam a reciclagem.

Estimativas (Cabral, 2007) apontam para um desperdício de cerâmica de pisos e revestimentos nas obras, na faixa de 12% à 22%. Isto deu ensejo para construção desta dissertação, optando pela “cerâmica de revestimento”, que foca na reciclagem em potencial, deste relevante rejeito. A cerâmica apresenta consistência rígida, podendo substituir parcialmente a brita como agregado graúdo ou miúdo, permitindo conformar um compósito de concreto, aplicável para confecção de peças de estruturas passivas e talvez em ativas. Os resultados dos ensaios mecânicos e de durabilidade, poderão recomendar o uso do compósito, ajudando a promover ainda mais o reaproveitamento dos RCDs cerâmicos na construção civil.

2. OBJETIVO

Objetiva-se neste trabalho, o desenvolvimento e caracterização de um compósito confeccionado de concreto com adições de agregados de cerâmica provenientes de rejeitos de obras civis (RCD) com viabilidade compatível com as do concreto sem adições. Para alcançar este objetivo, utilizou-se as técnicas de engenharia normatizadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a Ciência dos Materiais, para desenvolver um concreto com substituição parcial da brita natural, por adições percentuais (5%, 10%, 15%, 20%) de agregados graúdos de RCDs de revestimentos cerâmicos (classe A, conforme Resolução CONAMA 307, 2014) obtendo vantagens técnico econômicas para utilização pela construção civil (SENAI, 2005). Os resultados obtidos indicarão se o compósito investigado terá resistência mecânica e durabilidade dentro das premissas arbitradas dentro da faixa padrão de Engenharia, e também em caso de sucesso, estabelecer os tipos de aplicações e em que condições o produto poderá ser empregado. A viabilidade deste compósito estabelecerá mais uma opção de material, agregando valor aos RCDs para obras civis, ajudando a promover a reciclagem, desafogando aterros e despejos, reduzindo os impactos ambientais, além de fomentar uma engenharia ecologicamente correta.

3. JUSTIFICATIVA

Seriam desnecessárias justificativas para o uso de reciclagem, pois não se pode mais viver no planeta sem a consciência do hábito da reciclagem, uma vez que a população do planeta é cada vez maior, ocupa mais espaços na superfície e consome voraz e progressivamente os recursos da crosta.

A humanidade encontra-se às portas de uma nova era, onde é preciso repensar a utilização dos recursos naturais da Terra, ainda tratados como infinitos, gerando uma tremenda responsabilidade para a qual, a sociedade ainda não se conscientizou. Há urgência na aplicação da reciclagem de materiais em qualquer área atualmente, a fim de minimizar os impactos ambientais causados pelos RCDs (resíduos de construção e demolição) dando a eles um destino ecologicamente correto e reduzindo o esgotamento dos recursos da natureza (OLIVEIRA, 2009).

Os recursos naturais como jazidas de minerais, já estão se esaurindo, o que nos levará a duas alternativas, continuar com o extrativismo de esgotamento destruindo a crosta por completo e gerando mais impacto ambiental na extração cada vez mais predatória de materiais, ou, criar uma logística responsável de reaproveitamento dos materiais já extraídos e descartados como lixo, promovendo sua re-moldagem e reutilização na construção civil e na indústria de transformação. Todo tipo de reciclagem e reuso, deve ser estimulado, principalmente na construção civil, que anualmente gera uma quantidade enorme de rejeitos.

Atualmente, a reciclagem de RCDs de obras civis, tais como concreto, pisos, alvenaria, ferragem e tantos outros, já vêm sendo empregada na própria construção civil, mas apenas nos grandes centros por força de normas (Resolução 307 - CONAMA, 2014; NBR15116, 2004) e lei brasileira (Nº 12305, 2010) mas ainda não adotada amplamente nas obras de pequeno porte, pela população.

Não se sabe ainda com exatidão, o impacto ambiental e, principalmente, como anda o esgotamento dos recursos naturais dos materiais utilizados na construção civil, tais como jazidas de quartzo de leito de rio (areia) de granito ou basalto (brita) de calcário (matéria-prima do cimento) e a própria água, a qual vem esgotando sua disponibilidade em uma escala jamais vista.

Estimativas obtidas em diversos trabalhos e artigos (SENAI, 2005; Cabral, 2009) apontam por exemplo, que de 20% a 50% do lixo gerado pela população mundial é proveniente da construção civil. Isto revela dados mundiais alarmantes de

descarte da ordem de centenas de toneladas por ano por habitante (SENAI, 2005).

Segundo John (SENAI, 2005) a indústria de construção gera 50% das emissões mundiais de CO₂ e quase 50% dos RCDs produzidos no mundo.

Até mesmo o ar puro e a água já estão se tornando recursos escassos atualmente. Além do que, o concreto é feito com boa parte de água, assim, quanto mais se construir sem RCD, haverá mais água tratada confinada e menos dela disponível. Ao se reciclar materiais de construção, também se recicla água.

Muitos materiais da construção civil também usam subprodutos do petróleo (óleos, tintas, aditivos, plásticos) que é sabido ser finito e não renovável na natureza. Usado também e, principalmente, na queima como combustível, a sociedade devora sem renovação, as jazidas atuais numa velocidade muito maior que a da fabricação de bens que são renováveis. Sem mudar esta cultura equivocada, em futuro próximo, a humanidade poderá estar selando o fim do seu meio de vida moderno, pois não mais haverá matéria prima barata para fabricação dos bens derivados de petróleo, quando então, as indústrias e laboratórios terão que primeiro construir os aromáticos e polímeros químicos, para depois refiná-los em processo mais complexo, podendo tornar inviável ou muito caro o custo de vida futuro.

Uma população planetária crescente, consumirá cada vez mais recursos naturais. O reaproveitamento responsável e planejado de rejeitos oriundos de RCDs, promoverá a sustentabilidade principalmente na construção civil com a redução dos impactos ambientais a níveis adequados e mínimos.

A missão dos engenheiros e biólogos, é mudar nosso meio de vida para o consumo auto-sustentável, objetivando ou se aproximando dos 100% da reciclagem e reuso dos materiais. Caso contrário, as populações não mais conseguirão se manter no planeta, já que a destruição irreparável da crosta terrestre, poderá determinar o colapso das sociedades.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica foi separada em tópicos relacionados ao estudo que se desenrolou para execução deste projeto:

- 4.1) Materiais do concreto – história e propriedades
- 4.2) Agregados – caracterização e preparação
- 4.3) Conformação e resistência do concreto
- 4.4) Reciclagem na construção civil
- 4.5) Da argila à cerâmica – origem, transformação e uso
- 4.6) Concreto com reciclados cerâmicos – ensaios
- 4.7) Concreto com reciclados cerâmicos – resultados

4.1 MATERIAIS DO CONCRETO – HISTÓRIA E PROPRIEDADES

4.1.1 Agregados - Propósito e Uso

As rochas foram os primeiros materiais de construção usados pelas civilizações mais antigas e ainda utilizados até hoje em certos tipos de construção.

As rochas primitivas são de origem magmática, formadas pela solidificação da lava proveniente do magma das profundezas terrestres. A atividade vulcânica então, forma as rochas classificadas como magmáticas ou ígneas (POPP, 2012).

Segundo descreve Popp (2012) as rochas ígneas são identificadas pelas suas características que são a dureza, justaposição dos cristais constituintes, não apresentam faixas ou camadas, são maciças com granulação média a grossa, acinzentadas, com pouca ou nenhuma clivagem, a estrutura é cristalina vítrea e ou vesicular, não possuem inclusão de fósseis e contem minerais do tipo feldspato.

Já as rochas sedimentares são oriundas da alteração física ou química das rochas magmáticas. Muitas dessas rochas, após sofrerem a ação de movimentos tectônicos, das intempéries hídricas, eólicas e atmosféricas, deram origem às rochas sedimentares e metamórficas. As rochas sedimentares foram formadas principalmente pelo fenômeno denominado “transporte”, que é a erosão dos solos. Seus fragmentos foram acumulados em diversas áreas de menor topografia, devido principalmente às forças associadas à água e à gravidade, em diversas regiões da

crosta (WICANDER, 2009; POPP, 2012).

Estes fragmentos, na engenharia chamados de agregados, foram e ainda são, convenientes para o uso na construções feitas pelas civilizações do planeta.

Quatro deles, são basicamente a matéria prima natural para as construções humanas, a rocha (maciça ou em pedregulhos ou brita) a areia, o silte e a argila. Praticamente, as rochas e os solos do tipo sedimentares cobrem cerca de 75% da superfície terrestre e a maior parte dos assoalhos oceânicos. A classificação destes quatro elementos baseia-se em suas granulometrias (WICANDER, 2009).

Segundo Popp (2012) há outros tipos de solos sedimentares, cuja formação química, os classifica em “clásticos” e “precipitados químicos” que são os da base dos “carbonáticos”, que são usados para produzir outro material, talvez o mais importante, sendo o quinto material fundamental da construção, o cimento.

4.1.1.1 Areia

As areias são apenas rochas sedimentares fragmentadas até a granulometria entre e 0,06mm à 2mm. São oriundas de jazidas de arenito, rocha sedimentar de qualquer mineral, os quais sofreram a ação da erosão pela água (do mar ou das geleiras) ou pela ação do vento, através do fenômeno designado pela geologia como “transporte” (WICANDER, 2009).

A água é o elemento mais ativo de causa das erosões, pois sob a ação da gravidade atuando sobre os solos com relevo apropriado, geram a maioria dos sedimentos que irão formar os areais, ou também, novas rochas sedimentares em bacias aluviais ou marítimas. O relevo tem importância fundamental na formação das areias, geralmente encontradas em bacias de baixa topografia. Algumas areias possuem cerca de 25% de feldspato, outro mineral que pode compor as areias, mas as mais comuns são formadas quase que totalmente por quartzo (SiO_2) e outros minerais em quantidades menores (WICANDER, 2009).

A areia comum para obras é a de leito de rios, acumulada há séculos, e sua função na argamassa de concreto é a de “agregado miúdo”, cuja função é preencher os espaços vazios entre a brita (agregado graúdo) contribuindo para a resistência do concreto (BOTELHO, 2012).

4.1.1.2 Cascalho ou Brita

Britas são apenas rochas fragmentadas, fabricadas através do processo de moagem em granulometrias com vários diâmetros, dependendo da aplicação.

A brita funciona como “agregado graúdo”, conferindo a resistência e solidez ao concreto. Dentre as diversas procedências geológicas, as britas mais utilizadas são aquelas oriundas das rochas de “granito” e “basalto”, cujas tensões de ruptura variam de 80MPa a 200MPa, respectivamente (POPP, 2012; BOTELHO, 2012).

Segundo Popp (2012) dentre estas duas famílias de rochas, a mais usada na nossa região sudeste é a brita de granito. O granito cinzento, é encontrado em maciços rochosos chamados batólitos, podendo apresentar outras cores diversas mas sempre com a combinação de quartzo e feldspato alcalino. A presença de extratos de mica, revela a brita característica da construção civil (POPP, 2012).

Na confecção de concreto armado, a engenharia utiliza o maior diâmetro de brita capaz de perpassar entre as ferragens e não exceder a geometria das fôrmas. A resistência do concreto torna-se maior quanto maior for o diâmetro da brita. Os diâmetros de brita mais utilizados são a brita 1 (0,5 a 19mm) e brita 2 (19mm a 38mm) (BOTELHO, 2012).

4.1.2 Cimento - Sua Invenção e Propósito

Conforme estudos, o cimento é uma grande invenção que data da era antiga. Vários povos experimentaram cimentos rudimentares, como a cal calcinada. Há indícios de que os Egípcios já usavam versões de cal e gesso calcinados formando uma argamassa rudimentar mas eficiente nas construções das pirâmides para calafetar e dar acabamento (CARVALHO, 2008).

Um dos componentes mais importantes do concreto é o cimento, do grego “*caementum*”, que foi desenvolvida durante a história greco-romana. Historicamente, os gregos e romanos foram os primeiros a usar uma versão natural deste material conhecida por “*pozzolana*”, do latim *Pozzoli*, à base de rocha vulcânica queimada (CARVALHO, 2008).

Os romanos aperfeiçoaram o *caementum*, misturando a *pozzolana* à cal e, após hidratada esta mistura, era moldável e tornava-se material rígido, sendo

utilizado amplamente em muitas construções romanas, de todo tipo e tamanho, inclusive na confecção de estradas. Sendo material de tão boa qualidade que ajudou a manter resquícios de muitas obras até a era atual, muitas delas em razoável estado de conservação. Da mistura endurecida de argamassa pozzolânica e cal, o novo material foi batizado de “*concretum*” (CARVALHO, 2008).

Estes povos usavam o *concretum* mais para unir pedras, vedar junções de rochas e fabricar pisos e acabamentos do que propriamente conformar estruturas de construções em concreto sólido, pois ainda confiavam mais nas rochas. Isto se deve ao fato, de que na época antiga, não havia ciência técnica experimentada suficiente para que se pudesse confiar neste material não lhes ocorrendo a descoberta (*insight*) de produzir em escala e utilizá-lo para construir estruturas, muito menos o concreto armado. Esta descoberta ocorreria a partir do século XVIII, após a era do “Renascimento” (CARVALHO, 2008).

4.1.3 Concreto – A Evolução do Cimento - Propósito e Características

Segundo Carvalho (2008) a partir do século XVIII, alguns pesquisadores voltaram a testar outras formas de se fabricar “rocha artificial”, resgatando a fórmula original dos romanos. O engenheiro John Smeaton pesquisou uma mistura de “cimento hidráulico” com argila, obtendo eficiência superior a dos romanos. Em 1791, Parker patenteou o “cimento romano” que passou a ser muito utilizado. Em 1806, Vicat criou o “cimento artificial”, uma mistura de calcário e argila calcinados, que também passou a ser bastante empregado (CARVALHO, 2008).

Em 1824, Joseph Aspdin efetuou a moagem até pó fino, de amostras de calcário com argila calcinados. Este pó, após ser hidratado e posterior secagem, tornava-se rígido tal como uma rocha. Material era íntegro, mesmo na presença ou imerso em água, o que lhe deu uma patente chamada cimento do tipo *Portland*, em alusão às características das rochas da ilha de *Portland*, pertencente à Grã-Bretanha (CARVALHO, 2008).

Os Primeiros cimentos eram usados em argamassas, para vedações, pavimentações e construções simples sem muitos esforços. Em 1849, Louis Lambot, inventou uma maneira de construir tanques usando a combinação de malhas de ferro encapadas com concreto, dando origem ao cimento armado (atualmente

chamado de concreto armado). Em 1878, Joseph Monier vê nesta combinação uma oportunidade de negócio e, através de técnicas experimentais, consegue produzir tanques maiores, vigas de concreto e até pontes de cimento armado, obtendo bons resultados que logo foram aceitos em obras dentro das cidades (CARVALHO, 2008).

Fonseca (2010) estudando sobre a reação de formação do concreto, constata que seus componentes contêm elevada energia interna armazenada em suas partículas, por terem sido formados em fornos de alta temperatura e assim se tornam instáveis. O cimento fica altamente reativo, e em contato com hidratos, gera uma reação do tipo exotérmica, combinando-se com a água para se reequilibrar em menor nível de energia, liberando-a em forma de calor para o ambiente (FONSECA, 2010).

A liberação de calor pelo concreto, segundo trabalho de Fonseca (2010) tem relação direta com a durabilidade do mesmo contra a fissuração por calor. Peças de concretos com cimento comum, podem perder resistência se não utilizarem aditivos que evitem a “micro-fissuração” por resfriamento. Com aditivos, pode ocorrer o aumento da resistência, pois o calor da reação do concreto, acelera também a reação dos aditivos como por exemplo a pozzolana (FONSECA, 2010).

4.2 AGREGADOS - CARCATERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO

Cabral (2007) caracterizou o agregado graúdo utilizado em seu projeto. Utilizou brita basáltica como agregado natural e adicionados de brita de tijolos de cerâmica vermelha (RCDs de aterros e de olarias) além de corpos de prova de concreto moído, com idade maior que 2 anos. Efetuou peneiramento do agregado cerâmico usando material retido entre as peneiras Ø4,8mm e Ø19mm.

Cabral (2007) efetuou o controle da granulometria apenas para o agregado miúdo para que pudesse potencializar a obtenção de concreto com a máxima resistência possível. Cabral (2007) investigou problemas relativos a geometria dos agregados cerâmicos reciclados.

Fonseca (2006) preparou duas dosagens de concreto com RCD de cerâmica vermelha, uma com 50% e outra com 100% de substituição (volumétrica) do agregado natural. Ele definiu a premissa do índice de abatimento para $8\text{cm} \pm 2\text{cm}$, obtida por teste de *slump*, com desvio apenas na conformação 100% de substituição

com fator água/cimento previsto de 0,57.

4.2.1 Absorção de Água pelos Agregados

Cabral (2007) verificou por meio de ensaios, que a cerâmica vermelha foi o agregado de RCD que mais absorveu água, tendo relação direta com a porosidade da cerâmica em relação aos RCDs de agregados naturais, pois estes últimos têm morfologia mais densa. Ele também apontou e destacou as menores massas específicas para os agregados de RCDs cerâmicos e também obteve valores de índice de vazios abaixo do adequado.

Silva (2014) em suas pesquisas, também verificou que os agregados de RCD de argamassas e cerâmicas vermelhas, tiveram a maior absorção de água.

Fonseca (2006) também relata uma maior absorção de água por parte dos agregados, devido à maior absorção de água pelas cerâmicas vermelhas usadas no concreto com RCD e percebeu que isto leva à incerteza sobre o fator água/cimento. Ele também relatou dificuldades com a excessiva absorção de água na conformação do concreto com RCD. Devido à rápida absorção d'água pelo agregado cerâmico, e em testes empíricos que ela realizou com mistura invertida no traço de 100% de substituição, ocorreu a "pelotização" do cimento durante a mistura, que no caso, potencializou o problema. Ela até tentou conformar CPs mas foi inviável compactar o concreto e melhorou pouco quando incluiu 200ml de aditivo plastificante, "*Fosroc Complast SP430*", comprometendo a trabalhabilidade da argamassa.

Fonseca (2006) também utilizou as orientações da norma NBR9778, com o diferencial de que foi além na quantidade, utilizando-se de "três" CPs de 15cm x 30cm para cada dosagem. Nos cálculos finais ela utilizou a média dos valores entre os 3 CPs. Ela obteve médias de 5% de absorção de água e 11% de índice de vazios (Iv) na dosagem de referência. Nas dosagens de substituição obteve absorção de 12,4% e Iv de 41,1% para dosagem de 100% RCD e, 8,29% de absorção com Iv igual a 17,5 para a dosagem de 50% de RCD. Ele concluiu que, entre as dosagens com RCD e a de referência, houve uma variação de 121% (adição de 100% RCD) e 66% (adição de 50% RCD) (FONSECA, 2006).

Campos (2012) obteve valores de índice de vazios entre duas a três vezes maior que o valor de referência, quando utilizou substituição de brita por RCD, nas

dosagens de 20% à 100% de substituição.

Segundo Cabral (2007) o modelo de classificação criado por Phaedonos (1996) (tabela com faixas para o determinação da qualidade do Iv) considera os seguintes parâmetros: a forma como os CPs foram compactados; se aditivados ou não com cal na cura em câmara úmida; o arrancamento da fôrma; a idade após os 28 dias de cura.

4.2.2 Difratomia dos Agregados

Cabral (2007) na caracterização dos agregados, efetuou análises das fases químicas dos materiais de RCDs (concreto, argamassa e cerâmica vermelha) por DRX (difração de raios X). Nos resultados da difratometria, ele listou os materiais de maiores presenças na composição dos agregados graúdos e miúdos. Para os RCDs de concreto e de argamassa, ele obteve basicamente o quartzo como material que mais se sobressaiu, seguido dos minerais calcita e portlandita. No DRX do RCD de cerâmica vermelha, ele obteve resumidamente, o quartzo como componente principal, seguida da moscovita e da moganita.

4.3 CONFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Segundo Smith (2012) em sua literatura de Ciência dos Materiais, o concreto é um “compósito cerâmico” com excelente resistência à compressão mas com baixa resistência à tração.

Segundo Botelho (2012) o concreto pode ser visto com uma argamassa composta de agregados graúdos e miúdos mais cimento e água, em proporções tecnicamente calculadas, sendo o cimento e a água, os elementos fundamentais na mistura. O concreto nada mais é do que uma “pedra artificial fraca”, pois percebe-se que a resistência do concreto se mostra bem abaixo da resistência da “pedra natural” (de granito ou basalto) mas já permite construir obras com substancial resistência, uma vez que esta pedra artificial tem como vantagens, a trabalhabilidade e a adaptação às formas (BOTELHO, 2012).

Botelho (2012) lembra ainda que, a variabilidade acidental é da natureza dos ensaios com concreto, que é um material compósito formado por cinco materiais

(cimento, água, areia, brita e aço) tendo pelo menos três deles (cimento, areia e brita) propriedades que também podem variar bem mais do que os metais ou polímeros, por estarem sujeitos a muitos fatores que além dos ambientais, podem ser: a qualidade das jazidas; a qualidade da fabricação, do transporte e do armazenamento. Então, na engenharia civil, calcula-se com valores que são acrescidos de fatores de segurança com base na estatística avalizada por normas de entidade chancelada pelo governo brasileiro e com fé pública, tal como a ABNT (Ex.: NBR12655, 2006; NBR6118, 2004). Isso é feito justamente para se cobrir as deficiências não previstas, originadas nas falhas e heterogeneidade interna dos materiais formadores do concreto e de possíveis desvios nas condições de construção das obras (BOTELHO, 2012).

A resistência do concreto varia com o passar do tempo desde a sua conformação inicial, pois a hidratação completa dos silicatos, responsáveis pela aderência dos materiais, leva algum tempo para finalizar-se em todo o volume da peça de concreto. A resistência depende fundamentalmente da proporção água x cimento chamada “fator a/c” que em sendo elevado, gera concretos de baixa resistência à compressão, mas se baixo, gera problemas de plasticidade e adaptação às formas. Não existe um valor ideal. Mesmo que menores fatores a/c sejam almejados para melhorar a resistência, por outro lado, esta adoção pode ter um efeito negativo na trabalhabilidade do concreto (SMITH, 2012; BOTELHO, 2012).

Normalmente o engenheiro define as especificações do projeto, que incluem entre outros requisitos, o F_{ck} mínimo, a faixa de fator a/c e a proporção do traço, a serem utilizados, uma vez que os cálculos técnico/econômicos já efetuados, já consideram essas especificações. Caberá à construtora, produzir concreto obedecendo à estas especificações, além de efetuar e documentar os ensaios de resistência mecânica. Caberá ao Engenheiro, além de orientar tecnicamente o mestre de obras, deverá fiscalizar, os resultados dos ensaios registrados e a confecção das estruturas, durante toda obra (BOTELHO, 2012).

A pasta (cimento + água) é a cola que une os agregados, sendo esta, o ponto chave e crítico do concreto. Por exemplo, um concreto com “0,4” de fator a/c tem resistência característica a 28 dias (F_{ck}) de 28MPa, já outro feito com a/c igual a “0,8”, terá F_{ck} igual a 13,2MPa. Se isto é bom ou ruim, dependerá do valor mínimo de resistência que o calculista adotou para o projeto. (BOTELHO, 2012).

Troian (2010) em seu estudo, levantou informações de que a durabilidade do

concreto depende diretamente da forma e qualidade da elaboração do concreto. Para ter capacidade de suportar ao ambiente onde atuará, este deverá ser bem estudado e definido, além do dimensionamento correto dos componentes do concreto, deve-se respeitar às dimensões mínimas de cobrimento das armaduras, conforme previsto na norma NBR6118. Esta não define parâmetros de quais seriam as durabilidades em anos para as obras mas orienta que, a durabilidade dependerá da porosidade do concreto, a qual está relacionada com o tipo de cimento e com o fator água/cimento aplicado no concreto. Os poros podem reduzir a resistência, permitindo a penetração mais rápida de agentes degradantes do concreto (TROIAN, 2010; NBR6118, 2004).

Há vários tipos de cimento *Portland* conforme a aplicação de engenharia. Cabral (2007) utilizou cimento CPV-ARI (Cimento *Portland* de alta resistência inicial) mais claro e que recebe menos adições do que os cimentos mais comerciais. Ele indicou também, suas composições químicas e propriedades físicas na caracterização do mesmo.

Fonseca (2006) utilizou concreto tipo CII E32, dos fabricantes Ciminas e Cauê, por conveniência de disponibilidade em sua região local, inclusive conseguiu as características físicas e químicas do cimento destes fabricantes. As constituições médias dos tipos de cimento *Portland*, podem ser observadas na Tabela 1, seção 5.3.2 (FONSECA, 2010).

4.4 RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Sabendo-se da origem de todos os materiais naturais usados na construção, descrito neste trabalho no item “4.1”, e uma vez que suas jazidas são “finitas” na superfície do planeta Terra, coloca-se aqui a importância da reciclagem, a qual salvaguardará da extinção essas jazidas de recursos naturais, pois vários materiais já estão ficando escassos, como por exemplo o cobre (SENAI, 2005).

A falta de gestão de reciclagem destes recursos naturais, poderá comprometer em futuro breve, o modo de vida atual das sociedades (SENAI, 2005).

Segundo Massould (2012) o departamento australiano de sustentabilidade investigou que ≈ 19 milhões toneladas de RCD foram gerados entre 2008 e 2009, onde o concreto constituiu 80% deste material. No presente, somente 50% deste

material está sendo reciclado. A idéia de reuso de RCDs não é nova e vem sendo analisada por vários pesquisadores, alguns como Xiao (2004), Evangelista (2007), Oliveira (2012) e (MASSOULD, 2012).

Segundo Porto (2008) existem vantagens no uso de RCDs de concreto. Os RCDs podem ser usados como agregado em peças não-estruturais, substituindo os naturais como areia e brita, se beneficiados em usinas de RCD. Ele cita que todos rejeitos minerais podem ser usados como agregado (tijolos, argamassas, cerâmicos, areia, pedras) separados ou não. Os RCDs trazem economia de energia, pelo fato do material já estar em estado granular. Podem melhorar o desempenho do concreto quando comparado com o concreto com agregado natural, usando menor quantidade de cimento (PORTO, 2008)

Oliveira (2009) revela que deve-se promover o uso de RCD de cerâmica vermelha para se diminuir as extrações de sua matéria prima e também, preservar as reservas de agregados naturais ainda existentes.

O manual técnico australiano “Standards Australia HB155, 2002” que padroniza o uso de agregados de materiais cerâmicos, permite o uso de adições de até 30%, desde que seja RCD “Classe 1A” e produzindo concreto que possa atingir resistência até 40MPa (MASSOULD, 2012).

Massould (2012) ainda ressalta que o “Comitê do Instituto Americano de Concreto”, considera não haver um limite percentual de substituição dos agregados naturais. No entanto, devido há várias limitações como a presença de impurezas e contaminantes (que diminuem a resistência do concreto) na prática, o uso de RCDs no concreto tem se limitado à peças sem funções estruturais (pisos, estradas e preenchimento) pois que ainda existem poucas experiências e chancelas que garantam a utilização em peças estruturais com RCDs. Isto torna desconfortável o uso estrutural pelos engenheiros, pois as normas de construção australianas não avalizarem o uso de RCDs para fins estruturais (Massould, 2012).

A Norma brasileira NBR15116 (2004) orienta o uso de agregados reciclados em concretos. Ela determina que o uso deve se restringir a concretos para “pavimentação” ou para conformação de “concreto sem função estrutural” tais como: preenchimentos; contra piso; calçadas; blocos de vedação; meio-fios; sarjetas; canaletas; mourões e placas de muro.

Porto (2008) também alerta sobre as limitações do RCD, caso contenha materiais com faces polidas como os revestimento e pisos, pois provocam efeito

negativo nas resistências mecânicas do concreto. Outra limitação é a dificuldade de separação e mapeamento das características dos materiais de RCD pelas usinas, pela possível presença de contaminantes e impurezas. A coleta tem limitações, pois nos grandes centros há problemas de longas distâncias e congestionamentos de tráfego e onde ainda não há logística estabelecida para o recolhimento, descarga e reaproveitamento de RCDs (PORTO, 2008).

Segundo Silva (2014) os custos para aquisição de agregados de RCD são baixos em comparação aos convencionais, com notada viabilidade econômica, mas sua utilização é restrita a elementos não estruturais como pisos, contra-pisos, blocos de concreto, devido às argamassas e cerâmicas vermelhas terem menor resistência mecânica além de gerar aumento de absorção de água.

O material de Gestão de Resíduos elaborado pelo SENAI (2005) informa que a construção civil é um dos maiores consumidores de matéria prima e um dos maiores geradores de ocupação no planeta.

Segundo Silva (2014) a falta de métodos e técnicas que preconizam as questões ambientais na construção civil, é responsável por 30% dos RCDs descartados na natureza. Ele cita ainda que há uma iniciativa da Resolução CONAMA (2014) que visa regular e normatizar a gestão dos RCDs. Ela também menciona sobre a Lei Nº 12.305/10, que revela a “Política Nacional de Resíduos Sólidos”. Esta Lei estabelece a gestão consciente das obras para evitar o desperdício de material que chega a 30% em prejuízo monetário.

Oliveira (2009) ressalta também, a importância da reciclagem para prevenir impactos ambientais devido à falta de regras sobre o extrativismo da matéria prima dos materiais na natureza, e devido a esta situação na indústria e na construção civil, acabam ocorrendo muitos impactos hidrológicos e geológicos.

Porto (2008) destaca que dentre as várias finalidades dos RCDs, refere-se ao seu uso como agregado na confecção de concretos em obras civis. Os de origem de construções e demolições (restos de concreto, argamassa como de alvenaria e telhas) têm as melhores características para esta finalidade.

Santos (2009) em seu artigo sobre reciclagem usando cerâmica vermelha, também considera os benefícios do uso de RCDs, o que contribui para reduzir este tipo de rejeito no meio ambiente.

Troian (2010) obteve resistências acima de 25MPa em seu experimento fracionado com percentuais de RCD acima de 20%. Entretanto, o cimento utilizado

foi o CPV ARI (alta resistência inicial) o agregado graúdo utilizado foi a brita de basalto que gera resistências à compressão maiores que a da brita de granito e, finalmente, utilizou fator a/c abaixo dos 0,6 nos dois percentuais de 50% e 100% de substituição. Assim, ela demonstrou que RCDs podem ser usados e geram boas resistências.

4.5 DA ARGILA À CERÂMICA – ORIGEM, TRANSFORMAÇÃO E USO

A Argila é conhecida e utilizada desde a era primitiva do homem, há datações de uso muito antes da civilização egípcia.

Segundo Popp (2012) as argilas são argilominerais plásticos com granulometria fina de $\approx 0,003\text{mm}$ (3 micros). Uma variação das argilas são os argilitos mais maciços, oriundo do processo mais avançado de “litificação” dos sedimentos argilosos. São rochas das famílias dos argilitos e folhelhos que quando não consolidados são ditos da família da argila (POPP, 2012).

As argilas geralmente formam material pastoso se hidratadas e rígido se desidratadas ou queimadas. Se originam das dissoluções das rochas, causadas pelas intempéries, gerando material sedimentar, fino, plástico e consistente. Elas podem ser formadas por 3 processos, “neoformação”, “herança” e “transformação” (MEIRA, 2001).

Segundo a literatura da “Engenharia” e da “Ciência dos Materiais”, as cerâmicas tradicionais são compostas por materiais argilosos contendo basicamente três minerais, argila, sílica e feldspato. As argilas são formadas quimicamente por silicatos hidratados de alumínio ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) e adições menores de vários óxidos (SMITH, 2012).

Segundo Smith (2012) as cerâmicas são materiais inorgânicos, formados pela união química (iônica ou covalente) entre metais e não-metais, com combinações simples ou complexas, tendo elevada dureza e resistência a compressão em altas temperaturas, pouco dúcteis, fragmentando se submetidas a impacto ou a esforços de torção ou flexão. São pouco resistentes à tração mas são bons isolantes elétricos e térmicos, com boa resistência à temperatura, ao atrito e à corrosão, além de razoável resistência à compressão.

A sílica é o componente que confere dureza e resistência à cerâmica,

inclusive à altas temperaturas. O feldspato funciona como ligante entre as partículas, por vezes provocando a vitrificação durante o cozimento do material nos fornos (SMITH, 2012).

Segundo Smith (2012) as resistências características da cerâmicas são: de 750 a 3.860MPa à compressão; 170 a 207MPa à tração; 255 a 690MPa à flexão e 3,6 a 8MPa à fratura.

As resistências do agregado cerâmico, principalmente à compressão, foi o objeto de interesse nesta dissertação para o estudo e utilização do mesmo, na formação de um compósito de concreto. Tendo em vista que a morfologia atômica da cerâmica é do tipo policristalina, com sequências repetitivas de tetraedros (silicatos) e ou hexágonos (feldspatos) formando estruturas geometricamente resistentes (SMITH, 2012; BOTELHO, 2012).

4.6 CONCRETO COM USO DE RECICLADOS CERÂMICOS

4.6.1 Concreto com Reciclados Cerâmicos – Preparação e Dosagem

Massould (2012) estimou que até à proporção de 30% de substituição da brita por agregados reciclados, no geral, não tem havido quedas significativas de resistência ou trabalhabilidade e vêm sendo empregados em vários tipos de aplicações.

Barin (2008) e Troian (2010) utilizaram o cimento CPV - ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial) sendo este de coloração clara.

Silvestre (2012) concluiu em seu trabalho, que os agregados reciclados absorveram mais água devido ao maior índice de vazios dos mesmos.

Oliveira (2006) utilizou o cimento *Portland* CII-E40, agregado natural ($\emptyset 12,5\text{mm}$) e agregado reciclado ($\emptyset 19\text{mm}$) além de ter adotado as premissas de F_{ck} igual 30MPa e o abatimento igual $6\text{cm} \pm 1\text{cm}$. Para a produção do compósito ele adotou também, as adições de RCD de 0%, 15%, 30%, 45% e 100% em substituição da brita natural.

A Literatura para conformação de concreto recomenda 30 minutos de absorção de água para que o agregado tenha 100% da umidade necessária. Contudo, Cabral (2007) obteve em 10 minutos a pré-hidratação do agregado graúdo

de RCD cerâmico, com 80% da água de absorção em 24 horas. Ele desenvolveu pré-conformação e rompimento de 3 conjuntos de CPs para determinar o ponto ideal de uma argamassa com fator $a/c=0,54$ e traço=1:5 (1-cimento:5-agregados).

Cabral (2007) também relata durante a mistura, que obteve maior absorção de água pelo agregado de cerâmica vermelha do que a observada no concreto de RCD mixado (concreto + argamassa + cerâmica) ou natural. Ele utilizou a unidade de proporção de massa em quilograma (kg). Contudo, teve que usar fatores de ajuste para não haver muita discrepância de peso, já que a massa específica dos agregados de RCD são menores que as dos agregados naturais.

4.6.2 Concreto com Reciclados Cerâmicos – Conformação dos CPs

Na produção do concreto aditivado com RCD cerâmico, Cabral (2007) conformou 50 traços sendo preparados nestes, 2 CPs para ensaio de compressão, 2 para ensaio de módulo de deformação e 2 para ensaios de retração.

Barin (2008) efetuou ensaios utilizando escória que também possui peso específico menor que o do cimento. A substituição do cimento pela escória de alto forno foi nas proporções de 50% e 70%, incluindo ativadores.

Troian (2010) também balizou o F_{ck} de referência em 25MPa.

Mas Barin (2008) substituiu o fator a/c pelo fator “água/aglomerante” nas medidas de “0,3”, “0,42” e “0,55” e com traços diferenciados tais como “1:3,3”, “1:4,2” e “1:6,1”, efetuando pré-ensaios para avaliar a trabalhabilidade do material. O peso específico da escória forçou um aumento do volume de areia.

Na conformação de corpos de prova de concreto, Barin (2008) produziu 16 CPs de $\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ para ensaio de resistência a compressão axial para rompimentos de 4 em 4 CPs, em períodos de 3, 7, 28 e 91 dias de cura. Para os ensaios de absorção de água ele moldou dois CPs de $\varnothing 15\text{cm} \times 30\text{cm}$.

Na confecção dos CPs de $\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$, Barin (2008) utilizou fôrmas e para compactação utilizou mesa vibratória nas camadas de 50% e 100% de concreto. Nos CPs de $\varnothing 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ para ensaio de absorção de água, utilizou para compactação, vibradores mecânicos de agulha, observando os procedimentos da norma (NBR5738, 2003). Realizou pré-cura dos CPs após 24h com imediata imersão em água, na câmara úmida.

Fonseca (2006) relatou que no processo de pré-cura, os CPs cilíndricos foram desenformados após 24h e os CPs prismáticos após 48h, sendo após estes períodos, imediatamente submersos em água na câmara úmida com solução de hidróxido de cálcio, em temperatura que variou de 21°C a 27°C. Na cura, adotou submersão parcial por 14 dias e depois, cura ao ambiente até 28 dias.

Campos (2012) utilizou RCD cerâmico em seus experimentos com percentuais de adição (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) verificando a dificuldade do agregado cerâmico de se distribuir dentro dos moldes com maior índice gradual de abatimento, que foi tanto maior quanto maiores foram os percentuais de adições. Ele concluiu que isto se devia ao formato mais lamelar e plano da cerâmica em comparação com o agregado natural.

Cabral (2007) também teve problema com a distribuição não homogênea dos agregados de RCDs cerâmicos (cacos de tijolos e telhas) dentro dos moldes devido à geometria lamelar deste RCD, semelhante à dos revestimentos cerâmicos.

Para os ensaios de compressão axial, Barin (2008) seguiu os procedimentos da norma NBR5739 para o rompimento nas datas previstas.

Fonseca (2006) conformou CPs cilíndricos de Ø15cm x 30cm para ensaios de compressão e tração, e CPs prismáticos de 15cm x 15cm x 45cm para absorção de água e módulo de elasticidade. Para o processo de compactação, ele utilizou vibrador mecânico.

4.6.3 Concreto com Reciclado Cerâmicos – Ensaio Mecânicos

Massould (2012) observou que o uso de agregados reciclados afetam as propriedades e as características do concreto tais como o fator a/c , as resistências mecânicas, a permeabilidade e a retração. Ela detectou também que, o calor da reação de cura do concreto, tanto para o concreto convencional quanto para o aditivado, são semelhantes bem como a resistência nas idades iniciais. Porém, após dois dias, estas começam a se diferenciar com ampliação da diferença entre o convencional e o aditivado.

Troian (2010) que usou RCD de concreto reciclado, estimou que a resistência ideal deveria ser de 37MPa com fator $a/c < 0,65$.

Para o cálculo da resistência à compressão, Cabral (2007) utilizou uma

equação baseada na Lei de Abrams (Equação 4.1) que possui um auto ajuste para previsão do valor ótimo da resistência.

$$F_{ck} = \left(\frac{102,43}{5,8^{a/c}} \right) [1 - (\%substituído)] \quad (\text{Eq.4.1})$$

Esta equação permite determinar que, para um $F_{ck} > 0$, haverá perda de resistência de um tipo de RCD, caso o $F_{ck} > 0$, haverá ganho (CABRAL, 2007).

Nos ensaios de compressão, Cabral (2007) empregou modelos matemáticos para estabelecer os resultados. No entanto, teve alguns problemas com alguns deles devido a difícil relação de heterogeneidade dos materiais utilizados, como por exemplo nos cálculos do índice de retração.

Fonseca (2010) investigou o efeito de aditivos minerais no concreto, como por exemplo, o aditivo de base de pozzolânica, obtendo 38MPa aos 28 dias contra 36MPa do concreto sem aditivo. Ele obteve resistência à tração de 3,5MPa (concreto aditivado) contra 2,7MPa (não aditivado). Demonstrou desta forma, o quanto um aditivo eleva a resistência à compressão do concreto.

4.6.4 Compósito - Ensaios de Absorção - Índice de Vazios - MEV e DRX

Cabral (2007) obteve menores massas específicas para os agregados de cerâmica vermelha em comparação com as do concreto natural.

Em outro trabalho de Cabral (2009) ele efetuou DRX de amostras de concreto com reciclado cerâmico, que revelou a sua composição básica formada por quartzo, argilas e feldspatos.

Oliveira (2006) efetuou análise micro-estrutural por microscopia eletrônica de varredura para verificar a morfologia de superfície por elétrons retro-espalhados. Ele observou uma estrutura complexa da mistura com fases distintas, o cimento anidro e a formação do hidróxido de cálcio em superfície lisa e cor cinza escuro. Observou poros e concluiu que eram devido ao processo de hidratação e ao aditivo polimérico usado, o qual revelou sua eficiência na consolidação da matriz x agregado graúdo, refletindo-se na resistência obtida. Oliveira observou também, fraturas, porosidade difusa, vazios e formações circulares devido a reação de hidratação do concreto.

Oliveira (2006) também efetuou a análise do material por difração de raios X para confirmar as fases de hidratação participantes do concreto, com adição de 45% de RCD em conjunto com aditivo polimérico acrílico em solução aquosa.

4.7. CONCRETO COM RECICLADOS CERÂMICOS - RESULTADOS

Oliveira (2012) observou que os mesmos tipos de dosagens para concretos convencionais podem ser adotadas para concretos com uso de RCD.

Cabral (2007) teve problemas de distribuição não homogênea dos agregados de RCDs cerâmicos dentro do molde devido à geometria lamelar dos mesmos.

Massould (2012) observou através de várias pesquisas em trabalhos de Li (2004) e Yang (2008) que, a diminuição da resistência do concreto com percentuais agregados, está relacionada com a aderência dos agregados naturais com os reciclados reutilizados e que estes geram mais demanda de água. Ela observou que Li (2004) compilou um gráfico onde o aumento do fator a/c gerou decréscimo da resistência do concreto, que ocorreu até os 30% de substituição mas que aos 50% de substituição o processo se inverteu.

As resistências mecânicas de concretos com agregados reciclados até poderão ser maiores que as resistências dos agregados naturais, se o fator a/c for igual ou menor que os dos concretos convencionais, sem RCDs (OLIVEIRA, 2012).

Cabral (2007) obteve maior resistência à compressão com agregados de RCD de cerâmica vermelha em comparação aos demais, como por exemplo, o RCD de concreto. Observou que somente obteve estes índices mais altos quando também utilizou uma proporção de mistura de concreto com fator a/c da ordem de "0,6".

Em outro estudo Cabral (2009) também efetuou um conjunto de ensaios semelhantes, onde analisou a resistência à compressão dos compósitos gerados, o módulo de elasticidade, e o volume de poros por VPP. Empregou ferramentas estatísticas para a consolidação dos resultados via modelos matemáticos, caracterizando as propriedades do material final (CABRAL, 2009).

Em todas as dosagens ensaiadas por Cabral (2009) o agregado graúdo de RCD gerou valor de resistência abaixo do equivalente com concreto de brita natural. As outras características analisadas do compósito (módulo de elasticidade, absorção de água e volume de poros permeáveis - VPP) indicaram decréscimos de qualidade

em relação ao concreto padrão (CABRAL, 2009).

Fonseca (2006) no seu trabalho sobre comparação entre concreto convencional e com RCD de cerâmica vermelha, também obteve menor resistência à compressão e à tração nos concretos com agregados reciclados quando comparados aos convencionais. Ele também relata que as propriedades mecânicas deste compósito foram um pouco melhores que os que receberam aditivos plastificantes ou quando se aumentou a fração de cimento na argamassa.

Cabral (2007) demonstrou em seus resultados, o decréscimo da resistência à compressão das sucessivas adições de RCD e empregou 3 fatores a/c diferentes além de três tipos diferentes de agregado de RCD. Ele, tal como outros pesquisadores, avaliou outros aditivos de RCD (de concreto ou argamassa) também observando perda de resistência mecânica do concreto aditivado com RCD de cerâmica vermelha, da ordem de 19% quando usou 50% de substituição cerâmica e cerca de 38% quando usou 100% de substituição. Verificou que a perda de resistência mecânica foi devido à resistência do agregado cerâmico, que é menor, além da maior porosidade. A menor resistência obtida foi a do RCD de argamassa.

Massould (2012) acrescenta que a resistência do concreto com agregados, pode ser potencializada pelo uso de materiais cimentícios suplementares (cinza volante ou sílica ativada) melhorando a resistência e a trabalhabilidade.

Campos (2012) notou que o traço de referência (sem RCD) apresentou resistência à compressão aos 28 dias, $F_{c28} = 25,34\text{MPa}$, pouco acima dos 25MPa. A substituição percentual de RCD de 40%, programada no seu projeto, manteve-se em $F_{c28} = 20\text{MPa}$. Nos demais percentuais ele obteve substancial queda de resistência à compressão ($F_{c28} = 17\text{MPa}$) com a mistura com 100% de substituição de brita por RCD de cerâmica vermelha.

Campos (2012) também relatou aumento gradual da absorção de água e índice de poros, devido a maior absorção da água pela cerâmica à medida em que os percentuais de substituição foram aumentando. Campos também concluiu que o RCD de cerâmica vermelha já é um produto de origem industrial e constatou que o mesmo irá gerar desempenho mecânico menor que o do concreto convencional, havendo a necessidade de melhoria do mesmo, através de correções para os materiais se equivalerem.

RCDs possuem desvantagens como maior demanda de água, maior índice de abatimento devido à forma do agregado cerâmico (assentamento intra-molde e

menor peso específico) inferior à da brita natural. Ele concluiu que é possível o uso viável de até 40% de RCD, em obras que não exijam altos esforços ($F_{c28} \leq 20\text{MPa}$) com a vantagem do concreto ficar mais leve (CAMPOS, 2012).

Troian (2010) obteve resistências acima de 25MPa com percentuais 50% e 100%, o cimento utilizado foi o CPV ARI, o agregado graúdo utilizado foi a brita de basalto (resistência à compressão maior que o a do granito). Ela utilizou também, fator $a/c < 0,6$ nos dois percentuais de substituição. Ela demonstrou, que RCDs podem ser usados em concreto e que geram boas resistências.

Cabral (2007) também sugeriu a realização de outros testes para aferir a resistência e a durabilidade dos concretos com RCD.

Oliveira (2012) concluiu também que, ensaios futuros devem ser efetuados à procura das dosagens ótimas para os concretos com RCD, visando a melhor formulação resistência x trabalhabilidade.

Massould (2010) acredita que com a engenharia criando novas técnicas de concreto estrutural com RCDs, estes poderão ser usados com relativa segurança.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

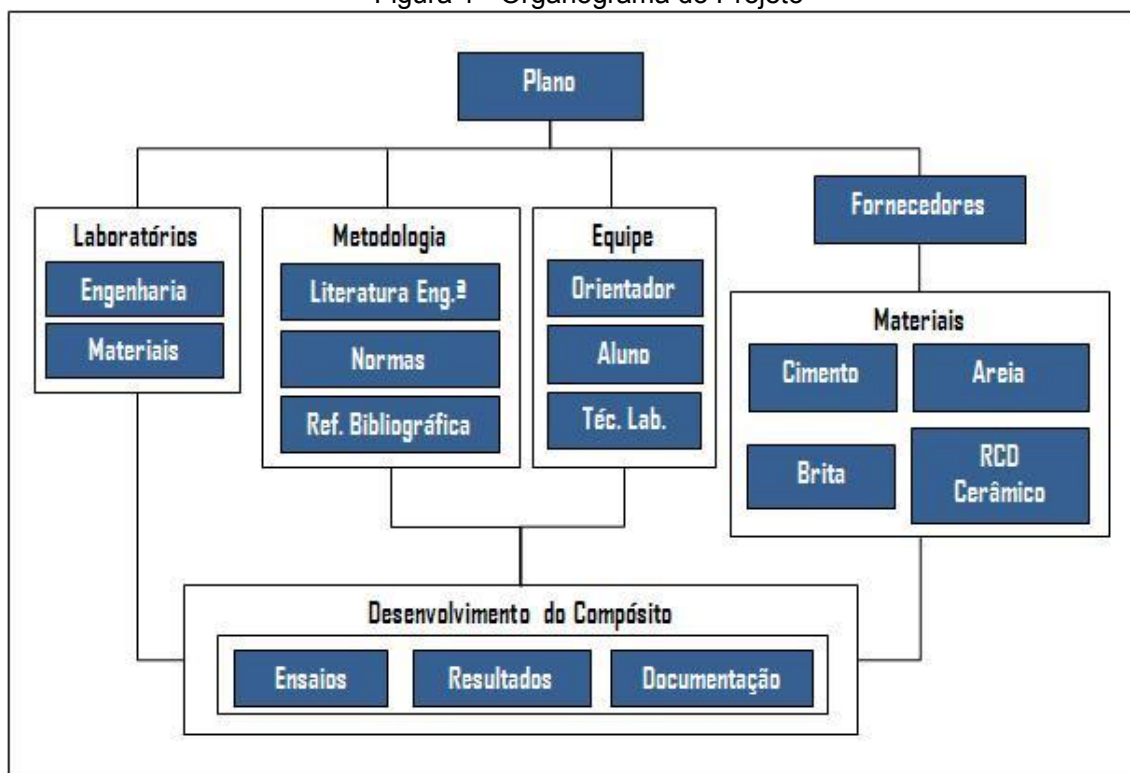
Nesta etapa, para desenvolvimento do compósito pretendido, tem-se as seguintes conteúdos:

- Organograma do Projeto
- O Fluxograma de Trabalho
- Materiais (para confecção do concreto aditivado cerâmico)
- Métodos (Estudos e procedimentos para confecção do Concreto).
- Preparação dos Materiais
- Conformação do Compósito
- Ensaio Mecânicos e de Absorção de Água
- Análises MEV (Cerâmica e Compósito) DRX (Materiais e Compósito)

5.1 ORGANOGRAMA DO PROJETO

A estrutura de Organograma deste projeto está indicada na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Organograma do Projeto

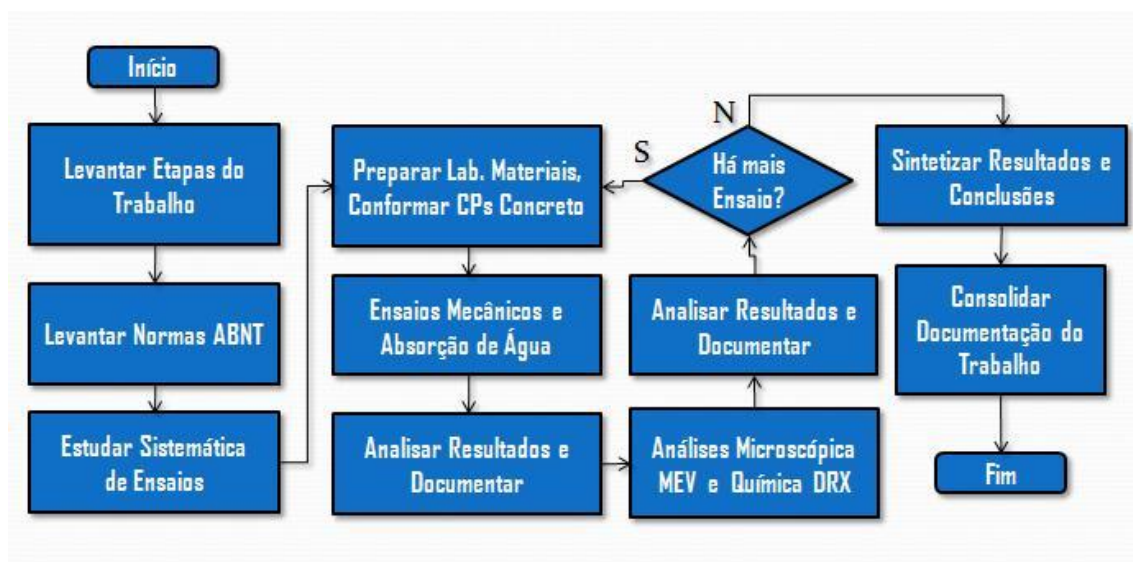


Fonte: Autor

5.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO

Para organizar a sequência de trabalho do projeto, foi estabelecido e seguido, o fluxo de trabalho (Figura 2) levando-se em conta as etapas, normas, documentações levantadas e as atividades práticas que foram executadas.

Figura 2 - Fluxo de trabalho



Fonte: Autor

5.3 MATERIAIS

Os Materiais utilizados para a produção do compósito são relacionados nas seções subseqüentes deste item e depois, resumidos na Tabela 2, onde são descritas suas origens e composições.

5.3.1 RCD de Revestimento Cerâmico

O material cerâmico (Fotografia 1) usado como aditivo em forma de agregado graúdo, foi obtido de rejeitos de cerâmica de pisos e revestimentos de obra do próprio autor, desta dissertação. O revestimento foi fabricado pela ARTEC Pisos e Revestimentos Ltda., tipo cerâmica monoporosa do modelo 53011-PEI4. Este material de origem comercial é conveniente e encontrado no mercado de lojas de material de construção. Devido à dificuldade de resposta das recicladoras industriais do ramos de reciclagem, seu custo médio como RCD foi estimado em R\$20,00/m³.

Fotografia 1 - Agregado Graúdo de RCD Cerâmico fragmentado



Fonte: Autor

5.3.2 Cimento

Foi utilizado cimento tipo *Portland* padrão CPIII-40RS (Fotografia 2) indicado para obras civis de baixo e médio porte, marca “CSN Cimentos S.A.”. Seu custo médio atual no varejo é de R\$ 22,00 por saco de 50kg.

Fotografia 2 - Cimento *Portland* CPIII - 40 RS

Fonte: Autor

Amostras deste cimento foram colhidas para análise via DRX na secção 5.11.

Apenas como comparativo do cimento CPIII-40RS com as demais classes, as composições médias constituintes dos cimentos foram listadas na Tabela 1. A composição química resumida do fabricante do cimento classe CPIII-40RS, indicada na embalagem, pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 1 - Constituintes dos Cimentos *Portland*

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filler calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	-	0	-
Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95	-	1-5	-
Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filler	CPII-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto Forno	CPIII	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	5-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: Fonseca (2010)

5.3.3 Brita

Foi utilizada “brita comum” tipo Natural (Fotografia 3), de composição básica de granito, extraída da Pedreira Volta Redonda e adquirida na Loja Capobiango Materiais de Construção Ltda. O custo da brita no mercado local é $\approx R\$121,00 / m^3$, tanto brita tamanho 1 (0,5mm à 19mm) como a brita 2 (19mm a 38mm).

Fotografia 3 - Britas (1 e 2) utilizadas no compósito



Fonte: Autor

5.3.4 Areia

Foi utilizada areia média “comum de leito de rio”, adquirida na Loja local Capobiango Materiais de Construção Ltda. (Fotografia 4). Seu custo atual no varejo é cerca de $R\$98,00 / m^3$.

Fotografia 4 - Areia média (granulometria $\varnothing 2mm$)



Fonte: Autor

5.3.5 Resumo dos Materiais utilizados

A Tabela 2 resume a lista dos materiais utilizados na produção do compósito com adições de agregado de revestimento cerâmico, proposto neste trabalho.

Tabela 2 - Lista de Materiais para confecção do Compósito

Material	Marca / Fornecedor	Modelo Tipo	Composição Química Padrão	Qt. Litros	Custo R\$ / Unidade
Cimento	CSN Cimentos / Capobiango Materiais de Construção	Cimento tipo <i>Portland</i> de Alto Forno Modelo: CPIII-40RS	<ul style="list-style-type: none"> • Ferro (Fe_2) + Silicatos de Cálcio (Ca_2SiO_4) • Ferro (Fe_2) + Alumina (Al_2O_3) • Filler Carbonático (Fe_2) + Sulfato de Cálcio (Ca_2SO_4) • Escória de Alto Forno (Fe_2O_3) 	30	22,00 / 50kg
Areia	Areal Sta. Isabel / Capobiango Materiais de Construção	Média de leito de rio Ø2,0mm	Areia granulada: Quartzo {base Sílica (SiO_2) + impurezas}.	40	98,00 / m^3
Brita	Pedreira VR / Capobiango Materiais de Construção	Britas 1: Ø0,5-19mm e 2:Ø19-38mm	Granito de jazida natural. Composição básica: <ul style="list-style-type: none"> • Quartzo • Feldspato • Mica. 	81	(1)121,00 / m^3 (2)121,00 / m^3
RCD Cerâmico	ARTEC Pisos e Revestimentos/ Capobiango Materiais de Construção	53011-PEI4	Argila processada e Sinterizada. (Composição química não disponível)	9	20,00 / m^3
Água	SAAE de Volta Redonda	Tratada	Água (H_2O + Resíduos químicos de Tratamento)	18	17,00 / m^3

Fonte: Autor

Os valores dos custos da areia, brita e cimento indicados na Tabela 2, foram colhidos em Fevereiro de 2016, na loja Capobiango Materiais de construção Ltda., em Volta Redonda, RJ. Os Preços foram colhidos em fevereiro e novamente em 12 de Maio de 2016 e estes continuaram com os mesmos.

5.4. MÉTODOS

Como metodologia técnica para permitir a produção do compósito investigado nesta dissertação, utilizaram-se os seguintes estudos, procedimentos e normas:

1. Morfologia, propriedade e conformação do concreto
2. Morfologia e química da argila
3. Morfologia e química do revestimento cerâmico
4. Normas de engenharia da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para produção do compósito de concreto

5.4.1 Propriedades do Concreto e sua Conformação

A composição química básica do cimento *Portland*, foi apresentada na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Composição Química Básica do Cimento *Portland*.

Componente	Nome mineral	Nome químico comum	Formula química	Qt. (%)
Clínquer	C3S (Alíta)	Silicato tricálcico	$(\text{CaO})_3 + \text{SiO}_2$	52
	C2S (Belíta)	Silicato dicálcico	$(\text{CaO})_2 + \text{SiO}_2$	18
	C3A (Celíta)	Aluminato tricálcico	$(\text{CaO})_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	10
	C4AF (Brownmillerita)	Ferroaluminato tetracálcico	$(\text{CaO})_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	9
Adições	Gipsita	Sulfato de cálcio	$\text{Ca}_2\text{SO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$	< 3

Fonte: Autor

Fonte composição: BARIN (2008)

Estudos realizados por Barin (2008) indicaram que os “silicatos” são os responsáveis pela promoção da resistência à compressão do concreto.

O concreto é formado basicamente por três elementos (cimento, agregados e água) mas pode receber outros produtos (Tabela 4) para aumentar seu desempenho conforme sua aplicação (Time LIFE™, 1996).

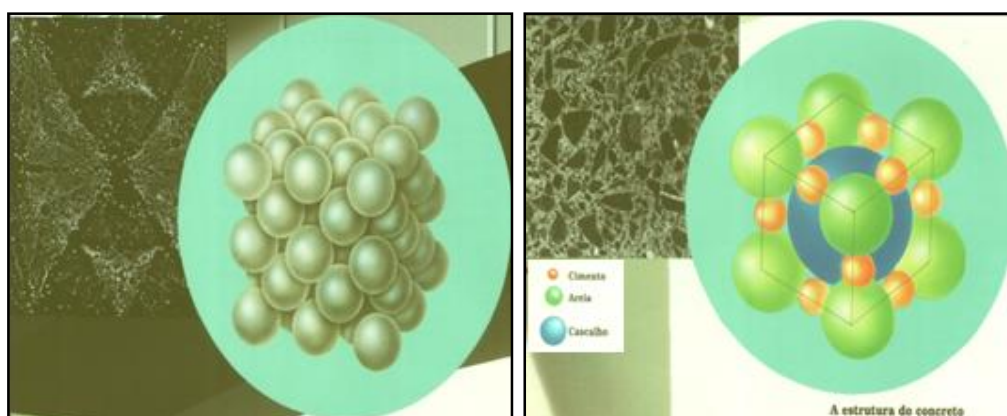
Tabela 4 - Componentes Comuns Constituintes do Concreto

Material	Tipo de Material	Função
Cimento <i>Portland</i>	Aglomerante	Colar e comprimir os agregados.
Areia natural de Quartzo (Sílica+impurezas) ou Artificial (pó de pedra beneficiado), pó de pedra.	Agregado Miúdo	Preenchimento intersticial e aumentar a resistência mecânica.
Pedra britada ou seixo natural	Agregado Graúdo	Resistência mecânica.
Água Tratada (Pode ser parcial ou totalmente substituída por gelo)	Reagente do cimento	Ativar a formação e compor o concreto.
Plastificante, retardador de pega.	Aditivo químico	Aceleradores ou retardadores da cura.
Metacaulim, cinza volante, pozzolanas, cal, pó de pedra.	Aditivos naturais	Incrementar a resistência mecânica.

Fonte : Time LIFE™, 1996

Comparando a estrutura do metal (Figura 3a) com a do concreto (Figura 3b) verifica-se que não são iguais mas possuem certa semelhança. Compartilham coeficientes de dilatação térmica muito próximos. Nos metais os átomos possuem uma forte ligação atômica, formando uma rede geometricamente simétrica, cada átomo comprimindo o outro ao seu redor. No concreto, a cristalização do cimento hidratado, comprime o agregado miúdo em torno do graúdo. Por isto, é um excelente coadjuvante dos metais para a formação de estruturas, (Time LIFE™, 1996).

Figura 3 - Estrutura do Aço(2a) à esquerda e Concreto(2b) à direita

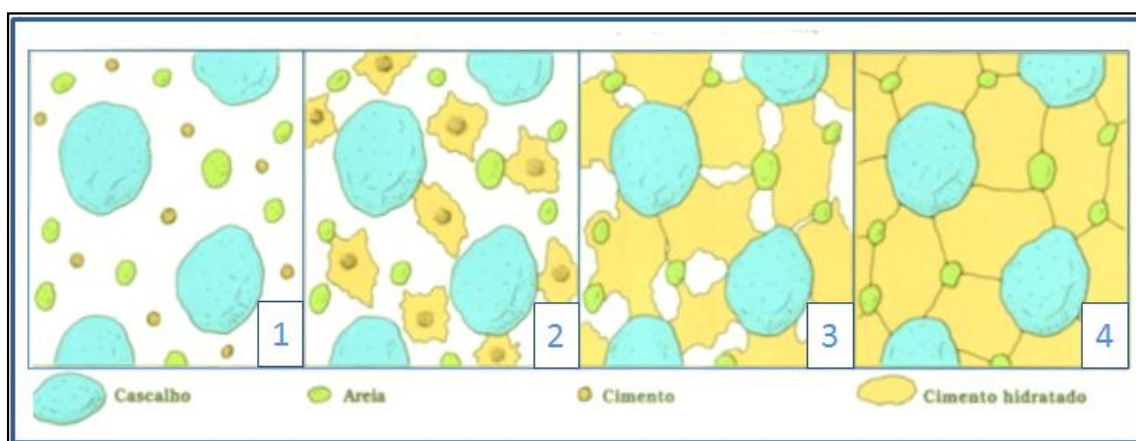


Fonte: Time LIFE™, 1996

A proporção entre a água e o cimento na mistura é chamada de “fator água/cimento” ou “a/c” (BOTELHO, 2012).

A água adicionada ativa a reação química dos silicatos e carbonatos presentes no cimento, formando uma pasta “aglomerante” que funciona como uma cola que aglutina as partículas dos agregados (Figura 4) aderindo-se à elas. Adicionando-se pouca quantidade de água (baixo a/c) a reação de cura não ocorrerá por completo e também, a facilidade de se adaptar às formas ficará prejudicada. Porém, adicionando-se quantidade de água superior à ideal (alto a/c) a resistência diminuirá em função dos poros que ocorrerão quando o excesso de água evaporar (Time LIFE™, 1996).

Figura 4 - Reação formadora do Concreto por aglutinação



Fonte: Time LIFE™, 1996.

Segundo Barin (2008) a reação da água com os componentes do cimento do concreto é do tipo exotérmica, consumindo CO_2 ambiente por carbonatação das massas de silicatos e óxidos do cimento, literalmente fervendo e gerando calor de dentro para fora das peças, durante a solidificação.

Toda essa massa de concreto endurece em poucas horas (Figura 4) através de um processo chamado “cura”. O interessante é que parte da água passa a compor quimicamente o concreto. Pode-se dizer que o concreto nunca “seca”, apenas endurece num material sólido e resistente, que é utilizado nas construções, estradas, pontes e outras estruturas de obras civis (Time LIFE™, 1996).

A mistura dos materiais para produzir o concreto é chamada de “dosagem” ou “traço”. Sua resistência e durabilidade dependem da proporção entre os materiais (Tabela 4) que entra na sua constituição (NBR5738, 2003; BOTELHO, 2012).

As proporções de cimento, areia, brita e água na mistura, tem influência na facilidade do concreto em se adaptar às formas e na sua resistência mecânica característica, chamada na engenharia de “fator Fck” (BOTELHO, 2012). As proporções de traço variam conforme as especificações técnicas das estruturas da obra a ser executada (ex.Tabela 5).

Tabela 5 - Traço e consumo (litros) para 1m³ de Concreto

Traço em volume	Cimento (litros)	Areia (litros)	Brita (litros)		Água (litros)	Resistência Fcj (MPa)		
			Nº 1	Nº 2		3 dias	7 dias	28 dias
Cimento : areia : agregado	-	-	Nº 1	Nº 2	-	3 dias	7 dias	28 dias
1:1:2	363	363	363	363	226	22,8	30,0	40,0
1:2:4	210	420	420	420	202	9,0	13,7	21,0
1:3:6	147	441	441	441	198	3,0	5,4	10,0

Fonte de Dados: BOTELHO (2012)

A porosidade por sua vez, tem influência na impermeabilidade e conseqüentemente, na durabilidade das estruturas confeccionadas em concreto, contra agentes agressores ambientais (BOTELHO, 2012). A porosidade, segundo Cabral (2007) também está relacionada ao montante de água total da massa, que dependendo da quantidade, irá gerar mais poros por evaporação e micro-fissuras por retração.

Pergunta-se, por que se deve molhar peças de concreto, especialmente as mais planas como as Lajes? Como confirmado em Cabral (2007) as obras são conformadas ao ar livre durante a cura (ambiente pouco úmido) e uma vez que nelas, as peças não ficam submersas em água como os CPs em laboratório, estas absorvem a água atmosférica de forma desigual devido às suas geometrias e ao diferencial de mobilidade da água entre o interior e a superfície das peças. Com o acúmulo de água confinada no interior das peças mais, a perda rápida de água na superfície por evaporação, surge o efeito da retração nas mesmas, havendo o aparecimento de fissuras de forma desigual em suas superfícies, no processo de

endurecimento. Isto influencia diretamente na durabilidade do concreto (CABRAL, 2007; BOTELHO, 2012; LAPA, 2008).

Também deve-se levar em conta que as peças de concreto estão ancoradas em geometrias diferentes, o que propicia o surgimento de esforços desiguais durante a retração e o endurecimento, potencializando ainda mais as fissuras, tanto maiores quanto mais geometricamente heterogênea for a estrutura (LAPA, 2008).

Segundo conclusão de Cabral (2007) o uso de RCDs em concretos obriga a um controle maior do processo de produção das peças de concreto, uma vez que estes absorvem mais água de mistura, elevando o fator a/c e assim, à maior porosidade externa e interna dos concretos. Isto implica diretamente na durabilidade do concreto durante sua vida útil (CABRAL, 2007).

As vantagens do concreto como material de construção segundo Smith (2012) são: a resistência mecânica, a trabalhabilidade, é moldável à formas, econômico, durável, resistente ao fogo e tem boa aparência estética final.

5.4.2 Morfologia Química da Argila

Tecnicamente, a “argila” é uma amálgama de compostos de silicatos terrosos contendo cátions básicos. Segundo Meira (2001) as argilas são compostas basicamente por oxigênio em combinados de óxidos como os de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3), magnésio (MgO), cálcio (CaO), potássio (K_2O) e sódio (Na_2O) entre outros compostos em quantidades menores, cuja granulometria é inferior a 2 microns (MEIRA, 2001; PEREIRA, 2008).

Suas formas mineralógicas comuns encontradas na crosta terrestre são: albita; atalpigita; caulinita; clorita; poligorsquita; montmorelonita; moscovita; saponita; sepiolita; saponita e vermiculita (PEREIRA, 2008; PEREIRA, 2008; POPP, 2012).

Diversas são as suas aplicações e a sua obtenção dependerá da disponibilidade, distância e proporção de seus constituintes, sendo utilizadas em grande escala pela indústria cerâmica de pisos e revestimentos (PEREIRA, 2008).

5.4.3 Morfologia Química do Revestimento Cerâmico

As cerâmicas queimadas e parcialmente vitrificadas, são utilizadas em áreas úmidas das construções. Elas permitem o isolamento hidráulico entre a água (uso ou limpeza) e o cômodo, mantendo os pisos e paredes deste, protegidos contra a ação reativa da água, que poderia degradá-los ao longo do tempo, além de ocasionar problemas de saúde aos humanos e também problemas de estética das paredes e pisos do cômodo. Elas se apresentam basicamente em dois tipos de conformação: cerâmica para pisos chamadas de “ piso cerâmico” e cerâmica para paredes chamadas de “revestimento cerâmico”.

As cerâmicas são argilominerais misturados e conformados nas proporções, geometria e dimensões necessárias à aplicação do revestimento ou piso pretendido e passam por um forno onde há a queima do material (HOLANDA, 2005).

Sua constituição química básica, segundo estudos de Holanda (2005) é a indicada na Tabela 6.

Tabela 6 - Elementos Constituintes da Cerâmica

Tabela de Elementos Constituintes da Cerâmica	
Substância	Percentual em Massa
Argila	70%
Calcário	15%
Quartzo	10%
Talco	5%

Fonte: (HOLANDA, 2005)

As várias formas do processo de mistura e de queima, darão as propriedades específicas conforme a aplicação da cerâmica (OLIVEIRA, 2000).

Segundo Oliveira (2000) os percentuais dos materiais argilosos que podem compor as matérias-primas para a produção de cerâmicas variam conforme o processo a ser empregado para aplicações específicas. A Tabela 7 elaborada por Oliveira (2000) mostra os constituintes e processos de queima (1 a 4) na fabricação de dois tipos de cerâmica, Monoporosa (1=branca; 2=vermelha) ou Bi-Queima rápida (3=branca; 4=vermelha).

Tabela 7 - Percentuais de componentes na fabricação das cerâmicas

Óxidos Constituintes	Massas %			
	1	2	3	4
SiO ₂	65,4	54,8	60,3	59,4
Al ₂ O ₃	12,9	16,0	13,4	11,6
K ₂ O	0,72	2,40	1,20	2,50
Na ₂ O	0,19	1,00	0,25	2,00
CaO	7,00	8,10	9,40	5,80
Fe ₂ O ₃	0,53	4,90	1,90	4,60
TiO ₂	0,29	0,90	0,57	0,63
MgO	1,30	0,80	0,31	3,10
Perdas em Forno	11,7	11,3	12,8	10,4

Fonte: OLIVEIRA, 2000

Segundo Oliveira (2000) as massas argilosas que formarão as cerâmicas de revestimento na fase de prensagem, por exemplo, são submetidas a pressões que variam de 200kgf/cm² (20MPa) a 250kgf/cm² (25MPa). Sua conformação, após a queima, pode ter as seguintes características (SMITH, 2012): tensão de compressão de 100 à 1000MPa; tenacidade à fratura de 0,5 a 6 (MPa/m^{-1/2}). Cerâmicas monoporosas apresentam peso específico menor que o dos agregados naturais mas boa dureza, podendo as sobras, serem utilizadas como agregado em concretos e argamassas. A Cerâmica utilizada neste trabalho foi a do tipo monoporosa, fragmentada em forma de agregado graúdo, sendo categorizada como agregado de resíduo misto (ARM) classe A, conforme item 5 na norma NBR15116 (2004).

5.4.4 Procedimentos das Normas de Engenharia

A seguir, são descritos resumidamente, os procedimentos conforme as normas ABNT, relativos às técnicas usadas neste trabalho para a produção do compósito além dos ensaios (resistência mecânica e absorção de água).

5.4.4.1 Características das Fôrmas – NBR5738

Os moldes usados foram de aço dentro do padrão da norma, com superfícies lisas e antiaderentes, base com Ø10cm e altura de 20cm, inertes ao cimento e de boa resistência mecânica ao processo repetitivo de moldagem e desmoldagem. Os moldes são equipados com dispositivo para fechamento lateral capaz de vedar a saída do material e também permite serem abertos após 24h, para que o CP de concreto saia facilmente, conforme itens 4.1 e 4.1.3 da norma (NBR5738, 2003).

5.4.4.2 Preparação dos Moldes

As formas dos CPs foram limpas e sua superfícies internas cobertas com poucas camadas de óleo para facilitar sua desmoldagem, conforme procedimento da norma (NBR5738, 2003).

5.4.4.3 Mistura do Concreto e Moldagem dos Corpos de Prova

Efetuuou-se a mistura e homogeneização do concreto na betoneira, para cada traço de adição cerâmica programada, fazendo-se periodicamente o teste de *slump*, até se obter a valor de abatimento programado. O concreto foi depois, envasado nos moldes obedecendo-se ao procedimento de compactação, conforme o item 5.4.4.4 da norma (NBR5738, 2003).

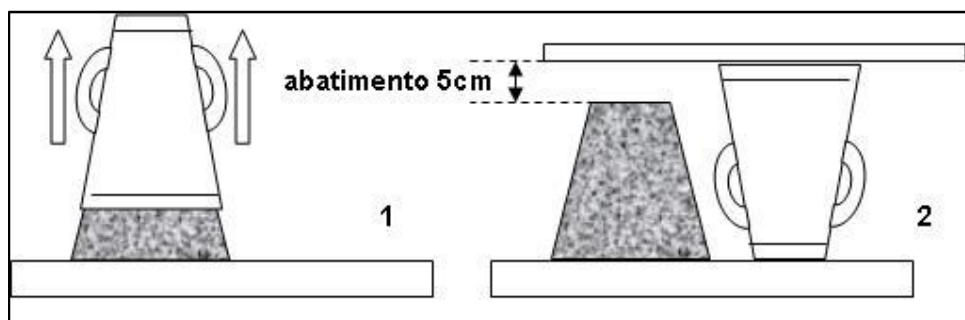
5.4.4.4 Adensamento

Foi efetuado o adensamento manual do concreto nas fôrmas (Ø10cmx20cm) com uma barra de aço cilíndrica (60cm e Ø1,5cm) com pontas arredondadas. A compactação (Tabela 1 da NBR5738) foi feita efetuando-se 12 punções, em rotação circularmente, a 50% de preenchimento do molde e outras 12 a 100%. Efetuou-se algumas pancadas laterais para que os vazios fossem preenchidos por escoamento. Preencheu-se a última camada até o transbordo do molde, fazendo-se então, o rasamento do topo com colher de pedreiro (itens 7.2 , 7.4, 7.4.2.2 e 7.4.2.3 - NBR5738, 2003).

5.4.4.5 Método de Abatimento (*Slump* - NM67)

O propósito deste teste é verificar o ponto de plasticidade que permita o concreto adaptar-se e preencher corretamente as fôrmas. Fez-se o preenchimento de um cone aço (padronizado pela NM67, 2003) com o concreto produzido para as adições cerâmicas. O cone foi então, içado verticalmente pelas alças, evitando-se vibrações para o concreto formar uma torre cônica por gravidade (Figura 5). O cone foi então colocado invertido ao lado da torre. A barra de aço usada na compactação, foi colocada na horizontal sobre a boca do cone, com sua projeção ficasse paralela em relação ao topo da torre. Com uma fita métrica, mediu-se a distância (em centímetros) da linha inferior da barra até o topo da torre. O abatimento visado foi de $6\text{cm} \pm 1\text{cm}$ (premissa do projeto) conforme item B da norma NM67 (que permite variação de 3cm a 15cm). Obteve-se então, a medida de abatimento de 5cm conforme item 7.4.1 da norma (NBR5738, 2003; NM67, 2003; BOTELHO, 2012).

Figura 5 - Teste de *Slump*



Fonte: Autor

Base de técnica: BOTELHO (2012)

5.4.4.6 Local de Armazenagem dos CPs

O traslado dos moldes com concreto, foi efetuado evitando-se impactos e vibrações, sendo acondicionados rapidamente sobre o piso plano e fechado do laboratório, em repouso (umidade do ar de $\approx 60\%$, à temperatura de 24° a 27° , à luz ambiente) para propiciar a 1ª cura (24h após o envasamento) para evitar adulteração da homogeneidade, conforme itens 7.6 e 8.1.1 da norma (NBR5738, 2003).

5.4.4.7 Lançamento na Câmara Úmida

Antes da imersão na câmara úmida, procedeu-se à identificação dos CPs (item 8.2.3 da norma). Logo em seguida procedeu-se a imersão dos CPs na câmara úmida, à 100% de umidade relativa (submersos em tanque de água parada) à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e conforme item 8.2.2 da norma (NBR5738, 2003).

5.4.4.8 Base dos CPs para Ensaio de Resistência Mecânica

Para os CPs onde houvesse necessidade de retificação do topo e base dos mesmos foi feito o procedimento de ajuste itens 9.3 até 9.4 da norma (retificação e planificação das bases sem saliências ou protuberâncias com pasta de cimento) para que o ensaio axial tivesse o perfeito encaixe do CP com as placas de pressão dos braços da prensa, proporcionando a ação uniforme da força de compressão conforme itens 9.1 a 9.4 da norma (NBR5738, 2003).

5.4.4.9 Ensaio Mecânicos - Rompimento a “n” dias de Cura

Conforme a programação de rompimento, 5 CPs foram retirados da câmara úmida e levados imediatamente para a sala de ensaio de resistência mecânica, conservados a $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de 40% a 60%. Os CPs foram rompidos na prensa hidráulica, sendo feitos os rompimentos aos 14, 21 e 28 dias de cura, conforme item 5 da norma (NBR5739, 2007).

5.4.4.10 Índices de Absorção d'água e Vazios - Pesos Específicos

Para os ensaios de absorção de água e do índice de vazios, os CPs foram pesados e depois secos em estufa a 105°C por 72h. Os CPs foram retirados para resfriamento à temperatura ambiente (23°C) e pesados novamente registrando-se a massa dos CPs para referência. Logo após, os CPs foram submersos em tanque

d'água para saturação, onde efetuou-se pesagem dos mesmos em períodos que foram de 24h, 48h e 72h (sempre enxugando a superfície dos CPs antes das pesagens). Feita estas pesagens emersas, os CPs foram novamente imersos por mais 72h para saturação, para o ensaio de absorção de água (NBR9778, 2009).

Após este período, os CPs foram levados para um tanque com água, próximo à balança de precisão Welmy, adaptada para pesagem hidrostática (Fotografia 53). Procedeu-se então, a imersão total de cada CP das adições, no prato da balança hidrostática, sendo feita a medição do peso imerso de cada um. Com estas pesagens registradas, executaram-se os cálculos para obtenção dos seguintes resultados, que poderão ser vistos mais adiante na seção 6.3 (NBR9778, 2009):

1. Índice de absorção de água;
2. Pesos específico dos CPs a seco;
3. Pesos específico dos CPs saturados de água;
4. Pesos específico real dos CPs;
5. Índice de vazios (lv).

5.5 LABORATÓRIOS E EQUIPAMENTOS

Nesta seção, são listados os equipamentos do UniFOA, usados na preparação e produção do compósito. Laboratório de Eng.^a Civil (armazenagem, preparação, conformação e ensaios) conforme as normas (NBR5738,2003; NBR5739, 2007). Laboratório de Materiais - CIT (análises morfológica e química).

5.5.1 Equipamentos de Moagem e Peneiramento

A seguir, listam-se os equipamentos utilizados no Laboratório de Engenharia do UniFOA (Fotografia 5 à 9) usados para efetuar a moagem da cerâmica e peneiramento dos materiais.

Fotografia 5 - Cavadeira de ferro para moagem do Revestimento cerâmico



Fonte: Autor

Fotografia 6 - Cadinho para moagem do Revestimento Cerâmico



Fonte: Autor

Fotografia 7 - Granulômetro marca Helvan modelo DM



Fonte: Autor

Fotografia 8 - Granulômetro marca Manupen de alta capacidade



Fonte: Autor

Fotografia 9 - Peneiras marca Soloteste Ø: 9.5mm e 19mm



Fonte: Autor

5.5.2 Equipamentos de Mistura e Dosagem do Concreto

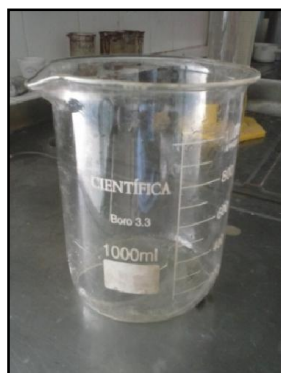
No laboratório de Engenharia do UniFOA foram utilizados os equipamentos a seguir (Fotografia 10 e 11) para efetuar a mistura e conformação do compósito de concreto.

Fotografia 10 - Betoneira marca Menegotti modelo 150 litros



Fonte: Autor

Fotografia 11 - Becker graduado marca Científica para medição da água.



Fonte: Autor

5.5.3 Equipamentos para Conformação dos Corpos de Prova

Para envasamento e compactação do compósito, conformando os corpos de prova de concreto, foram utilizados os seguintes equipamentos do laboratório de Eng.^a do UniFOA, (Fotografia 12 à 15).

5.5.3.1 Fôrmas para conformação dos Corpos de Prova (CPs)

Foram utilizadas as fôrmas marca Soloteste (Fotografia 12) para envasamento, compactação, pré-cura dos CPs do compósito de concreto.

Fotografia 12 - Formas Soloteste - Cilíndricas base Ø10cm x altura 20cm



Fonte: Autor

5.5.3.2 Ferramental do Teste de *Slump* (Cone, Barra e Trena)

O cone de aço (Fotografia 13) do teste de *Slump*, utilizado para formar a torre de concreto e referência na medição do abatimento. A barra de aço (60cm x Ø1,5cm) foi utilizada para compactar tanto o concreto dos moldes como aquele dentro do cone (Fotografia 14) e também como ponto de referência da medição do abatimento (Fotografia 15). A fita métrica da trena foi estendida entre barra de aço e topo do cone, para leitura do valor do abatimento em centímetros (Fotografia 15).

Fotografia 13 - Cone e Prancha de Aço para o Teste de *Slump*



Fonte: Autor

Fotografia 14 - Barra de aço (60cm x Ø1,5cm)



Fonte: Autor

Fotografia 15 - Trena para medição do abatimento



Fonte: Autor

5.5.3.3 Tanque para Cura e Saturação de Água dos CPs de Concreto

No laboratório de Engenharia do UniFOA, foram utilizados os tanques da câmara úmida para submersão dos CPs (Fotografia 16) para :

- Cura até o período de ensaios mecânicos.
- Saturação de água para ensaio de absorção de água.

Fotografia 16 - Tanque de Cura e Saturação de Água (Câmara úmida)



Fonte: Autor

5.5.4 Equipamentos de Ensaio Mecânicos

No laboratório de Engenharia do UniFOA, foi utilizada a Prensa Hidráulica marca EMIC modelo T1000 (Fotografia 17) para efetuar os ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração, dos CPs de concreto.

Fotografia 17 - Prensa EMIC T1000 – Capacidade: 100MPa



Fonte: Autor

Local: Laboratório de Engenharia do UniFOA

5.5.5 Equipamento para o Ensaio de Absorção de Água

Para o ensaio de absorção de água, no laboratório de Engenharia do UniFOA foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Estufa de esterilização marca Odontobrás modelo 1.5 (Fotografia 18).
- Tanque de submersão de CPs em água (Fotografia 16).
- Balanças de precisão marca BEL e Welmy (Fotografia 19a e 19b).

Fotografia 18 - Estufa Odontobrás - Secagem de CPs à 105°C



Fonte: Autor

Fotografia 19 - Balanças de precisão (a) e (b) para pesagem dos CPs



a) Balança BEL



b) Balança Welmy

Fonte: Autor

5.6 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS DO COMPÓSITO

Esta etapa trata dos procedimentos de preparação dos materiais usados na conformação do compósito com aditivado cerâmico, conforme NBR7211(2005).

5.6.1 Moagem da Cerâmica

Para moagem do rejeito cerâmico (Fotografia 20) devido à falta de um moinho mecânico, indisponível nas instalações da UniFOA, foi utilizado o método manual usando cavadeira de aço (Fotografia 5) fragmentando a cerâmica dentro de cadinho metálico (fôrma de aço de CP de 15cm x 30cm em desuso - Fotografia 6).

Fotografia 20 - Rejeitos de Cerâmica de Revestimento



Fonte: Autor

À medida em que a cerâmica (Fotografia 20) foi fragmentada, seus cacos foram armazenados em bandejas de aço (Fotografia 21) à espera do peneiramento.

Fotografia 21 - Cerâmica após moagem sem peneiramento



Fonte: Autor

5.6.2 Peneiramento dos Materiais

Para o peneiramento da cerâmica, areia e da brita, foram utilizados dois tipos de granulômetro do laboratório de Eng.^a do UniFOA. Um granulômetro marca Manupen (Fotografia 8) de alta capacidade, e um de baixa capacidade marca Helvan, modelo DM (Fotografia 7) combinado com um conjunto de peneiras marca Soloteste (Fotografia 9).

5.6.2.1 Peneiramento da Cerâmica

A cerâmica moída (Fotografia 21) foi passada pelas peneiras de Ø9,5mm a Ø19,0mm (Fotografia 24) no granulômetro Manupen (Fotografia 22) e depois pelas peneiras Soloteste (Fotografia 23) para maior controle (NBR7211, 2005). Amostras foram colhidas para análise MEV e DRX, nas secções 5.10 e 5.11.

Fotografia 22 - Peneiramento da Cerâmica no granulômetro Manupen



Fonte: Autor

Fotografia 23 - Conferência do Peneiramento (granulometria)



Fonte: Autor

Fotografia 24 - Cerâmica já peneirada ($\varnothing 9,5\text{mm}$ a $\varnothing 19,0\text{mm}$)



Fonte: Autor

5.6.2.2 Peneiramento da Brita

Utilizou-se as britas N° 1 (0,5 a 19mm) e N° 2 (19 a 38mm) pré-selecionadas em sacos de 20kg. Mesmo assim, fez-se novo peneiramento (Fotografia 25) garantindo a granulométrica passante ($\varnothing 9,5\text{mm}$ a $\varnothing 38\text{mm}$) e remoção de eventuais impurezas. Utilizou-se o granulômetro Manupen para o peneiramento (NBR7211, 2005). Foram colhidas amostras para análise DRX na seção 5.11.

Fotografia 25 - Peneiramento da Brita 1 e 2 no Granulômetro Manupen



Fonte: Autor

5.6.2.3 Peneiramento da Areia

Utilizou-se a areia média de leito de rio, já selecionada e pré-ensacada pelo fornecedor em sacos de 20 kg. Efetuou-se novo peneiramento da areia para garantir a granulometria passante ($\text{Ø}1,8$ à $\text{Ø}2,0\text{mm}$). Para o peneiramento, utilizou-se o granulômetro Helvan (Fotografia 26) e posteriormente a peneira Soloteste de $\text{Ø}2\text{mm}$ (Fotografia 27) para remoção de eventuais impurezas (NBR7211, 2005). Foram colhidas amostras para análise DRX na seção 5.11.

Fotografia 26 - Peneiramento preliminar - remoção de Impurezas da areia



Fonte: Autor

Fotografia 27 - Peneiramento da Areia – Granulometria $\text{Ø}2\text{mm}$



Fonte: Autor

5.6.3 Estimativa de Quantidade - Premissas - Traços do Compósito

Conforme o planejamento inicial, foram preparados CPs para cada uma das adições de 5%, 10%, 15% e 20% além do percentual de referência de 0% de substituição do agregado graúdo padrão por cerâmica, obtendo-se a quantidade (Tabela 8 e Tabela 9) suficiente para os ensaios, conforme os períodos de rompimento programados (14, 21, 28 dias de cura) (NBR5739,2007).

Tabela 8 - Estimativa de Quantidade de CPs por Traço a produzir

Qt. Mínima	Destino	Equipamento
5 CPs x 3 datas	Ensaio de compressão (axial 14, 21, 28dd).	Prensa Hidráulica
3 CPs x 1 data	Ensaio de tração (diametral 28dd)	Prensa Hidráulica
2 CPs	Ensaio absorção de água.	Estufa
2 amostras dos CP	Análise morfológica (0,5,10,15 e 20)%	MEV
2 amostras dos CP	Análise de mineralógica/química (0,5,10,15 e 20)%	DRX

Fonte: Autor

Base de orientação: NBR5738 (2003)

Tabela 9 - Estimativa de Quantidade mínima total de CPs a produzir

CPs	Destino (Ensaio / Análise)	Qt. Mínima	Qt. CPs x Qt. Rompimento x Qt. adições	Qt. CPs
CP	Compressão (axial 14, 21, 28dd).	15	5 x 3 x 5	75
CP	Tração (diametral 28dd).	5	5 x 5	25
CP	Absorção de Água.	2	2 x 5	10
Amostra	Obtidas das amostras dos CPs	2	2 x 5	10
Amostra	Obtidas das amostras dos CPs	2	2 x 5	10

Fonte: Autor

Base de orientação: NBR5738 (2003)

O traço unitário adotado foi o volumétrico na proporção de 1:2:3 (1 de cimento x 2 de areia x 3 de agregado graúdo) considerado este, um traço com custo benefício mediano, na engenharia. Estimado o abatimento em $6\text{cm} \pm 1\text{cm}$ para controle do fator a/c , que foi arbitrado mediano (0,65) para se obter a fluidez do concreto sem comprometer a resistência (25MPa) nem a trabalhabilidade (BOTELHO, 2012). Com estas definições arbitradas e a Tabela 9, foram então adotadas as premissas de conformação do compósito (Tabela 10) e a quantidade de material consumido para sua conformação (Tabela 11).

Tabela 10 - Premissas para Composição do Compósito

Premissas adotadas	Parâmetro Definido
Volume	L = Litro
Proporção do Traço	1 (Cimento) : 2 (Areia) : 3 (Brita + Cerâmica)
Fator água / cimento	≈ 0,65
Medida do Abatimento	6 cm ± 1 cm (meta pretendida = 5 cm)
Resistência à compressão pretendida	25MPa (Mega Pascal)
Quantidade estimada de consumo de Material / Traço	10 L - Cimento 20 L - Areia 30 L - Brita Aditivada 6,5 L - Água Potável
Quantidade mínimo de CPs por batelada	22 CPs (Ensaio compressão axial 14, 21 e 28dd) 05 CPs (Ensaio diametral à 28dd) 02 CPs (Ensaio de absorção de água)
Traços por Batelada (por adição %)	De 1 à 2 (conforme à quantidade mínima definida)

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012); NBR5738 (2003)

Tabela 11 - Proporção Teórica pretendida do Traço para as Adições

Adição (%)	Cimento <i>Portland</i> (L)	Areia (L)	Agregado Graúdo	
			Brita (L)	Cerâmica (L)
0	10	20	30,0	0,0
5	10	20	28,5	1,5
10	10	20	27,0	3,0
15	10	20	25,5	4,5
20	10	20	24,0	6,0

Fonte: Autor

Objetivou-se neste trabalho, avaliar a resistência mínima dentro dos padrões da engenharia, pretendendo-se produzir concreto com resistência $F_{ck} \geq 25\text{MPa}$ dividido pelo coeficiente de segurança do concreto ($\gamma_c = 1,4$) gerando $F_{cd} \geq 17,85\text{MPa}$ (resistência mínima de cálculo em projetos) além da adoção da condição “B” de preparo com desvio padrão “o” de aceitação $\leq 4\text{MPa}$ (simulando o rigor do concreto usinado) (NBR6118, 2004; NBR12655, 2006; BOTELHO, 2012).

5.7 CONFORMAÇÃO DOS CPs COM ADIÇÕES CERÂMICAS

Para a conformação dos CPs de concreto, foram utilizadas as orientações da norma NBR5738 (Moldagem cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, 2003) aplicadas às quantidades e proporções de materiais conforme as premissas especificadas no item 5.6.3 (Tabela 8 a Tabela 11)

Para compreensão global do processo de conformação, foi construído o Fluxograma 1 sob a orientação da norma (NBR5738, 2003).

Fluxograma 1 - Fluxo de conformação dos CPs



Fonte: Autor

Base Técnica: NBR5738 (2003)

Além do concreto padrão com 0% de adição, para cada uma das adições percentuais (5%, 10%, 15% e 20%) de substituição da brita por cerâmica de revestimento, repetiu-se o processo indicado no Fluxograma 1.

As cerâmicas foram previamente umedecidas para diminuir sua interferência desidratante na reação do cimento. Os Moldes foram untados previamente, com uma fina camada de óleo mineral (Fotografia 28) para que os CPs fossem facilmente removidos das fôrmas após a pré-cura de 24h (NBR5738, 2003). Os agregados miúdos e graúdos, além do cimento, foram preparados em separado conforme as adições previstas (NBR5838, 2003).

Fotografia 28 – Revestimento dos Moldes com Óleo



Fonte: Autor

Efetou-se a mistura da areia, brita e cerâmica por 5 minutos com 70% da água de amassamento, medida através do Becker graduado. O cimento foi então, adicionado à mistura com mais 20% da água. Retomava-se à mistura por mais 3 minutos (Fotografia 29). Para finalização da mistura ideal, a água foi adicionada de 200 e 200ml, com Becker graduado (marca Científica, Fotografia 30) para manter controle fino, evitando se ultrapassar o limite de fluidez e o a/c (NBR5738, 2003).

Fotografia 29 - Mistura do concreto na betoneira



Fonte: Autor

O concreto (Fotografia 29) foi misturado, adicionando-se gradualmente a água planejada restante (Fotografia 30). Quando se iniciou a consistência em cascata fluida na betoneira, esta foi parada para se efetuar o teste de *Slump* (para controle do fator “ a/c ” - Fotografia 31).

Fotografia 30 - Controle do a/c (adição de Água) com Becker graduado



Fonte: Autor

Fotografia 31- Teste de *Slump* - Aferição do abatimento

Fonte: Autor

O fator a/c (água / cimento) influencia na resistência e na durabilidade do concreto. Faz-se o controle da quantidade de água adicionada em mililitros com um Becker graduado, durante a mistura do concreto. Obtendo-se o abatimento de 5cm, confere-se calcula-se o a/c pela Equação 5.1. Visou-se a adição do mínimo possível de água, evitando-se adicionar mais cimento e procurando mantendo o fator a/c próximo de 0,65 (Tabela 10) (BOTELHO, 2012).

$$a/c = \frac{\text{Volume de Água}}{\text{Volume de Cimento}}$$

(5.1)

Deve-se ter o controle preciso do fator “a/c” pois quanto mais água adicionada, menor será o F_{ck} (resistência característica do concreto). Neste caso poderia se aumentar a quantidade de cimento, mas como este último é o material mais caro do concreto, onera-se o custo da obra (BOTELHO, 2012).

No processo de mistura do traço, repetiu-se adições de água sempre de 200ml em 200ml até atingir ponto de cascata fluida na betoneira, parando-se a mesma (Fotografia 31) para se aferir se medição do abatimento já indicava 5cm ($6\text{cm} \pm 1\text{cm}$) conforme premissa definida na Tabela 10. Repetiu-se o teste de *Slump* de 1 a 2 vezes (NBR5738, 2003). Notou-se que, na maioria dos traços, foi necessária a adição de mais água que o previsto, aparentemente devido à maior absorção dos agregados cerâmicos.

Findo o processo de mistura, a betoneira era desligada efetuando-se então, o envasamento (Fotografia 32) do concreto nos moldes. Cada molde cilíndrico de $\varnothing 10\text{cm}$ (base) x 20cm (altura) foi preenchido (Fotografia 33) em dois lances de 50% de sua altura. Cada lance do compósito foi compactado com a barra de ferro (Fotografia 14) efetuando-se 12 punções circulares até haver o transbordo superior do material (NBR5738, 2003).

Efetuuou-se o nivelamento do concreto no topo molde (Fotografia 32) com colher de pedreiro, para que a superfície ficasse lisa (NBR5738, 2003).

Fotografia 32 - Envasamento e Compactação do Concreto nos Moldes



Fonte: Autor

Após o envasamento, os CPs foram armazenados dentro do laboratório de Engenharia, abrigados sobre piso plano, sem vibrações (temperatura ambiente de $25^{\circ} \pm 2^{\circ}$ e umidade entre 40% e 60%) para pré-cura de 24h (Fotografia 33a).

Fotografia 33 - a) CPs conformados



b) Desmoldagem



Fonte: Autor

Após as 24h do envasamento do compósito nos moldes, estes foram desmoldados (Fotografia 33b) identificados e colocados submersos na posição vertical, dentro de tanques d'água na câmara úmida (Fotografia 34). Os CPs permaneceram no tanque até o início dos ensaios mecânicos programados, conforme Fluxograma 1, deste trabalho.

Fotografia 34 - CPs imersos em Tanque d'água, após 24 de Cura



Fonte: Autor

5.7.1 Execuções dos Traços com Aditivo Cerâmico

Na adição de 5%, foram feitos 1,5 traços com previsão de 9 litros de água, mas foi necessário mais 600 ml para que a mistura atingisse o abatimento previsto (Tabela 10) devida a baixa umidade do ar, o que foi obtido com 9,6 litros (Tabela 12). A trabalhabilidade do concreto só foi obtida com a adição dos 600ml.

Na adição de 10% de aditivo cerâmico, foi feita uma betonada com 2 traços com previsão de 12 litros de água, mas foi necessário mais 1 litro para que a mistura atingisse o abatimento previsto (Tabela 10) devida a baixa umidade do ar, o que foi obtida com 13 litros (Tabela 12). Houve pouca dificuldade na trabalhabilidade.

Na adição de 15% cerâmico, foi feito traço com medida de 1 litro, com previsão de 6 litros d'água, sendo preciso mais 500ml para a mistura atingir o abatimento previsto (Tabela 12). A trabalhabilidade se reduziu mais que a de 10%.

Na adição de 20%, foi feito 1 traço e a previsão de 6 litros de água, com pelotização no 2º amassamento e foi necessário mais 700ml para que a mistura atingisse o abatimento previsto (Tabela 10 e Tabela 12). A trabalhabilidade foi difícil.

Na composição de 0% de aditivo cerâmico, foram feitos 2 traços, com medida de 1,8 litros, com previsão de 8 litros d'água, mas foram necessários apenas 7 litros para atingir o abatimento previsto (Tabela 10 e Tabela 12).

Percebeu-se que, mesmo a cerâmica sendo previamente hidratada com água, o fator a/c aumentou gradualmente quanto maiores foram a absorção hídrica e percentual de cerâmica. No traço de 20% durante a 2ª fase de hidratação da mistura, houve por pouco tempo, a pelotização, denotando rápida absorção da água pela cerâmica. A Tabela 12 mostra os traços comparados ao que foi programado.

Tabela 12 - Proporções reais produzidas do Compósito (volume em L=Litros)

Adição %	Traços (un.)	Becker (L)	Cimento (L)	Areia (L)	Agregado graúdo (L)	Água (L)	Fator a/c (%)	Total CPs (Un)
0	2,0	1,80	10,8	21,6	32,4	7,2	0,66	22
5	1,5	1,00	15,0	30,0	45,0	9,6	0,64	22
10	2,0	1,00	20,0	40,0	60,0	13,0	0,65	28
15	1,0	1,25	10,0	20,0	30,0	6,5	0,65	22
20	1,0	1,25	10,0	20,0	30,0	6,70	0,67	22

Fonte: Autor

5.8. ENSAIOS

Esta etapa trata dos ensaios de resistência mecânica (NBR5739, 2007) absorção de água (NBR9778, 2003) análise morfológica através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de fases por difratometria de raios X (DRX).

5.8.1 Ensaios de Resistência à Compressão e à Tração

Foram realizados ensaios de resistência a compressão (axial) e tração (diametral). O CP foi submetido à compressão via prensa hidráulica, até o seu rompimento com o registro da tensão (ABNT NBR5739, 2007). Para os ensaios de compressão (Fotografia 35) e tração (Fotografia 39) foi utilizada a prensa hidráulica marca EMIC, modelo T1000, com capacidade máxima para até 100MPa de tensão (uso normal até 60MPa devido à questão de segurança).

Fotografia 35 - Preparação da Prensa EMIC para Ensaio de Compressão



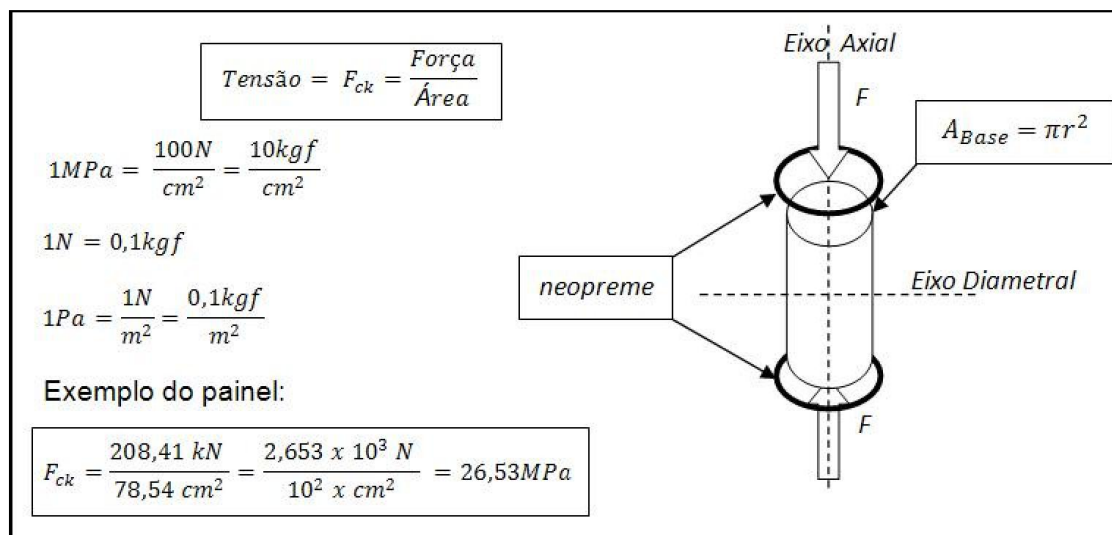
Fonte: Autor

5.8.1.1 Ensaio de Resistência à Compressão (axial)

Este ensaio visou obter a resistência característica à compressão do concreto (F_{ck}) de cada CP. Explicando teoricamente, uma força vertical em kN (quilo Newton) é aplicada sobre as bases superior e inferior do CP. Esta, é dividida pela área de contato das bases (Figura 6) em "cm²" do CP, sendo o mesmo valor aplicado tanto na base inferior como na superior, gerando assim o esforço de compressão. A tensão

(pressão) de ruptura é calculada em kN/cm^2 ou transformada para MPa (Mega Pascal) sendo esta última unidade, a adotada na engenharia atual.

Figura 6 - Teoria do Cálculo no Ensaio de Compressão Axial.



Fonte: Autor

Base teórica de cálculos: (BOTELHO, 2012 ; GIECK, 1976)

Para um exemplo ilustrativo da tensão obtida na prensa (Fotografia 37) e para termos noção em “toneladas”, calculou-se a tensão nas Equações 5.2 e 5.3 (BOTELHO,2012).

$$F_{ck} = \frac{208,41\text{ kN}}{78,54\text{ cm}^2} = \frac{2,653\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 10 = 26,53\text{MPa}$$

(5.2)

$$F_{ck} = \frac{2,653 \times 10^3 \times 10^{-1}\text{ kgf}}{\text{cm}^2} = \frac{265,3\text{ kgf}}{\text{cm}^2} = \frac{265,3 \times 10^{-3}\text{T}}{\text{cm}^2} = 0,27\text{ T/cm}^2 \uparrow$$

(5.3)

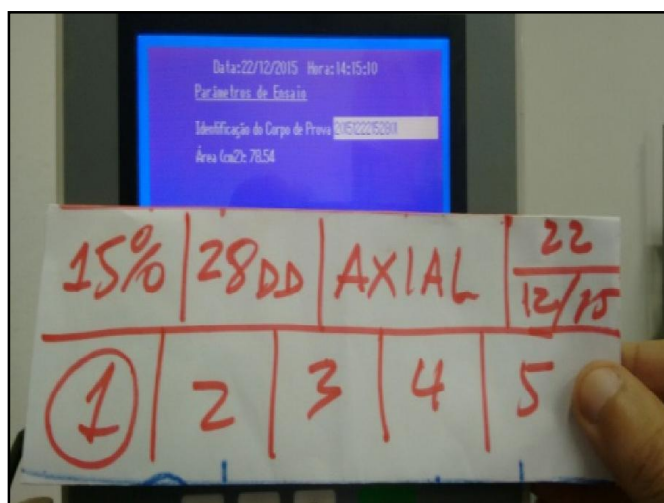
Apesar de não se usar a unidade MPa (Mega Pascal) no dia à dia, é padrão trabalhar com as “forças” em N (Newton) e as “tensões” em MPa (Mega Pascal) na engenharia atual. Nas equações de cálculos (5.2 e 5.3) pode-se ter uma idéia da ordem destas forças, se comparadas ao kgf (ou à tonelada). O kgf é a unidade de massa “kg” multiplicada por $\approx 10\text{m/s}^2$ (aceleração da gravidade) que define o peso dos objetos, mais conhecida no dia à dia, fora da notação técnica (GIECK, 1976).

Inicialmente preparou-se a prensa com o conjunto de ferramental para permitir o ensaio de compressão axial, com a montagem da punção metálica superior na rótula superior (fixa) e a montagem da punção inferior na base inferior (móvel) da prensa. Esta montagem permitiu o posicionamento verticalmente do CP entre as punções superior e inferior (Fotografia 35). Antes do rompimento, duas juntas metálicas de neopreme foram encaixadas nas bases superior e inferior de cada CP. As juntas de neopreme têm a função de transferir a força aplicada pelo punções superior e inferior, sobre o CP, evitando o desgaste das duas punções da prensa, quando do atrito e impacto do rompimento do corpo de prova.

Antes de cada rompimento do CP, procedeu-se a inserção dos parâmetros de ensaio no painel digital da prensa (Fotografia 36) com os dados a seguir:

- Identificação: ano + mês + dia + adição + dias de cura + N° CP
- Dimensão da área da base do CP ($\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$) valor fixo: $78,54 \text{ cm}^2$

Fotografia 36 - Registro de dados do ensaio de compressão no Painel Digital



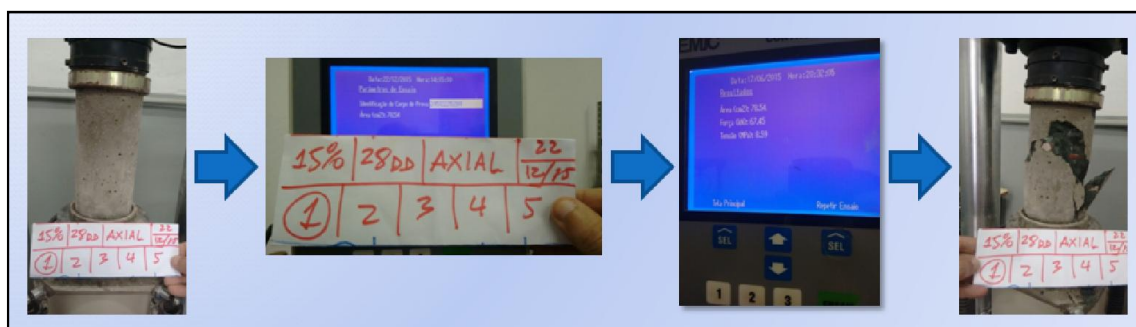
Fonte: Autor

Confirmadas a identificação e a área, liberou-se a pressão, através de mecanismo de injeção de óleo na câmara de pressão. Esta pressão gerou força na base pistão inferior, que fez subir verticalmente o conjunto neopreme inferior e CP, até que o neopreme superior encostasse na face inferior da punção superior (direção do eixo axial, Figura 6). A partir deste ponto, a prensa continuou gerando força no conjunto, comprimindo o CP de baixo para cima até seu rompimento.

O sensor de pressão do painel digital da prensa, registrou a tensão máxima

de rompimento de cada CP (Fotografia 37) e sinalizando (visualmente) para o operador para aliviar a pressão manualmente, fazendo com que o pistão inferior descesse à posição inicial. Registrou-se as fotos dos CPs antes e após os rompimentos além das tensões obtidas.

Fotografia 37 - Seqüência de Rompimento - Ensaio de Compressão Axial



Fonte: Autor

Local: Laboratório de Engenharia UniFOA

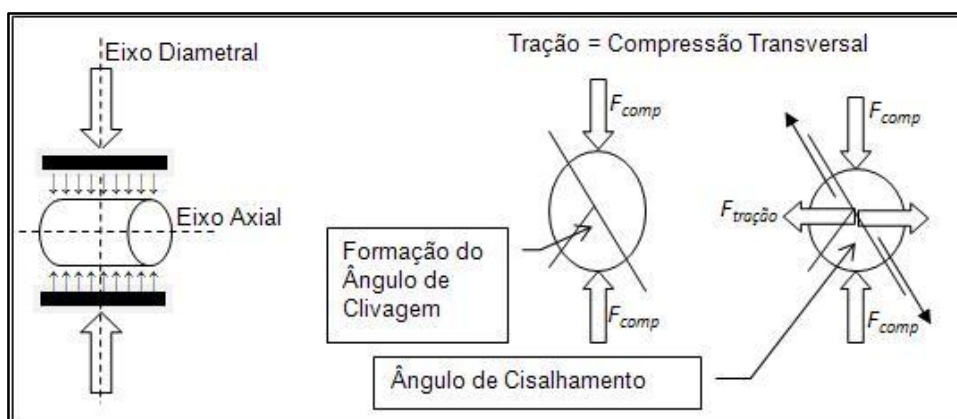
Segundo Botelho (2012) a resistência média à compressão (F_{ck}) considerada a faixa base para cálculos de Eng.^a é de $\approx 27,5$ MPa. Este F_{ck} médio de engenharia foi o adotado neste trabalho, como sendo a 1^a referência de resistência a compressão (F_{ck}) para o compósito. A 2^a referência, obtida com a adição 0% não gerou o resultado previsto (30MPa) por isto foi descartada como referência. A 3^o referência foi o valor estatístico de F_{ck} de 25MPa, muito utilizado para obras de baixo e médio porte (BOTELHO, 2012) e tornou-se a 2^a referência.

5.8.1.2 Ensaio de Resistência à Tração (diametral)

Explicando teoricamente o ensaio de tração (compressão diametral) o CP é submetido a uma força de compressão aplicada na direção transversal (eixo diametral, ver Figura 7 a seguir) perpendicular ao eixo axial (maior dimensão) do CP.

As punções superior e inferior da prensa, geram força sobre as duas placas de aço tangentes às bordas superior e inferior do CP, produzindo esforço de compressão vertical nas laterais inferior e superior do CP. Esta força é transferida internamente pelas partículas do CP, como força de tração horizontal que provoca o surgimento de um ângulo lateral preferencial chamado “clivagem” (de menor resistência) rompendo o CP por cisalhamento (BOTELHO, 2012).

Figura 7 - Teoria do ensaio de Tração (compressão Diametral)



Fonte: Autor

Base teórica: BOTELHO (2012)

O concreto tem pouca resistência à tração (10 vezes menor que à compressão) sendo esta, pouco relevante nas avaliações de resistência pois o esforço de tração nas estruturas fica a cargo da armadura de aço (concreto armado). Mas para efeito didático registraram-se os F_{tk} (tração característica do concreto) obtidos apenas para os 28 dias de cura (NBR5739, 2007).

A prensa foi re-configurada com o conjunto ferramental de ensaio de tração, com dois suportes com placas metálicas horizontais, um sobre o pistão inferior e outro na rótula superior (Fotografia 39). O CP foi colocado entre essas placas, na horizontal (Fotografia 39) alinhado ao eixo axial no centro das placas (NBR5739, 2007). No painel digital da prensa (Fotografia 38) foi definida a identificação do CP. A área foi mantida sem valor, já que neste ensaio, a força será aplicada na tangente de contato (Fotografia 39) das laterais superior e inferior do CP (NBR5739, 2007): Identificação: ano + mês + dia + adição + dias de cura + N° CP.

Fotografia 38 - Identificação do CP no Painel - Ensaio de Tração



Fonte: Autor

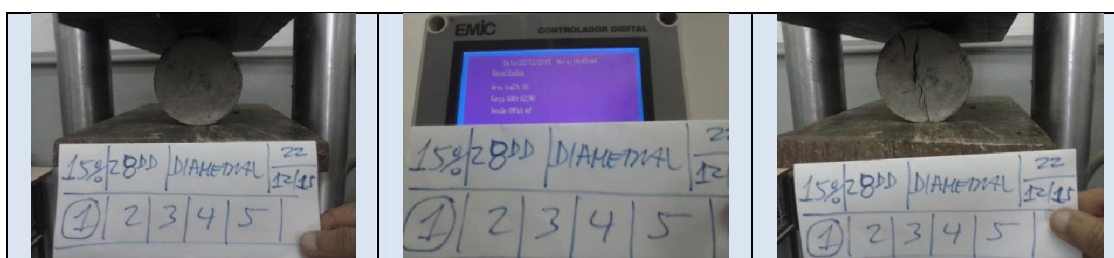
Fotografia 39 - Placas da prensa comprimindo no CP - Ensaio de Tração



Fonte: Autor

Confirmada a identificação, foi liberada a pressão (através de mecanismo de injeção de óleo) aplicando força no pistão inferior. Esta pressão gerou força ascendente, elevando verticalmente o conjunto da placa inferior e o CP, até que a lateral superior deste encostasse na placa superior (Fotografia 40a). A prensa continuou gerando força na placa inferior, comprimindo o CP de baixo para cima contra a placa superior, até seu rompimento (Fotografia 40c). Via sensor de pressão, o painel digital do computador da prensa registrou a tensão máxima de rompimento, sinalizando o momento de parada, desligando-se a pressão fazendo com que pistão inferior descesse e voltasse a sua posição inicial. O painel digital (Fotografia 40b) registrou a tensão máxima (NBR5739, 2007).

Fotografia 40 - Seqüência de Rompimento - Ensaio de Tração (Diametral)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

c) CP rompido

Fonte: Autor

5.8.2 Pré-ensaios de Compressão do Compósito - Adições 10% e 20%

Neste trabalho efetuou-se uma conformação de pré-ensaio, com 44 CPs de duas adições de cerâmica (10% e 20%) confeccionados e rompidos conforme a norma (NBR5738, 2003; NBR5739, 2007) com as seguintes finalidades:

1. Determinar se o fator a/c experimental arbitrado de $\approx 0,6$, geraria boa plasticidade com abatimento previsto de $6\text{cm} \pm 1\text{cm}$. Se conseguido seria considerado o fator a/c para os ensaios definitivos.
2. Determinar o valor limite superior de percentual de adição, com resistência à compressão com perda $>10\%$ do Fck padrão (27,5MPa) além do qual, não compensaria confeccionar adições percentuais superiores ao mesmo.

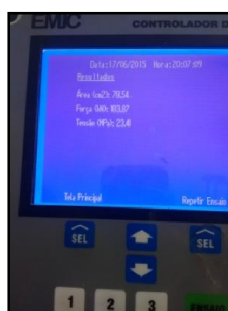
Os CPs de 10% e 20% de adição foram rompidos (Fotografia 41) e suas resistências obtidas na prensa (Ex.: Fotografia 41a, 41b e 41c). Armazenados os CPs rompidos no Laboratório até destino definitivo. Coletadas amostras para análises do MEV e DRX.

Os resultados obtidos do fator a/c final e a confirmação se o percentual limite ser adição de 20% foram colocados na Tabela 23, seção 6.2.5.

Fotografia 41 - Seqüência de Rompimento do Pré-ensaio de Compressão Axial



a) CP sob pressão



b) Medição do limite de ruptura



c) CP rompido

Fonte: Autor

5.8.3 Ensaios Definitivos de Compressão e Tração do Compósito

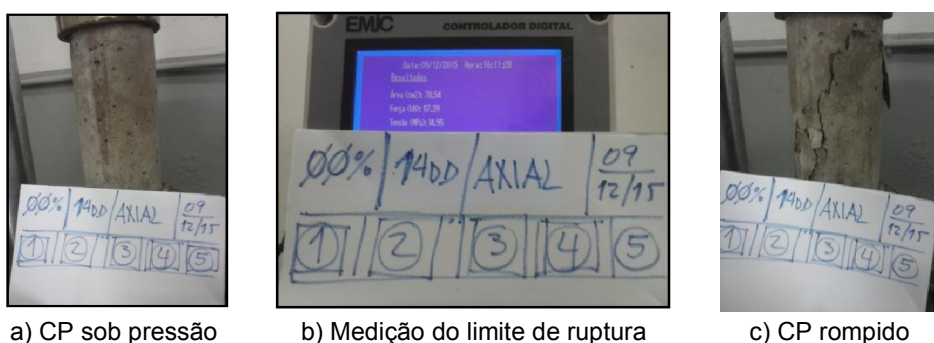
Efetuosos os ensaios de compressão axial nas datas de 14, 21 e 28 dias de cura. O ensaio de tração (diametral) por ser pouco relevante para avaliação da resistência mecânica, foram registrados apenas para os CPs com 28 dias de cura.

5.8.3.1 Execução do Ensaio de Compressão Axial - Adição de 0%

Os CPs (Fotografia 42a) foram rompidos (Fotografia 42c) e suas resistências foram obtidas no painel da prensa (Fotografia 42b). Os CPs foram armazenados no Laboratório até o destino definitivo. Coletadas amostras para as análises do MEV e DRX.

Os resultados obtidos foram listados na Tabela 19, seção 6.2.1.

Fotografia 42 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)



a) CP sob pressão
Fonte: Autor

b) Medição do limite de ruptura

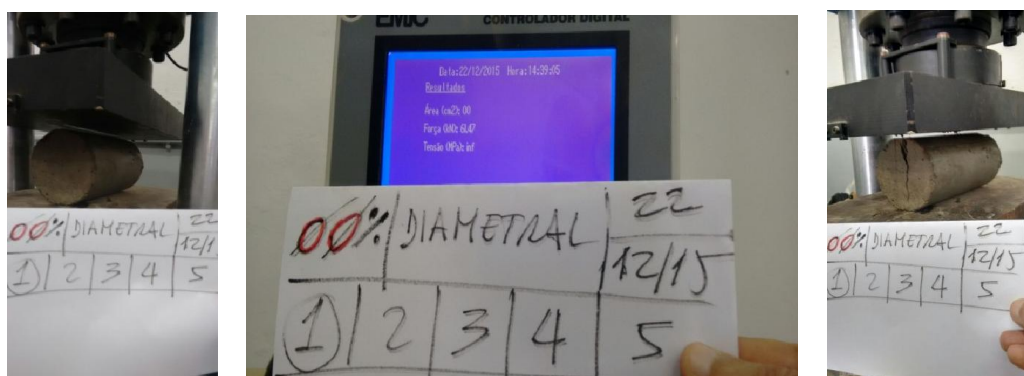
c) CP rompido

5.8.3.2 Execução do Ensaios de Tração (Diametral) - Adição de 0%

Os CPs (Fotografia 43a) foram rompidos (Fotografia 43c) e suas resistências foram obtidas no painel digital da prensa (Fotografia 43b). Os CPs foram armazenados no Laboratório até o destino definitivo. Coletadas amostras para análises MEV e DRX.

Os resultados foram listados na Tabela 26, seção 6.2.7.

Fotografia 43 - Seqüência (a),(b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

c) CP rompido

Fonte: Autor

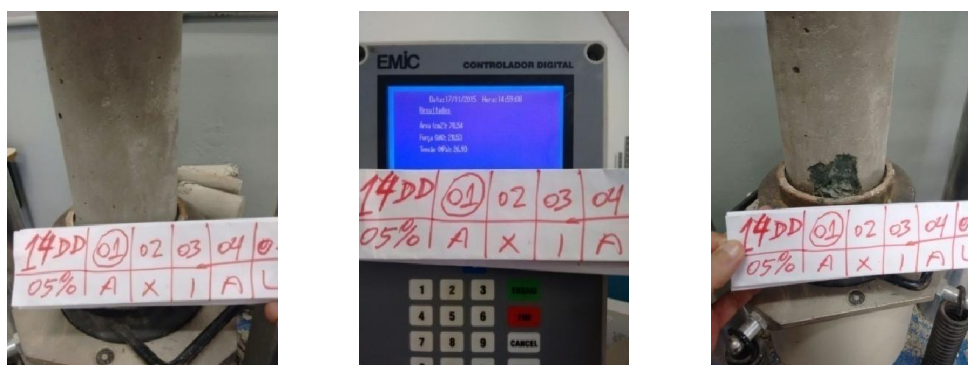
5.8.3.3 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 5%

Efetuosos os ensaios de resistência a compressão (axial) nos intervalos programados 14, 21 e 28 dias de cura e o de tração apenas para os 28dd.

5.8.3.4 Ensaio de Compressão do Compósito a 5%

Os CPs (Fotografia 44a) foram rompidos (Fotografia 44c) resistências obtidas na prensa (Fotografia 44b). Foram abrigados no Laboratório até o destino definitivo. Colhidas amostras para análises MEV e DRX. Os resultados foram listados na Tabela 20, seção 6.2.2.

Fotografia 44 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (axial)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

c) CP rompido

Fonte: Autor

5.8.3.5 Ensaio de Tração do Compósito a 5%

Os CPs foram rompidos e as resistências registradas. Foram então, colocados no Laboratório, abrigados até o destino definitivo. Colhidas amostras para as análises MEV e DRX. Os resultados estão na Tabela 27, seção 6.2.8.

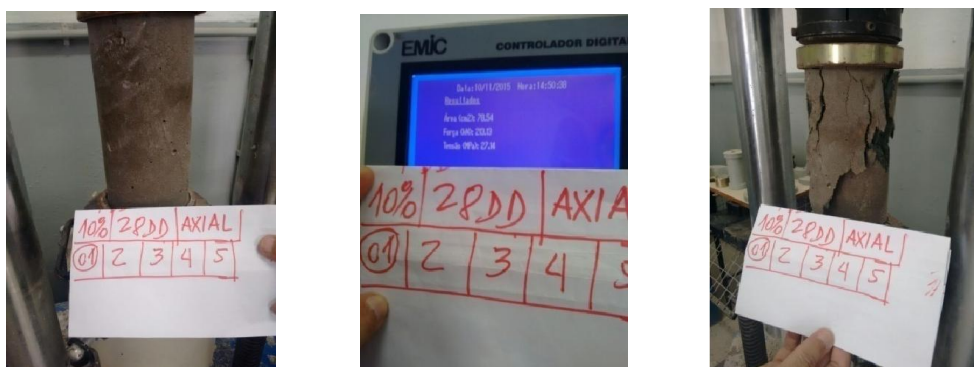
5.8.3.6 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 10%

Efetuosos os ensaios de resistência a compressão (axial) nos intervalos programados 14, 21 e 28 dias de cura e o de tração feito apenas para 28dd .

5.8.3.7 Ensaio de Compressão do Compósito a 10%

Os CPs foram rompidos (Fotografia 45a e 45c) suas resistências obtidas na prensa (Fotografia 45b) e foram armazenados até o destino final. Colhidas amostras para análises MEV e DRX. Resultados foram listados na Tabela 21, seção 6.2.3.

Fotografia 45 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

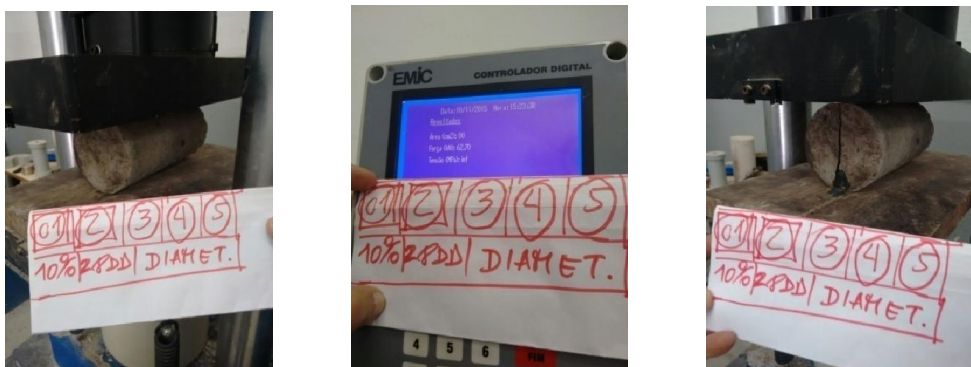
c) CP rompido

Fonte: Autor

5.8.3.8 Ensaio de Tração do Compósito a 10%

Os CPs foram rompidos (Fotografia 46a e 46c) suas resistências obtidas na prensa (Fotografia 46b) e foram armazenados até o destino final. Colhidas amostras para análises MEV e DRX. Resultados foram listados na Tabela 28, seção 6.2.9.

Fotografia 46 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

c) CP rompido

Fonte: Autor

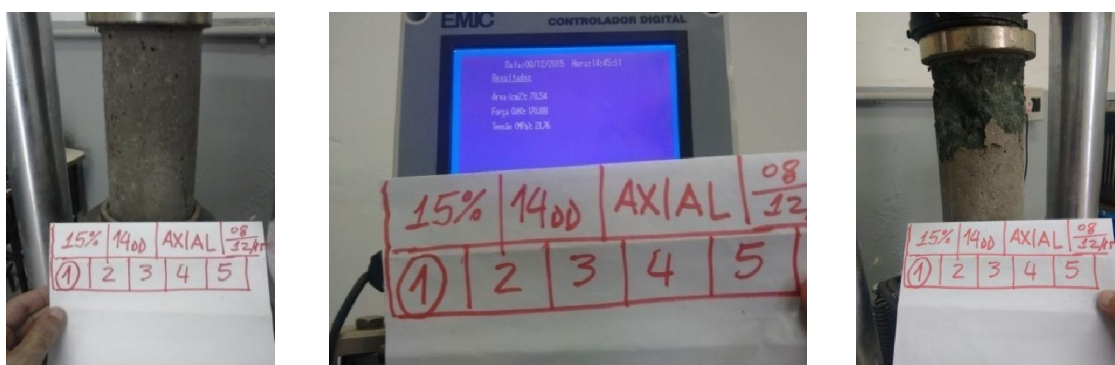
5.8.3.9 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 15%

Efetuosos os ensaios de resistência a compressão (axial) nos intervalos programados 14dd, 21dd e 28dd de cura. O ensaio de tração (diametral) por ser pouco relevante ao experimento foi efetuado apenas para 28dd de cura.

5.8.3.10 Ensaio de Compressão do Compósito a 15%

Os CPs foram rompidos (Fotografia 47a e 47c) suas resistências obtidas na prensa (Fotografia 47b) e foram armazenados até o destino final. Colhidas amostras para análises MEV e DRX. Resultados estão listados na Tabela 22, seção 6.2.4.

Fotografia 47 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

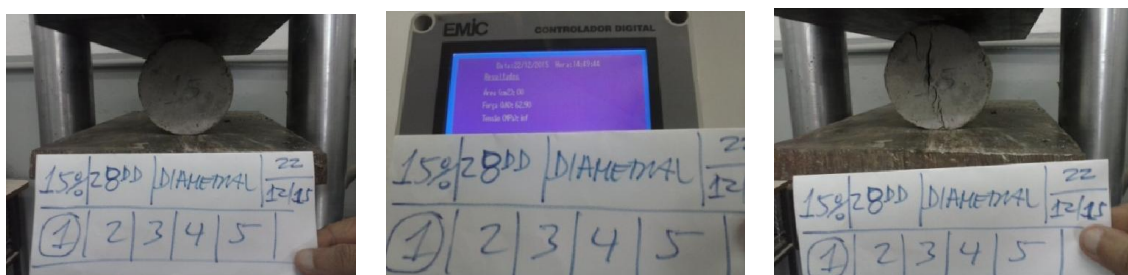
c) CP rompido

Fonte: Autor

5.8.3.11 Ensaio de Tração do Compósito a 15%

Os CPs foram rompidos (Fotografia 48a e 48c) e suas Resistências foram obtidas na prensa (Fotografia 48b). Os CPs foram guardados no Laboratório até o destino final. Amostras dos CPs foram colhidas para análises MEV e DRX. Os resultados podem ser vistos na Tabela 29, seção 6.2.10.

Fotografia 48 - Sequência (a), (b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

c) CP rompido

Fonte: Autor

5.8.3.12 Ensaio de Compressão e Tração do Compósito a 20%

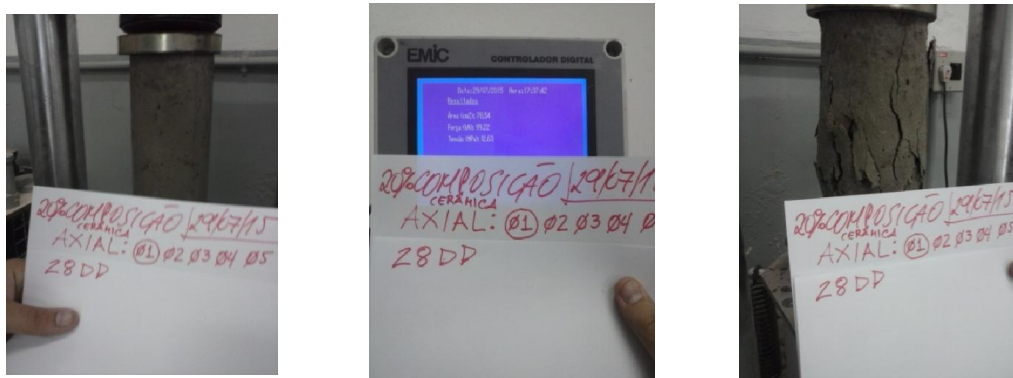
Efetuosos os ensaios de resistência a compressão (axial) nos intervalos programados 14dd, 21dd e 28dd de cura. O ensaio de tração (diametral) por ser pouco relevante ao experimento foi efetuado apenas para 28dd de cura.

5.8.3.13 Ensaio de Compressão do Compósito a 20%

Os CPs foram rompidos (Fotografia 49a e 49c) e suas resistências coletadas na prensa (Fotografia 49b). Os CPs foram armazenados até o destino final. Amostras foram colhidas para análises MEV e DRX.

Os resultados foram listados na Tabela 23, seção 6.2.5.

Fotografia 49 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Compressão (Axial)



a) CP sob pressão

b) Medição do Limite de ruptura

c) CP rompido

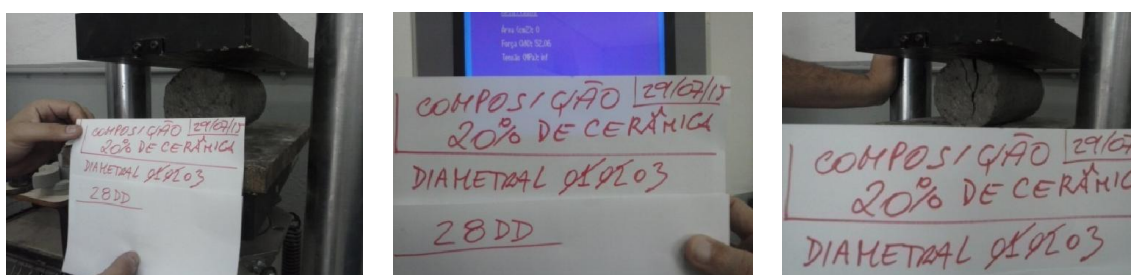
Fonte: Autor

5.8.3.14 Ensaio de Tração do Compósito a 20%

Os CPs foram rompidos (Fotografia 50a e 50c) e suas resistências foram obtidas no painel digital da prensa (Fotografia 50b). Após o rompimento, os CPs foram armazenados até o destino definitivo.

Amostras foram colhidas para as análises MEV e DRX. Registrados os resultados na Tabela 30, seção 6.2.11.

Fotografia 50 - Seqüência (a), (b) e (c) do ensaio de Tração (Diametral)



a) CP sob pressão

b) Medição do limite de ruptura

c) CP rompido

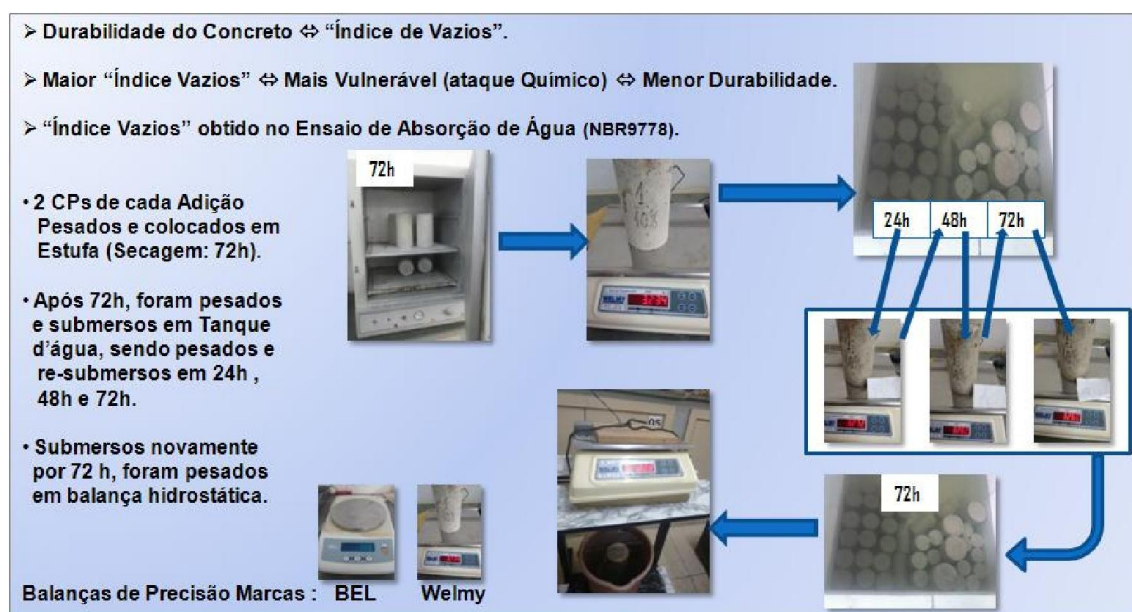
Fonte: Autor

5.9 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

O objetivo desta seção foi verificar a absorção de água pelo compósito, pelo índice de vazios. Este ensaio permite verificar se este índice de vazios está dentro da faixa que traduz a durabilidade recomendada pela norma NBR9778 (2009).

Toda a execução do ensaio pode ser resumida conforme o fluxo na Figura 8.

Figura 8 - Fluxo do Ensaio de Absorção de Água



Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

5.9.1 Ensaio de Absorção de Água

Foram preparados 10 CPs para os ensaios de absorção de água, sendo 2 de cada percentual de adição de cerâmica (0%, 5%, 10%, 15%, 20%). Os 2 CPs de cada adição, foram retirados da câmara úmida (Fotografia 51) e deixados em ambiente seco por 10 minutos. Em seguida, os CPs foram colocados na estufa Odontobrás, onde ficaram por 72h à uma temperatura de 100°C para secagem (Fotografia 51). Após 72h de secagem, foram retirados da estufa e pesados (Fotografia 52). Logo a seguir, foram imersos novamente no tanque d'água da câmara úmida, para sofrerem nova saturação de água, controlada por 72h (NBR9778, 2009).

Fotografia 51 - CPs em Estufa para secagem



Fonte: Autor

Durante este período de 72h de re-saturação controlada de água (Fotografia 19) foram retirados e pesados em balança (Fotografia 52) sucessivamente após 24h, 48h e 72h do início de saturação (Figura 8).

Os valores das pesagens dos CPs foram registrados em planilhas (Tabela 31 a 35 e Gráfico 8 a 12) listados na seção 6.2 para o cálculo dos índices de absorção de água, índice de vazios (NBR9778, 2009) e classificação quanto durabilidade.

Fotografia 52 - CPs pesados conforme programação



Fonte: Autor

5.9.2 Cálculo do Índice de Absorção de Água

Com os dados obtidos das pesagens, procedeu-se o cálculo do índice de absorção de água utilizando-se a equação 5.4, a seguir:

$$Abs_{H_2O} = \frac{M_{sat} - M_{sc}}{M_{sc}} \times 100$$

(5.4)

Onde:

Abs_{H_2O} = Índice percentual de absorção de água.

M_{sc} = Massa do CP seco.

M_{sat} = Massa do CP com saturação de água por 72h.

5.9.3 Pesos Específicos e Índice de Porosidade ou de Vazios

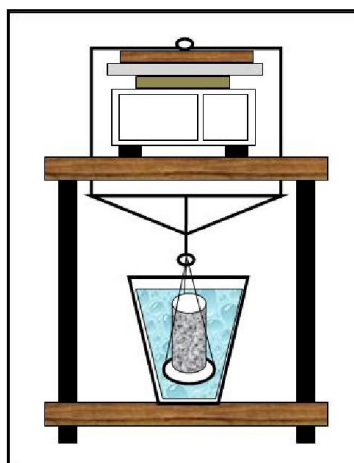
Não havendo balança hidrostática disponível, adaptou-se um dispositivo à balança Welmy (Fotografia 53a) para que ela funcionasse como balança hidrostática (Figura 9). Descontou-se na balança também, o peso do dispositivo adaptado antes do início da pesagem dos CPs.

Fotografia 53 - Balança de Precisão alterada para Hidrostática



Fonte: Autor

Figura 9 - Esquema técnico do dispositivo de balança para hidrostática



Fonte: Autor Base Base Teórica: RESNICK(1976)

Após 96 horas dos CPs imersos em tanque d'água, pesou-se cada um obtendo-se as massas imersas de cada adição cerâmica. Suas pesagens foram registradas e estão listadas na seção 6.2.

Para o cálculo do "índice de vazios" (I_v) cujos dados estão resumidos na Tabela 39, seção 6.3, utilizou-se a memória de cálculo da Equação 5.5. Foi optado por não efetuar a fervura dos CPs conforme norma (NBR9778, 2009).

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_{sc}}{M_{sat} - M_{imh}} \times 100$$

(5.5)

Onde:

I_v = Percentual de índice de vazios ou índice de porosidade.

M_{sc} = Massa do CP seco.

M_{sat} = Massa do CP com saturação de água por 72h.

M_{imh} = Massa do CP imerso em água com medição Hidrostática.

O índice de vazios (Tabela 39, seção 6.3) influencia na durabilidade do concreto aos ambientes das obras onde são conformados. Após os cálculos do I_v , pôde-se obter as classificações (Tabela 42) com base nas avaliações pré-definidas na norma (NBR9778, 2009) e na pesquisa de Phaedonos (1996).

5.9.4 Pesos Específicos dos CPs a Seco, Saturados de Água e Real

Neste item, foram listadas as equações (Equações 5.6, 5.7 e 5.8) para cálculo das massas específicas dos CPs, considerando a seguinte memória de cálculo:

$$P_{Sc} = \frac{M_{sc}}{M_{sat} - M_{imh}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

(5.6)

$$P_{Sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_{imh}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

(5.7)

$$P_{Real} = \frac{M_{sc}}{M_{sc} - M_{imh}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

(5.8)

Onde:

P_{Sc} = Massa Específica do CP seco (Razão entre a massa do CP seco e seu volume total, incluindo poros impermeáveis)

P_{Sat} = Massa Específica do CP saturado (Razão entre massa do CP saturado e seu volume total, com poros permeáveis e impermeáveis.)

P_{Real} = Massa Específica do CP (Razão entre massa do CP a seco e o seu volume, sem os poros permeáveis)

M_{sc} = Massa do CP seco.

M_{sat} = Massa do CP com saturação de água por 72h.

M_{imh} = Massa do CP, imerso em água com medição Hidrostática.

A Tabela 37 na seção 6.3, lista todos os pesos específicos dos CPs de compósito e de referência, concluindo a caracterização do ensaio de absorção de água com obtenção do índice de vazios.

Neste trabalho, escolheu-se a opção “a” do item 3.2.2 da norma NBR9778 (2009) que há a permissão de optar por não se efetuar a fervura dos CPs, quando do ensaio de absorção de água para obter o índice de vazios. Esta opção foi adotada por ser uma condição mais realista do ensaio.

5.10 ANÁLISE MEV - CERÂMICA E COMPÓSITO

Estas análises foram efetuadas nas amostras da cerâmica e também nos CPs das adições cerâmicas (compósito).

As amostras coletadas dos CPs foram cortadas em pastilhas com serra mármore, marca Fort modelo FT4100B (Fotografia 54) com disco de corte marca Stone Buffalo.

Fotografia 54 - Serra mármore com disco de corte



Fonte: Autor

O microscópio MEV exigiu tamanho adequado das amostras, que foram então, cortadas em forma de pastilhas. Foram então, agrupadas por adição cerâmica (Fotografia 55) sendo escolhidas duas de cada adição que melhor evidenciassem os elementos constituintes do compósito (a matriz de concreto, brita, cerâmica) e as interfaces entre estes.

Fotografia 55 - Pastilhas de amostra do compósito para análise MEV



Fonte: Autor

O microscópio eletrônico de varredura” (MEV) utilizado foi o Hitachi, modelo TM3000 (Fotografia 56a) de feixe secundário de elétrons, do CIT UniFOA.

Foram efetuadas ampliações e a digitalização de imagens obtidas no MEV (Fotografia 56c) nas magnitudes: 20x, 50x, 100x, 150x, 200x, 300x, 500x, 1000x, 1500x, 2000x, 3000x, 5000x e 10.000x .

Fotografia 56 - Microscópio Eletrônico de Varredura



a) MEV TM3000

b) Amostra preparada

c) Modelo do SW do MEV

Fonte: Autor

O revestimento cerâmico e o cimento já continham alumina e óxido de ferro, sendo desnecessária a metalização das amostras, inclusive houve certa magnetização a 1500x (Fotografia 56c) contornada mudando-se a potência de feixe de 5kV para 15kV, obtendo-se imagem mais definida. Alguns materiais possuem diferença de absorção de energia podendo provocar problemas na imagem.

5.10.1 Análise MEV - Amostras de Cerâmica e de Compósito

Foram preparadas duas amostras do revestimento cerâmico (Fotografia 55) através da separação de cacos "*in natura*". As amostras de compósito já cortadas na forma de pastilha com tamanho máximo $\approx(2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1,5\text{cm})$ foram colocadas na câmara de vácuo do MEV (Fotografia 56b) e digitalizadas suas imagens para análise morfológica de superfície.

Nas magnitudes até 1500x, utilizou-se potência de 5kV e para aquelas acima de 1500x, a nitidez foi conseguida à 15kV. O Tempo das digitalizações e análises foi de $\approx 2\text{h}$. Foi dado foco à qualidade das interfaces (matriz x concreto) e (matriz x cerâmica) além da morfologia do compósito (grãos, vazios, fraturas e porosidade) pois estas têm relação direta com aderência que se reflete na resistência mecânica do compósito. As imagens estão listadas na seção 6.4.

5.11 ANÁLISE DRX - MATERIAIS E COMPÓSITO

Para a análise das fases presentes do material das amostras, utilizou-se o aparelho DRX (Difratômetro de raios X) marca Shimadzu, modelo XRD 6100, do laboratório de materiais (CIT) do UniFOA (Fotografia 57).

Os arquivos de dados numéricos, gerados das fases presentes, foram obtidos utilizando-se o difratômetro dotado de radiação Cu-K α , arco de varredura de 10° a 80°, passo 5s e velocidade de contagem 3s/ponto.

Fotografia 57 - Difratômetro XRD6100 - Frente(a) e goniômetro (b)



a) Difratômetro de Raios X

Fonte: Autor



b) Mecanismo de varredura

Local: CIT - Laboratório de Materiais do UniFOA

Foram selecionadas amostras do compósito com 10% de aditivo, previamente preparadas na seção 5.10 de análises via MEV (Fotografia 58) por fatiamento com máquina serra mármore com disco de serra diamantada (Fotografia 54).

Fotografia 58 - Preparação de pastilhas do compósito



Fonte: Autor

As amostras de compósito foram moídas com martelo metálico e pulverizadas utilizando-se um cadinho de porcelana (Fotografia 59a). O material foi então, passado por peneira Soloteste de Ø2mm e cada amostra forneceu cinco lâminas de pó do compósito (Fotografia 59b) para serem analisadas via DRX.

Fotografia 59 - Seqüência de preparação pó de compósito.



a) Pastilha sendo pulverizada



b) Lâminas – Preparação

Fonte: Autor

Todas as lâminas de compósito foram sucessivamente colocadas no suporte de deflexão do DRX, que fez a análise por cerca de 1h / lâmina. Em cada análise, o DRX gerou os respectivos arquivos de dados dos picos de intensidade, que foram gravados.

As amostras de cerâmica e brita também foram moídas com martelo metálico, pulverizadas no cadinho de louça e passadas pela peneira (Ø2mm). A amostra de cerâmica gerou 2 lâminas e a de brita 5 lâminas que foram respectivamente analisadas no DRX. A amostra de areia foi apenas passada pela peneirada de Ø2mm, produzindo 5 lâminas que foram também analisadas no DRX.

As amostras obtidas de cimento, foram misturadas no cadinho de louça e forneceram 5 lâminas que também passaram pelo processo de difração de raios X.

As indexações de picos das fases mineralógicas dos compostos dos materiais individuais e do compósito, foram levantadas via comparação com as microfichas do arquivo do JCPDS (1979). Os resultados obtidos podem ser vistos na seção 6.5.

5.12 CUSTOS DO CONCRETO CONVENCIONAL E ADITIVADO

Para esta análise, levou-se em conta os custos das compras de materiais de RCD cerâmico, os custos do concreto com as quantidades percentuais de aditivo cerâmico utilizadas, e os custos do concreto convencional. Foram feitas também, comparações entre estes custos. Neste item, temos então a memória de cálculo dos custos com a economia estimada do concreto com as adições cerâmicas.

5.12.1 Considerações sobre o Custo da Reciclagem de RCD Cerâmico

Apesar de não se ter conseguido o custo do reciclado de cerâmica por metro cúbico no mercado, o que denota desinteresse do mesmo em revelar a este tipo de informação, há ainda o RCD de demolição onde todos materiais (concreto, cerâmica, argamassa) estão misturados, o que não serve como parâmetro mas mostra um indicativo de quanto seria o custo deste tipo de rejeito. Pelo que se pode notar, consultando três usinas de beneficiamento de RCD, é que o mercado hoje, não tem interesse em revender o reciclado cerâmico separado, sem estar mixado com os demais tipos de RCD. Os RCDs mais comuns revendidos hoje são: brita recondicionada de peças de concreto; brita recondicionada de argamassa, pós de concreto como agregado miúdo e pó de mistura destes materiais.

Teoricamente o RCD cerâmico sendo de obras baixas e médias, teria baixo custo se o descarte feito pelas pessoas fosse mais seletivo e direcionado para usinas municipais de RCD, para beneficiamento. Neste caso, o custo do RCD cerâmico seria apenas o custo de transporte do material da usina até à obra.

Outra forma, seria o já existente recolhimento de RCD feito pela prefeitura sendo destinado às usinas de reciclagem consorciadas. Neste caso o custo do metro cúbico seria o cobrado pelo beneficiamento mais o transporte até à obra.

5.12.2 Memória de Cálculo do Custo do Concreto

O consumo de materiais por m³ estimado (BOTELHO, 2012) foi colocado na Tabela 13, onde cada volume de material em Litros, representou parte do custo. Com os dados, pode-se estimar o custo total dos materiais, para o traço (1:2:3)

convencional ou aditivado.

Há vazios entre os agregados quando colocados em compartimentos, mas foram desconsiderados para efeito de “litragem” ($1\text{dm}^3 = 1\text{Litro}$) pois é desta forma que as medidas são feitas no dia a dia das obras.

O custo dos materiais foi obtido por orçamento (Anexo 3) na loja de Materiais de Construção Capobiango Ltda. Os custos unitários dos materiais utilizados na composição do concreto foram calculados e listados (Tabela 13 a 16).

Tabela 13 - Consumo e Custo do Concreto Convencional

Consumo e Custo dos Materiais por m^3 de Concreto Convencional											
Traço (Volume)	Fck (MPa)	Cimento (litro)	Custo (R\$)	Areia (litro)	Custo (R\$)	Brita (litro)		Custo (R\$)	Água (litro)	Custo (R\$)	Custo Total (R\$)
						1	2				
1:1:2	40	363	159,72	363	35,57	363	363	87,85	226	17,10	300,24
1:2:3	25	240	105,60	480	47,04	360	360	87,12	156	17,10	256,86
1:2:4	21	210	92,40	420	41,16	420	420	101,64	202	17,10	252,30
1:3:6	10	147	64,68	441	43,22	441	441	106,72	198	17,10	231,72

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

Tabela 14 - Custo do Cimento

Calculo do Custo do Cimento por Litro			
Saco	Litros	R\$/sc	R\$/litro
50kg	50	22,00	0,44

Fonte: Autor

Tabela 15 - Custo dos Agregados Convencionais

Custo dos Agregados Naturais				
Agregado	m3	R\$/m3	R\$/Lt	R\$
Areia	480	98,00	0,098	47,04
Brita	720	121,00	0,12	87,12

Fonte: Autor

Considerando-se o 1º caso de obtenção anterior, apenas o transporte do RCD cerâmico já beneficiado pela usina municipal, oriundo de despejo urbano, calculou-se R\$100,00 por caminhão de 5m^3 (considerado inclusive um frete elevado) mesmo assim obteve-se a Tabela 16. Esta estimativa é baseada no cálculo de 75% do valor da brita, ou seja $\text{R}\$121,00 \times 0,75 = \text{R}\$90,75$ (material + frete) com base no artigo nos site da Fundamentals (2016).

Cabral (2007) calculou o custo do RCD em R\$7,00 por m³ o que seria equivalente a R\$35,00 para 5m³ (1 caminhão padrão) apesar dele não ter considerado o frete nos cálculos.

Tabela 16 - Custo de obtenção do Agregado Cerâmico

Custo de Transporte do RCD Cerâmico	
Frete de um Caminhão Padrão	R\$100,00
Volume de uma Caçamba Padrão	5m ³
Custo do Frete do m ³ de Cerâmica	20,00
Custo do Frete de Cerâmica (R\$/Litro)	0,02

Fonte: Autor

Aferiu-se também, que o custo do m³ de água tratada, fornecida pelo SAAE da cidade de Volta Redonda - RJ, é definido por “faixa de consumo”. Então, 1m³ é o equivalente ao consumo mínimo de 10m³, cujo valor atual é de R\$17,00.

Efetuando-se novos cálculos com os percentuais das adições de concreto, agora com todos materiais na mesma unidade de medida (Tabela 17).

Tabela 17 - Consumo e Custo de Materiais do Concreto Aditivado

Consumo e Custo dos Materiais por m ³ de Concreto Aditivado													
Traço (Volume)	Fck (MPa)	Cimento (litro)	Custo (R\$)	Areia (litro)	Custo (R\$)	Brita (litro)		Custo (R\$)	Agregado Cerâmico (litro)	Custo (R\$)	Água a/c= 0,65 (litro)	Custo (R\$)	Custo Total (R\$)
						1	2						
1:2:3-0%	25	240	105,60	480	47,04	360	360	87,12	0	-	156	17,10	256,86
1:2:3-5%	27,17	240	105,60	480	47,04	342	342	82,76	34,2	0,68	156	17,10	253,19
1:2:3-10%	26,82	240	105,60	480	47,04	324	324	78,41	64,8	1,30	156	17,10	249,44
1:2:3-15%	27,56	240	105,60	480	47,04	306	306	74,05	91,8	1,84	156	17,10	245,63
1:2:3-20%	13,04	240	105,60	480	47,04	288	288	69,70	115,2	2,30	156	17,10	241,74

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

Tendo em vista os cálculos obtidos na Tabela 17, pôde-se resumir na Tabela 18 a seguir, a gradual economia de material usando-se o RCD cerâmico.

Tabela 18 - Economia com RCD Cerâmico - Custos Totais e Percentuais

Custo e Economia em Simulação de Consumo em Obra						
Traço (Volume)	Fck (MPa)	Custo Total	Econom./ m ³ (R\$)	Economia %	Obra com 1.000 m ³	Economia (R\$)
1:2:3-0%	25,00	256,86	-	0	256.860,00	0
1:2:3-5%	27,17	253,19	3,67	1%	253.188,00	3.672,00
1:2:3-10%	26,82	249,44	7,42	3%	249.444,00	7.416,00
1:2:3-15%	27,56	245,63	11,23	4%	245.628,00	11.232,00
1:2:3-20%	13,04	241,74	15,12	6%	241.740,00	15.120,00

Fonte: Autor

Foi identificada e confirmada uma economia de material nos percentuais (Tabela 18) iniciando-se com uma economia de 1% para a adição de 5% e economia final de 6% para a adição de 20% de RCD cerâmico. Esta economia foi obtida calculando-se com o valor super estimado (frete de R\$100,00) que no caso é conveniente para a comprovação da viabilidade.

Tendo-se em vista que, se o valor real do agregado de RCD cerâmico, estiver em torno dos “R\$50,00”, a economia para o percentual de 15% por exemplo, aumentará para 5%, cerca de R12.150,00.

Como convalidação deste cálculo, no trabalho de Cabral (2007) ele também obteve redução ligeira dos custos para 50% de agregados de RCD cerâmico (apesar de muito acima dos percentuais deste trabalho). Aliás o RCD cerâmico foi o único que gerou economia no trabalho de Cabral, os demais tipos de RCD testados por ele (argamassa e concreto) geraram maior custo do que o do concreto convencional.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram listados nesta seção, os resultados dos ensaios de resistência mecânica do compósito, as análises morfológicas por MEV (cerâmica e compósito final) e as composições das fases via DRX (cerâmica, areia, brita e compósito). Foram usadas cores e tracejados nos gráficos para melhor observação dos dados.

6.1 RESULTADOS - PRÉ-ENSAIOS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O pré-ensaio com adições de 10% e 20%, calculou-se fator a/c de $\approx 0,65$ a ser adotado e, detectou-se que a adição cerâmica de 20% mostrou perda de $\approx 52\%$ de F_{ck} , comparado ao do padrão de engenharia (27,5MPa). Com o pré-ensaio, pôde-se definir a faixa de adição de trabalho limite (0% a 20%) para este projeto. Acima desta faixa, não seria viável nem econômico, confeccionar CPs mesmo para fins não estruturais mesmo havendo outros trabalhos com maiores adições $>20\%$.

Segundo pesquisas, maiores percentuais de adições cerâmicas, maior as chances de potencializar os problemas a seguir (CABRAL, 2007; OLIVEIRA, 2012):

1. Maior desidratação da argamassa pela maior absorção de água pela cerâmica, diminuindo e comprometendo a trabalhabilidade do concreto;
2. Necessidade de adição extra de água além do previsto, descontrolando o fator a/c , e diminuindo assim, a resistência do concreto;
3. Diminuição substancial da resistência à compressão devido a cerâmica ter menor resistência mecânica que a brita natural.
4. Aumento da heterogeneidade de distribuição do agregado nas fôrmas, devido à sua geometria lamelar prejudicando a resistência da peça.
5. Preenchimento imperfeito das fôrmas e diminuição da fluidez dificultando o preenchimento dos espaços entre a ferragem, diminuindo ou comprometendo a resistência mecânica da peça.

As adições percentuais então, puderam ser definidas para os ensaios definitivos, a partir do limite de 20%, arbitrando-se então, adições percentuais de 5% em 5%, em ordem regressiva até 0% (adição de referência).

6.2 RESULTADOS - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A seguir são demonstrados os resultados obtidos com o ensaio de resistência a compressão com aplicação de força no sentido axial dos CPs de concreto.

A linha imaginária de aumento de Fck (em cor roxa) indica a tendência de ganho ou perda de Fck. Cabe aqui indicar que o valor padrão usual de engenharia para a resistência característica à compressão do concreto (fator Fck) tem a base nas literaturas de Botelho (2012) e Campos (2012) com o valor de 25MPa.

Este valor de Fck é próximo do valor 27,5MPa que é calculado como a média da resistência à compressão entre 15MPa até 40MPa, sendo a faixa de trabalho comum utilizada na engenharia (BOTELHO, 2012). Segundo Botelho (2012) o valor mínimo de Fck para fabricação de estruturas de baixo ou médio porte, inicia-se no patamar de 20MPa mas, se considerar as fundações e tubulões, pode ser usado o patamar inicial de 15MPa. Neste trabalho considerou-se como referenciais para avaliação dos resultados das resistência característica do concreto à compressão (Fck) os valores de 27,5MPa (como 1º Referencial) e 25MPa (como 2º Referencial).

O ensaio de tração está descrito após os resultados de compressão mas não será discutido longamente por ter pouca relevância neste trabalho (o esforço tração nas estruturas fica a cargo da armadura).

6.2.1 Resultados da Adição de 0% de Cerâmica - Compressão (Axial):

Na adição de 0% (1º Ref. de Fck) com 28dd, obteve-se F_{c28} médio de 17,8MPa, com queda substancial de 29% abaixo dos 25MPa (3ª Ref. - Botelho, 2012) que pode ser vista na Tabela 19 e Gráfico 1, a seguir. Neste ensaio, nota-se que houve algum problema na dosagem ou conformação que gerou este valor de Fck muito abaixo dos 30MPa (previstos e indicados pelo fabricante do cimento em ensaios exaustivos de fábrica).

Sendo assim, a adição 0% foi descartada como a 1ª referência, adotando-se então, como referências de F_{c28} , o valores de 27,5MPa (1ª Ref.) e 25MPa (2ª Ref.).

Segundo Botelho (2012) a variabilidade do Fck em ensaios de resistência mecânica de concreto, é intrínseca ao preparo do concreto.

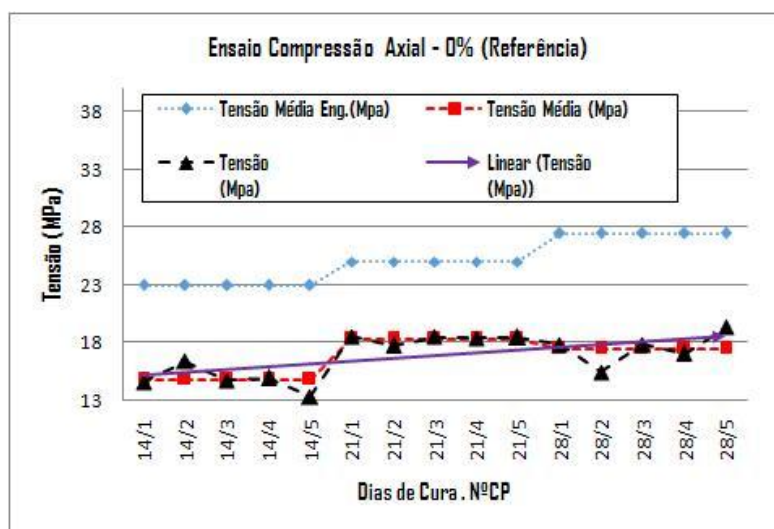
Tabela 19 - Dados ensaio Compressão axial - 0% aditivo cerâmico

Dados Ensaio Compressão 00% Aditivo Cerâmico (Referência)						
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ªRef.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm²)	Desvio Padrão
14/1	23,00	14,80	14,58	114,5	1,46	-
14/2	23,00	14,80	16,39	128,7	1,64	-
14/3	23,00	14,80	14,76	115,92	1,48	-
14/4	23,00	14,80	14,95	117,39	1,49	-
14/5	23,00	14,80	13,33	104,67	1,33	0,98
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ªRef. (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm²)	Desvio Padrão
21/1	25,00	18,32	18,53	145,57	1,85	-
21/2	25,00	18,32	17,73	139,29	1,77	-
21/3	25,00	18,32	18,49	145,2	1,85	-
21/4	25,00	18,32	18,39	144,43	1,84	-
21/5	25,00	18,32	18,44	144,81	1,84	0,29
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ªRef. (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm²)	Desvio Padrão
28/1	27,50	17,49	17,85	140,22	1,79	-
28/2	27,50	17,49	15,43	121,22	1,54	-
28/3	27,50	17,49	17,80	139,78	1,78	-
28/4	27,50	17,49	17,05	133,93	1,71	-
28/5	27,50	17,49	19,34	151,87	1,93	1,27

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

Gráfico 1 - Resistências à Compressão axial - 0% de Cerâmica



Fonte: Autor

6.2.2 Resultados da Adição de 5% de Cerâmica - Compressão (Axial)

A F_{c21} média foi = 28MPa (Tabela 20) pouco < 27,5MPa (1ª Ref.) e > 25MPa (2ª Ref.) (BOTELHO, 2012; CAMPOS, 2012). A previsão para o F_{c28} à 5% deveria

ter sido $\geq 29\text{MPa}$ (Gráfico 2). Em projetos experimentais, desvios podem ocorrer (BOTELHO, 2012). A linha roxa (Gráfico 2) mostra a tendência (decréscimo) não fossem os 3 CPs com $F_{ck} < 25\text{MPa}$, devido a provável problema na conformação.

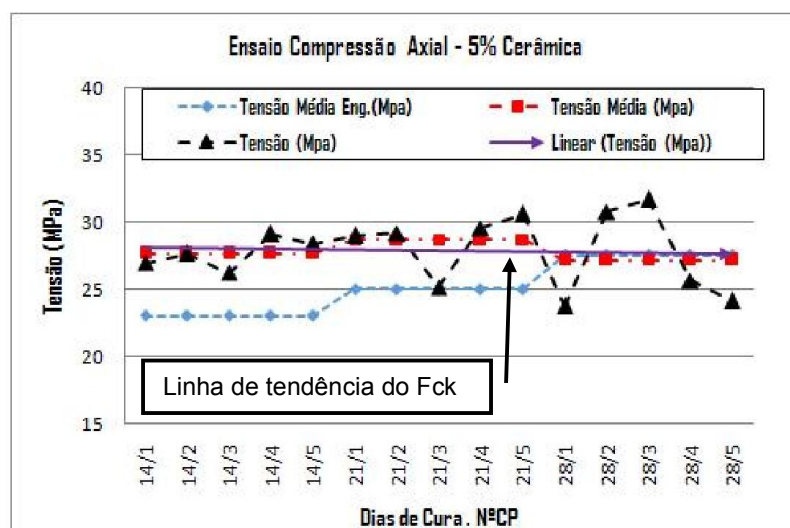
Tabela 20 - Dados ensaio Compressão axial - 5% aditivo cerâmico

Dados Ensaio Compressão 05% Aditivo Cerâmico						
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ºRef. (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
14/1	23,00	27,64	26,93	211,53	2,69	-
14/2	23,00	27,64	27,63	217,03	2,76	-
14/3	23,00	27,64	26,19	205,71	2,62	-
14/4	23,00	27,64	29,07	228,35	2,91	-
14/5	23,00	27,64	28,39	222,96	2,84	1,02
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ºRef. (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
21/1	25,00	28,67	28,98	227,63	2,90	-
21/2	25,00	28,67	29,15	228,96	2,92	-
21/3	25,00	28,67	25,14	197,42	2,51	-
21/4	25,00	28,67	29,52	231,86	2,95	-
21/5	25,00	28,67	30,54	239,89	3,05	1,85
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ºRef. (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
28/1	27,50	27,17	23,73	186,4	2,37	-
28/2	27,50	27,17	30,76	241,59	3,08	-
28/3	27,50	27,17	31,65	248,54	3,16	-
28/4	27,50	27,17	25,62	201,25	2,56	-
28/5	27,50	27,17	24,10	189,28	2,41	3,36

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

Gráfico 2 - Resistências à Compressão axial - 5% de cerâmica



Fonte: Autor

6.2.3 Resultados da Adição de 10% de Cerâmica - Compressão (Axial)

A F_{c28} média foi = 27MPa (Tabela 21) pouquíssimo < 27,5MPa (1ª Ref.) e >25MPa (2ª Ref.) (BOTELHO, 2012). O Gráfico 2 mostra a evolução da resistência.

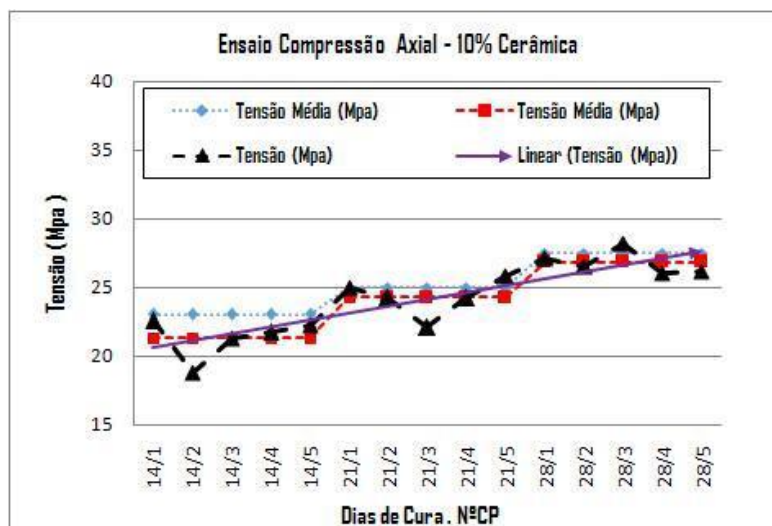
Tabela 21 - Dados ensaio Compressão axial - 10% aditivo cerâmico

Dados Ensaio Compressão 10% Aditivo Cerâmico						
Cura(dias) /CP	Tensão Média 1ªRef. (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
14/1	23,00	21,31	22,54	177,02	2,25	-
14/2	23,00	21,31	18,82	147,82	1,88	-
14/3	23,00	21,31	21,28	167,10	2,13	-
14/4	23,00	21,31	21,69	170,38	2,17	-
14/5	23,00	21,31	22,23	174,61	2,22	1,32
21/1	25,00	24,27	25,01	196,42	2,50	-
21/2	25,00	24,27	24,22	190,23	2,42	-
21/3	25,00	24,27	22,05	173,19	2,21	-
21/4	25,00	24,27	24,22	190,24	2,42	-
21/5	25,00	24,27	25,82	202,81	2,58	1,26
28/1	27,50	26,82	27,14	213,13	2,71	-
28/2	27,50	26,82	26,54	208,41	2,65	-
28/3	27,50	26,82	28,19	221,39	2,82	-
28/4	27,50	26,82	26,05	204,61	2,61	-
28/5	27,50	26,82	26,17	205,52	2,62	0,78

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

Gráfico 3 - Resistências à Compressão axial - 10% de cerâmica



Fonte: Autor

6.2.4 Resultados da Adição de 15% de Cerâmica- Compressão (Axial)

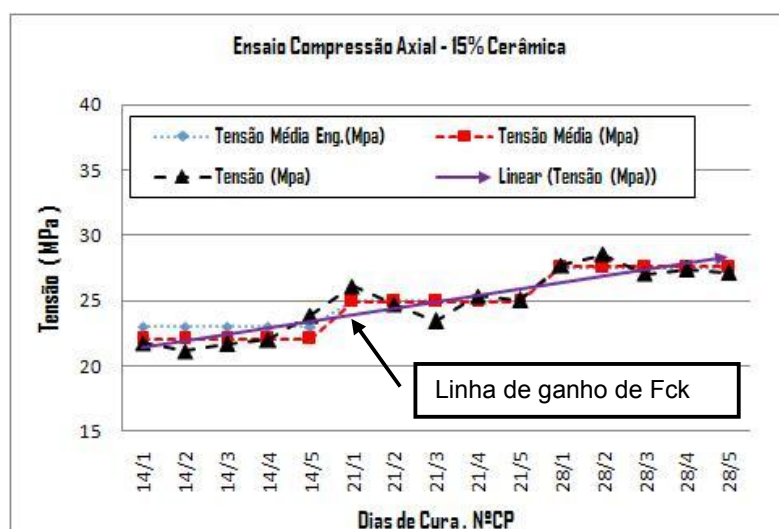
A F_{c28} média à 15% de adição foi de 27,5MPa, igual a 27,5MPa (1ª Ref.) e >25MPa (2ª Ref.) (BOTELHO, 2012). O Gráfico 4 mostra a evolução da resistência.

Tabela 22 - Dados ensaio Compressão - 15% aditivo cerâmico

Dados Ensaio Compressão 15% Aditivo Cerâmico						
Cura(dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm2)	Desvio Padrão
14/1	23,00	22,07	21,76	170,88	2,18	-
14/2	23,00	22,07	21,11	165,80	2,11	-
14/3	23,00	22,07	21,66	170,10	2,17	-
14/4	23,00	22,07	22,00	172,82	2,20	-
14/5	23,00	22,07	23,84	187,20	2,38	0,93
Cura(dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm2)	Desvio Padrão
21/1	25,00	24,92	26,08	204,83	2,61	-
21/2	25,00	24,92	24,74	194,3	2,47	-
21/3	25,00	24,92	23,41	183,86	2,34	-
21/4	25,00	24,92	25,32	198,89	2,53	-
21/5	25,00	24,92	25,03	196,6	2,50	0,88
Cura(dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm2)	Desvio Padrão
28/1	27,50	27,56	27,72	217,71	2,77	-
28/2	27,50	27,56	28,53	224,04	2,85	-
28/3	27,50	27,56	27,04	212,41	2,70	-
28/4	27,50	27,56	27,37	215	2,74	-
28/5	27,50	27,56	27,14	213,12	2,71	0,54

Fonte: Autor

Gráfico 4 - Resistências à Compressão axial - 15% de cerâmica



Fonte: Autor

6.2.5 Resultados da Adição de 20% de Cerâmica - Compressão (Axial)

O F_{c28} médio da adição de 20% (Tabela 23 e Gráfico 5) foi de 13MPa, abaixo dos 25MPa (2ª Ref.) e longe dos 27,5MPa (1ª Ref.).

Isto indicou as hipóteses de que, a partir dos 20% de adição, os Fck começam a sofrer expressiva redução, ou, pode ser possível que a pelotização ocorrida no início da conformação, seja a responsável pelo baixo Fck, induzindo-se à adoção do limiar viável de 20%.

Tabela 23 - Dados ensaio Compressão axial - 20% aditivo cerâmico

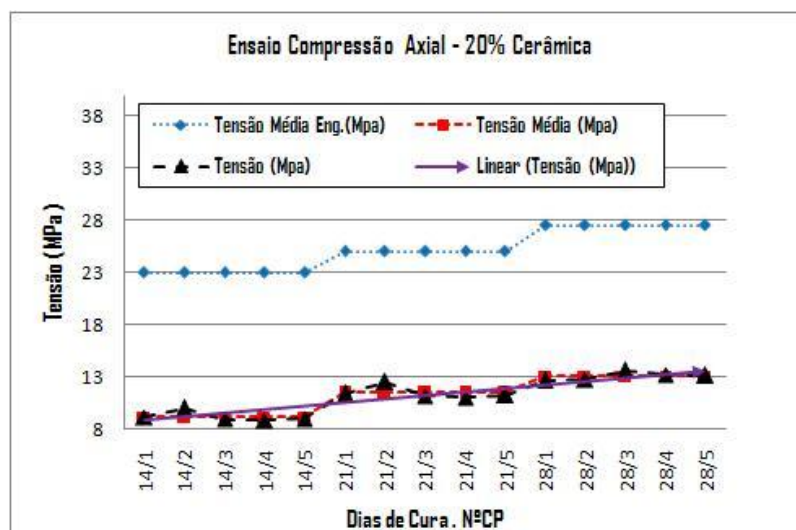
Dados Ensaio Compressão 20% Aditivo Cerâmico						
Cura(dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
14/1	23,00	9,16	9,10	71,49	0,91	-
14/2	23,00	9,16	9,98	78,35	1,00	-
14/3	23,00	9,16	8,92	70,06	0,89	-
14/4	23,00	9,16	8,80	69,10	0,88	-
14/5	23,00	9,16	8,98	70,53	0,90	0,42
Cura(dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
21/1	25,00	11,44	11,38	89,36	1,14	-
21/2	25,00	11,44	12,47	97,94	1,25	-
21/3	25,00	11,44	11,15	87,58	1,12	-
21/4	25,00	11,44	11,00	86,37	1,10	-
21/5	25,00	11,44	11,22	88,16	1,12	0,53
Cura(dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)	Desvio Padrão
28/1	27,50	13,04	12,63	99,22	1,26	-
28/2	27,50	13,04	12,74	100,07	1,27	-
28/3	27,50	13,04	13,56	106,53	1,36	-
28/4	27,50	13,04	13,17	103,45	1,32	-
28/5	27,50	13,04	13,09	102,8	1,31	0,33

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

O limite viável ainda poderia estar acima dos 20% de adição, mas conforme estudos de outros pesquisadores (Fonseca, 2006; Cabral, 2007; Campos, 2012; Massould, 2012) a hipótese do limite de 20% de adição poder ser um limite, se tornou factível e foi adotada neste projeto.

Gráfico 5 - Resistências à Compressão axial - 20% de Cerâmica



Fonte: Autor

Campos (2012) também detectou que as adições a partir de 20% geram F_{ck} abaixo dos 25MPa (o F_{ck} de 2ª referência para cálculos engenharia). O que convalida o arbítrio nesta dissertação, do limite dos 20% de adição conforme pré-ensaio e resultado na seção 6.2.5 (BOTELHO, 2012). No Gráfico 5, a linha roxa mostra a tendência de ganho de resistência à compressão (F_{ck}) ao longo do tempo.

6.2.6 Discussão dos Resultado da Resistência à Compressão (axial)

As tensões foram consolidadas no Gráfico 6 (de superfície) para facilitar as análises gerais sobre as resistências à compressão, obtidas com o compósito.

Verificou-se que a resistência à compressão, com uso de RCDs cerâmicos, é menor que aquela apenas com brita natural. É lógica esta conclusão, uma vez que, a brita possui resistência à compressão variando de 80MPa a 200MPa, já nos RCDs esta resistência é bem menor (concreto sem aditivos químicos é claro) (BOTELHO, 2012, MASSOULD, 2012; CABRAL, 2009; FONSECA, 2006).

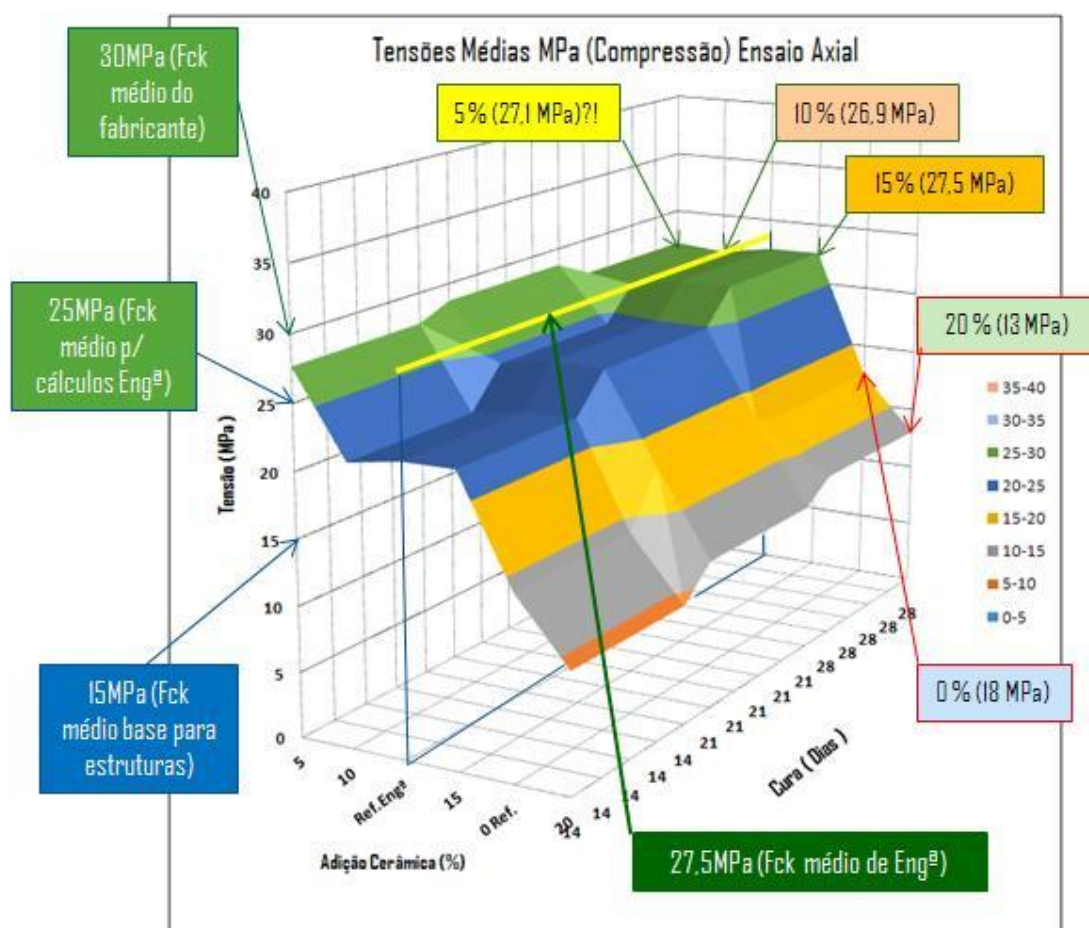
Como a aderência entre os componentes do concreto está relacionada ao percentual de aderência superficial total de aglomeração do cimento (a cola) *versus* agregados, a cerâmica surpreendeu, apresentando valores de resistência à compressão dentro ou acima da média, mesmo com (CAMPOS, 2012 ; CABRAL, 2007):

- Rugosidade e porosidade menores que a da brita natural;
- Forma geométrica lamelar, teoricamente menos resistente;
- Traço comum de 1:2:3 sem aditivos químicos para ganho de Fck.

O compósito revelou boa resistência nas adições de 5% à 15%, ficando dentro da resistência média de Eng.^a (27,5MPa) mostrando viabilidade de uso dos RCDs de cerâmica no concreto, no mínimo para peças não-estruturais, um dos objetivos deste projeto (BOTELHO, 2012 ; CAMPOS, 2012).

A seguir, foram resumidas as resistências à compressão axial (Gráfico 6) de todas as adições e períodos (14, 21 e 28dd). Ficou evidente a queda de resistência quanto maior foi o aumento do percentual de agregado graúdo cerâmico.

Gráfico 6 - Resumo das Tensões Médias à Compressão (axial)



Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

O relevo significativo de avaliação das resistências obtidas (à 28 dias de cura)

foi a zona verde (Tabela 24 e Gráfico 6) de 25MPa à 30MPa (limiar azul claro).

Oliveira (2006) mesmo não tendo usado cerâmica de revestimento, também verificou que a resistência do compósito cerâmico diminuiu quando os percentuais de adição cerâmica foram aumentados nos traços. Ele também obteve 27MPa no ensaio real da adição com 15% de agregado de RCD para conformação de concreto, tendo ainda utilizado aditivo. Isto confirma que os dados obtidos neste trabalho viabilizam o uso do compósito cerâmico em aplicações não-estruturais conforme a norma (NBR15116, 2004).

As adições de 5% à 15% mostraram-se viáveis (Tabela 24) sendo a adição de 15% cerâmica, aquela que apresentou melhor benefício técnico/econômico.

Tabela 24 - Valores significativos de Adição Cerâmica

Quantidade (%) de Aditivo Cerâmico	Fck (MPa)
5	27,17
10	26,82
15	27,56

Fonte: Autor

É possível e lógico que, quanto maior for a granulometria do agregado cerâmico usado, maior será a área vítrea intrínseca ao material, podendo produzir maior número de trincas e menor aderência geral do compósito (PORTO, 2008).

Massould (2012) também observou que as resistências dos concretos com adições percentuais crescentes de RCD, diminuem. Mas com a diminuição das jazidas minerais viáveis, o uso de RCDs na construção civil será inevitável até para funções estruturais.

Deve-se lembrar que, aos 90dd o concreto ganhará mais 10% de resistência, e em até 360dd terá o Fck elevado em mais 10%. Ou seja, os Fck obtidos nas datas de seus ensaios à 28dd não são ainda seus Fck finais (BOTELHO, 2012).

Embora com resistências percentuais um pouco menores, o compósito apresentou peso específico de 4% à 15% menor que o do concreto padrão, conforme resultados dos ensaios (Tabela 37) o que cria a vantagem técnica das peças de concreto aditivado serem mais leves que o padrão. Esta redução se refletirá no peso total da obra, elevando o fator de segurança estrutural (γ_c) ou

reduzindo os custos com armadura mais leve, sendo esta o material mais caro constituinte das estruturas em obras de engenharia.

Nestes ensaios mecânicos, os dados estatísticos convalidam o processo evidenciando sua homogeneidade, mesmo com uma linha de trabalho simples.

Mesmo com $F_{c28} > 25\text{MPa}$, observou-se que apenas a adição cerâmica de 5% (Tabela 25 e Gráfico 7) obteve homogeneidade quase fora do limite esperado, comparada à outras adições (desvio padrão $\leq 4\text{MPa}$ conforme NBR12655, 2006).

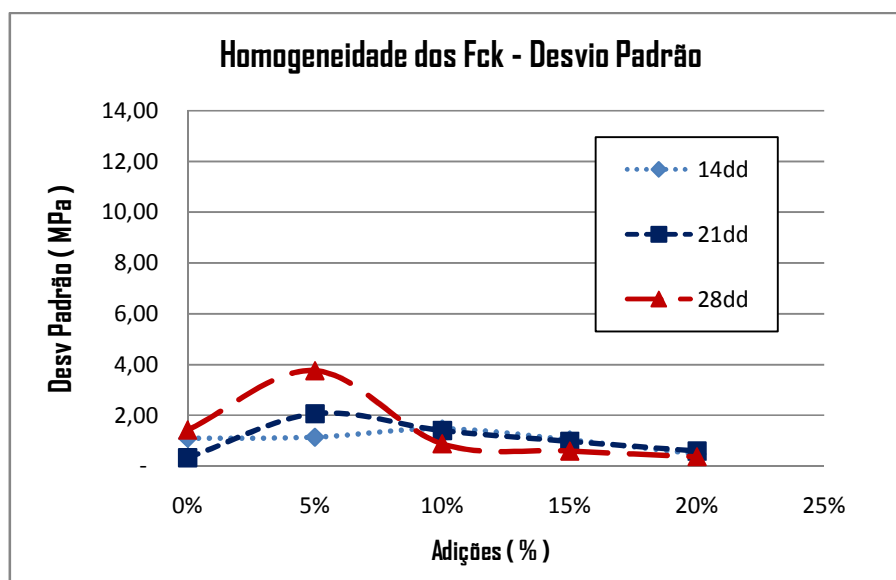
Tabela 25 - Estatística da Homogeneidade dos Fck

Estatística dos Ensaios de Resistência a Compressão						
Dados Estatísticos	Dias Cura	0% (MPa)	5% (MPa)	10% (MPa)	15% (MPa)	20% (MPa)
Variância	14	1,19	1,30	2,18	1,08	0,22
Desv. Padrão	14	1,09	1,14	1,48	1,04	0,47
Variância	21	0,11	4,26	1,97	0,96	0,35
Desv. Padrão	21	0,33	2,06	1,40	0,98	0,59
Variância	28	2,01	14,14	0,77	0,36	0,14
Desv. Padrão	28	1,42	3,76	0,88	0,60	0,37

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR12655 (2006)

Gráfico 7 - Homogeneidade das Resistências Características



Fonte: Autor

Aferiu-se também a homogeneidade pelo CVe (Coeficiente de Variabilidade) (Tabela 43, Anexo A) com faixa de classificação estatística mais rigorosa que a da

norma NBR5739 (2007). Este processo também confirmou que apenas a adição de 5% teve maiores problemas de dispersão do Fck, o que confirma o motivo da queda no seu F_{C28} . A Tabela 43 não usa a memória de cálculo exatamente com base na norma pois, a NBR5739 (2007) propõe valores mais brandos do C_{Ve} pois de baseia em amostragem duplicada (Tabela 44, Anexo B) que não foi possível se efetuar neste trabalho, pois precisaria quantidade inviável e muito maior de CPs. Devido à esta condição e por não satisfazer à premissa de condição menos favorável, deste projeto, foi calculado o C_{Ve} pela estatística padrão estudada em Iezzi (1997) com memória de cálculo no Apêndice A. Esta, possui uma escala construída com graduação mais rigorosa que a da NBR5739 (2007) que pode ser vista na Tabela 45 do Anexo B.

A condição de conformação escolhida para o preparo de CPs neste trabalho foi a condição B da norma (F_{ck} médio = 20MPa) de condição menos favorável. Adotou-se também o traço do cimento em “volume”, assim como os agregados e a água, para que fosse o mais real (de campo) possível. Obteve-se um Fck ainda promissor nesta condição, e pôde-se confirmar que, o aditivo se revelou ainda mais viável (NBR12655, 2006).

Os ensaios indicaram também que, a adição de $\geq 20\%$ de cerâmica, diminuíram muito a viabilidade, pois apresentaram resistência a compressão abaixo do faixa inicial de engenharia (15MPa) (BOTELHO, 2012). Verificou-se que devido a maior quantidade de cerâmica dentro do compósito, ocorreram maiores zonas de baixa aderência entre matriz x cerâmica, sendo as zonas de superfície vítreas, potenciais pontos de fragilidade mecânica por cisalhamento.

Lembra-se ainda que, como visto no item 5.4.3, as cerâmicas de revestimento possuem boa resistência a compressão mínima de aproximadamente 1kN/cm^2 ou 100kgf/cm^2 (Oliveira, 2000). Já a resistência à fratura da mesma é de $\approx 3,6\text{MPa}$ (CALLISTER, 2007) sendo este o ponto fraco do compósito, pois além da fratura nas interfaces vítreas (concreto x cerâmica) em segunda instância pode-se ter a ruptura na própria cerâmica.

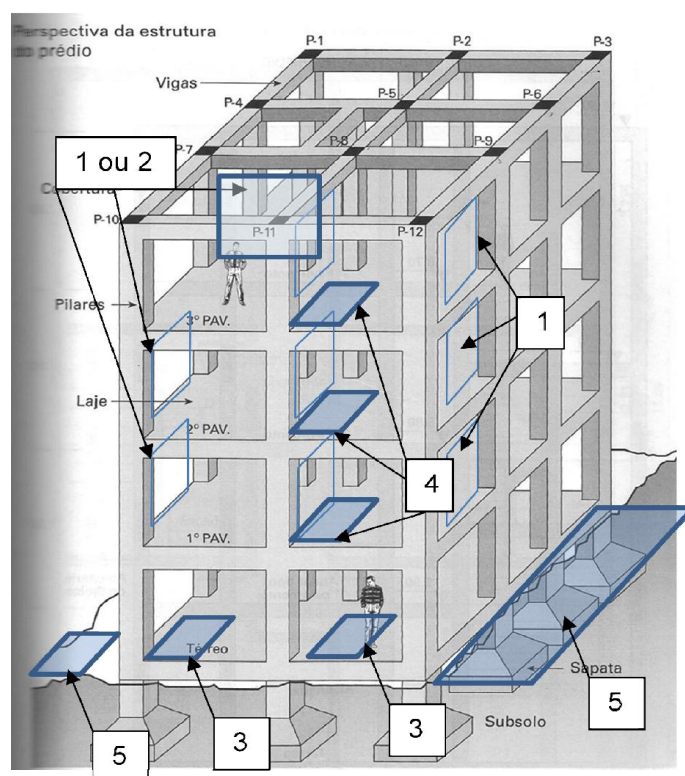
Um compósito com percentuais superiores a 20%, poderá potencializar o volume total de trincas, podendo gerar fragilidade até mesmo para peças com fins não-estruturais, usando o cimento padrão (*Portland* C_{PIII-40RS}). Esta conclusão pode não ser a mesma se o cimento usado for o CPV-ARI, que foi o caso do trabalho de Cabral (2007) onde ele ensaiou adições cerâmicas de 50% e 100%.

As adições de até 15% (Tabela 22) indicaram F_{c28} viável para peças de preenchimento (não-estruturais) e dentro do padrão médio de resistência (27,5MPa). Deve-se considerar que a premissa pretendida do F_{c28} neste estudo foi de $\approx 25\text{MPa}$ (BOTELHO, 2012; CAMPOS, 2012).

Estão listadas a seguir (Figura 10) alguns possíveis exemplos de peças não-estruturais, onde o compósito cerâmico obtido, pode ser aplicado conforme a norma (NBR15116, 2004) e onde os esforços “indiretos” por dilatação e recalque (compressão, tração, flexão e ruptura) não se projetam acima dos 3MPa:

1. Paredes pré-moldadas de concreto fabricadas com o compósito.
2. Paredes externas e internas de blocos feitos com o compósito.
3. Pisos em pavimentos térreos internos (entradas, recepções e corredores).
4. Pisos em pavimentos de subsolo internos à construção (garagens).
5. Pisos em pavimentos térreos em áreas externas (pátios e quadras).
6. Concreto para complementação e preenchimento de lajes pré-moldadas.

Figura 10 - Aplicações do Compósito em peças Não-Estruturais



Fonte: BOTELHO (2012)

6.2.7 Resultados da adição a 0% de Cerâmica – Tração (Diametral)

No ensaio de tração da adição de 0%, obteve-se os valores de Ftk listados na Tabela 26 (NBR5739, 2007).

Tabela 26 - Dados da Resistência à Tração - 0% Cerâmico

Dados Ensaio Tração 00% Aditivo Cerâmico (Referência)					
Cura (dias)	Tensão Média Eng.^a (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm²)
28.1	-	2,77	3,07	61,47	0,31
28.2	-	2,77	3,45	68,91	0,34
28.3	-	2,77	2,50	50,01	0,25
28.4	-	2,77	2,04	40,85	0,20
28.5	-	2,77	2,77	55,31	0,28

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

6.2.8 Resultados da adição a 0% de Cerâmica – Tração (Diametral)

Os Ftk da adição de 5% foram listados na Tabela 27 (NBR5739, 2007).

Tabela 27 - Dados da Resistência à Tração - 5% Cerâmico

Dados Ensaio Compressão 05% Aditivo Cerâmico					
Cura (dias)	Tensão Média Eng.^a (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm²)
28.1	-	10,67	9,32	186,4	0,93
28.2	-	10,67	12,08	241,59	1,21
28.3	-	10,67	12,43	248,54	1,24
28.4	-	10,67	10,06	201,25	1,01
28.5	-	10,67	9,46	189,28	0,95

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

6.2.9 Resultados da adição a 10% de Cerâmica – Tração (Diametral)

Os Ftk da adição de 10% foram listados na Tabela 28 (NBR5739, 2007).

Tabela 28 - Dados da resistência à tração - 10% cerâmico

Dados Ensaio Compressão 10% Aditivo Cerâmico					
Cura (dias)	Tensão Média Eng. ^a (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)
28.1	-	10,53	10,66	213,13	1,07
28.2	-	10,53	10,42	208,41	1,04
28.3	-	10,53	11,07	221,39	1,11
28.4	-	10,53	10,23	204,61	1,02
28.5	-	10,53	10,28	205,52	1,03

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

6.2.10 Resultados da adição a 15% de Cerâmica – Tração (Diametral)

Os Ftk da adição de 15% foram listados na Tabela 29 (NBR5739, 2007).

Tabela 29 - Dados da resistência à tração - 15% cerâmico

Dados Ensaio Compressão 15% Aditivo Cerâmico					
Cura (dias)	Tensão Média Eng. ^a (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)
28.1	-	10,82	10,89	217,71	1,09
28.2	-	10,82	11,20	224,04	1,12
28.3	-	10,82	10,62	212,41	1,06
28.4	-	10,82	10,75	215	1,08
28.5	-	10,82	10,66	213,12	1,07

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

6.2.11 Resultados da adição a 20% de Cerâmica – Tração (Diametral)

Os Ftk da adição de 20% foram listados na Tabela 30 (NBR5739, 2007).

Tabela 30 - Dados da resistência à tração - 20% cerâmico

Dados Ensaio Compressão 20% Aditivo Cerâmico					
Cura (dias) /CP	Tensão Média Eng.(MPa)	Tensão Média (MPa)	Tensão (MPa)	Força (kN)	Pressão (kN/cm ²)
28/1	-	5,12	4,96	99,22	0,50
28/2	-	5,12	5,00	100,07	0,50
28/3	-	5,12	5,33	106,53	0,53
28/4	-	5,12	5,17	103,45	0,52
28/5	-	5,12	5,14	102,8	0,51

Fonte: Autor

Base Técnica: BOTELHO (2012)

6.2.12 Discussão dos Resultados da Resistência à Tração (Diametral)

Como a tração em peças não-estruturais, devido a dilatação ou recalque da obra, é de pequena ordem (não ultrapassando os 3MPa) esta foi pouco relevante para a pesquisa do compósito de concreto, neste projeto.

Pela estatística de engenharia, as tensões de tração normalmente são 10 vezes menores que as tensões que se obtém à compressão (Botelho, 2012).

Como observação interessante, a adição de 0% (Tabela 26) que deveria ser a de referência, foi a que apresentou menor Ftk (resistência característica à tração) entre as adições cerâmicas. Mas, considerando-se o Ftk seja 10% do Fck (Fck deste projeto=25MPa) a adição de 0% (Ref.) deveria ser de $\approx 2,5$ MPa, o que se confirmou.

A adição de 20% (Tabela 30) gerou um Ftk ≈ 5 MPa, que foi até acima dos 10% da tensão de compressão desta adição.

Outro dado mais interessante, foram os Ftk das outras três adições (5%, 10% e 15%) surpreendendo, com valor em torno dos 10MPa (Tabela 27, 28 e 29) maior que os valores esperados para o Ftk destas adições ($Ftk = Fck \times 0,1$). Mas corroboraram, também proporcionalmente, sendo as adições com maiores tensões de tração dentre as de 0% a 20%.

6.3 RESULTADOS - ÍNDICE DE POROSIDADE (DURABILIDADE)

Nesta seção, encontram-se as análises dos resultados do ensaio de absorção de água (Tabela 31 a 35) conforme NBR9778 (2009) os índices de vazios (Tabela 39 a 41) e a durabilidade estimada para o compósito (Tabela 42).

A adição cerâmica de 0% (Ref.) teve a maior homogeneidade de valores (Gráfico 8) e o menor índice de absorção d'água (7%) (Tabela 31) dentre as 5 adições. O resultado já era esperado por não haverem nos CPs de 0%, agregados diferentes da brita, tendo esta adição, gerado os maiores pesos submersos e a menor variação do índice de absorção de água (NBR9778, 2009).

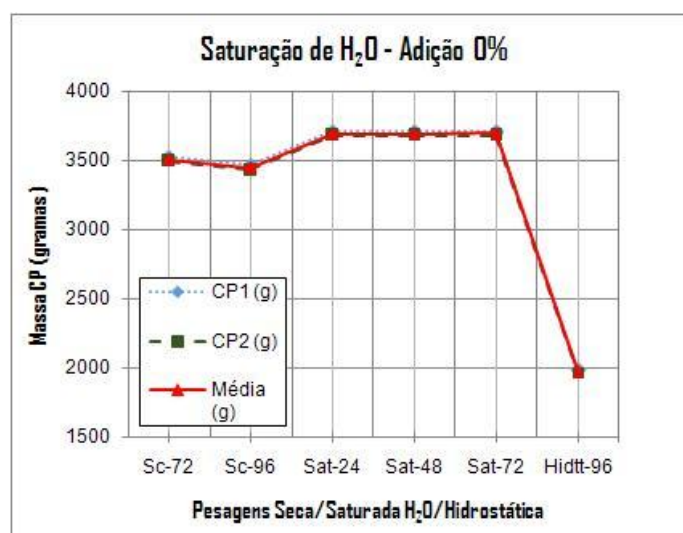
Tabela 31 - Saturação de Água na adição de 0% de Cerâmica

Pesagens Ensaio Absorção de Água - Adição 0%			
Tipo Pesagem / Tempo	CP1 (g)	CP2 (g)	Média (g)
Seca (ambiente) / 72h	3526	3494	3510,0
Seca (estufa) / 96h	3469	3430	3449,5
Saturação de H ₂ O/24h	3708	3680	3694,0
Saturação de H ₂ O/48h	3710	3682	3696,0
Saturação de H₂O/72h	3712	3682	3697,0
Hidrostática/96h	1988	1968	1978
Índice Abs. Água	6,55%	6,84%	7,00%

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

Gráfico 8 - Saturação de H₂O - Adição 0%



Fonte: Autor

A adição cerâmica de 5% (Tabela 32) teve a menor homogeneidade (Gráfico 9) e índice de absorção d'água (7,7%) imediatamente acima da adição de 0%.

Tabela 32 - Saturação de Água na adição de 5% de Cerâmica

Pesagens Ensaio Absorção de Água - Adição 5%			
Tipo Pesagem / Tempo	CP1 (g)	CP2 (g)	Média (g)
Seca (ambiente) / 72h	3374	3240	3307
Seca (estufa) / 96h	3366	3232	3299
Saturação de H ₂ O/24h	3632	3504	3568
Saturação de H ₂ O/48h	3634	3506	3570
Saturação de H₂O/72h	3638	3510	3574
Hidrostática/96h	2028	1706	1867
Índice Abs. Água	7,48%	7,92%	7,70%

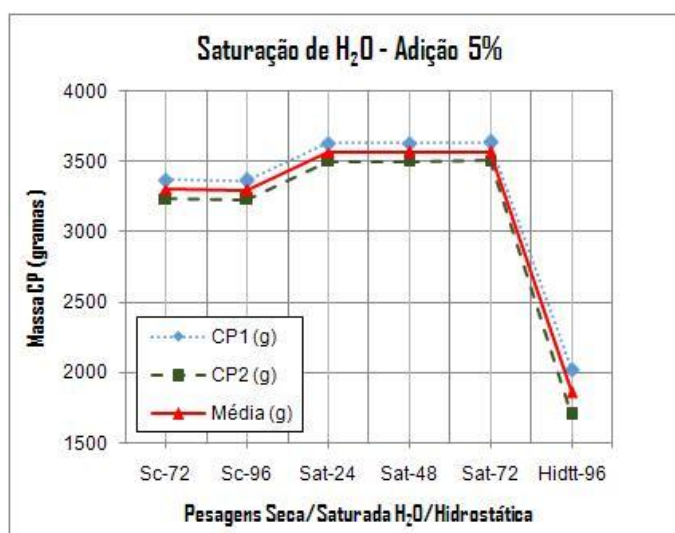
Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

A adição de 5% (Tabela 32) demonstrou normalidade em termos de proporção em relação às outras adições cerâmicas, mas foi aquela que apresentou a maior diferença percentual dos resultados de um CP para outro.

A diferença de peso específico, na adição de 5%, nas várias pesagens entre os CPs 1 e 2, manteve-se praticamente uniforme apesar da maior distância entre os pesos específicos e foi a terceira que mais absorveu água.

Gráfico 9 - Saturação de H₂O - Adição 5%



Fonte: Autor

A adição cerâmica de 10% (Tabela 33) teve a maior homogeneidade (Gráfico 10) dentre as adições com RCD mas teve o maior índice de absorção d'água (7,94%) dentre as elas, conseguindo ser maior que das adições de 15% e 20%, apesar da diferença de décimos de percentual.

Tabela 33 - Saturação de Água na adição de 10% de Cerâmica

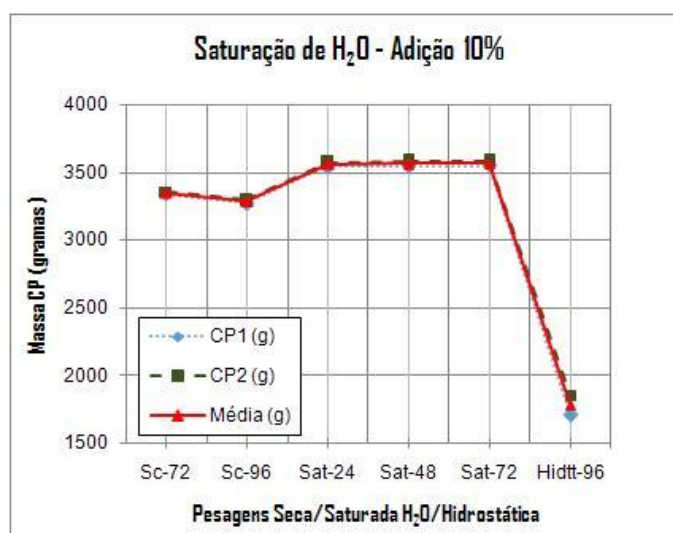
Pesagens Ensaio Absorção de Água - Adição 10%			
Tipo Pesagem / Tempo	CP1 (g)	CP2 (g)	Média (g)
Seca (ambiente) / 72h	3338	3356	3347
Seca (estufa) / 96h	3272	3294	3283
Saturação de H ₂ O/24h	3542	3572	3557
Saturação de H ₂ O/48h	3544	3580	3562
Saturação de H₂O/72h	3548	3584	3566
Hidrostática/96h	1718	1858	1788
Índice Abs. Água	7,78%	8,09%	7,94%

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

O motivo desta maior absorção da adição de 10% se confirmou (Tabela 33) devido ao seu maior índice de vazios atingido, maior que as adições de 15% e 20%.

Gráfico 10 - Saturação de H₂O - Adição 10%



Fonte: Autor

A adição cerâmica de 15% (Tabela 34) teve homogeneidade (Gráfico 11) e índice de absorção de 7,74% acima do valor da adição de 5%, mas ainda menor que

o das adições de 10% e 20%, considerando-se ainda dentro da normalidade crescente de aumento de absorção d'água.

Tabela 34 - Saturação de Água na adição de 15% de Cerâmica

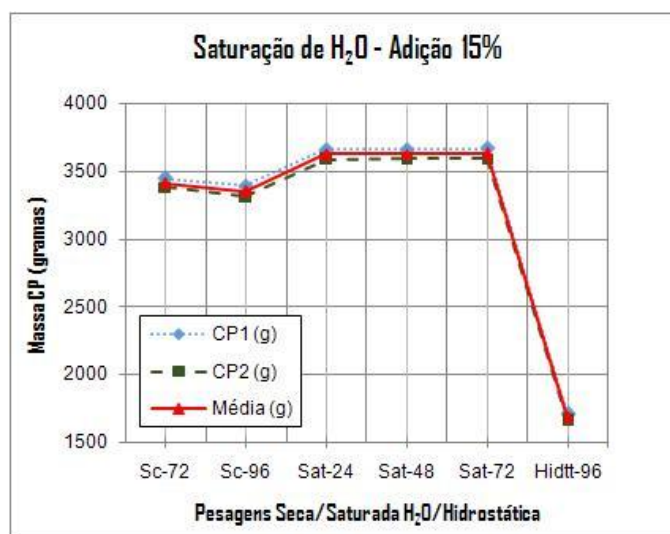
Pesagens Ensaio Absorção de Água - Adição 15%			
Tipo Pesagem / Tempo	CP1 (g)	CP2 (g)	Média (g)
Seca (ambiente) / 72h	3444	3382	3413
Seca (estufa) / 96h	3390	3310	3350
Saturação de H ₂ O/24h	3662	3588	3625
Saturação de H ₂ O/48h	3664	3590	3627
Saturação de H₂O/72h	3668	3594	3631
Hidrostática/96h	1708	1662	1685
Índice Abs. Água	7,58%	7,90%	7,74%

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

A diferença de peso específico na adição de 15%, nas várias pesagens, entre os CPs 1 e 2, manteve-se quase uniforme.

Gráfico 11 - Saturação de H₂O - Adição 15%



Fonte: Autor

A adição cerâmica de 20% teve homogeneidade (Gráfico 12) e índice (7,93%) de absorção d'água (Tabela 35) acima daqueles da adição de 15% e imediatamente menor que os da adição de 10%, mas ainda dentro da normalidade crescente de aumento de absorção d'água e índice de vazios, em relação às demais.

Tabela 35 - Saturação de Água na adição de 20% de cerâmica

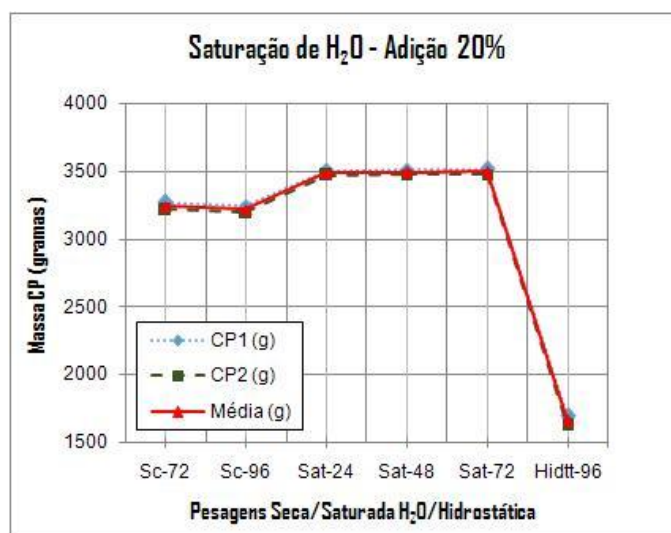
Pesagens Ensaio Absorção de Água - Adição 20%			
Tipo Pesagem / Tempo	CP1 (g)	CP2 (g)	Média (g)
Seca (ambiente) / 72h	3268	3216	3242
Seca (estufa) / 96h	3240	3196	3218
Saturação de H ₂ O/24h	3506	3470	3488
Saturação de H ₂ O/48h	3510	3474	3492
Saturação de H₂O/72h	3514	3476	3495
Hidrostática	1696	1624	1660
Índice Abs. Água	7,80%	8,06%	7,93%

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

A adição de 20% (Gráfico 12) foi uma das que apresentou a menor diferença de massa entre os CPs 1 e 2, indicando ter havido bom processo de conformação.

Dentro da lógica, entre as adições foi a de menor massa específica (Tabela 36 e Gráfico 13).

Gráfico 12 - Saturação de H₂O - Adição 20%

Fonte: Autor

Na Tabela 36 foram listadas as pesagens dos CPs a seco, saturados de água e suas pesagens submersas, obtida em balança hidrostática (NBR9778, 2009).

Tabela 36 - Resumo das Pesagens (Seca - Saturada - Hidrostática)

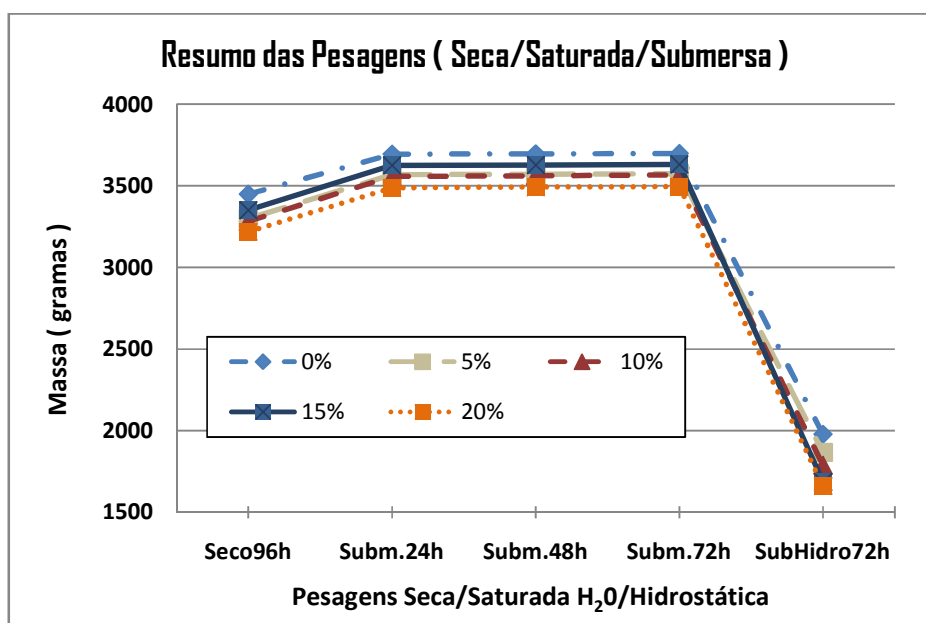
Resumo das Pesagens Seca - Saturada - Hidrostática					
% Adição Cerâmica	Seco96h	Sub.24h	Sub.48h	Sub.72h	SubHidro72h
0%	3.450	3.694	3.696	3.697	1.978
5%	3.299	3.568	3.570	3.574	1.867
10%	3.283	3.557	3.562	3.566	1.788
15%	3.350	3.625	3.627	3.631	1.685
20%	3.218	3.488	3.492	3.495	1.660

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

No Gráfico 13, nota-se a aproximação das pesagens (Tabela 36) nas dosagens de 5% e 10%. Os percentuais tiveram variação progressiva e homogênea, com exceção da adição de 15% com maior massa à seco, quando deveria estar entre as massas das adições de 10% e 20% ($\approx 3.240\text{g}$ a seco) mas seu peso específico ($2,01\text{g/cm}^3$) ficou dentro de uma variação aceitável (Tabela 37). Estes CPs podem ter ficado pouco maiores que os de 10% e 20%. Ensaios experimentais de concreto são passíveis de ocorrer estes tipos de desvio de valor pois brita e cerâmica podem também, conter variação de densidade não prevista (CABRAL, 2007; FONSECA, 2006).

Gráfico 13 - Resumo das Pesagens do Ensaio Absorção de Água



Fonte: Autor

Pelos dados obtidos é possível afirmar que, o uso de adições cerâmicas reduziu o peso específico real das peças de concreto (Tabela 37) o que é um constatação lógica pois o peso específico da cerâmica ($\approx 2,4\text{g/cm}^3$) é menor que o da brita natural ($\approx 2,7\text{g/cm}^3$) (BOTELHO, 2012).

Tabela 37 - Pesos específicos médios dos CPs

Pesos Específicos Médios dos CPs (g/cm ³)			
Adição Cerâmica	Seco	Saturado	Real
0%	2,01	2,15	2,34
5%	1,93	2,09	2,30
10%	1,85	2,01	2,20
15%	1,72	1,87	2,01
20%	1,75	1,90	2,07

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

Comparando as demais adições com a de 0% (Tabela 38) a diferença percentual do peso específico dos CPs, variou de 2% (adição de 5%) até 14% (adição de 15%). Isto confirmou que, o peso específico menor dos RCDs cerâmicos, tiveram pouca influência negativa no desempenho da trabalhabilidade e da resistência à compressão até a adição de 15%. Esta influência afetou mais, a resistência da adição de 20% (CAMPOS, 2012). No entanto, não inviabilizaram a durabilidade do compósito para a premissa de classe I, adotada neste projeto (CABRAL, 2007; NBR15116, 2004).

Tabela 38 - Diferença dos Pesos Específicos entre 0% e demais Adições

Diferença % entre o Peso Específico dos CPs da Adição de 0% (Referência) e as Adições Cerâmicas			
Adição Cerâmica	Seco	Saturado	Real
0%(Ref.)	0%	0%	0%
5%	4%	3%	2%
10%	8%	7%	6%
15%	14%	13%	14%
20%	13%	11%	12%

Fonte: Autor

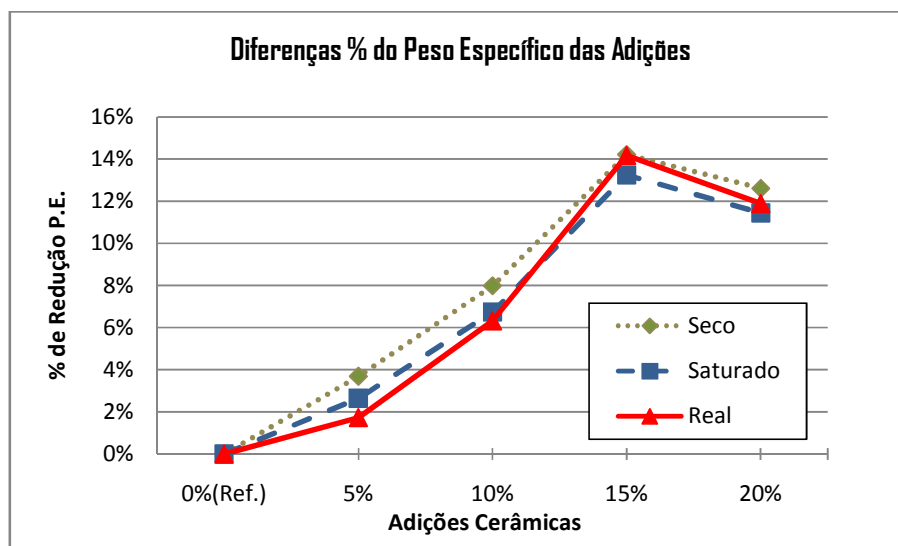
Base Técnica: NBR9778 (2009)

No Gráfico 14, pode-se notar o desvio no peso específico da adição de 15% de aditivo cerâmico, fora da expectativa da tendência da curva, tendo esta adição

então, atingido o menor grau de densidade dentre os demais.

Por outro lado, com esta diminuição do peso específico, promoverá uma economia de armadura substancial em grandes peças de concreto armado tais como lajes pré-moldadas e pisos térreos, subsolo de garagens, pátios e estradas (SOUZA, 2016; NBR15116, 2004).

Gráfico 14 - Diferenças dos Pesos Específicos dos CPs



Fonte: Autor

Por exemplo: Qual seria o peso de uma laje com concreto 20% cerâmico, que tivesse 5m (largura) x 4,20m (comprimento) x 30cm (altura) (BOTELHO, 2012)?

Resposta: Os cálculos 6.1 e 6.2 mostram a redução de 12% do peso com adição 20% de cerâmica (sem considerar a redução do peso da armadura).

$$\boxed{Vol. = 4,20m \times 5,00m \times 0,3m = 6,3m^3} \quad (6.1)$$

$$\boxed{Peso = \frac{25kN}{m^3} \times 6,3m^3 = 15,8t(\text{padrão}) \times 0,88(20\% RCD) = 13,9t} \quad (6.2)$$

Com as pesagens dos CPs e utilizando-se a Equação 5.4, obtiveram-se os valores de absorção de água e depois com a Equação 5.5, os índices de vazios, com estes resultados consolidados na Tabela 39.

Tabela 39 - Índices Médios de Absorção Água e de Vazios

Absorção de Água e Índice de Vazios (Iv) dos CPs (%)				
Adição Cerâmica	Abs. H ₂ O	Diferença Ref. 0% Abs.H ₂ O	Índice vazios	Diferença Ref. 0% Diferença Iv
0% (Ref.)	6,69%	-	14,40%	-
5%	7,69%	15,00%	16,11%	12,00%
10%	7,94%	19,00%	15,92%	11,00%
15%	7,74%	16,00%	14,44%	0,00%
20%	7,93%	18,00%	15,10%	5,00%

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009)

6.3.1 Índice de Vazios das Adições Cerâmicas

Com os valores de Iv, comparou-se os mesmos com as faixas de Iv da Tabela 40 (Phaedonos, 1996) e obteve-se a classificação dos Iv das adições cerâmicas.

O Fator idade é uma correção aplicada ao índice de vazios, que adiciona um valor percentual a mais nos Iv obtidos, quando a data do ensaio de absorção for acima dos 28 dias (Tabela 41 - Phaedonos, 1996). O acréscimo é determinado na coluna da direita, optando o pesquisador, por acréscimo em melhor condição (valor mínimo) ou em pior condição (valor máximo)

Neste dissertação, optou-se por aplicar o fator idade para ajustar a data do ensaio de absorção de água, que foi acima dos 28 dias de cura. Como esta opção já elevou o ensaio à pior condição, optou-se pelos percentuais de acréscimo de idade em “melhor condição” (Tabela 41).

Tabela 40 - Classificação dos Índices de Vazios

Classificação de Iv	
Índice Vazios (Iv)	Classificação
Iv < 12 %	Excelente
12 ≤ Iv < 14 %	Bom
14 ≤ Iv < 15%	Normal
15% ≤ Iv < 17%	Marginal
Iv ≥ 17%	Ruim

Fonte: (Phaedonos, 1996)

Tabela 41 - Faixas de Acréscimo ao Iv - Fator Idade

Correção para Ensaio de Absorção de Água efetuada acima de 28dias	
Valor Obtido de Iv (%)	Valor Percentual à adicionar ao Iv (%)
$Iv \leq 10$	1%
$10 \leq Iv < 15$	2% a 3%
$Iv \geq 15\%$	3% a 4%

Fonte: Phaedonos (1996)

A classificação dos Iv obtidos neste trabalho (Tabela 40) e com os mesmo, comparando-os às faixas de valores da esquerda da Tabela 41 (Phaedonos, 1996) obteve-se a classificada dos Iv descrita na Tabela 42. A durabilidade do composto pôde ser obtida, entrando-se com as classificações dos Iv (Tabela 42) dentro da Tabela 6.1 (classificação de agressividade ambiental) da norma NBR6118 (2004).

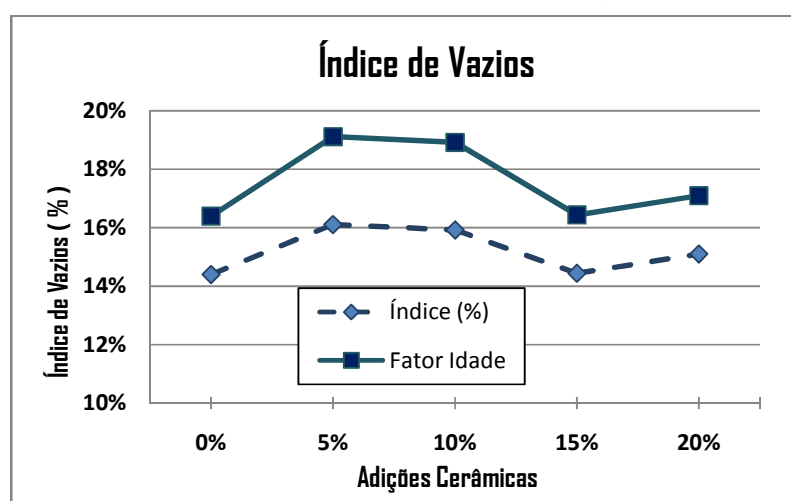
Tabela 42 - Classificação dos Iv após aplicação do Fator Idade

Classificação do Índice de Vazios			
% Adição Cerâmica	Índice (%)	Fator Idade	Avaliação
0%	14,40	16,40	Marginal
5%	16,11	19,11	Ruim
10%	15,92	18,92	Ruim
15%	14,44	16,44	Marginal
20%	15,10	17,10	Ruim

Fonte: Autor

Base Técnica: NBR9778 (2009), Phaedonos (1996)

Gráfico 15 - Índice de vazios (obtido e ajustado)



Fonte: Autor

6.3.2 Discussão dos Resultados do Ensaio de Absorção de Água

Apesar da relativa homogeneidade nas pesagens, analisando o Gráfico 14 da Tabela 38, e comparando os percentuais da dosagem de referência com os das dosagens de substituição, a absorção de água variou de 15% à 19% a mais e, o índice de vazios variou de 0% a 12%. Ambas variações não foram uniformes. As distorções encontradas podem ter ocorrido devido a problemas não percebidos durante a conformação ou adensamento dos CPs ou ainda, pode ter havido uma heterogeneidade micro-estrutural dos materiais utilizados no concreto, mesmo com a aparente qualidade na aquisição dos mesmos.

Lembra-se que a variabilidade acidental é intrínseca nos ensaios com concreto, que é um material compósito formado por cinco materiais (cimento, água, areia, brita e aço) tendo pelo menos três deles (cimento, areia e brita) propriedades que também podem variar bem mais do que as propriedades dos metais ou polímeros, conforme a jazida ou forma de fabricação ou tempo de armazenamento.

Na engenharia civil, efetuam-se os cálculos com índices que são acrescidos de fatores de segurança com base na estatística avalizada por normas como a ABNT (Ex.: NBR12655, 2006; NBR6118, 2004). Isso é feito justamente, para se cobrir deficiências não previstas originadas nas falhas, heterogeneidade interna dos materiais formadores do concreto e de possíveis desvios de condições de construção das obras (BOTELHO, 2012).

Observando-se os resultados dos índices de vazios (Tabela 42) a classificação ficou abaixo dos valores normais (bom e regular) para durabilidade, tal como aquela que ocorreu também, no trabalho de Cabral (2007).

Contudo, isto foi conveniente tecnicamente e já esperado, uma vez que neste trabalho, considerou-se como premissa, conseguir a viabilidade do RCD cerâmico na situação de condição mais desfavorável.

Como pôde ser observado no Gráfico 15, os índices de vazios ficaram todos entre 10% e 19%, entre as classificações Marginal e Ruim, que indicam neste caso, que o compósito obtido corresponde a ambientes classe I (baixa agressividade: ambientes rurais ou submersos) conforme as normas (NBR9778, 2009; 6118, 2004; CABRAL, 2007).

Valores de absorção e índice de vazios do percentual de 20% cerâmico, no trabalho de Campos (2012) foram diferentes ($Abs.H_2O=5,48\%$ e $Iv=14,61\%$) mas o

valor do I_v (15,10%) ficou próximo do obtido neste trabalho.

Cabral (2007) na mistura a 50% de adição de RCD cerâmico (com fator a/c de 0,6) obteve um $I_v = 21\%$, pois utilizou cerâmica não vitrificada. Ele também obteve a maioria dos valores de índice de vazios classificados abaixo do ideal, situando-os entre Marginal e Ruim, assim, a durabilidade do concreto de seu projeto ficou também dentro da classe I, tal como neste projeto.

É possível que o fator a/c de 0,65 tenha sido elevado para este traço neste projeto, pois nas conformações, o concreto foi limitado ao valor de abatimento de 5cm, gerando um valor menor de F_{ck} do que seria obtido com a/c de 0,6 ou 0,5. Porém, uma maior redução do fator a/c , poderia comprometer ou inviabilizar a trabalhabilidade do concreto (NBR9778, 2009; NBR6118, 2004; ARAGÃO, 2007; BOTELHO, 2012).

Os resultados obtidos não invalidaram o produto, uma vez que, com os índices apresentados, sem o máximo rigor nas conformações, os F_{ck} obtidos já indicaram relevante viabilidade, acima dos 25MPa. Além disso a absorção de água ficou dentro da faixa $<12\%$ da norma NBR15116 (2004). Caso se utilize um fator a/c menor e um maior controle na conformação dos CPs, maiores resistências do concreto poderão ser atingidas, podendo também, colocar o " I_v " dentro das classes II (ambiente urbanos: agressividade moderada) ou classe III (ambientes industriais: agressividade forte) (NBR5738, 2003; NBR6118, 2004, BOTELHO, 2012).

6.4 RESULTADOS - ANÁLISE MEV – MORFOLOGIA MATERIAIS

Esta seção trata das análises e discussões sobre os resultados das micrografias via MEV, das amostras de cerâmica e compósito final com foco nas interfaces entre os materiais e sua relação com a porosidade e as resistências já discutidas nas seções anteriores deste trabalho.

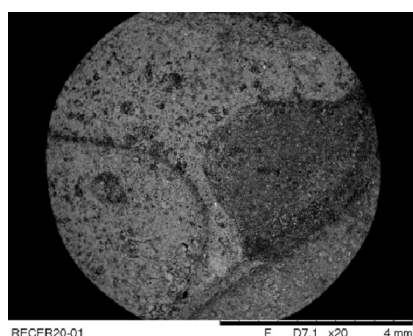
6.4.1 Resultados do MEV - Revestimento Cerâmico

As amostras de cerâmica 1 e 2 (Micrografia 1) são formadas por conglomerados de componentes granulares comprimidos, resultado da sinterização da composição da argila na fábrica de revestimentos. A digitalização mostrou boa nitidez nas magnitudes de 20x até 1000x. Algumas imagens acima 1000x apresentaram *overload* de magnetização e falta de nitidez.

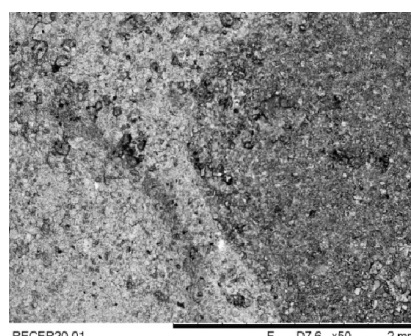
Dada a forma lamelar do revestimento cerâmico (Fotografia 21) este não apresentou variações aleatórias superficiais expressivas (Micrografia 1 e 2) em seu sentido longitudinal, em comparação com as da brita natural, que possui forma mais ovalada e cheia de relevos aleatórios (CAMPOS, 2012; CABRAL, 2007).

Mesmo assim, sob ampliação, a superfície do revestimento cerâmico apresentou alta porosidade, o que é conveniente para a penetração e adesão do concreto, porém ainda menos porosa e facetada que a brita natural (OLIVEIRA, 2006; CABRAL, 2007).

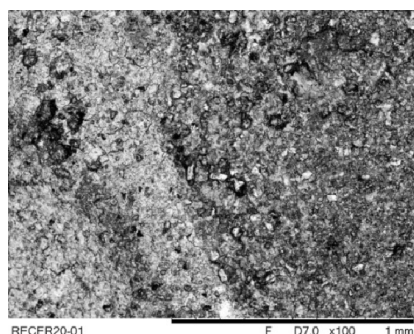
Micrografia 1 - Cerâmica, amostra 1, imagens de (a) até (h)



a) Imagem cerâmica à 20x

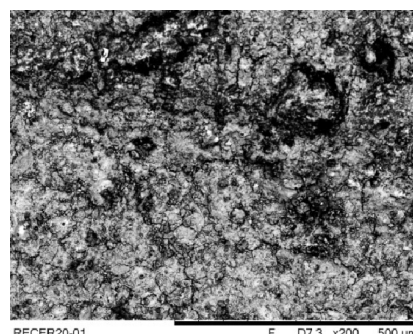


b) Imagem cerâmica à - 50x



RECER20-01 F D7.0 x100 1 mm

c) Imagem cerâmica à 100x



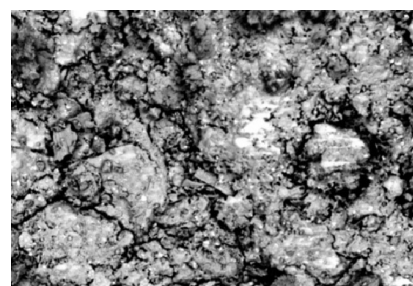
RECER20-01 F D7.3 x200 500 um

d) Imagem cerâmica à 200x



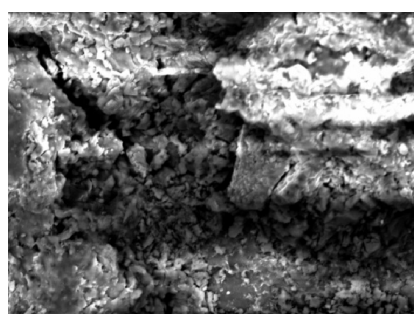
RECER20-01 F D7.2 x500 200 um

e) Imagem cerâmica à 500x



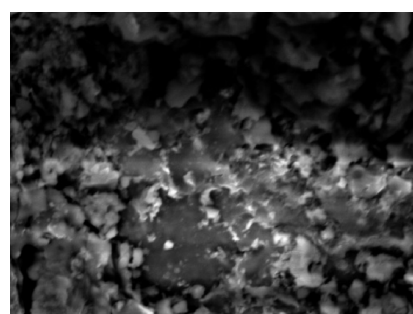
RECER20-01 F D7.2 x1.0k 100 um

f) Imagem cerâmica à 1000x



RECER20-01 N D7.4 x2.0k 30 um

g) Imagem cerâmica à 2000x



RECER20-01 N D7.4 x5.0k 20 um

h) Imagem cerâmica à 5000x

Fonte: Autor

A amostra 1 de cerâmica (Micrografia 1) mostrou granulometria mais grosseira que a da amostra 2 (Micrografia 2) mesmo sendo fabricada pelo mesmo processo, apresentando diferenças superficiais, mas ainda tendo uniformidade geral.

A porosidade influencia na aderência entre materiais (SMITH, 2012). Os alto-relevos de fabrica (Micrografia 1 e Micrografia 2) na superfície inferior das amostras, são feitos para ganho de aderência cerâmica x argamassa, aumentando a superfície de contato, que no caso deste trabalho, foram vantajosas e convenientes, promovendo maior aderência e resistência mecânica ao compósito (OLIVEIRA, 2000; NBR13818, 1997).

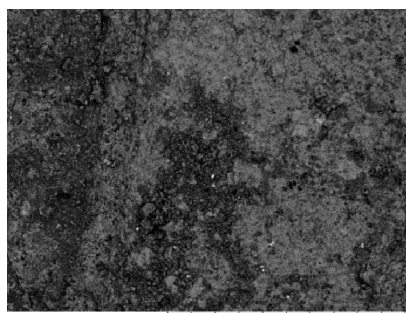
Micrografia 2 - Cerâmica, amostra 2, imagens de (a) até (h)



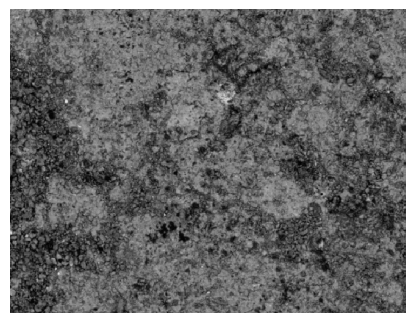
a) Imagem cerâmica à 20x



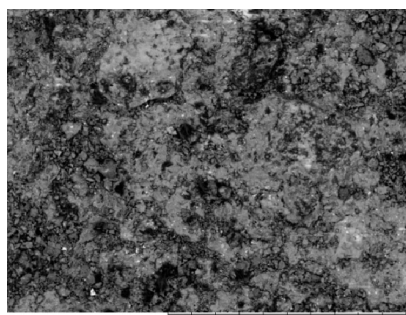
b) Imagem cerâmica à 50x



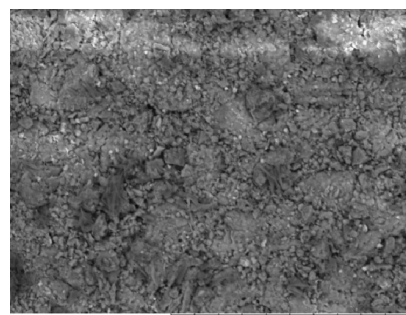
c) Imagem cerâmica - 100x



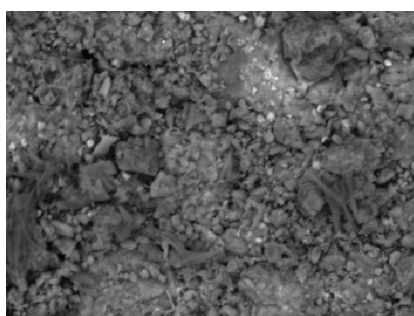
d) Imagem cerâmica à 200x



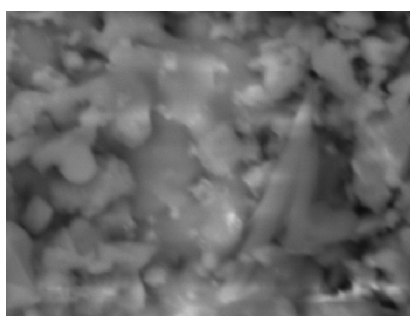
e) Imagem cerâmica - 500x



f) Imagem cerâmica à 1000x



g) Imagem cerâmica à 2000x



h) Imagem cerâmica à 5000x

Fonte: Autor

6.4.2 Resultados - MEV - Compósito de Concreto

Foram identificadas nas ampliações das amostras do compósito, inclusões dos próprios materiais, grãos de brita, mica, quartzo, micro-trincas e vazios, dispersos no concreto e na cerâmica, além de certa porosidade nestes dois materiais. Notou-se também, areia intersticial entre a brita, concreto e a cerâmica, formando estruturas complexas (OLIVEIRA, 2006). As imagens aqui indicadas, são das amostras dos CPs recolhidas durante a fase de conformação, sendo estas, visões pontuais da morfologia geral do produto.

O compósito é formado por conglomerados finos e graúdos, aglutinados quimicamente pelo cimento, pela reação de coagulação do mesmo com a água (Time LIFE™, 1996). Uma massa compacta de agregados envoltos em silicatos de aparência cinza, granular, maciça e rochosa (Micrografia 3, adição de 5% à 100x, 500x e 1000x) outras vezes plástica (Micrografia 8, adição de 15% à 1000x) (OLIVEIRA, 2006).

Com as ampliações, os materiais tornaram-se menos distinguíveis e foi necessária a inclusão de linhas e etiquetas, para identificá-los e demarcar (linhas amarelas) as interfaces (matriz x cerâmica e matriz x brita). A perda da distinção das fronteiras entre os materiais (Micrografia 3, Micrografia 4 e Micrografia 8) indicou propriedades morfológicas e químicas semelhantes. Isto foi ótimo pois, conforme a literatura da Ciência dos Materiais, compósitos formados por materiais de características morfológicas e químicas afins, tendem a ter uma mecânica simbiótica mais homogênea, melhorando o desempenho final da peça formada (SMITH, 2012).

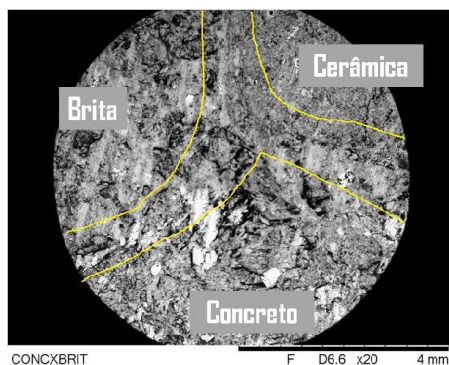
6.4.2.1 Amostras de Compósito à 5% - Interface Cerâmica x Concreto.

A amostra de 5% de adição (Micrografia 3a a 3f) apresentou interface matriz (argamassa) x cerâmica de difícil determinação, identificável somente à 1000x, com aparência granular e mássica, aderência bem consolidada, corroborando a resistência obtida nos ensaios mecânicos (OLIVEIRA, 2006).

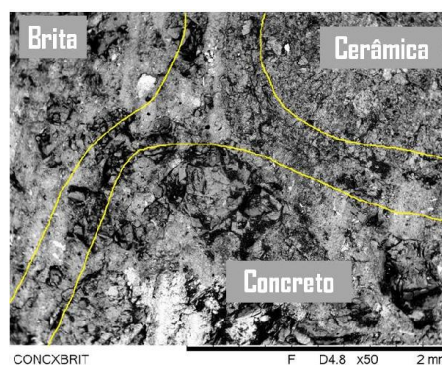
Pôde-se perceber as diferentes interfaces entre a matriz (argamassa) x cerâmica (Micrografia 3) se comparadas às interfaces (Micrografia 4) de matriz (argamassa) x brita (OLIVEIRA, 2006).

O percentual de 5%, apesar de não ter gerado bom F_{c28} , apresentou boa resistência geral à compressão, o que correspondeu ao tipo de microestrutura observada nas Micrografia 3a 3f (OLIVEIRA, 2006).

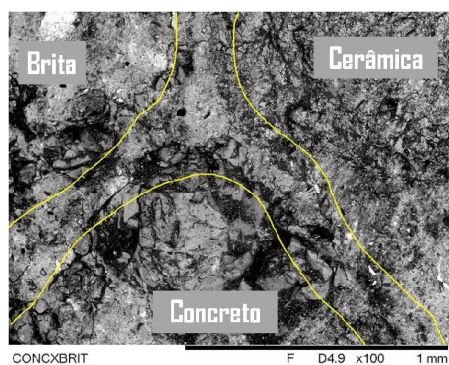
Micrografia 3 - Amostra 5% Concreto x Cerâmica, ampliações de (a) até (f)



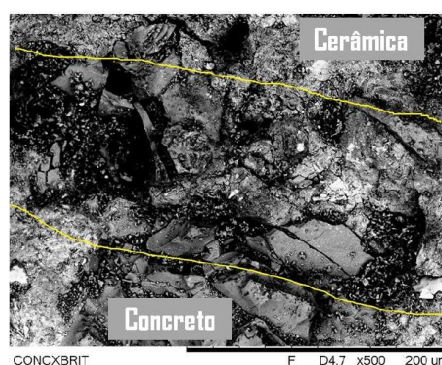
a) Concreto x Cerâmica – 20x



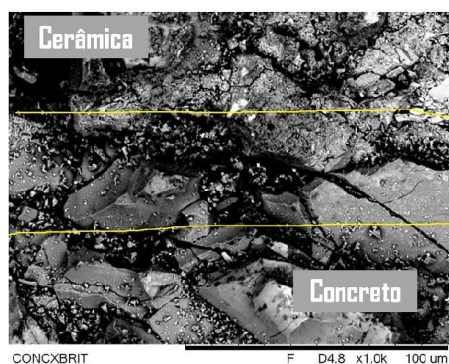
b) Concreto x Cerâmica – 50x



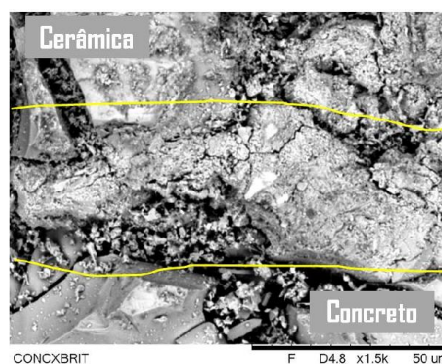
c) Concreto x Cerâmica – 100x



d) Concreto x Cerâmica – 500x



e) Concreto x Cerâmica – 1000x



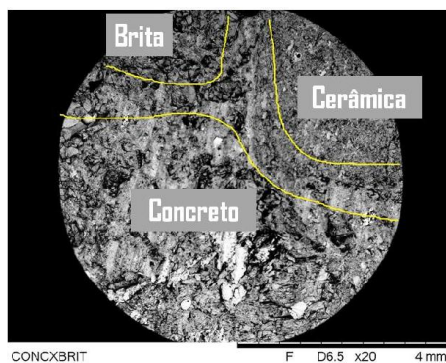
f) Concreto x Cerâmica – 1500x

Fonte: Autor

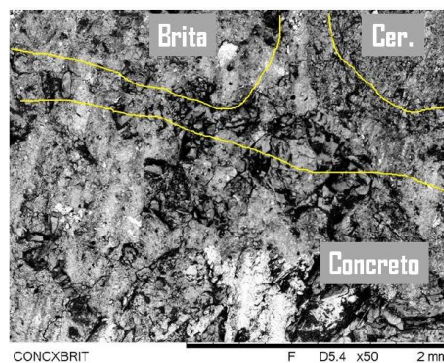
6.4.2.2 Amostras de Compósito à 5% - Interface Brita x Concreto.

Nas micrografias concreto x brita, a amostra com 5% de adição (Micrografia 4a a 4f) teve interface matriz x brita de difícil distinção, identificável a partir de 500x, mostrando boa consolidação, justificando a resistência obtida (OLIVEIRA, 2006).

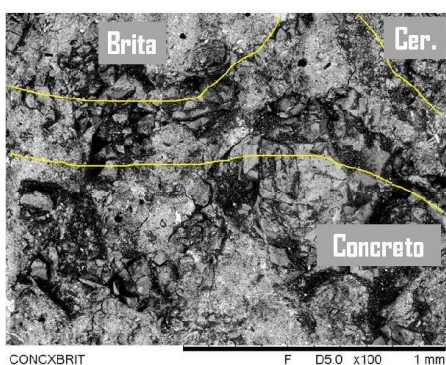
Micrografia 4 - Amostra 5% Concreto x Brita - ampliações de (a) até (f)



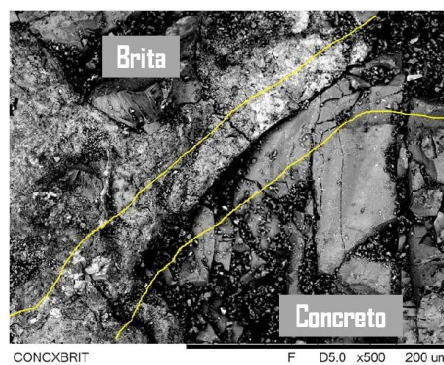
a) Concreto x Brita – 20x



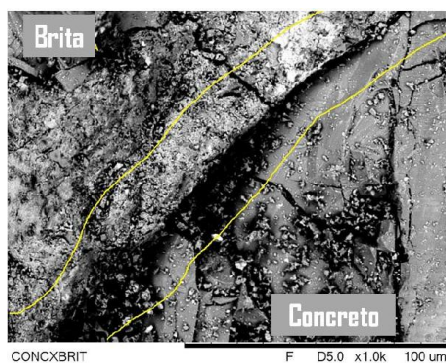
b) Concreto x Brita – 50x



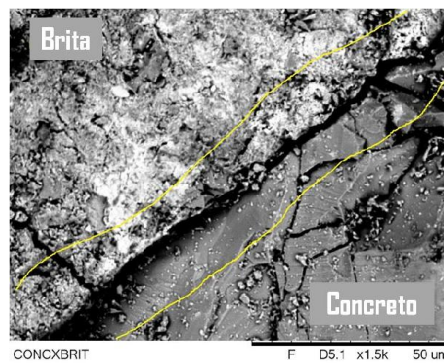
c) Concreto x Brita – 100x



d) Concreto x Brita – 500x



e) Concreto x Brita – 1000x



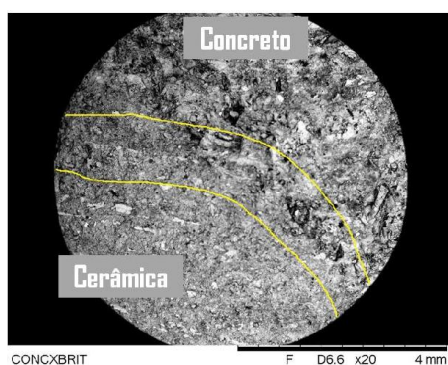
f) Concreto x Brita – 1500x

Fonte: Autor

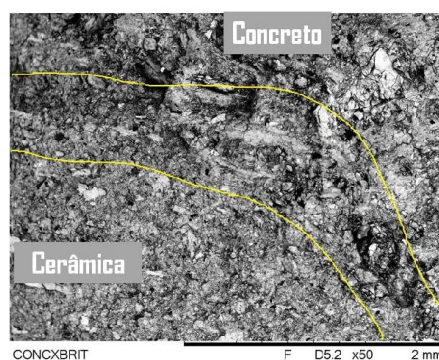
6.4.2.3 Amostras de Compósito à 10% - Interface Cerâmica x Concreto.

Nestas amostras (Micrografia 5a a 5f) a interface matriz x cerâmica, apresentou aspecto rochoso, poroso, boa aderência, interface visível a 500x, com a cerâmica apresentando rugosidade mais fina que a matriz ou se comparada à brita. Foi condizente com a resistência obtida (BOTELHO, 2012; SMITH, 2012).

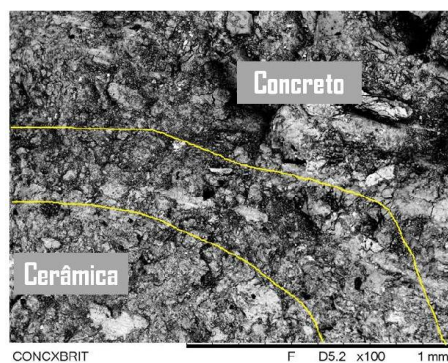
Micrografia 5 - Amostra 10% Concreto x Cerâmica, ampliações de (a) até (f)



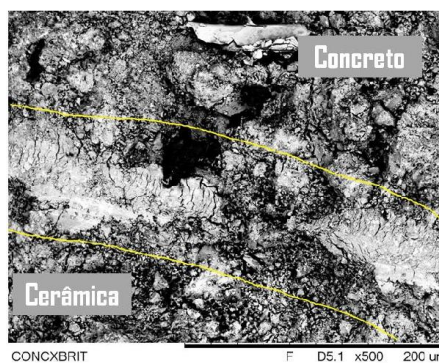
a) Concreto x Cerâmica - 20x



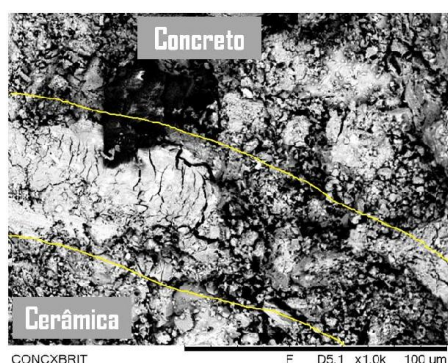
b) Concreto x Cerâmica - 50x



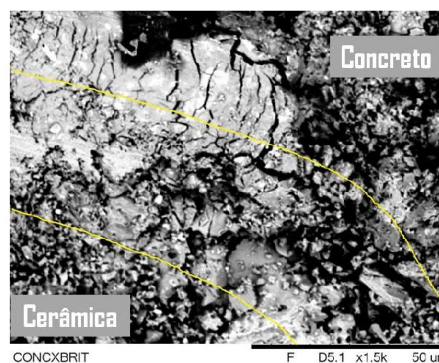
c) Concreto x Cerâmica - 100x



d) Concreto x Cerâmica - 500x



e) Concreto x Cerâmica - 1000x



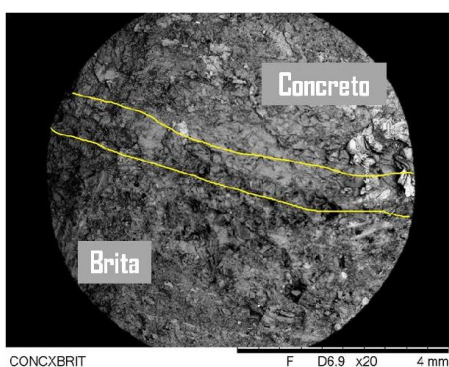
f) Concreto x Cerâmica - 1500x

Fonte: Autor

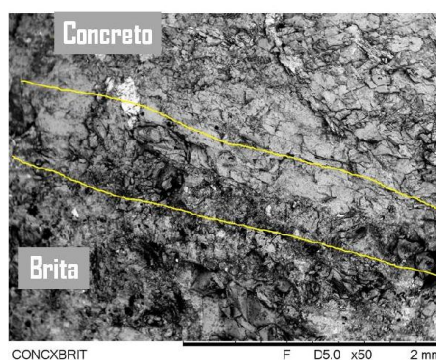
6.4.2.4 Amostras de Compósito 10% - Interface Brita x Concreto.

Nas micrografias de concreto x brita (Micrografia 6a a 6f) na amostra de 10% de adição, tem-se aparência rochosa e granular, interface “matriz x brita” de difícil distinção, bem consolidada, identificável apenas a partir de 500x, revelando boa aderência e coerente com a resistência obtida (OLIVEIRA, 2006; BOTELHO, 2012).

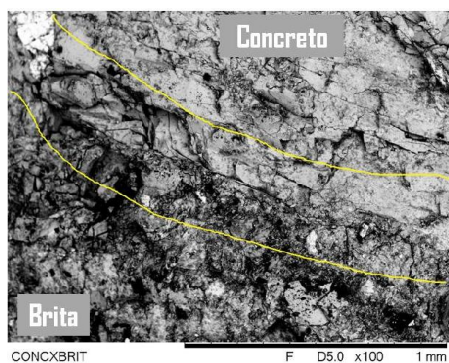
Micrografia 6 - Amostra 10% Concreto x Brita - ampliações de (a) até (f))



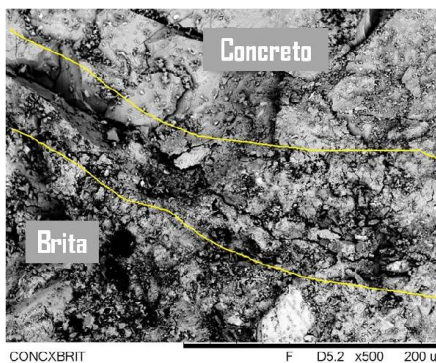
a) Concreto x Brita – 20x



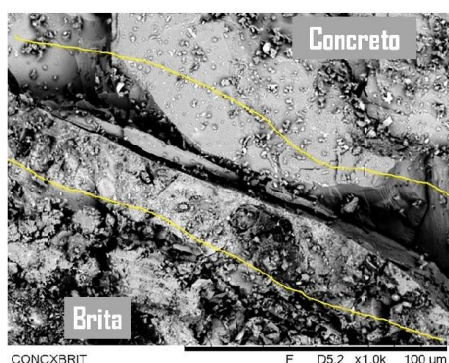
b) Concreto x Brita – 50x



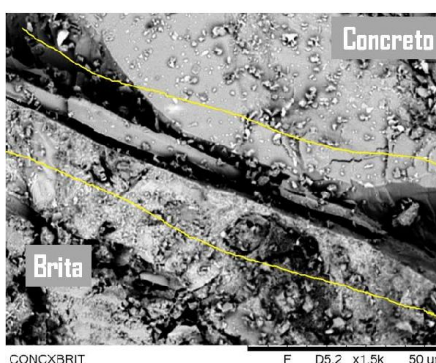
c) Concreto x Brita – 100x



d) Concreto x Brita – 500x



e) Concreto x Brita – 1000x



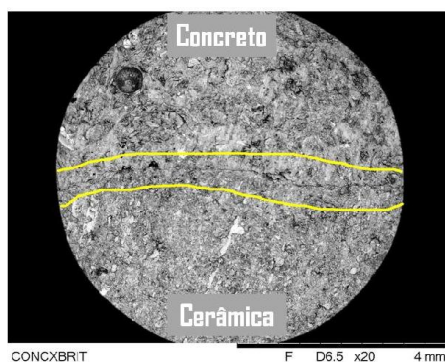
f) Concreto x Brita – 1500x

Fonte: Autor

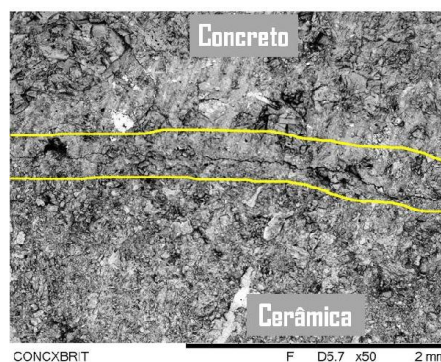
6.4.2.5 Amostras de Compósito à 15% - Interface Cerâmica x Concreto.

Na micrografias de concreto x cerâmica, na amostra com 15% de adição (Micrografia 7a a 7f) há aspecto rochoso e granular, interface matriz x cerâmica em forma de fissura, identificável a 100x, aderência serrilhada que surpreendeu perante a resistência obtida (OLIVEIRA, 2006; BOTELHO, 2012).

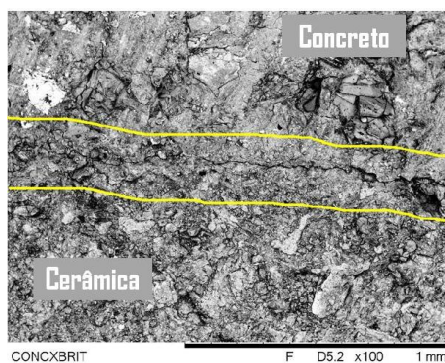
Micrografia 7 - Amostra 15% Concreto x Cerâmica, ampliações de (a) até (f)



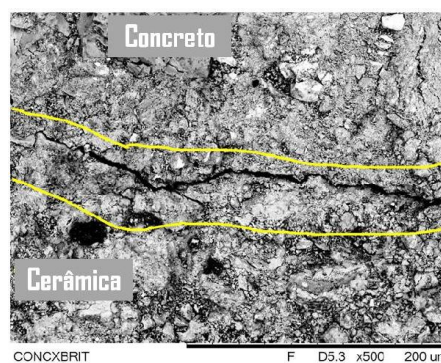
a) Concreto x Brita – 20x



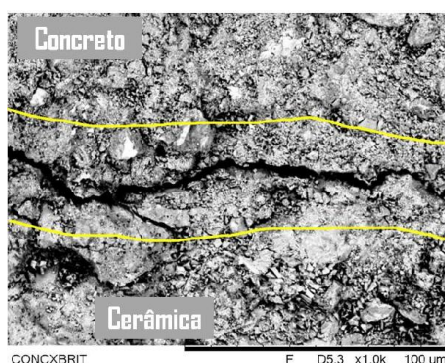
b) Concreto x Brita – 50x



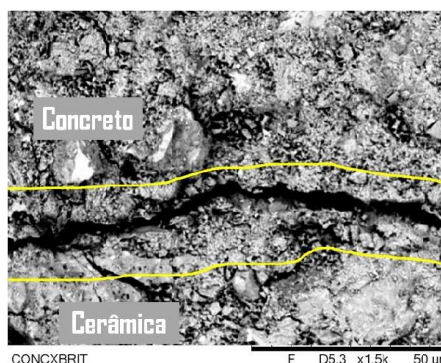
c) Concreto x Brita – 100x



d) Concreto x Brita – 500x



e) Concreto x Brita – 1000x



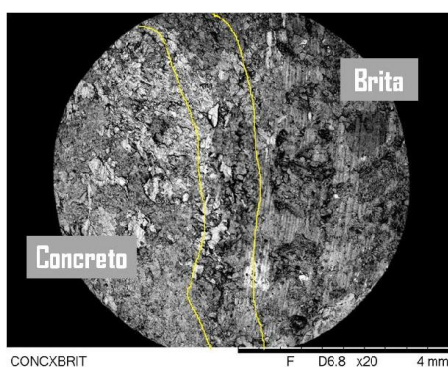
f) Concreto x Brita – 1500x

Fonte: Autor

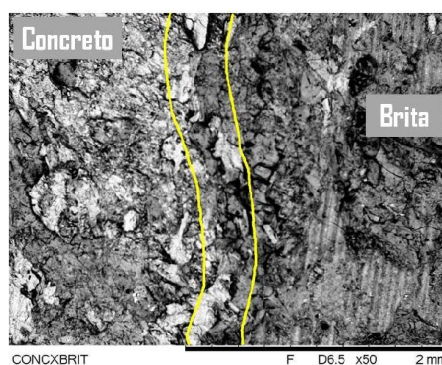
6.4.2.6 Amostras de Compósito à 15% - Interface Brita x Concreto.

Na adição de 15% (Micrografia 8a a 8f) a interface matriz x brita foi determinável a 500x, com boa consolidação, aparência rochosa e porosa (Micrografia 8a a 8c) outras vezes maciça e plástica (Micrografia 8e e 8f) boa aderência e condizente com a resistência obtida (OLIVEIRA, 2006; BOTELHO, 2012).

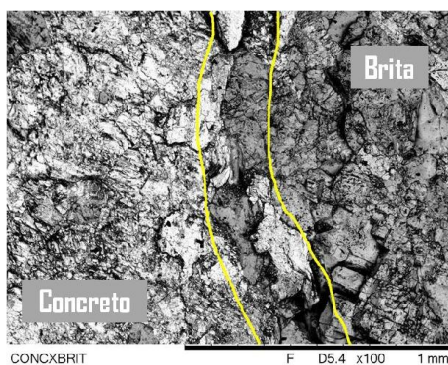
Micrografia 8 - Amostra 15% Concreto x Brita - ampliações de (a) até (f)



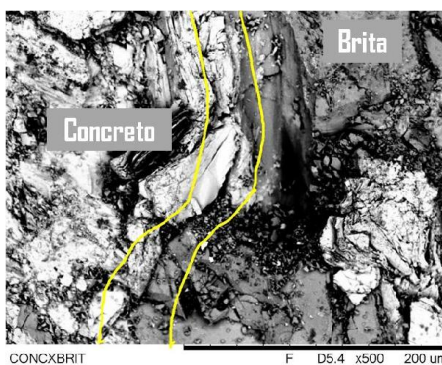
a) Concreto x Cerâmica - 20x



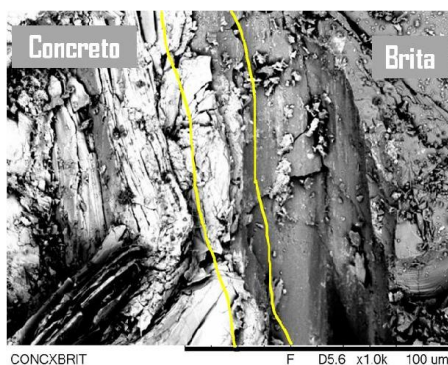
b) Concreto x Cerâmica - 50x



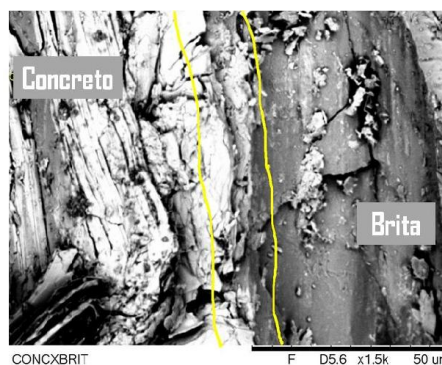
c) Concreto x Cerâmica - 100x



d) Concreto x Cerâmica - 500x



e) Concreto x Cerâmica - 1000x



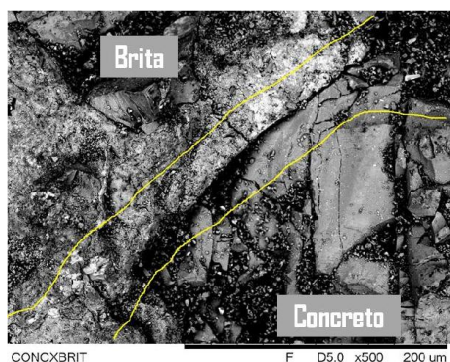
f) Concreto x Cerâmica - 1500x

Fonte: Autor

6.4.3 Discussão dos Resultados do MEV - Cerâmica e Compósito

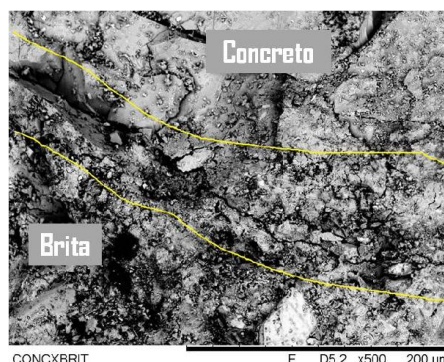
Notou-se a presença de interfaces unidas entre matriz (argamassa) x cerâmica quando comparadas às combinações da matriz (argamassa) x brita nas (Micrografia 5 x Micrografia 6) e (Micrografia 7 x Micrografia 8) (OLIVEIRA, 2006). Compactação dos grãos de areia e pó de brita, unidos à matriz de argamassa revelou uma amálgama endurecida e porosa (Micrografia 4d e Micrografia 6d) à 500x. Foram observados poros e inclusões nos agregados (Micrografia 4) a 20x e (Micrografia 5) a 100x (OLIVEIRA, 2006).

Micrografia 4(d) Brita x Concreto 500x



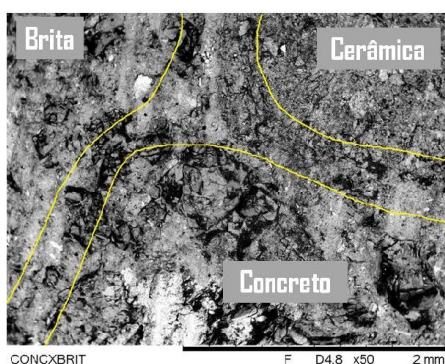
Fonte: Autor

Micrografia 6(d) Brita x Concreto 500x



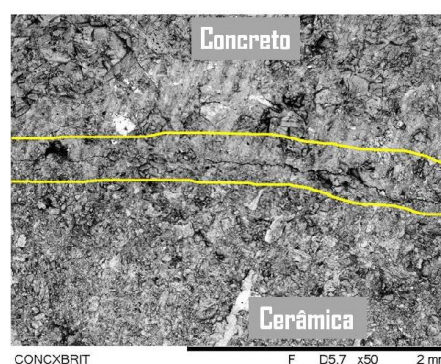
Na maioria das amostras, a micro-estrutura da cerâmica dentro do CP, manteve-se inalterada e aderida à superfície de contato com a matriz, sugerindo boa resistência à fratura. Ex.: Micrografia 3b e Micrografia 7b, à 50x (SMITH,2012).

Micrografia 3(b) Cerâmica x Concreto 50x



Fonte: Autor

Micrografia 7(b) Cerâmica x Concreto 50x

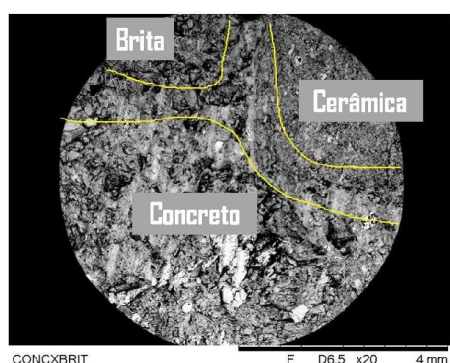


Fonte: Autor

As causas prováveis desta aderência deve-se, em alguns casos, à reação dos silicatos quimicamente ativos do cimento com a cerâmica (SMITH, 2012). O que já se esperava pois sua aplicação básica é revestir áreas molhadas de residências, além de resistir à compressão e à umidade sem dissolver ou ruir, tornam-se ainda mais aderentes na presença de cimento (ou argamassas) devido ao efeito ligante do mesmo (NBR13818, 1997).

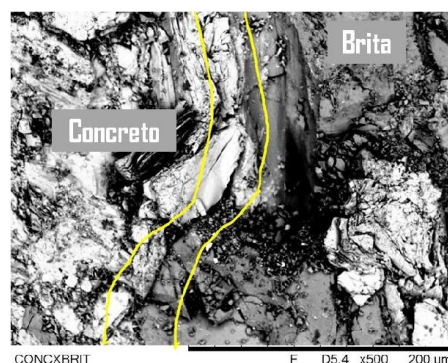
A morfologia geral do compósito sugere ter havido uma boa aderência nas interfaces, que se mostraram de difícil distinção, tais como nas ampliações matriz (argamassa) x brita (Micrografia 4a a 20x) e matriz (argamassa) x cerâmica (Micrografia 8d a 500x) destacadas novamente a seguir.

Micrografia 4(c) Concreto x Brita 20x



Fonte: Autor

Micrografia 8(d) Concreto x Cerâmica 500x



Fonte: Autor

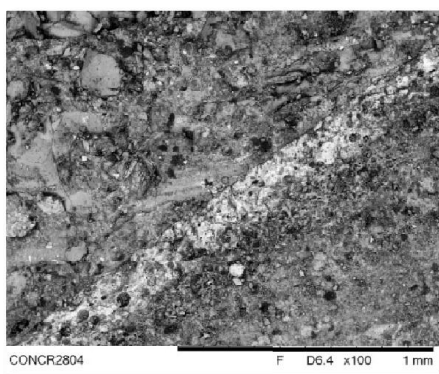
Possivelmente, o atrito interno entre as partículas da estrutura intrincada do concreto, também contribuiu para a resistência mecânica obtida, formando algo semelhante a uma rede policristalina, mais rudimentar que a dos metais mas eficiente mecanicamente (SMITH, 2012; Time LIFE™, 1996).

Houve pouca aderência entre a matriz (argamassa) x face-vítrea da cerâmica (sílica em estado amorfo – SMITH, 2012) revelando regiões de fragilidade que foram proporcionais ao percentual de adição cerâmica. Quantidades maiores de cerâmica contribuíram para uma maior superfície vítrea total (Micrografia 9a e 9b) afetando diretamente e negativamente, a resistência das peças de compósito (CAMPOS, 2012). Isto foi comprovado nos ensaios de compressão axial, seção 6.2.5, na adição de agregado cerâmico de 20% (PORTO, 2008; BOTELHO, 2012).

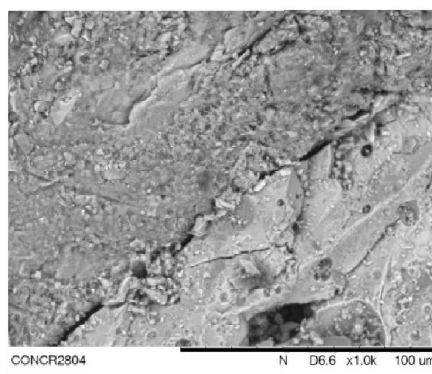
Por outro lado, verificando a porosidade pelo índice de vazios, e confirmada nas micrografias, o peso específico da cerâmica, equivale à cerca de 88% do peso

específico da brita, e estruturas feitas com o compósito cerâmico, ficarão tanto mais leves tanto quanto maior for o percentual de cerâmica adicionada (SMITH, 2012; CAMPOS, 2012) e é claro, respeitando as resistências mecânicas viáveis e obedecendo-se às normas de engenharia (NBR5739, 2007; NBR15116, 2004).

Micrografia 9 - Amostra 20% Concreto x Cerâmica - ampliações de (a) e (b)



a) Cerâmica x Concreto 100x



b) Cerâmica x Concreto 1000x

Fonte: Autor

Deve-se lembrar também que, a água possui a propriedade da adesão capilar, conseguindo penetrar os canais porosos nos interstícios da cerâmica e do compósito de concreto.

Isto mostra que, substituindo-se brita por cerâmica monoporosa (material mais poroso que a brita) corroborou o fato do compósito cerâmico, absorver mais água que o concreto com brita natural. Isto ficou comprovado no ensaio de absorção de água e índice de vazios, na seção 6.3.

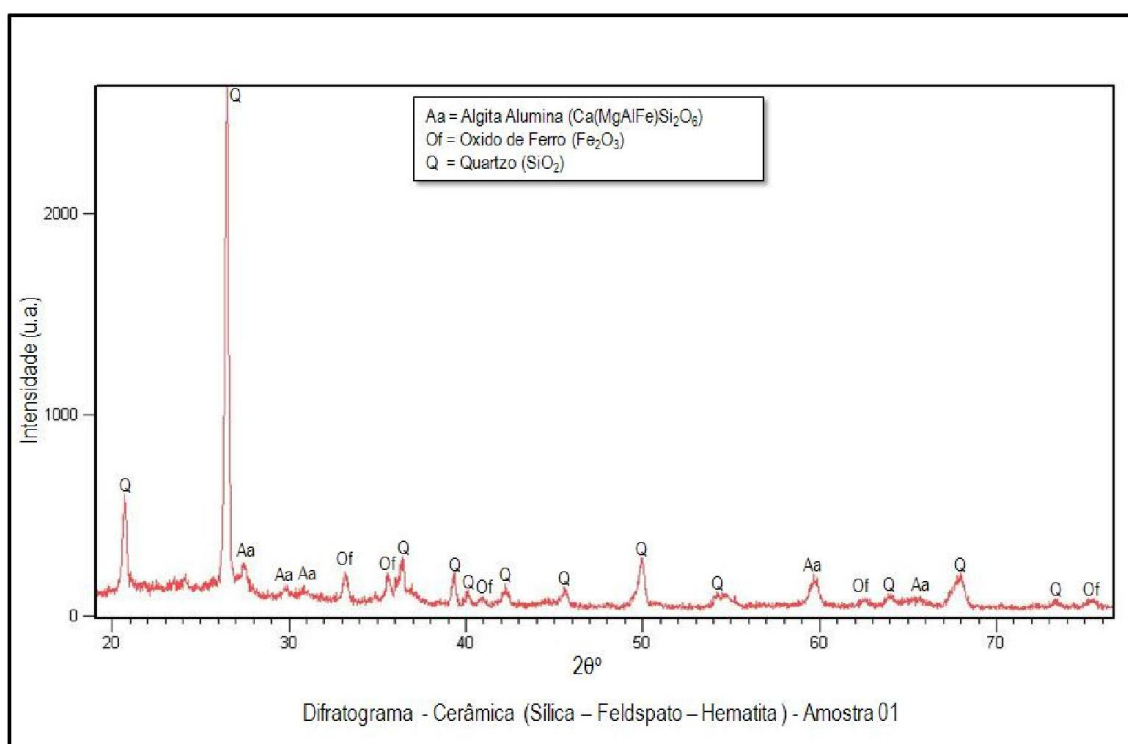
6.5 RESULTADOS - ANÁLISES DRX - MATERIAIS E COMPÓSITO

Nesta seção foram listadas as análises químicas (efetuadas através de difratometria de raios X e indexação pelas cartas JCPDS, 1979) da cerâmica, da areia, da brita, do cimento *Portland* e do compósito, e a possível influência da química destes nas propriedades do compósito.

6.5.1 Resultados e Discussão – Análise DRX da Cerâmica

Na cerâmica de revestimento da ARTEC, modelo 53011-PEI4 (Gráfico 16) o quartzo (SiO_2) aparece em mais de 10 picos entre 21° e 73° , o óxido de ferro com 5 picos entre 33° e 79° e o feldspato algita a 27° , 30° , 59° e 66° .

Gráfico 16 - Difratoograma da Cerâmica utilizado no Compósito



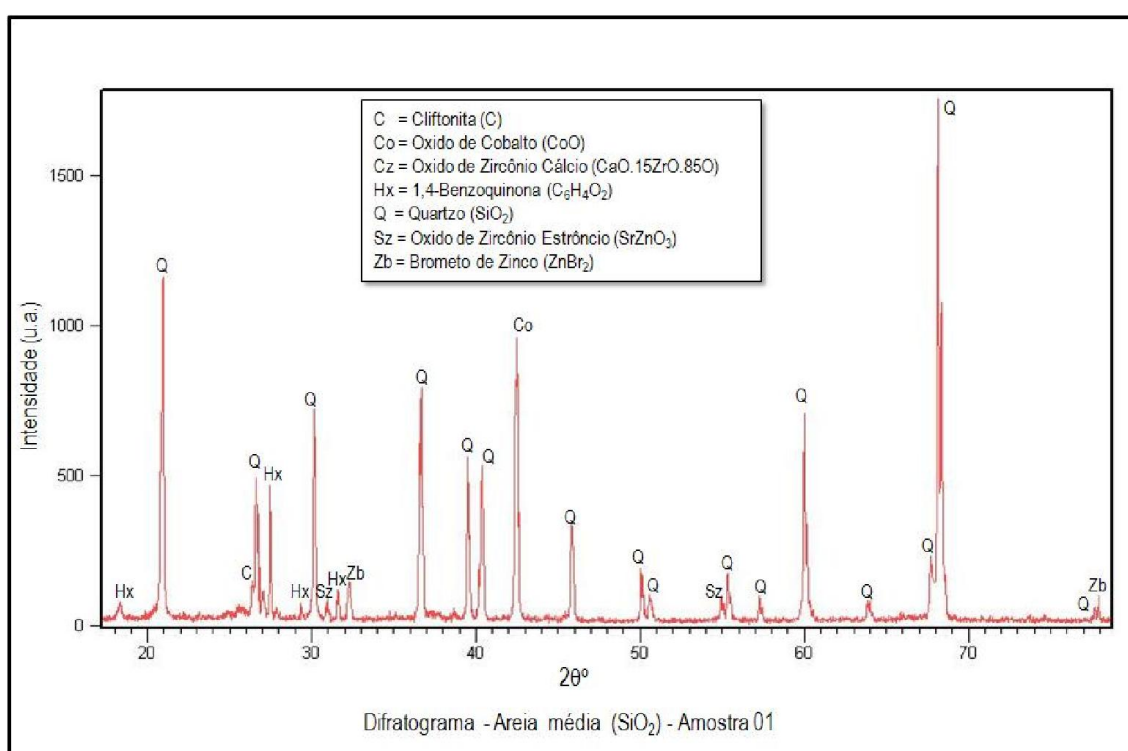
Fonte: Autor

Houve predominância do quartzo, seguido do óxido de ferro e a algita (menores quantidades) num mistura policristalina argilosa fundida à 1100°C (MEIRA, 2001). Esta mistura confere à cerâmica, sua dureza e resistência (SOUZA, 2005).

6.5.2 Resultados e Discussão – Análise DRX da Areia

Observou-se que a composição da areia fornecida pela Areal Santa Isabel (Gráfico 17) é formada predominantemente por quartzo (SiO_2) com mais de 12 picos entre 10° e 80° e materiais de menor ocorrência, como óxidos a base de zircônio (Zr) a $30^\circ, 50^\circ$ e 55° , carbono (C) a 26° , óxido de cobalto (CoO) a 42° , brometo de zinco (ZnBr_2) a 32° e 79° e alguma parcela do aromático benzoquinona ($\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$) a $18^\circ, 28^\circ$ e 32° .

Gráfico 17 - Difratoograma da Areia média utilizada



Fonte: Autor

A composição levantada está dentro do padrão da areia média de leito de rio, com quantidade predominante de quartzo (sílica) e algumas impurezas minerais menores. Alguma incidência de cálcio, carbono, zinco e zircônio (CABRAL, 2007; SILVA, 2013).

Na indexação, surgiu o aromático benzoquinona, devido à alguma possível contaminação, ocorrida no leito do rio ou no transporte ou no armazenamento na loja de materiais de construção.

6.5.3 Resultados e Discussão – Análise DRX da Brita

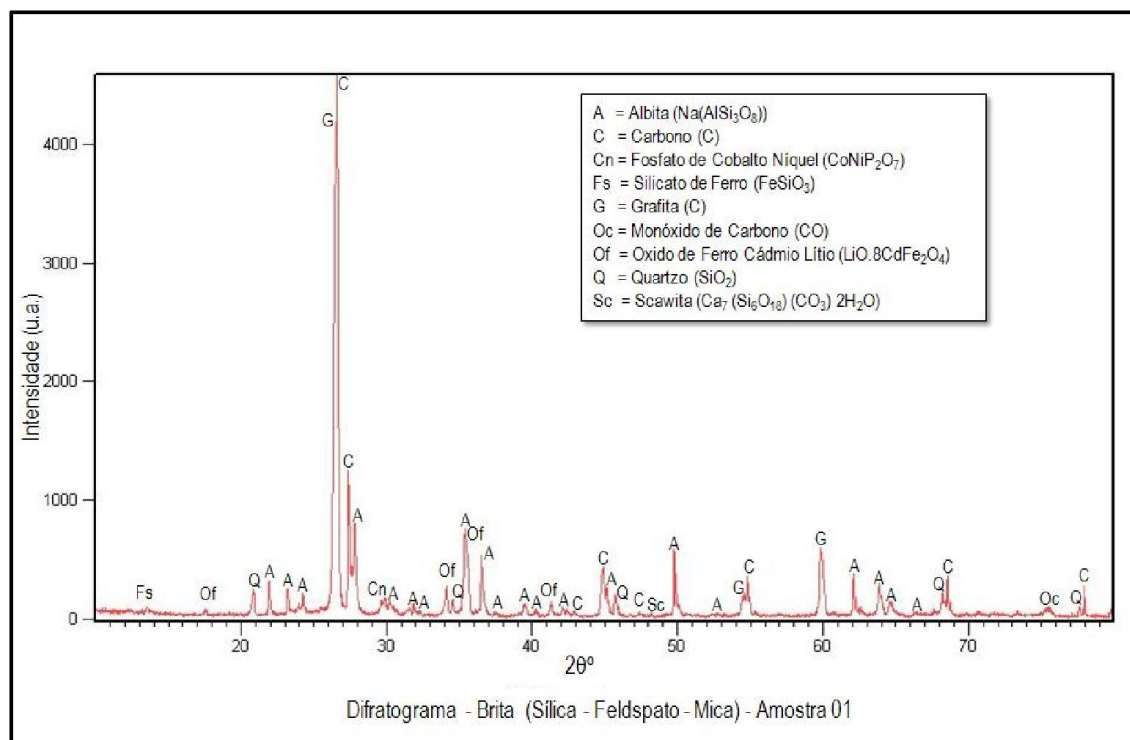
Pôde-se obter a composição de brita granítica, fornecida pela Pedreira Volta Redonda (Gráfico 18) e identificada basicamente pela quartzo (SiO_2) a 21° , 46° , 68° e 79° , 22 ocorrências do feldspato calcosódico albita ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) entre 10° a 80° , 7 ocorrências de carbono (C) entre 30° e 78° e óxido de ferro a 34° e 41° .

Basicamente o granito é formado por três elementos, sendo dois principais, o quartzo e um ou mais tipos de feldspato como a albita e scawita (Gráfico 18) e, componentes de menor ocorrência como óxido de ferro, silicato de ferro, fosfatos, carbono, e a grafita (CABRAL, 2007).

Neste trabalho não foi efetuado o ensaio de absorção de água da brita, mas como é formada pelo feldspato albita ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) corroborou a menor absorção de água da adição de 0%. Este agregado é conveniente por não atuar na desidratação precoce do concreto, o que acarretaria deficiência nas reações dos silicatos, interferindo negativamente na resistência final deste último (FONSECA, 2010).

Ocorreu algum surpresa a ocorrência de carbono em quantidade relevante

Gráfico 18 - Difratoograma da Brita utilizada



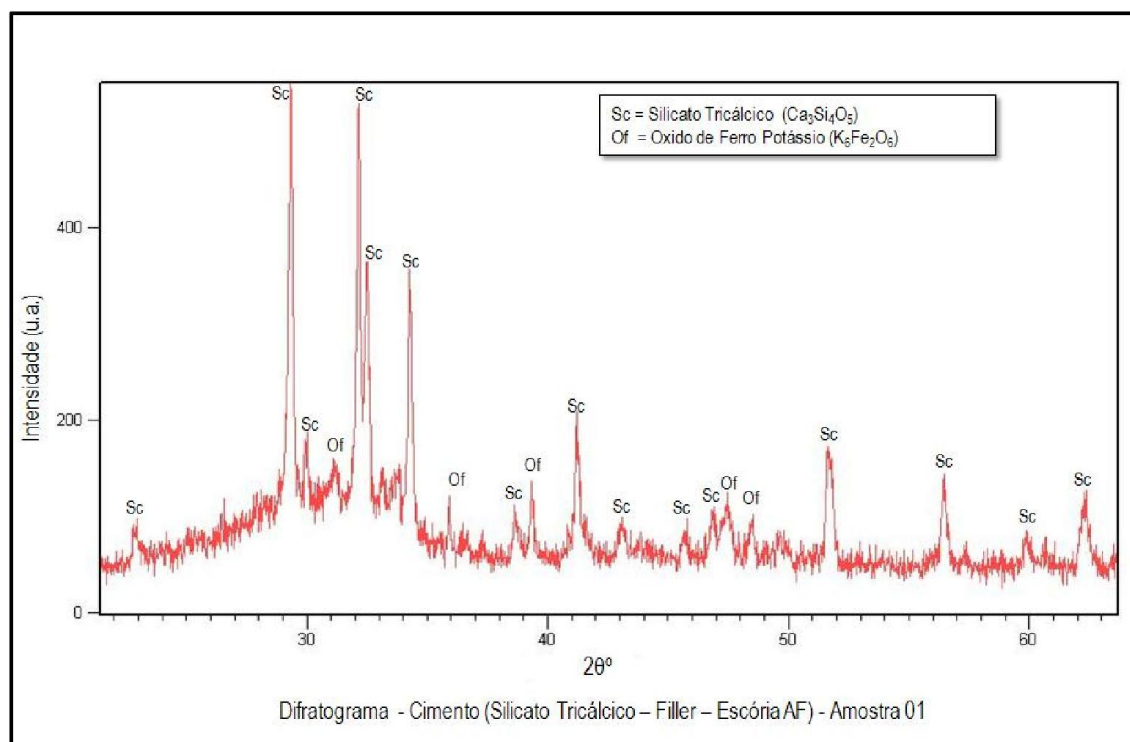
Fonte: Autor

6.5.4 Resultados e Discussão – Análise DRX do Cimento

Como já relatado na seção 5.3.5, o Cimento *Portland* CPIII 40RS da CSN Cimentos Ltda., tem uma composição básica formada por silicatos tricálcicos ou dicálcicos, carbonato de cálcio além de óxido de ferro, dada a inclusão de escória de alto forno e sulfatos de cálcio do componente filler.

Pôde-se identificar (Gráfico 19) mais de 10 picos de silicatos tricálcicos (alita= Ca_3SiO_5) desde 22° até 63° e o óxido de ferro associado ao potássio ($\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_6$) com 5 ocorrências entre 32° até 48° (SILVA, 2013).

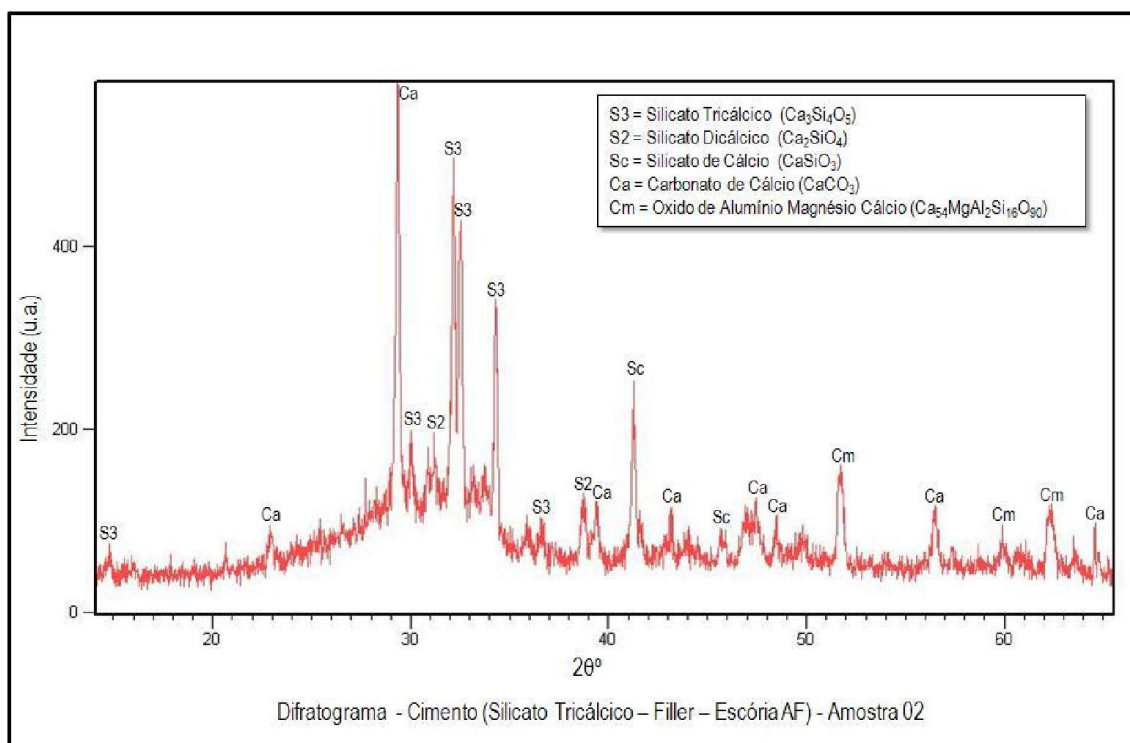
Gráfico 19 - Difratoograma do Cimento - Amostra 1



Fonte: Autor

Já na amostra 2 (Gráfico 20) foi observada a incidência de 6 picos do silicato tricálcico (de 10° a 37°) 2 picos do silicato dicálcico (31° e 39°) e 2 picos de silicato de cálcio (41° e 46°). Identificadas também, 8 ocorrências de carbonato de cálcio (CaCO_3) entre 23° e 65° e óxido de alumínio magnésio cálcio ($\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$) (do filler) a 52° , 60° e 62° (SILVA, 2013).

Gráfico 20 - Difratoograma do Cimento - Amostra 2



Fonte: Autor

Na indexação das amostras não puderam ser identificados os componentes do cimento, ferro aluminato (Gráfico 19 e Gráfico 20) e o filler no Gráfico 19.

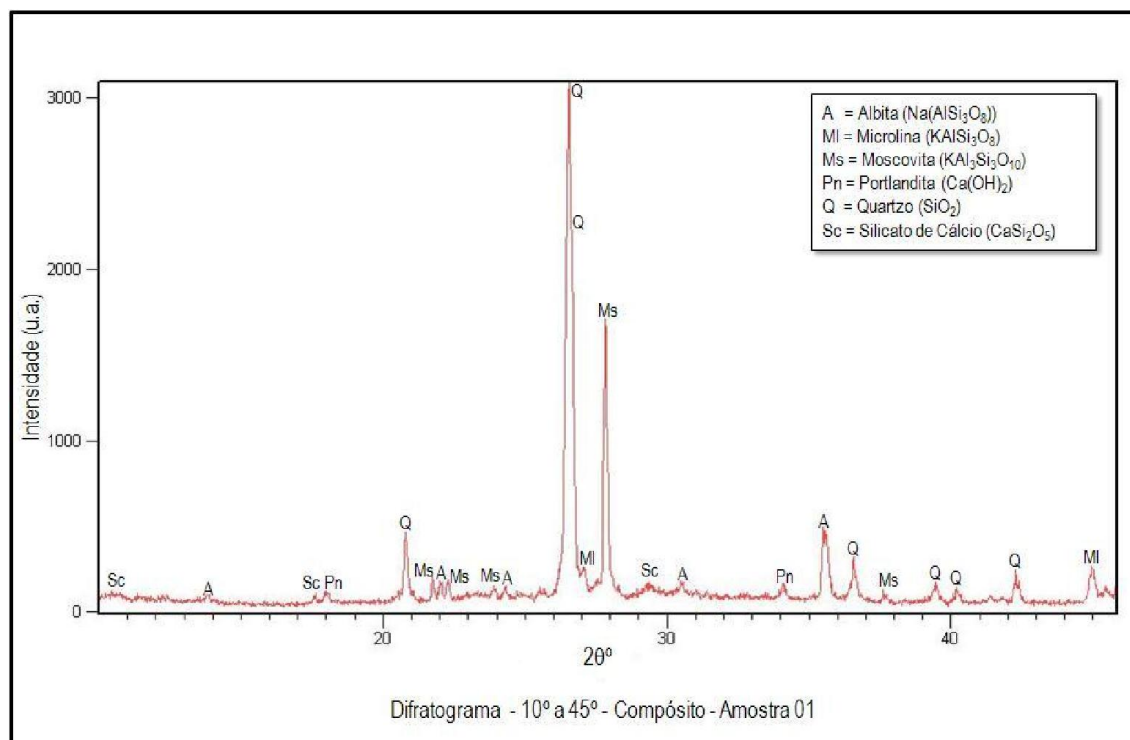
6.5.5 Resultados e Discussão – Análise DRX do Compósito Final

Curiosamente, com a junção de todos os materiais formadores do concreto aditivado de cerâmica (Gráfico 21 e Gráfico 22) deveria conter a maioria das composições químicas ou transformações destes, em sua composição final, no entanto sobreposições de intensidade podem não permitir a detecção de todos elementos.

A indexação do compósito foi dividida em duas partes, Gráfico 21 (0° a 45°) e o Gráfico 22 (45° a 80°) para que se pudesse observar os picos claramente.

Identificou-se o quartzo da areia e da brita, encontrado entre 21° e 68° (CABRAL, 2007) e parte dos elementos da cerâmica e da brita, como a albita, a moscovita, e a microlina desde 22° a 70° (Gráfico 21 e Gráfico 22). Ocorreu ainda o silicato de cálcio em pouca quantidade (Gráfico 21). Pôde-se destacar a portlandita (Gráfico 21 e Gráfico 22) do concreto a 18° e 51° , formada após a hidratação dos silicatos e filler (CABRAL, 2007). Da cerâmica, destacou-se a moscovita, componente do feldspato (CABRAL, 2007; OLIVEIRA, 2006).

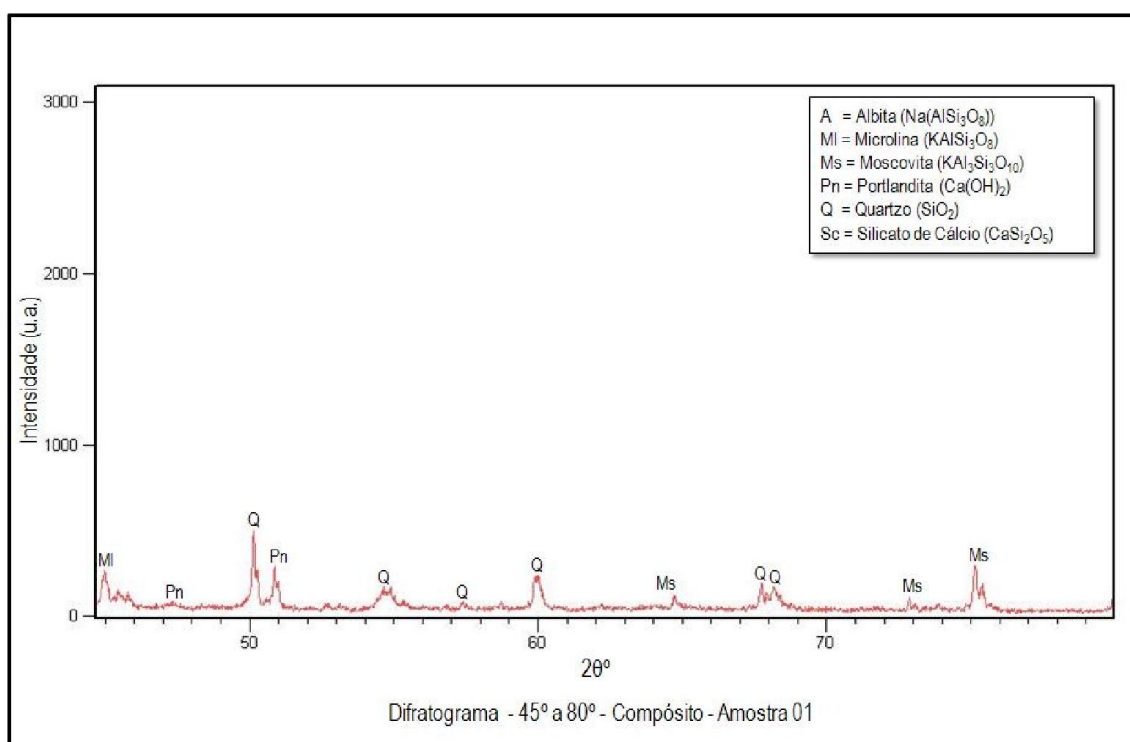
Gráfico 21 - Difratoograma 0° a 45° do - Compósito Final



Fonte: Autor

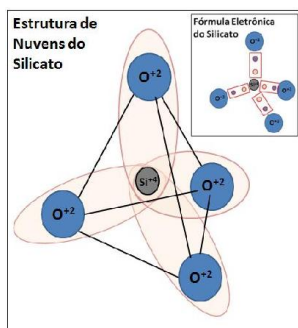
Houve a predominância do quartzo e dos feldspatos (Gráfico 21 e Gráfico 22) que corroborou e foi compatível com os Fck obtidos. Seus componentes contêm arranjos policristalinos de tetraedros de silicatos, que geram a resistência do concreto (BOTELHO, 2012; CABRAL, 2007). Há uma similaridade desses arranjos (Figura 11) com a forma das fortíssimas treliças (Figura 12). O triângulo é considerado estrutura indeformável em cálculos na Eng.^a (BOTELHO, 2012).

Gráfico 22 - Difratoograma 45° a 80° do Compósito Final



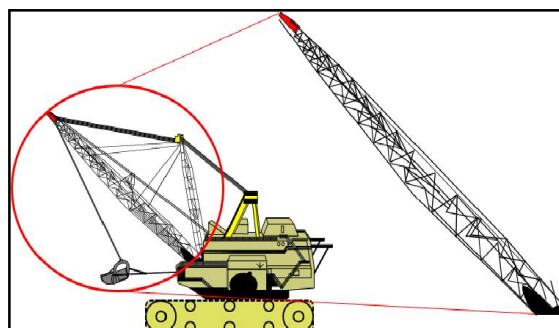
Fonte: Autor

Figura 11 - Estrutura molecular do Silicatos



Fonte: USBERCO (1999)

Figura 12 - Treliza de Cargas Pesadas



Fonte: CD-Expert - Media Graphics™ (1998)

7. CONCLUSÕES FINAIS

Nos ensaios de absorção de água, o compósito mostrou maior índice de vazios que o padrão e, mesmo irregular, revelou durabilidade viável para ambientes classe I, conforme o planejado neste projeto. Caso se consigam aperfeiçoamentos (menor fator a/c , menor granulometria e/ou uso de aditivos) é provável que o compósito aumente sua resistência e sua durabilidade se enquadrada nas classes II (urbana) ou III (industrial) abrindo maior leque de aplicações na construção civil.

A análise via MEV da cerâmica revelou porosidade confirmando ser de menor densidade comparada à brita (apontada no ensaio de absorção de água) mesmo assim, mostrou que pode produzir compósito com resistência mecânica compatível com a convencional, mesmo sem aditivos e em condições desfavoráveis.

As resistências a compressão, ficaram em torno dos 27,5MPa (média de Eng.^a para obras pequenas e médias) pouco acima dos 25MPa (base inicial para cálculos). Estas resistências foram corroboradas pela boa aderência e massa compacta percebidas na morfologia estudada nas análises MEV e DRX, apresentando como principais componentes, a sílica, o feldspato e a portlandita.

A adição de 5% de cerâmica poderia ter tido a maior resistência à compressão, não fosse o desvio ocorrido no F_{C28} . A adição de 10% teve resistência = 27MPa e a de 15% foi a mistura de maior resistência à compressão obtida e que aparentou ser o limite superior viável de adição.

A micro-estrutura da cerâmica, antes e após inclusão no CP já conformado, manteve-se inalterada sem trincas aparentes, mostrando boa resistência própria, boa aderência à matriz de concreto, sem diminuição expressiva de sua resistência, e ao contrário, não impediu a obtenção de resistências mecânicas viáveis e condizentes, comparáveis àquelas com concreto convencional.

O aumento percentual e gradual de cerâmica, provocou queda progressiva de resistência à compressão, tendo sido acentuada na adição de 20%, corroborada nos trabalhos de outros pesquisadores. A superfície vítrea da cerâmica de revestimento, se revelou o ponto crítico do compósito, tendo baixa aderência matriz x cerâmica, podendo propiciar a formação de clivagens e cisalhamento. Deve-se ter atenção com as adições $\geq 20\%$ pois elevam a quantidade total de superfície vítrea, podendo diminuir geometricamente a resistência.

As partes não vítreas também podem ter tido menor aderência devido a forma

lamelar da cerâmica e rugosidade mais fina que a da brita. O fator de forma das cerâmicas, em teoria, tem menor resistência a esforços que a arredonda das britas, entretanto, os ensaios provaram que não houve queda substancial entre 5% e 15% de adição cerâmica.

O compósito trouxe economia substancial direta, para a confecção de peças não-estruturais (pisos, blocos de parede, lajes pré-moldadas e muros) e economia indireta para peças estruturais pois, com a redução do peso da obra, também haverá economia com redução no dimensionamento das armaduras de aço.

Concluindo, o compósito demonstrou viabilidade técnico econômica para conformação de peças de concreto com função não-estrutural, já existindo permissão para uso desde a norma NBR15655 (2004). É possível a viabilidade das adições de 5% à 15% para usos estruturais, bastando que novas técnicas de confecção sejam testadas e avaliadas, inclusive pela ABNT, aprovando o uso do compósito.

8. PESQUISAS FUTURAS

Mesmo outros pesquisadores já tendo feito experimentos com vários tipos de RCD, produzindo até mesmo peças estruturais (Aragão, 2010) ainda será restringido o uso do compósito até que hajam mais pesquisas com chancela da própria ABNT, avaliando e aprovando o compósito.

As seguintes sugestões de pesquisas futuras são recomendadas:

- Resistência à oxidação da armadura em presença de argilosos;
- Provas de cargas repetitivas, instantâneas e de Impacto;
- Resistência a compressão com apenas granulometria de Brita 1;
- Teste de durabilidade com fator $a/c < 0,6$ (visando classe II e III).

Pesquisas mais refinadas poderão ser feitas para se obter as misturas otimizadas dos concretos com RCD, com ou sem aditivos químicos para manter a trabalhabilidade (Fonseca 2006; Fonseca 2010).

A engenharia aperfeiçoará cada vez mais as técnicas de reciclagem com os RCDs. Fica aqui então, o convite a outros pesquisadores, continuarem este trabalho a partir deste ponto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM67**: Ensaio de Abatimento do Concreto. Rio de Janeiro - 2003.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5738**: Moldagem e Cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparos de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR12655**: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR9778**: Absorção de Água por Índice de Vazios. Rio de Janeiro, 2009.

ANDREWS-PHAEDONOS, F. . **Establishing the durability performance of structural concrete**. Vic Roads , 1996, 79p.

ARAGÃO, H. G. . **Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Alagoas, Maceió , 2007, 109p.

BARIN, D. S. . **Carbonatação e Absorção Capilar em Concretos de Cimento Portland Branco com Altos Teores de Adição de Escória de Alto Forno e Ativador Químico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de Santa Maria - UFSM, RS, 2007, 171p.

BOTELHO, M.; Marchetti, O. Livro de Concreto: **Concreto Eu Te Amo**. 7ª ed., São Paulo: Editora Blucher Ltda., 2012, 726p.

CABRAL, A. E. B. . **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando a variabilidade da composição do RCD.** Dissertação (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2007,208p.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D., Ravindrarajah , R. S. . **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha.** DEECC, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2009.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais.** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007.

CAMPOS, C. F. S. ; MAZINI, G. B. ; NETO, G. A. S. . **Análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com resíduo sólido de cerâmica vermelha – Colloquium exactarum,** Presidente Prudente, São Paulo, 2012.

CARVALHO, J. D. N. . **Sobre as origens e desenvolvimento do concreto.** Revista Tecnológica, 2008, p.19-28.

MEDIA GRAPHICS™. **30.000 Cliparts.** Rio de Janeiro: Revista CD-Expert Ltda., 1998.

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 307.** Gestão de Resíduos da Construção Civil. Resolução Nº 448 - 2014.

ENCICLOPÉDIA Time LIFE™. **Estrutura da Matéria.** 2ª Ed., Rio de Janeiro: Abril Livros Ltda., 1996, p.151.

FLORENZANO, É. **Dicionário de Inglês-Português e Português-Inglês.** 4ª ed., São Paulo : Ediouro Publicações S.A., 2004, p492.

FONSECA, A. P. . **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) FECIV - Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, MG, 2006, 200p.

FONSECA, G. C. . **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010, 105p.

FUNDAMENTALS. Fundamentals. **Reciclar o entulho.** link: http://www.fundamental.org.br/conteudo_20.asp . Acessado em: 07/03/2016.

GIECK, K. **Manual de Fórmulas Técnicas.** 25ª Ed. ampliada, São Paulo: Hemus Livraria e Editora Ltda., 1976, p. 221.

IEZZI, G.; DOLCE, O.; DEGENSZAJN, D. M.; PÉRIGO, R. . **Matemática Volume Único.** 1ª Ed., São Paulo - SP: Atual Editora Ltda., 1997, p.651.

JCPDS - **Joint Committee on Powder Diffraction Standard. Inorganic Materials.** Pensilvania: International Centre for Diffraction Data Swarthmore. 1979.

LI J. **Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete.** Dissertation of Masteral Degree) Tongji University, Shanghai, China, 2004.

LAPA, J. S. . **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto.** Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008, 56p.

MASSOULD, S. ; MENDIS, P. ; LUMANTARNA, E. . **Use of recycled concrete aggregates in sustainable structural concrete applications.** Department of Infrastructure Engineering, Melbourne, Australia, 2012.

MEIRA, J. M. L. . **Argilas: O que são. Suas Propriedades e Classificações.** Comunicações Técnicas. Revista Visa Consultores, jan. 2001.

NAIME, R. **Reciclar o entulho da construção civil.** EcoDebate link: <http://www.ecodebate.com.br/2010/05/24/reciclar-o-entulho-da-construcao-civil-artigo-de-roberto-naime-2> . Acessado em 10/03/2015.

OLIVEIRA, A. P. N. . **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos.** Revista Cerâmica Industrial, SC, nov./dez. 2000.

OLIVEIRA, I B. C.; SILVESTRE, M. E. R.; MEDEIROS, J. L. G.. **Confecção de concreto com agregados reciclados** - VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas,Tocantins, 2012.

PEREIRA, K. . **Estudo em escala de laboratório, do uso de argilas tipo bofe na obtenção de argilas organofílicas e ativadas.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade de São Paulo – Escola Politécnica , São Paulo, SP, 2008,139p.

POPP, J. H. . **Geologia Geral.** 6ª ed. Revisada, Rio de Janeiro, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. , 2012, 309p.

PORTO, M. E. H. de C. e Silva, S. V. **Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas populares.** XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. ISECENSA. Rio de Janeiro, 2008.

RAMALHO JR, Francisco; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os Fundamentos da Física 1.** Livro : Física - 6ª Ed.,vol.1, São Paulo : Editora Moderna Ltda., 1993, p.480.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. . **Física I-2.** 2ª Ed., Rio de Janeiro- RJ: LTC Livros Técnicos e Científicos S.A., 1976, p.759.

SENAI; SEBRAE; GTZ; Projeto Competir APRESENTAÇÃO: **Gestão de Resíduos de Construção Civil – Redução, Reutilização e Reciclagem,** 2005.

SILVA, M. A.; SANTOS, Vitor A. A. **Reciclagem e Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil**. Revista do CEDS, Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDBN, São Luís, Maranhão, 2014.

SILVA, M. A. da. **Obtenção e caracterização de compósitos cimentícios reforçados com fibras de papel de embalagens de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, 2013, 111p.

SMITH, W. F. ; HASHEMI, J. . **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ª ed., Porto Alegre , AMGH Editora Ltda., 2012, 715p.

SOUZA L. M., ASSIS C. D., SOUTO S. B. G. . **Agregado reciclado: um novo material na construção civil**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET. Link: [dx.doi.org/10.5902/2236117011297](https://doi.org/10.5902/2236117011297) . Acessado em 22/02/2016.

SOUZA, S. J. G. ; HOLANDA, J. N. F. . **Avaliação das propriedades físico-mecânicas de uma massa cerâmica de revestimento poroso (BIII)**. Link: “www.scielo.br”, 2005.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) SÃO LEOPOLDO, 2010.

USBERCO, J. ; SALVADOR, E. . **Química – Volume Único**. 4ª Ed., Barra Funda, São Paulo, Editora Saraiva, 1999, 607p.

WICANDER, R. ; MONROE, J. S. . **Fundamentos de Geologia**. São Paulo, Cengage Learning, 2009, 508p.

XIMENES, S. . **Dicionário de Português**. 6ª ed., Rio de Janeiro: Ediouro Publicações S.A, 1999, p.619.

YANG, K. ; CHUNG, H. ; ASHOUR, A. . **Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties**. ACI Materials Journal, 2008, p.289-296.

GLOSSÁRIO

Abatimento = Medição feita no teste de “*Slump*” – Medida cuja dimensão em centímetros indica a fluidez de um concreto pela medida efetuada do topo do cone de abatimento até o seu topo do cone de concreto (BOTELHO, 2012).

Aglomerante = sm. Substância que aglomera outras (XIMENES, 1999).

Batelada = Traço – Quantidade unitária de concreto dosado, onde se colocam volumes proporcionais de cimento, areia, brita e água.

Britagem = Moagem de Rochas – Processo da indústria de mineração, que através moinhos mecanizados, trituram matacões de rocha. A granulometria de cascalho com diâmetro de 1,9mm à 38mm atendem à construção civil.

Caementum = palavra grega para cimento – Massa aglomerante aperfeiçoada durante a história greco-romana. Os gregos e romanos criaram a 1ª versão natural do cimento, uma mistura de Pozzolana (do latim Pozzoli) de rocha vulcânica queimada mais a cal, que quando hidratada tornava-se uma massa moldável e depois rígida (CARVALHO, 2008).

Concretum = Os romanos aperfeiçoaram o *Caementum* grego, misturando-o com a cal e, após hidratada, esta mistura era moldável e tornava-se rígida por chamada de *Concretum*. Utilizado nas construções romanas inclusive na construção de estradas, muitas dessas obras ainda estão em razoável estado de conservação até hoje. (CARVALHO, 2008)

Clivagem = Forma natural de fragmentação, que certos minerais possuem, onde a fratura procura direções determinadas, segundo planos paralelos às faces de sua forma cristalina, formando ângulos entre estes planos. Está relacionada com a geometria da estrutura molecular interna destes minerais.

Cura = Processo de coagulação do cimento que, ao reagir com água, provoca a formação de grãos em uma reação que libera energia do tipo exotérmica, tornando-se endurecido e rochoso (BOTELHO, 2012).

Exotérmica = Tipo de reação entre substâncias químicas reagentes que, ao se ligarem molecularmente, liberam energia para o ambiente, na forma de calor, sendo a energia final dos produtos menor que a inicial dos reagentes.

Insight = Expressão idiomática em inglês que significa idéia intuitiva lógica e repentina, a respeito de algo que estava intrínseco a um assunto mas não notado comumente (FLORENZANO, 2004).

Litificação = Processo de formação das rochas sedimentares, que ocorre por compactação do solo com sucessivos afundamentos do mesmo e novas sobrecargas de sedimentos, como os folhelhos argilosos por exemplo. Pode ser também por cimentação do grãos minerais e compostos químicos cimentícios intersticiais, como no caso dos arenitos (POPP, 2012).

Magnitude = Relevância de uma medida que pode ser gerada, captada ou definida. Grandeza de uma medida. sf.1. Qualidade de magno; grandeza; 2. Fig. Importância (XIMENES, 1999)

Matacão = 1. Grande fatia ou pedaço. 2. Grande rocha arredondada solta (XIMENES, 1999).

Neopreme = Material de interface que é colocado como “junta” entre duas peças para absorção ou transmissão de esforços entre elas. As de absorção são feitas de material flexível, já as de transmissão, de material pouco dúctil.

Overload = s. Sobrecarga, do termo em inglês. (FLORENZANO, 2004).

Silte = Rocha sedimentar, formada pela litificação de grãos com granulometria entre a da argila e a da areia (POPP, 2012).

Slump = Termo verbal (baixar ou desmoronar) em inglês (FLORENZANO, 2004). Teste que visa controlar a fluidez do concreto, o mesmo que abatimento (BOTELHO, 2012) (ver “Teste de *Slump*” na seção 5.4 de “Métodos”).

Traço = Dosagem dos materiais cimento, agregados e água para produzir o concreto, cujas proporções são arbitradas através das técnicas vigentes de engenharia, para que tenha determinada resistência e durabilidade (BOTELHO, 2012).

ANEXO 1- EFICIÊNCIA DE ENSAIO

Tabela 43 - Eficiência dos Ensaios

Grau de Eficiência de Ensaio (Cálculos por Estatística Padrão - IEZZI, 1997)										
	0	0	5%	5%	10%	10%	15%	15%	20%	20%
Cura (dias)	Tensão (Mpa)	Média	Tensão (MPa)	Média	Tensão (MPa)	Média	Tensão (MPa)	Média	Tensão (MPa)	Média
14	13,33	14,80	26,19	27,64	18,82	21,31	21,11	22,07	8,80	9,16
14	14,58	Variância	26,93	Variância	21,28	Variância	21,66	Variância	8,92	Variância
14	14,76	0,95	27,63	1,04	21,69	1,74	21,76	0,86	8,98	0,18
14	14,95	Grau Efic ^a	28,39	Grau Efic ^a	22,23	Grau Efic ^a	22,00	Grau Efic ^a	9,10	Grau Efic ^a
14	16,39	Ótimo	29,07	Bom	22,54	Bom	23,84	Ótimo	9,98	Ótimo
Cura(dias)	Tensão	Média	Tensão	Média	Tensão	Média	Tensão	Média	Tensão	Média
21	17,73	18,32	25,14	28,67	22,05	24,27	23,41	24,92	11,00	11,44
21	18,39	Variância	28,98	Variância	24,22	Variância	24,74	Variância	11,15	Variância
21	18,44	0,09	29,15	3,41	24,22	1,58	25,03	0,77	11,22	0,28
21	18,49	Grau Efic ^a	29,52	Grau Efic ^a	25,01	Grau Efic ^a	25,32	Grau Efic ^a	11,38	Grau Efic ^a
21	18,53	Ótimo	30,54	Regular	25,82	Bom	26,08	Ótimo	12,47	Ótimo
Cura(dias)	Tensão	Média	Tensão	Média	Tensão	Média	Tensão	Média	Tensão	Média
28	15,43	17,49	23,73	27,17	26,05	26,82	27,04	27,56	12,63	13,04
28	17,05	Variância	24,10	Variância	26,17	Variância	27,14	Variância	12,74	Variância
28	17,80	1,61	25,62	11,31	26,54	0,61	27,37	0,29	13,09	0,11
28	17,85	Grau Efic ^a	30,76	Grau Efic ^a	27,14	Grau Efic ^a	27,72	Grau Efic ^a	13,17	Grau Efic ^a
28	19,34	Bom	31,65	M.Ruím	28,19	Ótimo	28,53	Ótimo	13,56	Ótimo

Memória de Cálculo da Tabela 43:

- Média das resistências a compressão (Fck) de cada grupo de CPs:

$$Média = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} F_{cdd_i}}{n}$$

(a.1)

Onde: F_{cdd} = Fck do CP no período de cura

i = Número do CP num período de cura

n= Número total de CPs do período de cura

- Variância de cada grupo de 5 CPs do período de cura:

$$Variância = \frac{\{\sum_{i=1}^{n=5} (F_{cdd_i} - Média)^2\}}{n}$$

(a.2)

O Grau de Eficiência foi obtido comparando-se a Variância da Tabela 43 com as faixas de CVe (Coeficiente de Variabilidade) da Tabela 44, do Anexo 2.

ANEXO 2- GRAUS DE EFICIÊNCIA DE ENSAIO

A Tabela 44 é a de referência de avaliação dos CVe (Coeficiente de Variação) com base na Norma NBR5739 (2007) da ABNT.

Tabela 44 - Graus de Eficiência de Ensaio

Coeficiente Variabilidade do Ensaio (NBR5379, 2007)				
Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
$Ce \leq 3$	$3 < Ce \leq 4$	$4 < Ce \leq 5$	$5 < Ce \leq 6$	$Ce > 6$
Excelente	Muito Bom	Bom	Razoável	Deficiente

Fonte: NBR5739 (2007)

No entanto, as faixas de valores da Tabela 45 é que foram utilizadas na memória de cálculo da Tabela 43, pois a Tabela 45 é quem foi considerada, por ter uma variação de faixas de graus de variabilidade, mais rigorosa que a Tabela 44.

Isto foi feito para que se tivesse a condição mais desfavorável das margens de avaliação do CVe (Coeficiente de Variabilidade) que representa a eficiência dos ensaios mecânicos.

Tabela 45 - Graus de Eficiência de Ensaio (Estatística)

Coeficiente Variabilidade Ensaio- Estatística (Variância)				
$Ce < 1$	$1 \leq Ce < 2$	$2 \leq Ce < 4$	$4 \leq Ce < 10$	$Ce > 10$
Ótimo	Bom	Regular	Ruim	M.Ruim

Fonte: Base de Cálculo: IEZZI (1997)

ANEXO 3- ORÇAMENTO DOS MATERIAIS DO COMPÓSITO

A Figura 13 seguir, visualiza a folha de orçamento com o custo em Reais, de três dos materiais constituintes do compósito (cimento, areia e brita) obtido em loja do comércio local de Volta Redonda e utilizados na memória de cálculo da Tabela 17.

Figura 13 - Folha de Orçamento dos Materiais do Compósito

Capobiango Materiais p/ Construcao
 Av. Um, 119, Jardim belvedere, Volta Redonda
 Tel: (24) 33421400 Fax: 33431673

Forma de Pagamento: R\$240,76
 Recibo em Carteira

Orc. N. : 714760 Data: 19/05/2016 Tel: (24) 33421400 Fax: 33431673
 Vendedor: Juliana Batista
 Cliente : 1899 Adriano Ricardo G Costa/ Celia Teresinha Borges 3342-3260
 Rua.10 (24)9994-5726 ADriano 333 Samoa
 Volta Redonda RJ

Qt.	UN	Descricao	Valor	Total
1	SC	Cimento AF 320 saco 50 Kg - CSN - CSN	21,76	21,76
1	M3	Areia Media Lavada - AREAL	98,00	98,00
1	M3	Pedra Brita n. 01 - PEDREIRA VOLTA REDONDA	121,00	121,00
Total:			R\$240,76	

Total dos itens (Venda Varejo):R\$240,76

IMPORTANTE!!!!!!! MATERIAL DESCARREGADO A ATE 3 M DE ONDE O CAMINHAO ESTACIONAR !
 LAJOTAS SOMENTE NA CALCADA NAO SUBIMOS NEM DESCEMOS ESCADAS E VIELAS
 CAPOBIANGO !!!!!!! - Tudo para Construcao
 tel (24) 33