



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**REUTILIZAÇÃO DA CASCA CERÂMICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR
CERA PERDIDA, COMO ADIÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Autor: Carine Ferreira Machado
Orientador: Weber Guadagnin Moravia
Co-orientador: Nilton da Silva Maia

Belo Horizonte, Fevereiro de 2013



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Carine Ferreira Machado

**REUTILIZAÇÃO DA CASCA CERÂMICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR
CERA PERDIDA COMO ADIÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Orientador: Weber Guadagnin Moravia

Co-orientador: Nilton da Silva Maia

Belo Horizonte

2013

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**REUTILIZAÇÃO DA CASCA CERÂMICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR
CERA PERDIDA COMO ADIÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo colegiado do curso de Pós-graduação em Engenharia de materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Autora: Carine Ferreira Machado

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia
CEFET-MG (Orientador)

Prof. Dr. Nilton da Silva Maia
CEFET-MG (Co-orientador)

Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos
Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG

Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra
Departamento de Engenharia de Transportes

Prof. Dr. Plínio Eduardo Praes
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Belo Horizonte, Fevereiro de 2013



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*“Reutilização da Casca Cerâmica do Processo de Fundição por Cera Perdida
como Adição em Matrizes Cimentícias”*

Carine Ferreira Machado

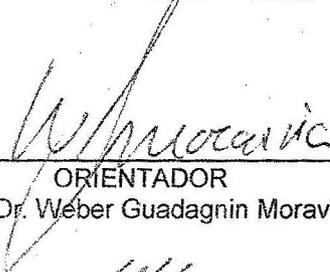
Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em 25 de FEVEREIRO de 2013

Aprovada com modificações sugeridas pela banca em _____ de _____ de 2013

*Aprovada com ressalvas em _____ de _____ de 2013.

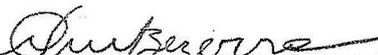
Reprovado (a).



ORIENTADOR
Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia



CO-ORIENTADOR
Prof. Dr. Nilton da Silva Maia



Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra



Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos



Prof. Dr. Plínio Eduardo Praes

* Caso o(a) candidato (a) seja aprovado com ressalvas, favor relatar as modificações necessárias e indicar um membro responsável pela verificação das correções.

A Deus por tudo e por tanto!

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nortear meu trabalho desde o início, abrir as portas, e pela força espiritual para resistir a todas as imposições sugestivas à derrota, as quais consegui superar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Weber Moravia, pelos conselhos sábios, pela paciência, tempo dedicado, pela confiança e incentivo para que o trabalho pudesse ser concretizado.

Agradeço à minha mãe pelo incentivo, pelas orações e compreensão nos momentos de ausência.

A Taynara Quadros pelo apoio incondicional, carinho e paciência durante a elaboração deste trabalho.

Sinceros agradecimentos ao professor Augusto Bezerra pela paciência, carisma, apoio e atenção dispensados, indispensáveis nos momentos finais da conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nilton Maia, pelas sugestões valiosas durante a execução do trabalho.

Ao CEFET e ao CAPES pelo apoio financeiro, apoio intelectual e incentivo à pesquisa.

À Fundimazza Indústria Comércio Microfundidos, de modo especial ao Idnei, pelo auxílio material, com o fornecimento da casca cerâmica.

A Holcim, pela doação do cimento Portland CPV para moldagem dos corpos de prova.

A todos os profissionais dos laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear pela disponibilidade e pelo apoio incondicional na realização dos ensaios, de modo especial ao Plínio Eduardo e ao professor Lameiras, que me abriram as portas para as pesquisas realizadas no CDTN.

Ao prof. Dr. Conrado Rodrigues e à professora Dr.^a Elaine Carbalho, pelas contribuições valiosas na execução dos ensaios e conhecimentos compartilhados.

Ao amigos do laboratório de Construção do CEFET-MG, Mateus Justino, Leandro e Alzimar, pelos momentos de descontração, amizade e todo o apoio dispensado.

À Cintia Danielle e Gabriela, pela amizade, pelos conselhos, esforços dispensados, amparo nas dificuldades e incentivos.

Aos amigos, Marcelo Machado e Karina Silva, da Universidade Federal de Minas Gerais, pela valiosa contribuição com a realização de ensaios indispensáveis ao trabalho.

A todos os colegas e amigos, que direta ou indiretamente, contribuíram com ideias, sugestões ou simplesmente com sua amizade.

“O covarde nunca começa, o fracassado nunca termina, o vencedor nunca desiste...”

Norman Vicente Peale

RESUMO

No Brasil, existem cerca de 30 empresas de Fundição por Cera Perdida e, cada uma delas descarta, mensalmente, em torno de 50 a 100 toneladas de resíduo do molde cerâmico, conhecido por casca refratária, utilizado no processo de fundição das peças. A motivação deste estudo partiu da ideia de se verificar a potencialidade da utilização do resíduo, como material pozolânico. Além da ação química, as pozolanas, finamente divididas, possuem ação física, uma vez que, atuam nos concretos como material de preenchimento, o que melhora o empacotamento do sistema (efeito *filler*). O material pulverulento, resultante da cominuição do resíduo de casca refratária passou por uma caracterização física, química, mineralógica e de risco ambiental. Após a caracterização, o resíduo na forma de pó foi utilizado em substituição de 10% e 15% da massa de cimento *Portland*, em matrizes cimentícias. Foram avaliadas as propriedades do concreto fresco e as propriedades do concreto endurecido, como resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 40 dias, o módulo de elasticidade, o índice de vazios, a absorção de água por imersão total e por capilaridade, a análise de pH e a tração na compressão diametral, aos 28 e 91 dias. Segundo a avaliação do comportamento ambiental pela NBR 10004/04, o resíduo da casca cerâmica (RCC) foi classificado como classe II-A, não inerte. O RCC apresenta-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de sílica, mulita e zircônia. Os resultados indicam que o RCC apresenta atividade pozolânica, pelos métodos físicos e químicos, atendendo aos requisitos mínimos impostos pelas normas NBR 5752/92 e NBR 15895, respectivamente. Como adição mineral na fabricação de concretos, do ponto de vista mecânico, houve uma queda de resistência à compressão simples, porém esta redução não foi proporcional ao teor de substituição utilizado, em razão da satisfatória atividade pozolânica do resíduo, além de seu efeito filler. Com relação à porosidade, os ensaios indicaram variações desprezíveis. As análises de pH indicaram que os teores de substituição de cimento por RCC não contribuíram para o fenômeno da corrosão de armaduras. O resíduo em questão tem grande potencial de aplicabilidade, o que o torna interessante do ponto de vista ambiental, uma vez que deixa de ser um passivo ambiental e passa a contribuir para o desenvolvimento sustentável dos recursos naturais.

Palavras-chave: Resíduo da Casca Cerâmica, Fundição por Cera Perdida, Matriz Cimentícia.

ABSTRACT

In Brazil, there are about 30 companies of Lost Wax Casting and, each one disposes around 50 to 100 tons ceramic mold waste, known as refractory shell, used in casting process of pieces. The motivation of the study came from the idea to verify the potential of using waste as a Pozzolanic material. In addition to the chemical action, the finely pozzolans divided have physical action, since working in concrete as a filling material, improving the packaging system (filler effect). The powdery material, resulting from the comminution of the waste from the refractory shell went through a physical, chemical and mineralogical characterization and environmental risk. After the characterization, the waste as a powder was used replacing from 10 to 15% of Portland cement mass in cementitious matrices. The properties of fresh concrete and those of the hardened concrete were evaluated, such as compression strength ages 3, 7 and 40 days, the modules of elasticity, voids, absorption of water by total immersion and by capillary action, pH analyses and tensile strength by diametrical compression ages 28 and 91 days . According to the evaluation of environmental performance by the NBR 10004/04, the residue of the ceramic shell (RCC) has been classified as Class II-A, non-inert. The RCC is shown in both amorphous and crystalline phases of silica, mullite, and zirconia. The results show that the RCC has pozzolanic activity, the physical and chemical methods, meeting the minimum requirements imposed by the NBR 5752/92 and NBR 15895, respectively. As a mineral additive in the manufacture of concrete, the mechanical point of view, there was a decrease of compressive strength, but this reduction was not proportional to soil replacement used, because of the satisfactory pozzolanic activity of the residue, and its effect filler. About the porosity, the tests showed negligible variations. Analyzes of pH showed that the concentration of replacing cement by RCC did not contribute to the phenomenon of corrosion reinforcement. The concerned waste has a great potential of applicability, which makes it interesting in the economic perspective, since it's no longer an environmental passive and contributes to the sustainable development of natural resources.

Key-words: Waste of Ceramic Shell, Lost wax Casting, Cimentitious Matrix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Metal fundido sendo vazado em molde	5
Figura 2- Molde metálico (A); Molde em areia sintética (B).....	6
Figura 3- Peças produzidas pelo processo de fundição por cera perdida	6
Figura 4- Etapas do processo de fundição por cera perdida	8
Figura 5- Moldes cerâmicos não calcinados do processo de microfusão	9
Figura 6- Resíduo de casca cerâmica	10
Figura 7- Fotomicrografia de uma pozolana natural	18
Figura 8- Esquema do Concreto com adições minerais (esquerda) e concretos com adições minerais (direita).....	20
Figura 9- Resistência à compressão do concreto com metacaulim aos 28 dias	22
Figura 10- Resistência à compressão dos concretos de acordo com a idade de cura	23
Figura 11- Efeito do Metacaulim na resistência à compressão	24
Figura 12- Resistência à compressão dos concretos após 3, 7 e 28 dias de cura	24
Figura 13- Módulo de elasticidade do concreto com cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	25
Figura 14- Resistência à tração por compressão diametral aos 7 e 28 dias de idade	27
Figura 15- Ponte Newton Navarro, Natal-RN	30
Figura 16- Consumo nacional de cimento em milhões de toneladas	31
Figura 17- Quatro frações de areia normalizada-IPT	34
Figura 18- Fluxograma do planejamento experimental.....	36
Figura 19- Determinação do teor de matéria orgânica	38
Figura 20- Determinação da massa submersa	41
Figura 21-Fragmentos do resíduo da casca cerâmica antes do processo de britagem.....	42
Figura 22- Fragmentos do resíduo da casca cerâmica após do processo de britagem.....	42
Figura 23- Resíduo da casca cerâmica pulverizado.....	43
Figura 24- Determinação da massa específica do RCC	46
Figura 25- Corpos de prova cilíndricos 5 cm X 10 cm	48
Figura 26- Procedimentos de ensaio do abatimento do tronco de cone	52
Figura 27- Fita de papel indicador universal de pH	53
Figura 28- Prensa Hidráulica para ensaio de resistência à compressão	54
Figura 29- Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	55
Figura 30- Ensaio de absorção de água por capilaridade	56
Figura 31- Imersão total dos corpos-de-prova.....	58
Figura 32- (A) amostra de concreto após ensaio de compressão diametral; (B) fragmentos de concreto após britador de mandíbulas; (C) fragmentos de concreto após moinho de discos; (D) pó de concreto após moinho de painelas	59
Figura 33- Medição do pH.....	60
Figura 34- Fotomicrografias do RCC com ampliações de 200X (A); 500X (B); 2000X (C); 4000X (D).....	63
Figura 35- Difractograma de raios X do resíduo da casca cerâmica.....	64
Figura 36- Distribuição dos valores acumulados em função do diâmetro das partículas do RCC	67
Figura 37- Ensaio de pH dos concretos no estado fresco, pelo método da fita, (A) ref., (B) 10%, (C) 15%	73
Figura 38- Resistência à compressão do concreto com e sem adição de RCC	74

Figura 39- Corpos de prova rompidos por compressão diametral (A) ref., (B) 10% e (C) 15% de substituição	76
Figura 40- Resistência à tração na compressão diametral aos 28 e 91 dias	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação e características das adições minerais para concreto.....	13
Tabela 2-Exigências químicas para materiais pozolânicos segundo a NBR 12653	16
Tabela 3 - Exigências físicas para materiais pozolânicos segundo a NBR 12653	17
Tabela 4 - Resumo de diferentes trabalhos de utilização de resíduos cerâmicos	18
Tabela 5 - Permeabilidade à água do concreto com cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	21
Tabela 6 - Valores de absorção de água dos concretos produzidos com adições de resíduo cerâmico.....	21
Tabela 7 - Resistência à compressão em MPa dos concretos com resíduo cerâmico	23
Tabela 8 - Módulo de elasticidade do concreto com adição de cinza volante.....	26
Tabela 9 - Tração por compressão diametral.....	27
Tabela 10 - Potencial hidrogeniônico dos concretos endurecidos.....	28
Tabela 11-Características do cimento Portland CPV	35
Tabela 12- Quantidades em massa para a moldagem de três corpos de prova cilíndricos.....	49
Tabela 13- Proporção e consumo de materiais por metro cúbico de concreto	51
Tabela 14- Características físicas do agregado miúdo	61
Tabela 15- Características físicas do agregado graúdo	62
Tabela 16- Composição química do resíduo da casca cerâmica expressa na forma de óxidos em % da massa da amostra analisada	65
Tabela 17- Análise química por via úmida do resíduo da casca cerâmica	66
Tabela 18- Características físicas do Resíduo da casca cerâmica e do cimento Portland	67
Tabela 19- Massa específica aparente do resíduo da casca cerâmica.....	68
Tabela 20 Análise por adsorção de nitrogênio por BET	69
Tabela 21- Índice de Atividade Pozolânica com cimento do resíduo da casca cerâmica	70
Tabela 22- Resultados do ensaio de lixiviação conforme a NBR 10005/2004	71
Tabela 23- Resultados do ensaio de solubilização conforme a NBR 10006/2004.....	71
Tabela 24- Parâmetros físicos ambientais	72
Tabela 25-Abatimento do tronco de cone dos concretos.....	73
Tabela 26-Apresentação do Módulo de Elasticidade	75
Tabela 27-Resultado dos valores de absorção de água por capilaridade em função do teor de adição.....	78
Tabela 28-Absorção de água por imersão total e índice de vazios.....	78
Tabela 29-Potencial hidrogeniônico dos concretos endurecidos.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água em gramas
A_b	Absorção de água em porcentagem
Å	Angstrom
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Fator água/cimento
Al_2O_3	Óxido de alumínio (Alumina)
$Al_6Si_2O_{13}$	mulita
B	Massa do corpo de prova seco em gramas
BaO	Óxido de bário
BET	Brunauer-Emmett-Teller
C	Coeficiente de capilaridade em g/cm^2
CaO	Óxido de cálcio
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CETEC	Fundação centro tecnológico de Minas Gerais
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CO_2	Dióxido de Carbono
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPV	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
dm^3	Decímetros cúbicos
DRX	Difração de raios X
f_{cc}	Resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova de referência apenas com o cimento
f_{cp}	Resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova com resíduo cerâmico
Fe_2O_3	Óxido de ferro (hematita)
FRX	Fluorescência de raios X
g	Gramas
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
kcal	Quilocalorias
kg	Quilograma
K_2O	Óxido de potássio
M	Massa ao ar da amostra seca, em gramas
m	Massa do material ensaiado em gramas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de magnésio ou periclásio (Magnésia)
M_i	Massa da amostra na condição imersa
min	Minutos

ml	Mililitros
MPa	Megapascal
M_s	Massa do corpo de prova seco em estufa
M_{sat}	Massa do corpo de prova saturado
M_{ss}	Massa da amostra saturada com superfície seca
MnO	Óxido de manganês
NBR	Norma Brasileira Registrada
PF	Perda ao fogo
PNRS	Política Nacional de resíduos Sólidos
RCC	Resíduo da Casca Cerâmica
S	Área da base do corpo de prova em cm^2
SiO	óxido de silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO ₃	Trióxido de enxofre
ZrSiO ₄	zirconita
ZrO ₂	óxido de zircônio
TiO ₂	Óxido de titânio
v	Volume deslocado pela massa do material ensaiado
Vf	Volume final
Vi	Volume inicial
ZrO ₂	Óxido de zircônio (Zircônio)
γ	Massa específica do material ensaiado em gramas por centímetros cúbicos
μm	micrometros
ρ	Massa específica

SUMÁRIO

RESUMO.....	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1 Processo de fundição por cera perdida	5
3.2 Resíduos industriais sólidos	10
3.3 Adições minerais em compósitos cimentícios	11
3.4 Adições pozolânicas	15
3.5 Influência das pozolanas nas propriedades do concreto	19
3.5.1 Absorção de água	20
3.5.2 Resistência à compressão	22
3.5.3 Módulo de elasticidade	25
3.5.4 Tração na compressão diametral	26
3.5.5 Influência do pH na durabilidade do concreto	27
3.6 Os impactos da indústria de fabricação do cimento	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Materiais	33
4.1.1 Agregado miúdo.....	33
4.1.2 Agregado graúdo.....	33
4.1.3 Agregado miúdo normalizado.....	33
4.1.4 Água	34
4.1.5 Resíduo da Casca Cerâmica (RCC)	34
4.1.6 Aglomerante.....	35
4.2 Caracterização do agregado miúdo.....	37

4.2.1	Granulometria	37
4.2.2	Materiais pulverulentos	37
4.2.3	Teor de matéria orgânica.....	38
4.2.4	Massa específica aparente	39
4.3	Caracterização do agregado graúdo	39
4.3.1	Granulometria	39
4.3.2	Massa unitária no estado solto	40
4.3.3	Absorção de água	40
4.4	Britagem do resíduo da casca cerâmica	42
4.5	Moagem do resíduo da casca cerâmica	43
4.6	Caracterização do resíduo da casca cerâmica	43
4.6.1	Microscopia Eletrônica de Varredura-(MEV)	43
4.6.2	Difração de Raios X -(DRX)	44
4.6.3	Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)	44
4.6.4	Análise química por via úmida	45
4.6.5	Granulometria a laser	45
4.6.6	Massa específica real	45
4.6.7	Massa específica aparente	46
4.6.8	Área superficial específica - BET	47
4.6.9	Índice de atividade pozolânica	47
4.6.10	Pozolanicidade (Chapelle)	49
4.6.11	Solubilização e Lixiviação	50
4.7	Desenvolvimento e confecção dos compósitos	50
4.8	Avaliação do comportamento do concreto no estado fresco	51
4.8.1	Abatimento em tronco de cone	51
4.8.2	Determinação do potencial hidrogeniônico dos concretos frescos	53
4.9	Avaliação do comportamento do concreto no estado endurecido	53
4.9.1	Ensaio de resistência à compressão	53
4.9.2	Módulo de elasticidade	54
4.9.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	55
4.9.4	Absorção de água por capilaridade	56
4.9.5	Absorção de água por imersão total	57
4.9.6	Determinação do potencial hidrogeniônico (pH) dos concretos endurecido ...	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Caracterização do agregado miúdo.....	61
5.2	Caracterização do agregado graúdo	62
5.3	Caracterização do resíduo da casca cerâmica	62
5.3.1	Microscopia eletrônica de varredura	62
5.3.2	Difração de raios X	63
5.3.3	Espectrometria de fluorescência de raios X-(FRX)	64
5.3.4	Análise Química por Via Úmida.....	65
5.3.5	Granulometria a laser	67
5.3.6	Massa específica real	68
5.3.7	Massa específica aparente	68
5.3.8	Área superficial específica	69
5.3.9	Índice de atividade pozolânica	69
5.3.10	Pozolanicidade (Chapelle)	70
5.3.11	Solubilização e Lixiviação	70

5.4	Comportamento dos Concretos no Estado Fresco	72
5.4.1	Abatimento em tronco de cone	72
5.4.2	Análise do pH dos concretos no estado fresco.....	73
5.5	Comportamento dos Concretos no Estado Endurecido	74
5.5.1	Resistência à compressão axial	74
5.5.2	Módulo de elasticidade	75
5.5.3	Resistência à tração na compressão diametral	76
5.5.4	Absorção de água por capilaridade	78
5.5.5	Absorção de água por imersão total	78
5.5.6	Análise do pH dos concretos no estado endurecido.....	79
6	CONCLUSÕES.....	80
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91

1 INTRODUÇÃO

O ramo de fundição pelo processo de cera perdida (Microfusão, Fundição de Precisão ou *Investment Casting*) vem ganhando destaque nos últimos anos no mercado nacional, e, sobretudo, internacional. De acordo com Machado (2005), o Brasil destaca-se como o sétimo produtor mundial, com mais de 30 empresas de microfusão de pequeno, médio e grande porte, localizadas nas regiões Sul e Sudeste do país.

Machado (2005) afirma que o processo oferece diversas vantagens, como precisão dimensional, excelente acabamento superficial, obtenção de formatos simples a complexos e aplicação para diversos tipos de liga, fornecendo peças com qualidade, que atendem às exigências das indústrias automobilística, aeronáutica, têxtil, alimentícia, agrícola, petroquímica, médica, odontológica e de esportes. Neste contexto, Lacerda, José e Bordin (2011) destacam que uma peça microfundida tem um valor agregado muito superior, ao de uma peça fundida comum, permitindo a exportação de mais da metade de sua produção.

Do processo da microfusão gera-se um tipo de resíduo, denominado de casca cerâmica ou casca refratária. Seu volume é significativo no Brasil (em média de 50 a 100 toneladas mensais por empresa) e ocasiona problemas ambientais, de transporte, estocagem, de manutenção dos depósitos, uma vez que, esse resíduo pode ter como destino final os aterros sanitários ou ser acondicionado na própria empresa, sem qualquer tipo de tratamento.

A implementação de regulamentos mais restritivos, nos últimos anos, tem obrigado as fundições a destinarem seus excedentes para aterros, muitas vezes distantes da sua localidade, onerando seus custos. Por outro lado, têm-se perdas econômicas pelo não aproveitamento desse material descartado. Nas últimas décadas, houve um aumento da preocupação das indústrias com o meio ambiente, principalmente depois de sancionada a nova lei nacional de resíduos sólidos 12305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), a qual determina que as empresas geradoras de resíduos devam buscar alternativas ambientalmente adequadas para a disposição final dos resíduos, e para um desenvolvimento mais sustentável.

Lacerda, José e Bordin (2011) abordaram a questão do reaproveitamento do resíduo da casca cerâmica na forma pulverulenta, como adição, durante o processo de fabricação de materiais refratários, e obtiveram excelentes resultados para o comportamento mecânico dos materiais cerâmicos com a adição desse resíduo. O reaproveitamento de resíduos provenientes de processos industriais e sua inserção em outros processos produtivos trazem inúmeras vantagens do ponto de vista econômico e, sobretudo, no âmbito social e ambiental.

Algumas adições minerais apresentam características pozolânicas (como a cinza volante com baixo teor de cálcio), algumas apresentam características cimentantes (como a escória granulada de alto forno), enquanto outras possuem características cimentantes e pozolânicas (como as cinzas volantes, com alto teor de cálcio) (METHA; MONTEIRO, 2008).

Resíduos do tipo cerâmico constituem alternativas atrativas para serem utilizados como adições pozolânicas em materiais cimentícios. A reatividade desse tipo de material (pozolanicidade) é de fundamental importância para a melhoria de propriedades mecânicas em argamassas e concretos.

Segundo Ghrici et al. (2006), o cimento é responsável por 7% da emissão mundial de CO₂, principal gás responsável pelo efeito estufa e aquecimento global. A adição de resíduos industriais como cinzas volantes, sílica de fumo e pozolanas contribui para diminuição do consumo de energia e da quantidade de CO₂ lançada na atmosfera, durante a manufatura do cimento. Dessa forma, o uso de pozolanas na indústria cimentícia reduz o custo de produção, além de melhorar algumas propriedades do concreto. Netto (2006), citando Oliveira e Barbosa (2004), destaca que a utilização de pozolanas nos concretos de cimento Portland tem apresentado inúmeros benefícios às propriedades do concreto, tanto em relação à reologia no estado fresco, quanto ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido.

Nesse contexto, Anjos et al. (2003) apud Menezes et. al. (2009) enfatizam que surge a necessidade de se utilizarem materiais alternativos, que sejam ecológicos, de baixo custo e com disponibilidade local, de modo a baratear os custos das habitações. Segundo Schmidt et al. (2011), futuros aumentos na demanda de cimento deverão ser atendidos pela utilização de subprodutos ou materiais residuais geralmente reativos, em substituição parcial ao cimento. Tendo em vista a minimização de problemas ambientais possa estar relacionada com o reaproveitamento de resíduos sólidos pela Indústria da Construção civil, foi avaliada a

reutilização do resíduo de casca cerâmica como substituição parcial ao cimento, na fabricação de concretos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Tem-se como objetivo geral, avaliar as propriedades mecânicas do concreto produzido a partir da substituição parcial do cimento Portland em massa pelo resíduo da casca cerâmica nas proporções de 10% e 15%.

2.2 Objetivos específicos

Quanto aos objetivos específicos pretende-se:

- a) caracterizar o RCC por meio da determinação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas;
- b) avaliar a classificação ambiental do resíduo de casca cerâmica, de acordo com a NBR 10004/2004;
- c) estudar o comportamento de atividade pozolânica do resíduo da casca refratária;
- d) avaliar a influência do resíduo cerâmico nas propriedades do concreto no estado fresco;
- e) avaliar a influência do resíduo cerâmico nas propriedades do concreto endurecido por meio de parâmetros de resistência à compressão, módulo de elasticidade, tração na compressão diametral, absorção de água por imersão total e por capilaridade e potencial hidrogeniônico.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Processo de fundição por cera perdida

Machado e Freitas (2001) esclarecem que o processo de fundição de peças data de épocas remotas. Esse processo consiste em preencher com metal líquido a cavidade de um molde, contendo a mesma geometria da peça desejada. Durante anos, uma grande variedade de métodos de moldagem e fusão foi desenvolvida, diversificando-se em diferentes processos.

A Figura 1 ilustra o processo de fundição, quando o metal, no estado líquido, é vazado dentro de um molde:



Figura 1- Metal fundido sendo vazado em molde
Fonte: foto do autor

Machado e Freitas (2001) salientam que os processos de fundição podem ser classificados com base no tipo de molde, em permanente (fundição sobre pressão, coquilha a gravidade e centrifugação) ou não permanente (moldes e areia, casca cerâmica e outros). Outra subclassificação pode ser feita com base no tipo de modelo, em perdido (isopor, cera) ou não (madeira, resina, metálica).

A Figura 2 ilustra dois tipos de moldes (próprias formas da fundição com o formato e as medidas exatas da peça a ser produzida) o primeiro do tipo de molde permanente (metálico) e o segundo, um molde descartável (areia sintética).



(A) (B)
Figura 2- Molde metálico (A); Molde em areia sintética (B)
 Fonte: foto do autor

Ainda de acordo com Machado e Freitas (2001) a escolha do tipo de material do modelo vai depender do tamanho e forma da peça, assim como da quantidade que será produzida. Esses modelos precisam ser retirados dos moldes com a maior facilidade possível.

Segundo Neto (2004), o processo de cera perdida é menos antigo do que a moldagem em areia. Porém, a cera é o material mais antigo utilizado para se confeccionar modelos de fundição. Esta técnica foi muito usada para produção de peças artísticas, e atualmente é muito utilizada para fabricação de peças que requerem alta precisão dimensional, com geometrias especiais ou em ligas especiais, conforme ilustra a Figura 3.



Figura 3- Peças produzidas pelo processo de fundição por cera perdida
 Fonte: ABIFA (2011)

Apesar do custo de produção por esta técnica de fundição ser ainda muito elevado, Machado (2005) ressalta que o processo de fundição por cera perdida oferece muitas vantagens em relação aos demais tipos de fundição, tais como a grande capacidade de geração de peças em

metais ou ligas especiais, custo inicial baixo com ferramental, eliminação de desperdícios, flexibilidade e capacidade de projetos, estreitas tolerâncias e acabamento superficial.

A partir dessa reflexão, Lacerda, José e Bordin (2011) destacam que falar em números do segmento de microfundição pode dar uma falsa ideia da importância dessa atividade industrial, uma vez que o mercado brasileiro conta com aproximadamente 1300 empresas de fundição. Dessas 25 a 30 delas são fundições do tipo cera perdida. Além disso, eles acrescentam que uma peça microfundida tem um valor agregado muito superior em relação ao valor de uma peça fundida por outros métodos, possibilitando-se a exportação de mais da metade da produção dessas peças.

Freitas e Machado (2001) enfatizam que a indústria de fundição por cera perdida continua crescendo em ritmo acelerado, devido principalmente à sua resposta tecnológica, a desafios no campo da qualidade de produtos apresentados ao mercado. No cenário mundial, o Brasil destaca-se como o sétimo produtor, estimando-se atualmente um número acima de 30 empresas, concentradas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, sobretudo nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Até a obtenção do produto final, o processo de fundição por cera perdida passa por diversas fases de produção. Bidwell (1997) *apud* Machado (2005) cita as principais etapas de uma microfundição:

- 1) produção do modelo de cera, através da injeção de cera em uma matriz, geralmente metálica;
- 2) montagem da “árvore” ou cacho de modelos;
- 3) produção do molde cerâmico em casca através de camadas obtidas por:
 - a) imersão do cacho de cera no banho de lama cerâmica;
 - b) estucagem (recobrimento com partículas refratárias);
 - c) secagem dos moldes;
- 4) deceragem - retirada da cera do molde;

- 5) sinterização do molde para aumento da resistência da casca, e retirada de resíduos de cera;
- 6) fusão e vazamento do metal líquido.

A Figura 4 corresponde a um fluxograma representativo das principais etapas do processo de fundição por cera perdida.

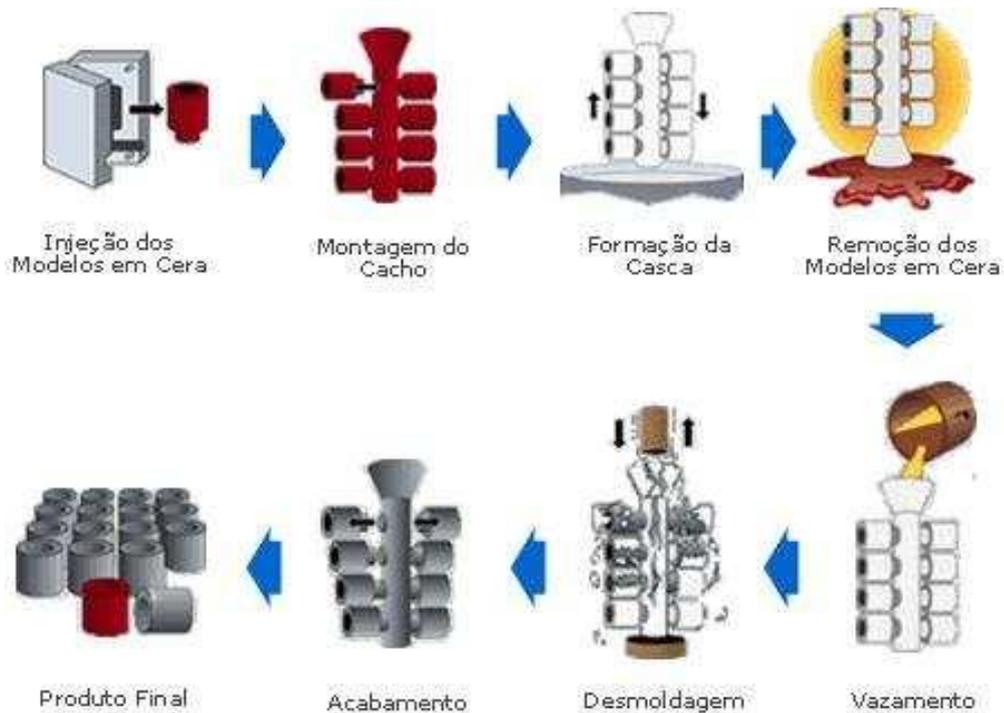


Figura 4- Etapas do processo de fundição por cera perdida
 Fonte: <http://www.rioinox.com>

A microfundição é um processo que se inicia com a fabricação dos moldes cerâmicos, denominados cascas cerâmicas, com a cavidade da peça a ser produzida. A Figura 5 ilustra moldes cerâmicos não calcinados produzidos durante o processo de fundição por cera perdida.



Figura 5- Moldes cerâmicos não calcinados do processo de microfusão
Fonte: Foto do autor

Niles (2000) citado por Machado (2005), enfatiza que a espessura da casca aumenta com o aumento do tamanho de partículas da estucagem e com o aumento da viscosidade da lama. Essa espessura varia, normalmente, de 5 mm a 16 mm.

Machado (2005) afirma que durante a produção da casca cerâmica, os fundidores devem desenvolver controles visando propriedades como resistência da casca a verde¹, resistência da casca sinterizada, permeabilidade e facilidade de remoção da casca. O molde em casca deverá suportar as tensões de manuseio, durante a deceragem e o vazamento do metal líquido.

Na última etapa do processo de microfusão, após a quebra do molde (calcinado) para a retirada da peça metálica fundida, gera-se um resíduo conhecido por casca cerâmica ou casca refratária, conforme ilustra a Figura 6. O resíduo cerâmico torna-se um passivo ambiental, uma vez que não encontra aplicabilidade dentro das indústrias geradoras, constituindo-se um mero rejeito industrial.

¹ Casca antes da sinterização.



Figura 6- Resíduo de casca cerâmica
Fonte: Foto do autor

3.2 Resíduos industriais sólidos

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos industriais são resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

O reaproveitamento de resíduos provenientes de processos industriais e sua inserção em outros processos produtivos trazem inúmeras vantagens do ponto de vista econômico e, sobretudo, no âmbito social e ambiental. Lacerda, José e Bordin (2011) utilizaram resíduos de casca refratária de fundição por cera perdida, na forma de pó, em formulações de blocos cerâmicos refratários, apontando uma solução satisfatória de reaproveitamento de tal resíduo de fundição, além de obter resultados significativos no comportamento mecânico, acima do exigido para cerâmica estrutural.

Carvalho (2006) ressalta que a preocupação das indústrias com o meio ambiente é cada vez maior, principalmente depois de sancionada a Lei Federal nº 9605/98², a qual é respeitada

² Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.

mais pelo seu caráter punitivo do que de incentivo à redução do impacto ambiental das atividades industriais. Em substituição à lei nº 9605/98, a lei nº 12.305/2010- Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010) impõe novas regras para a gestão e o gerenciamento de resíduos estimula as empresas a adotarem práticas para a redução dos custos totais de um produto, ou, que agreguem valor ao mesmo, tornando o processo produtivo mais rentável e competitivo.

Valle (1995) *apud* Savastano Júnior e Pimentel (2000) enfatiza que um material deixa de ser resíduo pela sua valorização como matéria-prima, para a produção de novos produtos. Vários tipos de resíduos industriais sólidos são reaproveitados como adições minerais em compósitos cimentícios, com ganhos econômicos e ambientais. Alguns tipos de resíduos têm destino e tratamento adequados, em atendimento à legislação ambiental.

Barbosa et al. (2012) afirmam que a indústria da Construção Civil busca, de maneira constante e insistente, materiais alternativos oriundos de subprodutos que venham a atender: a redução de custos, a agilidade de execução, a durabilidade e a melhoria das propriedades do produto final, visando, principalmente, a redução da extração de materiais naturais através do emprego de resíduos recicláveis, solucionando, também, os problemas de estocagem do material.

3.3 Adições minerais em compósitos cimentícios

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais podem ser classificadas como materiais naturais, ou seja, aqueles que são processados com a finalidade única de produzir uma pozolana, ou como materiais de subproduto; aqueles que podem ou não exigir algum processamento (secagem e pulverização, por exemplo) antes de serem usados como adições minerais. Algumas adições minerais apresentam características pozolânicas (como a cinza volante de baixo teor de cálcio). Algumas apresentam características cimentantes (como a escória granulada de alto forno), enquanto outras são tanto cimentantes quanto pozolânicas (como as cinzas volantes com alto teor de cálcio).

Tutikian e Dalton (2008) *apud* Alves, Salles e Mizumoto (2011) apontam que diferentemente do material pozolânico, o material cimentante possui em sua composição o hidróxido de cálcio e não necessita do Ca(OH)_2 , formado durante a hidratação do cimento, para gerar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), tendo a auto hidratação do cimento lenta e a quantidade de produtos cimentantes insuficientes para aplicação dos materiais para fins estruturais. A Tabela 1 apresenta alguns tipos de adições minerais, bem como suas classificações.

Tabela 1 Classificação e características das adições minerais para concreto

Classificação	Exemplos	Características da Partícula
Cimentantes e pozolânicas	Escória granulada de alto forno (cimentante)	O material não processado é da dimensão da areia e contém de 10% a 15% de umidade. Antes de ser usado, é seco e triturado em partículas menores de 45 μm (cerca de 500 m^2/kg Blaine). As partículas têm textura áspera.
	Cinzas volantes com alto teor de cálcio (cimentantes e pozolânicas)	O pó corresponde a 10%-15% de partículas maiores de 45 μm (normalmente, 300-400 m^2/kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro menor que 20 μm . A superfície da partícula, normalmente, é lisa, mas não tão limpa quanto as cinzas volantes com baixo teor de cálcio.
Pozolanas altamente reativas	Sílica ativa condensada	Pó extremamente fino, consistindo em esferas sólidas de 0,1 μm de diâmetro médio (área superficial específica de cerca de 20 m^2/g , por adsorção de nitrogênio).
	Cinza de casca de arroz	As partículas, normalmente, são menores do que 45 μm , mas são altamente celulares (área superficial específica de 40 a 60 m^2/g , por adsorção de nitrogênio).
Pozolanas comuns	Cinza volante com baixo teor de cálcio	O pó corresponde a 15%-30% de partículas maiores do que 45 μm (normalmente 200-300 m^2/kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro médio de 20 μm . Cenosferas e plerosferas podem estar presentes
	Materiais naturais	As partículas são moídas a menos de 45 μm e têm textura áspera.
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira, palha de arroz queimada em campo.	Os materiais devem ser pulverizados em partículas de dimensões muito finas para desenvolver alguma atividade pozolânica. As partículas moídas são de textura áspera.

Fonte: METHA; MONTEIRO (2008)

Gonçalves (2007) afirma que o concreto constitui-se como uma alternativa para incorporar adições minerais do tipo cerâmicas com benefícios ambientais. Conforme John (2000) *apud* Carvalho (2006), boa parte dos componentes de construção é de produção simples, como os componentes produzidos com agregados e aglomerantes inorgânicos, o que dispensa muitos

requisitos na maioria das aplicações comuns da construção civil, simplificando os processos de reciclagem de resíduos de outros segmentos industriais, dentro da construção civil.

Dessas acepções, Moraes (2001) ressalta que é significativo o fato de que a introdução de adições minerais como as cinzas volantes, a cinza de casca de arroz, a sílica ativa e outros, produzem efeitos de natureza química, física e físico-química no concreto. São estes efeitos que definem, em grande parte, o desempenho do concreto, pois este está subordinado diretamente à qualidade da pasta.

Tais benefícios se tornam claros quando o autor citado afirma que as adições minerais, quando incorporadas ao concreto em substituição parcial do cimento Portland, desempenham um papel fundamental sobre os mecanismos que atuam na microestrutura dos poros, propiciando o bloqueio e a obstrução dos vazios capilares pela atuação da finura dos grãos.

Neville (1997), citado por Gonçalves (2000), relata que o uso de escória de alto forno melhora a coesão e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, devido ao formato esférico de seus grãos. Gonçalves (2000), citado por Moura e Leite (2011), avaliou a influência da adição do resíduo de corte de granito no concreto e observou melhorias em todas as propriedades do concreto, avaliadas com a adição de 20% do resíduo na matriz.

Com base nessas afirmações, Silva (2005) observou que, a utilização do resíduo de polimento do porcelanato com teor de substituição de 10% na confecção de concreto, traz ganhos satisfatórios nas suas propriedades mecânicas (resistência à compressão) e na durabilidade, traduzindo-se em um material de melhor desempenho, e ainda contribuindo com a preservação do meio ambiente.

Neste aspecto, Oliveira, Gomes e Santos (2012), investigando a utilização de resíduos cerâmicos (de vidros, tijolos e telhas) como substituição do cimento Portland em concreto e argamassa, concluíram que as propriedades mecânicas e a durabilidade podem ser melhoradas com a adição de uma mistura de minerais, além de contribuir com a redução da emissão de CO₂, gás de efeito estufa, e diminuir o impacto ambiental causado pelo depósito em aterros.

Para Torgal e Jalali (2010), reutilizar os resíduos de concreto poderia ser uma situação favorável. Por um lado, por resolver o problema dos resíduos da indústria cerâmica e, por

outro lado, porque se leva a um concreto mais sustentável industrialmente, evitando-se problemas ambientais relacionados com o descarte.

Vasconcelos e Silva (2012) alegam que o aumento do consumo de cimento Portland tem incentivado as pesquisas referentes ao desenvolvimento de materiais, que utilizam adições minerais provenientes de processos industriais. Os materiais que apresentam propriedades pozolânicas melhoram a resistência química e mecânica do cimento hidratado, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável e o meio ambiente. Esses estudos evidenciam a importância comercial e ambiental da incorporação de resíduos em concretos, levando-se em conta os diversos benefícios desse recurso.

3.4 Adições pozolânicas

Oliveira et al. (2004) *apud* Paula et al. (2009) asseveram que as pozolanas são materiais pulverulentos com sílica reativa na sua composição, capazes de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. O hidróxido de cálcio liberado pelas reações de hidratação dos compostos cimentícios podem reagir com as pozolanas, resultando na formação extra de silicatos de cálcio hidratados, considerados como os produtos mais estáveis dos concretos e argamassas, sendo responsáveis pela resistência e durabilidade desses materiais.

Souza (2007) alega que, no Brasil, os materiais pozolânicos, tais como os provenientes do metacaulim, devem estar em conformidade com as exigências químicas estabelecidas pela norma NBR 12653 para materiais pozolânicos. A Tabela 2 especifica de acordo com a norma NBR 12653 as exigências químicas, acima mencionadas.

Tabela 2-Exigências químicas para materiais pozolânicos segundo a NBR 12653

Propriedades	Classes Material Pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , % min.	70	70	50
SO ₃ , % máx	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992)

As designações N, C e E correspondem a:

- a) classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos químicos e físicos dessa norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- b) classe C: Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedece aos requisitos da NBR 12653;
- c) classe E: Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na NBR 12653. Vale mencionar que alguns materiais que se enquadram nesta classe podem apresentar propriedades aglomerantes.

Santos (1992) e Zampieri (1989), citados por Souza (2007), afirmam que a composição química, mesmo não sendo um parâmetro adequado para avaliação da pozolanicidade (pois impossibilita a diferenciação entre a sílica cristalina e não cristalina), apresenta-se como uma forma de controle de produção ou de recepção de uma argila, com relação à sua origem ou procedência.

Além das exigências químicas, a NBR 12653 (ABNT, 1992) estabelece alguns parâmetros físicos para classificação de materiais pozolânicos, Tabela 3.

Tabela 3 - Exigências físicas para materiais pozolânicos segundo a NBR 12653

Propriedades	Classes Materiais pozolânicos		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade Pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
Índice de atividade Pozolânica com cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992c)

O uso de pozolanas possibilita uma produção mais econômica na indústria do concreto, melhorando suas propriedades, tais como a durabilidade. Segundo Pekmezci e Akyuz (2004), os efeitos das pozolanas nas propriedades do concreto variam com o tipo e o volume do material pozolânico a ser empregado, mas, de acordo com Netto (2006) apud Pereira (2012), apesar das variantes, os benefícios, em geral, são bem semelhantes. Dentre os principais, podem-se destacar: redução da permeabilidade e conseqüentemente aumento da durabilidade do concreto, desde que, curado convenientemente; obtenção de resistências mecânicas geralmente superiores, particularmente em idades mais avançadas; melhor desempenho da zona de transição da interface pasta-agregado; minimização do impacto ambiental por meio da utilização de subprodutos industriais, reduzindo o consumo de cimento e contribuindo para redução da emissão de CO₂; dentre outros.

De acordo com Gonçalves, Filho e Fairbairn (2006), os subprodutos industriais, com propriedades pozolânicas, como a sílica ativa, a cinza volante e a escória de alto forno, não estão disponíveis em grandes quantidades, o que tem motivado novos trabalhos de pesquisa, para que se investigue o emprego de materiais cimentícios alternativos.

Ghrici et al. (2006) utilizaram em seu trabalho de pesquisa uma pozolana natural cujas partículas, analisadas através de um microscópio eletrônico de varredura, que podem ser visualizadas na Figura 7.



Figura 7- Fotomicrografia de uma pozolana natural
Fonte: Ghrici et. al. (2006)

Cordeiro e Désier (2010) salientam que um solo argiloso pode adquirir propriedades pozolânicas quando submetidos a processos adequados de ativação térmica e moagem mecânica. Campos, Rossignolo e Lima (2008) constataram que as cinzas agroindustriais ocupam lugar de destaque dentre os resíduos com possibilidades de aplicação em materiais cimentícios, pois algumas, como a cinza da casca do arroz, apresentam propriedades pozolânicas, contribuindo para a redução do consumo de cimento Portland.

Resíduos do tipo cerâmico constituem-se como alternativas atrativas para serem utilizados como adições de pozolânicas em materiais cimentícios. A pozolanicidade desse tipo de material é de fundamental importância para a melhoria de propriedades mecânicas de argamassa e concretos. Vários tipos de resíduos cerâmicos foram caracterizados a fim de se verificar se estes materiais apresentavam características pozolânicas ao serem empregados na produção de compósitos cimentícios. A Tabela 4 representa alguns desses trabalhos.

Tabela 4 - Resumo de diferentes trabalhos de utilização de resíduos cerâmicos

Autores	Tipos de Resíduos
Silva (2005)	Polimento do porcelanato
Evangelista <i>et al.</i> (2006)	Lodo da estação de tratamento de efluentes
Moura e Leite (2011)	Resíduo da serragem de rochas ornamentais
Alves <i>et al.</i> (2008)	Resíduo do polimento de rochas graníticas
Menezes <i>et al.</i> (2009)	Resíduo do beneficiamento do caulim

Uma vez identificada a reatividade pozolânica de determinado material, ele passa a ser alvo de grande interesse comercial, sobretudo da indústria cimentícia. Oliveira (2007) salienta que as adições pozolânicas tiveram grande impulso ao serem usadas em concretos de cimento Portland, porque além dos aspectos técnicos, proporcionam vantagens econômicas, ao substituírem um material nobre, o clínquer. Barbosa e Renóbio (2011) afirmam que o clínquer, principal componente do cimento, consome grande quantidade de calor, pois, para sua produção, a matéria prima é elevada a temperaturas de aproximadamente 1400°C, liberando uma série de gases, estando entre eles, o dióxido de carbono.

3.5 Influência das pozolanas nas propriedades do concreto

Muitos trabalhos de pesquisa vêm sendo desenvolvidos para investigação das propriedades de concretos e argamassas, quando parte do aglomerante é substituído por pozolanas. Dentro deste contexto, Souza (2007) explicita que a introdução de pozolanas no concreto resulta em uma série de alterações em suas propriedades, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. Essas propriedades tendem a refletir a ação física, principalmente no que se refere ao tamanho das partículas, que via de regra, são mais finas que as do cimento Portland, bem como a ação química resultante da atividade pozolânica e a atuação em conjunto das duas ações.

Para Herrman et al. (2012), a ação química via reações pozolânicas reforça a ação física, segmentando poros e refinando a matriz, à medida que a idade aumenta, tornando-se uma pasta mais densa e compacta e resultando em um concreto com microestrutura mais homogênea e uniforme. A Figura 8 apresenta o esquema do efeito *filler* em concreto com adições minerais, em que as pozolanas se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos vazios da pasta.

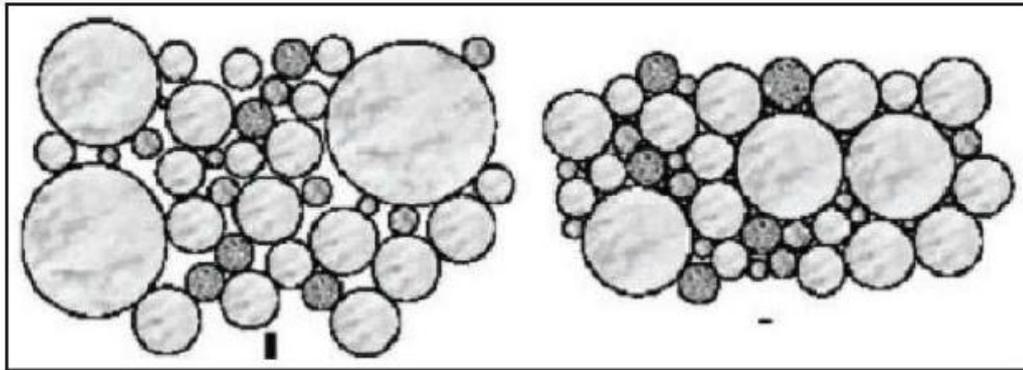


Figura 8- Esquema do Concreto com adições minerais (esquerda) e concretos com adições minerais (direita)

Fonte: Hermann (2012)

Importante ressaltar que Goldman e Bentur (1993), ao estudarem o comportamento de resistência mecânica do concreto com sílica de fumo, uma pozolana, e negro de fumo, uma adição inerte, concluíram que o efeito físico, baseado no efeito microfiller, é importante para o comportamento mecânico do concreto, assim como o efeito pozolânico.

3.5.1 Absorção de água

Segundo Metha e Monteiro (2008), a água costuma ser o fator principal para a maioria dos problemas de durabilidade no concreto. Os fenômenos físico-químicos associados ao transporte de água em sólidos porosos, como o concreto, são controlados pela permeabilidade do sólido. Na pasta de concreto endurecida, em qualquer estágio durante o processo da hidratação, o tamanho e a conectividade dos poros controlarão a permeabilidade.

No que diz respeito à absorção do concreto, Souza (2007) deixa claro que concretos com baixa porosidade são mais duráveis, porque dificultam o ingresso de substâncias que possam danificar o próprio concreto. Ele ainda acrescenta que a permeabilidade é uma propriedade que depende da porosidade, ou seja, indica a maior ou menor capacidade de penetração e absorção de líquidos ou gases pelo concreto.

Para Lopez, Cerri e Araújo (2006), a substituição de parte do cimento por materiais pozolânicos proporciona, além da diminuição de custos, a redução do calor de hidratação e da permeabilidade do concreto. Utilizando cinza-do-bagaço de cana de açúcar como substituição

parcial do cimento Portland em concretos, Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) observaram que aos 28 dias de cura houve um aumento do índice de absorção de água, conforme os dados da Tabela 5. Chegaram à conclusão que esse aumento foi atribuído à finura da pozolana, porém, após 90 dias de cura, o índice de absorção de água reduziu-se consideravelmente, devido ao refinamento dos poros do concreto, causados pela reação pozolânica. Portanto, com o prolongamento da idade de cura, haveria uma redução dos vazios permeáveis.

Tabela 5 - Permeabilidade à água do concreto com cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Designação	Teor de Cinza (%)	Absorção de Água (%)	
		28 dias	90 dias
B0	0	4,71	3,76
B1	5	4,78	3,01
B2	10	4,86	2,44
B3	15	4,90	2,21
B4	20	5,16	2,60
B5	25	5,56	2,72
B6	30	6,08	3,90

Fonte: GANESAN; RAJAGOPAL e THANGAVEL (2007)

Souza, Barbosa e Oliveira (2011), ao utilizarem resíduo composto, exclusivamente por placas cerâmicas de revestimento, em substituição parcial do cimento, notaram que houve pouca variação da capacidade de absorção dos concretos produzidos com resíduo cerâmico, em relação ao concreto de referência, conforme Tabela. 6.

Tabela 6 - Valores de absorção de água dos concretos produzidos com adições de resíduo cerâmico

Referência	Absorção de água (%)		
	10%	20%	30%
5,98	5,81	4,13	6,25

Fonte: SOUZA, BARBOSA e OLIVEIRA (2011).

A capacidade de absorção de água do concreto varia conforme o tipo de adição mineral utilizada, podendo contribuir ou não com a redução da permeabilidade do concreto.

3.5.2 Resistência à compressão

Muitos autores investigaram a evolução do comportamento mecânico de resistência à compressão de concretos, produzidos com adições minerais. Oliveira (2007), investigando o comportamento de resistência à compressão do concreto com substituição parcial do aglomerante por metacaulim (uma pozolana sílico aluminosa, derivada da calcinação de alguns tipos de argilas como o caulim), concluiu que a utilização da pozolana na proporção de 5% e 15% em massa de cimento aumentou a resistência à compressão do compósito em 5,1% e 11,6%, respectivamente, o que pode ser visualizado na Figura 9.

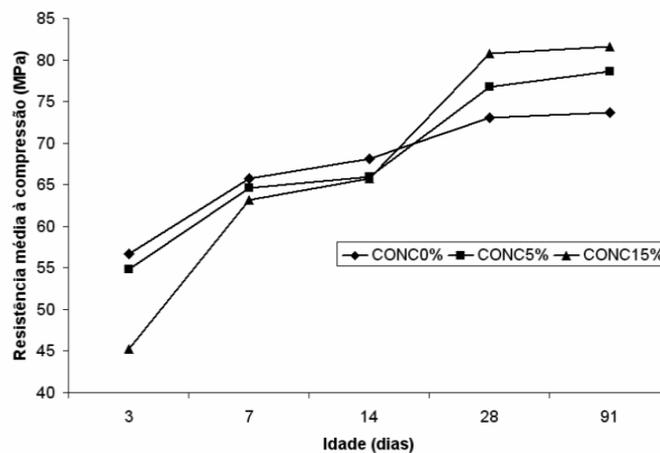


Figura 9- Resistência à compressão do concreto com metacaulim aos 28 dias
Fonte: Oliveira (2007)

Vejmelkova et al. (2012) compararam a substituição de 10% do cimento Portland em concretos por metacaulim, com a substituição de 10% em massa do cimento, por pó de resíduo cerâmico, proveniente da moagem de tijolos, e, concluíram que, apesar de uma leve redução da resistência à compressão do concreto com resíduo cerâmico, conforme apresentado na Tabela 7, os resíduos cerâmicos ainda puderam ser considerados como uma alternativa viável.

Tabela 7 - Resistência à compressão em MPa dos concretos com resíduo cerâmico

Material	7 dias	28 dias
CR	63,3	62
CB10	65,2	65,7
CB20	47,8	60,2
CB40	37,9	42,6
CB60	21,3	22,5

Fonte: VEJMEJKOVÁ et al. (2012)

No trabalho desenvolvido por Pacheco-Torgal e Jalali (2010), os resultados obtidos revelaram menores resistências dos concretos com resíduos cerâmicos, quando comparados com o concreto de referência, sendo que as resistências são elevadas em idades iniciais, mas vão se reduzindo com o tempo de cura, o que é típico do comportamento de concretos com aditivos pozolânicos, conforme Figura 10.

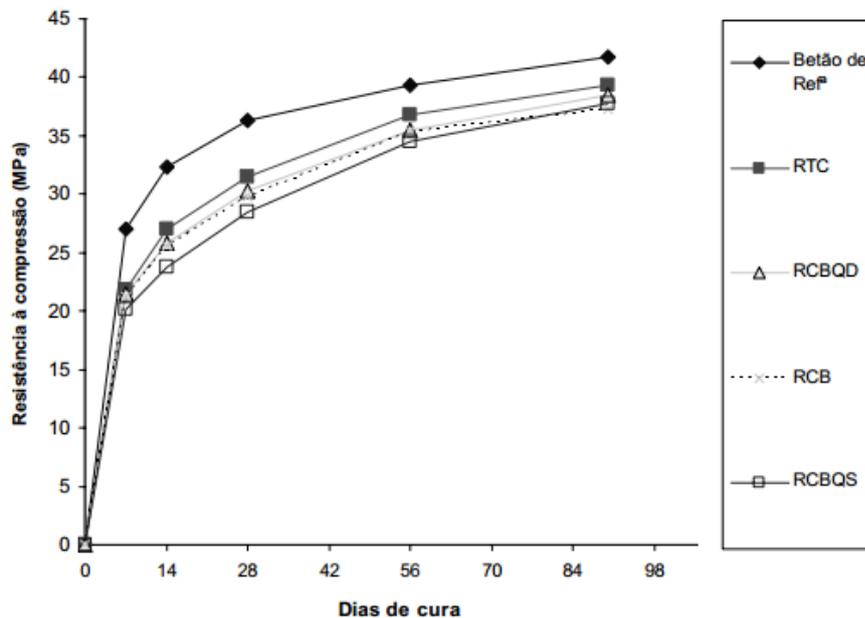


Figura 10- Resistência à compressão dos concretos de acordo com a idade de cura
Fonte: Torgal e Jalali (2010)

Segundo Hibbert e Khatib (2005), as partículas de metacaulim promovem um efeito físico (*filler effect*) atuando como material de preenchimento, com refinamento da estrutura de poros do concreto, o que contribui para o aumento da resistência à compressão com a substituição do cimento Portland por esta pozolana, conforme se vê na Figura 11.

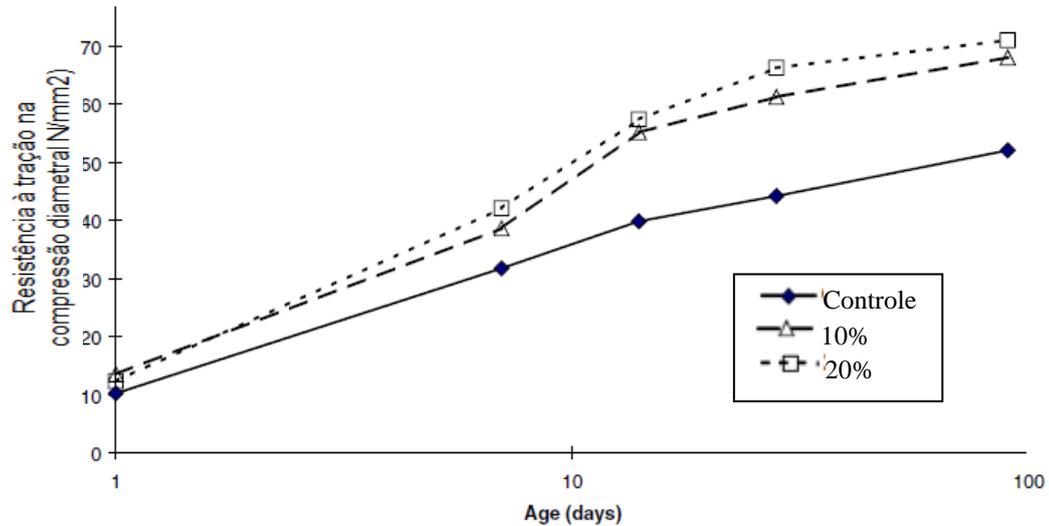


Figura 11- Efeito do Metacaulim na resistência à compressão
Fonte: Hibbert e Khatib (2005)

Cordeiro e Barroso (2011) avaliaram o comportamento de resistência mecânica do concreto produzido com a substituição de 20% da massa de cimento Portland por cinza do bagaço de cana-de-açúcar, produzida com queima controlada, uma pozolana, e constataram, a partir da análise do gráfico da Figura 12, que, aos 7 dias de cura, a resistência média do concreto com adição foi superior ao concreto de referência e, aos 28 dias de cura, a resistência do concreto com 20% de substituição foi ligeiramente superior.

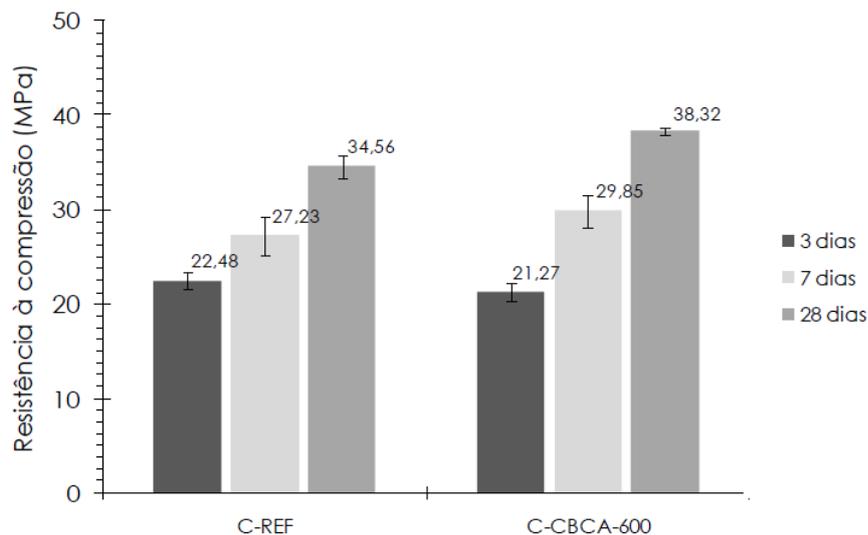


Figura 12- Resistência à compressão dos concretos após 3, 7 e 28 dias de cura
Fonte: Cordeiro e Barroso (2011)

3.5.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto pode variar conforme o tipo e o teor de adição mineral utilizada em sua composição. Gonçalves (2007), ao estudar as propriedades mecânicas de concretos com substituição de 20% do aglomerante por resíduo da indústria cerâmica, encontrou uma redução de 12% no módulo de elasticidade do concreto de referência. A justificativa para tal comportamento foi a de que, em decorrência da menor rigidez dos produtos hidratados formados na reação pozolânica do hidróxido de cálcio e o resíduo, são geradas misturas mais deformáveis sob tensão.

Cordeiro e Barroso (2011), ao avaliarem o comportamento do módulo de elasticidade do concreto contendo cinza do bagaço de cana-de-açúcar, aos 3 dias de idade, perceberam que o concreto de referência apresentou um valor significativamente superior. Os autores citados concluíram que as reações pozolânicas da cinza exerceram maior influência nas propriedades dos concretos após 7 dias de cura, conforme o gráfico apresentado na Figura 13.

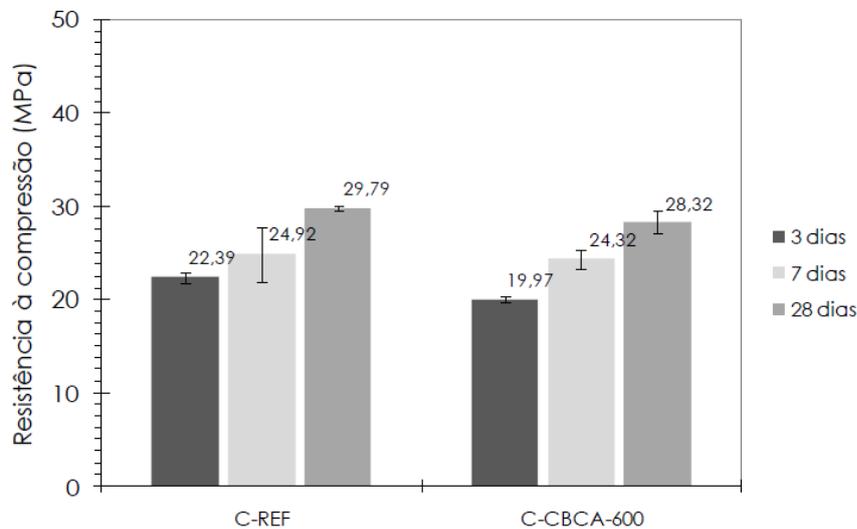


Figura 13- Módulo de elasticidade do concreto com cinza do bagaço de cana-de-açúcar.
Fonte: Cordeiro e Barroso (2011)

Oshiro et al. (2011) encontraram valores similares para o módulo de elasticidade entre o concreto de referência e os concretos produzidos com adição de cinza volante, em substituição à massa de cimento Portland, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Módulo de elasticidade do concreto com adição de cinza volante.

Concretos	Módulo de Elasticidade (MPa)
HC250	39,9
HC200	41,6
HC150	42,4
HC100	41,8
HC0	43,9

Fonte: OSHIO et al. (2011)

3.5.4 Tração na compressão diametral

De acordo com Gabrich (2008), a resistência à tração, no concreto, é de grande importância para prevenir o aparecimento de fissuras provocadas por retração por secagem, quando no estado fresco. Ele acrescenta ainda que do mesmo modo que ocorre com a resistência à compressão, a resistência à tração cresce com o passar do tempo em função da ocorrência das reações químicas de hidratação e das reações pozolânicas.

Segundo De Larrard (1999), a resistência à tração por compressão diametral atinge o seu valor máximo aos dos 14 dias, ao contrário da resistência à compressão, que pode aumentar de 10% a 20% de seu valor após os 14 dias. Deve-se levar em consideração que esses valores são estimados para concretos sem adições minerais. Com isso os percentuais podem sofrer alterações, conforme o tipo de concreto analisado.

Silva (2005), ao fazer a adição de resíduo de polimento do porcelanato ao concreto, percebeu que os concretos com 10% de adição apresentaram melhor desempenho que os concretos com adição de 20% e os de referência, um ganho de 21,39% em relação ao concreto sem adição. A justificativa apresentada pelo autor foi a de que, à medida que se aumenta o teor de adição para 10%, a densificação da pasta diminui a tendência de formação de microfissuras que levam à ruptura. Este ganho também está relacionado com o efeito *filler* e a atividade pozolânica.

Beltrão e Zenaide (2010), ao utilizarem como adição mineral Metacaulim na composição do concreto, de acordo com o gráfico da Figura 14, concluíram que o percentual de aumento da resistência à tração, apesar de parecer bastante substancial em termos percentuais, é pouco significativo. Isto se deve ao fato de o concreto ser pouco resistente à tração.

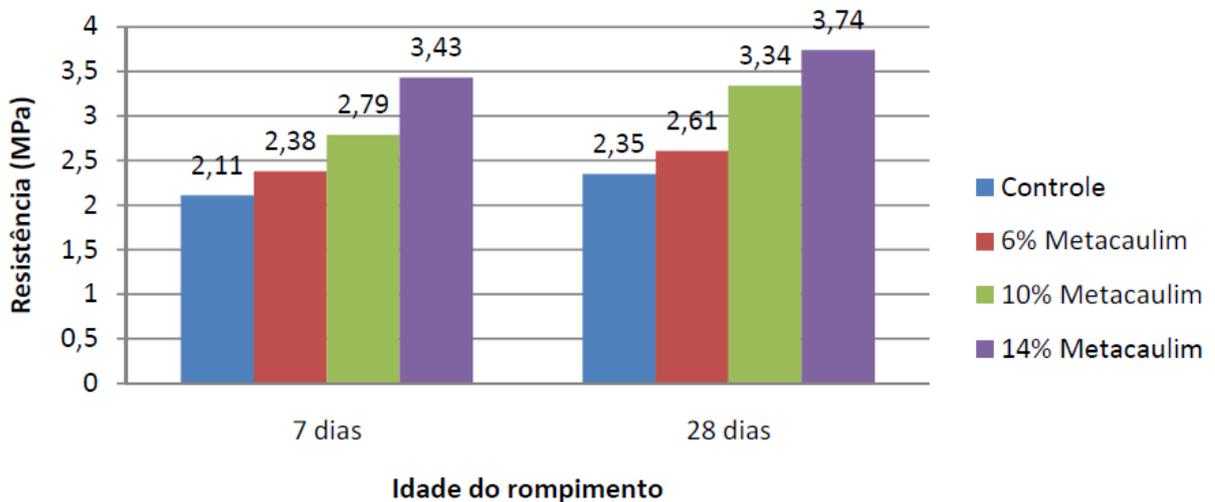


Figura 14- Resistência à tração por compressão diametral aos 7 e 28 dias de idade
Fonte: Beltrão e Zenaide (2010)

Dourado et al. (2011), ao substituírem parte do cimento pela pozolana metacaulim, observaram uma tendência à elevação dos resultados da resistência à tração por compressão diametral, de 28 para 90 dias, devido às reações pozolânicas se processarem ao longo do tempo, conforme se vê na Tabela 9.

Tabela 9 - Tração por compressão diametral

FAMÍLIAS	TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa/ SD/CV)	
	28 dias	90 dias
Família 1 (referência)	3,48/ 0,55/ 15,81	4,11/ 0,23/ 5,6
Família 2	3,67/ 0,6/ 16,35	4,13/ 0,74/ 16,67
Família 3	3,83/ 0,64/ 16, 71	4,44/ 0,74/ 17, 92
Família 4	3,64/ 0,4/ 10, 99	3,71/ 0,68/ 21,94

Fonte: DOURADO et al. (2011)

3.5.5 Influência do pH na durabilidade do concreto

Segundo Souza (2007), o pH dos concretos está diretamente associado aos álcalis (NaOH, TiOH e KOH) do cimento Portland. O Ca(OH)_2 , liberado das reações de hidratação do

cimento, também contribui para a alcalinidade dos concretos e argamassas, e a sua redução nos poros do concreto pode contribuir para o processo de corrosão de armaduras.

O cimento hidratado possui um pH de aproximadamente 12,5. Este pH protege o aço contra a corrosão. Um valor crítico para o pH do concreto seria na faixa de 11,5-11,8, abaixo do qual já não se assegura a manutenção da passivação (proteção) de suas armaduras.

Filho (2002) alega que embora a utilização de adições minerais seja quase uma unanimidade no meio científico, no que se refere aos benefícios técnicos econômicos alcançados, essa substituição causa um efeito colateral indesejável: a diminuição na reserva alcalina do concreto, devido às reações pozolânicas, que consomem hidróxido de cálcio para a formação do C-S-H. Esse consumo de reserva alcalina propicia uma maior velocidade de carbonatação da camada de cobrimento, a qual protege a armadura das estruturas de concretos, levando à despassivação do aço, devido à redução do pH, e, ao longo do tempo, dá início a um processo de corrosão do aço.

Souza (2007), substituindo parte do cimento por metacaulim, encontrou para os concretos analisados os valores de pH expressos na Tabela 10. Ele chegou à conclusão, através dos resultados obtidos, que os teores de substituições de cimento por metacaulim estudados não reduzem o pH dos concretos ao nível de ocasionar fenômenos de corrosão de armadura. E a ligeira redução do pH dos concretos pode estar relacionada com a acidez (pH=8) dessa pozolana e com o consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica.

Tabela 10 - Potencial hidrogeniônico dos concretos endurecidos

Teor de Substituição (%)	Temperatura do ensaio (°C)	pH	
		28 dias	91 dias
0	27,6	12,80	12,81
5	27,6	12,79	12,81
15	27,6	12,74	12,78

Fonte: SOUZA (2007)

3.6 Os impactos da indústria de fabricação do cimento

De acordo com Ribeiro, Pinto e Starling (2002) *apud* Moravia (2004), os aglomerantes são materiais pulverulentos que se hidratam na presença de água, formando uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados, dando origem às argamassas e aos concretos.

Ribeiro, Pinto e Starling (2002) afirmam que o aglomerante mais usado na construção civil é o cimento, conhecido mundialmente como cimento Portland. Um pó fino acinzentado, constituído principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio e que apresenta como características principais o fato de ser moldável e de desenvolver elevada resistência mecânica com o passar do tempo.

Câmara et. al. (2012) expõem que o concreto de cimento Portland é o principal material utilizado na construção civil. Misturas contendo água, agregado e aglomerantes são utilizados desde a antiguidade em estruturas que resistem até mesmo por milhares de anos. Uma das suas principais características é a resistência mecânica, que aliada ao custo relativamente baixo, versalidade de formas e rapidez de aplicação, torna viável o seu emprego em diversas obras, como edificações, pontes, túneis etc.

Cada vez mais, o homem se torna dependente de um dos materiais mais consumidos pela humanidade: o concreto à base de cimento Portland. Obras grandiosas feitas de concreto, como a ponte Newton Navarro, Figura 15, localizada na cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil, com dimensões de 1501,80m de comprimento e 53m de altura, são erguidas, desafiando o tempo e o espaço.



Figura 15- Ponte Newton Navarro, Natal-RN
Fonte: Foto do autor

A produção mundial de cimento alcançou, em 2010, a marca de 3.300 milhões de toneladas, de acordo com os dados divulgados pelo SNIC em 2010. Hargreaves (2011) *apud* Sales et al. (2011) alegam que a estimativa da produção mundial de cimento para o ano de 2012 deverá ficar em torno de 3.859 milhões de toneladas. A expectativa para 2013 é de um novo crescimento em relação ao bom ano de 2012, que registrou crescimento de 6,9% em relação a 2011. Os resultados positivos do primeiro mês do ano em relação a 2012, animam o mercado, mesmo com as incertezas do mercado internacional. Dados preliminares do SNIC e estimativas de mercado indicam que as vendas de cimento para o mercado interno brasileiro acumuladas nos últimos doze meses (fev/12 a jan/13) atingiram 68,6 milhões de toneladas, apresentando crescimento de 6,5% sobre igual período anterior (fev/11 a jan/12). O parque nacional ultrapassará a marca dos 100 milhões de toneladas de produção de cimento até 2016. A Figura 16 apresenta a evolução do consumo de cimento, no Brasil, desde a década de setenta.

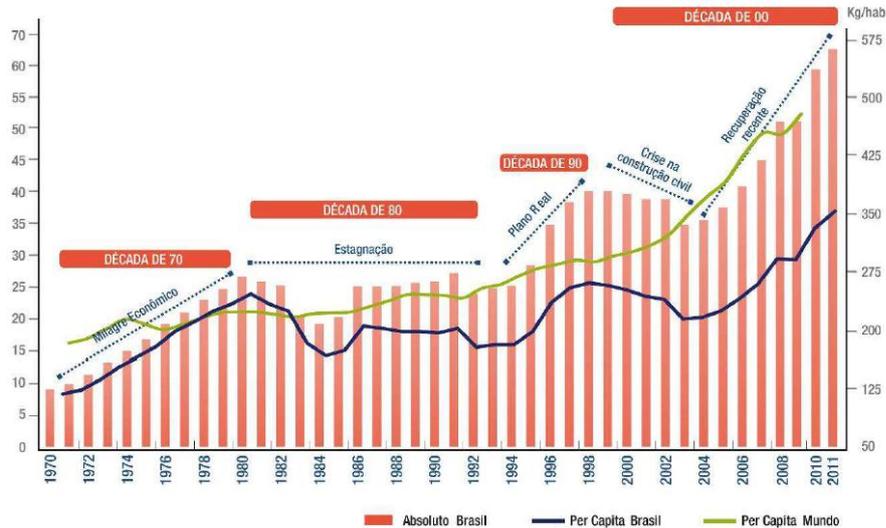


Figura 16- Consumo nacional de cimento em milhões de toneladas
Fonte: SNIC (2011)

Nesse cenário, Ghrici et al. (2006) enfatizam que o cimento é responsável por 7% da emissão mundial de CO₂, principal gás estufa, relacionado ao aquecimento global. A adição de resíduos industriais, tais como lamas, cinzas volantes e sílica de fumo ou pozolanas naturais contribuem, na manufatura do cimento, para a diminuição do consumo de energia e da quantidade de CO₂ lançados no ar.

Torgalo, Castro e Jalalis (2005) *apud* Sales et. al. (2011) alega que, para cada tonelada de cimento produzida, geram-se 0,55 toneladas de CO₂, às quais devem ser adicionadas 0,39 toneladas de CO₂, em função do uso de combustíveis fósseis para o fornecimento de energia necessária para o processo.

Torgal e Jalali (2010) acrescentam que em termos energéticos a fabricação de cimento requer 850 Kcal por Kg de clínquer produzido, e a isto se somam os custos ambientais da extração das argilas e dos calcários, com uma proporção de 1,7 toneladas de rochas por tonelada de clínquer.

Netto (2006) concluiu que a substituição parcial do cimento por algum material pozolânico gera uma economia de energia com a redução dos custos de fabricação do cimento, aumentando o tempo de exploração das jazidas de calcário e o período de produção da fábrica de cimento. A indústria do cimento tem grande papel na civilização atual, no entanto, gera diversos impactos ambientais.

O cimento utilizado no trabalho foi o cimento Portland CPV ARI, segundo Neville (1982) assim definido por apresentar um aumento mais rápido de resistência às primeiras idades, atinge uma resistência a três dias da ordem de grandeza da atingida por um cimento Portland comum, a sete dias com igual relação água/cimento.

Optou-se pela utilização do cimento CPV-ARI, porque atinge altas resistências nos primeiros dias, apresenta desforma fácil em relação aos demais tipos de cimento Portland, apresenta uma moagem mais fina, além de ser mais puro em termos de adições minerais e conter mais clínquer.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo, a que se refere nesta pesquisa, é o de origem quartzosa, disponível no comércio local, do tipo areia média lavada.

4.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo, ao qual se refere utilizado neste trabalho, é de origem basáltica, classificado como brita número 1.

4.1.3 Agregado miúdo normalizado

Na confecção das argamassas para ensaio de atividade pozolânica pelo método físico, foi utilizado areia quartzosa fornecida pelo IPT/SP, segundo a NBR 7214 (1982), as quatro frações da areia normalizada, conforme apresentado na Figura 17.



Figura 17- Quatro frações de areia normalizada-IPT
Fonte: Foto do autor

4.1.4 Água

A água utilizada no trabalho é proveniente da COPASA, empresa que cuida da distribuição e tratamento de água potável de Belo Horizonte.

4.1.5 Resíduo da Casca Cerâmica (RCC)

O resíduo da casca cerâmica, utilizado no trabalho desta pesquisa, foi coletado em uma microfusão, na cidade de Cordeirópolis, no estado de São Paulo. A empresa foi escolhida, pela facilidade de coleta do material e pela grande geração do resíduo. Foram coletados 25kg do material cerâmico. Esta empresa fabrica mais de 4000 produtos nos seguimentos automobilísticos, cirúrgico, alimentício, agropecuário, sucroalcooleiro, cervejaria etc. O material do molde cerâmico utilizado para a fabricação das peças é o mesmo para todos os produtos moldados. O resíduo cerâmico é descartado semanalmente em aterro apropriado. Até o momento do descarte, todo resíduo fica armazenado a céu aberto.

Foi coletada uma amostra da pilha de resíduo de forma a se obter uma amostra homogênea e representativa. Acredita-se que as pilhas possuam características pouco distintas, uma vez que todos os moldes são produzidos do mesmo material e com a mesma periodicidade de descarte.

4.1.6 Aglomerante

Como aglomerante, usou-se o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI FÁCIL. As características físicas e a composição química do aglomerante utilizado na fabricação dos concretos são apresentadas na Tabela 11, em seguida.

Tabela 11- Características do cimento Portland CPV

Índices físicos	
Massa Específica	3,07 g/cm ³
Área Superficial Específica-BET	1,69 m ² /g
Início de Pega	127 min
Fim de Pega	182 min
Dimensão média	10,27 µm
Perda ao fogo	3,60
Resist. Comp. 1 dia (MPa)	29 MPa
Resist. Comp. 3 dias (MPa)	40,1 MPa
Resist. Comp. 7 dias (MPa)	44,3 MPa
Resist. Comp. 28 dias (MPa)	53,2 MPa
Análise química	
Óxidos	Teores (%)
SiO ₂	19,04
Al ₂ O ₃	4,60
Fe ₂ O ₃	2,96
CaO	64,0
MgO	0,78
SO ₃	2,76
K ₂ O	0,80

Fonte: Dados do fabricante.

A Figura 18 apresenta um fluxograma do planejamento experimental realizado para este trabalho.

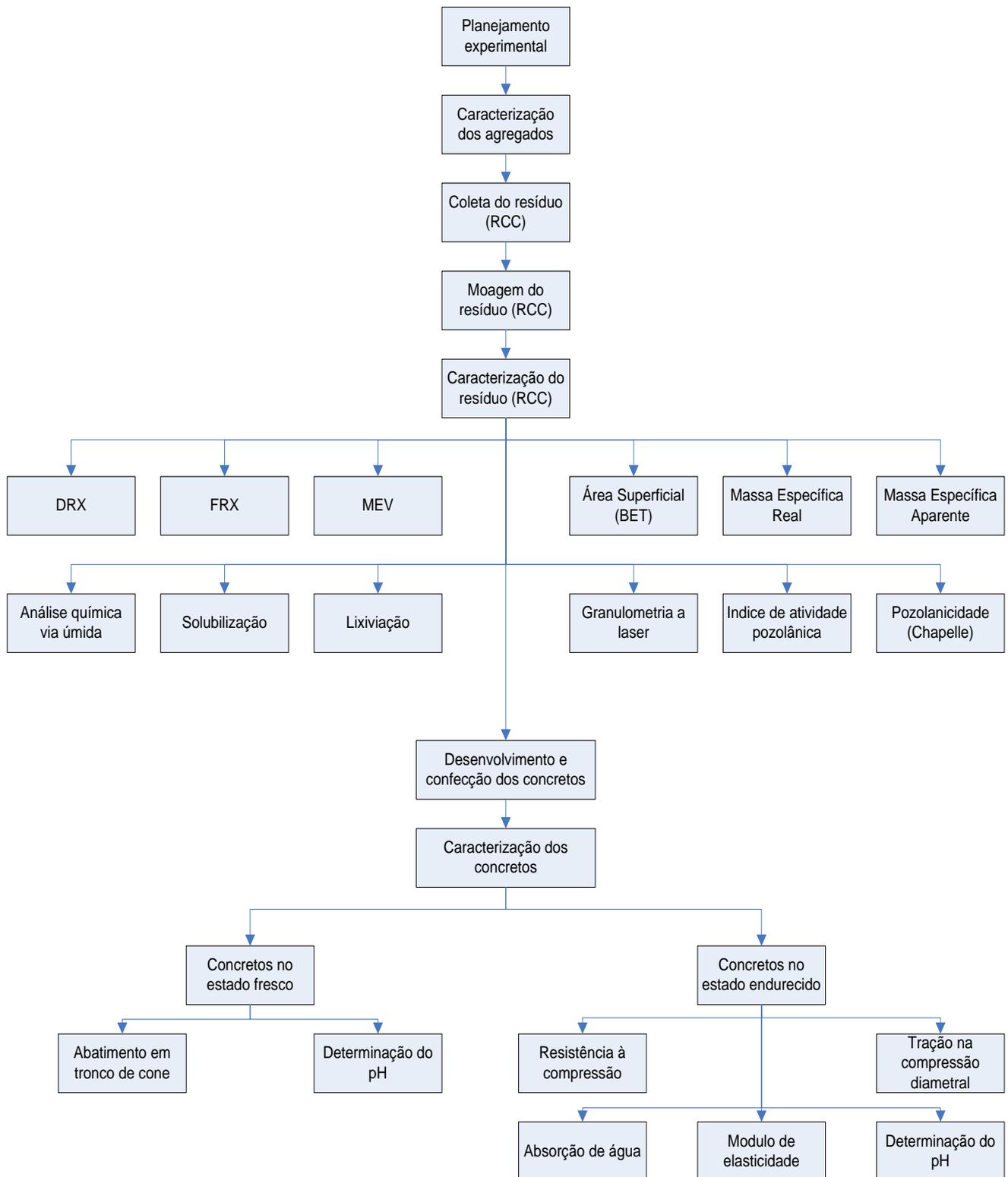


Figura 18- Fluxograma do planejamento experimental

4.2 Caracterização do agregado miúdo

4.2.1 Granulometria

Para a determinação das faixas granulométricas do agregado miúdo, foram seguidas as recomendações da norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram colocados 500 g (m_1) de agregado miúdo, areia média lavada, previamente seca em estufa por 24 h, em um conjunto de peneiras, de acordo com a norma, durante 10 min. Em seguida, o material retido em cada peneira foi conduzido para bandejas identificadas. Foi determinada a massa total retida em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. O ensaio foi repetido para uma amostra de 500g (m_2).

4.2.2 Materiais pulverulentos

Seguindo os parâmetros da norma NBR 7219 (ABNT, 1987), foi determinado o teor de materiais pulverulentos presentes no agregado miúdo, destinado ao preparo do concreto. Uma amostra de 500 g do RCC foi lavada em uma peneira de 200 mesh, até que a água da lavagem saísse com uma coloração mais clara. Em seguida, toda massa lavada foi transferida para um tabuleiro metálico e levada para estufa, a 105 °C, durante 24 h. Após este período, o teor de materiais pulverulentos (MP) de cada amostra foi obtido pela diferença entre as massas da amostra antes e depois da lavagem e expresso em porcentagem da amostra ensaiada, segundo a Equação 1:

$$MP(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que,

M_i = massa inicial da amostra de agregado miúdo

M_f = massa final da amostra de agregado miúdo, após a lavagem

4.2.3 Teor de matéria orgânica

Foram adotados os procedimentos adequados de acordo com a norma NBR NM 49 (ABNT, 2001), ou seja, em um erlenmeyer adicionou-se 100 g de agregado miúdo a uma solução de hidróxido de sódio (3%). Agitou-se e deixou-se a mistura em repouso por 24 h. Em seguida, filtrou-se a solução para se retirar o agregado miúdo. Preparou-se uma solução padrão com 97 ml de hidróxido de sódio (3%) e 3 ml de solução de ácido tânico (2%) e deixou-se em repouso por 24 h. Por meio da Figura 19, é possível visualizar os dois tipos de soluções preparadas para o ensaio. Esta norma estabelece o método de determinação colorimétrica de impurezas orgânicas por meio da comparação visual da solução preparada com a solução padrão, em agregado miúdo destinado ao preparo do concreto.

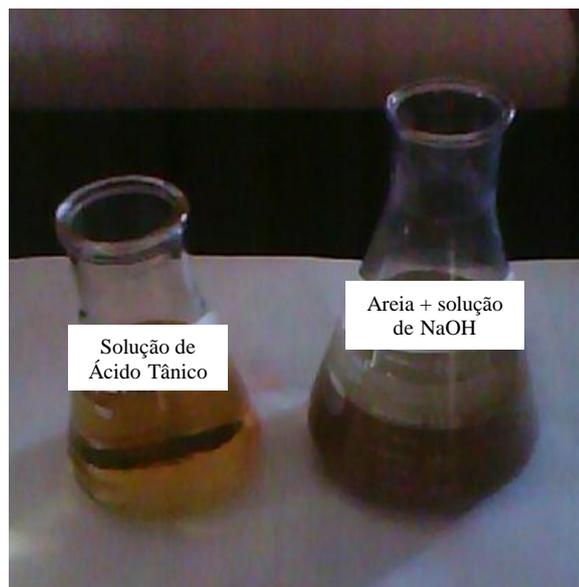


Figura 19- Determinação do teor de matéria orgânica
Fonte: Foto do autor

4.2.4 Massa específica aparente

Para avaliação da massa específica aparente do agregado miúdo adotou-se metodologia proposta pela NBR 9776 (ABNT, 1987). Foram pesados, com o auxílio de uma balança, 500 g de agregado miúdo. Em seguida, encheu-se um frasco *Chapman* com 200 ml de água, utilizando-se um funil metálico. Foram acrescentados os 500 g de areia previamente determinados registrando-se o volume final alcançado. Por meio da Equação 2, foi possível determinar o valor da massa específica aparente do agregado

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (\text{Equação 2})$$

No qual,

γ = massa específica do agregado miúdo em g/cm³

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

4.3 Caracterização do agregado graúdo

4.3.1 Granulometria

Para determinação das faixas granulométricas do agregado graúdo, foram seguidas as recomendações da norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram colocados 5 kg (m_1) de agregado graúdo, brita de número 1, previamente seca em estufa por 24 h, em um conjunto de peneiras, de acordo com a norma, durante 10 min. Em seguida o material retido em cada peneira foi conduzido para bandejas identificadas. Foi determinada a massa total retida em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. O ensaio foi repetido para uma amostra de massa m_2 .

4.3.2 Massa unitária no estado solto

A massa unitária dos agregados graúdos foi obtida seguindo-se as recomendações da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para isso, encheu-se um recipiente metálico de 20 dm³ com brita número 1. A superfície do recipiente foi rasada utilizando-se uma régua. Em seguida, pesou-se o recipiente com a brita. Para a determinação da massa unitária do agregado graúdo, utilizou-se a Equação 3:

$$d = \frac{M}{V} \quad (\text{Equação 3})$$

No qual,

d = massa unitária em kg/dm³

M = massa do agregado graúdo em kg

V = volume do recipiente

O resultado encontrado foi a média dos resultados individuais obtidos de três determinações.

4.3.3 Absorção de água

O índice de absorção de água da brita foi determinado seguindo-se os procedimentos prescritos pela norma NM 53 (2003). Pesou-se 3 kg de agregado graúdo e colocou-se essa amostra em uma aparelhagem, submersa em água durante 24 h. Após este período, a amostra foi secada com uma flanela, para tirar o excesso de água capilar. Em seguida, submergiu-se a amostra em água, conforme Figura 20, registrou-se a massa com o auxílio de uma balança hidrostática. A amostra foi secada à temperatura de 105±5°C, foi resfriada e pesada novamente.



Figura 20- Determinação da massa submersa
Fonte: Foto do autor

A Equação 4 foi utilizada para a determinação do índice de absorção de água do agregado graúdo:

$$A_{bs} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que,

A_{bs} = absorção de água em porcentagem

M_{sat} = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas

M_s = massa ao ar da amostra seca, em gramas

4.4 Britagem do resíduo da casca cerâmica

Após a coleta, o resíduo, na forma de cacos cerâmicos, conforme a Figura 21, passou por um britador de mandíbulas, da marca Renard, modelo Mass-200, para redução desses fragmentos em tamanhos menores, o que pode ser visto na Figura 22, com o objetivo de facilitar a moagem.



Figura 21-Fragmentos do resíduo da casca cerâmica antes do processo de britagem
Fonte: Foto do autor



Figura 22- Fragmentos do resíduo da casca cerâmica após do processo de britagem
Fonte: Foto do autor

4.5 Moagem do resíduo da casca cerâmica

Após a fragmentação, procedeu-se à moagem das partículas do RCC em um pulverizador de panelas, marca AMEF, modelo AMP1-M, com a finalidade de se alcançar uma finura adequada. A cada 10 min. de funcionamento do moinho eram pulverizados 100 g do material, resultando em um pó acinzentado, cuja análise tátil-visual concluiu que o resíduo apresentou-se semelhante ao cimento o que pode ser visualizado na Figura 23.



Figura 23- Resíduo da casca cerâmica pulverizado
Fonte: Foto do autor

Após a moagem, o resíduo cerâmico resultante do processo foi submetido a ensaios de caracterização.

4.6 Caracterização do resíduo da casca cerâmica

4.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura-(MEV)

Para a análise de microestrutura do RCC, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo SSX-550, acoplado a um espectrômetro por dispersão de energia (EDS-*Energy Dispersive Spectrometry*).

Previamente, o material pulverulento, isento de umidade, foi recoberto com uma fina camada de ouro, com um equipamento da marca Sanyu Electron, para se evitar a geração de cargas eletrostáticas danosas à imagem. A análise foi feita no laboratório de Caracterização e Microscopia de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais, DEMAT, do CEFET-MG.

4.6.2 Difração de Raios X -(DRX)

Para a determinação das fases cristalinas e do grau de cristalinidade da amostra do RCC, foi utilizado um difratômetro de fabricação Rigadzu, modelo D/MAX ÚLTIMA, automático, com goniômetro 2θ e tubo de raios X de cobre. As condições de operação adotadas foram: velocidade do goniômetro de $4^\circ 2\theta/\text{min}$, faixa de 2θ (4 a 80°), corrente de 30 mA e tensão de 40 kV. O ensaio foi realizado em um laboratório do CDTN.

A identificação das fases (estruturas cristalinas) presentes foi feita através de uma comparação do perfil analisado, desconhecido, com o conjunto de difração padrão mantido pelo banco de dados da *ICDD-International Center for Diffraction Data/ Joint Committeon Power Diffraction Standards-JCPDS* (Sets 01-58; MDI; Jade 9, 2008).

4.6.3 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A composição química global das amostras do RCC foi determinada por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Shimadzu, modelo EDX-720. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Microscopia de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais, DEMAT, do CEFET-MG. O resultado foi expresso em porcentagem dos óxidos da amostra.

4.6.4 Análise química por via úmida

Por se tratar de uma técnica mais precisa na determinação dos óxidos, uma amostra de 100 g do RCC foi encaminhada ao Laboratório de Traços Metálicos e Via Úmida Inorgânica, localizado na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), para realização do ensaio de análise química, por via úmida do resíduo da casca cerâmica. Foi utilizado para o ensaio um espectrômetro de emissão por plasma, um espectrômetro de absorção atômica com chama e uma balança analítica.

4.6.5 Granulometria a laser

Para a análise granulométrica adotou-se o método de espalhamento de luz *laser*, também conhecido por Difração de *Fraunhofer*. Este método baseia-se na interação entre um feixe de luz com partículas em um meio dispersante. A intensidade da energia espalhada, após interação de um feixe de luz monocromática e uma quantidade de partículas, é captada por lentes, detectores fotoelétricos e macro-processador e é transformada em distribuição volumétrica das partículas, tidas como esféricas.

A medida do tamanho das partículas das amostras do RCC foi feita por meio de um granulômetro a *laser*, Cilas 1064. As partículas da amostra foram dispersas em hexametáfosfato de sódio.

4.6.6 Massa específica real

Foi adotado o método de ensaio por picnometria a hélio, utilizando a amostra na forma de pó. Justifica-se a utilização do gás hélio para o ensaio devido à pequena dimensão atômica desse elemento, o que facilita a sua penetração entre as cavidades e poros do material de ensaio.

Foi utilizado na análise um picnômetro da marca Multipycnometer, modelo MVP-4DC Quantachrome Corporation, pertencente ao laboratório de Materiais Nanoestruturados do Departamento de Química da UFMG. As amostras foram previamente tratadas em estufa a 150°C e, posteriormente, resfriadas.

4.6.7 Massa específica aparente

A massa específica do resíduo foi determinada de acordo com a norma Mercosul NM 23. Com o auxílio de um funil de haste longa, introduziu-se querosene no frasco de Le Chatelier, capacidade de 250 cm³, até a marca de 1 cm³. O frasco foi colocado em um banho termorregulador por 30 min. Uma massa conhecida do resíduo foi colocada, até que o volume final atingisse a marca de 24 cm³ da escala graduada do frasco, conforme Figura 24.



Figura 24- Determinação da massa específica do RCC
Fonte: Foto do autor

Após a estabilização, a massa específica do material foi calculada por meio da Equação 5:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{(Equação 5)}$$

Em que:

ρ = massa específica do material ensaiado em gramas por centímetros cúbicos

m = massa do material ensaiado em gramas

v = volume deslocado pela massa do material ensaiado

O resultado final foi a média de duas determinações, que não diferiram entre si em mais do que 0,01 g/cm³.

4.6.8 Área superficial específica - BET

Adotou-se para determinação da medida da área superficial específica do RCC, o método BET. Este ensaio também fornece informações do volume total de poros e do tamanho médio deles. Para o teste laboratorial, foi utilizado um equipamento *Quantachrome Novawin Data Acquisition And Reduction for Nova Instruments, version 11.0*, do Departamento de Tecnologia Mineral do CETEC. O aparelho é composto por um sistema de adsorção automatizado, que fornece dados de equilíbrio de adsorção e dissorção.

As amostras do material pulverulento foram previamente desgaseificadas em temperaturas menores do que as de tratamento térmico correspondente, e, em uma segunda etapa, foram resfriadas em nitrogênio líquido. Terminado o pré- tratamento, a análise foi iniciada.

4.6.9 Índice de atividade pozolânica

Para avaliar a atividade pozolânica pelo método físico, foi determinado o índice de atividade pozolânica com cimento Portland, segundo as recomendações da NBR 5752 (ABNT 1992). O IAP foi calculado pela Equação 6.

$$IAP(\%) = \frac{f_{cp}}{f_{cc}} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Na qual,

IAP = índice de atividade pozolânica

f_{cp} = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova com resíduo cerâmico;

f_{cc} = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova de referência apenas com o cimento.

Nesse ensaio, as misturas foram feitas com o auxílio de um misturador planetário de eixo vertical para a moldagem de corpos de prova e posterior avaliação da resistência à compressão. Foram moldados seis corpos de prova de 5 cm de diâmetro, por 10 cm de altura,. Três corpos de prova de referência (sem a adição do RCC) e três corpos de prova com a adição do RCC (35% de substituição do volume de cimento), conforme apresentado na Figura 25. Após a cura, durante 28 dias, em água saturada com cal, os corpos de prova foram rompidos, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) utilizando-se de uma prensa da marca EMIC DL 3000N.



Figura 25- Corpos de prova cilíndricos 5 cm X 10 cm
 Fonte: Foto do autor

As quantidades de materiais utilizadas no preparo dos dois tipos de argamassas estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12- Quantidades em massa para a moldagem de três corpos de prova cilíndricos

Materiais	Quantidade em gramas	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CPV-ARI	312,0	202,8
RCC	-	91,32
Areia Normal-IPT	936	936
Água	180	200

A quantidade de água utilizada no preparo das argamassas foi definida com base na norma NBR 7215 (ABNT/1996), sendo que a argamassa com resíduo exigiu maior quantidade de água de amassamento. Determinação da resistência à compressão, para um índice de consistência de 225 ± 5 mm.

Para que o RCC seja considerado material pozolânico, é necessário que a resistência à compressão média dos corpos de prova de argamassa B seja maior ou igual a 75% da resistência média dos corpos de prova de argamassa A, segundo as recomendações da NBR 5752 (ABNT 1992).

4.6.10 Pozolanidade (Chapelle)

Para determinação do índice de atividade pozolânica do resíduo cerâmico, adotou-se o método Chapelle Modificado, segundo a norma NBR 15895 (ABNT, 2010). O método consiste em manter sob agitação, na temperatura de 90 ± 5 °C, durante 16 h, uma mistura de 1 g de material pozolânico, com 2 g de óxido de cálcio, em 250 ml de água. O resultado é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material “pozolânico”. A literatura menciona que quanto maior o consumo de óxido maior a pozolanidade do material.

4.6.11 Solubilização e Lixiviação

Para a caracterização do RCC, no que diz respeito ao risco ambiental, com o objetivo de conhecer sua periculosidade, foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização, seguindo padronização brasileira, de acordo com a NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004), respectivamente.

4.7 Desenvolvimento e confecção dos compósitos

Após a caracterização do RCC, foram definidos os traços a serem utilizados no preparo dos compósitos cimentícios. Adotou-se a metodologia de dosagem recomendada pelo IPT/EPUSP, descrito por Helene e Terzian (1992), pois essa metodologia apresentou-se eficiente na produção de compósitos cimentícios com adições minerais. Os concretos foram dosados para uma consistência requerida e uma resistência à compressão média (f_{cj}) de 40 MPa aos 7 dias de idade (utilizando-se o cimento CP V ARI).

Para a moldagem, foram produzidas misturas de concretos com três traços diferentes, mantendo-se a relação água/aglomerante em 0,42: concretos de referência com 0% de adição e concretos com substituição de 10% e 15% (em massa) do cimento Portland, pelo resíduo da casca cerâmica. Estas proporções foram escolhidas com base nos resultados obtidos por outros trabalhos de pesquisa, conforme citado na tabela 4, em que os autores utilizaram adições minerais ao concreto. A quantidade de materiais utilizada na moldagem está expressa na Tabela 13:

Tabela 13- Proporção e consumo de materiais por metro cúbico de concreto

Teor de Substituição	Cimento (Kg/m³)	RCC (Kg/m³)	Agregado Miúdo (Kg/m³)	Agregado Graúdo (Kg/m³)	Fator A/C
0%	891,72	-	708,60	729,30	0,42
10%	802,54	89,18	708,60	729,30	0,42
15%	757,96	133,76	708,60	729,30	0,42

Optou-se por variar apenas a quantidade do aglomerante e manter constantes as proporções dos outros constituintes, para que a única variável fosse a percentagem de resíduo utilizada nas misturas. Segundo Luiz et. al.(2012), quanto maior o consumo de cimento no traço, menor a emissão de CO₂, podendo ser considerado, neste parâmetro, um concreto sustentável, em termos de redução na emissão de gases de efeito estufa. O que pode ser uma justificativa para o alto consumo de cimento utilizado no trabalho.

4.8 Avaliação do comportamento do concreto no estado fresco

4.8.1 Abatimento em tronco de cone

Esse ensaio teve por finalidade medir a consistência e a fluidez da pasta, permitindo que se controle a uniformidade do concreto, sendo que a consistência do abatimento indicaria a uniformidade da trabalhabilidade. O ensaio para a determinação do abatimento do tronco de cone foi realizado para todas as misturas de concreto confeccionadas para moldagem dos corpos de prova. O ensaio foi realizado imediatamente após a mistura. Foram adotados os parâmetros de ensaios prescritos pela norma Mercosul NM 67(ABNT/1998). A Figura 26 apresenta os procedimentos adotados para a realização do *slump test*.

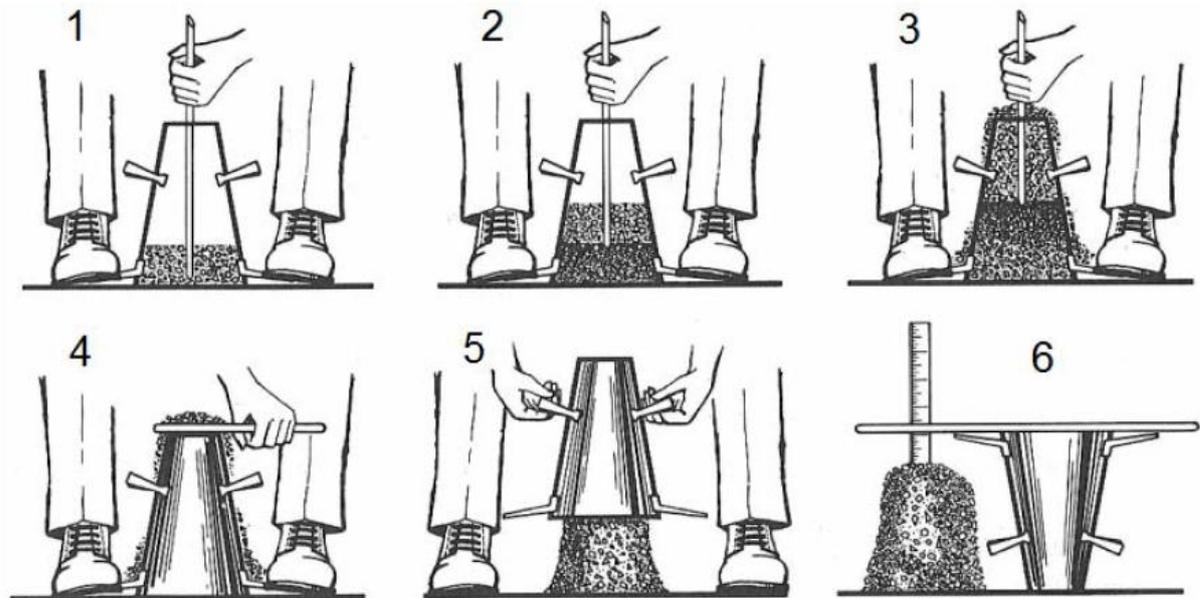


Figura 26- Procedimentos de ensaio do abatimento do tronco de cone
Fonte: Metha e Monteiro (1994)

De acordo com a Figura 26, os procedimentos adotados podem ser descritos pelas etapas:

1- Umedecer o molde e a placa de base (deve ser colocada sobre uma superfície rígida, plana, horizontal e livre de vibrações) e colocar o molde sobre a placa de base. Durante o preenchimento do molde com o concreto de ensaio, o operador deve se posicionar com os pés sobre suas aletas, de forma a mantê-lo estável. Encher rapidamente o molde com o concreto coletado, em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado;

2- Compactar cada camada com 25 golpes da haste de socamento;

3-Distribuir uniformemente os golpes sobre a seção de cada camada. Compactar a camada inferior em toda a sua espessura. Compactar a segunda camada e a camada superior, cada uma através de toda sua espessura e de forma que os golpes apenas penetrem na camada anterior;

4- Limpar a placa de base;

5- retirar o molde do concreto, levantando-o cuidadosamente na direção vertical. A operação de retirar o molde deve ser realizada em 5 s a 10 s, com um movimento constante para cima, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral;

6- Imediatamente após a retirada do molde, medir o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova desmoldado.

4.8.2 Determinação do potencial hidrogeniônico dos concretos frescos

A avaliação do pH dos concretos no estado fresco foi realizada pela colocação, junto à mistura fresca dos concretos, de uma fita de papel indicador universal de pH, que ao entrar em contato com o mistura sofre alteração de coloração. A cor obtida é comparada com a tabela padrão do fabricante , Figura 27, para obtenção o valor do pH do concreto no estado fresco.



Figura 27- Fita de papel indicador universal de pH
Fonte: Foto do autor

4.9 Avaliação do comportamento do concreto no estado endurecido

4.9.1 Ensaio de resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura) para cada traço de concreto, 12 CPs por idade, com o

auxílio de uma betoneira planetária de eixo vertical, tendo sido moldados um total de 36 corpos de prova de concreto. Para a moldagem, foram seguidas as recomendações da norma NBR 5738 (ABNT, 2003). O adensamento foi realizado em mesa vibratória e depois rasado. A cura foi feita em água saturada de cal.

Após o período de cura, nas idades de 3, 7 e 40 dias, os corpos de prova foram retificados no topo e conduzidos aos ensaios de resistência à compressão axial, de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2003), utilizando-se uma prensa hidráulica da marca EMIC DL 3000 N, conforme Figura 28. O ensaio foi realizado no Laboratório de Comportamento Mecânico dos Materiais do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG.



Figura 28- Prensa Hidráulica para ensaio de resistência à compressão
Fonte: Foto do autor

4.9.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008), em corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento, na idade de 7 dias, O ensaio foi feito com o auxílio de uma prensa da marca EMIC DL 3000 N, no Laboratório de Comportamento Mecânico dos Materiais do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG.

4.9.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com as prescrições da norma NBR 7222/1994, com corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, avaliados nas idades de 28 e 91 dias. Para o rompimento dos corpos de prova, após a cura, foi utilizada uma prensa hidráulica, da marca EMIC DL 3000N, como demonstra a Figura 29. O ensaio foi realizado no Laboratório de Comportamento Mecânico dos Materiais do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. O ensaio foi realizado com o intuito de tentar verificar a maior ou menor influência do efeito *filler* na matriz cimentícia.



Figura 29- Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral
Fonte: Foto do autor

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação 7.

$$f_{td} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que,

f_{td} = resistência à tração por compressão diametral em MPa

L = altura do corpo de prova em mm

d = diâmetro do corpo de prova em mm

F = carga máxima obtida no ensaio

4.9.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção capilar dos corpos de prova de concreto foi determinada através de uma adaptação às recomendações dadas pela norma NBR 9779 (ABNT, 1995).

Para cada traço de concreto, foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Após a cura, na idade de 28 dias, os corpos de prova foram colocados em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até a constância de massa, 72 h. Em seguida, foram resfriados à temperatura ambiente. Após o resfriamento, os corpos de prova foram pesados e suas massas registradas. Em seguida, foram colocados em um recipiente com água, apoiados em uma tela metálica, para evitar o contato com o fundo do recipiente, de modo que o nível da água permanecesse constante em 10 mm de altura. A realização dessa etapa pode ser visualizada na Figura 30.



Figura 30- Ensaio de absorção de água por capilaridade
Fonte: Foto do autor

Durante o ensaio, a massa dos corpos de prova foi determinada no período de 3 h, 24 h, 48 h e 7 dias, previamente enxutos com um pano seco. A absorção de água por capilaridade é calculada dividindo o aumento da massa em cada tempo especificado pela área da seção

transversal da superfície do corpo de prova em contato com a água, através da média dos resultados observados em três corpos de prova, para cada período de cura, de acordo com a Equação 8.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (\text{Equação 8})$$

Na qual,

C = coeficiente de capilaridade em g.cm^{-2}

A = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água em gramas

B = massa do corpo de prova seco em gramas

S = área da base do corpo de prova em cm^2

4.9.5 Absorção de água por imersão total

Na realização do ensaio para determinação da absorção de água por imersão total, foram seguidos os parâmetros recomendados pela NBR 9778 (ABNT/1987). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento para cada traço de concreto totalizando nove corpos-de-prova. Após a cura, na idade de 28 dias, os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 h. Em seguida, tiveram suas massas determinadas na condição seca. Após secagem em estufa, os corpos de prova foram colocados em um recipiente onde foi adicionada água à altura de 1/3, por um período de 4 horas; 2/3 de altura nas 4 horas subsequentes, sendo completamente imersos, 3/3 da altura nas 64 horas restantes, conforme prescrito em norma. A Figura 31 ilustra o procedimento de imersão total dos corpos de prova.



Figura 31- Imersão total dos corpos-de-prova
Fonte: Foto do autor

As massas dos corpos de prova, na condição saturada com superfície seca, foram determinadas após 24, 48 e 72 h de imersão. Previamente, os corpos de prova foram enxutos com um pano seco, para a remoção do excesso de água. Após 72 h de saturação, os corpos de prova foram colocados em uma balança hidrostática, sendo determinada a massa da amostra na condição imersa. O índice de absorção de água das amostras de concreto foi determinado pela Equação 9.

$$Abs = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Em que,

Abs = absorção de água

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado

4.9.6 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH) dos concretos endurecido

O pH dos concretos endurecidos foram determinados nas idades de 28 e 91 dias. Para cada traço de concreto, após ensaio de tração por compressão diametral, foi retirada uma amostra de concreto da região central do corpo de prova rompido. Essas amostras passaram por um britador de mandíbulas para a redução do tamanho dos fragmentos. Em seguida, os

fragmentos resultantes da britagem passaram por um moinho de discos, para que os fragmentos atingissem um tamanho ideal para moagem. Feito o quarteamento das amostras, estas foram colocadas em um moinho de panelas, tempo de 5 min de moagem para cada 100 g de amostra.

A Figura 32 apresenta as etapas de preparação das amostras de concreto endurecido para medição do pH.

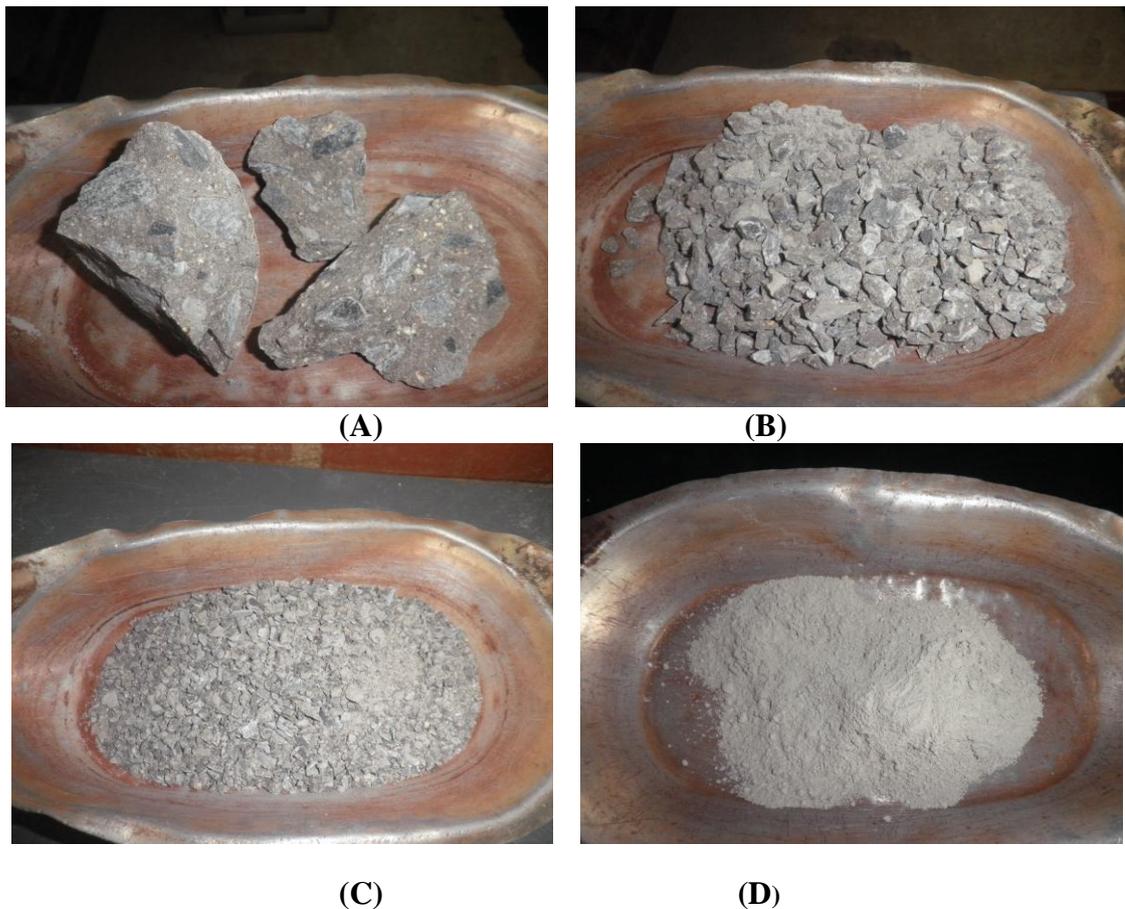


Figura 32- (A) amostra de concreto após ensaio de compressão diametral; (B) fragmentos de concreto após britador de mandíbulas; (C) fragmentos de concreto após moinho de discos; (D) pó de concreto após moinho de panelas

Fonte: Foto do autor

Após moagem, seis amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Análises Químicas-CDTN, para medição dos seus pHs. Primeiramente, preparou-se uma solução com 25 g do pó de concreto e 25 g de água deionizada. Estas soluções foram colocadas em agitadores mecânicos. Após o desligamento do agitador, as soluções foram deixadas em repouso, para que houvesse uma decantação, durante um tempo de 30 min; Encerrado o tempo de decantação, procedeu-se à medição do pH das amostras, utilizando-se um pHmetro digital, de

eletrodo blindado, preenchido com gel, conforme a Figura 33. Foram feitas medições de duas amostras para cada traço de concreto utilizado.



Figura 33- Medição do pH
Fonte: Foto do autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do agregado miúdo

As características físicas e a distribuição granulométrica do agregado miúdo estão apresentadas na Tabela 14 abaixo:

Tabela 14- Características físicas do agregado miúdo

Peneira (mm)	Massa Retida (%)*	Massa Acumulada (%)**
4,8	0	0
2,4	0,13	0,13
1,2	1,96	2,09
0,6	24,72	26,82
0,3	39,60	66,42
0,15	26,26	92,69
Fundo	7,30	100,00
Total	100,00	188,17
Módulo de Finura: 1,883		
Massa unitária: 1,47 Kg/dm³		
Massa específica: 2,59 g/dm³		
Material pulverulento: 4,32%		
Norma adotada		
*NBR 7211 (ABNT/2009)-Agregado para concreto-Especificação		
**NBR NM 248 (ABNT/2003)- Agregados-determinação da composição granulométrica		

Segundo a NBR 7211 (ABNT/2009), não foram constatadas as presenças de impurezas orgânicas e o módulo de finura encontra-se dentro da zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20.

5.2 Caracterização do agregado graúdo

As características físicas e a distribuição granulométrica do agregado graúdo estão relacionadas na Tabela 15:

Tabela 15- Características físicas do agregado graúdo

Peneira (mm)	Massa Retida (%)*	Massa Acumulada (%)**
25	0	4,52
19	4,52	47,12
12,5	42,6	75,48
9,5	28,36	93,04
6,3	17,56	96,18
4,75	3,14	96,18
2,4	0	96,18
1,2	0	96,18
0,6	0	96,18
0,3	0	96,18
0,15	0	96,18
Fundo	3,82	
Total	96,18	893,42
Módulo de Finura: 3,16		
DMC-Dimensão Máxima: 19 mm		
Massa unitária: 1,45 Kg/dm³		
Absorção de água: 0,56%		
Norma adotada		
*NBR 7211 (ABNT/2009)-Agregado para concreto-Especificação		
**NBR NM 248 (ABNT/2003)-Agregados-determinação da composição granulométrica		

Os agregados miúdo e graúdo, utilizados no trabalho, atenderam aos requisitos propostos em norma.

5.3 Caracterização do resíduo da casca cerâmica

5.3.1 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 34 apresenta as imagens dos grãos de resíduo da casca cerâmica, obtidas por microscopia de varredura eletrônica - MEV.

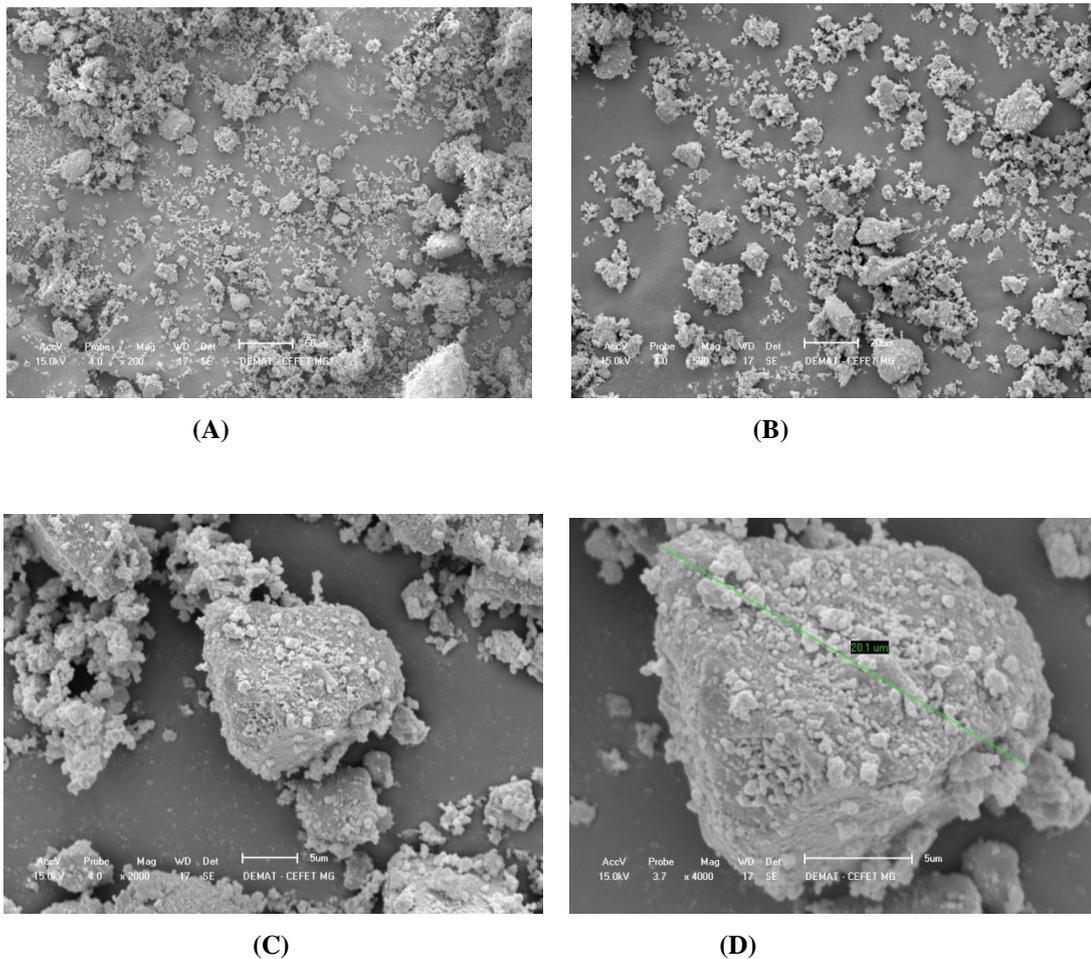


Figura 34- Fotomicrografias do RCC com ampliações de 200X (A); 500X (B); 2000X (C); 4000X (D)
Fonte: Foto do autor

A partir das imagens, verificou-se que o RCC apresenta partículas com tamanhos variados e formatos arredondados, característicos de materiais pozolânicos inorgânicos, o que também foi verificado por Ghrici (2006), em seu trabalho de pesquisa, ao estudar uma pozolana natural.

5.3.2 Difração de raios X

A Figura 35 corresponde ao difratograma da amostra de resíduo de casca cerâmica, obtido pelo método de Difração de Raios X.

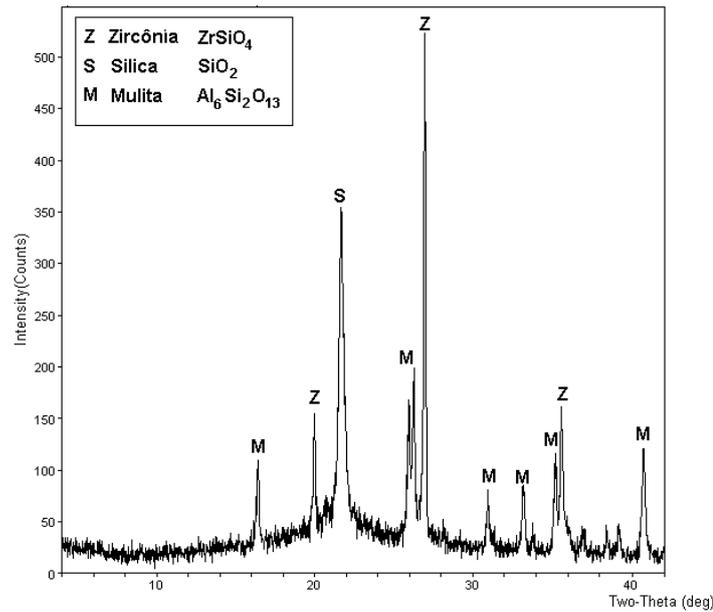


Figura 35- Difratoograma de raios X do resíduo da casca cerâmica
Fonte: Foto do autor

O espectro apresentou picos bem definidos no difratograma, que correspondem às fases cristalinas da sílica (SiO_2), mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e zirconita (ZrSiO_4), com predominância do óxido de silício, resultado compatível com a composição química do resíduo, analisada posteriormente.

A mulita é uma fase cristalina estável no sistema aluminossilicato, corresponde a 71,8% de Al_2O_3 e 28,3% de SiO_2 e pôde ter sido obtida pela sinterização em altas temperaturas de misturas deste dois óxidos. O mineral zirconita é um ortossilicato tetragonal de zircônio (ZrSiO_4), com composição aproximada de 67,2% de ZrO_2 32,8% de SiO_2 .

Além das fases cristalinas identificadas, notou-se no espectro um domo de amorfização entre $2\theta=18^\circ$ e 28° , o que pode ser atribuído à existência de sílica reativa, no estado amorfo, o que pode estar associado às características pozolânicas ao RCC.

5.3.3 Espectrometria de fluorescência de raios X-(FRX)

Os resultados obtidos na análise química do RCC, pelo método de fluorescência de raios X, são apresentados na Tabela 16, na forma dos seus respectivos óxidos.

Tabela 16- Composição química do resíduo da casca cerâmica expressa na forma de óxidos em % da massa da amostra analisada

Composto	Teor (% em massa)
SiO ₂	74,70
Al ₂ O ₃	17,48
Fe ₂ O ₃	0,89
CaO	0,11
K ₂ O	0,04
MnO	0,04
MgO	<0,01
ZrO ₂	4,50
P ₂ O ₅	1,10
BaO	0,53
TiO ₂	0,60

A análise química indicou a SiO₂, Al₂O₃ e a ZrO₂ como os principais compostos presentes na constituição do RCC. Os valores encontrados estão de acordo com a própria composição da casca refratária, uma vez que os principais constituintes utilizados na fabricação do molde cerâmico são a sílica coloidal (aglomerante), farinha de zircônio (predominância de ZrO₂ e Al₂O₃), areia de zircônio e mulita (refratários).

O somatório dos teores dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ correspondeu a 93,07%, superando o limite mínimo de 70% estabelecido pela norma NBR 12653 (ABNT/1992), para que o material seja considerado pozolânico. Desta forma, o RCC apresentou características pozolânicas, segundo este critério de avaliação.

5.3.4 Análise Química por Via Úmida

Na Tabela 17, apresenta-se o resultado da análise química por via úmida do RCC.

Tabela 17- Análise química por via úmida do resíduo da casca cerâmica

Composto	Resultados	Unidades	Método
SiO ₂	67,77	%	GRAVIMETRIA
Al ₂ O ₃	21,70	%	ICP OES
Fe ₂ O ₃	1,16	%	ICP OES
CaO	0,15	%	ICP OES
K ₂ O	262,50	µg/g	FAAS
MnO	0,03	%	ICP OES
MgO	0,05	%	ICP OES
ZrO ₂	5,54	%	ICP OES
P ₂ O ₅	0,02	%	ICP OES
BaO	88,10	µg/g	ICP OES
TiO ₂	0,66	%	ICP OES
Na ₂ O	0,10	%	FAAS
Perda ao fogo	0,25		GRAVIMETRIA

Assim como o resultado obtido pela análise química pelo método de FRX, a partir da análise química por via úmida, confirmou-se como principais compostos presentes na constituição do RCC, a SiO₂, Al₂O₃, e a ZrO₂. O somatório dos teores dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ correspondeu a 90,63%, também superando, assim como obtido por FRX, o limite mínimo de 70%, estabelecidos pela norma NBR 12653 (ABNT/1992), comprovando o caráter pozolânico do resíduo da casca cerâmica.

Pela análise química, observou-se também baixo teor de álcalis (K₂O, MgO, CaO, Na₂O) presentes no RCC. Segundo Lima e Rossignolo (2009), os álcalis podem prejudicar o desempenho das propriedades do concreto, com destaque para a redução do pH, com consequente despassivação da armadura e reações expansivas. A NBR 12653 limita a quantidade de equivalentes de Na₂O nos materiais pozolânicos em 1,5%.

A perda ao fogo foi inferior ao valor máximo de 10%, para materiais pozolânicos, definido pela norma NBR 12653.

5.3.5 Granulometria a laser

Os resultados da distribuição granulométrica acumulada para o resíduo da casca cerâmica são apresentados na Figura 36:

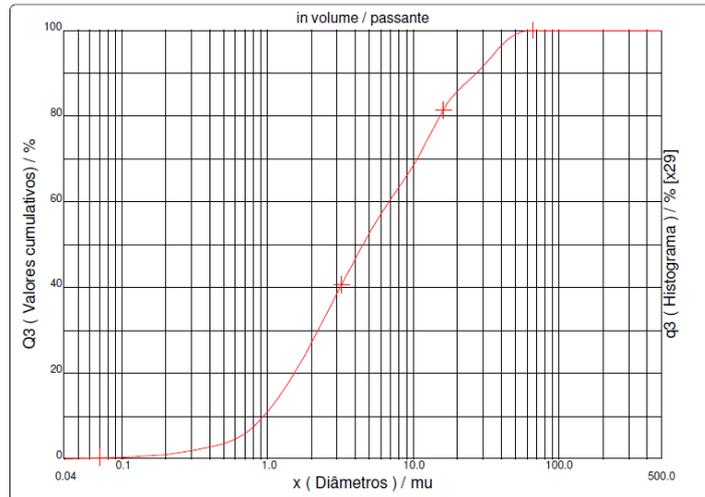


Figura 36- Distribuição dos valores acumulados em função do diâmetro das partículas do RCC

A Tabela 18 estabelece uma comparação entre a distribuição do tamanho de partículas do RCC e do cimento Portland, utilizado no trabalho, obtidas por granulometria a laser.

Tabela 18- Características físicas do Resíduo da casca cerâmica e do cimento Portland

Cimento CPV-ARI		Resíduo da Casca Cerâmica após moagem	
Distribuição Granulométrica	$D_{10\%} = 3,79 \mu\text{m}$	Distribuição Granulométrica	$D_{10\%} = 0,93 \mu\text{m}$
	$D_{50\%} = 20,59 \mu\text{m}$		$D_{50\%} = 4,50 \mu\text{m}$
	$D_{90\%} = 28,47 \mu\text{m}$		$D_{90\%} = 27,07 \mu\text{m}$
Dimensão média	19,04 μm	Dimensão média	9,51 μm

De acordo com o método de moagem adotado no trabalho, obteve-se um material muito fino, cujo diâmetro médio em torno de 9,51 μm , encontrado através do ensaio de granulometria, sendo que 50% do volume da amostra analisada possui diâmetro abaixo de 4,5 μm . Esta granulometria confere ao resíduo a capacidade de atuar como adição mineral. A maior finura

do resíduo contribui com a reatividade desse material (atividade pozolânica) e promove o efeito *filler* (preenchimento de vazios) em matrizes cimentícias.

5.3.6 Massa específica real

A partir da análise por picnometria a hélio, o resíduo da casca cerâmica apresentou uma densidade real de $3,02 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, valor bem próximo à massa específica real do cimento CPV ARI de $3,07 \text{ g/cm}^3$, usado nesta pesquisa.

5.3.7 Massa específica aparente

A Tabela 19 informa os valores encontrados nos ensaios executados, para determinação da massa específica aparente do RCC.

Tabela 19- Massa específica aparente do resíduo da casca cerâmica

Variáveis	Ensaio I	Ensaio II
Massa inicial	100,00 g	100,00 g
Massa final	41,15g	40,27g
Volume de querosene	22,7ml	23,0ml
Massa específica	2,59g/ml	2,60g/ml

A média encontrada foi de 2,59 g/ml, valor este 16% inferior à massa específica do cimento CPV ARI, cujo valor é 3 g/ml.

5.3.8 Área superficial específica

A Tabela 20 registra os valores encontrados para a determinação de superfície específica, pelo método BET, de uma amostra do RCC e do cimento CPV-ARI, utilizado no trabalho da pesquisa.

Tabela 20 Análise por adsorção de nitrogênio por BET

Amostra	Valores encontrados
RCC	4,40m ² .g ⁻¹
Cimento CPV-ARI	1,69m ² .g ⁻¹

O resíduo de casca cerâmica apresentou uma superfície específica de 2,60 vezes maior do que o cimento CPV ARI. Trata-se, portanto, de um material com maior área superficial em relação ao cimento, o que favorece a sua reatividade. O resultado da área superficial do cimento Portland CPV, calculado pelo método de BET, é um valor próximo ao encontrado por Souza (2007), de 1,45 m²/g , que utilizou o mesmo tipo de cimento em seu trabalho.

Quanto maior for a superfície de contato da pozolana com o hidróxido de cálcio, maior será a taxa de reação pozolânica, segundo Ferreira et. al. (2012).O resultado da área superficial do cimento Portland está próximo de valores consultados na literatura.

5.3.9 Índice de atividade pozolânica

Os resultados de resistência à compressão, aos 28 dias, das argamassas A (com resíduo cerâmico) e B (sem resíduo cerâmico), bem como o valor do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) do RCC estão discriminados na Tabela 21.

Tabela 21- Índice de Atividade Pozolânica com cimento do resíduo da casca cerâmica

Argamassas	Resistência média à compressão Axial (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica do RCC (%)
Argamassa A	24	79,98%
Argamassa B	30	

Na avaliação pelo método físico da atividade pozolânica, o corpo de prova com adição do resíduo apresentou uma resistência média à compressão de 24 MPa, enquanto os corpos de prova de referência tiveram uma resistência média de 30 MPa. Estes valores conferem ao RCC um índice de atividade pozolânica igual a 79,98%, o qual supera o valor mínimo de 75% exigidos pela NBR 12653, para ser classificado como material pozolânico.

5.3.10 Pozolanidade (Chapelle)

Através do ensaio de atividade pozolânica químico pelo método de Chapelle Modificado, o RCC apresentou valor de fixação correspondente a 693 mg de CaO/g da amostra à temperatura de 90 ± 5 °C. De acordo com a normalização, o resultado encontrado, está bem acima do limite inferior estabelecido (330 mg de CaO/g), o que prova quimicamente ser o resíduo da casca cerâmica um material com expressiva atividade pozolânica.

5.3.11 Solubilização e Lixiviação

O RCC foi classificado de acordo com as prescrições da norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Verificou-se que o RCC se enquadra como resíduo não inerte - classe II A. De acordo com a norma considerada, resíduos de classe II A podem apresentar propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

As Tabelas 22 e 23 exibem os resultados encontrados nos ensaios de Lixiviação e Solubilização, respectivamente, e os limites máximos estabelecidos em norma.

Tabela 22- Resultados do ensaio de lixiviação conforme a NBR 10005/2004

Parâmetros	Unidades	Resultados da amostra	Limites Máximos (NBR-10004)
Inorgânicos			
Arsênio	(mg/L)	ND*	1,0
Bário	(mg/L)	ND*	70,0
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,5
Chumbo	(mg/L)	ND*	1,0
Cromo Total	(mg/L)	ND*	5,0
Mercurio	(mg/L)	ND*	0,1
Fluoreto	(mg/L)	0,1	150,0
Prata	(mg/L)	ND*	5,0
Selênio	(mg/L)	ND*	1,0

ND* = Não detectado

Tabela 23- Resultados do ensaio de solubilização conforme a NBR 10006/2004

Parâmetros	Unidades	Resultados da amostra	Limites Máximos (NBR-10004)
Fenóis Totais	(mg/L)	ND*	0,001
Mercurio	(mg/L)	ND*	0,001
Arsênio	(mg/L)	ND*	0,01
Bário	(mg/L)	ND*	0,7
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,005
Chumbo	(mg/L)	ND*	0,01
Cromo Total	(mg/L)	ND*	0,05
Alumínio	(mg/L)	6,3	0,2
Ferro	(mg/L)	0,5	0,3
Manganês	(mg/L)	ND*	0,1
Sódio	(mg/L)	3,4	200,0
Zinco	(mg/L)	ND*	5,0
Cobre	(mg/L)	ND*	2,0
Prata	(mg/L)	ND*	0,05
Selênio	(mg/L)	ND*	0,01
Cianeto	(mg/L)	ND*	0,07
Fluoreto	(mg/L)	0,2	1,5
Nitrato	(mg/L)	0,1	10,0
Cloreto	(mg/L)	1,8	250,0
Sulfato	(mg/L)	ND*	250,0
Surfactantes	(mg/L)	ND*	0,5

ND* = Não detectado

Cada tipo de ensaio, solubilização e lixiviação, utiliza-se de um reagente diferente, com sensibilidade diferente de detecção, o que justifica alguns componentes terem sido encontrados apenas na tabela 23. A partir dos resultados apresentados nos ensaios de solubilização e lixiviação, notou-se que apenas o alumínio, no extrato solubilizado, encontrava-se em concentração fora dos limites estabelecidos, o que pode ser explicado pela composição química do próprio resíduo, com 17,48% de alumina. No entanto, os demais

valores encontrados estão abaixo dos valores limites previstos em norma. Outros parâmetros físicos encontrados nos ensaios de caracterização ambiental do RCC constam na Tabela 24.

Tabela 24- Parâmetros físicos ambientais

Parâmetros	Unidades	Resultados da amostra
pH (mistura 1:1 em água)	-	7,00
Umidade	(%)	0,05
Matéria Orgânica	(%)	0,09

A mistura da amostra de resíduo com água apresentou pH neutro. Este valor encontrado não se insere na faixa, que indica corrosividade (pH inferior a 2,0), segundo a NBR 10004/2004. Percebe-se, também, que a amostra não apresentou nenhuma das propriedades que conferem patogenicidade ao resíduo, e não foram constatadas propriedades de inflamabilidade e toxicidade no mesmo.

5.4 Comportamento dos Concretos no Estado Fresco

5.4.1 Abatimento em tronco de cone

A Tabela 25 apresenta o resultado do abatimento dos concretos desenvolvidos em função do teor de substituição e relação água/aglomerante.

Tabela 25-Abatimento do tronco de cone dos concretos

Resistência à compressão estimada (MPa)	Concreto	Relação água/aglomerante	Abatimento Tronco de Cone (mm)
	Ref.		180
40	10%	0,42	170
	15%		120

De acordo com os dados apresentados na tabela, notou-se que à medida que aumenta o teor de substituição do RCC pelo cimento no concreto, há uma diminuição na trabalhabilidade. Supõe-se que a redução do abatimento está relacionada com a grande área superficial do resíduo da casca cerâmica, material fino que demanda mais água trabalhável.

5.4.2 Análise do pH dos concretos no estado fresco

Por meio da Figura 37 pode-se perceber visualmente, a coloração adquirida pela fita de papel indicador universal dos concretos analisados.

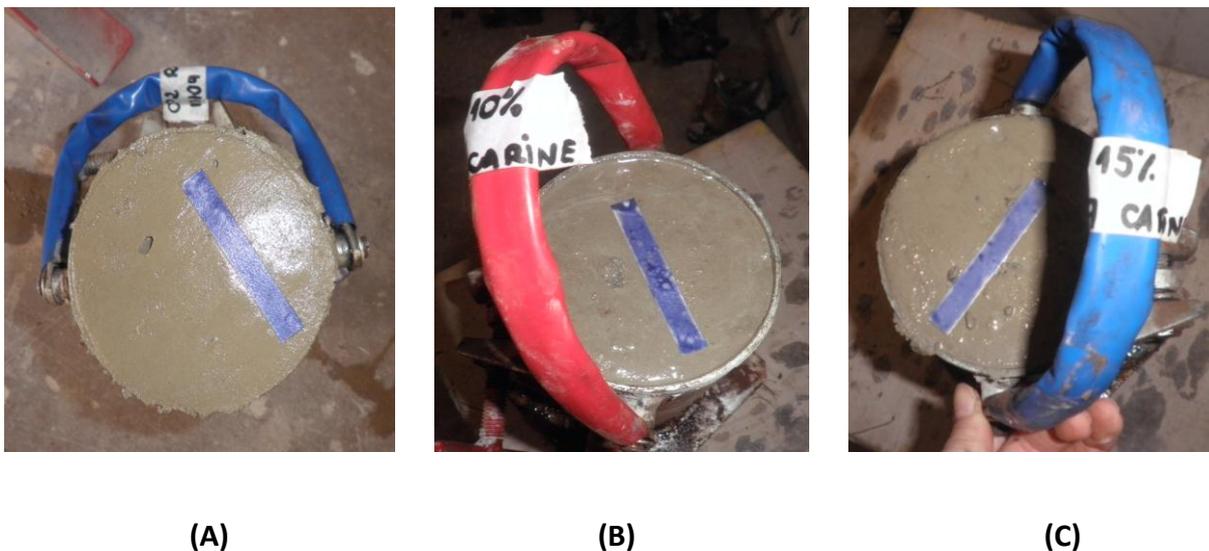


Figura 37- Ensaio de pH dos concretos no estado fresco, pelo método da fita, (A) ref., (B) 10%, (C) 15%
Fonte: Foto do autor

A partir dos resultados obtidos, notou-se que no teste de comparação de cor, em relação ao concreto sem RCC, os concretos com 10% e 15%, não demonstram diferença com relação ao nível de pH, ou seja os concretos apresentaram o mesmo nível de pH. Isso poderia ser justificado pela lentidão das reações pozolânicas.

Importante destacar que as pozolanas, ao serem incorporadas ao concreto, podem reduzir seu pH ao consumirem o hidróxido de cálcio através da reatividade, deixando o concreto desprotegido com relação à corrosão das armaduras em concretos armados.

5.5 Comportamento dos Concretos no Estado Endurecido

5.5.1 Resistência à compressão axial

A Figura 38 apresenta o gráfico com a evolução da resistência mecânica dos concretos em função da idade e de acordo com os teores de adição.

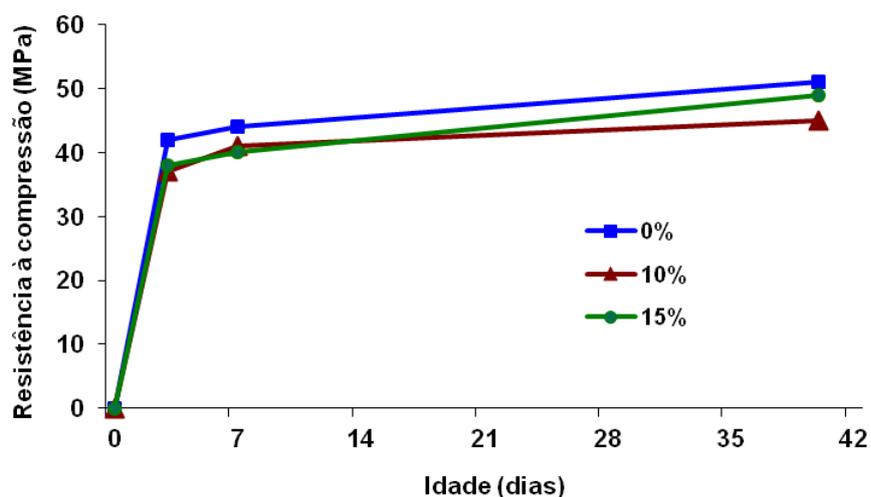


Figura 38- Resistência à compressão do concreto com e sem adição de RCC

Pode-se notar que a evolução da resistência à compressão dos concretos, até os três dias de idade, apresentou valores mais elevados. Esse comportamento foi observado por Pacheco-Torgal e Jalali (2010), em seu trabalho de pesquisa. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato da utilização do cimento CPV, de alta resistência inicial, desenvolver a maior parte da sua resistência mecânica nas primeiras idades.

Os concretos com teores de 10% e de 15% de RCC apresentaram o mesmo comportamento até os 7 dias de idade. Entretanto, após esta idade, observou-se que o concreto com 15% de adição, apresentou uma evolução maior em relação ao concreto com 10%, acontecendo o mesmo, em relação ao concreto de referência.

Confirmando essa teoria, Bui, Hu e Stroven (2005) apud Krug et al. (2011) afirmam que, nas primeiras idades, o empacotamento das partículas é responsável pela resistência, e em idades mais avançadas, predomina o efeito pozolânico. E isso pode significar que as reações tardias de pozolanicidade podem apresentar melhora significativa na resistência desses concretos.

5.5.2 Módulo de elasticidade

Na Tabela 26, estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios do módulo de elasticidade, aos 7 dias de idade, do concreto em função do teor de substituição do cimento pelo RCC.

Tabela 26-Apresentação do Módulo de Elasticidade

Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	Teor de adição	Módulo de Elasticidade (GPa)
44	0%	27,45
41	10%	26,64
40	15%	26,19

Observa-se que o módulo de elasticidade não sofreu alteração significativa em função do teor de substituição do concreto pelo RCC, quando comparado ao concreto de referência. Este mesmo comportamento foi observado por Oshiro et al. (2011), conforme mencionado na literatura consultada.

Percebeu-se, como era de se esperar, que a redução dos valores encontrados para o módulo de elasticidade vem acompanhada pela diminuição do valor da resistência média.

5.5.3 Resistência à tração na compressão diametral

A Figura 39 ilustra os corpos de prova cilíndrico, após terem sido rompidos na prensa por compressão diametral:

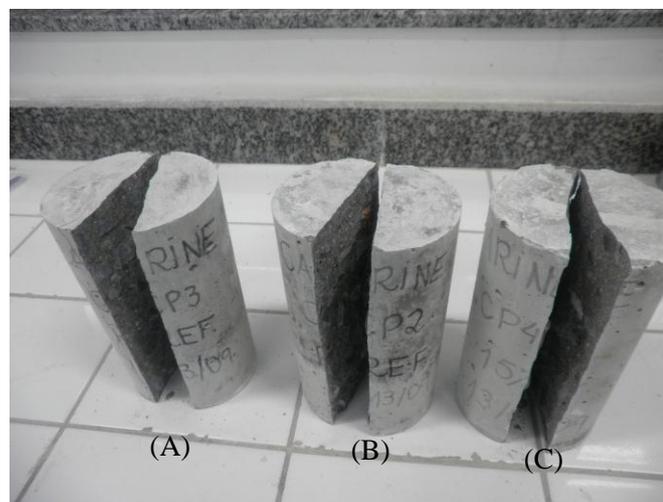


Figura 39- Corpos de prova rompidos por compressão diametral (A) ref., (B) 10% e (C) 15% de substituição

Fonte: Foto do autor

A Figura 40 representam os gráficos com os valores das resistências médias à tração por compressão diametral dos concretos, aos 28 e 91 dias.

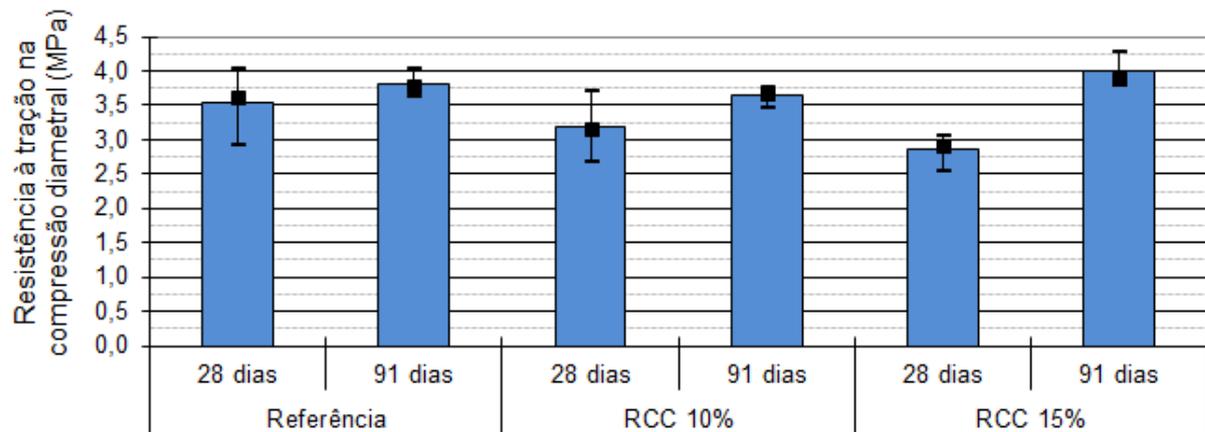


Figura 40- Resistência à tração na compressão diametral aos 28 e 91 dias

Diferentemente do afirmado por De Larrard (1992), a resistência à tração por compressão diametral continuou a crescer, mesmo após os 28 dias, tanto para o concreto de referência, quanto para os traços de 10% e de 15%. Notou-se que as diferenças de valores de resistência, em comparação com o concreto de referência, diminuíram com o aumento da idade de 28 para 91 dias. O traço com 15% de substituição chegou a superar a resistência à compressão diametral do concreto sem adição, em 4,72%, aos 91 dias, provavelmente devido à evolução das reações pozolânicas em idades mais avançadas. Esse comportamento foi semelhante ao obtido no ensaio de resistência à compressão axial, em que os concretos com 15% de substituição tiveram melhores desempenhos do que os concretos de 0% e 10% de adição.

No que se refere à interação entre o teor de adição de RCC e a evolução da idade (de 28 para 91 dias), os concretos com menor acréscimo de resistência, com 10% de adição, apresentaram um aumento médio de 14,15%. Os concretos de referências aumentaram em 7,63%, porém os concretos com melhores desempenhos foram os com 15% de adição, pois apresentaram um ganho de 40% de resistência.

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral com a tendência de elevação dos resultados (de 28 para 91 dias) indica que o efeito predominante foi devido às reações pozolânicas, que se processaram ao longo do tempo.

5.5.4 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 27 apresenta a média dos resultados obtidos nos ensaios de absorção por capilaridade, realizados nos corpos de prova com composições diferentes, aos 28 dias de idade.

Tabela 27-Resultado dos valores de absorção de água por capilaridade em função do teor de adição.

Teor de Adição (%)	Absorção de Água por Capilaridade (g.cm ⁻²)			
	3 h	24 h	48 h	7 dias
0%	1,9x10 ⁻⁴	3,1x10 ⁻⁴	3,6x10 ⁻⁴	3,6x10 ⁻⁴
10%	1,9x10 ⁻⁴	3,3x10 ⁻⁴	4x10 ⁻⁴	3,9x10 ⁻⁴
15%	1,9x10 ⁻⁴	3,2x10 ⁻⁴	3,6x10 ⁻⁴	3,4x10 ⁻⁴

Conforme se verifica, os valores encontrados para o coeficiente de absorção capilar dos concretos com adição de RCC não sofreram uma variação significativa em relação ao concreto de referência (0% de adição). Esse comportamento revelou que a quantidade de água que os concretos absorveram, por unidade de área, foi praticamente a mesma.

5.5.5 Absorção de água por imersão total

A Tabela 28 apresenta a média dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por imersão total, aos 28 dias de idade, e, o índice de vazios para os diferentes teores de adição do RCC.

Tabela 28-Absorção de água por imersão total e índice de vazios.

Teor de Adição (%)	Absorção de Água por Imersão (%)	Índice de Vazios (%)
0%	4,3	10,4
10%	4,1	9,6
15%	3,9	8,5

Verificou-se uma redução da absorção de água por imersão total com o aumento do teor de adição do RCC, em relação ao concreto de referência. Com 10% a absorção de água diminuiu em aproximadamente 5% em relação ao concreto de referência, e com 15% de adição esta

redução foi de 9%. A redução da absorção pode ser explicada pela maior quantidade de finos presentes na mistura, devido à adição mineral, que proporcionou uma redução do volume de vazios com o fechamento dos poros. Esse fenômeno é conhecido como efeito *filler* e contribuiu com a menor percolação de água no interior dos concretos com adição pozolânica. Com relação ao teor de substituição pôde-se observar que, tanto a porosidade total quanto o índice de vazios dos concretos contendo RCC, foram inferiores aos do concreto sem adição (referência).

5.5.6 Análise do pH dos concretos no estado endurecido

A Tabela 29 apresenta os resultados dos potenciais hidrogeniônicos dos concretos no estado endurecido, nas idades de 28 e 91 dias. Os valores apresentados na tabela representam a média de dois ensaios, para cada tipo de concreto, com teores de substituição de 0%, 10% e 15%.

Tabela 29-Potencial hidrogeniônico dos concretos endurecidos

Tipos de concretos	Temperatura	pH	
		28 dias	91 dias
0%	25°C	12,49	12,60
10%		12,47	12,65
15%		12,49	12,58

Observa-se que, nas idades analisadas, não houve diferença significativa no pH dos concretos com o teor de substituição. O mesmo comportamento foi encontrado por Souza (2007), ao utilizar metacaulim como substituição, conforme citado em literatura.

É importante destacar que a redução da alcalinidade não alcançou o nível que poderia desencadear o processo de corrosão em concretos armados (despassivação da armadura), uma vez que o cimento hidratado possui pH de aproximadamente 12,5. Este valor de pH protege o aço do concreto armado contra a corrosão.

6 CONCLUSÕES

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT/1992), o RCC apresenta características, que o classificam como uma pozolana do tipo comum se enquadrando na classificação do tipo A ou B, apresentou um percentual dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , de 93,07%, acima do limite, de 70%, especificado por esta norma, para materiais pozolânicos.

De acordo com a NBR 10004/04 o resíduo de casca cerâmica é classificado como resíduo da classe II-A não inerte.

O resíduo da casca cerâmica apresentou uma composição mineralógica constituída basicamente de sílica, mulita, cristobalita, fosfato de alumínio e zirconita. Apresenta ainda uma fase amorfa, que pode estar associada à característica reativa do material, demonstrada na forma de atividade pozolânica.

De acordo com os resultados da caracterização do RCC, a pozolana estudada é um material neutro ($\text{pH}=7,001$), reativo, fino ($D_{50\%}=4,50\ \mu\text{m}$), com área específica de $4,04\ \text{m}^2.\text{g}^{-1}$ (BET) e massa específica de $3,02\ \text{g}.\text{cm}^{-3}$.

Os testes de pH, nos concretos analisados, mostraram que para os níveis de substituição de RCC estudados, o pH dos concretos ficou numa faixa ótima.

Verificou-se, também, que os resultados obtidos nos ensaios de absorção foram satisfatórios, pois com a substituição do cimento pelo resíduo da casca cerâmica, foi possível obter uma matriz cimentícia mais densa e homogênea, conseqüentemente, mais resistente à penetração de fluidos agressivos, devido ao fato do RCC atuar nos concretos como material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema (efeito *filler*).

O caráter pozolânico do resíduo da casca cerâmica foi comprovado pelos ensaios de pozolanicidade, tanto pelo método físico (resistência à compressão de argamassas) quanto pelo método químico (Chapelle Modificado).

Com relação às propriedades mecânicas de compressão axial e compressão diametral, constatou-se que houve um ganho de resistência em idades mais avançadas, devido, principalmente, à evolução das reações pozolânicas nos concretos analisados.

Sendo assim, concluiu-se que a utilização do resíduo de casca cerâmica como adição mineral em substituição ao cimento nas proporções de 10% e 15%, é extremamente promissora, devido às características pozolânicas do resíduo, assim como o reaproveitamento deste material, que poderia levar a uma redução do passivo ambiental, e com relação à manufatura do cimento, a diminuição do consumo de matérias primas, da emissão de gases de efeito estufa, caracterizando uma ação sustentavelmente correta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Revista da ABIFA**, Fundação e Matérias Primas, edição 130, p. 65, mar. 2011.

ALVES, L. S.; SALLES F. M.; MIZUMOTO, C. Análise do desempenho das adições minerais nas características do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

ALVES, M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ANJOS, M. A. S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.346-349, mai./ago. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó-determinação da massa específica - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: cimento Portland – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregado em estado solto determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49** Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto-determinação dos módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto-determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1987.

BARBOSA, M. T. G. O emprego do rejeito de mármore triturado na confecção de concreto auto adensável-adensável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

BARBOSA, L.; RENÓFIO A. Análise estrutural de um edifício fundamentada em seu impacto ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

BELTRÃO, F. C. M.; ZENAIDE, J. C. Influência **do metacaulim nas propriedades do concreto**. 2010. 66 f. Monografia - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade da Amazônia, Belém.

BIDWELL, H. T. **Investment casting handbook**. Dallas: ICI, 1997. 123p. il.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 3 de ago. de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 20 fev. 2012.

BRASIL. Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 12 fev. 1998. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=320>> Acesso em: 20 fev. 2012.

BUI, D. D.; HU, J.; STROVEN, P. Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 357-366. 2005.

CÂMARA, E. et al. Uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na mistura de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

CAMPOS, M. F.; ROSSIGNOLO, J. A.; LIMA, S. A. Pozolanidade e resistência mecânica de argamassas confeccionadas com cinza da casca da castanha de caju. **Revista Minerva**, São Paulo, n. 5, p. 249-256. 2008.

CARVALHO, A. L. **Avaliação das propriedades mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo de carbonato de cálcio gerado na fabricação de celulose**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Bahia.

CORDEIRO, G. C.; DÉ SIR, J. M. Potencial de argila caulínica de Campo dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 56, n. 337, p. 71-76, jan./mar. 2010.

CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R. Avaliação da atividade pozolânica e aplicação em concreto de cinza do bagaço de cana-de-açúcar produzida com queima controlada.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series**. V. 9. London: E&FN SPON, 1999. 421 p.

DOURADO, K. C. A. et al. Influência da pozolana em concretos moldados em caruaru-Pernambuco. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓN, 11., 2011, Guatemala. **Anais...** Guatemala: Conpat, 2011.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Programa Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

DUARTE, M. N. et al., Métodos de Análise de Solos e Calcário. Disponível em: <<http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual%20de%20MetodosID-6trBnpFBp8.pdf>> Acesso em 20 nov. 2012.

EVANGELISTA, A. C. J. et al. Aplicação de resíduo cerâmico como adição mineral na produção de argamassas e concretos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 3, p. 1-12, 2006.

FERREIRA, G. C. S. et al. Avaliação físico-mecânica de matrizes cimentícias com substituição parcial do cimento Portland por cinza residual de casca de arroz e sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2012.

FILHO, H. J. **Efeitos da Adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. 2002. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

FREITAS, A. W.; MACHADO, I. M. L. **Tecnologia básica do processo de fundição por cera perdida**. Itaúna: SENAI- DR.MG, 2001, 44 p.

GABRICH, M. F. **Estudo da influência das adições minerais no comportamento do concreto sob a ação do fogo**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as a supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 515-524, jul. 2007.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 4, p. 639-644, out. 2007.

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

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A. Uso de resíduos sólidos como materiais de construção: uma alternativa para redução do impacto ambiental no setor da construção civil. **Revista Diálogos & Ciência**, Bahia, ano V, n. 10, mai. 2007.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 962-972, jul. 1993.

GHRICI, M. et al.. Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 5, n. 2, p. 349-354. 2006.

HARGREAVES, D. Global Cement Consumption Expected to Reach New Highs. **Revista International Cement Review**. Disponível em <http://www.cimento.org>. Publicado em abril 2011.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

HERRMANN, T. D. et. al. Análise da resistência e microestrutura em concretos com substituição parcial do cimento por microssílica da cinza de casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

HIBBERT, J. J.; KHATIB, J. M. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 6, p. 460-472, jul. 2005.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil. Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) –Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

KRUG, L. F. et al. Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: Estudo como adição pozolânica em concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53, 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

LACERDA, S. S.; JOSÉ, A. A.; BORDIN, S. E. Valorização da casca cerâmica residual do processo de microfusão por incorporação em formulação de refratários. In: Congresso de Fundação da Associação Nacional de Fundação, 15., 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CONAF, 2011.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de raios X. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14, n.1, p. 680-688, abr. 2009.

LUIZ, A. P. et al. Comparação da emissão de CO₂ por concretos de rendimentos diferentes em uma usina localizada em Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

LOPES, R. H.; CERRI, J. A.; ARAÚJO, M. S. Análise da evolução das fases presentes na pasta de cimento Portland com adição de cinza de xisto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CEBCIMat, 2006. p. 2173-2183.

MACHADO, I. M. L. **Avaliação microestrutural de cascas cerâmicas utilizadas na produção de moldes para o processo de fundição por cera perdida.** 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MACHADO, I. M. L.; FREITAS A. W. O mercado de fundição de precisão e as perspectivas para o setor. **Revista da Abifa**, Minas Gerais, n. 122, p.82- 89, jul. 2001.

MENEZES, R. R. et al. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.6, p. 795-801, mar. 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MORAES, C. A. M. **Ferros e aços fundidos.** Apostila de aula. Porto Alegre: PPEM/UFRGS, 2000.

MORAES, R. C. **Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto.** 2001. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, PPGECC, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

MORAVIA, W. M. **Comportamento térmico e avaliação microestrutural de concretos leves produzidos com argila expandida.** 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 2, p. 147-154, 2011.

NETO, B. C. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas.** 2004. 293 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos.** 2006. 147 f. Monografia - Especialização em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828p.

NILES, J.C. The effect of slurry viscosity and stucco size on shell properties. In: ANNUAL TECHNICAL MEETING; 48, 2000, Dallas. **Proceedings...** New York: ICI, 2000. paper n. 13.

OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim.** 2007. 196 f. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, M. P., BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.490-496, 2006. Disponível em <http://www.agriambi.com.br/revista/v10n2/490.pdf>. Acessado em julho 2012.

OLIVEIRA, M. P. et al. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-convencionais: Habitação e Infra-estrutura de Interesse Social, 2004, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: NOCMAT, 2004.

OLIVEIRA, L. A. P.; GOMES, J. P. C.; SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 197-203, 2012.

OSHIRO, A. et al. Hormigón convencional com alto volumen de ceniza volante. Propriedades em estado endurecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

PAULA, M. O. et al. Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 15-20, 2009.

PEREIRA, A. S. Propriedades do concreto com adição de cinza quanto à penetração de oxigênio e absorção por capilaridade In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, 2012. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

PEKMEZCI, B. Y.; AKYUZ, S. Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2175-2179, dez. 2004.

Press Kit. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), 2011. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2011.pdf>. Acesso em: 22 Jan. 2013.

Processo de Microfusão—Fundição de Precisão – Principais Etapas. Disponível em: <http://www.rioinox.com/index_arquivos/microfusao.htm>. Acesso em: 10 fev. 2012.

RESCHKE, J. S. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** 2003. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2. ed. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 101 p.

SALES, F. A. *et. al.* Materiais cimentícios de engenharia fabricados com resíduos de vidro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

SAVASTANO JUNIOR, H.; PIMENTEL, L. L. Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n.1, p.103-110, 2000.

SCHMIDT, B. et al.. Aplicação de tratamento térmico em resíduos de pó de pedra para substituição parcial do cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CBC, 2011.

SEVERO E. A.; OLEA P. M. Estratégias ambientais: o caso do arranjo produtivo local metalmeccânico automotivo da serra gaúcha. In: XI Encontro Nacional e Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2009, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: UCS, 2009.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA, E. M. F.; BARBOSA, A. H.; OLIVEIRA, S. L. Substituição do cimento por resíduo cerâmico em concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 208 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 832-838, 2010.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Resistência e envelhecimento acelerado de betões contendo resíduos cerâmicos. **Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho**, Portugal, n. 36, p. 63-71, 2010.

Torgal, F.M.A.S.P.; CASTRO, J.P.G.; JALALIS, S. Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono. *Revista Betão*, n. 10, 2005.

TUTIKIAN, B. F.; DALMOLIN, D. **Concreto auto-adensável**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008. 140 p.

VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente**. São Paulo: Pioneira, 1995. 117 p.

VASCONCELOS W. L.; SILVA G. J. B. Estudo da atividade Pozolânica do resíduo Proveniente do Polimento do Porcelanato. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

XAVIER, R. A. X. **Avaliação da usinabilidade no desbaste do virabrequim de ferro nodular obtido por fundição em areia e em casca.** 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VEJMELKOVÁ, E. et al. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 55-61, 2012.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho sugere que a pesquisa continue avaliando outras porcentagens de substituição do cimento pelo RCC, assim como, variar o fator água/aglomerante, a fim de avaliar as propriedades mecânicas dos concretos desenvolvidos.

Sugere-se também, fazer um estudo mais detalhado da microestrutura da matriz dos concretos por meio de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica, assim como outras técnicas de obtenção de imagens.