

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

Área de Concentração: Construções Rurais e Ambiente

RESÍDUO DE CAULIM PRIMÁRIO COMO MATERIAL POZOLÂNICO EM
CONCRETO SECO: PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E
DURABILIDADE

MARIA LUIZA DE SOUZA REZENDE

Campina Grande - Paraíba
Março - 2013

MARIA LUIZA DE SOUZA REZENDE

**RESÍDUO DE CAULIM PRIMÁRIO COMO MATERIAL POZOLÂNICO EM
CONCRETO SECO: PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E
DURABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

Orientadores:

Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Área de Concentração: Construções Rurais e
Ambiência

Campina Grande – Paraíba
Março - 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R467u Rezende, Maria Luiza de Souza.
Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade / Maria Luiza de Souza Rezende. - Campina Grande, 2013.
179 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves.

Referências.

1. Metacaulim. 2. Concreto Seco. 3. Durabilidade.

I. Título.

CDU 628.4(043)




PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

MARIA LUIZA DE SOUZA RESENDE

REDÍDUO DO CAULIM COMO MATERIAL POZOLÂNICO EM CONCRETO
SECO: PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E DURABILIDADE

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Orientador (UAEA/UFCC)

APROVADA


Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador (UAEMA/UFCC)

APROVADA


Dr. José Pinheiro Lopes Neto

Examinador (UAEA/UFCC)

APROVADA


Dr. Heber Carlos Ferreira


Examinador (UAEMA/UFCC)

APROVADA


Dr. Normando Perazzo Barbosa

Examinador (CT/UFPB)

APROVADA


Dr. Ulisses Targino Bezerra

Examinador (IFPB)

APROVADA

MARÇO - 2013

*A todos aqueles que acreditam ser atemporal
a capacidade de sonhar e que lutam para
que seus sonhos se tornem realidade,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A **Deus** e a todos os seus anjos, em especial aqueles que me guardam e a todos os que, mesmo estando em outro plano espiritual, continuam torcendo por mim.

A meus pais, **Aldir** e **Lindalva**, por serem para mim o primeiro e determinante exemplo de amor, seriedade, dedicação e honestidade.

A meu marido e companheiro, **José Artur**, pelo amor, compreensão e tolerância, e, como geólogo, pela colaboração nos assuntos relacionados ao caulim.

A meus filhos, **Betânia**, **Helena**, **Elizabeth** e **Artur**, pela ajuda e a meus netos, **Maria Clara**, **Pedro**, **Mariana** e **Francisco**, pela compreensão quando vovó pedia silêncio para estudar.

Aos Orientadores, professores **José Wallace Barbosa do Nascimento** e **Gelmires de Araújo Neves**, pelo acompanhamento neste trabalho e por disponibilizar o **Laboratório de Reciclagem** para realização deste trabalho.

Aos professores do **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola** pelos conhecimentos adquiridos em suas disciplinas.

Ao Prof. **Antônio Farias Leal**, pela atenção, paciência e, acima de tudo, pela amizade e pelo incentivo para que eu concluísse este trabalho.

Ao Prof. **Heber Carlos Ferreira**, pela gentileza em me atender sempre que precisei dos seus conhecimentos, mostrando que ser mestre, antes de ser um título, é um dom.

Ao Prof. **Flávio Luiz Honorato da Silva**, pela grande ajuda na execução do planejamento experimental estatístico.

À minha amiga **Wilma**, que o destino cuidou para que eu a reencontrasse no Laboratório de Reciclagem, me encorajando e me ajudando sempre que foi necessário, não só pela competência e conhecimentos mas também, pelo companheirismo e dedicação aos colegas.

À Prof. **Deise Luna**, por disponibilizar o **Laboratório de Hidráulica** para os ensaios de simulação de chuva dirigida e pelo técnico **Ismael Pereira** pela inestimável ajuda na utilização dos equipamentos.

Aos meus amigos professores e funcionários da **Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção**, pela parceria e incentivo colaborando sempre que possível com as minhas atividades como docente, para que eu tivesse mais tempo para me dedicar à minha tese.

Ao Coordenador Geral de Pós-Graduação, **Daniel Sales de Assis**, pelo empenho em auxiliar os alunos da Pós-Graduação na divulgação dos resultados de suas pesquisas em congressos.

A todos os colegas e funcionários do **Laboratório de Reciclagem**, pelo companheirismo e colaboração em toda a etapa experimental.

A **Mineração Caiçara**, pelo fornecimento do resíduo de caulim utilizado nesta pesquisa e à **Ultrafine Technologies**, pelos serviços de micronização deste.

A **MIZU Cimentos Especiais** pela doação do cimento e à **J.A.R. PREMOLDADOS**, pelo apoio nos ensaios e moldagens realizados na unidade de produção de blocos.

PUBLICAÇÕES

- BELTRÃO, S. L. D.; REZENDE, M. L. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; NASCIMENTO, J. W. B. Tailings in the melioration of residual Kaolin: an option for use as pozzolanic material. In: **IV Portuguese Spanish Congress on Ceramics and Glasses**. Aveiro – Portugal. Novembro, 2011.
- REZENDE, M. L. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; NEVES, G. A. Tailings in the processing of residual kaolin as pozzolanic material in dry concretes. In: **International Conference of Agricultural Engineering – CIGR-AGENG 2012**. Valencia – Espanha. Julho, 2012.
- REZENDE, M. L. S.; BELTRÃO, S. L. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Use of tailings in the processing of primary Kaolin in the production of metakaolin: influence of activation temperature on the pozzolanic activity. In: **The ISWA World Solid Waste Congress 2012**. Firenze – Itália. Setembro, 2012.
- REZENDE, M. L. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; NEVES, G. A.; SILVA, F. L. H.; LEAL, A. F.; FERREIRA, H. C. Uso do metacaulim em concretos secos: uma abordagem por superfície de respostas. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.12, n.3, pp.135-146, jul./set. 2012.

RESUMO

O acúmulo de resíduos no beneficiamento de caulim na região produtora do Estado da Paraíba vem preocupando ambientalistas e motivando pesquisas que venham a propor soluções de reutilização do resíduo como matéria-prima alternativa em diversos setores. Pesquisas anteriores evidenciaram a potencialidade do resíduo de caulim para uso como material pozolânico, sendo o objetivo deste trabalho a avaliação da influência do seu uso nas propriedades físicas e mecânicas de concretos secos, avaliando também a durabilidade através de ensaios de degradação por exposição a sulfatos e simulação de chuva dirigida. Inicialmente foi realizada a caracterização física, química e mineralógica do resíduo, após a qual foi realizada a moagem e estudo da temperatura de calcinação visando obter um material com reatividade pozolânica, reatividade esta avaliada através da determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Para definição dos traços a serem avaliados foi utilizado o planejamento experimental estatístico Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) sendo utilizada para análise a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) cujos resultados indicaram os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33. O uso do metacaulim, obtido com o resíduo, foi avaliado como substituição à massa do cimento nos referidos traços nos teores de 10%, 15%, 20% e 25%. As propriedades físico-mecânicas avaliadas foram: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, massa específica, absorção de água e índice de vazios. Análises por termogravimetria e difratometria de raios X também foram realizadas para confirmação da reação pozolânica. O resíduo calcinado a 800°C apresentou características mais adequadas para seu uso como material pozolânico. A substituição de 10% e 15% da massa do cimento por iguais percentuais de resíduo de caulim em concretos no traço 1:8,33 e fator $A/(C+M) = 0,57$ promoveu, respectivamente, acréscimos de 12% e 6% na resistência à compressão de concretos de referência, sem adição mineral. Para os demais traços e teores de substituição houve redução nas resistências à compressão e à tração indireta. Foi verificada, em relação aos corpos de prova de referência, redução na expansão dimensional dos concretos com 10% de substituição do cimento pelo resíduo, entretanto, para todos os traços e todos os teores de substituição houve acréscimo nas taxas de absorção de água, as quais, apesar de mais elevadas do que as dos concretos de referência, apresentaram valores que atendem aos limites máximos da ABNT. Após os ensaios de simulação por chuva dirigida, os corpos de prova nos quais foi utilizado o resíduo apresentaram maiores valores de perda de massa e que estes tendem a aumentar com a elevação do teor de substituição e os resultados da análise química do lixiviado indicaram que a decomposição ocorrida nos concretos está relacionada com a baixa reatividade pozolânica do resíduo.

Palavras-chave: metacaulim; concreto seco; durabilidade.

ABSTRACT

The accumulation of waste beneficiation of kaolin the producing region of the state of Paraíba is worrying environmentalists and motivating research that will propose solutions for reuse of waste as alternative raw material in various industries. Previous research has demonstrated the potential of kaolin waste for to be used as pozzolanic material, and this study aimed to evaluate the influence of its use in physical and mechanical properties of concrete dried, also evaluating the durability tests through degradation by exposure to sulfates and rainfall simulation driven. Initially it was performed the physical, chemical and mineralogical residue, which was performed after grinding and calcination temperature of study to obtain a material with pozzolanic reactivity, this reactivity assessed by determining the activity index with Portland cement at 28 days. For definition of the traits to be evaluated was used statistical experimental design Central Composite Rotational Design (CCRD) being used for the analysis of Response Surface Methodology (RSM) whose results indicated traces 1:5,56, and 1:6,67 1:8,33. The use of metakaolin, the residue obtained was evaluated as a replacement to the mass of cement in said trace in the levels 10%, 15%, 20% and 25%. The physical and mechanical properties evaluated were compressive strength, tensile strength by diametral compression, elastic modulus, density, water absorption and voids. Analysis by thermogravimetry and X-ray diffraction were also performed to confirm the pozzolanic reaction. The residue calcined at 800 ° C showed characteristics suitable for the use as a pozzolanic material. Replacement of 10% and 15% of the mass of cement by the same percentage of kaolin waste in concrete and 1:8,33 factor A dash / (C + M) = 0.57 promoted, respectively, increases of 12% and 6% in compressive strength of concrete reference without mineral addition. For other traits and levels of substitution was no reduction in compressive strength and indirect tension. For the remaining traits and levels of substitution was reduction in compressive strength and indirect tension. Was observed, compared to the reference test bodies, a reduction in dimensional expansion of concrete containing 10% of cement replaced by the residue, however, for all traits and all substitution levels there was an increase in the rate of water absorption, the which, although higher than the reference concrete, had values that meet the ceilings of ABNT. After the rainfall simulation driven tests, the samples was used in which the residue showed higher weight loss and they tend to increase with increasing levels of substitution and the results of chemical analysis indicated of the leached indicated that the decomposition occurred in concrete is connected with the low reactivity of pozzolanic waste.

Key-words: metakaolin; dry concrete; durability.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
ABREVIATURAS	iii
SÍMBOLOS	iv
CAPÍTULO 1	19
1. INTRODUÇÃO	19
1.1 HIPÓTESE	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
CAPÍTULO 2	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONCRETO SECO.....	22
2.1.1 Processo de moldagem	26
2.2 DURABILIDADE	27
2.2.1 Agentes de degradação e patologias	28
2.2.1.1 A água como agente de degradação	29
2.2.1.2 Ensaios e durabilidade à ação das chuvas	31
2.2.1.3 Degradação por ataque por sulfatos.....	32
2.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	34
2.3.1 Metacaulim	36
2.3.1.1 Influência do metacaulim nas propriedades do concreto.....	38
2.4 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE CAULIM	40
2.4.1 Uso do resíduo de caulim como material pozolânico	41
2.5 ANÁLISE CRÍTICA DO CAPÍTULO	42
CAPÍTULO 3	44
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	44
3.1.1 Definição das variáveis	44
3.2 MATERIAIS	46
3.2.1 Cimento Portland	46

3.2.2 Metacaulim.....	46
3.2.3 Agregados.....	47
3.2.4 Resíduo de caulim.....	47
3.2.5 Água.....	47
3.3 METODOLOGIA.....	48
3.3.1 Caracterização dos materiais.....	49
3.3.1.1 Agregados.....	49
3.3.1.2 Resíduo de caulim.....	49
3.3.2 Processamento do resíduo de caulim como pozolana.....	50
3.3.3 Ensaio de caracterização.....	51
3.3.3.1 Análises químicas.....	52
3.3.3.2 Difração de raios X.....	52
3.3.3.3 Granulometria a laser.....	52
3.3.3.4 Análises térmicas.....	52
3.3.4 Ensaio tecnológico.....	53
3.3.4.1 Definição dos traços e teores de substituição - DCCR.....	53
3.3.4.2 Proporcionamento dos traços.....	55
3.3.4.3 Massa dos corpos de prova cilíndricos.....	55
3.3.4.4 Moldagem dos corpos de prova.....	56
3.3.4.5 Método de cura.....	56
3.3.5 Metodologia para realização dos ensaios.....	57
3.3.5.1 Ensaio físico e mecânico.....	57
3.3.5.2 Avaliação da resistência à ação da chuva.....	59
3.3.5.3 Avaliação da resistência ao ataque por sulfatos.....	62
CAPÍTULO 4.....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	64
4.1.1 Cimento Portland.....	64
4.1.2 Metacaulim.....	64
4.1.3 Agregados.....	65
4.1.4 Resíduo de caulim.....	66
4.2 PROCESSAMENTO DO RESÍDUO DE CAULIM.....	68
4.2.1 Caracterização após a moagem.....	68

4.2.2 Estudo da temperatura de calcinação	70
4.2.3 Determinação do índice de atividade pozolânica	73
4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E TEORES DE SUBSTITUIÇÃO	75
4.3.1 Determinação da massa dos corpos de prova (fábrica)	76
4.3.2 Resultados planejamento estatístico experimental	77
4.3.2.1 Superfícies de resposta para resistência à compressão	80
4.3.2.2 Superfícies de resposta para absorção de água por imersão	82
4.3.3 Análises térmicas das composições avaliadas	84
4.4 INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO RESÍDUO NOS CONCRETOS ESTUDADOS	86
4.4.1 Traço 1:5,56	86
4.4.1.1 Análises térmicas e por difração de raios X	86
4.4.1.2 Propriedades mecânicas.....	89
4.4.1.3 Propriedades físicas	95
4.4.2 Traço 1:6,67	98
4.4.2.1 Análises térmicas e por difração de raios X	98
4.4.2.2 Propriedades mecânicas.....	100
4.4.2.3 Propriedades físicas	106
4.4.3 Traço 1:8,33	108
4.4.3.1 Análises térmicas e por difração de raios X	108
4.4.3.2 Propriedades mecânicas.....	110
4.4.3.3 Propriedades físicas	117
4.4.4 Resistência ao ataque por sulfatos	119
4.4.5 Envelhecimento acelerado por simulação de chuva dirigida	121
CAPÍTULO 5	126
5. CONCLUSÕES	126
5.1 CONCLUSÃO FINAL	129
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	129
LITERATURA CITADA	131
APÊNDICES	
APÊNDICE A - Distribuição granulométrica do resíduo (50% RGC + 50% RFC) após cominuição	144

APÊNDICE B - Análises térmicas (ATG e ATD) das argamassas para determinação da atividade pozolânica	150
APÊNDICE C - Planejamento estatístico experimental e resultados das três repetições para os ensaios de resistência à compressão simples (f_c) e absorção de água por imersão (A_b).	151
APÊNDICE D - Análises térmicas (TG e DTG) dos concretos nos traços utilizados no planejamento experimental.....	152
APÊNDICE E - Análises termogravimétricas para o traço 1:5,56 com e sem substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim	157
APÊNDICE F - Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH e do CaCO_3 e índice de hidratação e pozolanicidade para concretos no traço 1:5,53.....	160
APÊNDICE G - Propriedades mecânicas dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56.	161
APÊNDICE H - Propriedades físicas dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56	162
APÊNDICE I - Análises termogravimétricas para o traço 1:6,67 com e sem substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim	163
APÊNDICE J - Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH e do CaCO_3 e índice de hidratação e pozolanicidade para concretos no traço 1:6,67.....	166
APÊNDICE K - Propriedades mecânicas dos corpos de prova no traço 1:6,67	167
APÊNDICE L - Relação entre a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.	168
APÊNDICE M - Propriedades físicas dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67.....	169
APÊNDICE N - Análises termogravimétricas para o traço 1:8,33 com e sem substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim	170
APÊNDICE O - Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH e do CaCO_3 e índice de hidratação e pozolanicidade para concretos no traço 1:8,33.....	173
APÊNDICE P - Propriedades mecânicas dos corpos de prova no traço 1:8,33	174
APÊNDICE Q - Propriedades físicas dos corpos de prova no traço 1:8,33	175
APÊNDICE R - Variação dimensional resultante da exposição a sulfatos (%).....	176
APÊNDICE S - Variação de massa (seca) e absorção de água a cada 5 ciclos de exposição	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma das etapas no beneficiamento do caulim	40
Figura 3.1 - Representação esquemática das variáveis em estudo	45
Figura 3.2 - Fluxograma das etapas que compõem a fase experimental.	48
Figura 3.3 - Moinho utilizado para processamento do resíduo e desenho esquemático do princípio de funcionamento	50
Figura 3.4 - Curva granulométrica dos agregados.....	55
Figura 3.5 - Desenho esquemático do sistema de cura úmida em laboratório	56
Figura 3.6 - Moldagem e prensagem das placas de concreto	60
Figura 3.7 - Placas expostas no equipamento de simulação de chuvas.....	60
Figura 3.8 - Representação esquemática das etapas de cada ciclo de exposição	61
Figura 3.9 - Localização das linhas de referência para medições dos corpos de prova	62
Figura 3.10 - Corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio	63
Figura 4.1 - Difratoograma de raios X do metacaulim HP.....	64
Figura 4.2 - Curva granulométrica da composição de agregados miúdos e limites utilizáveis recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).....	66
Figura 4.3 - Difratoogramas de raios X do resíduo grosso (RCG) e do resíduo fino (RCF)	67
Figura 4.4 - Distribuição granulométrica do resíduo após cominuição.....	68
Figura 4.5 - Análises térmicas diferencial e termogravimétrica do resíduo sem calcinação....	69
Figura 4.6 - Análise térmica diferencial (ATD) dos resíduos após calcinação nas temperaturas avaliadas	70
Figura 4.7 - Difratoogramas de raios X dos resíduos após calcinação.....	71
Figura 4.8 - Distribuição granulométrica do resíduo após a calcinação.....	72
Figura 4.9 - Curvas de ATD para análise da atividade pozolânica	74
Figura 4.10 - Resultados para os ensaios de resistência à compressão (1ª. Fase), comparados aos de referência (0% de substituição)	78
Figura 4.11 - Resultados para os ensaios de absorção (1ª. Fase), comparados aos de referência (0% de substituição)	78
Figura 4.12 - Diagrama de Pareto para a variável resistência à compressão.....	79
Figura 4.13 - Diagrama de Pareto para a variável absorção de água por imersão.....	80
Figura 4.14 - Superfícies de resposta para resistência à compressão aos 3(a), 8(b), 16 (c), 24 (d) e 29 (e) dias de cura, em função do traço e teor de substituição.....	81
Figura 4.15 - Superfícies de resposta para absorção de água por imersão aos 3(a), 8(b), 16(c),	

24 (d) e 29 (e) dias de cura, em função do traço e teor de substituição.....	83
Figura 4.16 - Difratogramas de raios X para o traço 1:5,56 com substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim	87
Figura 4.17 - Evolução do teor de água combinada referente ao CH para o traço 1:5,56.....	88
Figura 4.18 - Principais tipos de rupturas observadas	89
Figura 4.19 - Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56	90
Figura 4.20 - Resistência à compressão dos corpos de prova no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência.....	91
Figura 4.21 - Evolução da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56	92
Figura 4.22 - Resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova de concreto no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência	93
Figura 4.23 - Módulo de elasticidade dos concretos no traço 1:5,56 com o resíduo de caulim e dos concretos de referência.....	94
Figura 4.24 - Absorção de água e índice vazios dos corpos de prova no traço 1:5,56 com o resíduo de caulim.....	95
Figura 4.25 - Absorção de água por imersão dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos concretos de referência	97
Figura 4.26 - Difratogramas de raios X do traço 1:6,67 com o resíduo de caulim aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura	98
Figura 4.27 - Evolução do teor de água combinada referente ao CH para o traço 1:5,56.....	99
Figura 4.28 - Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67	100
Figura 4.29 - Resistência à compressão de corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com o resíduo de caulim e dos concretos com metacaulim convencional e sem metacaulim	102
Figura 4.30 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura.....	103
Figura 4.31 - Resistência à tração dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência	104
Figura 4.32 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência	105
Figura 4.33 - Propriedades físicas de corpos de prova no traço 1:6,67 com e sem resíduo de	

caulim	106
Figura 4.34 - Absorção de água por imersão dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos concretos de referência	107
Figura 4.35 - Difratoformas de raios X para o traço 1:8,33 com e sem resíduo de caulim ...	108
Figura 4.36 - Evolução do teor de água combinada referente ao CH para o traço 1:8,33.....	109
Figura 4.37 - Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto no traço 1:8,33 com e sem resíduo de caulim.....	110
Figura 4.38 - Resistência à compressão de corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim e dos corpos de prova com metacaulim convencional e sem metacaulim	112
Figura 4.39 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto no traço 1:8,33 com e sem incorporação de resíduo de caulim.....	113
Figura 4.40 - Resistência à tração de corpos de prova no traço 1:8,33 com o metacaulim em estudo e dos corpos de prova de referência	114
Figura 4.41 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim e dos corpos com e sem incorporação de metacaulim.....	116
Figura 4.42 - Propriedades físicas de corpos de prova no traço 1:8,33 com e sem incorporação do resíduo de caulim.....	117
Figura 4.43 - Absorção de água por imersão dos corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência.....	118
Figura 4.44 - Desgaste de corpos de prova devido à intrusão de sulfatos nas arestas.....	119
Figura 4.45 - Variação dimensional devido à exposição a sulfatos para o traço 1:5,56.....	120
Figura 4.46 - Variação dimensional devido à exposição a sulfatos para o traço 1:6,67.....	120
Figura 4.47 - Variação dimensional devido à exposição a sulfatos para o traço 1:8,33.....	120
Figura 4.48 - Perda de massa das placas de concreto com e sem a incorporação de resíduo de caulim	122
Figura 4.49 - Perda de massa para o traço 1:5,56 com resíduo de caulim e resultados de referência (com e sem metacaulim convencional)	123
Figura 4.50 - Perda de massa para o traço 1:6,67 com resíduo de caulim e resultados de referência (com e sem metacaulim convencional)	123
Figura 4.51 - Perda de massa para o traço 1:8,33 com resíduo de caulim e resultados de referência (com e sem metacaulim convencional)	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos blocos de concreto quanto ao uso e função	25
Tabela 2.2 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração de blocos vazados de concreto para alvenarias	25
Tabela 2.3 - Dimensões (mm) de blocos inteiros em função da classe modular.....	26
Tabela 2.4 - Espessuras mínimas das paredes dos blocos	26
Tabela 2.5 - Classificação do grau de exposição proposta por Chand e Bhargava	30
Tabela 2.6 - Requisitos físicos e químicos para materiais pozolânicos de acordo com a ABNT	35
Tabela 2.7 - Requisitos físicos e químicos do metacaulim.....	37
Tabela 3.1 - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado	46
Tabela 3.2 - Características químicas e físicas do metacaulim de referência.....	47
Tabela 3.3 - Ensaio para caracterização física dos agregados e respectivas normas	49
Tabela 3.4 - Ensaio para caracterização física e mineralógica do resíduo de caulim	49
Tabela 3.5 - Composição das argamassas para ensaio de atividade pozolânica.....	51
Tabela 3.6 - Matriz completa para determinação de traços e teores de substituição.....	53
Tabela 3.7 - Valores reais e codificados das variáveis independentes	54
Tabela 3.8 - Matriz do delineamento composto central rotacional (DCCR)	54
Tabela 3.9 - Ensaio a serem realizados e normas utilizadas para fundamentação.....	57
Tabela 3.10 - Parâmetros e valores considerados para o ensaio de simulação de chuvas.....	60
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	65
Tabela 4.2 - Composição química do resíduo de caulim (RCG e RCF)	66
Tabela 4.3 - Identificação das fases cristalinas presentes no RCG e RCF	68
Tabela 4.4 - Granulometria e superfície específica das amostras calcinadas	73
Tabela 4.5 - Índice de atividade pozolânica e resistência à compressão aos 28 dias	73
Tabela 4.6 - Teores de Ca(OH)_2 , CaCO_3 e CaO total para as argamassas A, B e C	75
Tabela 4.7 - Quantitativos de material para os traços avaliados (kg/m^3)	76
Tabela 4.8 - Planejamento estatístico (DCCR) e média das respostas para resistência à compressão e absorção de água	77
Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para avaliação preliminar do uso do resíduo	80
Tabela 4.10 - Diferenças de massa decorrente da decomposição do CH e do C-S-H (1ª. Fase)	84
Tabela 4.11 - Quantitativos de material para os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33	86

Tabela 4.12 - Identificação das fases por DRX para o traço 1:6,67	99
Tabela 4.13 - Análise química da água aspergida e coletada no reservatório	125

ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C - fator água/cimento
A/(C+M) - fator água/(cimento+metacaulim)
ATD - análise termodiferencial
B.E.T - Brunauer - Emmet - Teller
CIB - Conseil International Du Bâtiment
CPV-ARI - cimento Portland de alta resistência inicial
DCCR - delineamento composto central rotacional
DMC - dimensão máxima característica
DRI - <i>driving rain index</i>
DRX - difração de raios X
DTG - derivada da termogravimétrica
EDX - espectroscopia de raios X por dispersão de energia
IAP - índice de atividade pozolânica
ICD - índice de chuvas dirigidas
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LANDSAT - <i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MF - módulo de finura
PET - politereftalato de etileno
PF - perda ao fogo (rubro)
PIB - produto interno bruto
RFC - resíduo fino de caulim
RGC - resíduo grosso de caulim
SINAPROCIM - Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento
TG - análise termogravimétrica
MME - Ministério das Minas e Energia
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
WBCSD - <i>World Business Council for Sustainable Development</i>

SÍMBOLOS

Al_2O_3 - óxido de alumínio

C_3A - aluminato tricálcico ou celita

CaCO_3 - carbonato de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ - hidróxido de cálcio (CH)

CaSO_4 - sulfato de cálcio ou gipsita

C_2S - silicato dicálcico ou belita

C_3S - silicato tricálcico ou alita

C-S-H - silicato de cálcio hidratado

C_4AF - ferroaluminato tetracálcico ou ferrita

CO_2 - dióxido de carbono

Fe_2O_3 - óxido de ferro

K_2O - óxido de potássio

MgO - óxido de magnésio

MgSO_4 - sulfato de magnésio

Na_2O - óxido de sódio

Na_2SO_4 - sulfato de sódio

SiO_2 - dióxido de silício (quartzo)

TiO_2 - dióxido de titânio

O grande crescimento demográfico mundial ocorrido a partir da segunda metade do século passado tem exigido práticas construtivas que venham a atender a grande demanda por edificações. Dentro deste contexto, o uso de blocos vazados de concreto para alvenarias vem se consolidando devido às vantagens que proporciona na execução e custos de uma obra, aliando qualidade e produtividade, principalmente devido à precisão dimensional. Atualmente, o desenvolvimento da indústria de pré-moldados de concreto está direcionado não só a parâmetros ligados diretamente à automação, mas também a utilização de novos materiais visando com isto a redução de problemas ambientais. Esta tendência já havia sido preconizada por Mehta e Monteiro (2008) ao afirmar que, no futuro, a escolha do material de construção mais adequado deverá ser regida pela sincronia de quatro “E”: Energia, Engenharia, Economia e Ecologia.

O concreto utilizado na produção de blocos vazados para alvenarias, diferenciando do concreto armado utilizado em estruturas, possui baixo teor de umidade o que lhe confere a terminologia usual de concreto “seco”, sendo a retirada do ar e compactação feita através de vibroprensas. Devido a necessidades decorrentes do processo de produção, dentre elas a comercialização entre 7 e 14 dias após a moldagem, na composição dos traços geralmente é utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial o qual é considerado um dos cimentos de maior custo energético e ambiental por não possuir adições em sua composição. O custo ambiental na fabricação do cimento Portland é causado não só pela extração de recursos naturais como também pela emissão de dióxido de carbono na atmosfera, sendo 7% desta, proveniente da indústria de cimento Portland (Torgal, 2012).

Visando reduzir tais custos, vem se propagando o uso de materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento Portland, estendendo-se o benefício ambiental ao fato de que alguns resíduos industriais considerados poluidores, como cinzas volantes oriundas de termoelétricas, sílica ativa (indústrias de ferro-silício e silício metálico), resíduos minerais, resíduos cerâmicos e agrícolas, podem ser utilizados como pozolanas. Além de consumir menos energia em seu processamento do que o clínquer do cimento Portland, o qual requer a queima a aproximadamente 1450°C, o uso de subprodutos industriais como material

pozolânico agrega valor a rejeitos cuja destinação final seria aterros sanitários ou até mesmo a deposição em locais inadequados causando grandes impactos ambientais.

A utilização de cada resíduo irá depender da sua disponibilidade na região, o que justifica o uso no Brasil de cinzas volantes na região sul, escórias de alto forno na região sudeste e nas regiões norte e nordeste argilas calcinadas. O metacaulim é uma pozolana obtida através da calcinação de argilas caulínicas de alta pureza e pesquisas feitas por Castro (2008), Menezes *et al.* (2009b) e Barata e Angélica (2012), concluíram que o resíduo do beneficiamento de caulim, argilomineral de vasta aplicação industrial, quando devidamente processado, proporcionou melhorias nas propriedades dos concretos e argamassas em que foi utilizado em substituição parcial ao cimento Portland.

Dependendo da natureza dos depósitos e dos processos de exploração e beneficiamento do caulim, o volume de resíduo no seu beneficiamento pode atingir até 85% do volume bruto extraído, como é o caso dos caulins primários de Mogi das Cruzes, SP (LUZ *et al.*, 2008). Na província pegmatítica da região Borborema - Seridó, localizada nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, segundo Lima (2010), o aproveitamento é de 35% do caulim bruto. Mensalmente, o beneficiamento de caulim nas empresas dos municípios de Juazeirinho, Junco do Seridó e Tenório gera 6 800 t de resíduos os quais são descartados a céu aberto, se acumulando nos pátios das empresas, margens de rodovias ou simplesmente em terrenos baldios sobre a vegetação nativa, em volume estimado por Rezende *et al.* (2008) em dois milhões de metros cúbicos.

Foram encontradas, na literatura consultada, poucas pesquisas que objetivaram avaliar a influência do metacaulim nas propriedades físicas e mecânicas do concreto utilizado na produção de blocos vazados para alvenarias.

A pesquisa, então, se justifica tanto pelo fato de propor uma alternativa de aproveitamento que agrega valor a um resíduo que se tornou um grave problema ambiental, como também de investigar a influência do uso de pozolanas em concretos destinados à produção de blocos vazados para alvenarias, sobre o qual as informações encontradas na literatura consultada são bastante limitadas, confirmando assim a originalidade do trabalho.

1.1 HIPÓTESE

O metacaulim obtido a partir do resíduo no beneficiamento de caulim pode promover, em concretos destinados à produção de blocos vazados para alvenaria, propriedades físicas e

mecânicas similares às de concretos de referência, proporcionando também maior durabilidade quando expostos a ambientes agressivos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência do uso de resíduo de caulim como material pozolânico nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de concretos secos.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. caracterização os materiais convencionais e não convencionais (resíduos de caulim);
- ii. determinação da temperatura ideal de calcinação e processo de cominuição do resíduo de caulim, visando a sua utilização como material pozolânico;
- iii. determinação dos traços e teores de substituição avaliados no decorrer da pesquisa através de planejamento estatístico experimental;
- iv. avaliação e análise da evolução das propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova de concretos, nos traços e teores de substituição determinados na etapa anterior, e comparar os resultados aos encontrados para corpos de prova de referência (sem substituição e com substituição por metacaulim produzido industrialmente);
- v. estudo da durabilidade através da exposição à solução de sulfato de sódio, comparando os resultados aos encontrados para corpos de prova imersos em água por igual período de tempo;
- vi. avaliação da durabilidade à chuva dirigida, através de simulação em laboratório, comparando os resultados experimentais com os valores de referência, ou seja, sem adição do material pozolânico estudado e com metacaulim convencional.

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONCRETO SECO

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, sendo suplantado apenas pela água. Mehta e Monteiro (2008) justificam tal consumo não só pela excelente resistência à água e ao baixo custo, como também pela facilidade de compor elementos estruturais de diferentes formas e tamanhos, se prestando a construção de pontes, barragens, pavimentos, elementos pré-moldados, etc.

Apesar de cada tipo de concreto possuir características distintas e diversificadas, segundo Felipe (2010), os concretos podem ser classificados em dois grandes grupos: os concretos “plásticos” e os concretos “secos”. Basicamente a diferença entre os dois está na quantidade de água requerida para garantir a trabalhabilidade dentro dos limites impostos pelo processo de moldagem. Os concretos plásticos, depois de homogeneizados os seus materiais constituintes, formam uma mistura plástica e de fácil adensamento sendo a retirada do ar feita através de equipamentos simples como vibradores por imersão. Fazem parte deste grupo o concreto convencional utilizado em estruturas de concreto armado e o concreto fluído auto-adensável utilizado em alguns elementos pré-moldados.

Em concretos secos, a quantidade de água utilizada para amassamento é substancialmente menor que a utilizada no concreto plástico proporcionando características de concreto levemente umedecido, umidade esta que varia entre 6 a 8% (FERNANDES, 2008). A mistura deve ser suficientemente densa para permitir desmoldagem imediata, mas, com umidade suficiente para permitir uma distribuição adequada no interior dos moldes durante as operações de mistura e vibração.

Relacionando-se com a resistência diferentemente do observado em concretos plásticos, os quais seguem o princípio fundamental da Lei de Abrams, em concretos secos, para um traço seco fixo são encontradas maiores resistências para fatores água/cimento mais elevados, sendo respeitados os limites para que não haja deformabilidade no estado fresco (TANGO, 1987).

Frasson Júnior (2002), Buttler (2007) e Fernandes (2008) frisam que a coesão é o fator determinante no proporcionamento dos traços e no teor de umidade do concreto seco. Se a mistura for pouco coesa, como é o caso de misturas com baixa quantidade de finos, o bloco em estado fresco irá fissurar, quebrar arestas e até mesmo desmoronar. Misturas muito coesas, além de dificultar a alimentação dos moldes, irão exigir maior energia de compactação aumentando, assim, os custos de produção.

Os materiais utilizados na produção de blocos vazados de concreto são os mesmos utilizados nas misturas convencionais de concreto, ou seja: cimento, agregados e água, sendo que as especificações de cada um estão intrinsecamente ligadas ao processo de fabricação.

Devido à desmoldagem imediata e o reduzido tempo de permanência nas fábricas, já que podem ser comercializados em até sete dias após a moldagem, normalmente é utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI (ABNT, 1991). Os traços utilizados em blocos de concreto geralmente são mais pobres do que os utilizados em concretos estruturais, variando entre 1:4 a 1:14 dependendo da função à qual o bloco se destina, se para alvenarias estruturais ou apenas de vedação.

Os agregados (gráudo e miúdo) devem ser proporcionados visando obter o menor índice de vazios sendo que, de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2008), a dimensão máxima do agregado gráudo não deve ultrapassar a metade da menor dimensão do bloco para que não haja problemas na moldagem. Devido às baixas resistências requeridas, podem ser utilizados agregados de diversas naturezas desde que os blocos atendam às exigências da ABNT.

Buttler (2007) concluiu que agregados gráudos reciclados de resíduos de concreto, independente de sua origem e qualidade, cumprem os requisitos necessários para seu emprego na produção de blocos de concreto estruturais. Modro *et al.* (2009) investigaram a influência da substituição do agregado por resíduos de PET (politereftalato de etileno) nos percentuais de 10%, 20%, 30% e 40%, concluindo ser possível o uso de 40% do volume do agregado pelo material analisado em blocos de concreto sem função estrutural. Resíduos de borracha também se mostraram viáveis para substituir 13% do agregado gráudo em blocos com função estrutural (FIORITI *et al.*, 2010).

O aproveitamento de carepa de aço, resíduo sólido metálico originado da oxidação da superfície do aço fundido em siderúrgicas e formado basicamente por óxido de ferro, como agregado gráudo em blocos estruturais foi estudado por Almeida (2009). Para todos os traços estudados os resultados de resistência à compressão foram superiores aos de referência, porém em alvenarias expostas à umidade (alvenarias externas) a oxidação pode causar problemas de degradação.

O resíduo de caulim gerado na primeira fase do beneficiamento, também denominado de resíduo grosso (ϕ 25 mm) e composto basicamente por quartzo, foi estudado por Lima (2005) e Rezende *et al.* (2008) como substituição parcial ao agregado em blocos de concreto simples sem função estrutural. Em teores de até 70% de substituição, os resultados de resistência à compressão simples e absorção de água apresentaram valores que satisfazem aos requisitos prescritos pela NBR 7173 (ABNT, 1982) substituída em 2008 pela NBR 6136 (ABNT, 2008).

De acordo com dados disponibilizados pelo Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento (SINAPROCIM) a produção de blocos de concreto representou em 2010 o percentual de 15,66% do faturamento total do setor, apresentando crescimento de 18,50% em relação a 2009. Em 2011, devido ao grande aumento da capacidade instalada e também à diminuição do crescimento do PIB brasileiro, o índice de crescimento não ultrapassou a 7% porém, as expectativas para 2012 é que haja aumento de até 30% no faturamento das indústrias de blocos vazados de concreto. Segundo a Associação da Indústria de Blocos de Concreto - Bloco Brasil, a produção mensal das empresas brasileiras certificadas é de 57 milhões de unidades, produção esta suficiente para a execução de 56 mil habitações com 50 m² de área mensalmente.

O déficit habitacional brasileiro é de 5,5 milhões de moradias, de acordo com o Ministério das Cidades (BRASIL, 2011), logo, a indústria de blocos de concreto se apresenta como bastante promissor tanto como empreendimento econômico como solução construtiva para viabilização de habitações com menor custo e em menor tempo. Apesar do custo unitário ser mais elevado, a operacionalidade e a economia de material que o uso de blocos de concreto proporciona, podem reduzir o custo final na execução de alvenarias. De acordo com Frasson Júnior, Oliveira e Prudêncio Júnior (2002), tal redução de custos se deve principalmente aos seguintes fatores:

- i. a uniformidade de dimensões permite o planejamento e modulação de alvenarias sem que haja necessidade de quebras e, por conseguinte, há redução de desperdícios e rejeitos no canteiro da obra;
- ii. possuindo dimensões maiores do que as do tijolo cerâmico convencional, os blocos de concreto promovem maior rapidez na execução de alvenarias, reduzindo o custo de mão de obra;

- iii. os vazios no interior dos blocos permitem a passagem de tubulações para instalações elétricas e hidrosanitárias, como também de ferragens no caso de alvenarias estruturais dispensando o uso de formas para pilares;
- iv. na execução de vigas em alvenarias estruturais, são utilizadas canaletas (também em concreto) as quais também dispensam o uso de formas;
- v. em alvenarias com função estrutural, os blocos apresentam ainda as vantagens de possuir menor massa específica e de poder, através de dosagem racional, atingir as resistências características exigidas pela obra;
- vi. devido à regularidade das faces reduz as camadas de revestimento, sendo indicados para obras de interesse social e, quando utilizados em obras industriais, muitas vezes as alvenarias não necessitam ser revestidas.

A NBR 6136 (ABNT, 2008) classifica os blocos quanto ao uso e função (Tabela 2.1) e especifica os requisitos mínimos exigidos para as propriedades físicas e mecânicas (Tabela 2.2).

Tabela 2.1 - Classificação dos blocos vazados de concreto quanto ao uso e função.

Classe	Função	Condições de uso
A	Estrutural	Alvenarias acima ou abaixo do nível do solo
B	Estrutural	Alvenarias acima do nível do solo
C ⁽¹⁾	Estrutural	Alvenarias acima do nível do solo
D ⁽¹⁾	Não estrutural	Alvenarias acima do nível do solo

⁽¹⁾As classes B, C e D diferem em dimensões e classes de resistência.

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2008).

Tabela 2.2 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração de blocos vazados de concreto para alvenarias.

Classe	Resistência Característica [Mpa]	Absorção média [%]		Retração ⁽¹⁾ [%]
		Agregado normal	Agregado leve	
A	≥ 6,0		≤ 13,0	
B	≥ 4,0	≤ 10,0	(média)	≤ 0,065
C	≥ 3,0		≤ 16,0	
D	≥ 2,0		(individual)	

⁽¹⁾Facultativo

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2008).

A resistência à compressão é a principal variável de controle do processo produtivo de blocos de concreto. A absorção inicial interfere na aderência do bloco à argamassa e a

absorção total é um indicador da quantidade de vazios e, por conseguinte, do grau de eficiência da compactação.

Quanto às dimensões os blocos são classificados em função da modulação do seu comprimento, ou seja, os blocos da classe M20 são indicados para alvenarias cujo comprimento (linha) é múltiplo de 20 e assim para os blocos das classes M15, M12,5, M10 e M7,5. Para que as alvenarias sejam executadas sem haver necessidade de corte das unidades de blocos nas amarrações, os mesmos são fabricados com 1/2 e 1/3 do comprimento do bloco inteiro. As dimensões reais para blocos inteiros em função das cinco classes modulares estão descritas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Dimensões (mm) de blocos inteiros em função da classe modular.

Módulo	M-20	M-15		M-12,5			M-10		M-7,5	
Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	10x30	7,5x40
Largura	190	140	140	115	115	115	90	90	90	65
Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
Comprimento	390	390	290	390	240	365	390	190	290	390

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2008).

A espessura mínima das paredes dos blocos varia de acordo com a função da alvenaria e da classe modular (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Espessuras mínimas das paredes dos blocos

Classe	Designação	Paredes longitudinais (mm)	Paredes transversais (mm)
A e B	M-15	25	25
	M-20	32	25
C	M-10, M-12,5, M-15 e M-20	18	18
D	M-7,5, M-10, M-12,5, M-15, M-20	15	15

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2008).

O grau de estabilidade dimensional é considerado por Taguchi (2008) como o parâmetro que indica o potencial de deformação que a alvenaria deverá apresentar, sendo decorrente de variações térmicas e higroscópicas originadas das reações químicas entre os materiais componentes do concreto e de reações deste com agentes externos no processo de cura.

2.1.1 Processo de moldagem

A energia de compactação tem influência significativa nas características determinantes da qualidade dos blocos, ou seja, porosidade, resistência à compressão e estabilidade

dimensional. Salvador Filho (2007) cita que no Brasil, as fábricas de blocos vazados de concreto variam desde a utilização de equipamentos automatizados de alta produtividade a pequenas centrais onde funcionam uma betoneira e uma vibroprensa manual levando muitas vezes a produtos que não atendem às especificações.

Diante das dificuldades em simular a compactação das vibroprensas nos estudos desenvolvidos em laboratório sobre dosagem de blocos de concreto para alvenarias, Frasson Júnior (2000) desenvolveu moldes cilíndricos tripartidos que permitem a desmoldagem imediata. Com dimensões de 50 mm (diâmetro) x 130 mm (altura) após a compactação, a altura fica reduzida a 100 mm, obtida através do encaixe de um tarugo de nylon com 30 mm, o que se faz necessário pelo fato do volume do concreto no estado solto ser bem maior que no estado compactado. Após correlacionar a resistência à compressão de corpos de prova moldados em laboratório e compactados através de golpes manuais com soquete, com a resistência de blocos moldados em vibroprensa industrial o autor concluiu que, para um mesmo traço e mesma massa específica, a resistência dos corpos de prova cilíndricos é 20% menor que a resistência dos blocos, ou seja, a relação é de 0,80.

Tais moldes também foram utilizados por Buttler (2007), o qual avaliou a influência da energia aplicada variando o número de golpes para resistências nominais de 4,5 MPa, 6,0 MPa e 8,0 MPa, encontrando os valores de 0,98, 0,88 e 0,73, respectivamente, para a relação entre as resistências dos corpos de prova e dos blocos de concreto.

2.2 DURABILIDADE

A importância do estudo da durabilidade no desenvolvimento de materiais de construção se justifica não só pela prolongada vida útil e ao elevado custo das obras civis (SOUZA, 2007) como também aos custos de reparos e substituições os quais, em países industrialmente desenvolvidos, representam 40% do total dos recursos da indústria da construção, de acordo com Lopes (2009), podendo atingir a 50% segundo John e Sato (2006). Sob o ponto de vista ecológico, a produção de materiais mais duráveis, além de contribuir para a conservação dos recursos naturais, reduz a incidência do acúmulo de rejeitos oriundos de demolição. A durabilidade de um produto pode ser então considerada como uma importante ferramenta para o alcance do desenvolvimento sustentável.

A necessidade de concretos que satisfaçam às condições de execução em curto prazo foi apontada por Mehta e Burrows (2001) como uma das causas da redução da durabilidade das construções no último século. Segundo os autores, o uso de cimentos de alta resistência inicial

aumenta o calor de hidratação podendo provocar fissuras e conseqüentemente permitem a infiltração de agentes agressores.

Entretanto, a durabilidade não é uma propriedade específica do material, mas o resultado da interação do material e o ambiente que o cerca, podendo ser definida como a capacidade do mesmo apresentar desempenho satisfatório por um determinado espaço de tempo, denominado vida útil (JOHN e SATO, 2006).

Apesar de envolver o conhecimento científico da composição do material, sua microestrutura e do comportamento do produto, o estudo da durabilidade deve ser iniciado pela identificação dos agentes de degradação, ou seja, todos os fatores capazes de provocar transformações no produto. O acompanhamento destas transformações é feito através de indicadores de degradação, os quais são escolhidos em função das propriedades mensuráveis mais representativas do material.

Sendo destinado à execução de alvenarias, o bloco vazado de concreto deverá ser durável quando exposto à chuva e ao sol e resistir à exposição prolongada à umidade típica de áreas molhadas (cozinhas e banheiros), ou seja, água com sabão e outros resíduos (SOUZA, 2007). Tais exposições podem causar reações químicas deletérias tais como hidrólise ou dissolução dos produtos contendo cálcio e a formação de produtos expansivos, resultando em perda progressiva de resistência, fissuras e perda de massa devido à lixiviação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.2.1 Agentes de degradação e patologias

Os agentes de degradação podem ser classificados, de acordo com a sua origem, em mecânicos, biológicos, químicos e físicos, entretanto, ambos estão sempre intrinsecamente ligados. Dentre os processos físicos de degradação em concretos secos, Madhkhan *et al.* (2012) citam o desgaste superficial por abrasão e fissuras ligadas ao proporcionamento inadequado de materiais e à baixa energia de compactação, os quais provocam falta de homogeneização no concreto causando fraturas e desgaste prematuro.

Mehta e Burrows (2001), analisando o desempenho de estruturas de concreto, concluíram que o uso de cimento de alta resistência inicial também pode proporcionar microfissuras devido à retração térmica causada pela energia liberada durante o rápido processo de hidratação ocorrido nas idades iniciais. Tais fissuras, assim como o excesso de porosidade, aumentam a permeabilidade desencadeando patologias relativas a processos químicos de degradação.

Sendo comum a todos os produtos à base de cimento Portland, as patologias mais frequentes em concretos secos são a hidrólise dos componentes da pasta de cimento, a eflorescência (FERNANDES, 2008) e o ataque por sulfatos (GLASSER, MARCHAND e SANSON, 2008 e IRASSAR, 2009), que resulta na formação de etringita e taumasita, ambas com efeitos nocivos à durabilidade do concreto.

2.2.2.1 A água como agente de degradação

Em sólidos porosos, a permeabilidade à água é habitualmente fator determinante na taxa de deterioração, mas não só a porosidade como o diâmetro e a interconexão entre os poros influenciam diretamente a capacidade de penetração da água, causando os principais problemas ligados à durabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A hidrólise dos componentes ocorre quando, sob efeito de água corrente, a solução de contato é diluída e o Ca(OH)_2 é retirado por lixiviação, expondo os componentes cimentícios à decomposição química o que reduz a resistência podendo levar até a degradação total do concreto. A eflorescência é decorrente da reação do Ca(OH)_2 lixiviado com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar resultando na precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) na forma de crostas brancas na superfície do concreto (FERNANDES, 2008).

A ação da água em uma alvenaria tem origens diversas, como a infiltração por capilaridade da água do solo, da água de lavagem para manutenção e da água da chuva nas vedações externas, sendo que esta última pode representar de 40% a 70% dos casos de infiltração (TAGUCHI, 2008). A infiltração pela chuva pode acarretar danos à edificação que vão desde problemas estéticos, como manchas e bolores, até a degradação dos materiais, sendo a chuva dirigida (chuva à qual é associada uma componente horizontal que é a velocidade do vento) a principal causa de erosão e degradação dos materiais que compõem as fachadas (GIONGO, PADARATZ e LAMBERTZ, 2011).

Estudos de higrotermia e de durabilidade em fachadas exigem a quantificação das cargas de chuva dirigida e a resposta das alvenarias a estas cargas, sendo desenvolvidos por métodos experimentais, semiempíricos ou numéricos. Blocken et al. (2009) citam que a grande maioria dos métodos semiempíricos existentes, se baseiam nas duas relações apresentadas por Hoppestad em 1955: a relação de chuva dirigida (*Driving Rain Relationship*) e o índice de chuva dirigida – *ICD (Driving Rain Index – DRI)*, que também é utilizado para classificar o grau de exposição ao qual a edificação está submetida.

De acordo com Giongo, Padaratz e Lambertz (2011), durante os anos 60, o ICD foi estabelecido pelo CIB (*Conseil International Du Bâtiment*) como sendo o produto da quantidade de precipitação pela velocidade do vento, podendo ser obtido pela Equação 2.1:

$$ICD = V.P.10^{-3} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Em que:

ICD = índice de chuva dirigida (m^2/s),

V = velocidade média anual do vento (m/s , medida a 10 m de altura) e

P = total de precipitação anual (mm).

Segundo Melo Júnior e Carasek (2011), o estudo da chuva dirigida se faz importante para a análise da agressividade do meio no qual a edificação se encontra, proporcionando informações que levem à maior durabilidade das fachadas. Chand e Bhargava (2002) classificaram os graus de exposição de alvenarias em função de ICD (Tabela 2.5), ao confeccionarem um mapa de chuva dirigida para a Índia.

Tabela 2.5 - Classificação do grau de exposição proposta por Chand e Bhargava (2002)

Grau de exposição	Protegida	Moderada	Alta	Severa
Faixa ICD*	$ICD \leq 3 \text{ m}^2/s$	$3 \text{ m}^2/s < ICD \leq 7 \text{ m}^2/s$	$7 \text{ m}^2/s < ICD \leq 11 \text{ m}^2/s$	$11 \text{ m}^2/s < ICD$

Fonte: Adaptado de Melo Júnior e Carasek (2011).

O primeiro mapa de chuva dirigida do Brasil foi elaborado por Lima e Morelli (2005) com base nos valores de ICD calculados através da Eq. 1 e dados climatológicos disponibilizados pelo CPTEC/INPE. Segundo os autores, no Brasil predominam áreas com grau de exposição alto e moderado, ou seja, com ICD mínimo de $3 \text{ m}^2/s$ e máximo de $11 \text{ m}^2/s$. Apesar dos mapas de médias anuais de chuva serem úteis como indicadores do umedecimento médio por chuva dirigida em uma parede e os danos por umidade repetidos em construções (RYDOCK, 2006), eles apenas fornecem dados quanto aos riscos de agressividade do meio no qual a edificação se encontra, não permitindo conhecer qual fachada está mais exposta. Estudos mais específicos, considerando medições do vento em oito direções, foram desenvolvidos por Giongo et al. (2011) e Melo Júnior e Carasek (2011) para as cidades de Florianópolis e Goiânia, respectivamente.

Giongo *et al.* (2011) citam que Lacy, após estudar 75 eventos de chuvas durante 16 anos (1948-1963) em Garston, Inglaterra, concluiu que $1 \text{ m}^2/s$ (1 ICD) corresponde a 206 mm de

chuva dirigida em uma parede vertical. Henriques (1993) realizou experimentos utilizando pluviômetros fixos nas paredes e posicionados livremente, concluindo que a relação entre o índice de chuva dirigida e a quantidade de água coletada nos pluviômetros foi de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ (1 ICD) para 145 litros/ m^2/hora .

2.2.2.2 Ensaios de durabilidade à ação de chuvas

Os ensaios utilizados para avaliar a durabilidade de alvenarias e/ou de seus componentes quando expostos às intempéries de campo, são geralmente classificados em três categorias: ensaios indiretos, acelerados e de simulação.

Dentre os ensaios indiretos, o precursor e provavelmente o mais amplamente divulgado é o normatizado pela NBR 13554 (ABNT, 2013), desenvolvido com a finalidade de determinar a perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-cimento.

Os ensaios por gotejamento, considerados tanto indiretos como acelerados, associam a profundidade do sulco resultante à erodibilidade do elemento avaliado. De acordo com Heathcote (2002), o primeiro teste de gotejamento foi desenvolvido por Yttrup, Diviny e Sottile, na Universidade de Deakin, Austrália, com o objetivo de criar um teste simples que pudesse ser utilizados por proprietários e, geralmente também construtores, de edificações rurais, para determinar a aptidão do solo de suas propriedades para a confecção de tijolos de adobe. O teste consiste no gotejamento, de 100 ml de água (aproximadamente 14 gotas por minuto) de uma altura de 400 mm sobre a superfície de tijolos posicionados e inclinados a um ângulo de 27° em relação à horizontal, sendo considerada como parâmetro de avaliação a média da profundidade dos sulcos resultantes.

Os ensaios acelerados basicamente consistem em direcionar o fluxo de água sobre a amostra (*Spray Erosion Test*), através de uma ducha com pressão regulável. Reddy e Jagadish (1987), utilizando uma ducha com furos de diâmetro 1,15 mm e densidade de 3,2 furos. cm^{-2} , posicionada a 175 mm e com descarga horizontal, concluíram que nestas condições, um minuto de saída de água com pressão de 70 kPa, corresponde a uma precipitação pluvial de 566 mm. Ola e Mbata (1990) modificaram a posição da ducha permitindo a descarga de água vertical a partir de um chuveiro (\varnothing 100 mm) posicionado a 140 mm de distância do corpo de prova com vazão variando entre 4,16 litros/min e 46,30 litros/min. Considerando a área atingida de 240 cm^2 , a taxa de fluxo mínima adotada corresponde a uma precipitação de 600 mm em 50 anos e a máxima a uma precipitação de 7 000 mm em igual período.

Nos ensaios por simulação são utilizados modelos que representam as reais condições de uso. A câmara desenvolvida por Ogunye e Boussabaine (2002) permite a aplicação da descarga de água em uma área de aproximadamente 1 m^2 , através de um bico aspersor posicionado a uma altura de dois metros dos corpos de prova, os quais ficam apoiados em uma plataforma inclinada de 30° em relação à horizontal. O aspersor, quando em funcionamento, oscila sobre uma área de teste e o número de oscilações, controlado por um sistema mecânico, na unidade de tempo permite regular a vazão da água em função da intensidade de chuva desejada. A simulação de uma precipitação anual de 3 500 mm durante um período de 25 anos consiste em três ciclos de 12 horas de molhagem e 42 horas de secagem em estufa a 60°C sendo a diferença entre a massa seca final e a inicial o parâmetro utilizado para avaliar a degradação.

2.2.2.3 Degradação por ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos, sendo uma reação expansiva, provoca fissuras que aumentam a permeabilidade e facilitam a penetração da água, acelerando o processo de degradação pela perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento (IRASSAR, 2009). Este processo leva a perda progressiva de resistência e massa, escamação e até mesmo a desintegração do concreto.

Basicamente o ataque por sulfatos ocorre pela sua reação com o aluminato tricálcico ($\text{CaO}_3\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A ou celita) do cimento hidratado, entretanto, enquanto o sulfato de cálcio (CaSO_4) apenas reage com o aluminato tricálcico, o sulfato de sódio (Na_2SO_4) reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) livre formando sulfato de cálcio (CaSO_4) que por sua vez irá reagir com os aluminatos. O resultado destas reações é a formação de gesso e etringita, significativamente mais volumosos do que os reagentes iniciais (1,2 a 2,2 vezes) o que provoca expansão e, por conseguinte, fissuras e deterioração (AL-AKHRAS, 2006).

O efeito do metacaulim em reduzir a expansão provocada pelo ataque por sulfato de sódio em concretos foi estudada por Al-Akhras (2006). Corpos de prova prismáticos de concreto ($75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$) contendo 0%, 10% e 15% de metacaulim, após 28 dias de cura em água saturada de cal, foram imersos em solução de 5% de sulfato de sódio por um período de 18 meses. As leituras de dimensões e peso foram executadas a cada dois meses e a solução de sulfato foi substituída sempre que o pH excedeu a 9,5. Os corpos de prova sem metacaulim (0%), ao final do período de exposição, apresentaram 0,45% de expansão

enquanto os corpos de prova para 10% e 15% de metacaulim apresentaram 0,10% e 0,07%, comprovando a eficiência do metacaulim em reduzir a expansão pelo ataque por sulfatos.

Segundo Irassar (2009), o ataque por sulfato de magnésio ($MgSO_4$), formando a taumasita, é considerado o mais agravante pelo fato de reagir diretamente com o silicato de cálcio hidratado, principal agente aglomerante do cimento e, por conseguinte, provocando a dissolução deste e a degradação do concreto. Pinheiro-Alves *et al.* (2007) citam que ambientes de alta umidade relativa (90% a 100%) e uma fonte de íons carbonatos, que pode ser o próprio ar atmosférico, agregados calcários ou a água, são condições propícias a esta patologia.

Skarapoulou *et al.* (2009) avaliaram a influência de adições minerais na resistência ao ataque por sulfato de magnésio imergindo corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 53 mm) de argamassa em solução de 1,8% de $MgSO_4$ por um período de 60 meses. A solução foi substituída a cada três meses. O acompanhamento da degradação foi executado através de inspeção visual, resistência à compressão, massa específica e análises térmicas, e os resultados comparados aos encontrados para corpos de prova de referência, sem adição. Os autores concluíram que o uso de metacaulim e de escória de alto forno, em substituição a 15% da massa do cimento, aumentou a resistência de argamassas ao ataque por sulfatos, quando comparadas a argamassas com pozolanas naturais e sem pozolana.

O aumento da resistência ao ataque por sulfato de magnésio com o uso do metacaulim, também foi comprovado por Vu, Stroeven e Bui (2001) em pesquisa que avaliou corpos de prova prismáticos com dimensões de 100 x 100 x 100 mm mergulhados em solução de 2% de $MgSO_4$ por um período de 360 dias. Foram analisados os seguintes percentuais de substituição da massa do cimento por metacaulim: 0%, 10%, 20% e 30%, e a solução trocada a cada duas semanas nos primeiros dois meses e trocada mensalmente durante o período restante do teste. Foi avaliada a resistência à flexão após os períodos de 28, 90, 150, 240 e 360 dias sendo os resultados comparados aos encontrados para corpos de prova de referência imersos em água por igual período. Os autores concluíram que, em ambientes de alta concentração de sulfatos (áreas costeiras, onde o ambiente pode ser considerado representativo), 20% de substituição do cimento por metacaulim em concretos podem promover melhores resultados de resistência à flexão.

Existem ainda as patologias decorrentes das reações químicas que ocorrem entre agregados reativos (calcários, quartzo, vidro vulcânico) e os álcalis do cimento (Na_2O e K_2O). Na reação álcali-agregado, a mais frequente, a sílica ativa presente nos agregados reage com os álcalis do cimento formando um gel expansivo nocivo ao concreto, pois, ao provocar

fissuras, reduz a resistência e a durabilidade (FIGUERÔA e ANDRADE, 2007). Entretanto, tais patologias não serão abordadas neste trabalho por entender-se que dificilmente podem ocorrer em um sistema de produção industrial, como é o caso dos blocos de concreto, onde existe seleção de matérias-primas.

2.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Carvalho (2008), em estudo sobre a origem do concreto, afirma haverem registros do uso da cal como aglomerante em ruínas na Sérvia datadas de 5 600 a.C. e que os romanos passaram a utilizá-la a partir de 600 a.C. Segundo Sabir *et al.* (2001), além da descoberta de que cinzas vulcânicas em Pozzuoli combinadas com cal e água produziam um material cimentício resistente, os romanos usaram ladrilhos triturados como pozolana, particularmente em regiões como a Grã-Bretanha, onde cinzas vulcânicas não eram disponíveis.

A terminologia “materiais pozolânicos” ou simplesmente “pozolanas” se aplica a todo material que, apesar de no seu estado natural não possuir atividade aglomerante, na presença de cal (hidróxido de cálcio) e água desenvolve atividades cimentícias. Domingos Vandelli, notório cientista italiano do século XVIII, em documentos estudados por Sinner (2011) já citava a importância do uso de pozolanas:

“... nestes montes se acha outra espécie de lava cinzenta com glóbulos brancos, e quasi desfeita, que vem a fazer o que se chama de saibro; o qual he uma especie de pozzolana muito estimada para edificar debaixo da água.”

De acordo com Santos (2006), o uso de pozolanas em concretos e argamassas de cimento Portland proporciona as seguintes características:

- i. redução do calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento) por reações atérmicas (reação pozolânica);
- ii. estabilização do hidróxido de cálcio livre e formação de silicatos de cálcio hidratados mais resistentes ao ataque ácido;
- iii. redução do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo os efeitos danosos causados pelo ataque por cloretos e sulfatos, contribuindo para inibição da reação álcali-agregado;
- iv. devido às contribuições acima citadas, as pozolanas contribuem diretamente para a durabilidade de concretos e argamassas, principalmente quando expostos a ambientes agressivos.

O uso de materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento Portland, reduz também os impactos ambientais causados tanto pela extração de recursos naturais, como pelo consumo energético da indústria cimenteira, uma vez que esta é responsável por cerca de 5% a 8% das emissões globais de CO₂ na atmosfera (ALI, SAIDUR e HOSSAIN, 2011). Segundo dados disponibilizados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o consumo mundial de cimento Portland em 2010 foi de 3,3 bilhões de toneladas, sendo a China responsável por 57,6% desse total. O Brasil consome 60 milhões de toneladas o que representa 1,8% da produção mundial.

De acordo com Sabir *et al.* (2001), o cimento Portland hidratado, libera hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) em até 28% da sua massa inicial. O material pozolânico adicionado reage com o Ca(OH)₂ livre resultando em silicatos de cálcio hidratados adicionais, reduzindo a porosidade e aumentando assim a resistência e durabilidade de concretos e argamassas.

A NBR 12653 (ABNT, 1992) classifica as pozolanas como naturais (materiais de origem vulcânica ou sedimentar) ou artificiais (argilas calcinadas, cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral). Entretanto, Souza Santos (1998b) considera as argilas como pozolanas naturais, apesar de ser necessária a calcinação para que as mesmas possam desenvolver atividade pozolânica, recomendando ainda que o termo pozolana artificial deveria ser reservado apenas a subprodutos industriais.

As exigências químicas e físicas especificadas pela ABNT para materiais pozolânicos estão descritas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Requisitos físicos e químicos de materiais pozolânicos de acordo com a ABNT

Propriedades			Classes de material pozolânico		
			N ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	E ⁽³⁾
Químicas	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ [% mín.]		70,0	70,0	50,0
	SO ₃ [máx.]		4,0	5,0	5,0
	Teor de umidade [% máx.]		3,0	3,0	3,0
	Perda ao fogo [% máx.]		10,0	6,0	6,0
	Álcalis disponíveis em Na ₂ O [% máx.]		1,5	1,5	1,5
Físicas	Material retido na peneira 45 µm (% máx.)		34,0	34,0	34,0
	Índice de atividade pozolânica	Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle [% mín.]	75,0	75,0	75,0
		Com o cal aos 7 dias [Mpa]	6,0	6,0	6,0
		Água requerida [% máx.]	115	110	110

⁽¹⁾ Materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;

⁽²⁾ Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas;

⁽³⁾ Qualquer material que não se enquadre nas classes anteriores.

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 1992).

Pesquisas têm demonstrado que subprodutos industriais podem ser utilizados como material pozolânico agregando valor a rejeitos que, se descartados no meio ambiente, podem causar impactos ambientais.

Pesquisas feitas por Souza *et al.* (2007), Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) e Vasconcelos e Akasaki (2010), comprovaram que o uso de cinzas de casca de arroz em substituição parcial ao cimento proporciona melhor desempenho em concretos e argamassas. Menezes *et al.* (2009a) concluíram que o resíduo de corte de granito pode ser utilizado em até 50% em substituição ao cimento em argamassas sem haver decréscimo na resistência à compressão simples.

Isaia e Gastaldini (2004) estudaram a influência da substituição de 90% do cimento Portland por cinza volante e escória de alto forno em concretos. Os resultados demonstraram que houve redução de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO₂ e aumento de 34% no índice de durabilidade, em relação a concretos de referência sem adição de material pozolânico. O uso de cinza volante e sílica ativa como mistura binária em substituição ao cimento Portland em concretos, foram estudados por Nochaya, Wongkeo, Chaipanish (2010). Os autores concluíram que 10% de substituição da massa do cimento pela mistura estudada, resultou em uma microestrutura mais densa promovendo acréscimo de 45% para a resistência à compressão em relação aos resultados de referência sem a adição.

Glasser, Marchand e Samson (2008) investigaram a microestrutura de concretos secos através de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio e estas foram comparadas com a microestrutura de concretos plásticos. Concluíram que o uso de aditivos minerais, como a sílica ativa e cinzas volantes melhoraram a homogeneidade da pasta de cimento elevando assim as resistências e aumentando a durabilidade.

2.3.1 Metacaulim

O metacaulim é uma pozolana obtida através da calcinação de argilas caulínicas a aproximadamente 500°C, sendo a faixa de otimização entre 700°C e 900°C (SOUZA SANTOS, 1998b). A ativação térmica provoca a perda de hidroxilas da estrutura cristalina, tornando-a amorfa e quimicamente ativa devido à fraqueza e instabilidade das ligações, o que permite a facilidade de reação com o hidróxido de cálcio livre do cimento hidratado. A partir de 980°C ocorre a nucleação da mulita, fracamente cristalizada e praticamente inativa (LUZ *et al.*, 2008).

Souza Santos (1998b) ressalta que a atividade pozolânica do metacaulim varia em função da composição química e mineralógica da argila, do tratamento térmico e do processamento antes do uso, sendo de extrema importância o acompanhamento e controle destes fatores. A importância da pureza das argilas é também citada por Souza (2003) que estipula em 90% o teor mínimo de caulinita, para a produção de pozolanas altamente reativas e por Zampieri (1989) que, adicionando a argilas caulínicas de alta pureza quartzo de mesma granulometria em teores de até 40%, reduziu em 22% a resistência à compressão em ensaios de pozolanicidade com a cal.

Entretanto, Cassagnabère *et al.* (2010) e Siddique e Klaus (2009), relataram que metacaulins obtidos a partir de argilas caulínicas com baixa razão Al_2O_3/SiO_2 (0,36 a 0,71) apresentaram resultados similares quanto à resistência à compressão e retardamento do tempo de pega, quando utilizados em substituição parcial ao cimento em concretos. Os autores encontraram resultados superiores aos de corpos de prova de referência, sem metacaulim, porém, inferiores aos encontrados para metacaulins obtidos a partir de caulins de alta pureza ($Al_2O_3/SiO_2 = 0,95$). O ideal é que se obtenha um material com reatividade suficiente que justifique o processamento, sendo sugerido por alguns autores que o metacaulim seja classificado em alta, média e baixa reatividade.

O consumo de energia exigido na calcinação das argilas reduz em 33% a energia utilizada para fabricação do clínquer e a emissão de CO_2 durante a calcinação, devido aos baixos teores de carbonatos na composição química das argilas (ALI, SAIDUR e HOSSAIN, 2011).

Os requisitos físicos e químicos do metacaulim de alta reatividade são especificados pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010) e estão descritos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Requisitos físicos e químicos do metacaulim

Componente	Unidade	Limite
SiO_2	%	$\geq 44,0$ e $\leq 65,0$
Al_2O_3	%	$\geq 32,0$ e $\leq 46,0$
CaO +MgO	%	$\leq 1,5$
SO_3	%	$\leq 1,0$
Na_2O	%	$\leq 0,5$
Equivalente alcalino em Na_2O	%	$\leq 1,5$
Umidade	%	$\leq 2,0$
Perda ao fogo	%	$\leq 4,0$
Retido na peneira ABNT 325	%	$\leq 10,0$
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	$MgCa(OH)_2 / g_{material}$	≥ 750
Área específica B.E.T. (opcional)	$m^2 \cdot g^{-1}$	≥ 15

Tão importante quanto a composição química e mineralógica, a granulometria do metacaulim influencia diretamente a intensidade da atividade pozolânica, sendo tal afirmação comprovada por Cordeiro e Dèsir (2001) os quais, analisando diferentes metacaulins, concluíram que os que apresentaram maior área específica, apresentaram também maiores valores para os índices de atividade pozolânica com o cimento e a cal.

A excessiva aglomeração normalmente existente nas argilas após o processo de calcinação e também a presença de minerais de extrema dureza que não sofrem influência durante a calcinação, como o quartzo, torna necessária e de extrema importância a etapa de moagem no processamento do metacaulim (SOUZA, 2003). Por outro lado, a calcinação do material não moído, ou seja, com partículas de maiores dimensões, pode acarretar falta de homogeneidade na distribuição de calor e, por conseguinte, amorfização heterogênea do material e baixos resultados de pozolanicidade. Para que seja utilizada como adição ou em substituição parcial ao cimento Portland é necessário que a pozolana apresente granulometria semelhante ou inferior a este.

Souza (2003) ao avaliar a moagem de argilas caulínicas utilizando quatro tipos de moinhos: moinho de bolas horizontal, moinho de bolas vertical, moinho de molas e moinho de discos, constatou que tais moinhos não foram adequados para a moagem do material dificultando a obtenção da granulometria média desejada, $D_{50} \cong 3\mu m$.

A moagem de materiais, com a finalidade de atingir faixas granulométricas inferiores a 10 μm é denominada moagem ultrafina e, nesta faixa, os moinhos com carga moedora não são adequados para materiais lamelares, que é o caso da caulinita (WELLENKAMP, 1999). De acordo com o autor, os moinhos indicados para a moagem ultrafina são os moinhos de choque, nos quais a fragmentação do material é obtida quando as partículas, aceleradas com rotores ou jatos de gás, chocam-se com outras partículas princípio este denominado de moagem autógena. Através deste processo materiais friáveis ou cristalinos podem ser reduzidos a partículas de 10 μm a 1 μm , proporcionando também a vantagem de não haver contaminação pela utilização de carga moedora.

2.3.1.1 Influência do metacaulim nas propriedades do concreto

De acordo com Cassagnabère *et al.* (2010) e Siddique e Klaus (2009), o uso do metacaulim em concretos proporciona refinamento da estrutura porosa, aumentando a resistência à compressão e flexão e ao ataque por sulfatos, reduzindo os efeitos da reação álcali-agregado e do potencial de eflorescência e assim, aumentando a durabilidade.

A natureza e o processamento do metacaulim, teor de substituição e tempo de cura, assim como o tipo de cimento utilizado são fatores que irão influir no seu desempenho como material pozolânico. Os teores de substituição irão depender tanto do nível de reatividade, ou seja, do índice de pozolanicidade do metacaulim, como do tipo de cimento utilizado e do grau de hidratação, pois deles irá depender a quantidade de Ca(OH)_2 liberado. Devido a esses fatores, foram encontrados, na literatura consultada, valores diferentes para teores de substituição e idades para conclusão da atividade pozolânica.

Para Barata e Angélica (2012), as partículas extremamente finas do metacaulim atuam como pontos de nucleação para formação do hidróxido de cálcio e posteriormente reagem com este produto da hidratação do cimento, logo é de extrema importância a etapa de micronização no processamento do metacaulim. Afirmam ainda que, independente do teor de substituição, a atividade pozolânica máxima ocorre entre 7 e 14 dias.

Siddique e Klaus (2009) relatam que a expansão causada pela reação álcali-sílica pode ser controlada com o uso de metacaulim em teores entre 10% e 15% em substituição ao cimento em concretos. Após acompanhar a evolução da reação em corpos de prova por um período de dois anos, os autores constataram que o concreto com metacaulim apresentou expansão 97% menor que a verificada em concretos de referência, ambos em mesmo ambiente de cura.

Oliveira *et al.* (2006), acompanharam, através da avaliação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica, a evolução da estrutura porosa em argamassas com diferentes teores de substituição do cimento por metacaulim (10%, 20%, 30% e 40%). Eles constataram que o aumento do teor de substituição, aumentou a resistência à compressão e reduziu a velocidade de propagação, comprovando a mudança na estrutura porosa que se tornou mais densa.

Rosignolo e Oliveira (2006) estudaram as modificações provocadas pela substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural, avaliando as resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral, e absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura. Todas as propriedades avaliadas apresentaram resultados em valores até 10% melhores do que os concretos de referência, sem adição.

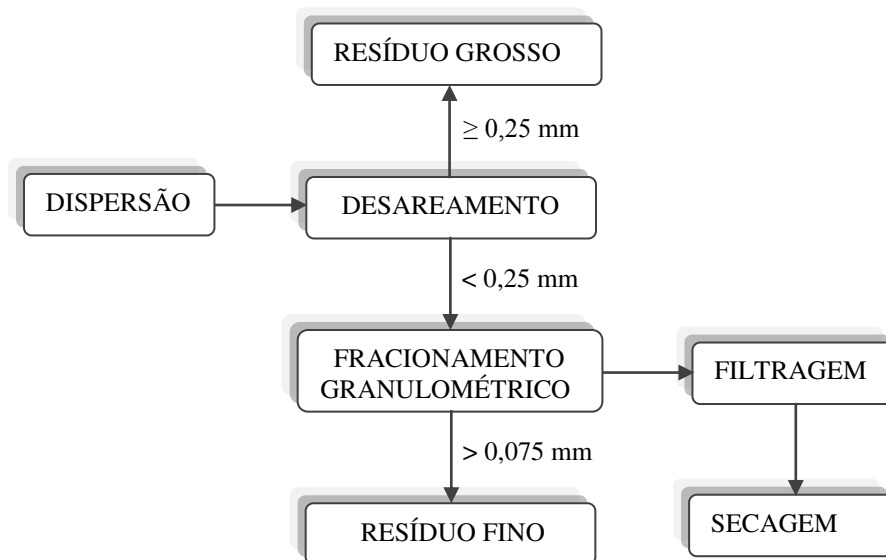
O uso do metacaulim em concreto seco foi estudado por Cassagnabère *et al.* (2010) através de ensaios em laboratório e validação dos resultados através de ensaios em escala natural executados em fábrica de pré-moldados. Concluíram que o uso do metacaulim em teores de 25% da massa do cimento não alterou a resistência dos concretos, podendo ser usado pra reduzir o consumo do cimento.

2.4 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE CAULIM

Em seu estado natural o caulim, quer seja residual ou sedimentar, não atende às especificações de mercado, geralmente apresentando impurezas em sua composição que podem prejudicar as suas propriedades. Para que possa ser utilizado industrialmente é necessário que seja beneficiado, processo este em que são retiradas as impurezas e, dependendo do fim a que se destina, são acrescentadas substâncias que tornam o caulim adequado ao uso.

O beneficiamento pode ser feito através de dois processos: por via seca e por via úmida, sendo este o mais difundido e que basicamente consiste nas etapas de dispersão, desareamento, fracionamento em hidrociclone ou centrífuga, floculação seletiva, alveamento químico, filtragem e secagem (LUZ *et al.*, 2008). A Figura 2.10 apresnta as etapas do beneficiamento de caulim.

Figura 2.1 - Fluxograma das etapas do beneficiamento do caulim.



Fonte: Adaptado de Luz *et al.* (2008)

Em função do tipo do depósito de caulim, o beneficiamento gera proporções de rejeitos (fino e grosso) diferentes. Enquanto no beneficiamento de caulins secundários no estado do Pará o total de rejeitos representa 34% do caulim bruto, sendo apenas 8% de rejeito grosso (BARATA e ANGÉLICA, 2012), em caulins primários no estado da Paraíba estima-se o volume entre 80% e 90% do volume explotado (REZENDE *et al.*, 2008).

Além da gênese, outro fator de extrema relevância na geração de resíduos é o tipo de lavra com a qual o caulim é explorado. Devido às condições mecânicas da rocha a lavra

geralmente é feita a céu aberto, porém enquanto na mineração Horii (Mogi das Cruzes-SP) é utilizado desmonte hidráulico e a lavagem para desareamento totalmente mecanizada (LUZ *et al.*, 2008), os caulins da província pegmatítica Borborema-Seridó são lavrados e beneficiados de maneira rudimentar, acarretando não só significativas perdas de minério como também volume excessivo de rejeitos (SILVA *et al.*, 2010).

Na província Borborema-Seridó, localizada em região de clima semi-árido, a carência de recursos hídricos impede que seja feito o desmonte hidráulico pré-selecionando o minério que vai para o beneficiamento. Tal dificuldade em utilizar recursos tecnológicos mais adequados é agravado pelo fato de que a região de maior produção de caulim está inserida em uma reserva garimpeira, sendo as atividades extrativas minerais caracterizadas pela informalidade, pelo uso de técnicas inadequadas, baixa produtividade e baixo valor agregado.

A Portaria nº. 1.524, de 27 de outubro de 1982, do Ministério das Minas e Energia (MME, 1982), teve como principal motivação evitar conflitos entre mineradores e garimpeiros que vem há muitos anos garantindo a sua subsistência na região, através do garimpo. A atividade garimpeira, porém, vem causando o seguinte problema na gestão dos resíduos: o garimpeiro não beneficia o minério e não tem responsabilidade com o resíduo gerado no beneficiamento e as empresas de beneficiamento ficam impossibilitadas de remover o resíduo para as cavas de lavras, pois não têm acesso às mesmas (REZENDE *et al.*, 2008).

Não havendo aproveitamento, a quantidade de resíduo é cumulativa tendo sido estimado por Rezende *et al.* (2008), através da observação de imagens de satélite TM-LANDSAT feitas em 2001 e de medições nos locais dos depósitos, em 2 milhões de metros cúbicos constituindo-se, apesar de não apresentar toxicidade, em um grave problema ambiental.

2.4.1 Uso do resíduo de caulim como material pozolânico

Barata e Angélica (2012) e Souza (2003) estudaram o aproveitamento do resíduo do beneficiamento de caulim sedimentar do Pará, como matéria-prima na produção de metacaulim de alta reatividade. Foi utilizado nestas pesquisas o resíduo fino, que corresponde a 26% da exploração do caulim na região e que apresentou relação Al_2O_3/SiO_2 no valor de 0,86, acima portanto do valor de 0,85 citado por Souza (2003), para a célula unitária da caulinita. O metacaulim obtido foi utilizado em substituição a 10% da massa do cimento em concretos, variando o fator $A/(C+M)$ em 0,39, 0,47 e 0,65 e os resultados comparados com concretos de referência sem adição e com adição de sílica ativa. Os resultados de resistência à

compressão dos corpos de prova com metacaulim foram superiores aos com sílica ativa e aos de referência, sendo a absorção capilar semelhante para todas as composições. Os autores concluíram ser possível obter metacaulim de alta reatividade a partir do resíduo estudado.

O uso do resíduo do beneficiamento de caulim primário oriundo da Paraíba como material pozolânico em argamassas foi estudado nas proporções de 50% de resíduo fino e 50% de resíduo grosso, calcinados à temperatura de 600°C por um período de 2 horas, apresentando, índice de atividade pozolânica acima do exigido pela ABNT (CASTRO, 2008). A autora concluiu que o uso de 10% da pozolana estudada, em substituição ao cimento em argamassas, proporciona comportamento mecânico superior ao de argamassas de referência, sem adição, recomendando para futuras pesquisas, que seja analisado o comportamento do resíduo calcinado em temperaturas entre 600°C e 800°C. O resíduo fino de caulim da mesma procedência, de acordo com estudos desenvolvidos por Ferreira *et al.* (2012), apresentou potencial pozolânico através de ativação alcalina utilizando silicatos de sódio e de potássio.

2.5 ANÁLISE CRÍTICA DO CAPÍTULO

Diante do que foi visto na literatura pesquisada pode-se tomar como pontos de interesse a ser considerados na pesquisa os seguintes itens:

- i. no processamento do resíduo, o intervalo de temperatura de calcinação utilizado foi de 600°C a 800°C, avaliando-se a temperatura ideal que proporcione a destruição da estrutura da caulinita;
- ii. o menor teor de substituição citado na literatura, com resultados positivos, foi de 10% e o máximo de 30%;
- iii. a atividade pozolânica atinge o seu maior índice nos períodos entre 7 e 14 dias, a partir daí continua a haver evolução nas propriedades, porém, em menor velocidade;
- iv. os blocos de concreto, após a moldagem, permanecem na fábrica por um período de no máximo 14 dias, portanto o concreto deve apresentar propriedades adequadas ao uso logo nas idades iniciais;
- v. os agentes de degradação de maior impacto em alvenarias externas são as chuvas dirigidas, sendo possível a execução de ensaios de simulação em laboratório os quais podem também ser utilizados como ensaios de envelhecimento acelerado;
- vi. blocos utilizados em alvenarias externas, expostas a chuvas e radiação solar, estão mais suscetíveis a fissuras e degradação do concreto por lixiviação;

- vii. dentre os agentes químicos o ataque por sulfatos é considerado uma das principais causas de deterioração do concreto, podendo formar compostos expansivos que geram tensões internas que levam a fissuração e degradação. O sulfato de sódio reage com o hidróxido de cálcio na pasta de cimento hidratada, logo, concretos com pozolanas são mais resistentes ao ataque por sulfatos;
- viii. o concreto seco deve ter o máximo de umidade possível dentro dos limites de operacionalidade exigidos pelo processo de moldagem, para que haja quantidade de água suficiente para o processo de hidratação do cimento;
- ix. a massa necessária para cada corpo de prova deverá ser determinada a partir da massa específica de blocos recém-moldados e, através desta, a quantidade de golpes necessários para obter a mesma densidade dos blocos;

3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para que fossem atingidos os objetivos desta pesquisa, cujo foco principal é a avaliação do uso de um material pozolânico em concretos secos, foram determinados quais os fatores intervenientes de maior influência e, dentre eles, os mais adequados para serem utilizados como variáveis independentes mantidas até o final da pesquisa. Assim, como as variáveis independentes, também foram determinadas quais as variáveis de resposta mais adequadas para mensurar os resultados dentro dos objetivos propostos.

3.1.1 Definição das variáveis

Como variáveis independentes foram utilizados:

- i. relação aglomerante/agregados (traço);
- ii. teor de substituição do cimento por resíduo de caulim e
- iii. tempo de cura.

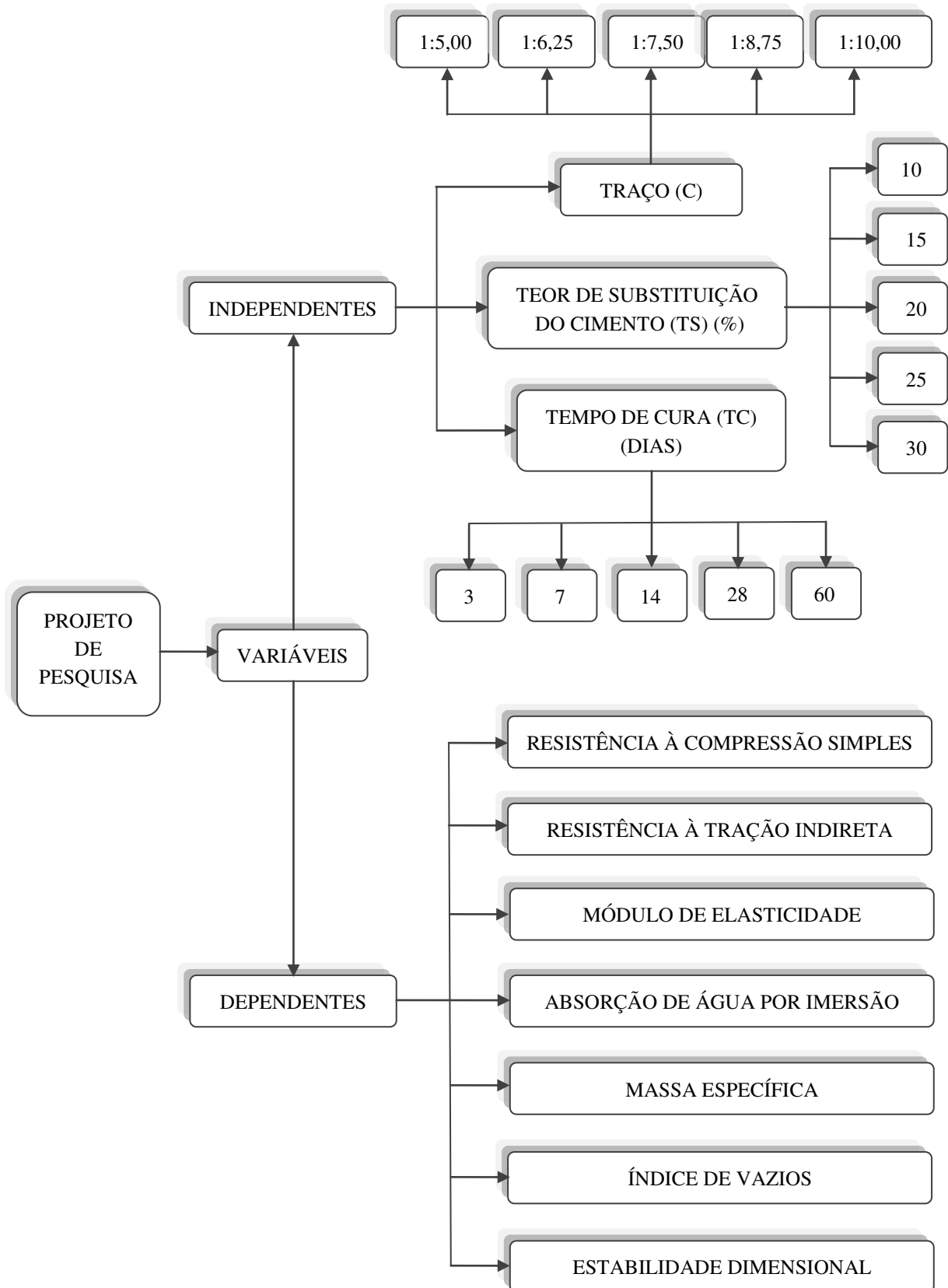
A variação do fator água/cimento, apesar da grande importância no estudo do comportamento de concretos e argamassas, neste trabalho foi fixada em função das necessidades de moldagem.

As variáveis de resposta foram escolhidas em função das propriedades mais representativas relacionadas a blocos vazados de concreto que são as seguintes:

- i. resistência à compressão simples;
- ii. resistência à tração indireta (por compressão diametral);
- iii. absorção de água por imersão;
- iv. estabilidade dimensional;
- v. módulo de elasticidade;
- vi. massa específica e
- vii. índice de vazios.

Na Figura 3.1 as variáveis avaliadas neste trabalho estão descritas sob a forma de fluxograma.

Figura 3.1 - Representação esquemática das variáveis em estudo



3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento Portland

Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CPV ARI, da marca MIZU, fabricado pela MIZU Cimentos Especiais, Baraúna – RN. A escolha deste tipo de cimento justifica-se pelo fato de, além de ser recomendado para a aplicação em elementos pré-moldados de concreto, não possui adições pozolânicas em sua composição evitando que os resultados sejam influenciados pela presença de outro material pozolânico. Os dados de caracterização do cimento, fornecidos pelo fabricante, estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.

Características	Determinações	Valores informados	Especificações NBR 5733 (ABNT, 1991)	
Químicas	Perda ao fogo [%]	4,31	≤ 4,5	
	Trióxido de enxofre (SO ₃) [%]	0,94	≤ 1,0	
	Óxido de cálcio (CaO) livre [%]	3,37	≤ 3,5	
		2,16	-	
Finura	Retido #200 [%]	0,15	≤ 6,0	
	Retido #325 [%]	2,80	-	
	Área específica Blaine [m ² /g]	0,42	≥ 0,3	
Físicas	Massa específica [g/cm ³]	3,13	-	
	Expansibilidade a quente [mm]	1,00	≤ 5,0	
	Consistência normal [%]	29,60	-	
	Tempo de início de pega [min]	150	≥ 60	
	Tempo de fim de pega [min]	210	≤ 600	
Mecânicas	Resistência à compressão [Mpa]	1 dia	21,67	≥ 14
		3 dias	36,15	≥ 24
		7 dias	40,47	≥ 34

Fonte: MIZU Cimentos Especiais. www.mizu.com.br

3.2.2 Metacaulim

Nesta pesquisa, foi utilizado o metacaulim de alta reatividade, marca Metacaulim HP, fabricante Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, São Paulo e doado pela J.A.R. Premoldados, Campina Grande, Paraíba. Na Tabela 3.2 estão descritos os dados de caracterização fornecidos pelo fabricante e, adicionalmente a estes dados, também foi realizada análise por difração de raios X.

Tabela 3.2 - Características químicas e físicas do metacaulim de referência

Características	Determinações	Valores informados	Especificações NBR 15894-1 (ABNT, 2010)
Químicas	Perda ao fogo [%]	2,62	≤ 4,0
	Sílica (SiO ₂) [%]	51,57	≥ 44,00 e ≤ 65,00
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) [%]	40,50	≥ 32,00 e ≤ 46,00
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ [%]	94,87	-
	Óxido de sódio (Na ₂ O) [%]	0,08	≤ 0,50
Físicas	Finura		
	Área específica [m ² /g] BET	32,7	Opcional
	Diâmetro médio das partículas	12,40 µm	-
	Massa específica [g/cm ³]	2,65	-
	Umidade [%]	0,60	≤ 2,0
	IAP –Chapelle modificado [47L CaO/g]	771,2	≥ 750,00

3.2.3 Agregados

O agregado graúdo utilizado foi pedra britada, de origem granítica, processada pela Britex Mineração Ltda. localizada no município de Pocinhos, PB, classificada pela NBR 7211 (ABNT, 2009) como Brita “0” e comercializada sob a denominação de cascalhinho. Como agregado miúdo foi utilizado areia quartzosa, oriunda de São Miguel de Taipú, PB e pó de pedra, comercializado pela Britex Mineração Ltda.

3.2.4 Resíduo de caulim

Foram utilizados os resíduos provenientes da primeira etapa de beneficiamento, o desareamento, denominado resíduo grosso (RGC) e os resultantes da segunda etapa de peneiramento, retido na peneira ABNT n° 200 (0,075 mm), denominado resíduo fino (RFC), ambos doados pela empresa de exploração e beneficiamento Caulim Caiçara Ltda., localizada no município de Equador, RN.

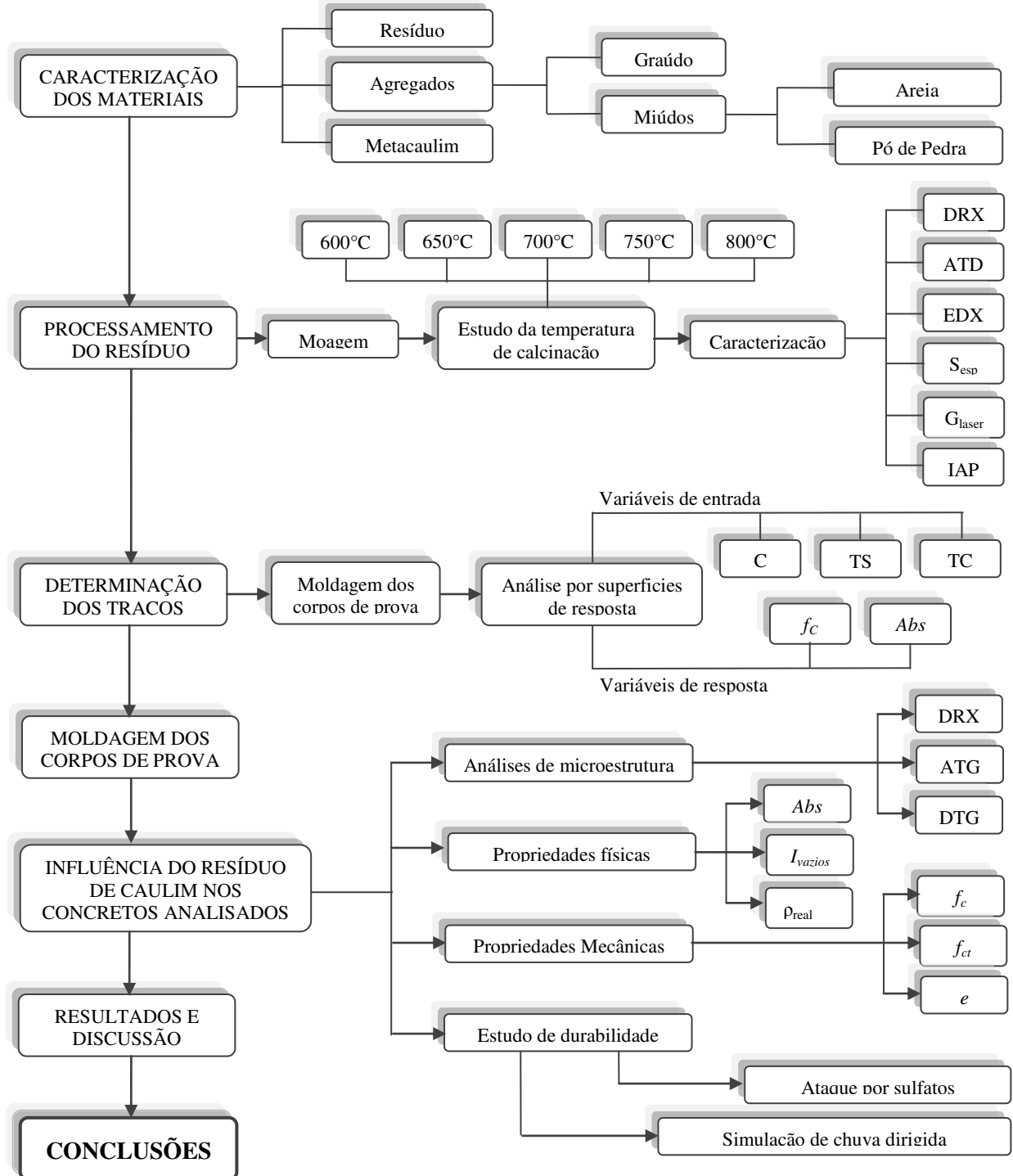
3.2.5 Água

Foi utilizada água potável, fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba para o sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande, PB, no período de outubro de 2011 a março de 2012.

3.3 METODOLOGIA

A abordagem metodológica desta tese está descrita esquematicamente na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Fluxograma das etapas que compõem a fase experimental.



Legenda: DRX – Difração de raios X; EDX – Espectrometria dispersiva de raios X; ATD – Análise térmica diferencial; ATG - Análise termogravimétrica; DTG – Derivada da termogravimétrica; S_{esp} – Área específica; G_{laser} - Granulometria a laser; IAP – Índice de Atividade Pozolânica; C – Teor de cimento; TS – Teor de substituição; C – Tempo de cura; Abs – Absorção de água por imersão; I_{vazios} – Índice de vazios; ρ_{real} – Massa específica real; f_c – Resistência à compressão simples; f_{ct} – Resistência à tração por compressão diametral; e – Módulo de elasticidade.

3.3.1 Caracterização dos materiais

3.3.1.1 Agregados

Devido à limitação do diâmetro máximo de agregados utilizados para blocos vazados, especificada pela NBR 6136 (ABNT, 2008), o agregado graúdo foi passado em peneira ABNT # 3/8” (ϕ 9,5 mm) sendo desprezado o material retido na mesma. O material, antes de ser utilizado foi lavado para retirada do pó, sendo depois seco em estufa (60°C) e armazenado em ambiente de laboratório.

Os agregados miúdos foram passados em peneira ABNT # 4 (ϕ 4,8 mm) para retirada de impurezas e, assim como o agregado graúdo, secos em estufa (60°C) e armazenados em ambiente de laboratório.

Os ensaios de caracterização física dos agregados e respectivas normas estão descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Ensaios para caracterização dos agregados e respectivas normas

Determinações	Método de Ensaio
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máxima característica - DMC [mm]	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária [g / cm ³]	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica [g /cm ³]	NBR NM 53 (ABNT, 2003)

3.3.1.2 Resíduo de caulim

Os ensaios e análises para caracterização física e mineralógica do resíduo de caulim estão descritos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Ensaios para caracterização física e mineralógica do resíduo de caulim

	Determinações	Norma
Físicas	Composição granulométrica por peneiramento	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Análise granulométrica por difração de laser	
	Diâmetro médio das partículas [μ m]	
Mineralógicas	Análise química	
	Difração de raios X	
	Análise térmica diferencial (ATD)	
	Análise termogravimétrica (TG)	

3.3.2 Processamento do resíduo de caulim como pozolana

O resíduo grosso (RGC) foi passado na peneira ABNT # 4 (ϕ 4,8 mm) sendo o material retido, que representa 19% da massa inicial, descartado em virtude de ser composto basicamente por quartzo, material este que reduz a reatividade da pozolana em razão de ser uma fase inerte do ponto de vista pozolânico. Este procedimento não foi necessário para o resíduo fino (RFC). Os resíduos foram utilizados na proporção de 1:1 (50% RGC + 50% RFC) sendo a granulometria da mistura reduzida a 90% inferior a 45 μ m, ou seja, ao limite máximo de 10% retido na peneira ABNT n^o325 (0,044 mm) caracterizando a moagem como ultrafina.

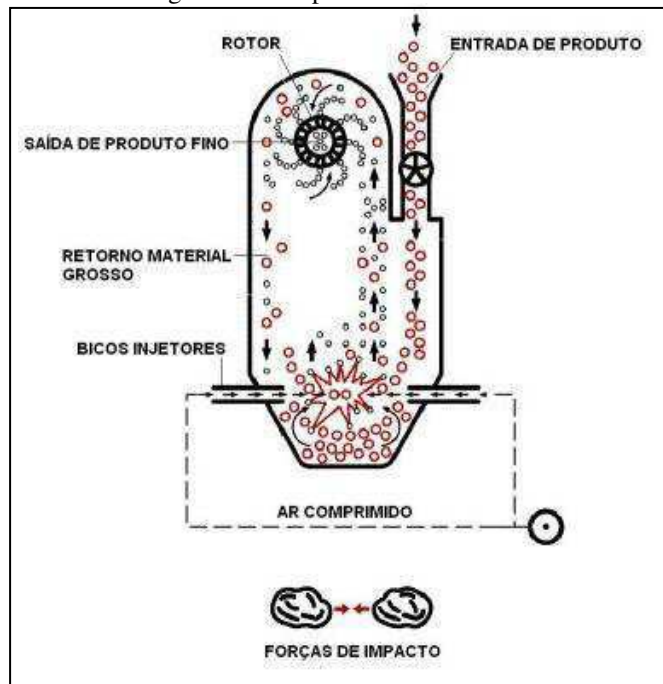
A moagem utilizando moinho de bolas (Fabricante Kohlbach Standard – Mod. 100 L, cap. 5.0 cv) não se mostrou eficiente para a cominuição do resíduo de caulim, o que também foi constatado por Souza (2003), devido à estrutura lamelar da caulinita e da mica, mineral também presente no resíduo. Utilizou-se então o processo de moagem autógena, através de moinho a jatos de ar opostos da marca NOLL, modelo Multino[®] 1270 M/S/M (Figura 3.3), sendo a micronização realizada pela ULTRAFINE Technologies, Indaiatuba, SP.

Figura 3.3 - Moinho utilizado no processamento do resíduo (Fig.3.3a) e desenho esquemático do princípio de funcionamento (Fig.3.3b)

Fig. 3.3a Moinho Multino[®]1270 M/S/M



Fig. 3.3b Princípio de funcionamento



Após a moagem, as amostras foram calcinadas a temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C por duas horas, com evolução de temperatura de 5°C/min e em seguida analisadas através de difração de raios X e análises térmicas (ATD e ATG) para comprovação da completa desidroxilação da caulinita presente no resíduo. O teor de caulinita na base seca, foi obtido dividindo-se a perda de massa termogravimétrica pelo teor de H₂O da fórmula estrutural padrão que é de 13,96% (BATTAGIN e PECCHIO, 2003). A granulometria de cada amostra foi analisada por difração a laser devido ao fato da calcinação poder provocar aglomerações nas partículas, alterando a distribuição granulométrica inicial. O material, após a calcinação, foi embalado em sacos plásticos e armazenado em local protegido de umidade relativa do ar.

Para as temperaturas que apresentaram granulometria mais fina, foi determinado o índice de atividade pozolânica com o cimento seguindo as recomendações da norma NBR 5752 (ABNT, 1992), para complementar a identificação da temperatura ideal de calcinação.

A composição das argamassas utilizadas para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP), descrita na Tabela 3.5, foi calculada de acordo com as especificações da norma NBR 5752 (ABNT, 1992). As diferentes quantidades de água requerida nas argamassas são justificadas por serem os valores de superfície específica diferentes para o cimento e para os resíduos calcinados.

Tabela 3.5 - Composição das argamassas para ensaio de atividade pozolânica

Material		Massa Necessária [g]		
		A (Referência)	B (650)	C (800)
Cimento Portland		312,0	202,8	202,8
Resíduo calcinado	650°C		120,6	
	800°C			120,6
Areia		936,0	936,0	936,0
Água (espalhamento 225 ± 5 mm)		181,5	212,3	231,0

3.3.3 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização recomendados e normatizados pela ABNT estão descritos nos itens relativos a cada material. A seguir serão descritos os ensaios e análises cujos procedimentos não estão especificados por normas, assim como as condições, equipamentos e laboratórios utilizados para sua realização.

3.3.3.1 Análise química

As análises químicas foram determinadas por via úmida e por EDX utilizando espectrômetro marca SHIMADZU, modelo EDX-720. Foram determinados os percentuais de perda ao fogo, resíduo insolúvel e óxidos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O e Fe_2O_3).

3.3.3.2 Difração de raios X

As análises por difração de raios X foram executadas tanto com a finalidade de identificar os compostos cristalinos existentes nas matérias primas como para identificar as mudanças de fase decorrentes da atividade pozolânica. Para realização das análises, utilizou-se difratômetro marca SHIMADZU, modelo XRD-6000, com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, modo “*fixed time*”, com passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 0,6 s, com ângulo de 2θ percorrido de 10° a 55° e velocidade do goniômetro de $2^\circ/\text{min}$.

3.3.3.3 Granulometria a laser

Indicado para análises granulométricas de materiais finos, ou seja, material cujas partículas são inferiores a $75\ \mu\text{m}$, utiliza o princípio de que partículas dispersas em um fluido em movimento causam descontinuidades no fluxo deste fluido que são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas ao tamanho das partículas (PAPINI e LEAL NETO, 2006). O equipamento utilizado foi um granulômetro CILAS, modelo 1064.

3.3.3.4 Análises térmicas (ATD, ATG e DTG)

Para a realização dos ensaios de análises térmicas foi utilizado o equipamento fabricado pela BP Engenharia, modelo RB 3020, sendo as amostras aquecidas até a temperatura de 1000°C com taxa de aquecimento de $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$. Foram realizadas análises termogravimétricas (ATG e DTG) e térmicas diferenciais (ATD), sendo usado como padrão para estas últimas, alumina (Al_2O_3) calcinada.

3.3.4 Ensaios tecnológicos

A fase experimental desta pesquisa foi dividida em três etapas. Na primeira etapa foram determinados os traços, teores de substituição e tempos de cura que seriam utilizados na pesquisa. Na segunda etapa, foi estudada a influência da adição da pozolana obtida a partir do resíduo de caulim nas propriedades físicas e mecânicas de concretos destinados à produção de blocos vazados para alvenarias. Na terceira etapa foi avaliado o efeito que esta adição proporciona aos concretos quando expostos ao ataque por sulfatos e à exposição a chuvas dirigidas (simulação em laboratório).

3.3.4.1 Definição dos traços e teores de substituição avaliados

Como não foram encontrados, na literatura pesquisada, dados sobre o comportamento do concreto seco quando incorporadas pozolanas em sua composição, houve a necessidade de estudar as variáveis em uma quantidade maior de níveis. Estipulou-se então a amplitude máxima de cinco níveis para cada uma, conforme descrito na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Matriz completa para determinação de traços e teores de substituição

Traço	Teor de cimento [%]	Teor de substituição [%]	Tempo de cura [dias]	Ensaios a realizar	Corpos de prova (5 p/ ensaio)
1:5,00	20	10	3	- Resistência à compressão simples; - Absorção de água;	5 x 5 x 4= 100 100 x 5 x 2= 1000
1:6,25	16	15	7		
1:7,50	14	20	14		
1:8,75	11	25	28		
1:10,00	10	30			
Total:					1000

Com o intuito de reduzir o número de corpos de prova, analisando todas as variáveis, foi utilizado o método estatístico de delineamento composto central rotacional (DCCR), o qual, se validado estatisticamente o modelo matemático elaborado, as condições otimizadas poderão ser determinadas através de análise das superfícies de respostas obtidas. O planejamento fatorial, valores reais e codificados das variáveis independentes estudadas estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Valores reais e codificados das variáveis independentes

Variáveis independentes	Níveis				
	$-\alpha$ (-1,68)	-1	0	+1	$+\alpha$ (+1,68)
Teor de cimento (Traço) – C [%]	10 (1:10)	12 (1:8,33)	15 (1:6,67)	18 (1:5,56)	20 (1:5)
Teor de substituição – TS [%]	10	14	20	26	30
Tempo de cura – TC [dias]	3	8	16	24	29

A matriz do delineamento composto central rotacional, especificando os experimentos, está representada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Matriz delineamento composto central rotacional (DCCR)

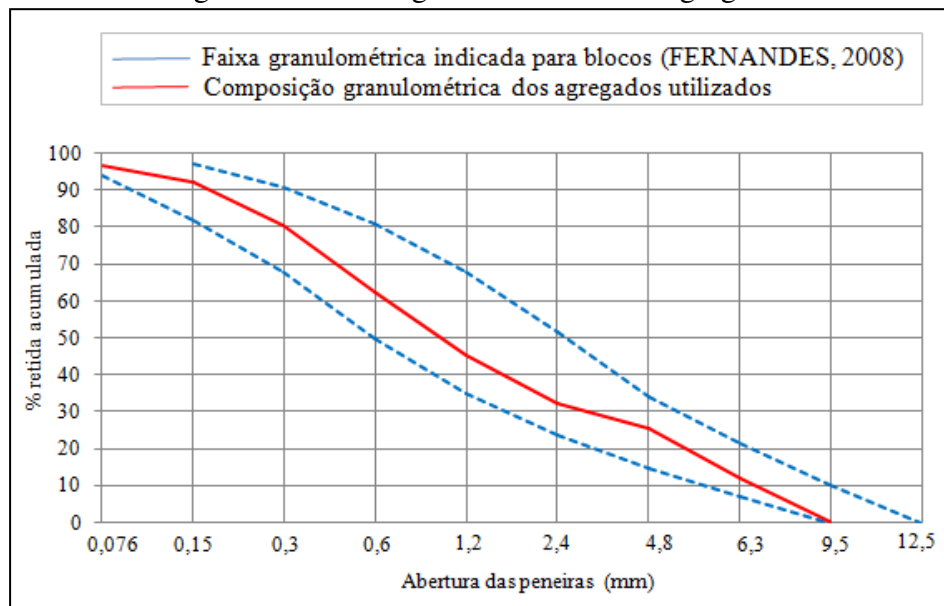
Ensaio	X_1	X_2	X_3	Valores codificados		
				C [%]	TS [%]	TC [%]
1	-1	-1	-1	12	14	8
2	+1	-1	-1	18	14	8
3	-1	+1	-1	12	26	8
4	+1	+1	-1	18	26	8
5	-1	-1	+1	12	14	24
6	+1	-1	+1	18	14	24
7	-1	+1	+1	12	26	24
8	+1	+1	+1	18	26	24
9	-1,68	0	0	10	20	16
10	+1,68	0	0	20	20	16
11	0	-1,68	0	15	10	16
12	0	+1,68	0	15	30	16
13	0	0	-1,68	15	20	3
14	0	0	+1,68	15	20	29
15	0	0	0	15	20	16
16	0	0	0	15	20	16
17	0	0	0	15	20	16

Conforme apresentado na Tabela 3.8, o número de ensaios ficou reduzido a 17 e, portanto, o número de corpos de prova reduzido a 85 por ensaio, perfazendo um total de 170 corpos de prova. Os resultados foram analisados estatisticamente utilizando o programa Statistica 5.0, da StatSoft, em um nível de confiança de 95%. Para a segunda etapa, foram determinadas as propriedades físico-mecânicas de corpos de prova de concreto nos traços e teores de substituição de maior influência, nas idades de 7, 14, 28 e 60 dias através de modelo inteiramente casualizado.

3.3.4.2 Proporcionalamento dos agregados

A composição dos agregados objetivou a obtenção do menor índice de vazios, obtido através de cálculo teórico baseado no índice de vazios de cada agregado, de acordo com a metodologia de Alves (2004), visando com isto alcançar maiores massas unitárias, as quais são diretamente proporcionais à resistência à compressão simples. A granulometria da areia tem influencia direta na textura superficial dos blocos, areias finas proporcionam blocos com superfícies mais lisas não necessitando de revestimento, entretanto, o uso de areias finas pode acarretar redução na resistência mecânica dos blocos para um mesmo consumo de cimento. Foram mantidas para todos os traços as seguintes proporções: 37% de brita, 40% de areia e 23% de pó de pedra, estando dentro da faixa granulométrica recomendada por Fernandes (2008) para uso de agregados em concretos secos que está apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Curva granulométrica dos agregados



3.3.4.3 Massa dos corpos de prova cilíndricos

A massa necessária para moldagem do corpo de prova cilíndrico e, por conseguinte, a quantidade de golpes para compactá-la, foi determinada a partir da massa específica de blocos recém-moldados em fábrica e o volume interno da forma. Foi determinada a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura de blocos e de corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm) moldados com o mesmo concreto, sendo estes ensaios realizados na fábrica de pré-moldados JAR Indústria de Pré-moldados, situada em Campina Grande, PB. Os ensaios foram

realizados com 3 repetições, ou seja, foram moldados 3 blocos e 3 corpos de prova para cada idade sendo considerado como resultado final a média dos resultados encontrados para cada grupo.

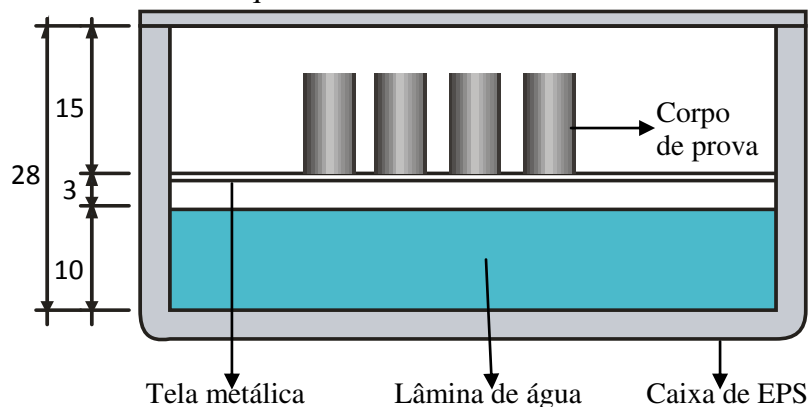
3.3.4.4 Moldagem dos corpos de prova

Os moldes utilizados foram adaptados de Frasson Júnior (2000), sendo mantidas as dimensões (50 mm x 130 mm). Entretanto, o cilindro foi bipartido (originalmente composto por três partes) por entender-se que assim será obtida maior agilidade no processo de moldagem e, para garantir a ortogonalidade à base, foi adaptado um suporte vertical. A haste de compactação obedece às especificações da NBR 7215 (ABNT, 1996). O procedimento de moldagem consistiu em dividir a massa de cada corpo de prova em duas partes iguais e logo em seguida subdividida, compondo quatro partes equivalentes. Após a colocação de cada camada (1/4 da massa) foram aplicados 20 golpes com a haste de compactação, sendo o acabamento final dado com o soquete de nylon comprimido por golpes de martelo de borracha.

3.3.4.5 Método de cura

Com o intuito de simular as condições de cura às quais os blocos serão submetidos na fábrica de pré-moldados, os corpos de prova recém moldados permaneceram as primeiras 24 horas em câmara úmida. O desenho esquemático da câmara úmida utilizada em laboratório está apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Desenho esquemático do sistema de cura úmida em laboratório



Fonte: Adaptado de Frasson Júnior (2002)

O período de cura restante foi em condições do meio ambiente, sendo cada corpo de prova devidamente identificado e embalado em saco plástico hermeticamente fechado para evitar perda de água por evaporação, prejudicando a hidratação do cimento, como também o consumo de hidróxido de cálcio por carbonatação (reação com o CO₂ presente no ar), comprometendo a avaliação de atividade pozolânica.

3.3.5 Metodologia para realização dos ensaios

3.3.5.1 Ensaio Físicos e Mecânicos

Na Tabela 3.9 estão descritos os ensaios realizados e as normas utilizadas para executá-los.

Tabela 3.9 - Ensaio realizados e normas utilizadas para fundamentação

Ensaio	Normas
Resistência à compressão simples	NBR5739 (ABNT, 2007)
Resistência à tração por compressão diametral	NBR7222 (ABNT, 2011)
Absorção de água por imersão	NBR9778 (ABNT, 2005)
Massa específica	NBR9778 (ABNT, 2005)
Índice de vazios	NBR9778 (ABNT, 2005)

i. Resistência à compressão simples (f_c)

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão simples foram executados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007) no que se refere a equipamento, velocidade de carga e preparação dos corpos de prova. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi o Autograph modelo AG-IS, fabricante Shimadzu, com célula de carga de 100 kN, também utilizado para os ensaios de tração por compressão diametral;

ii. Resistência à tração por compressão diametral (f_{tc})

Foram realizados conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011) para a velocidade de carga e posicionamento dos corpos de prova, sendo que, para cálculo foi considerada a recomendação de Süsskind (1980, p. 16) de que, para compensar as tensões de compressão existentes nos bordos do cilindro, deve-se aplicar um coeficiente de correção. A Equação 3.1, relação apresentada na NBR 7222 (ABNT, 2011), considera que as tensões de tração são constantes em toda a seção transversal do cilindro.

$$f_{tc} = \frac{2P}{\pi dl} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Em que:

P - força máxima aplicada no ensaio;

d - diâmetro do corpo de prova e

l - comprimento do corpo de prova.

Aplicando o coeficiente de redução sugerido por Süssekind (1980, p16) tem-se a Equação 3.2, que foi utilizada para obtenção dos resultados.

$$f_{tc} = 0,55 \cdot \frac{P}{dl} \quad \text{Eq. 3.2}$$

As amostras para as análises por difração de raios X e análises térmicas (ATD, ATG e DTG) foram obtidas dos corpos de prova rompidos nos ensaios destrutivos, sendo o material cominuído a um diâmetro inferior a 76 μm ;

iii. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade das composições estudadas foi calculado em função da resistência à compressão e massa específica, utilizando-se a equação recomendada por Neville (1997) para concretos com massa específica entre 2 300 e 2 500 kg/m^3 (Equação 3.3):

$$E_c = 43 \cdot \rho^{1,5} \cdot f_c^{0,5} \cdot 10^{-6} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Em que: f_c – resistência à compressão (MPa);

ρ – massa específica (kg/m^3)

iv. Absorção de água por imersão

Neste ensaio foi determinado o aumento de massa ocorrido nos corpos de prova, decorrente da penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa seca, sendo procedimento descrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Sendo a água um dos principais agentes de degradação do concreto, concretos com menores taxas de absorção provavelmente apresentarão maior durabilidade;

v. Índice de vazios

Executado em conformidade com a NBR 9778 (ABNT, 2005), este ensaio objetivou determinar o percentual de volume de poros permeáveis em relação ao volume total do corpo de prova. Concretos e argamassas com adição de material pozolânico tendem a

apresentar refinamento na estrutura porosa e, conseqüentemente, menor volume de poros permeáveis;

vi. Massa específica

É assim denominada a relação entre a massa do corpo de prova seco e o seu volume, sendo excluídos os poros permeáveis, portanto de importância quando se deseja investigar a atividade pozolânica de um material.

3.3.5.2 Avaliação da resistência à ação da chuva

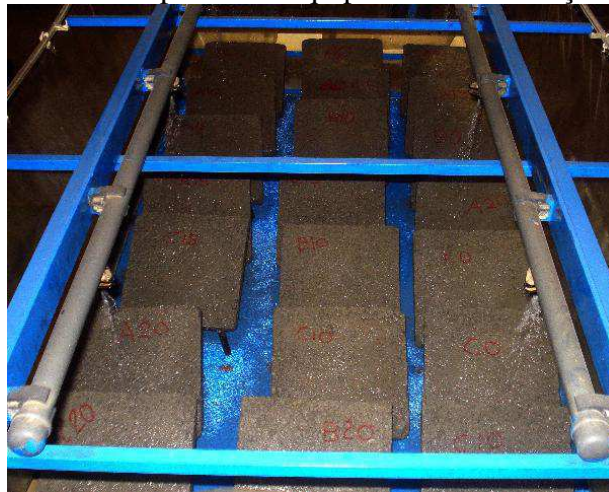
Devido a dificuldades na execução do ensaio utilizando blocos vazados, foram moldadas placas (250mm x 250mm x 25mm) de concretos com as mesmas composições e massas específicas dos utilizados para os corpos de prova cilíndricos, objetivando com isto simular a ação de chuvas sobre uma superfície plana, sendo feita a compactação do concreto no molde através de prensagem mecânica. Na Figura 3.6 pode-se observar as etapas de moldagem e prensagem (Força=20 t) das placas utilizadas para o ensaio de exposição no simulador de chuvas.

Figura 3.6 - Moldagem e prensagem das placas de concreto



As placas, 24 h após desmoldadas, foram identificadas e embaladas em sacos plásticos para evitar a perda de umidade durante os 28 dias de cura, quando então foram dispostas no equipamento de teste, conforme ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Placas expostas no equipamento de simulação de chuvas



Foi utilizado o *Basic Hydrology System – BHS*, fabricado pela *Armfield Corporation*, o qual é composto por um conjunto de oito aspersores pelos quais é distribuído um fluxo de água regulável. A área útil disponível para exposição é de 2m^2 ($1\text{m} \times 2\text{m}$) e o abastecimento de água feito através de um reservatório e uma bomba de circulação, a água aspergida e não absorvida pelas placas retorna através de canaletas e tubulações para o reservatório, reiniciando o processo. A água utilizada foi proveniente do reservatório de águas pluviais existente no laboratório em que foi realizado o ensaio. As placas foram dispostas apoiadas em suportes de forma a ficarem inclinadas 30° em relação à horizontal e elevadas 10mm da base para não impedir o escoamento da água.

Visando minimizar os efeitos causados pela diferença de localização das placas em relação aos aspersores, as linhas e colunas foram alternadas a cada ciclo. Os quantitativos de vazão e tempo de exposição foram determinados com base nos dados de precipitação média anual na Paraíba e considerando 1 ICD equivalente a $145\text{ l/m}^2/\text{h}$, o que corresponde a uma precipitação de 14mm . Na Tabela 3.10 estão descritos os valores assumidos para a execução do ensaio.

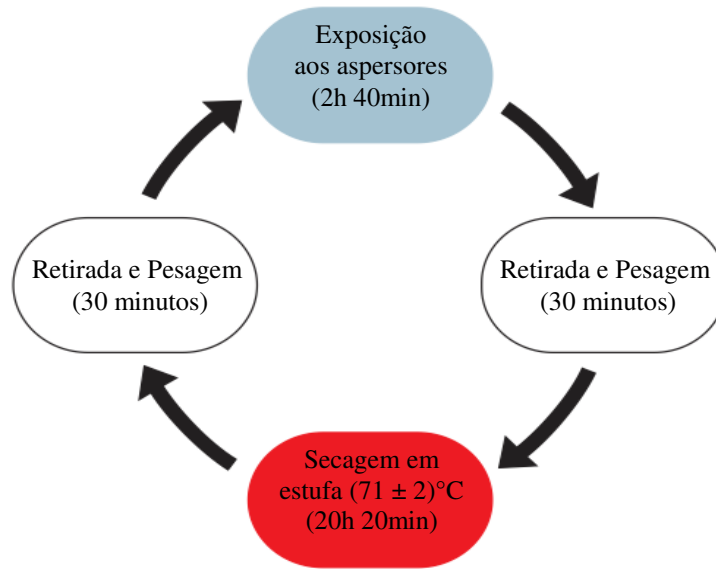
Tabela 3.10 - Parâmetros e valores considerados para o ensaio de simulação de chuvas

Distribuição anual	Mínimo (12%)	Máxima (38%)	Média (25%)(2x)
Índice de Chuva Dirigida – ICD	3	11	7
= [litro/m ² /minuto]	7	27	17
Precipitação média anual – 1300mm*	163	517	340
Área do equipamento [2m ²]	326	1034	680
Tempo [minuto]	45	39	40

*1 mm de precipitação corresponde a 1l/m²

Com a finalidade de padronizar os tempos de exposição optou-se por adotar 160 minutos de exposição e, como vazão, a média de 17 litros/minutos. As placas foram submetidas a vinte ciclos de molhagem e secagem, tendo cada ciclo duração de 24 horas conforme representado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Representação esquemática das etapas de cada ciclo de exposição



Objetivando simular o choque térmico decorrente de precipitações de chuvas sobre alvenarias expostas ao sol durante longo tempo, o que pode favorecer a formação de fissuras, as placas não passaram por resfriamento antes de iniciar o ciclo seguinte. Para análise dos resultados, foram consideradas as leituras aos 5, 10, 15 e 20 ciclos, quando também foram coletadas amostras da água do reservatório para análise química executada no Laboratório de Irrigação e Salinidade (UAEAg/UFCG). As análises da água resultante do ensaio de lixiviação objetivaram a sua classificação como água para irrigação, sendo determinados os índices de condutividade elétrica, acidez e quantidades de cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonatos, bicarbonatos, cloretos e sulfatos.

A variação de massa, calculada segundo a Equação 3.4, foi utilizada como parâmetro para avaliar a resistência à erosão causada pela chuva, sendo os resultados comparados aos encontrados para as placas de referência, ou seja, sem metacaulim e com a adição de metacaulim convencional.

$$V_{ms} = \frac{(m_{si} - m_{sc})}{m_{si}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 3.4}$$

Em que:

V_{ms} – variação de massa seca [%];

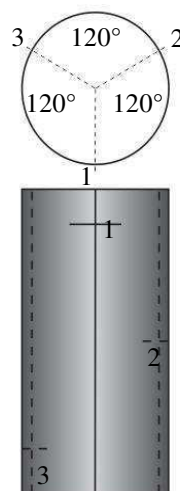
m_{si} - massa seca inicial;

m_{sc} – massa seca no ciclo avaliado.

3.3.5.3 Avaliação da resistência ao ataque por sulfatos

O ensaio para avaliação da variação dimensional decorrente da exposição à solução de sulfatos foi adaptado da NBR 13583 (ABNT, 1996), que prescreve o método para avaliação em barras de argamassa de cimento Portland. Foram mantidas as recomendações quanto ao período de exposição e teor da solução de sulfato de sódio (10%), porém, devido à dificuldade em moldar barras de concreto, foram moldados corpos de prova cilíndricos (50 mm x 100 mm) sendo feitas três medições (mm) de altura para cada corpo de prova, utilizando-se paquímetro digital com duas casas decimais, sendo utilizados 3 corpos de prova para cada composição, ou seja, o ensaio foi realizado. A localização das alturas e dos diâmetros foi marcada com tinta permanente no início do ensaio, para que as medições fossem efetuadas sempre nos mesmos pontos conforme ilustrado na Figura 3.9, sendo também registrados os quantitativos de massa úmida dos corpos de prova a cada leitura de dimensões.

Figura 3.9 - Localização das linhas de referência para medições dos corpos de prova



Os corpos de prova, após 28 d de cura e devidamente identificados, foram imersos em água por 48 h sendo então retirados e, após secagem da água superficial com um pano úmido, feita a leitura inicial das dimensões com duas casas decimais, nas linhas previamente marcadas. Foram então divididos em dois grupos: um grupo foi imerso em solução de sulfato

de sódio (10%) e outro em água (23 ± 2)°C, em recipientes plásticos os quais foram vedados com filme de PVC, com o objetivo de evitar a evaporação (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Corpos de prova imersos em solução de sulfatos



As medições foram efetuadas no início do ensaio e a cada sete dias durante seis semanas, ou seja, até 42 d após a imersão, sendo a expansão individual calculada através da seguinte expressão (Equação 3.5):

$$E_{ind} = \frac{M_{idade} - M_{inicial}}{M_{inicial}} \quad \text{Eq.3.5}$$

Em que: E_{ind} – Expansão individual (%);

$M_{inicial}$ – Média das medições iniciais (mm) em cada corpo de prova;

M_{idade} – Média das medições (mm) efetuadas na idade correspondente em cada corpo de prova.

A expansão resultante é a diferença entre a expansão dos corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio e a dos corpos de prova imersos em água.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

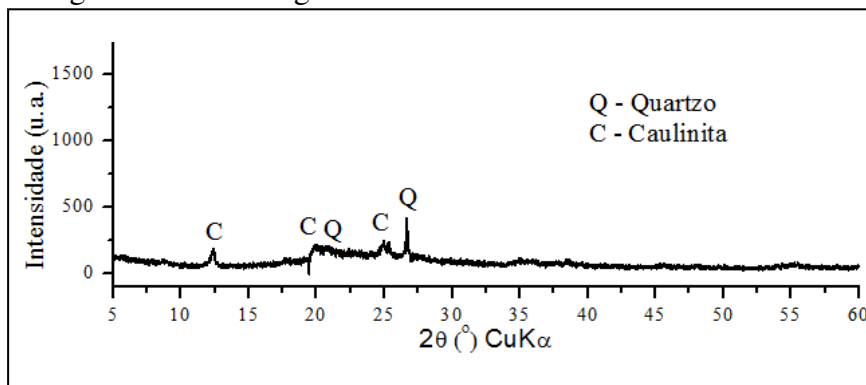
4.1.1 Cimento Portland

Os dados de caracterização do cimento, fornecidos pelo fabricante e utilizados na pesquisa estão em conformidade com a NBR 5733 (ABNT, 1991) a qual especifica os requisitos exigidos para o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Este cimento, além de proporcionar rapidez na evolução das propriedades mecânicas do concreto, não possui aditivos em sua composição, portanto o seu uso não intervém nos resultados da atividade pozolônica do material estudado.

4.1.2 Metacaulim

Na Figura 4.1 pode ser observado o difratograma resultante da análise por difração de raios X do metacaulim industrial utilizado como referência.

Figura 4.1 - Difratograma de raios X do metacaulim industrial



Observando-se a Figura 4.1, verifica-se picos existentes nas distâncias interplanares de 7,138 Å ($2\theta = 12,40^\circ$), 4,387 Å ($2\theta = 20,24^\circ$) e 3,570 Å ($2\theta = 24,94^\circ$), de acordo com as cartas padrão existentes no sistema JCPDS cadastradas no ICDD (*International Center for*

Difraction Data) utilizadas como referência para comparação, estão compatíveis com a presença de caulinita. Resultados relatados por Souza et al. (2007) e Nobre e Acchar (2010), também identificaram caulinita utilizando iguais referências de distâncias interplanares. A existência ainda de vestígios de caulinita pode estar relacionada à distribuição inadequada de temperatura durante a fase de calcinação, demonstrando a importância do acompanhamento desta fase. Também foram identificadas fases referentes ao quartzo, nas distâncias interplanares de 4,218 Å ($2\theta = 21,06^\circ$) e 43,346 Å ($2\theta = 26,64^\circ$), mineral este que é considerado inerte com relação à atividade pozolânica.

4.1.3 Agregados

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Determinações		Resultados obtidos								
Abertura da peneira [mm]	Composição granulométrica	Brita		Areia		Pó de pedra				
		Massa retida [%]	Indiv.	Acum.	Massa retida [%]	Indiv.	Acum.	Massa retida [%]	Indiv.	Acum.
9,5		0,60	0,60	-	-	-	-	-	-	-
6,3*		30,54	31,14	0,96	0,96	-	-	-	-	-
4,8		34,65	65,79	1,75	2,71	0,42	0,42			
2,4		12,60	78,39	3,90	6,61	2,91	3,33			
1,2		5,58	83,97	14,75	21,36	21,47	24,80			
0,6		3,81	87,78	27,77	49,13	19,53	44,33			
0,3		3,25	91,03	32,02	81,15	17,66	61,99			
0,15		3,48	94,51	16,50	97,65	17,08	79,07			
0,074*		2,78	97,29	2,14	99,79	12,19	91,26			
DMC** [mm]			9,50		4,80		2,40			
Módulo de finura (MF)			5,02		2,59		2,14			
Massa unitária [g / cm ³]			1,54		1,46		1,43			
Massa específica [g / cm ³]			2,67		2,59		2,69			
Teor de material pulverulento [%]			-		0,21		8,74			
Teor de umidade [%]			0,10		0,22		0,10			

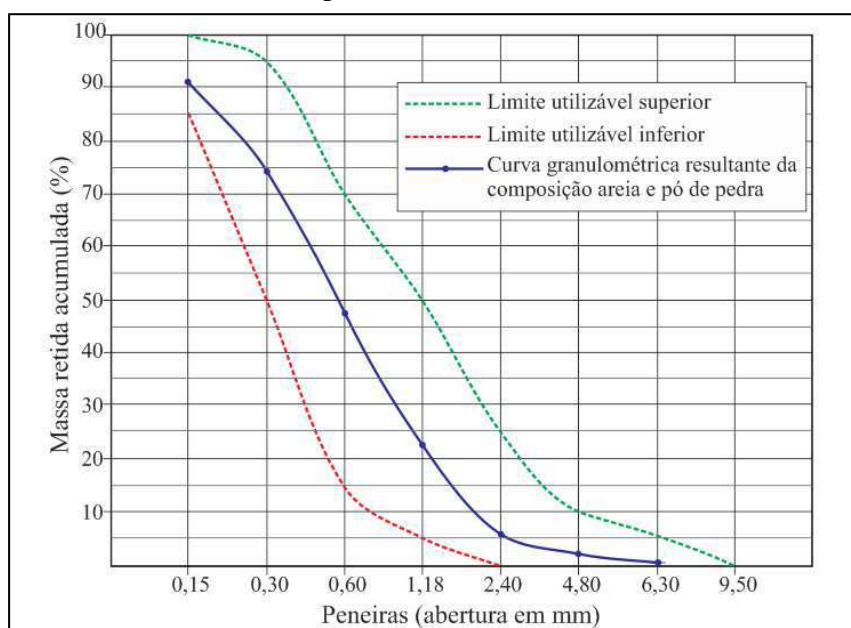
* Não foi incluído no cálculo do módulo de finura

** Diâmetro máximo característico

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) o agregado graúdo é classificado segundo a sua granulometria, como Brita 0 com dimensão máxima característica (DMC) de 9,5 mm, atendendo, portando, a recomendação da NBR 6136 (2008) de que a dimensão do agregado graúdo não deve exceder a metade da menor dimensão do bloco.

Os agregados miúdos apresentaram resultados de granulometria que satisfazem a NBR 7211 (ABNT, 2009), e a curva granulométrica resultante da composição areia e pó de pedra, ilustrada na Figura 4.2, atende aos limites utilizáveis recomendados por esta norma.

Figura 4.2 - Curva granulométrica da composição de agregados miúdos e limites utilizáveis recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).



Os agregados miúdos apresentaram valores de 2,59 e 2,14 para o módulo de finura da areia e do pó de pedra, respectivamente, estando, portanto, dentro da zona ótima de utilização na qual o módulo de finura pode variar de 2,20 a 2,90.

4.1.4 Resíduo de caulim

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados da análise química do resíduo de caulim grosso (RGC) e do resíduo de caulim fino (RFC).

Tabela 4.2 - Composição química do resíduo de caulim (RGC e RFC)

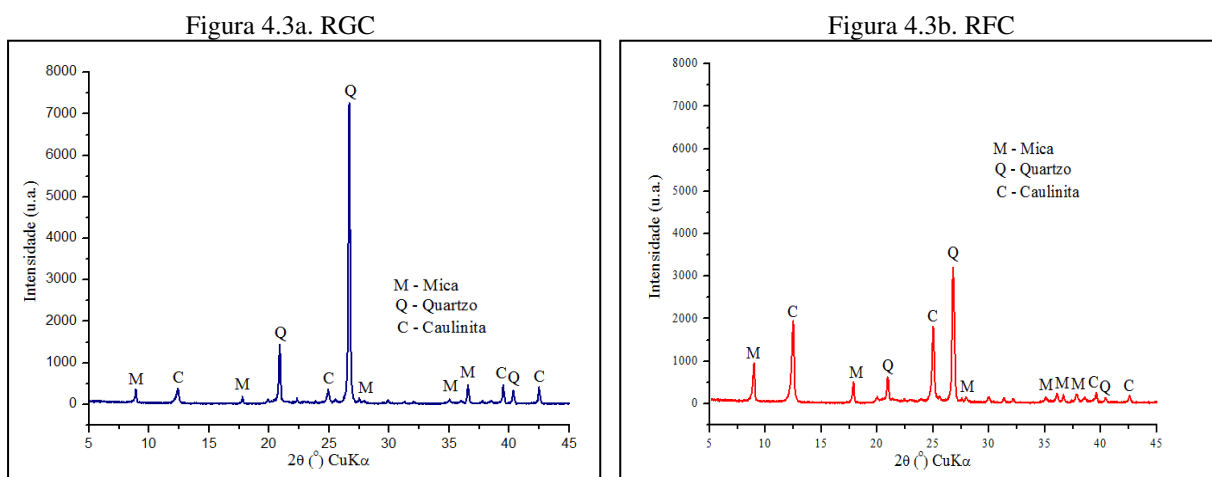
[%]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃
RGC	69,92	15,07	0,64	6,08	traços	traços	traços	0,28	85,63
RFC	51,07	32,54	0,90	5,55	0,11	traços	traços	traços	84,51

Como pode ser observado na Tabela 4.2, os valores encontrados para a soma dos componentes SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ são superiores ao limite mínimo recomendado pela

American Society for Testing and Materials (ASTM C 618, 1991) que é de 70% para que um material possa ser utilizado como material pozolânico. Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 para o RFC atendem aos limites especificados pela norma NBR 15894 (ABNT, 2010) para uso como metacaulim de alta reatividade, segundo a qual $44,0 \leq \text{SiO}_2 \leq 65,0$ e $32,0 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 46,0$, o que não ocorre com o RGC. Entretanto, ambos os resíduos apresentam composição química que atende às exigências da norma NBR 12653 (ABNT, 1992) para o seu uso como material pozolânico. O reduzido teor de ferro (abaixo de 1%), característica dos caulins da província pegmatítica Seridó-Borborema, permitem pouca alteração na coloração do material após a calcinação que, feita a temperaturas abaixo de 900°C , não altera a estrutura do K_2O o qual, apesar de ser considerado um componente fundente com influência na transformação das fases durante o aquecimento (SOUSA, HARIMA e LEITE, 2007), esta influência, de acordo com Soares *et al.* (2010) só ocorre de forma mais significativa a temperaturas acima de 1000°C . Os dados apresentados na Tabela 4.2 estão coerentes com os encontrados por Castro (2008), Menezes *et al.* (2009b) e Anjos e Menezes (2011) em pesquisas que abordaram o estudo de resíduo de caulim de mesma procedência.

Os difratogramas de raios X de ambos os resíduos (RGC e RFC), com a respectiva identificação das fases cristalinas presentes, estão apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Difratogramas de raios X do resíduo grosso (RGC) e do resíduo fino (RFC)



Observando-se a Figura 4.3, verifica-se que ambos os resíduos são constituídos basicamente por quartzo, mica e caulinita e que, o alto teor de SiO_2 , quantificado na análise química, está relacionado principalmente à presença de quartzo e a presença das fases relativas à mica justificam os teores de K_2O . Na Tabela 4.3 estão descritas as principais fases cristalinas, identificadas através de comparação com as respectivas cartas padrão de DRX,

estando coerentes os utilizados por Varela et al. (2009), Menezes (2009b), Paz, Angélica e Neves (2010) e Santana et al. (2012).

Tabela 4.3 - Identificação das fases cristalinas presentes no RGC e RFC

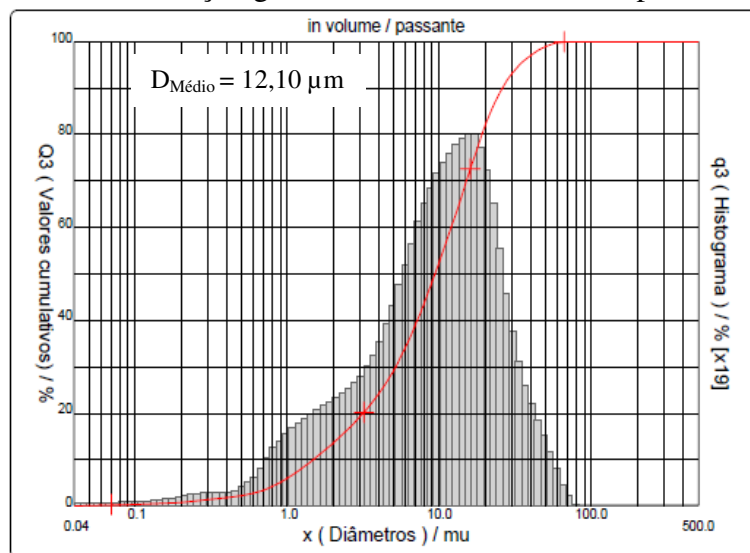
Fase cristalina					
Caulinita		Quartzo		Mica	
Distância interplanar [Å]	2θ [°]	Distância interplanar [Å]	2θ [°]	Distância interplanar [Å]	2θ [°]
7,149	12,38	4,254	20,88	9,958	8,88
3,573	24,92	3,341	26,68	4,988	17,78
2,281	39,50	2,236	40,34	3,246	27,48
2,128	42,48			2,460	36,52

4.2 PROCESSAMENTO DO RESÍDUO DE CAULIM

4.2.1 Caracterização

A curva de distribuição granulométrica dos resíduos (50%RGC +50%RFC), após cominuição em moinhos a jatos de ar opostos, pode ser observada na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Distribuição granulométrica dos resíduos após cominuição



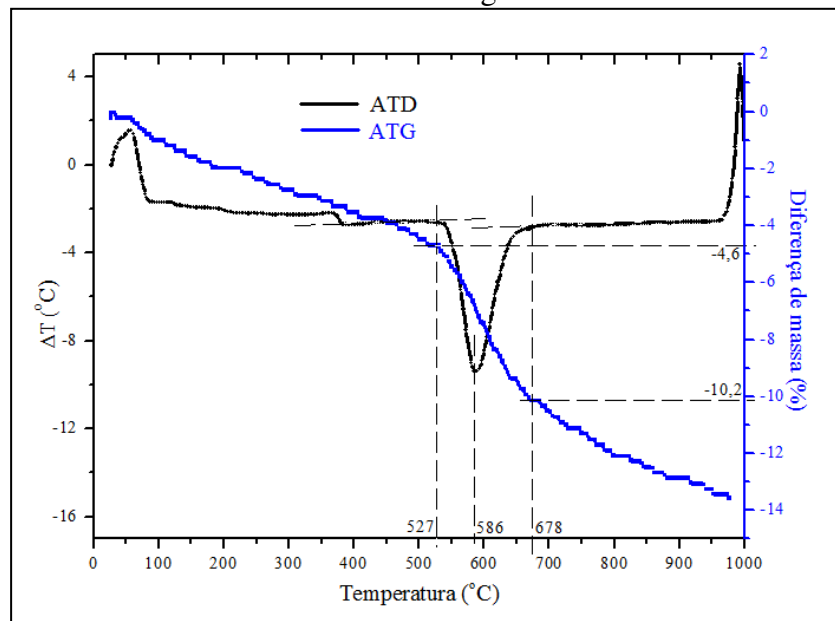
Analisando-se a curva de distribuição do tamanho de partículas do resíduo apresentada na Figura 4.4, verificou-se que esta apresentou comportamento monomodal, com concentração das partículas entre 10 μm e 20 μm . As partículas apresentaram diâmetro médio de 12,10 μm , D_{10} de 1,48 μm , D_{50} de 9,37 μm e D_{90} de 25,88 μm , sendo 1,74% acima de 45

μm (Anexo 1) abaixo, portanto, do limite máximo de 10% especificado pela norma NBR 15894-1 (ABNT, 2010) para o metacaulim de alta reatividade. Com relação ao diâmetro médio, o resíduo, após a cominuição, apresenta valor semelhante ao do metacaulim industrial usado como referência ($D_{50} = 12,4 \mu\text{m}$) e ao metacaulim utilizado por Cassagnabère *et al.* (2010) ($D_{50} = 11,5 \mu\text{m}$) e Vu, Stroeven e Bui (2001) ($D_{50} = 11,8 \mu\text{m}$), comprovando-se assim que o processo de cominuição proporcionou ao resíduo granulometria compatível com o metacaulim industrial utilizado como referência.

A análise de superfície específica, obtida pelo método de B.E.T. (Brunauer – Emmett - Teller), dos resíduos apresentou como resultado $29,73 \text{ m}^2/\text{g}$ acima, portanto, do limite mínimo de $15 \text{ m}^2/\text{g}$ exigido pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010).

As curvas referentes aos resultados das análises térmicas (ATD e ATG) estão apresentadas na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Análises térmicas diferencial e termogravimétrica do resíduo sem calcinação.



A curva de análise térmica diferencial, observada na Figura 4.5, apresentou um pico endotérmico a 586°C , proveniente da presença de hidroxilas da caulinita e dois picos exotérmicos nas temperaturas de $54,4^{\circ}\text{C}$ se prolongando até 110°C (associado à eliminação de água livre e/ou água absorvida) e 990°C , relacionado à recristalização da estrutura da caulinita formando a mulita. Através da curva referente à análise termogravimétrica pode-se determinar

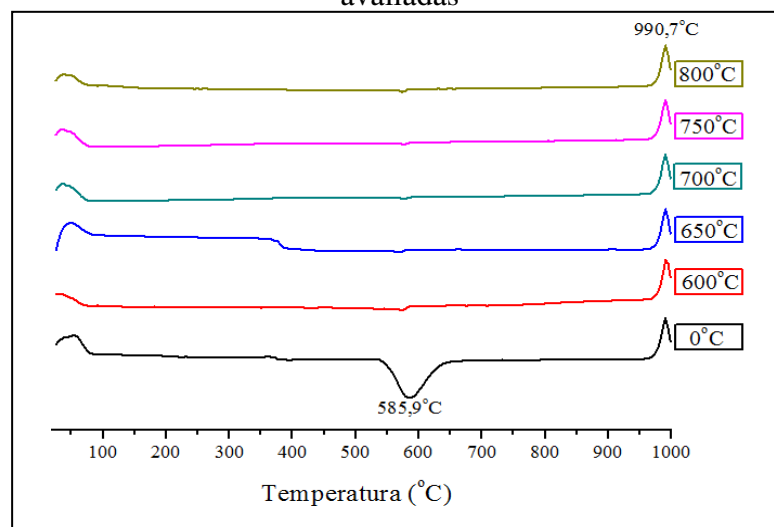
a perda de massa ocorrida durante a desidroxilação da caulinita, ocorrida entre 527°C e 678°C e que representa 5,6% da massa inicial analisada.

O teor de caulinita na base seca obtido dividindo-se a perda de massa termogravimétrica pelo teor de H₂O da fórmula estrutural padrão resultou em 40,12%. Apesar de ser inferior ao relatado por Barata e Angélica (2012) para resíduos de caulim sedimentar (92%), pode-se afirmar que é superior ao relatado por Christófolli (2010) que, em pesquisa sobre argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico, encontrou, para argilas com 31,08% de caulinita e calcinadas a 850°C, índice de atividade pozolânica acima de 100%.

4.2.2 Estudo da temperatura de calcinação

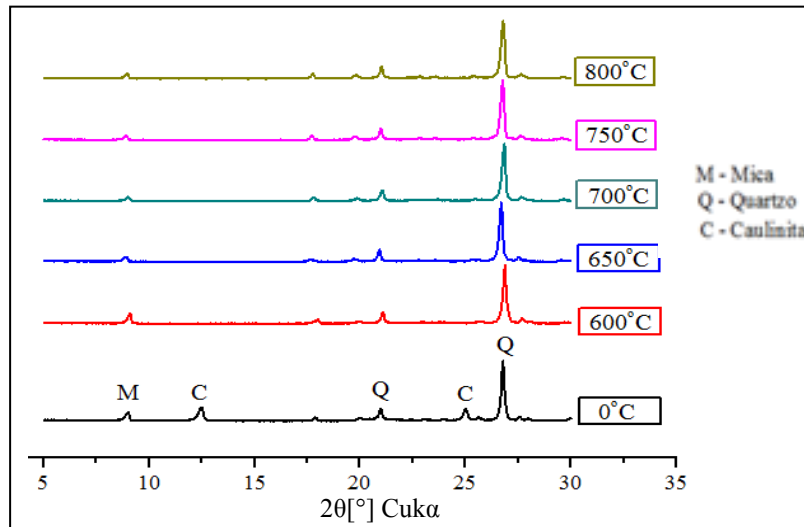
Na Figura 4.6 estão representadas as curvas resultantes da análise térmica diferencial das amostras calcinadas a 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C, e sem calcinação (0°C).

Figura 4.6 - Análise térmica diferencial (ATD) dos resíduos após calcinação nas temperaturas avaliadas



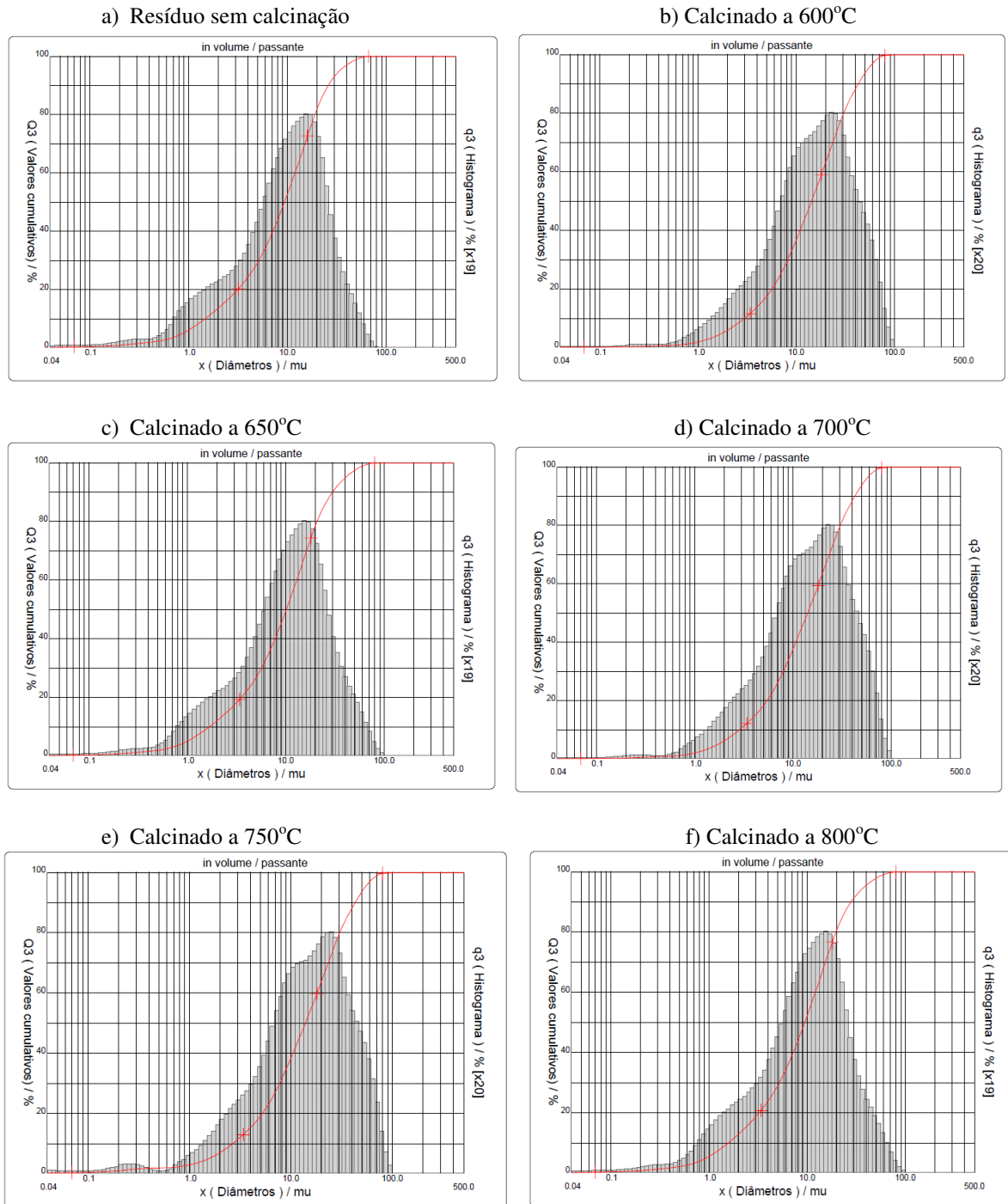
Verifica-se na Figura 4.6 que todas as temperaturas de calcinação analisadas promoveram a desidroxilação da caulinita, isto podendo ser comprovado pela existência do pico endotérmico a 585,9°C, proveniente da presença de hidroxilas, apenas no resíduo sem calcinação, não ocorrendo nas curvas de análise dos resíduos calcinados. A destruição da estrutura cristalina da caulinita para todas as temperaturas analisadas foi também comprovada pelas análises por difração de raios X, cujos difratogramas estão representados na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Difratogramas de raios X dos resíduos após calcinação



Nos resultados das análises por difração de raios X, apresentados na Figura 4.7, é observada a presença de caulinita cristalizada apenas na amostra sem calcinação, demonstrando que todas as temperaturas de calcinação foram suficientes para destruição da estrutura cristalina da caulinita tornando-a um material amorfo, a metacaulinita. Os resultados estão coerentes com os publicados por Menezes et al. (2009) para resíduos de caulim de mesma procedência calcinados à temperatura de 600°C em que foi obtida a completa desidroxilação da caulinita. Analisando sob a ótica de economia energética, temperaturas mais baixas se apresentam como mais indicadas para ativação térmica do metacaulim, entretanto, de acordo com Souza (2003) e Barata e Angélica (2012), em pesquisas sobre o uso de argilas calcinadas como metacaulim, a calcinação pode promover a aglomeração de partículas afetando a finura do material e assim prejudicando o seu desempenho como material pozolânico. Na Figura 4.8 podem ser observados os gráficos resultantes da análise de distribuição granulométrica do resíduo após a calcinação (Anexo A).

Figura 4.8 - Distribuição granulométrica do resíduo após a calcinação



Comparando-se os gráficos apresentados na Figura 4.8 observou-se que nas amostras calcinadas nas temperaturas de 600°C, 700°C e 750°C, houve aglomeração de partículas promovendo distribuição mais irregular do que a observada nas amostras calcinadas a 650°C e 800°C, o que indica variação no diâmetro das partículas e, por conseguinte, nos valores de superfície específica como é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Granulometria e superfície específica das amostras calcinadas

Temperatura de calcinação (°C)	0	600	650	700	750	800
Diâmetro médio [μm]	12,10	14,34	10,17	14,10	13,89	9,45
Partículas > 45 μm [%] Max 34% NBR 12653 (ABNT 1992)	1,74	8,71	3,66	8,63	8,80	3,13
Área de superfície específica [m^2/g] B.E.T. Mín. ≥ 15 NBR 15894-1(ABNT 2010)	29,73	24,98	23,18	25,10	20,52	25,95

Comparando-se os valores apresentados na Tabela 4.4, compreende-se que houve redução de superfície específica e aumento no percentual de partículas maiores que 45 μm com o aumento da temperatura de calcinação, quando comparados aos encontrados para o resíduo sem calcinação (0°). Para as temperaturas de 650°C e 800°C foram encontrados os menores valores de diâmetro médio de partículas, sendo na temperatura de 800°C encontrado o maior valor de superfície específica. Seguindo a recomendação de Carmo e Portella (2008), de que argilas com maior área específica e menor quantidade de partículas retida na peneira ABNT n° 325 (abertura 45 μm) apresentam maior potencial pozolânico, optou-se pela avaliação da atividade pozolânica dos resíduos calcinados a 650°C e 800°C, e utilizou-se o índice de atividade pozolânica como parâmetro final na definição da temperatura mais adequada.

4.2.3 Determinação do índice de atividade pozolânica

Os resultados encontrados para as resistências à compressão simples aos 28 dias de cura e os índices de atividade pozolânica com cimento estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Índice de atividade pozolânica e resistência à compressão aos 28 dias

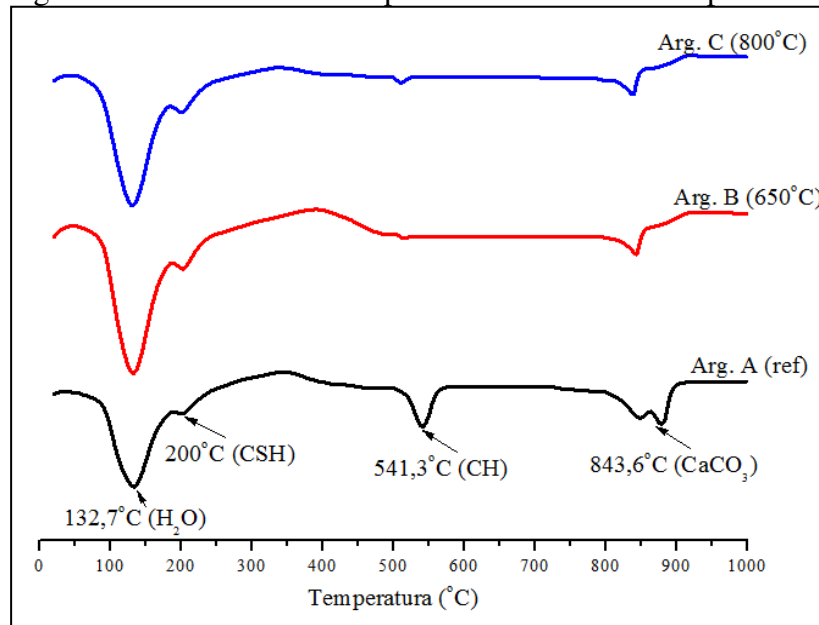
Argamassa	A (referência)	B (650°C)	C(800°C)
Resistência à compressão [Mpa]	17,35	14,77	16,39
Índice de atividade pozolânica [IAP] (%)		85	95

Apesar dos resultados apresentados na Tabela 4.5 não atenderem às especificações da NBR 15894-1 (ABNT,2010) de 105% IAP (com cimento aos 7 dias de cura) para metacaulim de alta reatividade, os resultados para ambas as temperaturas são superiores ao valor mínimo estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 1992) que é de 75% de IAP (com cimento aos 28 dias de cura) para que um material seja considerado pozolânico. É importante ressaltar que o teor de substituição da massa do cimento estipulado pela ABNT para este ensaio é de 35%. A calcinação a 800°C proporcionou ao resíduo de caulim um valor de IAP 11% acima do valor

encontrado para o resíduo calcinado a 650°C, resultado este que corrobora os publicados por Gutiérrez *et al.* (2008) segundo os quais, argilas caulínicas calcinadas à temperatura de 800°C apresentaram acréscimo de 15% de IAP em relação a argilas calcinadas a 600°C. As divergências quanto à temperatura de calcinação e índice de atividade pozolânica, estão relacionados não só com a finura e pureza, mas também com a quantidade de defeitos na estrutura cristalina da caulinita utilizada. Quanto maior o grau de desordem da estrutura cristalina, menores quantidades de energia serão requeridas para que haja total desidroxilação da caulinita.

Análises térmicas das argamassas aos 28 dias de cura, cujas curvas estão apresentadas Figura 4.9, comprovaram a redução do hidróxido de cálcio livre.

Figura 4.9. - Curvas de ATD para análise da atividade pozolânica



Comparando-se os termogramas apresentados na Figura 4.9, verifica-se a redução do pico endotérmico referentes ao CH (hidróxido de cálcio) e aumento no referente ao C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) nas argamassas com o resíduo, em relação à argamassa de referência, indicando a ocorrência de reação pozolânica pela adição do resíduo. O primeiro pico endotérmico, a aproximadamente 130°C e observado em todas as argamassas, corresponde à presença de água livre. Observa-se, a aproximadamente 850°C, pico endotérmico referente à presença de CaCO_3 (carbonato de cálcio), com expressiva redução deste nas argamassas com resíduo, o que indica redução da carbonatação, reação do CH com o CO_2 presente no ar e que, de acordo com Souza (2008), pode afetar as propriedades

mecânicas dos corpos de prova. O teor de hidróxido de cálcio das argamassas, obtido através das perdas de massa observadas nas análises termogravimétricas (Apêndice B) para o Ca(OH)_2 e para o CaCO_3 e de cálculos estequiométricos, de acordo com a metodologia utilizada por Lima e Toledo Filho (2008), está apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Teores de Ca(OH)_2 , CaCO_3 e CaO total para as argamassas A, B e C

Argamassa	M Ca(OH)_2 [%]	M CaCO_3 [%]	M CaO		M CaO Total [%]
			M Ca(OH)_2 *(74/18) ^a [%]	M CaCO_3 *(74/44) ^b [%]	
A (referência)	2,43	6,65	9,99	11,18	21,17
B (650°C)	0,38	3,01	1,56	5,06	6,63 (31,32% ref)
C (800°C)	0,24	2,49	0,99	4,19	5,17 (24,33% ref)

^a Na desidroxilação 1 mol de Ca(OH)_2 (74 g mol^{-1}) perde 1 mol de H_2O (18 g mol^{-1});

^b Na descarbonatação 1 mol de CaCO_3 formado a partir de 1 mol de Ca(OH)_2 , perde 1 mol de CO_2 (44 g mol^{-1}).

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 4.6 pode-se comprovar a redução do teor de CaO para ambas as argamassas com incorporação do resíduo, corroborando os resultados observados nas análises térmicas diferenciais e que se justificam tanto pela redução da quantidade de cimento Portland com a substituição do resíduo como pela reação pozolânica por ele ocasionada. Nota-se que, em relação ao teor de CaO da argamassa de referência, houve uma redução de 68,68% e 75,67% para as argamassas com o resíduo calcinado a 650°C e 800°C respectivamente, superiores portanto aos 35% de substituição do cimento pelo resíduo, comprovando a existência de reação pozolânica. Pode-se também afirmar que, em relação à argamassa de referência, houve redução na carbonatação o que é demonstrado pelos resultados de perda de massa referentes ao CaCO_3 para ambas as argamassas com resíduo. Verifica-se, entretanto, que o resíduo calcinado a 800°C, em relação ao resíduo calcinado a 650°C, promoveu redução de 22% no teor de CaO das argamassas. Após a análise dos resultados encontrados para o índice de atividade pozolânica e a justificativa destes pelas análises térmicas diferenciais, optou-se pela temperatura de 800°C, nas condições especificadas na metodologia, para calcinação do resíduo de caulim utilizado nesta pesquisa.

4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E TEORES DE SUBSTITUIÇÃO

Os quantitativos de materiais para os traços analisados na primeira fase, através do delineamento composto central rotacional, estão descritos na Tabela 4.7, em que os valores

para metacaulim são referentes à pozolana obtida com o resíduo e o metacaulim industrial utilizado como referência.

Tabela 4.7 - Quantitativos de materiais para os traços avaliados na primeira fase (kg/m^3)

(C+M)*/Ag**	Ensaio	Cimento [kg]	Metacaulim [%]	Metacaulim [kg]	Brita [kg]	Areia [kg]	Pó de pedra [kg]	Fator A/(C+M)***
1:5,00	Ref.	409	0	0	757	818	470	0,48
	10	327	20	82	757	818	470	0,52
1:5,56	Ref.	375	0	0	770	833	479	0,52
	2, 6	323	14	52	770	833	479	0,54
	4, 8	278	26	97	770	833	479	0,58
1:6,67	Ref.	322	0	0	794	858	494	0,54
	11	290	10	32	794	858	494	0,57
	13 a 17	258	20	64	794	858	494	0,6
	12	225	30	97	794	858	494	0,64
1:8,33	Ref.	266	0	0	820	887	510	0,56
	1, 5	229	14	37	820	887	510	0,58
	3, 7	197	26	69	820	887	510	0,62
1:10,00	Ref.	226	0	0	836	904	520	0,62
	9	181	20	45	836	904	520	0,66

* Cimento + Metacaulim; ** Agregados: brita + areia + pó de pedra; *** Água/(Cimento + Metacaulim)

4.3.1 Determinação da massa dos corpos de prova (fábrica)

A massa necessária para cada corpo de prova, calculada a partir da densidade de blocos recém moldados na fábrica, foi de 0,458 kg. Os blocos e os corpos de prova apresentaram, aos 7 dias de cura, resistência à compressão simples de 21,43 MPa e 16,82 MPa respectivamente. A proporção entre as resistências dos corpos de prova e dos blocos foi de 78,48%, ou seja, a resistência do corpo de prova ensaiado atingirá aproximadamente este percentual da resistência de blocos de concreto de mesma densidade. Este valor está de acordo com os resultados encontrados por Frasson Júnior (2002) que apresentaram variação entre 77,30% a 80,98% em pesquisa que avaliou as metodologias de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural.

4.3.2 Resultados do planejamento estatístico experimental

A Tabela 4.8 apresenta o planejamento estatístico e as médias (três repetições) dos resultados encontrados para os parâmetros de resistência à compressão simples (f_c) e absorção de água (A_b). Os resultados específicos para cada repetição estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.8 - Planejamento estatístico (DCCR) e médias das respostas para resistência à compressão e absorção de água

Ensaio	Descrição			f_c [Mpa]			A_b [%]		C/D
	C* [%]	TS** [%]	TC*** [dias]	c/ resíduo (A)	s/ adição (B)	A/B	c/ resíduo (C)	s/ adição (D)	
1	12	14	8	14,47	13,47	1,07	8,60	8,11	1,06
2	18	14	8	16,82	17,24	0,98	9,41	9,10	1,03
3	12	26	8	11,91	13,47	0,88	7,10	8,11	0,88
4	18	26	8	16,72	17,24	0,97	9,25	9,10	1,02
5	12	14	24	15,36	12,97	1,18	8,65	7,84	1,10
6	18	14	24	23,54	18,22	1,29	8,82	8,89	0,99
7	12	26	24	13,95	12,97	1,08	9,26	7,84	1,18
8	18	26	24	21,12	18,22	1,16	8,94	8,89	1,01
9	10	20	16	12,05	13,36	0,90	9,63	9,14	1,05
10	20	20	16	19,03	18,42	1,03	9,95	8,59	1,16
11	15	10	16	15,77	19,94	0,79	9,48	8,74	1,08
12	15	30	16	17,62	19,94	0,88	9,67	8,74	1,11
13	15	20	3	10,66	12,63	0,84	11,69	9,34	1,25
14	15	20	29	16,09	20,27	0,79	10,43	8,90	1,17
15	15	20	16	11,40	19,94	0,57	9,33	8,74	1,07
16	15	20	16	12,24	19,94	0,61	10,14	8,74	1,16
17	15	20	16	12,35	19,94	0,62	10,21	8,74	1,17

* Teor de cimento; ** Teor de substituição do cimento pelo resíduo; *** Tempo de cura.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.8, a adição do resíduo para os traços com teores de cimento mais elevados promoveu acréscimo nas resistências à compressão em relação aos corpos de prova de referência, sem adição, sendo os melhores resultados encontrados para os traços 1:8,33 e 1:5,56 (12% e 18% de cimento, respectivamente) ambos com 14% de substituição do cimento pelo resíduo. Entretanto, devido à granulometria mais fina do resíduo, houve considerável aumento para o índice de absorção de água, o qual, para os ensaios 13, 14, 16 e 17, apresentou valores acima do limite especificado pela NBR 6136 (ABNT, 2008). A comparação entre os resultados apresentados na Tabela 4.8 está representada graficamente na Figura 4.10 (resistência à compressão) e Figura 4.11 (absorção de água por imersão).

Figura 4.10 - Resultados para os ensaios de resistência à compressão (1ª. Fase), comparados aos de referência (0% de substituição)

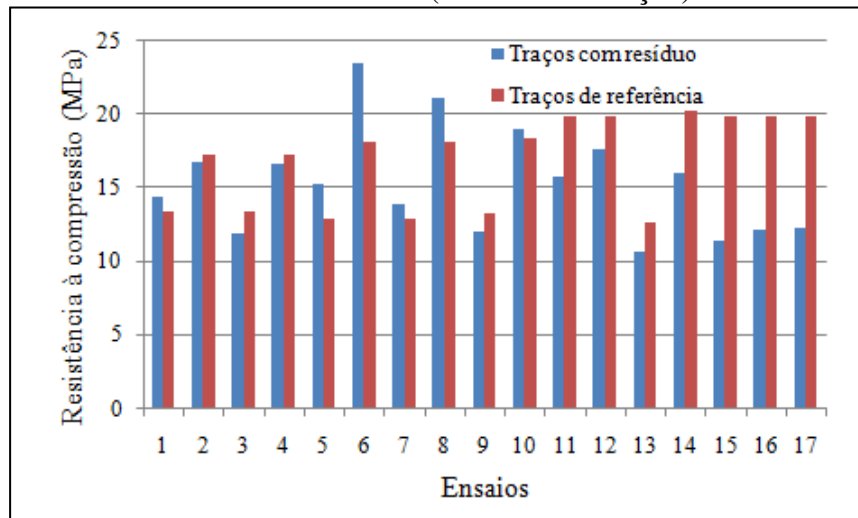
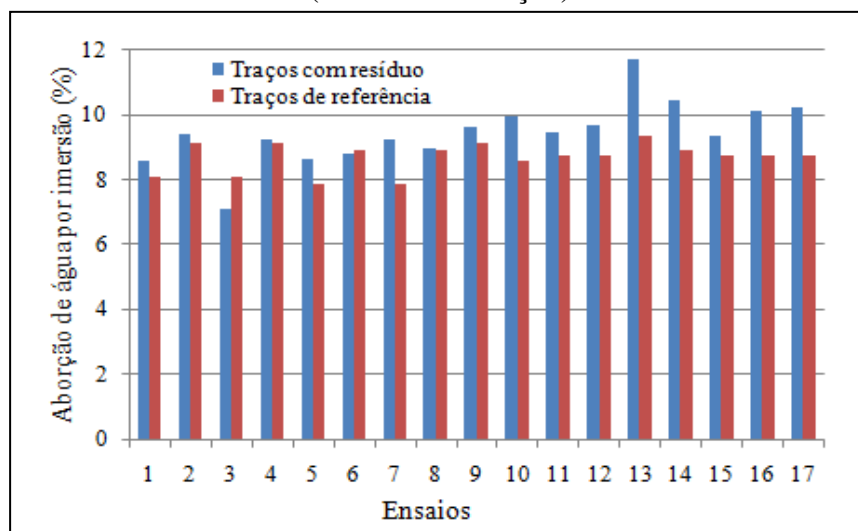


Figura 4.11 - Resultados para os ensaios de absorção (1ª. Fase), comparados aos de referência (0% de substituição)



As equações de regressão, estatisticamente significativas em nível de 95% de confiança, para as variáveis de resposta da resistência à compressão simples (Equação 4.1) e absorção de água por imersão (Equação 4.2), com os coeficientes estatisticamente significativos, são as seguintes:

$$f_c = 11,91 + 1,55C^2 + 2,51C + 1,98TS^2 + 0,78TC^2 + 1,69TC + 1,03C \cdot TC \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$Ab = 9,98 - 0,34C^2 - 0,43TS^2 - 0,41C \cdot TC \quad \text{Eq. 4.2}$$

Em que:

C – teor de cimento;

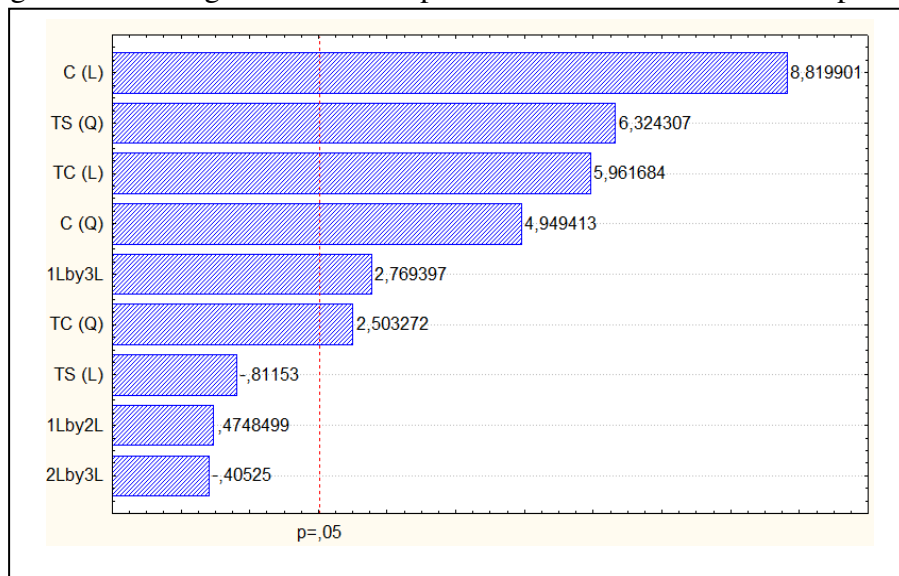
TS – teor de substituição do cimento pelo resíduo e

TC – tempo de cura.

Os coeficientes de determinação (R^2), medida estatística de quanto uma linha de regressão aproxima-se de dados reais, para as Equações 4.1 e 4.2 foram de 0,81 e 0,40 respectivamente. Estes valores indicam que, para a variável de resposta resistência à compressão 19% das variáveis analisadas não tiveram influência significativa e para a absorção de água 60%, tendo maior interferência outros fatores que não foram analisados como a compactação e proporcionamento dos agregados.

. Os diagramas de Pareto para as duas variáveis de resposta (RC e AA) (Figuras 4.12 e 4.13) permitem visualizar quais coeficientes dos modelos apresentam influência estatística ao nível de significância de 5%.

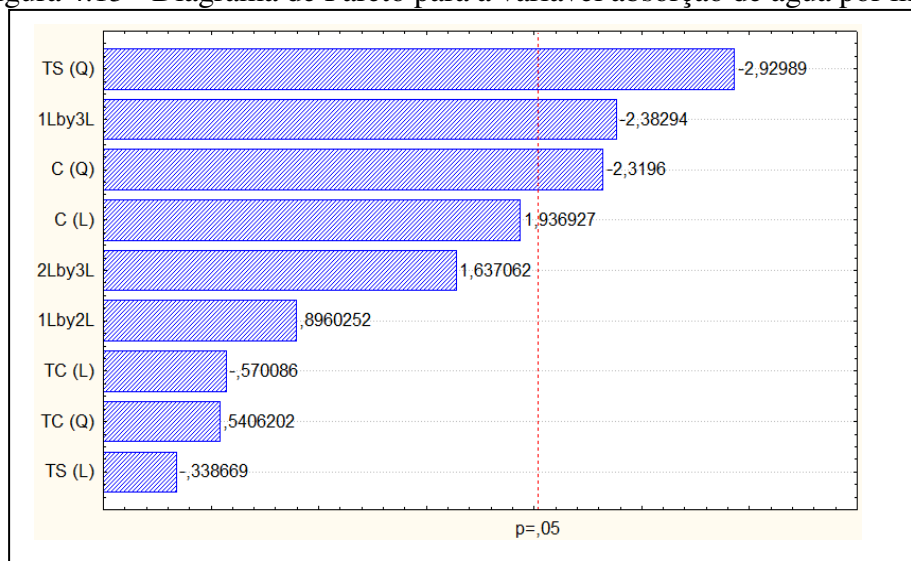
Figura 4.12 - Diagrama de Pareto para a variável resistência à compressão



Observando-se a Figura 4.12, pode-se constatar que o coeficiente linear de maior relevância para a resistência à compressão é o teor de cimento (C), seguido do tempo de cura (TC) e da interação entre os dois. Para o coeficiente quadrático, todos os fatores são relevantes.

O teor de substituição, diretamente relacionado com a quantidade de finos na mistura, mostrou-se como o fator de maior influência estatística na absorção de água como pode ser observado na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Diagrama de Pareto para a variável absorção de água por imersão



Na Tabela 4.9 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para avaliação preliminar do uso do resíduo

Propriedade avaliada		SQ	GL	QM	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}	R^2
Resistência à compressão simples	Regressão	570,33	9	63,37	19,15	2,12	0,81
	Resíduo	135,56	41	3,31			
	Total	705,89	50				
Absorção de água por imersão	Regressão	19,71	9	2,19	3,09	2,12	0,40
	Resíduo	29,13	41	0,71			
	Total	48,84	50				

Pode-se concluir, observando os dados da Tabela 4.9 que, para a variável resistência à compressão, o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo, demonstrado pelo fato de que o valor calculado para F foi acima de 6 vezes o valor do F_{tabelado} (RODRIGUES e IEMMA, 2009).

4.3.2.1 Superfícies de resposta para resistência à compressão simples

As superfícies de resposta geradas para os ensaios de resistência à compressão simples, em função do teor de substituição do cimento por metacaulim e o tempo de cura, utilizando-se o programa Statistica 5.0 da Statsoft, estão apresentadas na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Superfícies de resposta para resistência à compressão (f_c) aos 3(a), 8(b), 16 (c), 24 (d) e 29 (e) dias de cura ,em função do traço (C) e teor de substituição (TS)

Figura 4.14a. 3 dias de cura (N. -1,67)

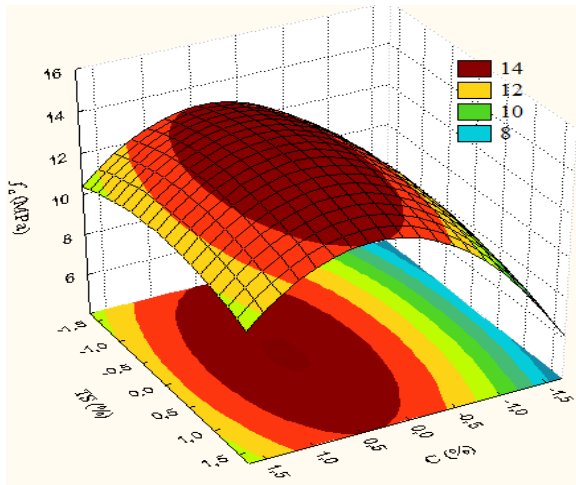


Figura 4.14b.8 dias de cura (N. -1)

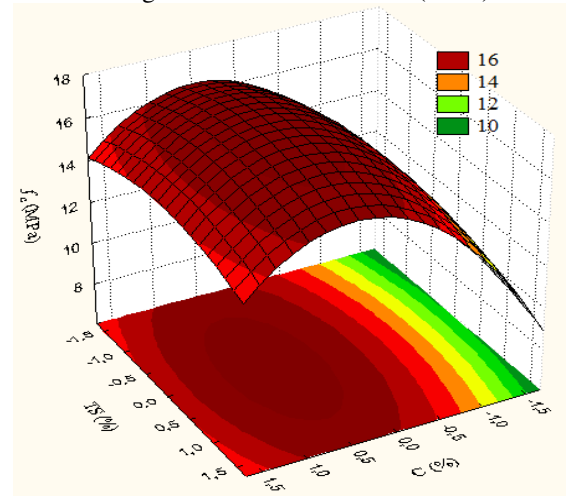


Figura 4.14c. 16 dias de cura (N. 0)

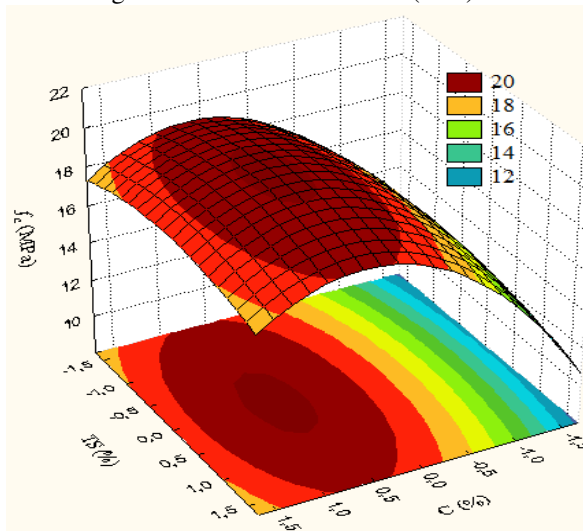


Figura 4.14d.24 dias de cura (N. 1)

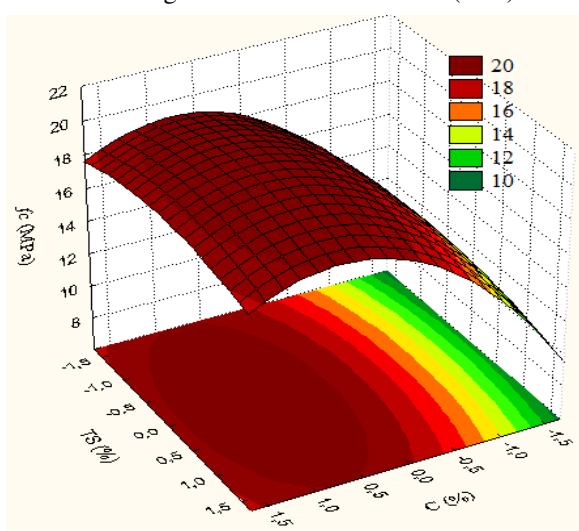
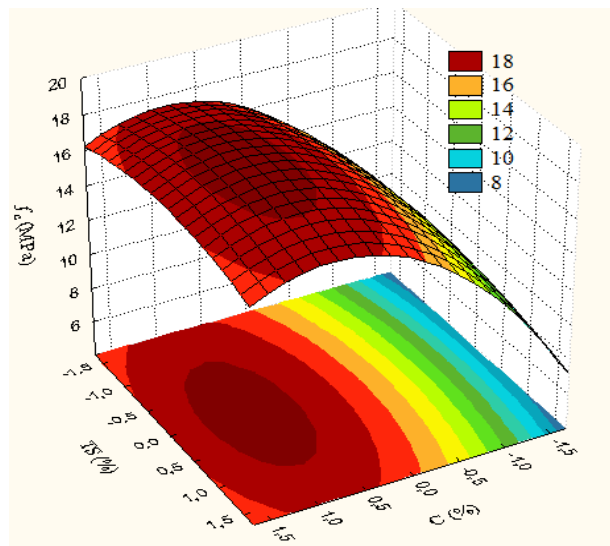


Figura 4.14e.29 dias de cura (N. 1,67)



Observando-se a Figura 4.14, pode-se notar que a resistência à compressão tende a aumentar com o tempo de cura, apresentando valores mais elevados aos 16 e 24 dias de cura (Fig. 4.14c e Fig 4.14d) período este em que, segundo Barata e Angélica (2012), ocorre o ápice da atividade pozolânica. Observa-se também que nestas idades, os melhores resultados foram encontrados para o nível 1 da variável teor de cimento (traço 1:5,56) e para o nível 0 da variável teor de substituição (20%) do cimento pela pozolana estudada. Tal resultado está coerente com os encontrados por Cassagnabère *et al.* (2010), os quais encontraram os melhores resultados para resistência à compressão simples com teores de substituição da massa do cimento por metacaulim variando entre 12,5% e 25%.

Entretanto, nota-se que, à partir dos 8 dias de cura, podem ser obtidos resultados de resistência à compressão acima de 12 MPa para todos os níveis de substituição do cimento pelo resíduo estudado, excetuando o traço 1:10 cujas resistências máximas a esta idade não ultrapassam o valor de 10 MPa.

Sendo um dos objetivos deste trabalho a redução do consumo de cimento Portland, diante dos resultados encontrados para resistência à compressão, o traço 1:5 (N+1,67 = 20% C) apresenta-se como excessivo para o limite exigido pela NBR 6136 (ABNT, 2008) de 10 MPa. Os estudos então, para as etapas seguintes, irão se concentrar nos traços 1:5,56 (Nível 1), 1:6,67 (Nível 0) e 1:8,33 (N. -1).

4.3.2.2 Superfícies de resposta para absorção de água por imersão

As superfícies de resposta para a absorção de água por imersão, em função do teor de cimento e do teor de substituição deste por resíduo, estão apresentadas na Figura 4.15.

Apesar do baixo valor para o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,40$), as superfícies de resposta para os ensaios de absorção de água por imersão mostram a tendência de comportamento desta variável dentro das condições estudadas. As superfícies geradas para os períodos de 3, 8 e 16 dias de cura, (Fig. 4.15a, 4.18b e 4.18c) indicam que para menores teores de cimento e maiores teores de substituição deste por resíduo, a absorção de água tende a diminuir o que, pode ser justificado pelo fato do cimento não intervir na porosidade da pasta em idades iniciais devido à baixa taxa de produtos hidratados, notando-se que os valores máximos de absorção decrescem com o avanço do tempo de cura. Observando-se as Figuras 4.15d e 4.15e, relativas aos 24 e 29 dias de cura, respectivamente, nota-se que a absorção tende a reduzir para maiores teores de cimento e menores teores de substituição, isto provavelmente devido à redução da porosidade ocorrida durante a hidratação.

Figura 4.15 - Superfícies de resposta para absorção de água por imersão (A_b) aos 3(a), 8(b), 16(c), 24 (d) e 29 (e) dias de cura, em função do traço (C) e teor de substituição (TS)

Figura 4.15a. 3 dias de cura (N. -1,67)

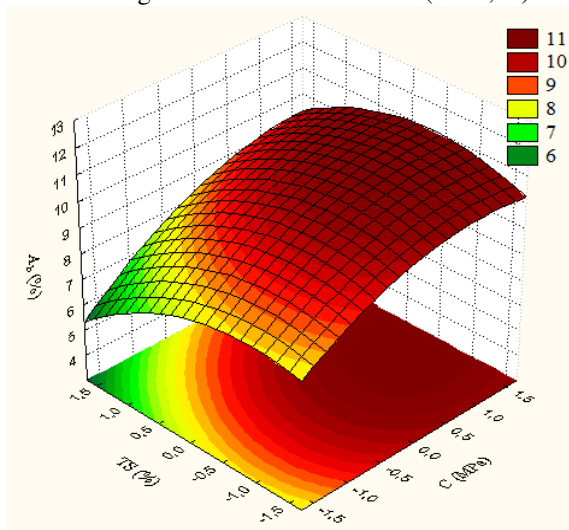


Figura 4.15b. 8 dias de cura (N. -1)

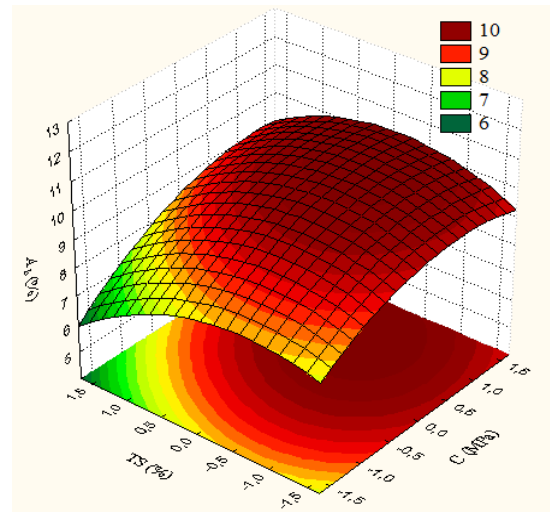


Figura 4.15a. 16 dias de cura (N. 0)

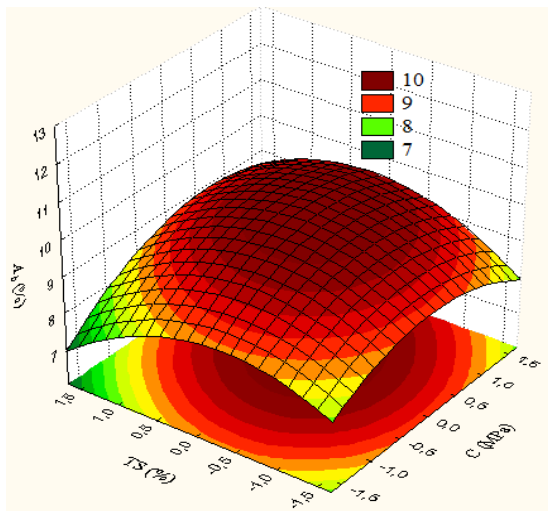


Figura 4.15b. 24 dias de cura (N. +1)

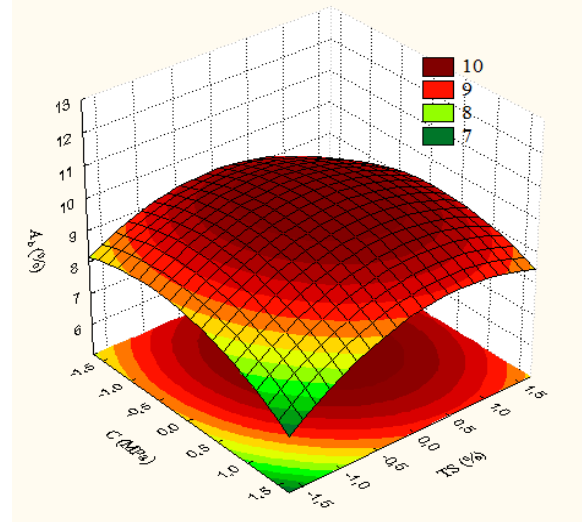
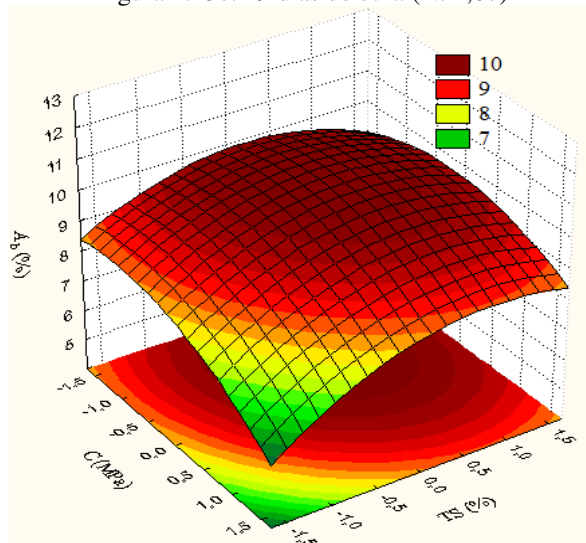


Figura 4.15e. 29 dias de cura (N. 1,67)



4.3.3 Análises térmicas das composições avaliadas

As análises termogravimétricas (ATG e DTG) permitiram avaliar o teor de água quimicamente combinada com o Ca(OH)_2 e o CaCO_3 e, através da diferença entre estes teores e da perda de massa ocorrida entre 105°C e $1\ 000^\circ\text{C}$, as alterações na quantidade de produtos hidratados, segundo metodologia adotada por Gonçalves, Toledo Filho e Fairbairn (2006). As faixas de temperatura em que ocorrem as reações estão de acordo com as relatadas por Almeida e Sichieri (2006), Jacoby (2011) e Girão (2007), da qual foi adotada a metodologia de leitura das massas através de retas tangentes aos pontos de inflexão. A Tabela 4.10 apresenta os valores de perda de massa referente à água combinada para o CH, o CaCO_3 , índice de hidratação obtidas através das análises térmicas (Apêndice 3).

Tabela 4.10 - Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH, do CaCO_3 e índice de hidratação e pozolanicidade (1ª. Fase)

Traço	TC*	Ensaio	TS** (%)	CH (%)	CaCO_3 (%)	$I_{\text{hidratação}}$ (%)	I_p (%)
1:5,00	16	10	20	10,50	10,11	79,39	108,84
		Ref.	0	14,83	12,23	72,94	
1:5,56	8	2	14	8,67	9,70	82,94	101,43
		4	26	8,11	9,11	82,78	101,24
	Ref.	0	10,15	7,03	81,77		
	24	6	14	11,33	8,32	80,36	103,68
1:6,67	3	8	26	6,61	12,26	81,13	104,67
		Ref.	0	11,31	11,19	77,51	
	16	13	20	12,37	15,97	71,66	101,42
		Ref.	0	12,56	16,78	70,66	
		11	10	7,00	11,45	81,54	101,07
		15	20	8,23	8,29	83,48	103,47
29	16	20	5,32	9,96	84,72	105,00	
	17	20	4,92	10,63	84,44	104,66	
	12	30	8,43	9,37	82,20	101,88	
	Ref.	0	11,91	7,41	80,68		
1:8,33	8	14	20	4,29	11,23	84,48	108,11
		Ref.	0	11,12	10,77	78,11	
	24	1	14	6,88	9,16	83,96	101,17
		3	26	6,15	9,67	84,18	101,43
1:10,00	16	Ref.	0	10,06	6,95	82,99	
		5	14	10,83	14,02	75,15	105,20
	24	7	26	8,21	16,62	75,17	105,24
		Ref.	0	14,18	14,40	71,43	
1:10,00	16	9	20	10,14	16,50	73,35	101,31
		Ref.	0	11,71	15,89	72,40	

* TC – tempo de cura; ** TS – teor de substituição da massa do cimento por resíduo; *** I_p – Índice de pozolanicidade – relação entre os índices de hidratação dos concretos com resíduo e os de referência.

Observando-se a Tabela 4.10 verifica-se que todos os concretos contendo resíduo apresentaram teor de água quimicamente combinada no hidróxido de cálcio (CH) inferior aos concretos de referência. Entretanto, tal redução é parcialmente devida à redução da massa do cimento, pois o resíduo está sendo utilizado não como adição e sim como substituição parcial ao cimento, e ao CH consumido na carbonatação. O acréscimo no índice de hidratação, o qual representa o teor de água de todos os produtos hidratados excetuando o CH e o CaCO_3 oriundo da carbonatação, em relação aos concretos de referência indica a existência de reação pozolânica e, conseqüentemente, produtos hidratados adicionais.

Para o traço 1:5,00, verificou-se que 20% de resíduo promoveram, aos 16 dias de cura, acréscimo de 8,84% de produtos hidratados em relação ao traço de referência, corroborando com os resultados encontrados para a análise de superfície de resposta em que este traço apresentou maiores valores para resistência à compressão. Entretanto, o traço 1:10,00 com igual teor de substituição do cimento pelo resíduo e em igual tempo de cura, apresentou 1,31% de acréscimo de produtos hidratados. Este comportamento se justifica pelo fato de que maior teor de cimento implica em maior quantidade de CH liberado no processo de hidratação, porém, traços com maior quantidade de finos exigem maior demanda de água o que pôde ser observado para o traço 1:5,00 (Apêndice D), no qual as análises térmicas demonstraram não haver perda de massa relacionada à água livre indicando que a quantidade de água utilizada no amassamento, limitada pelo processo de moldagem, pode não ter sido suficiente para a completa hidratação do cimento.

Os resultados encontrados para os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33 demonstram que houve aumento nos produtos de hidratação com o aumento do teor de substituição e do tempo de cura, porém, verifica-se que 30% de resíduo apresentam-se como excessivo e, devido à maior quantidade de finos a hidratação da pasta pode ter sido reduzida, prejudicando a reação pozolânica. De acordo com Sabir *et al.* (2001) a quantidade de CH liberada no cimento totalmente hidratado, corresponde a 28% da massa inicial do cimento, o que pode justificar os resultados para 30% não serem satisfatórios, limitando os teores analisados na segunda fase a 25%.

Diante dos resultados encontrados através do planejamento experimental e das análises optou-se por utilizar para a segunda etapa desta pesquisa os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,833 e os teores de substituição da massa do cimento por resíduo de 10%, 15%, 20% e 25%, aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura. A opção por estender a análise aos 60 dias justifica-se pelo fato da atividade pozolânica, segundo Siddique e Klaus (2009), prolongar-se até após 360 dias.

4.4 INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE CAULIM NOS CONCRETOS ESTUDADOS

As quantidades de material para cada traço é descrita na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Quantitativos de material para os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33

(C+M)*/Ag**	Cimento	Resíduo		Brita [kg]	Areia [kg]	Pó de pedra [kg]	Fa tor A/(C+R)***
	[kg]	[%]	[kg]				
1:5,56	375	0	0	770	833	479	0,52
	337	10	38	770	833	479	0,53
	319	15	56	770	833	479	0,54
	300	20	75	770	833	479	0,56
	281	25	94	770	833	479	0,58
1:6,67	322	0	0	794	858	494	0,54
	290	10	32	794	858	494	0,57
	274	15	48	794	858	494	0,58
	258	20	64	794	858	494	0,60
	241	25	81	794	858	494	0,62
1:8,33	266	0	0	820	887	510	0,56
	239	10	27	820	887	510	0,57
	226	15	40	820	887	510	0,58
	213	20	53	820	887	510	0,60
	199	25	67	820	887	510	0,62

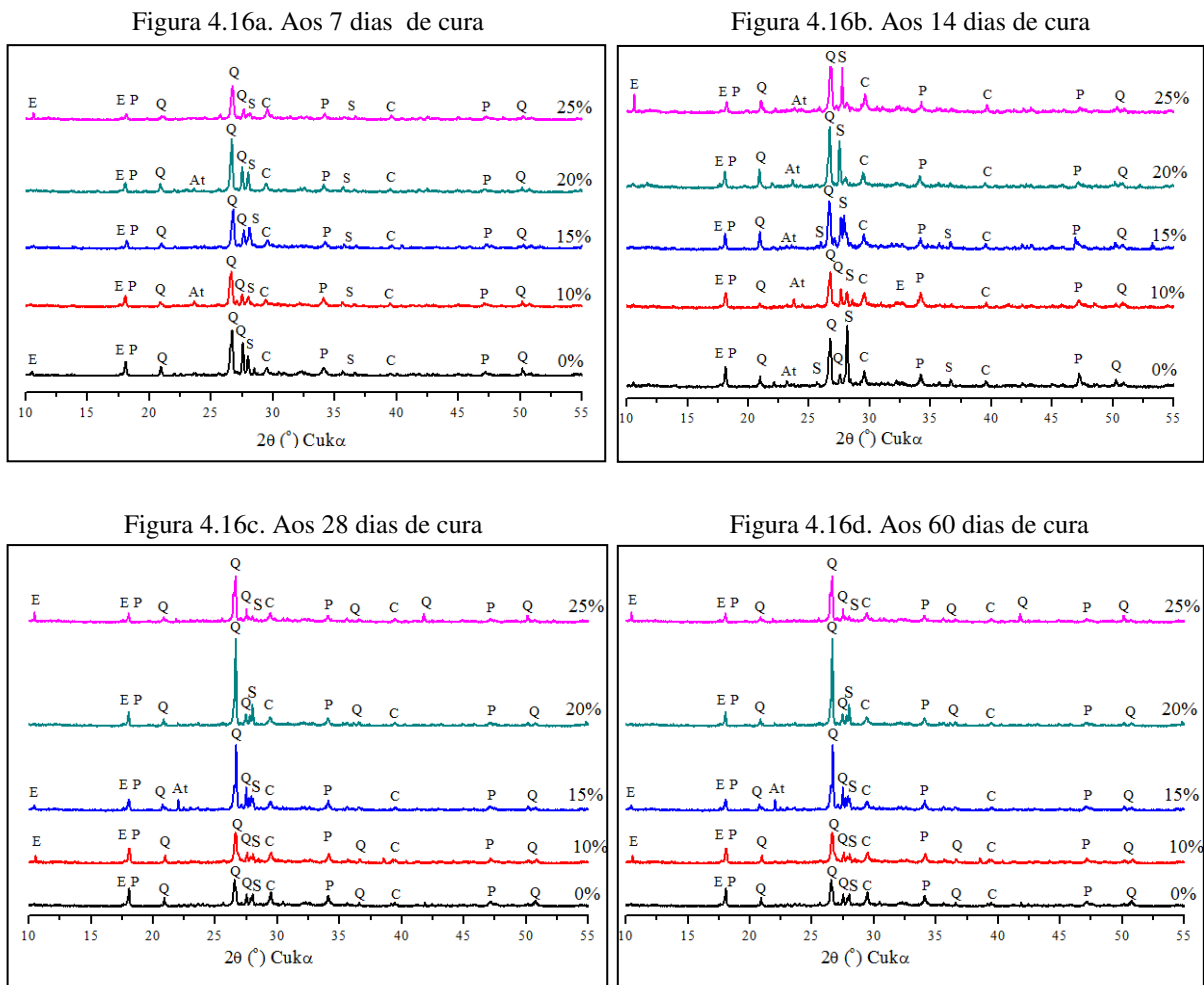
* Cimento + Metacaulim; ** Agregados: brita + areia + pó de pedra; *** Água/(Cimento + Metacaulim)

4.4.1 Traço 1:5,56

4.4.1.1 Análises térmicas e por difração de raios X

A verificação da intensidade da reação pozolânica foi obtida através de análises por difração de raios X e por análises termogravimétricas. Os difratogramas de raios X para o traço 1:5,56, nas idades de 7, 14, 28 e 60 dias, estão apresentados nas Figuras 4.16.

Figura 4.16 - Difratomogramas de raios X para o traço 1:5,56 com substituição parcial do cimento pelo metacaulim obtido com o resíduo de caulim



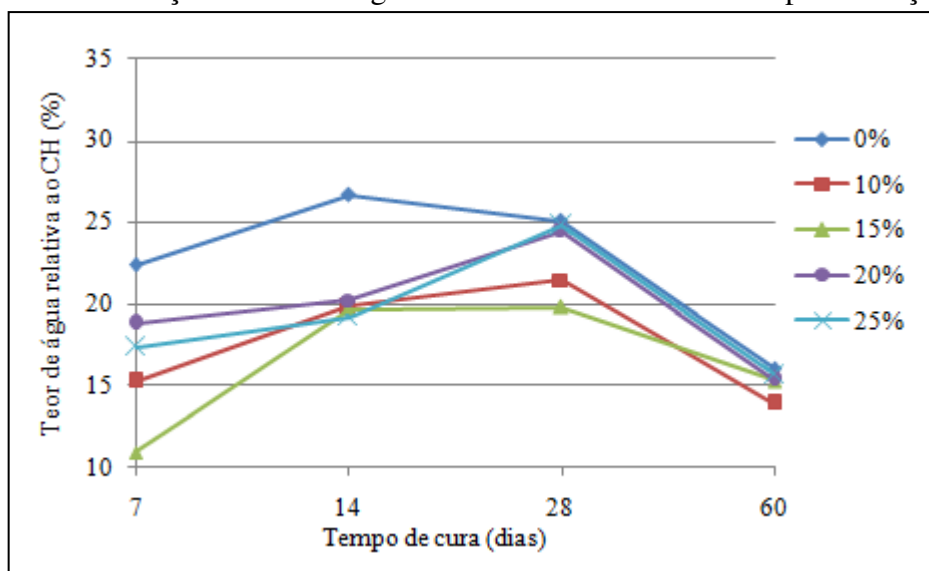
Legenda: E – etringita ($C_6AS_3H_{32}$); P – portlandita CH ($Ca(OH)_2$); Q – quartzo (SiO_2); S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H); C – calcita ($CaCO_3$); At – aluminato tricálcico - celita (C_3A).

Nos difratogramas apresentados na Figura 4.16 foram identificadas, em todas as composições e em todas as idades, as seguintes fases: portlandita ou hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), caracterizada pela existência dos picos às distâncias interplanares de 4,933 Å, 2,628 Å e 1,927 Å; etringita ou monossulfato hidratado ($C_6AS_3H_{32}$) caracterizada pelas distâncias interplanares de 8,465 Å e 4,933 Å; quartzo ou dióxido de silício cristalino (SiO_2) correspondente aos picos nas distâncias interplanares de 4,275 Å, 3,352 Å, 2,455 Å e 1,800 Å. Sendo o dióxido de silício oriundo dos agregados, materiais cuja massa é predominante nas composições, nota-se a maior frequência dos picos a ele relacionados, verificando-se ainda a presença de celita (C_3A) e de calcita ($CaCO_3$) esta resultante da carbonatação. Observa-se redução na intensidade dos picos referentes ao hidróxido de cálcio (portlandita - CH) nos concretos com o resíduo em relação aos concretos de referência, indicando a ocorrência de

reação pozolânica. A existência ainda de picos relativos à portlandita na idade de 60 dias demonstra que a reação pozolânica não se completou que, apesar de atingir o seu ápice entre os 7 e 14 dias de cura, de acordo com Nita e John (2007), pode se prolongar após 360 dias segundo pesquisas relatadas por Siddique e Klaus (2009) e Cassagnabère *et al* (2010).

A redução de hidróxido de cálcio e formação de produtos hidratados adicionais foi analisada através de análises termogravimétricas (Apêndice E), através da avaliação do teor de água quimicamente combinada entre 105°C e 1 000°C e a diferença deste com o teor de água relacionada ao CH (Apêndice F). A evolução do teor de água combinada do CH, em relação ao índice de hidratação, até os 60 dias de cura, para os diferentes teores de substituição está apresentada na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Evolução do teor de água combinada referente ao CH para o traço 1:5,56



Observando-se a Figura 4.17, verifica-se que o uso do resíduo promoveu, para todos os níveis de substituição, teores de CH inferiores ao concreto de referência (0% de substituição), o que parcialmente pode ser justificado pela redução da massa do cimento. Entretanto, a ocorrência de redução de CH, estimado pela massa de água a ele relacionada e o acréscimo de produtos hidratados são decorrentes de reação pozolânica. Aos 7, 28 e 60 dias de cura, os concretos com 10% e 15% de substituição da massa do cimento pelo resíduo apresentaram os menores teores de água relativa ao CH, porém este comportamento não foi verificado aos 14 dias, quando a reação pozolânica ocorre em maior intensidade. Para estas composições, não houve perda de massa relativa à água adsorvida (até 105°C) indicando que o teor de umidade adotado, limitado pelas condições de moldagem, pode não ter sido suficiente para promover

uma maior hidratação da pasta e, conseqüentemente, condições favoráveis para a reação pozolânica.

4.4.1.2 Propriedades mecânicas

Nos ensaios de resistência à compressão simples os corpos de prova apresentaram rupturas do tipo C (colunar e com formação de cones) e E (cisalhada), segundo classificação da NBR 5739 (ABNT, 2007), estando ilustradas na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Principais tipos de rupturas observadas

Figura 4.18a Ruptura tipo C



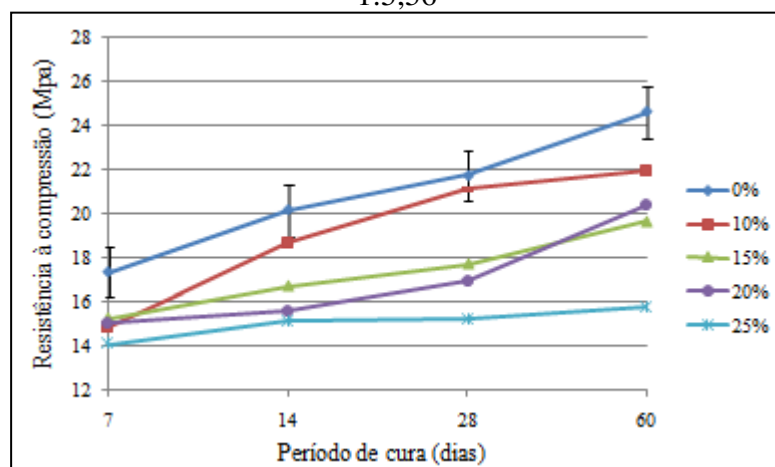
Figura 4.18b Ruptura tipo E



Os resultados dos ensaios mecânicos para o traço 1:5,56 (Apêndice G) serão discutidos nos itens a seguir e, de acordo com a metodologia adotada por Buttler (2007), serão considerados aceitáveis os teores de substituição que proporcionarem no mínimo 85% dos valores encontrados para os corpos de prova sem substituição do cimento por resíduo.

Na Figura 4.19 pode-se observar a evolução das resistências à compressão dos corpos de prova no traço 1:5,56, com substituição da massa do cimento nos teores 0% (referência), 10%, 15%, 20% e 25% pelo resíduo, aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura.

Figura 4.19 - Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56

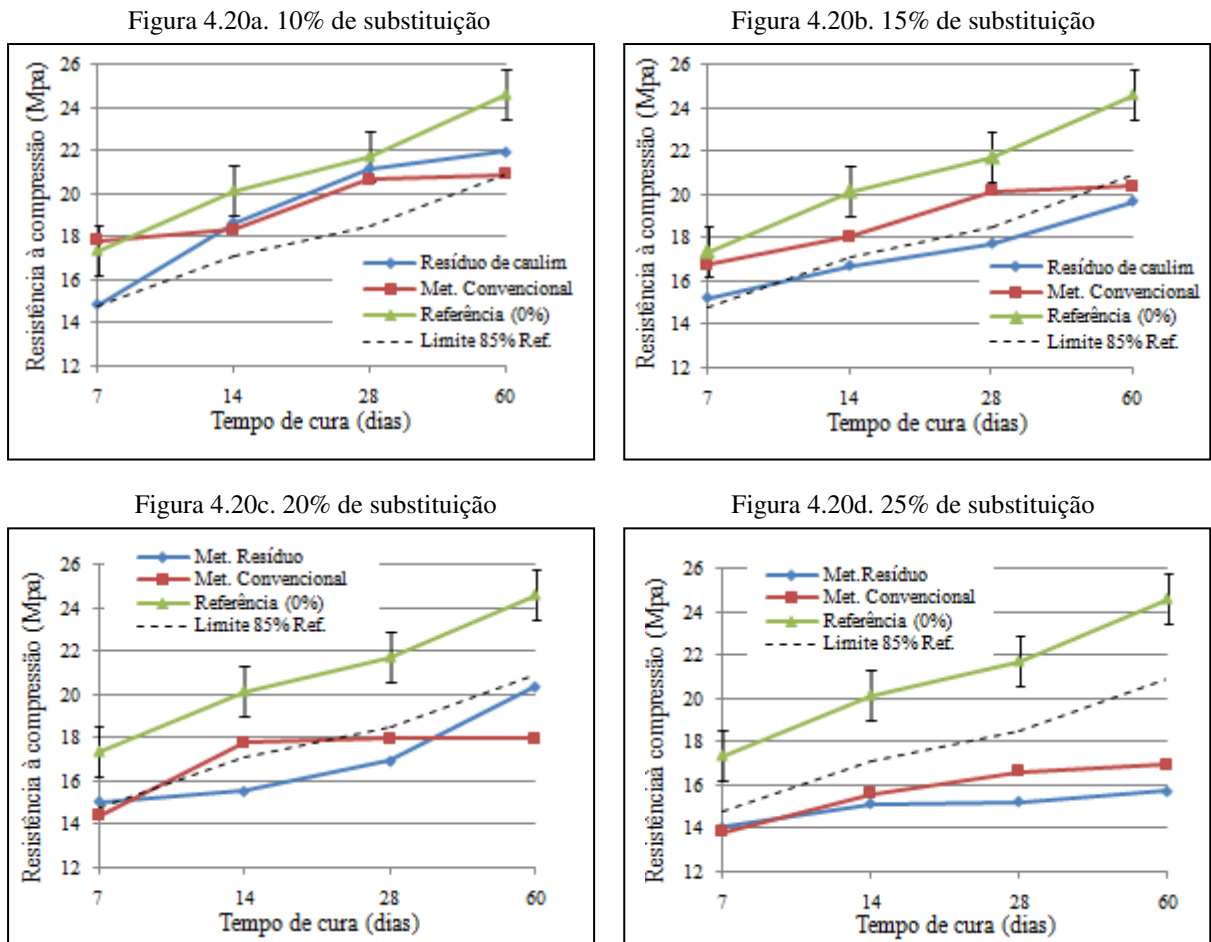


Observando-se os resultados apresentados na Figura 4.19, verifica-se que, aos sete dias de cura, todas as composições apresentaram resistência à compressão superior a 6 MPa, limite mínimo especificado pela NBR 6136 (ABNT, 2008) para blocos vazados de concreto simples para alvenaria. De acordo com Oliveira (2007), a maior resistência à compressão do concreto de referência em relação aos concretos com resíduo até os sete dias de cura, pode ser creditada à lentidão da reação pozolânica, entretanto, nota-se que em todas as idades avaliadas as composições com resíduo apresentaram resultados inferiores ao concreto de referência e que estes tendem a reduzir com o aumento do teor de substituição. Verifica-se que os corpos de prova com 25% de substituição apresentaram os menores valores de resistência à compressão em todas as idades avaliadas, indicando que este teor de substituição é excessivo passando o resíduo a atuar parcialmente como partícula inerte, reduzindo assim a quantidade de produtos hidratados e, conseqüentemente, as resistências mecânicas. Estes resultados divergem dos relatados por Cassagnabère *et al.* (2010), segundo os quais 25% de metacaulim promoveram 3,6% de acréscimo na resistência de concretos destinados à indústria de pré-moldados, entretanto, encontra-se como diferença principal nas misturas o uso de superplastificante o que, segundo Mehta e Monteiro (2008) acelera a taxa de hidratação sem prejudicar a consistência dos concretos.

Nota-se coerência ao se relacionar os valores de resistência à compressão aos resultados de redução de CH obtidos nas análises termogravimétricas para os teores de 10% e 15% de substituição, porém a reação pozolânica ocorrida não foi suficiente para compensar a diminuição da massa do cimento, reduzindo assim as resistências em relação ao concreto de referência.

A comparação entre as resistências à compressão dos corpos de prova no traço 1:5,56 com resíduo e dos corpos de prova de referência (com o metacaulim convencional e sem metacaulim), está representada na Figura 4.20.

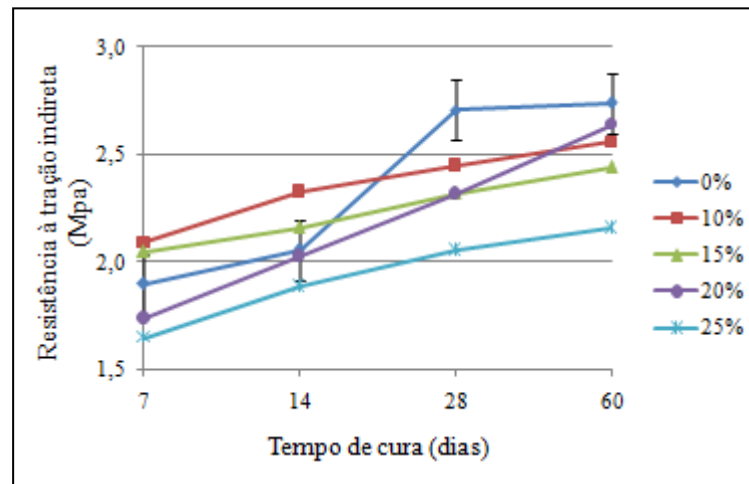
Figura 4.20 - Resistência à compressão dos corpos de prova no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência



Observando-se a Figura 4.20a verifica-se que os corpos de prova com 10% de resíduo apresentaram evolução de resistências superior aos corpos de prova com igual teor de metacaulim convencional e que ambas as adições promoveram, em todas as idades, resultados dentro do limite aceitável de 85% da resistência de corpos de prova sem metacaulim. Para os demais teores de substituição (Figuras 4.20b, 4.20c e 4.20d) se apresentam excessivos para ambas as pozolanas, os resultados encontrados não satisfazem a este limite, indicando que a quantidade de água foi insuficiente devido à maior quantidade de finos o que, além de prejudicar a atividade pozolânica, prejudica também as propriedades mecânicas do concreto.

Na Figura 4.21 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova no traço 1:5,56, com substituição da massa do cimento pelo resíduo nos teores 0% (referência), 10%, 15%, 20% e 25%, aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura.

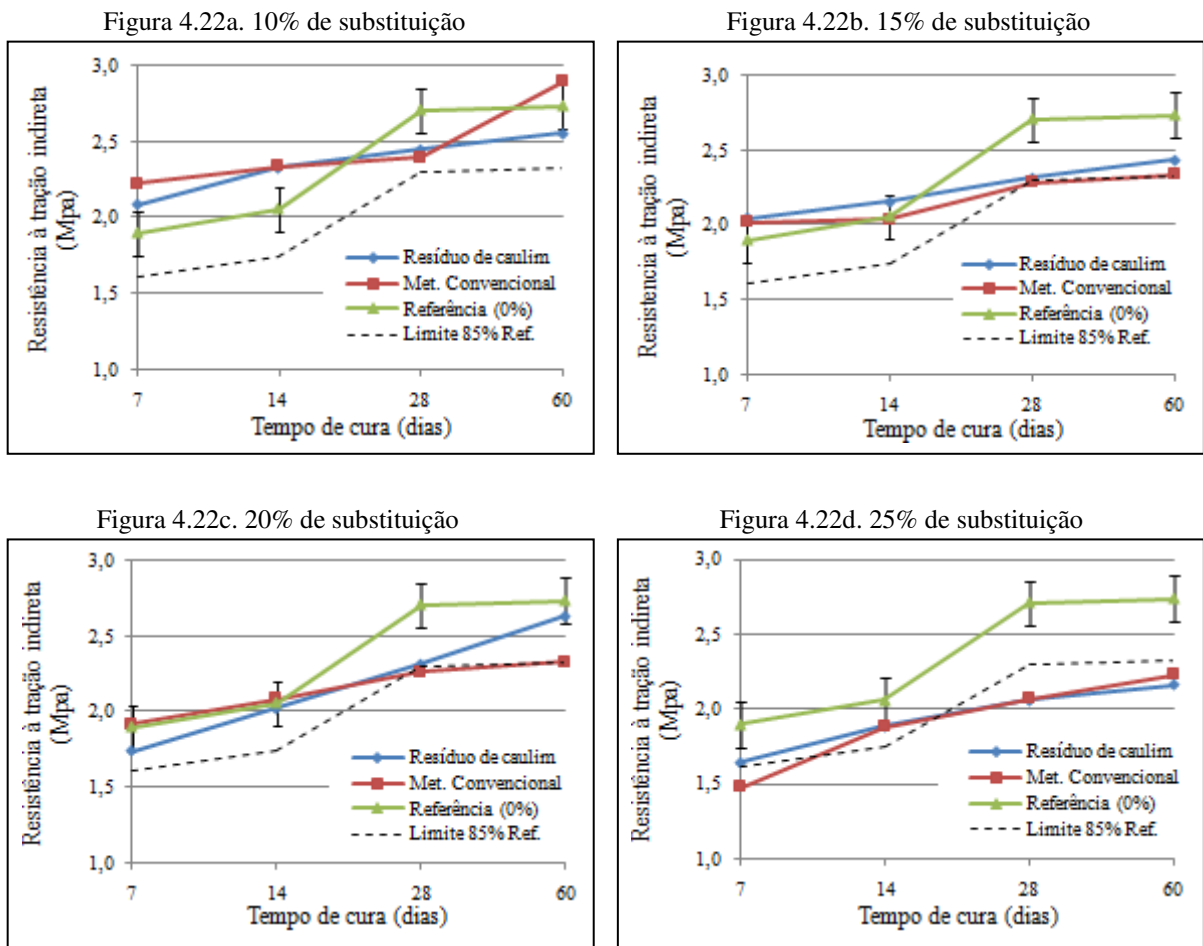
Figura 4.21- Evolução da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56



Comparando-se os gráficos da Figura 4.21, pode-se observar que aos 7 e 14 dias de cura os corpos de prova com 10% e 15% de substituição da massa do cimento pelo resíduo apresentaram resistência à tração por compressão diametral acima dos resultados obtidos para os corpos de prova de referência, o que pode ser relacionado à atividade pozolânica e/ou ao efeito filler da adição do material estudado. Verifica-se também que os corpos de prova com 25% de resíduo apresentaram os menores valores de resistência, corroborando os resultados encontrados para este teor na avaliação da resistência à compressão e análises térmicas e por difração de raios X. Os valores de resistência à tração apresentados na Figura 4.14, em relação aos valores de resistência à compressão (Apêndice N), estão de acordo com os resultados encontrados por Barbosa e Hanai (2006), segundo os quais a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta) corresponde em torno de 10% da resistência à compressão. Segundo Mehta e Monteiro (2008) a baixa resistência à tração do concreto deve-se à propagação de microfissuras decorrentes de tensões de origem térmica ou de retração por secagem, as quais podem se ampliar até a ruptura do concreto.

A comparação entre as resistências à tração dos corpos de prova no traço 1:5,56 com o obtido a partir do resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência (metacaulim convencional e sem metacaulim) está representada na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova de concreto no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência

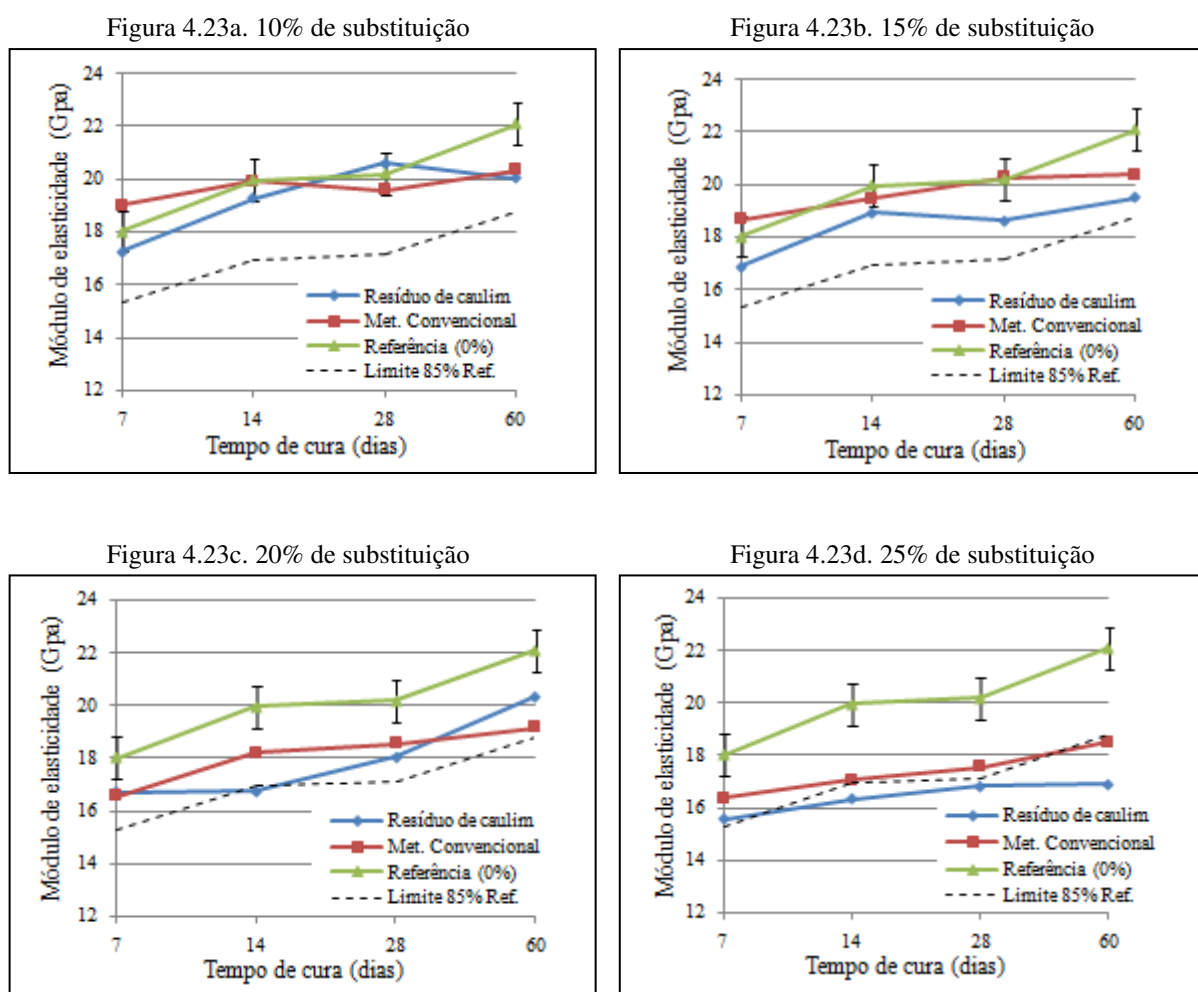


Observando-se as Figuras 4.22a, 4.22b e 4.22c, verifica-se que os corpos de prova com até 20% de resíduo apresentaram valores de resistência à tração que acima do limite aceitável de 85% dos valores de referência sugerido por Buttler (2007), e que para o teor de 15% (Figura 4.22b) o resíduo de caulim promoveu resistências na ordem de 5% acima das encontradas para corpos de prova com igual teor de metacaulim convencional. O fato das resistências se apresentarem mais elevadas aos sete dias de cura (Figuras 4.22a e 4.22b), em relação aos corpos de prova de referência em que não houve substituição do cimento por metacaulim, pode ser justificado pelo efeito filler que é imediato. Na Figura 4.22d pode ser observado que o teor de 25% apresenta-se como excessivo para ambas as pozolanas o que é

demonstrado pelos valores de resistência abaixo do limite de tolerância, resultados estes coerentes com os resultados das análises anteriores.

Na Figura 4.23 pode-se observar os gráficos comparativos entre o módulo de elasticidade dos concretos no traço 1:5,56 com o metacaulim obtido com o resíduo e os concretos de referência, com o metacaulim convencional e sem metacaulim.

Figura 4.23 - Módulo de elasticidade dos concretos no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos concretos de referência



Observando-se os gráficos representados na Figura 4.23, verifica-se pequena variação do módulo de elasticidade entre as composições com ambas as pozolanas avaliadas, e que o uso do resíduo de caulim promoveu valores de módulo de elasticidade inferiores aos obtidos para as composições de referência, apesar dos resultados até o teor 20% (Fig. 4.23a, 4.23b e 4.23c) satisfazerem ao limite recomendado por Buttler (2007). Considerando-se o desvio padrão dos resultados dos corpos de prova de referência (0% de substituição), observa-se na

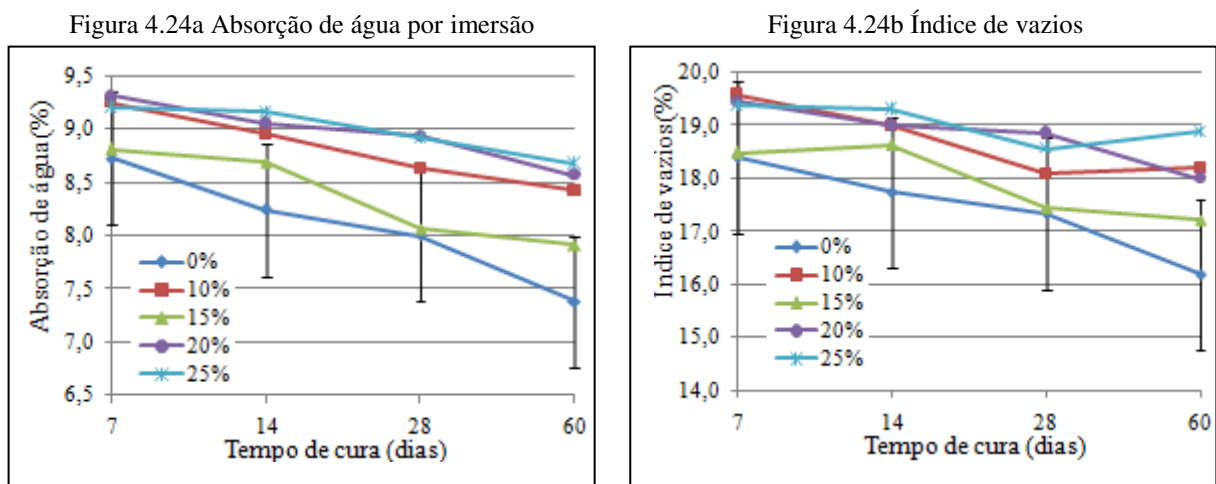
Figura 4.23a que os corpos de prova com 10% de resíduo de caulim apresentaram aos 7, 14 e 28 dias módulo de elasticidade similar. Assim como os resultados encontrados para a resistência à compressão e resistência à tração, o aumento do teor de substituição para o traço 1:5,56 promoveu redução no módulo de elasticidade, sendo encontrados os menores valores para o teor de 25% de substituição.

Verifica-se também que a evolução em função do tempo de cura também é muito discreta (em média 15% entre 7 e 60 dias), o que está de acordo com a afirmação de Neville (1997) de que o módulo de elasticidade não é influenciado pelo tempo de cura e sim pelo módulo de elasticidade dos agregados.

4.4.1.3 Propriedades físicas

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica real estão apresentados no Apêndice H. O efeito dos diferentes teores de substituição do cimento pelo resíduo de caulim, na absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova no traço 1:5,56 pode ser observado através dos gráficos representados na Figura 4.24.

Figura 4.24 - Absorção de água e índice vazios dos corpos de prova no traço 1:5,56 com resíduo de caulim



Observando-se a Figura 4.24, verifica-se que a absorção de água por imersão (Fig. 4.24a) e o índice de vazios (Fig. 4.24b) tendem a aumentar com a elevação dos teores de substituição e que tendem a reduzir com a prolongação do tempo de cura, o que se justifica pela continuação do processo de hidratação do cimento e, conseqüentemente, maior

quantidade de produtos hidratados acarretando maior refinamento da estrutura dos poros. Com relação aos teores de substituição, os valores mais elevados de absorção justificam-se pelo fato de que o resíduo possui maior superfície específica do resíduo do que o cimento, e, conforme foi verificado nas análises térmicas, parte dele não reage com o CH atuando como partícula inerte aumentando assim o teor de finos da composição o que, segundo Drago, Verney e Pereira (2009), requer maior quantidade de água de amassamento acarretando, com a evaporação desta, maior índice de vazios e maior absorção.

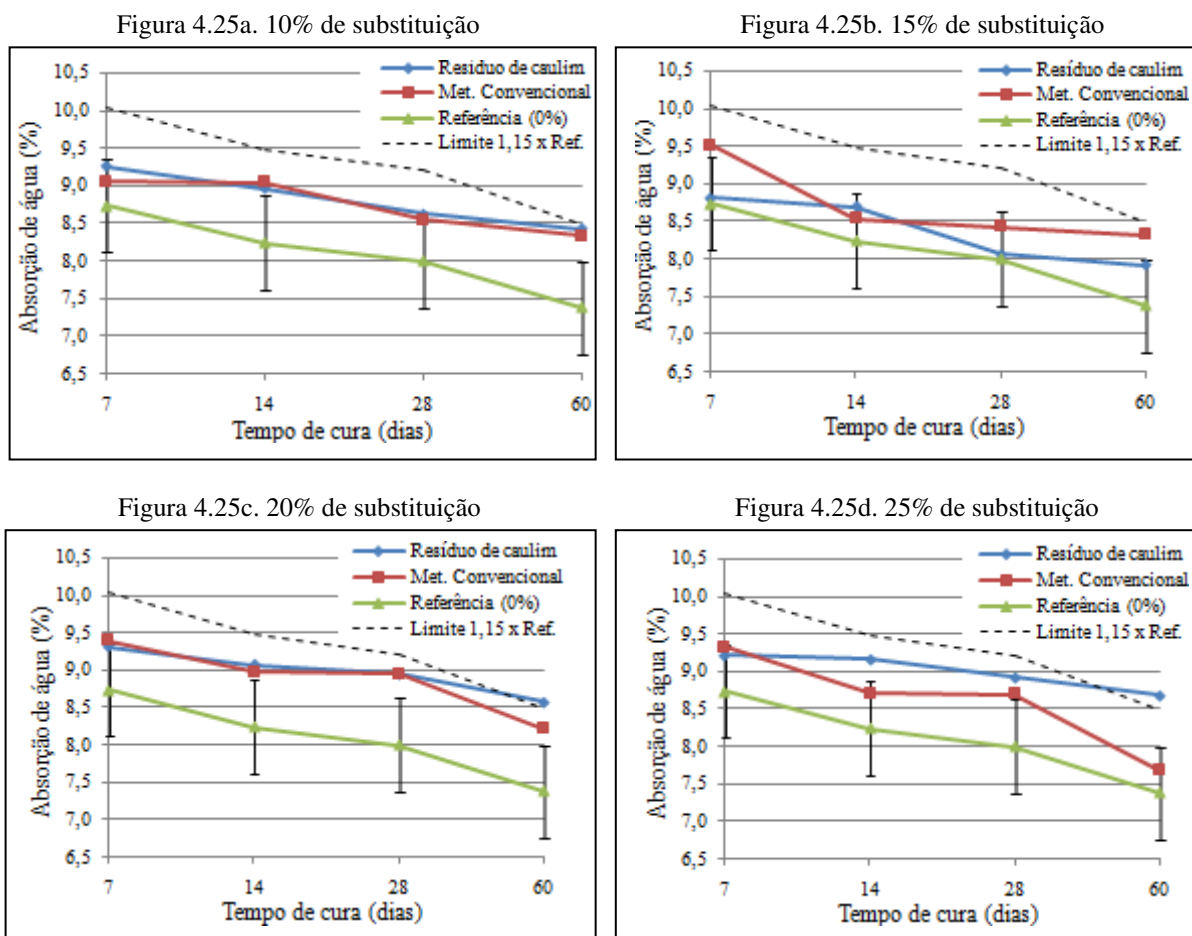
Para todos os teores de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim os resultados obtidos para ambas as propriedades foram superiores aos dos corpos de prova de referência, sem substituição, porém, entre os 7, 14 e 28 dias de cura, os corpos de prova com teores de 10% e 15% apresentaram acréscimos de 11% e 13% nas taxas de absorção, inferiores, portanto, ao acréscimo de 14% relatado por Cassagnabère *et al.* (2010) para o uso de 12,5% de metacaulim em concretos destinados à indústria de elementos pré-moldados.

Apesar dos corpos de prova com resíduo terem apresentados resultados de absorção mais elevados do que os obtidos para os corpos de prova de referência, verifica-se que todas as composições apresentaram valores que atendem aos requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2008) segundo a qual, concretos destinados à produção de blocos vazados para alvenaria devem apresentar, no máximo, 10% de taxa de absorção.

O uso do resíduo ocasionou pequena variação de massa específica real, $\pm 1,5\%$ em relação aos corpos de prova de referência, estando os valores obtidos para esta propriedade, juntamente com os valores de absorção de água e índice de vazios descritos no Apêndice H.

A comparação entre os resultados encontrados nos ensaios de absorção de água por imersão para os corpos de prova com o resíduo de caulim e os corpos de prova de referência está apresentada na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Absorção de água por imersão dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56 com resíduo de caulim e dos concretos de referência



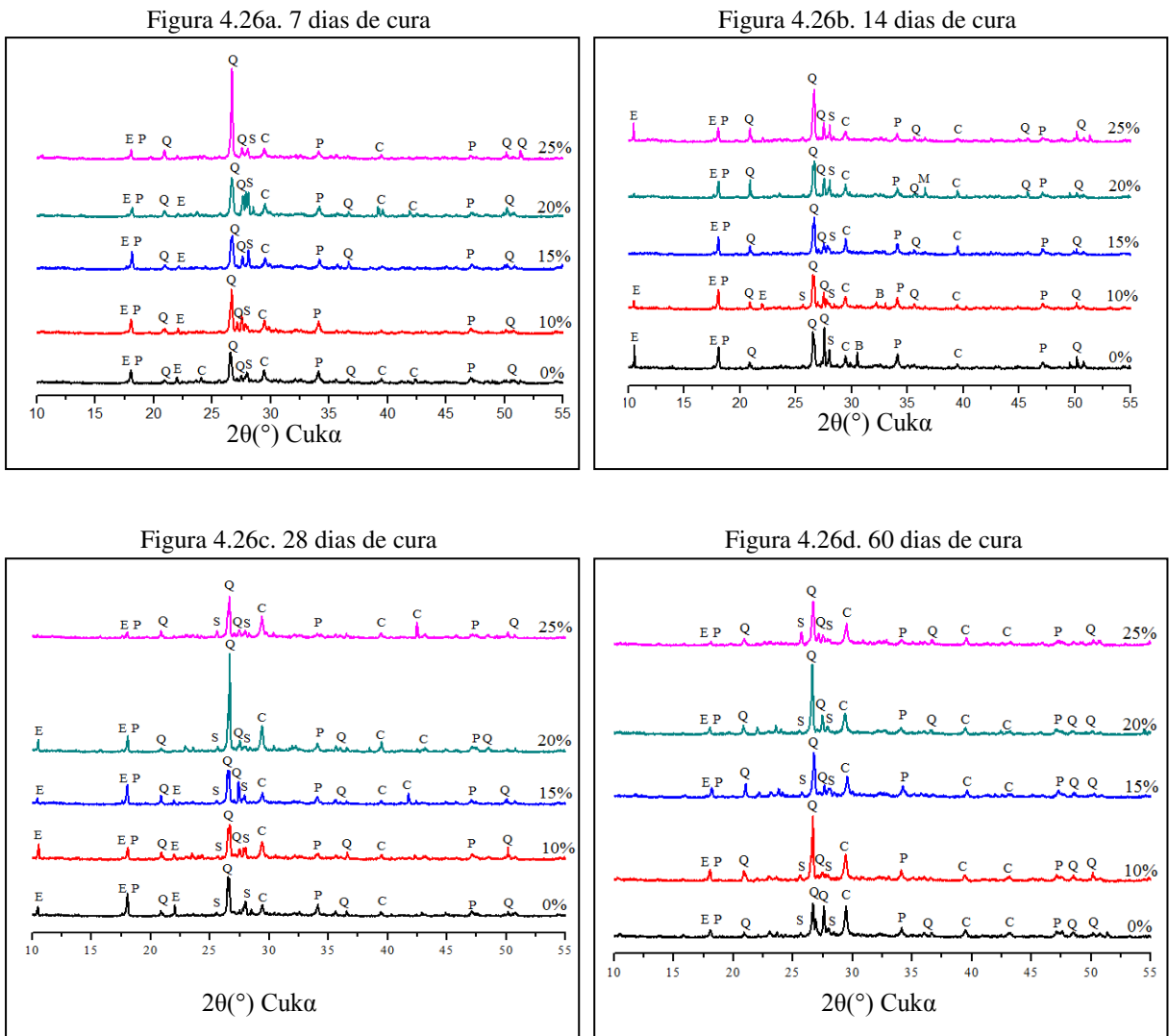
Através dos gráficos apresentados na Figura 4.25a, 4.25b e 4.25c verifica-se que os corpos de prova no traço 1:5,56 com 10%, 15% e 20% de substituição da massa do cimento por resíduo de caulim apresentaram valores de absorção compatíveis aos corpos prova com metacaulim convencional. Quando utilizado em teor de 25% de substituição (Fig. 4.25d) verifica-se que os corpos de prova com resíduo apresentaram valores de absorção superiores aos corpos de prova com metacaulim convencional o que pode ser justificado pelo índice de reatividade do resíduo ser inferior ao do metacaulim. Todos os resultados atendem aos requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2008) e são inferiores ao limite sugerido por Buttler (2007), entretanto os melhores resultados foram obtidos para os teores de 10% e 15% de substituição.

4.4.2 Traço 1:6,67

4.4.2.1 Análises térmicas e por difração de raios X

Na Figura 4.36 podem ser observados os difratogramas das composições com o resíduo de caulim nos diferentes teores de substituição analisados aos 7 (Fig. 4.26a), 14 (Fig. 4.26b), 28 (Fig. 4.26c) e 60 dias de cura (Fig. 4.26d).

Figura 4.26 - Difratogramas de raios X do traço 1:6,67 com o resíduo de caulim aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura



Legenda: E – etringita ($C_6AS_3H_{32}$); P – portlandita CH ($Ca(OH)_2$); Q – quartzo (SiO_2); S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H); C – calcita ($CaCO_3$).

Verifica-se, ao serem comparados os difratogramas das amostras do traço 1:6,67 aos 28 (Fig. 4.26c) e 60 dias (4.26d) com as idades iniciais (Fig. 4.26a e b), redução de intensidade

nos picos referentes à portlandita (hidróxido de cálcio) com o aumento do teor de substituição da massa do cimento pelo metacaulim obtido com o resíduo de caulim. Nota-se ainda a existência, a partir dos 28 dias de cura, o surgimento de pico adicional referente ao silicato de cálcio hidratado, o qual apresenta maior intensidade aos 60 dias de cura (Fig. 4.26d) comprovando, juntamente com a existência de picos relacionados à portlandita, de que a reação pozolânica não foi completada se prolongando após esta idade.

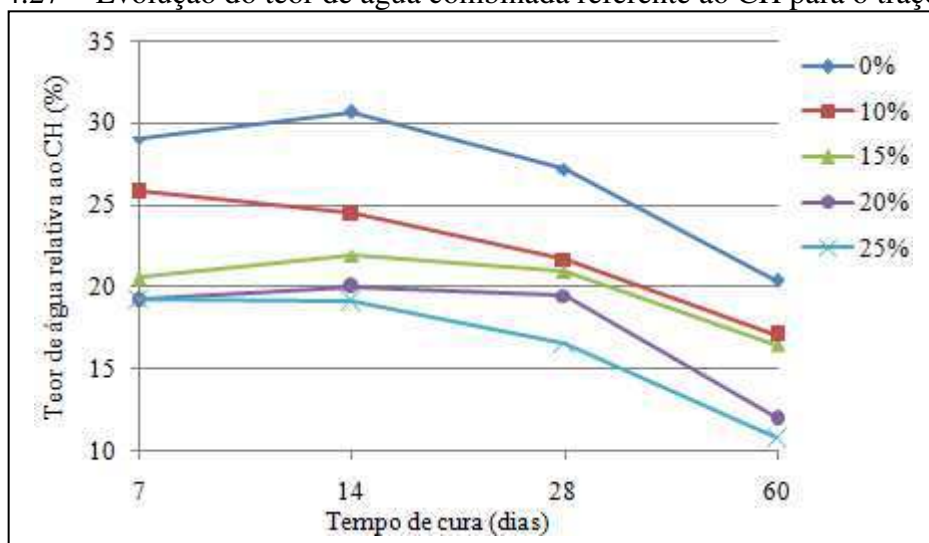
As fases identificadas, através da análise dos difratogramas apresentados na Figura 4.26, assim como as distâncias interplanares e localização dos picos, estão descritas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Identificação de fases por DRX para o traço 1:6,67

Fase identificada	Localização 2θ(°)	Distância interplanar (Å)
Portlandita (Ca(OH) ₂) - CH	18,10, 34,06 e 47,09	4,90, 2,63 e 1,93
Etringita (C ₆ AS ₃ H ₃₂)	10,46 e 18,10	8,46 e 4,90
Quartzo (SiO ₂)	20,85, 26,68, 36,69 e 50,19	4,26, 3,34, 2,45 e 1,82
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	25,67 e 25,67	3,47 e 3,25
Calcita (CaCO ₃)	29,32, 39,40 e 43,13	3,04, 2,28 e 2,10
Celita (C ₃ A)	23,11	3,85

A evolução do teor de água combinada relacionada ao CH, em relação ao índice de hidratação até os 60 dias de cura, para o traço 1:6,67 com diferentes teores de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim, obtida através de análises térmicas (Apêndice K e L) está apresentada na Figura 4.27.

Figura 4.27 - Evolução do teor de água combinada referente ao CH para o traço 1:6,67



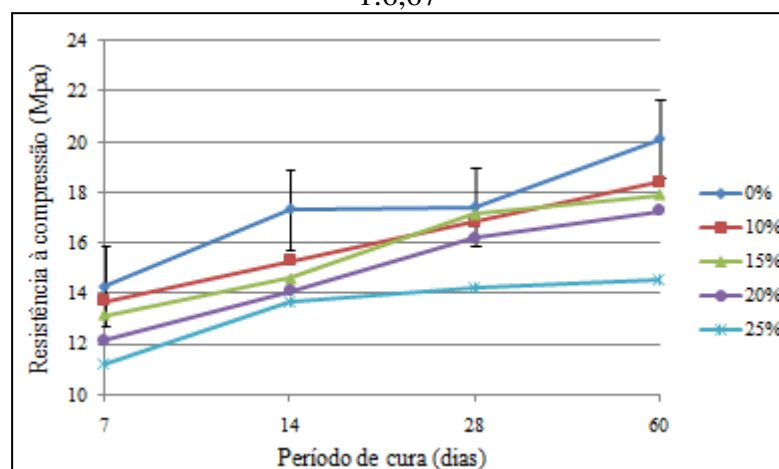
Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.27, observa-se que todas as composições contendo resíduo de caulim apresentaram teores de água relativa ao CH

inferiores ao concreto de referência, sem adição de pozolana e que estes tendem a reduzir com o aumento do teor de substituição e do tempo de cura. As maiores taxas de redução, em relação ao concreto de referência, foram encontradas aos 14 dias confirmando a afirmação de Nita e John (2007) de que, nesta idade, ocorre o ápice da reação pozolânica. Verifica-se que nesta idade, para os teores de 10%, 15% e 20% de substituição as reduções de CH (estimado em função do teor de água combinada) foram na ordem de 9%, 13% e 15%, respectivamente, em relação ao concreto de referência, sendo a maior redução encontrada para o teor de 25% de substituição o qual promoveu 17% de redução de CH. Resultados semelhantes são relatados por Gonçalves, Toledo Filho e Fairbairn (2006). A redução do CH pôde também ser comprovada pelos resultados do teor de água combinada relativa ao CaCO_3 (Apêndice 9) os quais demonstraram que em todos os concretos com resíduo houve, em relação ao concreto de referência, redução na carbonatação chegando a atingir 54% para 25% de substituição aos 60 dias de cura. Apesar dos compostos C-S-H, C_2S e C_3S serem passíveis de carbonatação (PETER *et al.* 2008), o CO_2 é consumido principalmente pelo CH e, com a redução deste, haverá conseqüente redução na carbonatação, justificando assim os resultados obtidos.

4.4.2.2 Propriedades mecânicas

Os valores obtidos nos ensaios mecânicos para o traço 1:6,67 estão apresentados no Apêndice M. A influência do uso do resíduo de caulim na resistência à compressão do concreto no traço 1:6,67 até os 60 dias de cura pode ser observada na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67



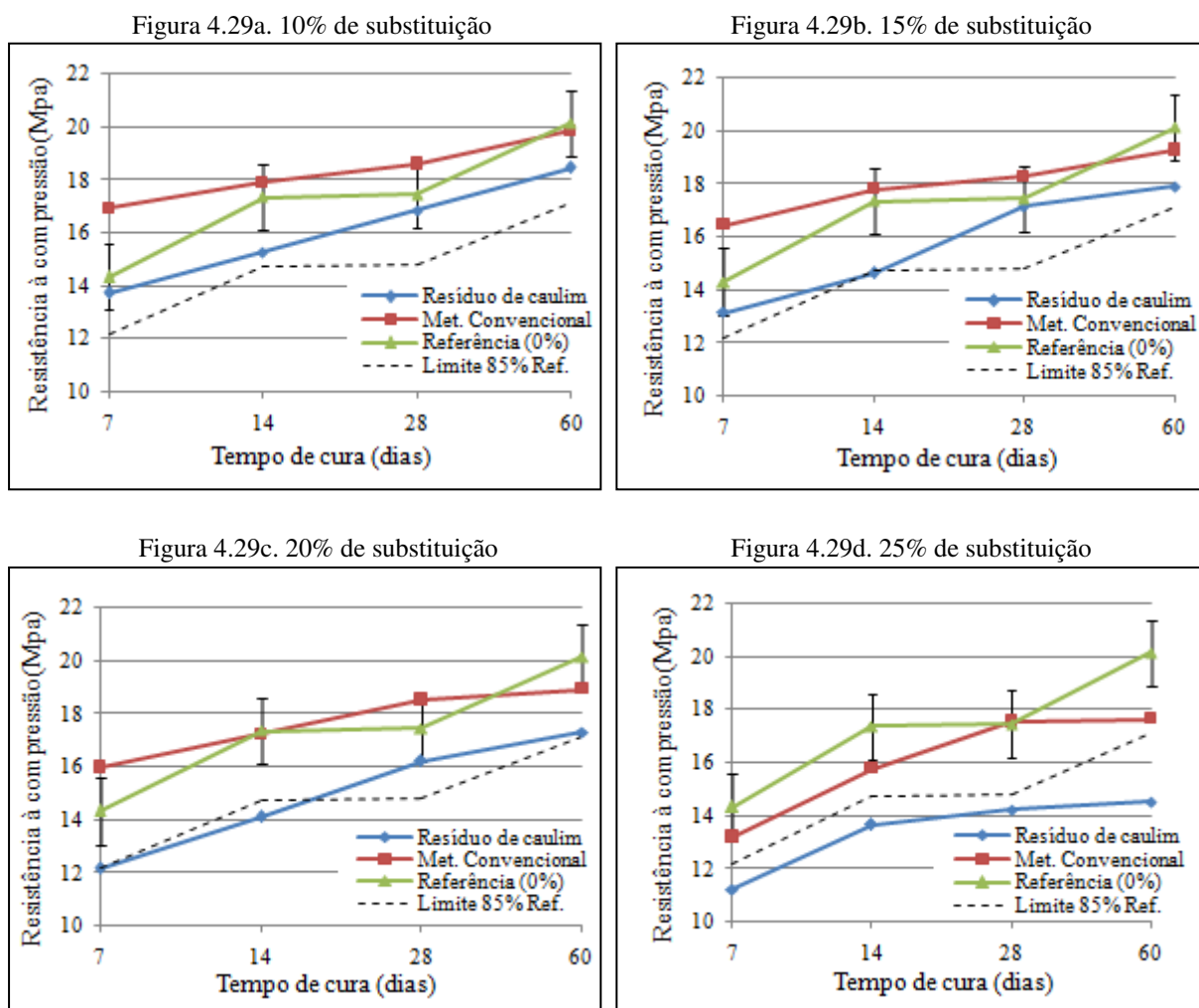
Observando-se a Figura 4.28 verifica-se que os corpos de prova com o resíduo de caulim, para todos os teores de substituição e em todas as idades, apresentaram valores de

resistência à compressão inferiores aos dos corpos de prova de referência (0% de resíduo) e que tendem a reduzir com a elevação do teor de substituição. Entretanto, considerando-se o desvio padrão para os valores obtidos para o traço de referência, nota-se que, 10% de substituição da massa do cimento pelo resíduo, promoveram valores de resistência à compressão que podem ser considerados similares aos de referência. Confirmando os resultados de redução de CH e acréscimo de produtos hidratados encontrados nas análises térmicas, nota-se que, aos 28 dias de cura, a substituição do cimento pelo resíduo em teores de até 20% promoveu nos corpos de prova resistência à compressão compatível com a dos corpos de referência. Conflitando com os resultados das análises térmicas que apresentaram menor teor de CH para os concretos com 25% de resíduo, para esse teor foram encontrados os menores valores de resistência, indicando que a reação pozolânica não foi suficiente para compensar a redução de 25% da massa do cimento. Apesar dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova com o resíduo de caulim serem inferiores aos dos corpos de prova de referência, verifica-se que todos os resultados foram superiores ao limite mínimo de 6 MPa especificado pela NBR 6136 (ABNT, 2008) para blocos vazados de concreto.

Comparando-se os resultados iniciais (7 dias) com os obtidos aos 60 dias de cura, verificou-se maior taxa de evolução para as composições com 15% de resíduo, as quais apresentaram 42% de acréscimo nos valores de resistência à compressão, acima, portanto, do resultado de referência o qual apresentou taxa de evolução de 41% e dos corpos de prova com 10%, 20% e 25% os quais apresentaram 34%, 36% e 30% respectivamente. Entretanto, devido ao fato da reação pozolânica ocorrer em maior intensidade entre os 7 e 14 dias de cura (NITA e JOHN, 2007), todas as composições com o resíduo apresentaram aos 28 dias taxas de evolução de resistência à compressão superiores aos corpos de prova.

A comparação entre os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova no traço 1:6,67 o resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência (metacaulim convencional e sem metacaulim) está representada na Figura 4.29.

Figura 4.29 - Resistência à compressão de corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com resíduo de caulim e dos concretos com metacaulim convencional e sem metacaulim

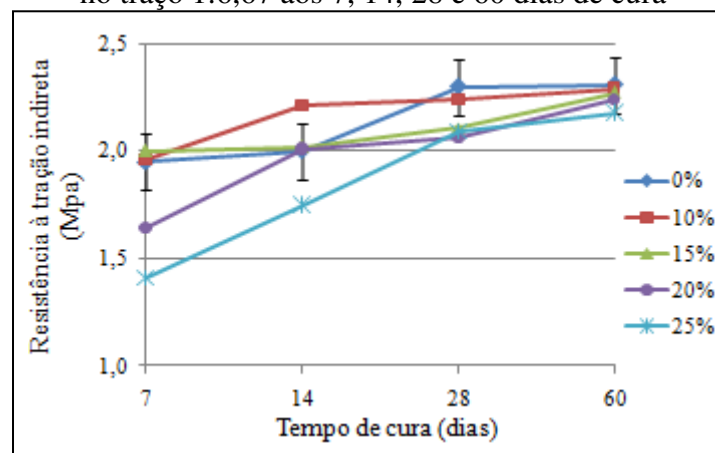


Observando-se a Figura 4.29 verifica-se que apesar de serem inferiores às resistências à compressão dos corpos de prova de referência, os corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com 10%, 15% e 20% de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim apresentaram valores que atendem ao limite de 85% recomendado por Buttler (2007), como tolerância para uso de materiais alternativos para blocos de concreto, entretanto, o teor de 25% de substituição promoveu resistências inferiores a esse limite. Comparando-se a evolução das resistências promovidas pelo resíduo de caulim e pelo metacaulim convencional, classificado segundo o fabricante de alta reatividade, verifica-se que o resíduo de caulim promoveu taxa de evolução superior à do metacaulim convencional para teores de substituição de até 20%. Para os teores 10%, 15% e 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim as taxas de evolução das resistências até os 60 dias de cura foram 15%,

16% e 20%, respectivamente, superiores às taxas de evolução apresentadas por iguais teores de substituição pelo metacaulim convencional.

Na Figura 4.30 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova com o resíduo de caulim e a comparação destes aos resultados obtidos para os corpos de prova de referência (sem adição) até os 60 dias de cura.

Figura 4.30 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura

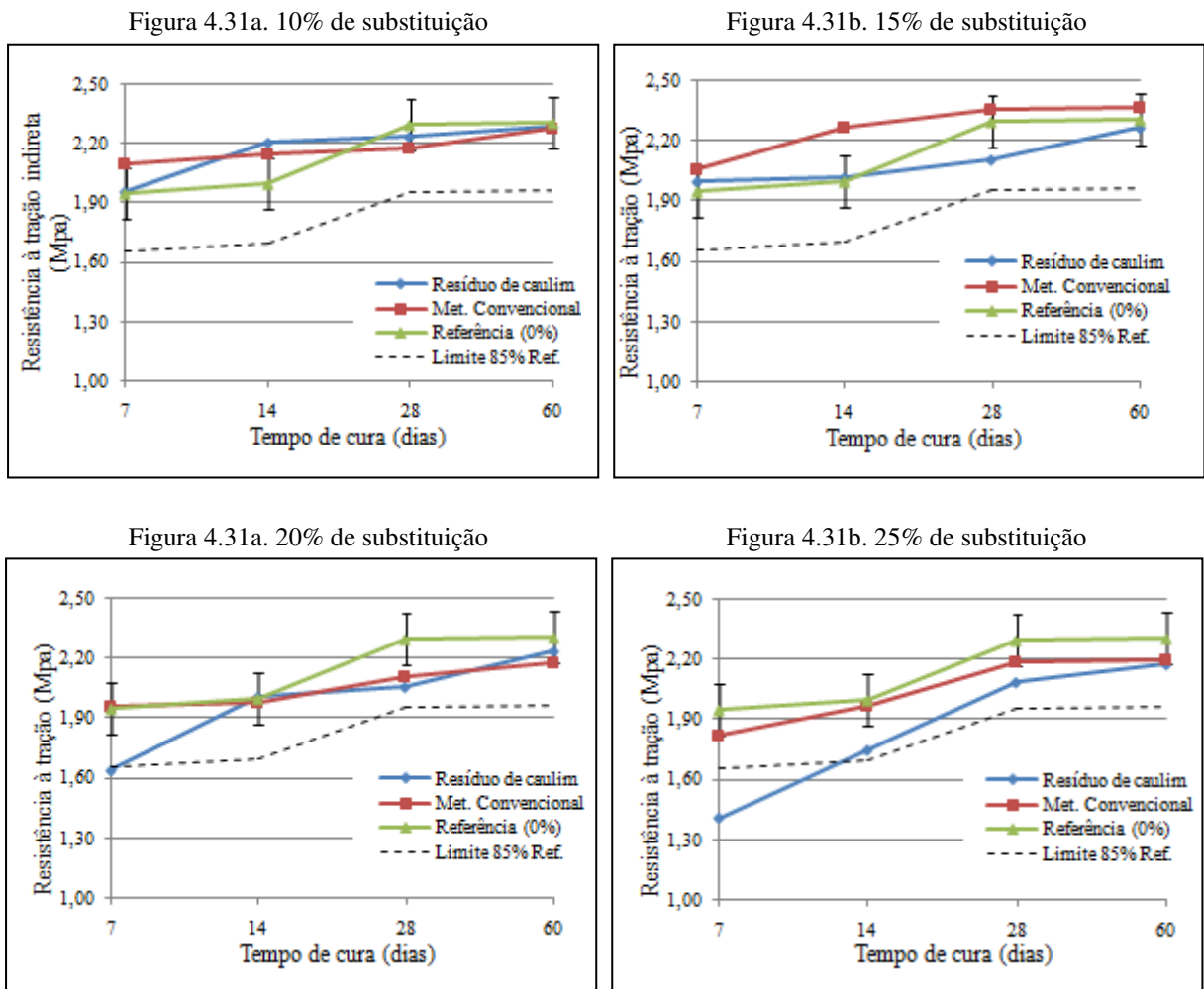


Observando-se a Figura 4.30 verifica-se que, aos 7 e 14 dias, os corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com 10 e 15% de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim apresentaram resistência à tração superior aos corpos de prova de referência, sem adição de pozolana. Para os teores de 20% e 25%, apesar de terem apresentado maior evolução entre os 7 e 14 dias, em todas as idades a resistência à tração foi inferior à dos corpos de prova de referência. A resistência à tração apresentou valores entre 11% e 15% dos valores obtidos para a resistência à compressão, sendo compatíveis aos publicados por Souza (2003), ao avaliar o uso de metacaulim obtido com o resíduo de caulim sedimentar em concretos plásticos. O autor encontrou para a relação entre a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta) e resistência à compressão valores entre 10% e 14%, valores semelhantes aos observados nesta pesquisa os quais estão detalhados no Apêndice N.

Considerando-se o desvio padrão dos resultados de resistência à tração para os corpos de prova de referência, observa-se que aos 60 dias de cura todos os teores de substituição apresentaram resultados semelhantes aos de referência.

Na Figura 4.31 os resultados de resistência à tração dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com resíduo de caulim, são comparados aos encontrados para os corpos de prova referência, com metacaulim convencional em iguais teores de substituição e sem adição de pozolana.

Figura 4.31 - Resistência à tração dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência



Analisando os gráficos representados na Figura 4.31 verifica-se que todos os corpos de prova com metacaulim (resíduo e convencional) apresentaram resistência à tração acima do limite mínimo recomendado por Buttler (2007) de 85% da resistência dos corpos de prova de referência, sem metacaulim. Observa-se na Figura 4.31a que 10% de resíduo promoveu valores de resistência à tração superiores ao metacaulim convencional em todas as idades avaliadas e que ambas as pozolanas promoveram resultados similares aos obtidos para os concretos de referência, sem pozolana. Para os teores de 15%, 20% e 25% de substituição,

observa-se nas Figuras 4.31b, 4.31c e 4.31d que o desempenho do resíduo de caulim foi inferior aos concretos de referência, sem pozolana, porém aos 60 dias de cura não foram verificadas diferenças significativas de resistência à tração entre todas as composições avaliadas, corroborando os resultados publicados por Carmo e Portela (2008) e Rossignolo e Oliveira (2006), segundo os quais, o melhor desempenho da resistência à tração dos concretos com metacaulim pode ser atribuído à alteração da microestrutura da matriz de cimento, reduzindo o teor dos poros e melhorando a qualidade da zona de transição agregado-matriz.

Na Figura 4.32 podem ser observados os gráficos comparativos entre o módulo de elasticidade dos concretos no traço 1:6,67 com o resíduo de caulim e os concretos de referência, com o metacaulim convencional e sem adição.

Figura 4.32 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência

Figura 4.32a. 10% de substituição

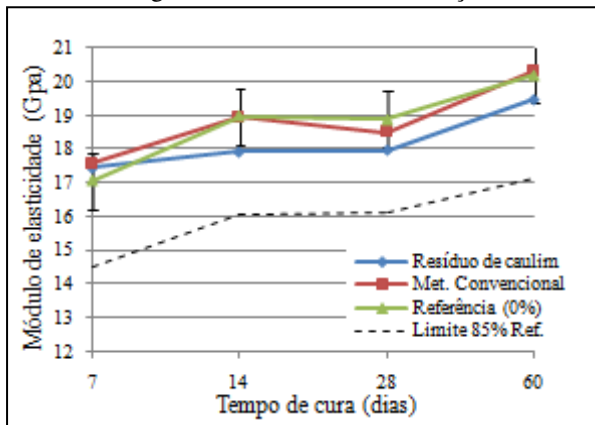


Figura 4.32b. 15% de substituição

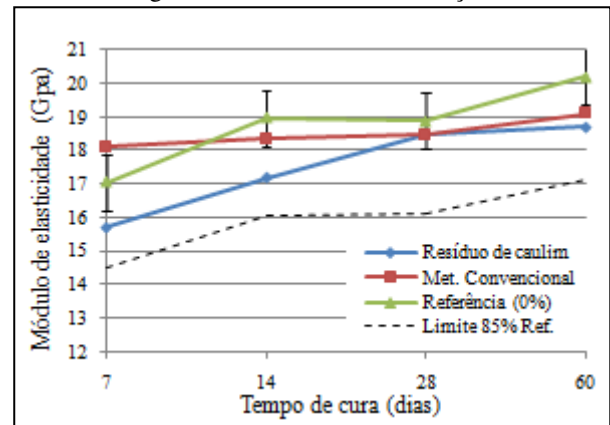


Figura 4.32c. 20% de substituição

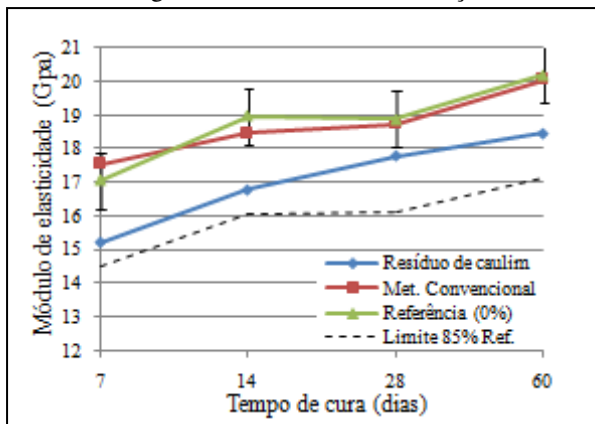
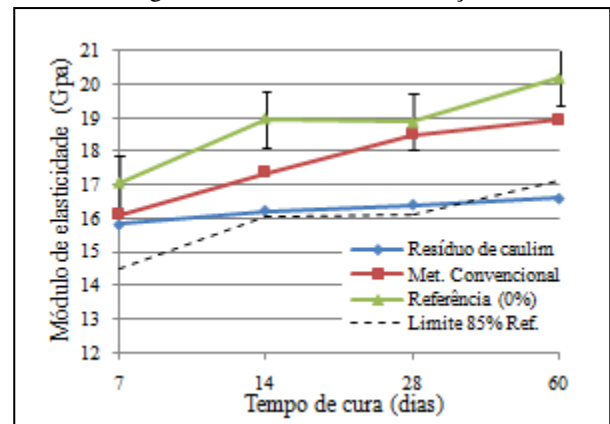


Figura 4.32d. 25% de substituição

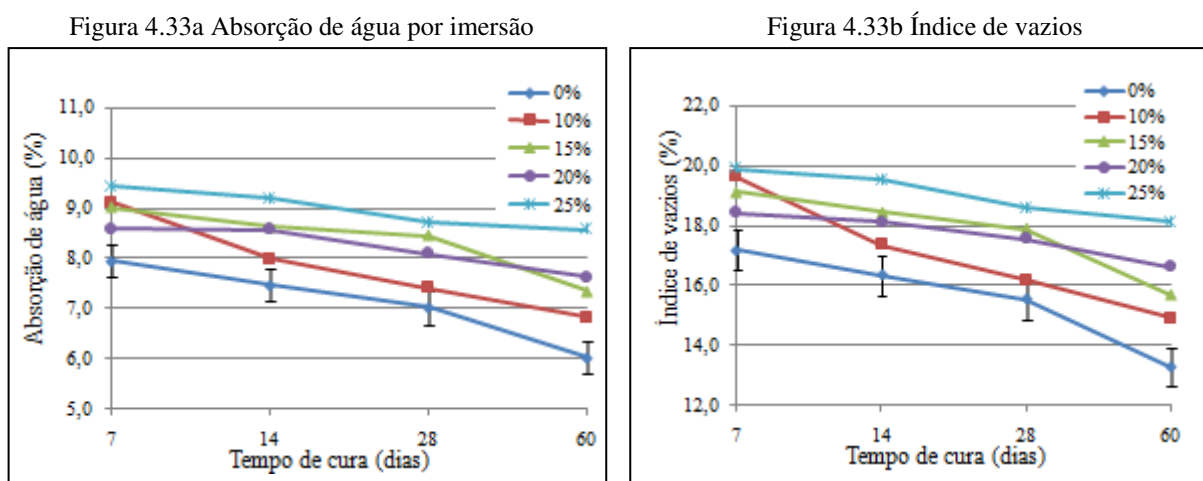


Os valores de módulo de elasticidade obtidos para os corpos de prova de concreto no traço 1:6,67 apresentaram valores similares aos encontrados por Buttler (2007) e Souza (2003). Comparando-se os valores apresentados na Figura 4.32a, observa-se que para o teor de 10% de substituição os valores de módulo de elasticidade dos concretos com resíduo de caulim não apresentaram diferença significativa para os valores obtidos para os concretos com metacaulim convencional e sem metacaulim. Observando-se as Figuras 4.32b, 4.32c e 4.32d, verifica-se que para 15%, 20% e 25% os concretos com resíduo de caulim apresentaram módulos de elasticidade inferiores aos de referência, apesar de atenderem ao limite mínimo sugerido por Buttler (2007). Verifica-se evolução discreta do módulo de elasticidade em função do tempo de cura, comportamento também identificado por Garcia, Santos e Ribeiro (2011) em pesquisa sobre o efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas. Entretanto, para os concretos com 15% e 20% de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim, verificou-se entre os 7 e 28 dias de cura acréscimo de 18% e 17% no módulo de elasticidade, o que pode ser creditado à reação pozolânica ocorrida entre os 7 e 14 dias de cura, aumentando a quantidade de ligações hidratadas e, por conseguinte, aumentando a rigidez do concreto.

4.4.2.3 Propriedades físicas

Os valores de massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos no traço 1:6,67 estão descritos no Apêndice O. A evolução da absorção de água e índice de vazios para o traço 1:6,67 até os 60 dias de cura pode ser observada através dos gráficos representados na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Propriedades físicas de corpos de prova no traço 1:6,67 com e sem resíduo de caulim



Os resultados apresentados na Figura 4.33 demonstram que o uso do resíduo de caulim promoveu acréscimo na absorção de água por imersão e índice de vazios, verificando-se que os valores de ambas as propriedades tendem a aumentar com a elevação do teor de substituição. O desempenho inferior aos corpos de prova de referência pode estar relacionado não só com a insuficiência da reação pozolânica em compensar a redução da massa do cimento, como também com o fato de que o aumento de finos nas composições ocasiona aumento na absorção do concreto. Em relação ao concreto de referência, sem resíduo, verificaram-se acréscimos de 13%, 22%, 27% e 42% de absorção para os teores de substituição de 10%, 15%, 20% e 25%, respectivamente, entretanto, todos os resultados são inferiores ao limite máximo de 10% especificado pela NBR 6136 (ABNT, 2008) para blocos vazados de concreto.

Na Figura 4.34 os valores de absorção dos concretos com resíduo de caulim são comparados aos obtidos para os concretos de referência, com metacaulim comercial e sem metacaulim.

Figura 4.34 - Absorção de água por imersão dos corpos de prova no traço 1:6,67 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência

Figura 4.34a. 10% de substituição

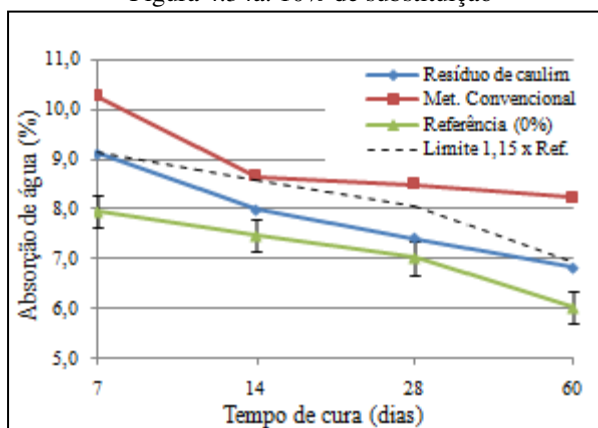


Figura 4.34b. 15% de substituição

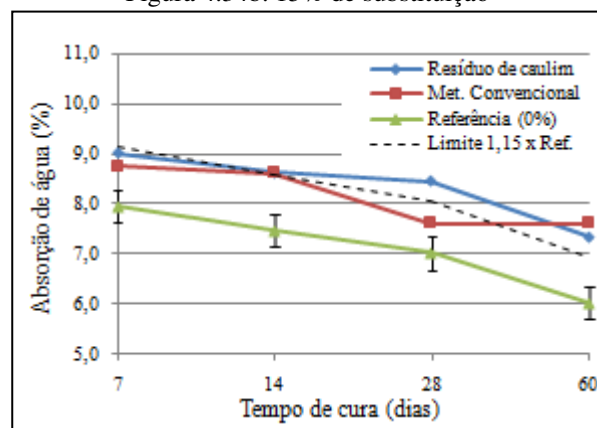


Figura 4.34c. 20% de substituição

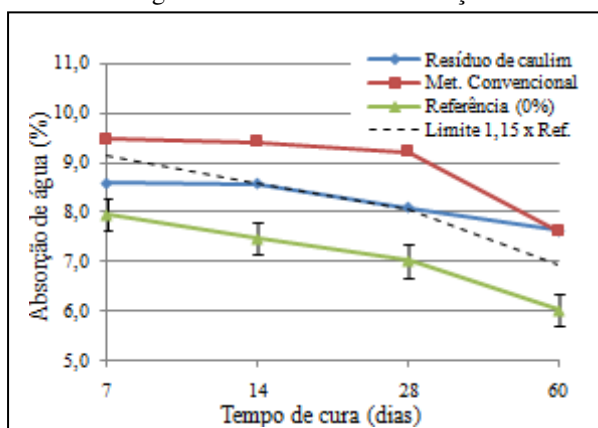
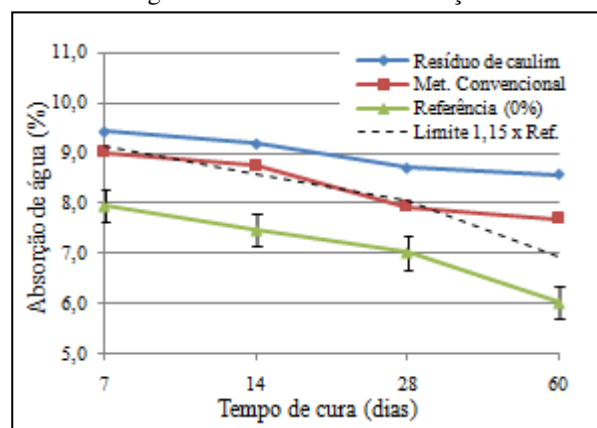


Figura 4.34d. 25% de substituição



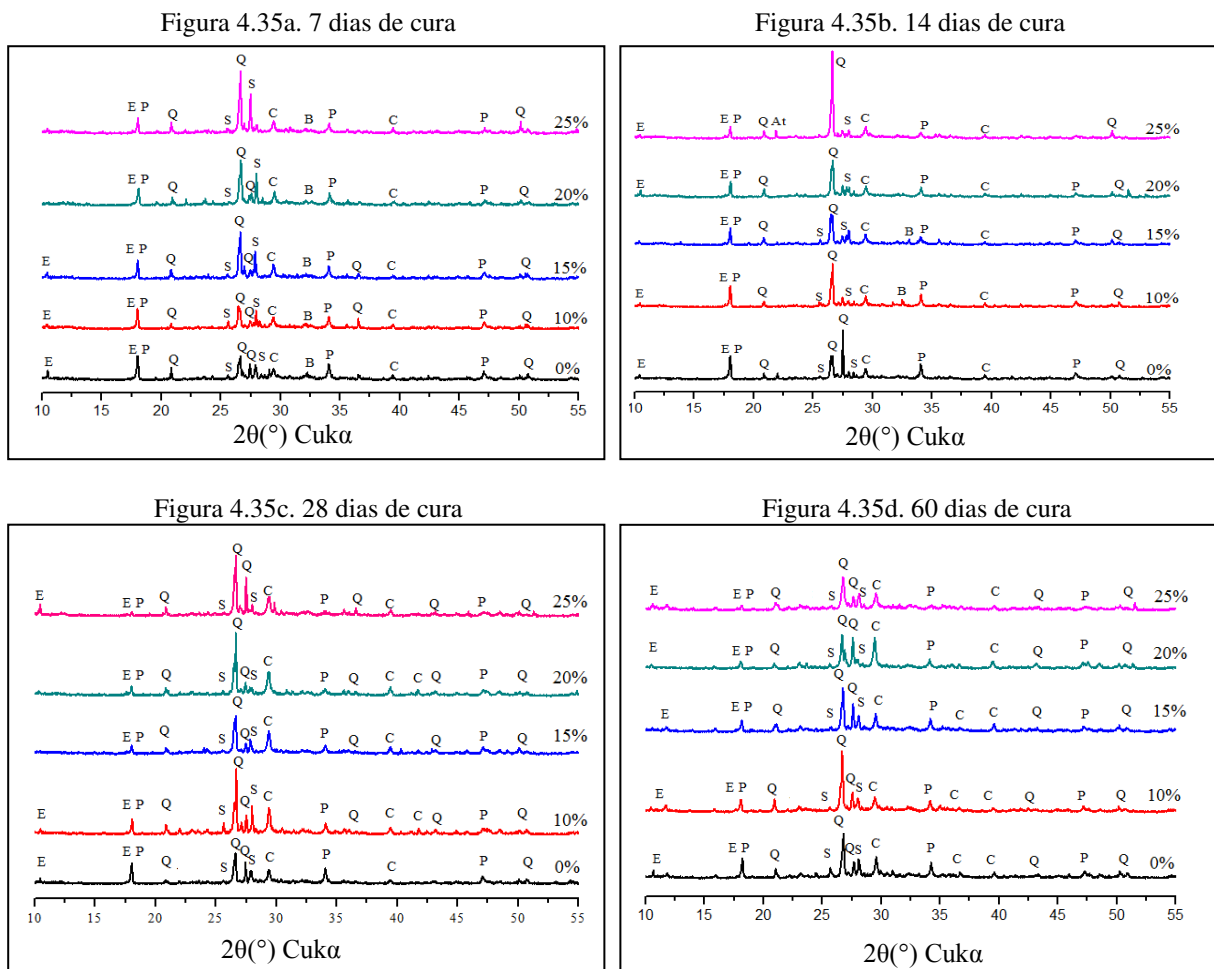
Observando-se a Figura 4.34a verifica-se que os concretos com 10% de resíduo de caulim, apesar de apresentarem valores de absorção superiores aos concretos sem metacaulim, apresentaram taxas de absorção inferiores aos concretos com metacaulim convencional estando de acordo com os resultados encontrados para as propriedades mecânicas. Considerando-se a limite de tolerância de 15% acima dos corpos de prova de referência, sem metacaulim, observando-se as Figuras 4.34b, 4.34c e 4.34d comprova-se que apenas os corpos de prova com 10% de metacaulim obtido com o resíduo atendem a este limite.

4.4.3 Traço 1:8,33

4.4.3.3 Análises térmicas e por difração de raios X

Na Figura 4.35 podem ser observados os difratogramas das amostras do concreto no traço 1:8,33, com o resíduo de caulim analisados aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura.

Figura 4.35 - Difratogramas de raios X para o traço 1:8,33 com e sem resíduo de caulim

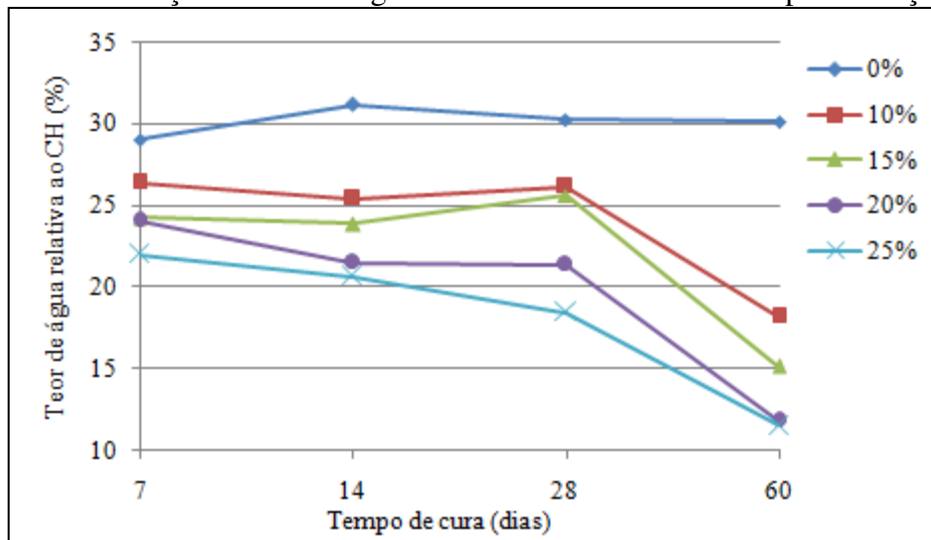


Legenda: E – etringita ($C_6AS_3H_{32}$); P – portlandita CH ($Ca(OH)_2$); Q – quartzo (SiO_2); S – silicato de cálcio hidratado (C-S-H); C – calcita ($CaCO_3$).

Analisando-se os difratogramas apresentados na Figura 4.35 verifica-se haver redução na intensidade dos picos relativos à portlandita (hidróxido de cálcio) com o avanço do tempo de cura e com o aumento do teor de substituição. Entretanto, esta redução é mais visível aos 28 e 60 dias de cura (Figura 4.35c e 4.35d) provavelmente devido ao fato de que a reação pozolânica ocorreu em maior intensidade em idades anteriores, sendo mais lenta para as idades seguintes. As principais fases identificadas foram: portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), caracterizada pela existência dos picos às distâncias interplanares de 4,933 Å, 2,628 Å e 1,927 Å; etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) caracterizada pelas distâncias interplanares de 8,465 Å e 4,933 Å; quartzo (SiO_2) correspondente aos picos nas distâncias interplanares de 4,275 Å, 3,352 Å, 2,455 Å e 1,800 Å, e que, devido ao fato da massa predominante nos concretos ser dos agregados, é notada maior frequência dos picos a ele relacionados. A existência de picos relativos à portlandita ainda na idade de 60 dias demonstra que a reação pozolânica não se completou, podendo se prolongar após 360 dias, de acordo com Siddique e Klaus (2009) e Cassagnabère *et al* (2010).

A evolução do teor de água combinada relacionada ao CH, em relação ao índice de hidratação até os 60 dias de cura para o traço 1:8,33 com resíduo de caulim obtida através de análises térmicas (Apêndice P e Q) está apresentada na Figura 4.36.

Figura 4.36 - Evolução do teor de água combinada referente ao CH para o traço 1:8,33



Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.36 observa-se que, em relação ao concreto de referência, houve redução do hidróxido de cálcio (CH) para todos os teores de substituição. Aos 7 dias de cura esta redução é causada principalmente pela redução da massa do cimento, verificando-se reduções de 9,09%, 16,56%, 17,14% e 24,21% para os teores de

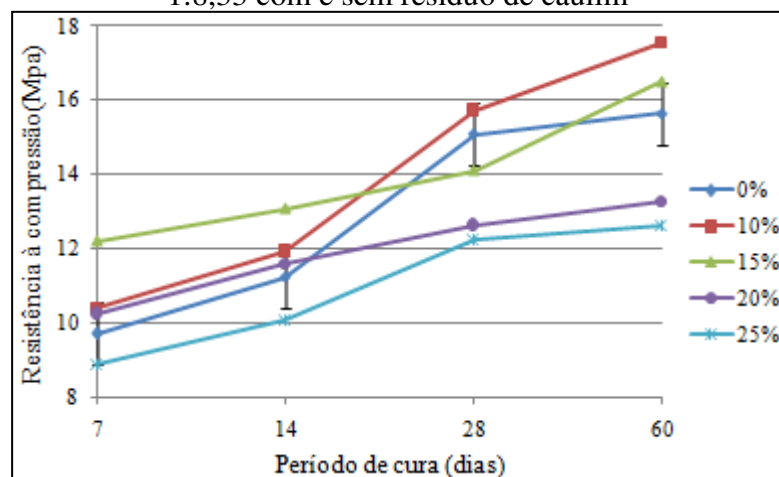
substituição da massa do cimento pelo resíduo em teores de 10%, 15%, 20% e 25%, respectivamente. Além do percentual de redução da massa do cimento verificou-se aos 14 e 28 de cura redução média de CH nos valores de 8,76% e 6,85, respectivamente, atingindo o valor máximo de 38,20% aos 60 dias de cura, indicando que a reação pozolânica ocorreu em maior intensidade entre os 28 e 60 dias de cura, divergindo da afirmação de Nita e John (2007) de geralmente ocorrer entre 7 e 14 dias de cura. Entretanto, estão de acordo com os resultados de Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) e Anjos e Neves (2011) que encontraram melhores desempenhos de pozolanas após os 28 dias cura.

Com relação ao índice de pozolanicidade, aqui considerado como a relação entre o índice de hidratação dos concretos com resíduo de caulim e do concreto de referência, sem resíduo, verificou-se o melhor resultado para 20% de substituição da massa do cimento pelo resíduo, promovendo acréscimo de 43% nos compostos hidratados. O melhor desempenho do resíduo de caulim para o traço 1:8,33, em relação aos demais traços avaliados, pode ser justificado pelo teor de umidade que erroneamente está relacionado a baixos fatores de A/C. Enquanto para o traço 1:5,56 o teor de umidade máximo que permitiu a moldagem foi de 8,3%, resultando fator A/C de 0,52, para o traço 1:8,33 o teor de umidade foi de 5,4%, resultando fator A/C de 0,62 e, por conseguinte, maior quantidade de água disponível para a hidratação do cimento e a reação pozolânica com o resíduo.

4.4.3.2 Propriedades mecânicas

Os valores obtidos nos ensaios mecânicos para o traço 1:8,33 estão apresentados no Apêndice 15. A influência do uso do resíduo de caulim na resistência à compressão do concreto no traço 1:8,33 até os 60 dias de cura pode ser observada na Figura 4.37.

Figura 4.37 - Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto no traço 1:8,33 com e sem resíduo de caulim



Diferentemente dos traços analisados anteriormente, observa-se na Figura 4.37 que os corpos de prova no traço 1:8,33 com 10 e 15 % de substituição aos 60 dias de cura apresentaram resistências à compressão superiores aos corpos de prova de referência, podendo ser considerada constante a evolução das resistências entre os 7 e 14 dias para todas as composições, inclusive a de referência (0% de resíduo). Verifica-se o melhor desempenho para os concretos com 10% de substituição da massa do cimento pelo resíduo, para os quais, aos 7, 14 e 28 dias de cura foram obtidos acréscimos de 6% de resistência em relação aos concretos de referência, verificando-se aos 60 dias acréscimo de 12% em relação a estes, estando de acordo com os resultados relatados por Carmo e Portella (2008) que observaram aos 90 dias acréscimos de resistência na ordem de 18% para concretos com 8% de metacaulim de alta reatividade. Para as idades iniciais o acréscimo constante das resistências pode ser atribuído ao efeito filler do resíduo, em virtude do menor diâmetro de suas partículas em relação às do cimento, porém, as resistências aos 60 dias estão relacionadas à reação pozolânica ocorrida em maior intensidade entre os 28 e 60 dias, como demonstraram as análises térmicas.

Verifica-se ainda que, para o teor de 15% de substituição aos 7 e 14 dias de cura, foram obtidos valores de resistência à compressão superiores às obtidas para os corpos de prova com 10%, entretanto, para 28 e 60 dias de cura, as resistências são similares às dos corpos de prova de referência. Para os concretos com 20% e 25% de substituição da massa do cimento pelo resíduo, verifica-se aos 60 dias de cura redução de 15% e 21% na resistência à compressão do concreto de referência, demonstrando que, a reação pozolânica promovida pelo resíduo foi insuficiente para compensar a retirada da massa do cimento nesses teores e que o excedente de partículas inertes atua de forma prejudicial às propriedades mecânicas do concreto, conforme também foi relatado por Agredo, Gutiérrez e Arjona (2011) e Menezes *et al.* (2009) os quais encontraram decréscimo na resistência à compressão para teores acima de 20% e 15% de metacaulim, respectivamente.

A comparação entre as resistências à compressão dos corpos de prova no traço 1:8,33 com o resíduo de caulim e dos corpos de prova com metacaulim convencional e sem metacaulim está representada na Figura 4.38

Figura 4.38 - Resistência à compressão de corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim e dos corpos de prova com metacaulim convencional e sem metacaulim

Figura 4.38a. 10% de substituição

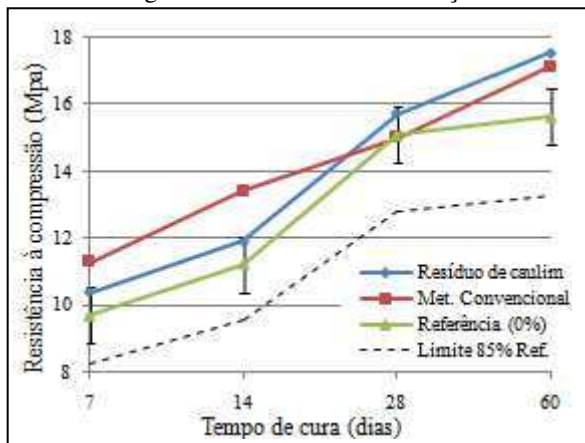


Figura 4.38b. 15% de substituição

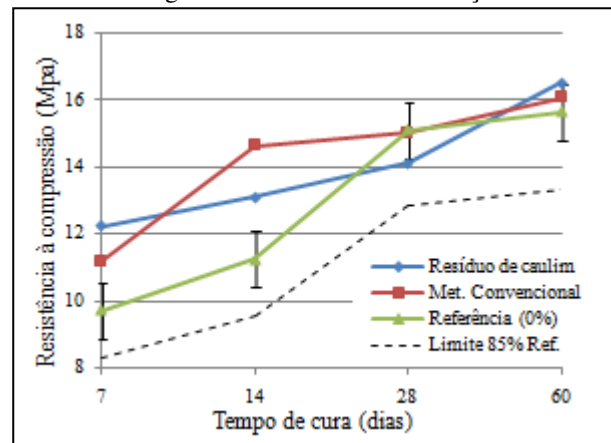


Figura 4.38c. 20% de substituição

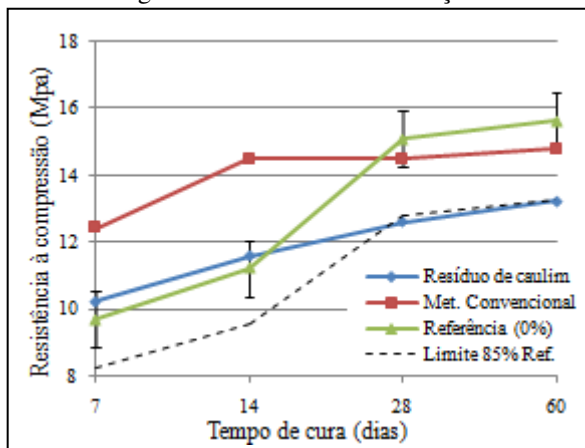
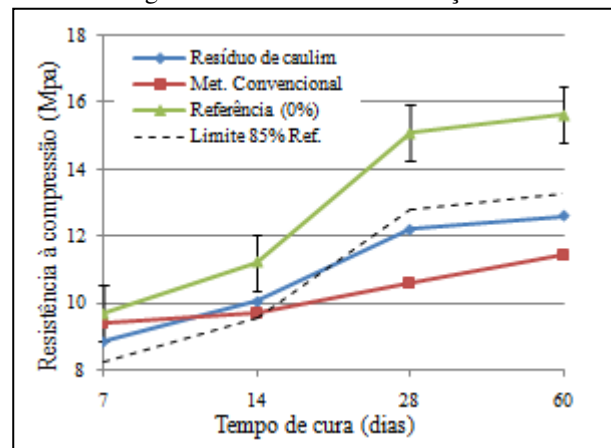


Figura 4.38d. 25% de substituição



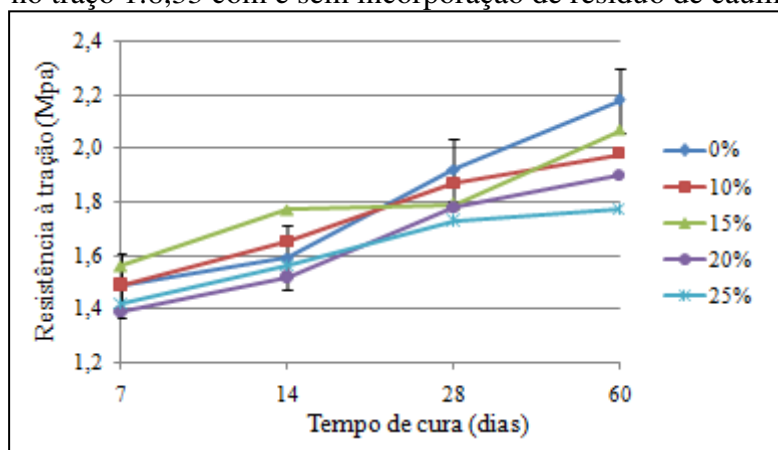
Observando-se a Figura 4.38 verifica-se que para teores de 10% e 15% de substituição da massa do cimento por resíduo de caulim os valores de resistência à compressão aos 60 dias de cura foram similares aos obtidos para o metacaulim convencional e que ambos os resultados foram superiores ao obtido para o concreto sem pozolana. Para o teor de 20% de resíduo, os resultados em todas as idades se apresentaram inferiores aos obtidos para o metacaulim convencional, comportamento este justificado pela baixa reatividade do resíduo de caulim em relação ao metacaulim convencional, de alta reatividade. Verifica-se também que os valores de resistência à compressão obtidos para os concretos com 20% de resíduo não atendem ao limite de redução de 85% da resistência do concreto de referência sugerido por Butler (2007), para concretos utilizando resíduos. A substituição de 25% do cimento tanto pelo resíduo de caulim como pelo metacaulim convencional, promoveu reduções na resistência à compressão variando entre 19 e 30% em relação aos corpos de prova sem metacaulim, indicando que o uso de teores de substituição acima de 20% é prejudicial à

evolução das propriedades mecânicas do concreto, sendo inclusive inferiores ao limite sugerido por Buttler (2007). A evolução das resistências à compressão encontradas para o traço 1:8,33 ao diferenciar da evolução dos demais traços estudados, confirma a observação feita por Vu et al. (2001), de que as proporções das misturas afetam diretamente o desenvolvimento das propriedades mecânicas de concretos e argamassas com metacaulim.

Apesar de não serem encontradas na literatura pesquisada referências quanto ao uso de metacaulim em concretos destinados à produção de elementos pré-moldados, para concretos Fator A/C = 0,35, Sabir et al. (2001) encontraram resultados em torno de 10% como nível ótimo de substituição do cimento por metacaulim, sendo resultados semelhantes citados por Siddique e Klaus (2009). Portanto, tendo sido encontrados nesta pesquisa como 10 e 15% os teores ótimos de substituição, tais resultados estão de acordo com os encontrados pelos autores anteriormente citados.

A relação entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral e os resultados de resistência à compressão (Apêndice N) apresentou valores entre 10 e 17%, estando de acordo com os resultados relatados por Barbosa e Hanai (2006) e Sacht e Rossignolo (2008). Na Figura 4.39 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova no traço 1:8,33, com substituição do cimento nos teores 0%, 10%, 15%, 20% e 25% pelo resíduo processado, aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura.

Figura 4.39 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto no traço 1:8,33 com e sem incorporação de resíduo de caulim



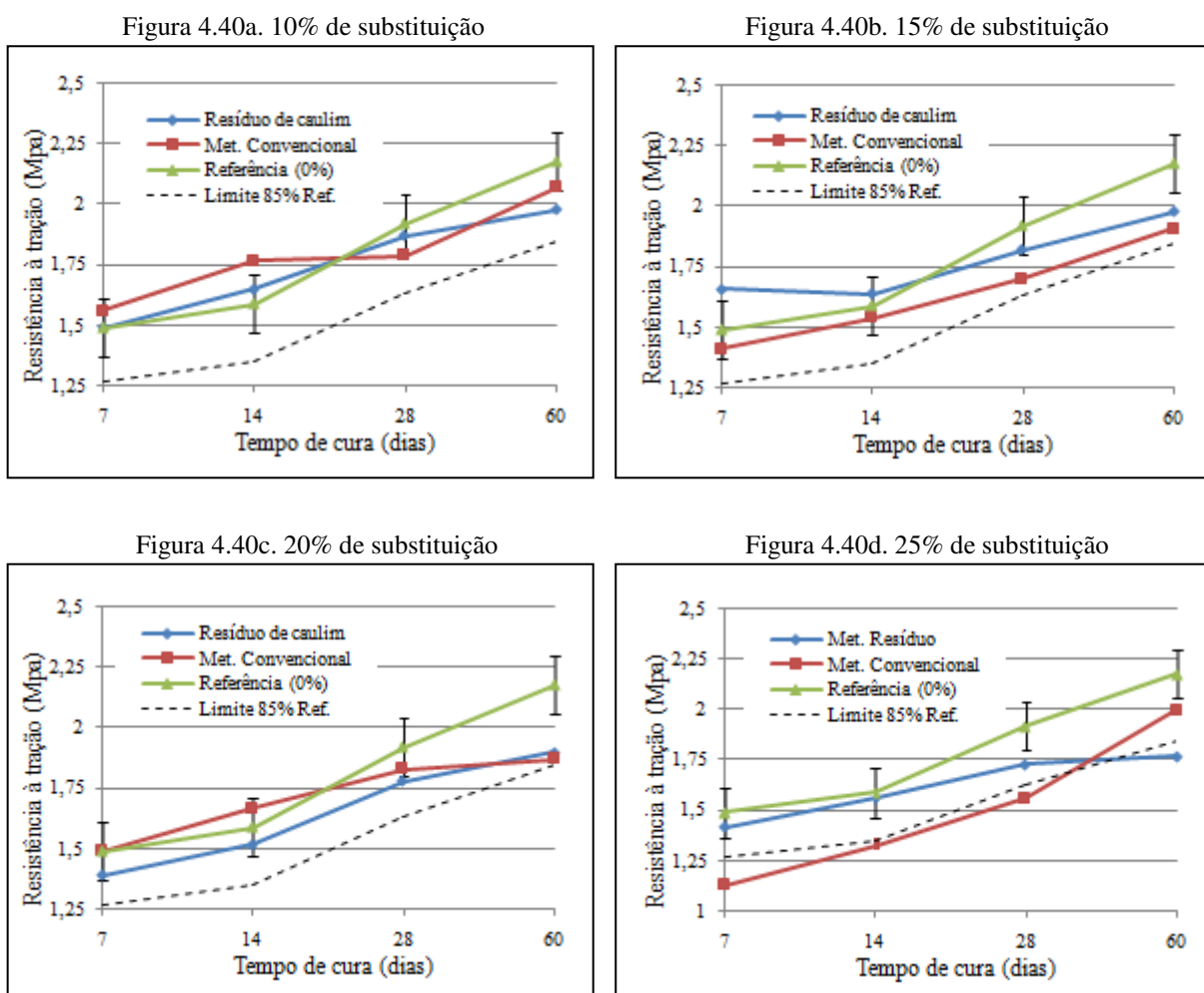
Observando-se os resultados apresentados na Figura 4.39, verifica-se que apesar dos concretos com resíduo de caulim apresentaram até os 28 dias de cura resistência à tração similar ao concreto sem incorporação, o resíduo de caulim não proporcionou benefícios a essa

propriedade mecânica verificando-se aos 60 dias de cura, para todos os teores de substituição, valores de resistência à tração inferiores aos concretos de referência. Os valores obtidos são inferiores aos relatados por Buttler (2007), Sacht e Rossignolo (2008) e Oliveira *et al.* (2011) os quais encontraram valores entre 2,5 e 3,1 MPa, o que é justificado pela variação das características das misturas avaliadas em cada pesquisa e também pelo baixo teor de cimento (12%) do traço 1:8,33, assim como pela redução deste para a incorporação da pozolana.

. Verifica-se também que a evolução da resistência à tração em função do tempo de cura é mais lenta do que a observada para a resistência à compressão, porém, este comportamento está de acordo com a observação de Mehta e Monteiro (2008) de que, após 30 dias de cura, a resistência à tração aumenta mais lentamente do que a resistência à compressão.

A comparação entre os resultados de resistência à tração dos corpos de prova no traço 1:8,33 com incorporação do resíduo de caulim e os concretos com e sem metacaulim, está ilustrada na Figura 4.40

Figura 4.40 - Resistência à tração de corpos de prova no traço 1:8,33 com o metacaulim em estudo e dos corpos de prova de referência



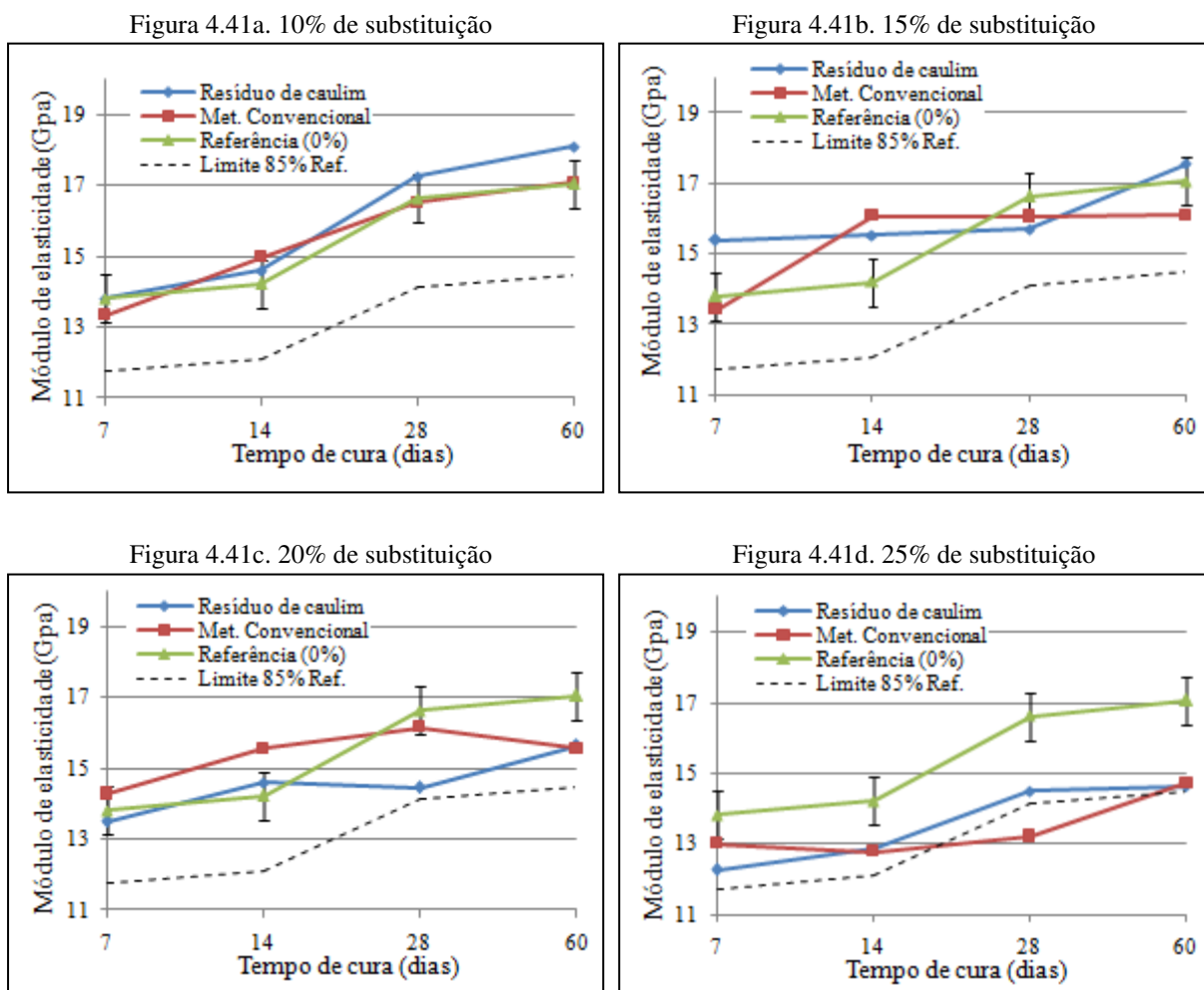
Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.40, verifica-se que para ambas as pozolanas os valores de resistência à tração se mostraram, a partir dos 28 dias, inferiores aos obtidos para os corpos de prova sem incorporação de metacaulim, demonstrando que, para este traço, a adição do resíduo de caulim apresentou desempenho similar ao metacaulim convencional. Apesar da porosidade da matriz e da zona de transição agregado/matriz ser relatada por Zucco e Beraldo (2008) e Oliveira et al. (2011) como principal causa da redução da resistência à tração, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), esta se relaciona principalmente com a quantidade de cristais orientados de hidróxido de cálcio presente na zona de transição, inclusive as que apresentam baixa porosidade.

Com relação aos teores de substituição observa-se na Figuras 4.40a que os corpos de prova com 10% de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim, apresentaram resistências à tração por compressão diametral similares aos corpos de prova de referência (com metacaulim convencional e sem metacaulim) para todas as idades avaliadas. Para o teor de 15% de substituição (Figura 4.40c), os resultados obtidos foram superiores ao metacaulim convencional, porém, assim como para o teor de 20% (Figura 4.40d), aos 60 dias de cura apresentaram redução de até 19% nos valores de resistência à tração. Verifica-se também que o uso do resíduo de caulim em todos os teores de substituição, excetuando-se para 25% (Figura 4.40d), os resultados obtidos são superiores a 85% dos obtidos para os concretos sem metacaulim acima, portanto, do limite de tolerância recomendado por Buttler (2007) para resultados relacionados a aproveitamento de resíduos.

O módulo de elasticidade, assim como as demais propriedades mecânicas para os corpos de prova com ambos os metacaulins avaliados, tende a reduzir com o aumento do teor de substituição estando os valores obtidos, para os concretos sem metacaulim, compatíveis aos relatados por Mohamad *et al.* (2011), em pesquisa que buscou avaliar as características mecânicas de blocos de concreto vibro-compactados.

Na Figura 4.41 podem ser observados os gráficos comparativos entre o módulo de elasticidade dos concretos no traço 1:8,33 com o resíduo de caulim e dos concretos de referência, com e sem metacaulim convencional.

Figura 4.41 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim e dos corpos com e sem incorporação de metacaulim

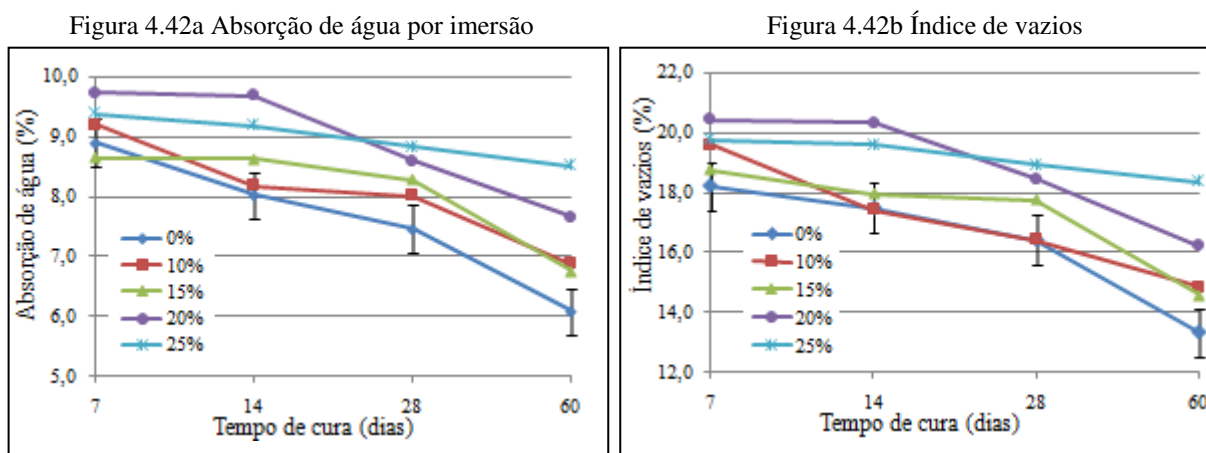


Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.41, verifica-se que os corpos de prova com resíduo de caulim apresentaram resultados similares aos corpos de prova com metacaulim convencional e que, para 10% e 15% de substituição (Figuras 4.41a e 4.41b) os resultados são compatíveis aos obtidos para os corpos de prova sem metacaulim. Para 20% e 35% de substituição (Figura 4.41c e 4.41d), aos 60 dias, de cura observam-se valores inferiores ao obtido para o concreto de referência (0%), porém todos os valores atendem ao limite recomendado por Buttler (2007). Os valores mais elevados de módulo de elasticidade, em relação à resistência à compressão, devem-se principalmente à baixa porosidade do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008) não sendo identificadas melhorias significativas para as composições com o resíduo de caulim quando comparadas às de referência.

4.4.3.2 Propriedades físicas

Os resultados encontrados para as propriedades físicas dos corpos de prova no traço 1:8,33 estão descritas no Apêndice 16. Os gráficos apresentados na Figura 4.42 ilustram a evolução da absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova com resíduo de caulim aos 7, 14, 28 e 60 dias de cura.

Figura 4.42 - Propriedades físicas de corpos de prova no traço 1:8,33 com e sem incorporação do resíduo de caulim



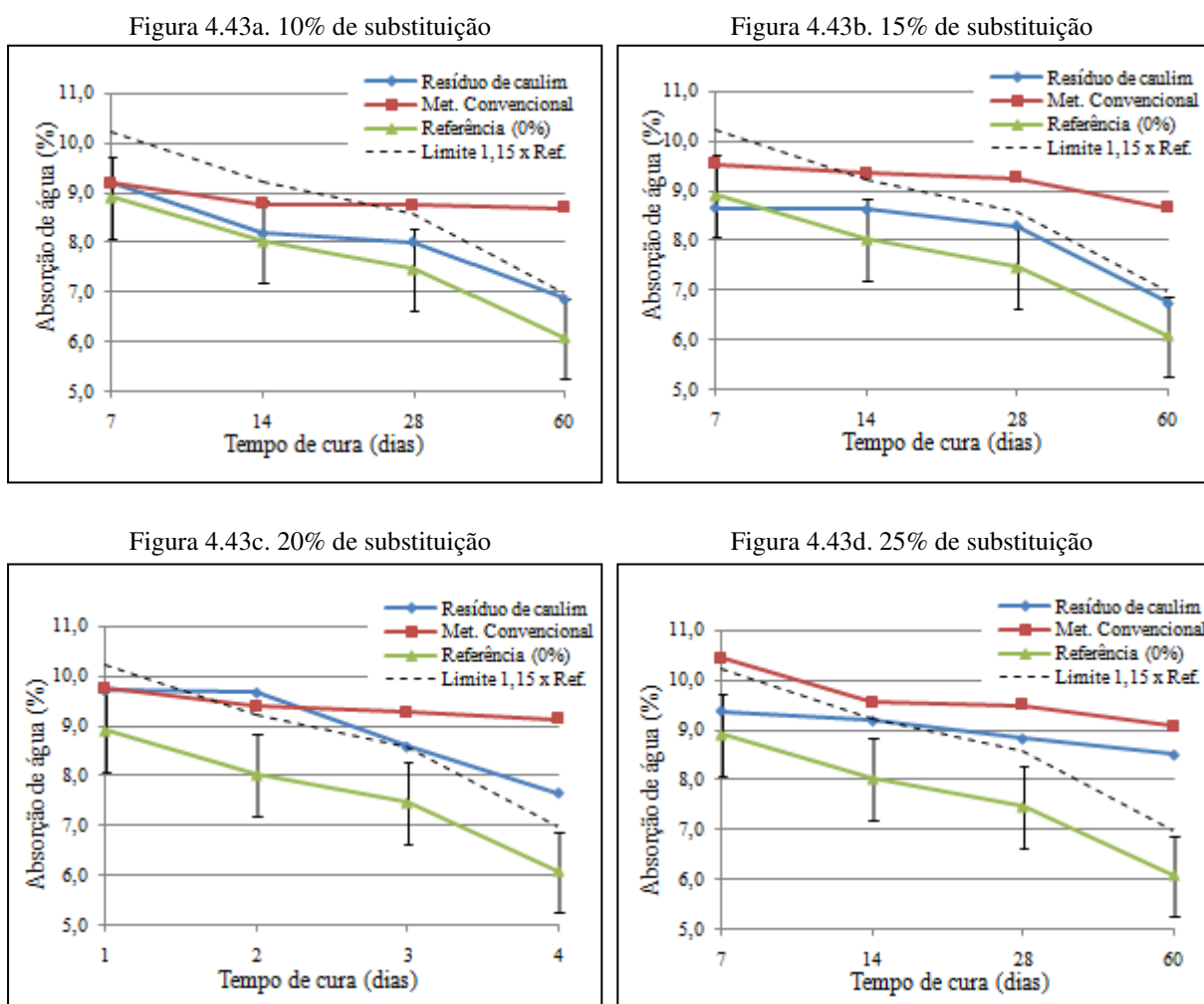
Observando-se os resultados apresentados na Figura 4.42a e 4.42b verifica-se que a elevação do teor de substituição aumentou a absorção de água e o índice de vazios para todas as composições e que os valores encontrados para estas propriedades tendem a reduzir com o aumento do tempo de cura, comportamento justificado pelo refinamento dos poros ocasionado pela continuidade do processo de hidratação da pasta. Estes resultados estão coerentes com os relatados por Souza *et al.* (2007), sendo o aumento de absorção justificado pelos autores pela elevada finura da pozolana em relação ao cimento o que pode também justificar os acréscimos de absorção obtidos por Cassagnabère *et al.* (2010). Agredo, Gutiérrez e Arjona (2011) relataram redução nas taxas de absorção para concretos com 10 e 20% de metacaulim em relação aos de referência, porém, não foram disponibilizadas informações quanto à finura e área específica do metacaulim utilizado.

Sendo a permeabilidade do concreto relacionada por Mehta e Monteiro (2008) pelas microfissuras existentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, as taxas de absorção e índice de vazios obtidas para os concretos com resíduo de caulim indicam que a redução do teor de cimento pode ter acarretado maior fragilidade da pasta e, provavelmente, zonas de transição mais passíveis de fissuramento. Apesar de serem mais elevados do que os

obtidos para os concretos de referência (sem metacaulim), todos os resultados para absorção de água apresentarem valores abaixo de 10%, limite máximo admitido pela NBR 6136 (ABNT, 2008) em concretos destinados a blocos vazados para alvenarias.

Na Figura 4.43, os valores de absorção de água encontrados para os corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim são comparados aos encontrados para os corpos de prova com metacaulim convencional e sem metacaulim.

Figura 4.43 - Absorção de água por imersão dos corpos de prova no traço 1:8,33 com resíduo de caulim e dos corpos de prova de referência



Os gráficos apresentados na Figura 4.43a e Figura 4.43b demonstram que, apesar de apresentarem valores superiores aos corpos de prova sem metacaulim, os corpos de prova com 10 e 15% de metacaulim obtido com o resíduo de caulim apresentaram taxas de absorção inferiores aos corpos de prova com iguais teores de metacaulim convencional. Para 20 e 25% de substituição (Figuras 4.43c e 4.43d), ambas as pozolanas promoveram resultados acima do

limite sugerido por Buttler (2007), apesar do resíduo de caulim promover menores taxas de absorção do que as obtidas para o metacaulim convencional.

Ao serem correlacionados com os resultados encontrados para as propriedades físicas e mecânicas, verifica-se que, o uso do resíduo de caulim nos concretos no traço 1:8,33 apesar de promover a reação pozolânica, identificada através das análises termogravimétricas, esta não foi suficiente para compensar a redução de 20 e 25% da massa do cimento. Se considerarmos a indicação de Sabir *et al.* (2001) de que a pasta de cimento Portland, se completamente hidratada, libera 28% de hidróxido de cálcio, se a massa do cimento for reduzida em 20 e 25% teremos respectivamente 22,4 e 21% de hidróxido de cálcio disponíveis para reagir com a pozolana em condições ideais de hidratação. Para os concretos no traço 1:8,33 os resultados demonstraram serem adequados os teores de substituição de até 15% da massa do cimento pelo metacaulim obtido com o resíduo de caulim.

4.4.4 Resistência ao ataque por sulfatos

Devido ao fato do teor de 25% de substituição ter apresentado, nas análises anteriores e para todos os traços avaliados, resultados que não indicam viabilidade para o seu uso, nos ensaios de durabilidade foram avaliados os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33 com 10%, 15% e 20% de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim, sendo os resultados comparados aos encontrados para corpos de prova de referência (com metacaulim convencional e sem metacaulim).

Os corpos de prova imersos na solução de sulfato de sódio, ao final do ensaio, apresentaram pequena deterioração localizada nas arestas formadas pela face lateral e bases devido à intrusão dos sulfatos em duas faces adjacentes, conforme pode ser observado na Figura 4.44.

Figura 4.44 - Desgaste de corpos de prova devido à intrusão de sulfatos nas arestas



Os resultados da variação dimensional causada pela exposição a sulfatos, calculada de acordo com a NBR 13583 (ABNT, 1996), estão descritos no Apêndice 17. Nas Figuras 4.45, 4.46 e 4.47 estão representados graficamente os resultados da variação dimensional encontrados para os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33, respectivamente.

Figura 4.45 - Variação dimensional devido à exposição a sulfatos para o traço 1:5,56

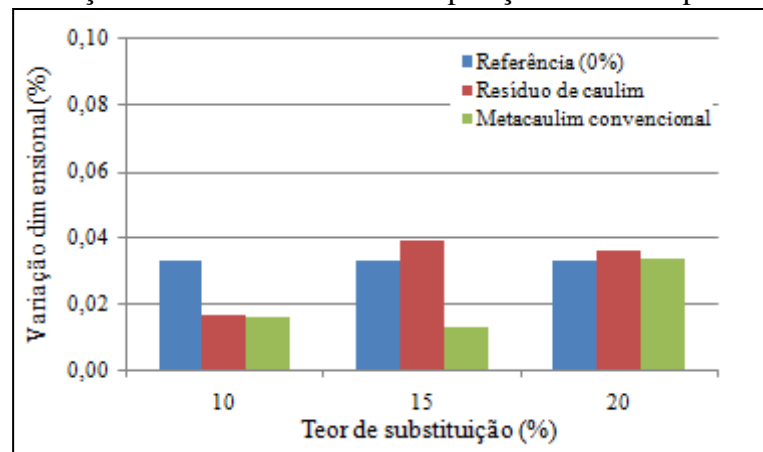


Figura 4.46 - Variação dimensional devido à exposição a sulfatos para o traço 1:6,67

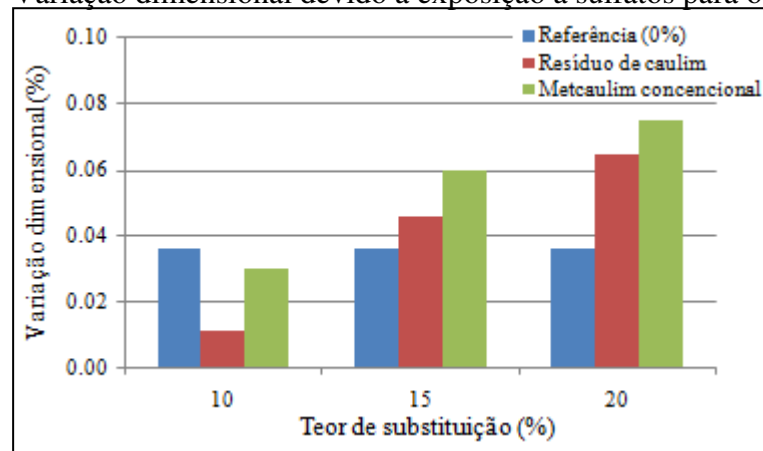
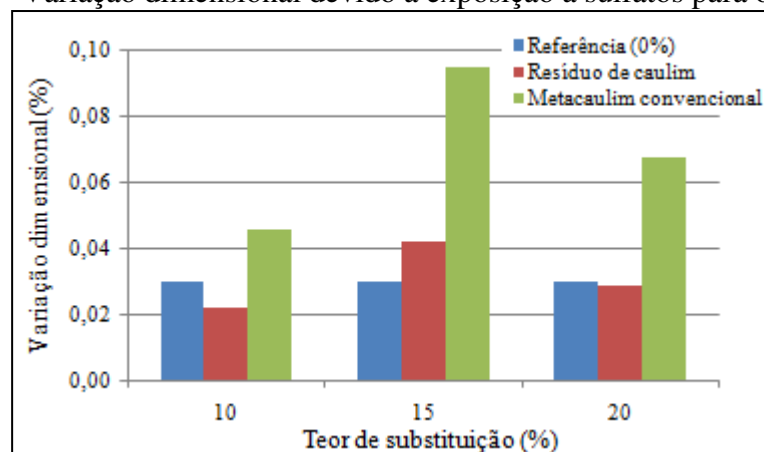


Figura 4.47 - Variação dimensional devido à exposição a sulfatos para o traço 1:8,33



Apesar da NBR 13583 (ABNT, 1994) não especificar o limite máximo aceitável para a expansão dimensional, em barras de argamassa de cimento Portland, decorrente da exposição a sulfatos, a NBR 7211 (ABNT, 2009) recomenda que os valores encontrados para concretos não devam ultrapassar a 0,1% desde que o cimento Portland utilizado seja resistente a sulfatos, cimento este utilizado nesta pesquisa. Observando-se as Figuras 4.45, 4.46 e 4.47, verifica-se que todas as composições apresentaram valores de expansão dimensional inferiores ao limite máximo especificado pela ABNT. Verifica-se também que, 10% de substituição da massa do cimento pelo resíduo de caulim, promoveram, em todos os traços, expansão dimensional inferior às encontradas para os concretos de referência, com igual teor de metacaulim convencional e sem metacaulim.

Os resultados obtidos para os corpos de prova no traço 1:8,33, apresentados na Figura 4.47 apresentaram resultados que atendem ao limite de variação dimensional recomendado pela ABCP, o que corrobora os resultados obtidos para os ensaios físicos e mecânicos de que, para este traço, o resíduo de caulim pode ser utilizado em teores de até 20% sem comprometer as propriedades do concreto.

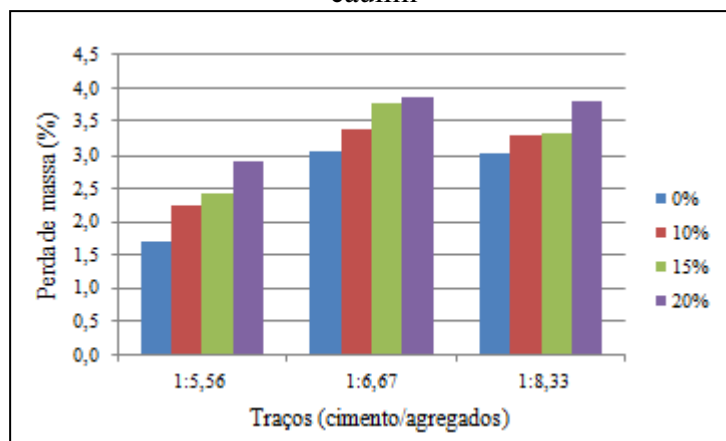
A comparação entre os resultados obtidos com o resíduo de caulim e com o metacaulim comercial (Apêndice 17) demonstrou que para os traços 1:6,67 e 1:8,33 o resíduo de caulim promoveu variação dimensional inferior à encontrada para iguais traços e teores de metacaulim convencional, o qual, de acordo com resultados relatados por Mauri *et al.* (2009), compromete a resistência mecânica de argamassas submetidas a ambientes agressivos.

Os resultados para os corpos de prova de referência, sem metacaulim, estão de acordo com os encontrados por Gomides (2001) para concretos compactados com rolo (CCR). Al-Akhras (2006), usando solução semelhante e ao final de 18 meses de exposição, relatou resultados de variação dimensional abaixo de 0,1% para concretos com 10 e 15% de metacaulim e fator água/aglomerante 0,5, portanto, os resultados encontrados nesta pesquisa estão coerentes com os relatados na literatura.

4.4.5 Ensaio de simulação à exposição de chuva dirigida

Na Figura 4.48 estão apresentados os resultados de perda de massa (Apêndice 18), após 20 ciclos de exposição, dos traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33 com e sem incorporação do resíduo de caulim.

Figura 4.48 - Perda de massa das placas de concreto com e sem a incorporação de resíduo de caulim

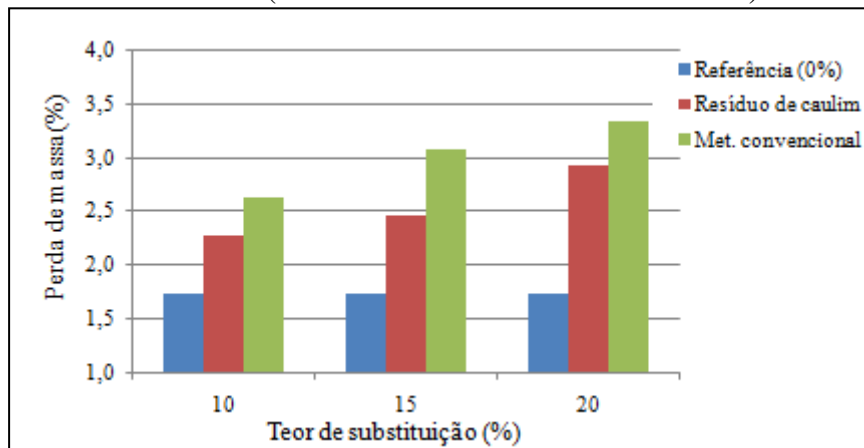


Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.48, verifica-se que as placas de concreto com resíduo de caulim apresentaram maior suscetibilidade à erosão causada pelos respingos de água dos aspersores do que as placas de referência, sem incorporação do resíduo. Verifica-se também que a elevação do teor de substituição promoveu maiores valores de perda de massa, o que pode estar relacionado com a redução do teor de cimento e ao desempenho do resíduo em substituí-lo aumentando, conseqüentemente, o teor de agregados e a permeabilidade do concreto, comportamento também verificado por Oliveira *et al.* (2006) e Lima (2010). Após os 20 ciclos de exposição, todas as composições apresentaram perda de massa inferior a 4% o que, considerando-se o valor de 3,8% relatado por Heathcote (2002), para blocos de solo-cimento, após 25 ciclos de exposição à chuva dirigida em intensidade semelhante à utilizada nesta pesquisa, pode ser considerado alto. Os resultados mais elevados para a perda de massa, obtidos na atual pesquisa, podem ser justificados pelo grau de compactação das placas que tende a ser menor nas arestas, tornando-as assim mais passíveis de erosão.

Os resultados das leituras parciais, aos 5, 10, 15 e 20 ciclos, apresentadas no Apêndice 18, indicaram para todas as composições tendência à redução nos valores de perda de massa com o aumento do período de exposição o que pode ser justificado pela aceleração da cura decorrente de ciclos de molhagem e elevação da temperatura pela secagem em estufa.

Na Figura 4.49 os resultados finais de perda de massa obtidos para o traço 1:5,56 com incorporação do resíduo são comparados aos obtidos com e sem metacaulim convencional.

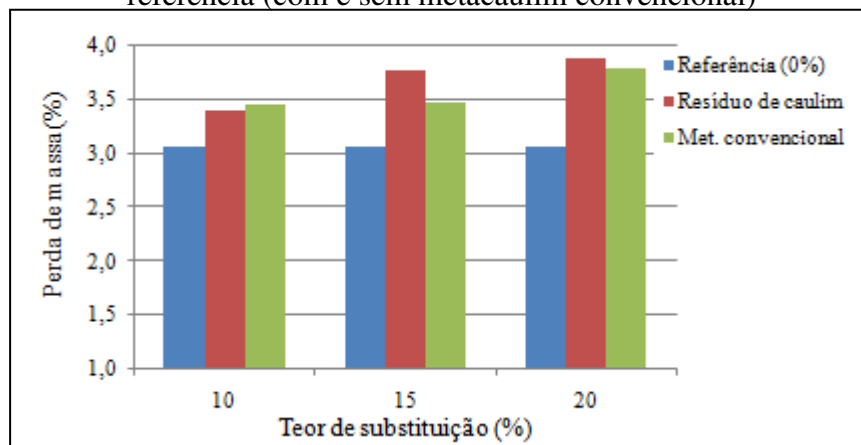
Figura 4.49 - Perda de massa para o traço 1:5,56 com resíduo de caulim e resultados de referência (com e sem metacaulim convencional)



Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.49, verifica-se que as placas nas quais foi utilizado resíduo de caulim apresentaram perda de massa superior às de referência, sem adição de metacaulim, porém, estes resultados foram inferiores aos obtidos para as placas com metacaulim convencional. Em relação ao traço 1:5,56 sem incorporação de metacaulim, após 20 ciclos, verificou-se que o uso de 10%, 15% e 20% de resíduo promoveu, respectivamente, 32%, 42% e 69% de acréscimos nos valores de perda de massa.

Na Figura 4.50 os resultados de perda de massa obtidos para o traço 1:6,67 com a incorporação de resíduo de caulim são comparados aos obtidos com e sem metacaulim convencional, após os 20 ciclos de exposição.

Figura 4.50 - Perda de massa para o traço 1:6,67 com resíduo de caulim e resultados de referência (com e sem metacaulim convencional)

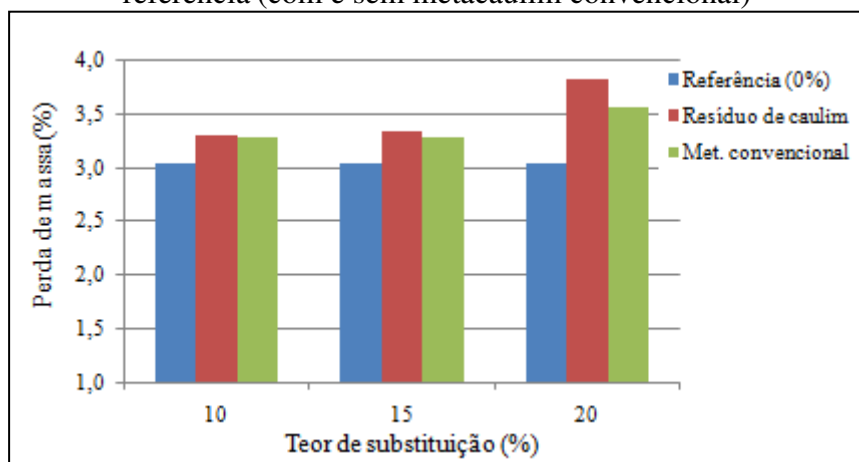


Observando-se os resultados apresentados na Figura 4.50, verifica-se que, para o traço 1:6,67, a incorporação de ambas as pozolanas acarretou em maior perda de massa em relação aos resultados obtidos para o traço de referência, sem metacaulim e, corroborando os

resultados encontrados para as propriedades físicas e mecânicas, os melhores resultados foram encontrados para 10% de substituição com acréscimo de 10,4%, em relação aos resultados de referência. Para os teores de 15% e 20% os acréscimos foram de 22,8% e 26,4%, respectivamente.

Os resultados de perda de massa após os 20 ciclos de exposição para o traço 1:8,33 com o resíduo de caulim e a sua comparação com os resultados de referência (com e sem metacaulim convencional) são apresentados na Figura 4.51.

Figura 4.51 - Perda de massa para o traço 1:8,33 com resíduo de caulim e resultados de referência (com e sem metacaulim convencional)



Comparando-se os resultados apresentados na Figura 4.51, verifica-se para o traço 1:8,33 comportamento semelhante ao verificado para o traço 1:6,67, com ambas as pozolanas promovendo resultados de perda de massa após 20 ciclos superiores aos obtidos para o traço de referência, sem metacaulim. Entretanto, verifica-se para o traço 1:8,33 que o teor de 15% de substituição apresentou resultados similares aos obtidos para o teor de 10%, sendo superiores, em relação aos obtidos para o traço sem metacaulim, 8,6% e 9,8% respectivamente e, para o teor de 20%, o acréscimo foi de 25,7%.

Os resultados da análise química da água do reservatório, após 0, 5, 10, 15 e 20 ciclos, estão descritos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Análise química da água aspergida e coletada no reservatório

Quant. ciclos	pH	Cond. elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Cálcio (meq.l-1)	Magnésio (meq.l-1)	Sódio (meq.l-1)	Potássio (meq.l-1)	Carbonatos (meq.l-1)	Bicarbonatos (meq.l-1)	Cloretos (meq.l-1)	Sulfatos (meq.l-1)	Rel. ads. sódio RAS	Classe da água
0	6,77	15,37	0,06	0,55	0,01	0,01	0,00	0,26	0,01	Ausente	0,01	C1
5	7,32	105,00	0,87	0,81	0,37	0,29	0,43	1,13	0,25	Ausente	0,29	C1
10	8,05	212,00	1,02	0,97	0,51	0,32	0,53	1,28	0,31	Ausente	0,57	C1
15	8,60	262,00	0,62	1,21	0,9	0,88	0,98	0,84	0,65	Ausente	0,96	C2
20	9,47	416,00	0,33	1,02	2,00	2,64	1,18	0,35	0,75	Ausente	2,43	C2

A análise química da água usou como parâmetro a utilização desta para fins de irrigação e os resultados de concentração de sódio, apresentados na Tabela 4.13, permitem classificá-la no grupo de baixa (C1) e média (C2) salinidade, podendo a primeira (até 10 ciclos) ser usada na maioria das culturas e na maioria dos solos sem ocasionar salinidade e a segunda (10 a 20 ciclos), quando houver grau moderado de lixiviação. Esta análise teve a finalidade de verificar a qualidade da água resultante do ensaio de simulação de chuvas e, apesar de ser detectado aumento na concentração de bicarbonatos, oriundos dos aglomerantes utilizados nas composições, os resultados não podem ser relacionados a um traço ou teor de substituição específico, devido ao fato de que todas as composições foram expostas em conjunto no mesmo ensaio.

Pelo fato de inicialmente o equipamento ter sido submetido a 6 horas de fluxo de água pelos aspersores e de que a água recolhida foi retirada antes do início do ensaio, os resultados da análise química da água se referem a alterações decorrentes da lixiviação ocorrida nas placas. Os dados apresentados na Tabela 4.13, demonstram que houve acréscimo do teor sódio e elevação do pH ou seja, por parte do concreto, houve perda de sódio e redução do pH, desestabilizando quimicamente o C-S-H que passa então a se decompor, resultando em maior perda de massa para os traços em que a reação pozolânica ocorreu em menor intensidade.

Após os estudos do uso do resíduo de caulim como material pozolânico em concretos destinados à produção de blocos vazados para alvenaria, pode-se chegar às seguintes conclusões:

Caracterização física, química e mineralógica do resíduo de caulim

- i. O resíduo de caulim utilizado nesta pesquisa é constituído basicamente por quartzo, caulinita e mica;
- ii. A composição química do resíduo apresenta teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que somados, satisfazem aos limites recomendados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM C 618, 1991) para materiais pozolânicos;
- iii. A composição 1:1 (50% resíduo grosso + 50% resíduo fino) apresentou perda de massa termogravimétrica referente à desidroxilação da caulinita de 5,6% da massa da amostra, o que representa 40,12% de teor de caulinita valor este suficiente para justificar a sua avaliação como material pozolânico;
- iv. Após a micronização, feita através de moinhos a jato de ar opostos, o resíduo apresentou granulometria e superfície específica que atendem aos requisitos para uso como metacaulim e a temperatura de 800°C mostrou-se a mais adequada para ativação térmica do resíduo visando à obtenção de metacaulim, proporcionando não só a desidroxilação total da caulinita como também não alterando as características físicas iniciais, anteriores à calcinação.

Planejamento estatístico experimental

De acordo com a análise de variância (ANOVA) o modelo utilizado pode ser considerado estatisticamente significativo, em um nível de 95% de confiança, para a variável resistência à compressão e a análise das superfícies de respostas permitiu concluir serem mais representativos para a pesquisa os traços 1:5,56, 1:6,67 e 1:8,33.

Propriedades físico-mecânicas

- i. Para os concretos no traço 1:5,56 com resíduo de caulim, em relação aos corpos de prova de referência sem metacaulim e com o metacaulim industrial, houve redução nas propriedades mecânicas avaliadas e esta redução aumentou com a elevação dos teores de substituição da massa do cimento pelo metacaulim obtido com o resíduo;
- ii. Os concretos no traço 1:6,67 com 10% de substituição da massa do cimento por resíduo de caulim, apresentaram propriedades mecânicas similares às dos concretos com metacaulim industrial e sem metacaulim;
- iii. Os concretos no traço 1:8,33 com até 15% de substituição da massa do cimento por resíduo de caulim, apresentaram propriedades mecânicas superiores as dos concretos com metacaulim industrial e sem metacaulim;
- iv. Todos os resultados de resistência à compressão encontrados atendem ao limite mínimo de 6 MPa exigidos pela ABNT para uso em blocos vazados para alvenaria;
- v. Em relação aos concretos sem metacaulim, para todos os traços analisados, o uso do resíduo de caulim aumentou os valores de absorção de água e, conseqüentemente, do índice de vazios e que os valores encontrados tendem a aumentar com a elevação do teor de substituição.
- vi. As análises por difratometria de raios X e termogravimetria para os concretos com resíduo de caulim evidenciaram a redução do hidróxido de cálcio e aumento de produtos hidratados em relação aos concretos no mesmo traço, sem metacaulim;
- vii. Todas as composições apresentaram resultados de absorção de água por imersão inferior ao limite máximo especificado pela ABNT para uso em blocos vazados de concreto para alvenarias, apresentando redução de valores com o aumento do tempo de cura, ou seja, com a elevação do grau de hidratação dos concretos.

Ataque por sulfatos

- i. Para todos os traços, o uso de 10% de resíduo de caulim promoveu redução na expansão dimensional por exposição a sulfato de sódio;
- ii. Todos os traços avaliados apresentaram índices de expansão inferiores ao limite máximo de 0,1% recomendado pela NBR 7211 (ABNT, 2009);
- iii. O desempenho do metacaulim obtido com o resíduo, quando utilizado em substituição parcial da massa do cimento em concretos no traço 1:8,33 mostrou-se similar ao desempenho do metacaulim convencional.

Simulação de exposição à chuvas dirigidas

- i. As placas de concreto com metacaulim obtido com o resíduo de caulim apresentaram maior suscetibilidade à erosão causada pelos respingos de água dos aspersores do que as placas de referência, sem metacaulim, e que a elevação do teor de substituição acarreta em aumento dos valores de perda de massa;
- ii. As taxas de erosão, avaliadas pela perda de massa, tendem a reduzir com o aumento do tempo de exposição o que pode estar relacionado à maior densificação da pasta ocorrida com a elevação do grau de hidratação do cimento com o processo de cura;
- iii. Apesar do metacaulim obtido com o resíduo não promover redução nos efeitos deletérios da exposição ao simulador de chuvas, a perda de massa provocada pela erosão foi inferior às encontradas para as placas com metacaulim convencional;
- iv. A água utilizada para o ensaio, após os 20 ciclos, apresentou composição química que a classificam como adequada para uso em irrigação, ou seja, a água resultante da lixiviação não apresenta riscos de contaminação para o solo.

5.1 CONCLUSÃO FINAL

O metacaulim obtido com o resíduo de caulim não pode ser qualificado como metacaulim de alta reatividade, porém apresenta índice de atividade pozolânica que permite a sua utilização em concretos secos, destinados a produção de blocos vazados para alvenaria.

No estudo da influência do uso de materiais pozolânicos em concretos, a substituição parcial da massa do cimento dificulta a avaliação do consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica, em virtude da redução de hidróxido de cálcio livre naturalmente ocorrida pela redução do cimento.

Considerando que o cimento Portland, se totalmente hidratado, libera hidróxido de cálcio em 28% da sua massa inicial, usando-se metacaulim em substituição parcial ao cimento o teor de substituição não deve exceder a 21% da massa do cimento, o que foi comprovado nesta pesquisa ao verificar-se que os teores de 20% de 25% em nenhuma das situações analisadas proporcionaram benefícios ao concreto.

Nesta pesquisa, o uso de até 15% de metacaulim obtido com o resíduo de caulim em substituição ao cimento em concretos no traço 1:8,33 e fator $A/(C+M) = 0,57$ promoveu maiores resistências mecânicas do que as encontradas para os concretos de referência, sem metacaulim e utilizando metacaulim industrial, inclusive quando expostos a ambientes agressivos, confirmando, dentro das condições expostas nas conclusões parciais, a hipótese sugerida no início deste relatório de tese.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Na fase de revisão bibliográfica, com a finalidade de não só avaliar o estado da arte, mas também de coletar dados que viessem a embasar e otimizar a metodologia utilizada para os ensaios, verificou-se a existência de poucos trabalhos publicados objetivando o estudo do uso de pozolanas em concretos secos. Em virtude das dificuldades encontradas e também visando a continuidade deste trabalho, são sugeridos os seguintes temas para futuras pesquisas:

- i. Avaliação da evolução e do grau de hidratação do cimento Portland em concretos destinados à produção de blocos intertravados e blocos vazados para alvenarias;

- ii. Avaliação da influência do uso do metacaulim nas propriedades físicas e mecânicas de concretos e argamassas, como adição e não em substituição à massa do cimento;
- iii. Realizar experimentos de envelhecimento natural correlacionando os resultados obtidos com os encontrados no ensaio de simulação de chuvas dirigidas em laboratório;
- iv. No ensaio de simulação de chuvas dirigidas, expor individualmente cada composição e, através de análise química do lixiviado, analisar e avaliar as alterações ocorridas na composição do concreto;
- v. Realizar estudos sobre o efeito da temperatura na ativação térmica do resíduo em granulometrias mais finas, objetivando a otimização da relação custo-benefício;

LITERATURA CITADA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Cimento Portland de alta resistência inicial. **NBR 5733 EB 2**, 5 p. Rio de Janeiro, 1991.

_____ - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. **NBR 5739**, 9 p. Rio de Janeiro, 2007.

_____ - Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. **NBR 5752**, 3 p. Rio de Janeiro, 1992.

_____ - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. **NBR 6136**, 9p. Rio de Janeiro, 2008.

_____ - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural – **NBR 7173**. Rio de Janeiro, 1982.

_____ - Agregados para concreto - Especificação. **NBR 7211**, 9 p. Rio de Janeiro, 2009.

_____ - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. **NBR 7215**, 8 p. Rio de Janeiro, 1996.

_____ - Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. **NBR 7222**, 5p. Rio de Janeiro, 2010.

_____ - Argamassas e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. **NBR 9778**, 4 p. Rio de Janeiro, 2005.

_____ - Materiais pozolânicos - Especificação. **NBR 12653**, 3 p. Rio de Janeiro, 1992.

_____ - Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. **NBR 13554**, 4 p. Rio de Janeiro, 2013.

_____ - Cimento Portland – Variação dimensional de barras de argamassas expostas à solução de sulfato de sódio. **NBR 13583**, 12 p. Rio de Janeiro, 1996.

_____ - Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. **NBR 14724**, 11 p. Rio de Janeiro, 2011.

_____ - Metacaulim - Requisitos. **NBR 15894-1**, 8 p. Rio de Janeiro, 2010.

_____ - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. **NBR NM 45**, 8 p. Rio de Janeiro, 2006.

_____ - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo – Método de ensaio. **NBR NM 53**, 8p. Rio de Janeiro, 2003.

_____ - Agregados – Determinação da composição granulométrica. **NBR NM 248**, 6 p. Rio de Janeiro, 2003.

AGREDO, J. T.; GUTIÉRREZ, R. M.; ARJONA, S. D. Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado. **Ingeniería e Universidad**. Bogotá, v. 15, n. 1, p. 77-90, 2011.

AL-AKHRAS N. M. Durability of metakaolin concrete to sulphate attack. **Cement and Concrete Research**. v. 36, p. 1727-1734, 2006.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 15, n. 4, p. 2252-2261, 2011.

ALMEIDA, A. E. F. S.; SICHIERI, E. P. Thermogravimetric analyses and mineralogical study polymer modified mortar with silica fume. **Materials Research**. v. 9, p. 321-326, 2006.

ALMEIDA, E. **Potencial de utilização do resíduo “carepa de aço” na fabricação de blocos de concreto**. 2009. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) – Lajeado, RS: UNIVATES, 2009.

ALVES, J. D. **Manual de blocos de concreto: práticas de dosagem e controle de qualidade**. Goiânia, GO: Editora da UEG, 2004.

ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 91-96, 2011.

ASTM - American Society for Testing and Materials - Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. **ASTM C 618**, 3 p. Philadelphia, 1991.

BAHIENSE, A. V.; MANHÃES, R. T.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, n. 332, oct./dec. 2008.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. **Cerâmica**, São Paulo, v. 58, p. 36-42, 2012.

BARBOSA, C. S.; HANAI, J. B. Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, v. 8, n. 34, p. 45-74, 2006.

BATTAGIN, A. I.; PECCHIO, M. Caracterização mineralógica por difratometria de raios X e análises termodiferencial e termogravimétrica. **Relatório de ensaio ABCP 25.795**. São Paulo, 2003.

BLOCKEN, B.; ABUKU, M.; ROELS, S.; CARMELIET, J. Wind-driven rain on buildings facades: some perspectives. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. USA, v. 92, n. 13, p.1079-1130, nov. 2009. In: **5th European & African Conference on Wind Engineering**. Florence, IT: 2009. Disponível em: <http://iawe.org/Proceedings/5EACWE/028.pdf>

BRASIL, Secretaria Nacional de Habitação **Déficit Habitacional no Brasil 2008**. Ministério das Cidades: Brasília, 2011.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 499 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 331, 2008.

CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, v. 17, p. 19-28, Maringá, 2008. Acesso em: 15 setembro 2011. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/revtecnol/article/view/8169>

CASSAGNABÈRE, F.; MOURET, M.; ESCAIDELAS, G.; BROILLIARD, P.; BERTRAND, A. Metakaolin a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: mechanical aspects. **Construction and Buildings Materials**. v. 24, p. 1109-1118, 2010.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

CHAND, I.; BHARGAVA, P. K. Estimation of driving rain index for India. **Building and Environment**. v. 37, n. 5, p. 549-554, may. 2002.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba, Paraná**. 157p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 2010.

CORDEIRO, G. C.; DÉ SIR, J. M. Estudo da potencialidade de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho. Foz do Iguaçu, PR, 2001. In: **Reunião Anual do IBRACON**, 43. Anais, Foz do Iguaçu, 2001.

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

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 285-290, jul./set. 2009.

FELIPE, A. S. **Contribuição para a otimização de traços de concreto utilizados na produção de blocos estruturais**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Ilha Solteira, SP: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2010.

FERNANDES, I. D. **Blocos e Pavers: Produção e controle de qualidade**. 1. ed. 120 p. Ribeirão Preto, SP: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2008.

FERREIRA, D. T. A.; ROCHA, B. D.; LIRA, E. C.; GOMES, K. C.; TORRES, S. M.; BARBOSA, N. P. Characterization Physics, Chemistry and Mineralogy of Waste from Kaolin and their Potential Pozzolanic to Alkali Activation. **Key Engineering Materials**. v. 517, p. 617-621, june/2012.

FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, T. . O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto. Editora Universitária, UFPE, 2007.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá, v. 32, p. 237-244, 2010.

FRASSON JÚNIOR, A.; OLIVEIRA, A. L.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. Influência do processo produtivo nas resistências dos blocos de concreto. Foz do Iguaçu, PR, 2002. In: **IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Anais. Foz do Iguaçu, 2002.

FRASSON JÚNIOR, A.; Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GARCIA, G. C. R.; SANTOS, E. M. B.; RIBEIRO, S. Efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas produzidas com cimento Portland. **Cerâmica**. São Paulo, v. 57, n. 341 p. 94-99, jan./mar. 2011

GIONGO, M.; PARADATZ, I. J.; LAMBERTZ, R. Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semiempíricos. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 11, n.1, p. 7-23, jan./mar. 2011.

GIRÃO, A.V.O.M.S. **The nanostructure and degradation of C-S-H in Portland and blended cements**. 314 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculty of Engineering – School of Civil Engineering. Leeds, UK: University of Leeds, 2007.

GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E. Durability of concrete – Degradation phenomenon involving detrimental chemical reactions. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 226-246, 2008.

GOMIDES, M. J. **Ataque por sulfatos no concreto compactado com rolo (CCR)**. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Goiânia, GO: Universidade Federal de Goiás, 2001.

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

GUTIÉRREZ, R. M.; TORRES, J.; VIZCAINO, C.; CASTELLO, R. Influence of the calcination temperature of kaolin on the mechanical properties of mortars and concretes containing metakaolin. **Clay Minerals**. v. 43, p. 177-183, 2008.

HEATHCOTE, K. A. **An investigation in to the erodibility of earth wall units**. 284 p. Tese (Doctor of Philosophy) – Sydney, Austrália: University of Technology Sydney, 2002.

HENRIQUES, F. M. A. Quantification of wind driven rain on vertical surfaces. In: **International Conference of Durability of Building Materials and Components 6**, Anais. P. 607-616. Omiya, Japão, 1993.

IRASSAR, E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. **Cement and Concrete Research**. v. 39, n. 3, p. 241-254, 2009.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2004.

JACOBY, P. C. Utilização do resíduo do polimento de porcelanato na produção de materiais cimentícios. In: **Prêmio Odebrecht para o desenvolvimento sustentável: livro comemorativo 2011: compilação dos melhores projetos**. Rio de Janeiro: Construtora Norberto Odebrecht, 2012.

JOHN, V. M.; SATO, N. M. N. Durabilidade de componentes da construção. In: SATTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. **Construção e Meio Ambiente**. p. 20-57. Porto Alegre: ANTAC, 2006.

LIMA, M. G.; MORELLI, F. Mapa Brasileiro de Chuva Dirigida: algumas considerações. Florianópolis, SC, 2005. In: **International Symposium on Mortars Technology 1**, Anais. Florianópolis, 2005.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R.D. Uso de metacaulinita para incremento de compósitos à base de cimento reforçados com fibra de sisal. **Ambiente Construído**. v. 8, n. 4, p. 7-19, out./dez. 2008.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

LOPES, C. A. S. **Durabilidade na construção: estimativa da vida útil de revestimentos cerâmicos de fachadas**. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Porto, PT: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C. Argila - Caulim. In: **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Parte 2. p. 255-294. Rio de Janeiro: CETEM, 2008.

MADHKHAN, M.; AZIKHANI, R.; HARCHEGANI, M. E. Effects of pozzolans with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. **Construction and Buildings Materials**. v. 26, n. 1, p. 102-112, jan. 2012.

MAURI, J.; DIAS, D. P.; CORDEIRO, C. G.; DIAS, A. A. Argamassa geopolimétrica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p.1039-1046, 2009.

MELO JÚNIOR, C. M.; CARASEK, H. Índices de chuva dirigida direcional e análise do nível de umedecimento em fachadas de edifício multipavimentos em Goiânia, GO. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 23-37, jul. /set. 2011.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H.C. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica**. São Paulo, v. 55, p. 263-270, jul./set. 2009 a.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C. Atividade pozolânica dos resíduos de caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 795-801, nov./dec. 2009b.

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

MEHTA, P. K.; BURROWS, R. W. Point of view: Building durable structures in the 21st century. **Concrete International**, Michigan, v. 23, n. 3, p. 57-63, Mar. 2001.

MME – Ministério de Minas e Energia. Portaria nº. 1524/1982, MME: Artigo acessado em 20/10/2005 através do endereço eletrônico:

<http://www.dnrm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=67&IDPagina=84&IDLegislacao=60>.

MODRO, N. L. R.; MODRO, N. R.; OLIVEIRA, A. P. N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R.; RIZATTI, E.; BARBOSA, C. S. Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibro-compactados a seco. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 638-657, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª Ed., São Paulo: Editora PINI, 1997.

NITA, C.; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil. 13p. São Paulo, EPUSP: 2007.

NOBRE, L. L. S.; ACCHAR, W. Aproveitamento de rejeitos da mineração de caulim em cerâmica branca. **Holos**. RN, ano 26, v. 3, p. 13-27, 2010.

NOCHAYA, T.; WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. **The Science and Technology of Fuel and Energy**. v. 89, n. 3, p. 768-774, 2010.

OGUNYE, F. O.; BOUSSABAIN, H. Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. **Construction and Buildings Materials**. v. 16, p. 173-180, 2002.

OLA, S. A.; MBATA, A. Durability of soil-cement for building purpose – rain erosion resistance test. **Construction and Building Materials**. USA, v. 4, n. 4, p. 182-187. Dez. 1990.

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

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V. S.; LIRA, H. L.; MELO, A. B.; NEVES, G. A. Durabilidade de compósitos de concreto de cimento Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v. 1, n. 2, p. 30-36, 2006.

OLIVEIRA, D. R. C.; POMPEU NETO, B. B.; FUJIYAMA R. T.; FERREIRA, M. P. Propriedades mecânicas de concreto laterítico com metacaulim. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. n. 17, p. 25-31. mai. 2011.

OLIVEIRA, M. P.; NÓBREGA, A. F.; DI CAMPOS, M. S.; BARBOSA, N. P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: **Conferência**

Brasileira de Materiais não Convencionais: Habitações e Infraestrutura de Interesse Social no Brasil. Pirassununga, SP, 2004.

PAPINI, C. J.; LEAL NETO, R. M. Análise granulométrica de pós metálicos por difração de laser via seca. Foz do Iguaçu, PR, 2006. In: **17º CBCIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.** Disponível em: <http://www.ipen.br/biblioteca/2006/cbcimat/12576.pdf>

PAZ, S. P. A.; ANGÉLIZA, R. S.; NEVES, R. F. Síntese hidrotermal de sodalita básica a partir de um rejeito de caulim termicamente ativado. **Química Nova.** v. 33, n. 3, p. 579-583, 2010.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; BÖHN, M. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research.** v. 38, p. 1385-1393, 2008.

PINHEIRO-ALVES, M. T.; GOMÀ, F. ; JALALI, S. Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos. In: **3. Congresso Construção.** Coimbra, Portugal: Universidade de Coimbra, 2007.

RAMACHANDRAN, V. S. Thermal Analysis. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J.J. **Hanbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques, and applications.** p. 127-169. New York, USA: Willian Andrew Publishing, LLC, 1999.

REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Spray erosion studies on pressed soil blocks. **Building and Environment.** v. 22, n. 2, p.135-140. 1987.

REZENDE, M. L. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. W. B.; LEAL, A. F. Utilização de resíduo de caulim em blocos de vedação. **REM: Revista Escola de Minas,** v. 61, n. 3, p. 285-290, jul./set. 2008.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos.** 1.ed. Campinas, SP: Casa do Pão Editora, 2006. p.125-133.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. Concreto leve estrutural com metacaulim. **Minerva**, vol. 3, n. 2, p. 177-187, 2006.

RYDOCK, J. P. A look at driving rain intensities at five cities. **Building and Environment**. v. 41, n. 12, p. 1860-1866, dez. 2006.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**. v. 23, p. 441-454, 2001.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A. Desenvolvimento de concretos para vedações verticais *in loco*. **Revista Tecnológica**, vol. 17, p. 3-18, 2008.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de concreto para alvenarias em construções industrializadas**. 246p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 2007.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 267p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Florianópolis, SC: Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SANTANA, D. L.; SARAIVA, A. C. F.; NEVES, R. F.; SILVA, D. L. Zeólita A sintetizada a partir de rejeitos do processo de beneficiamento de caulim. **Cerâmica**. v. 58, n. 346, p. 238-243, 2012.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**. n. 43, p. 392-400, 2009.

SILVA, F. A. N. G.; MELLO, L. S.; SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; TEIXEIRA, F. S. Caracterização e beneficiamento físico-químico do caulim da região Borborema-Seridó. In: **II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste**. Campina Grande, PB. 2010. Anais. p. 71-82. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

SINNER, C. Língua e terminologia nas memórias econômicas de Domingos Vandelli de 1789. **Estudis Romànics**. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona. v. 33, p 7-22, 2011.

SKAROPOULOU, A; TSIVILIS, S; KAKALI, G; SHAP, J; SWAMY, R. Thaumaside form of sulphate attack in limestone cement mortars: A study on long term efficiency of mineral admixtures. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 2338-2345, 2009.

SOARES, R. A. L.; CASTRO, R. J. S.; NASCIMENTO R. M.; MARTINELLI, A. E. Influência do teor de calcário no comportamento físico, mecânico e microestrutural de cerâmicas estruturais. **Cerâmica Industrial**. v. 15, n. 2, p. 38-42, 2010.

SOUSA, L. D. A.; HARIMA, E.; LEITE, J. Y. P. Rejeito de caulim de APL de pegmatito do RN/PB – uma fonte promissora para cerâmica branca. **Holos**. RN, ano 23, v. 3, p. 212-223, 2007.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 203p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

SOUZA, J.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; CARVALHO, J. B. Q.; SOUZA, A. J. D.; OLIVEIRA N. M. S. Avaliação de Argamassas com Cinza e Casca de Arroz. In: **51º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Salvador, 2007.

SOUZA SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das argilas**. v. 1, p. 242-272, 2ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda., 1998a.

SOUZA SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das argilas**. v. 2, p.423-431, 2ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda., 1998b.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto**. Volume I. Porto Alegre: Editora Globo, 1980, p. 16-17.

TAGUCHI, M. K. **Avaliação e qualificação das patologias das alvenarias de vedação nas edificações**. 84p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 2008.

TANGO, C. E. S. **Blocos de concreto: produção, dosagem e controle de qualidade**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1987.

TORGAL, F. P. Execução e reparação de infra-estruturas com recurso a betões correntes ou o barato sai caro (em termos económicos e ambientais) **Maquinaria – Perspectiva Global**, n. 227, p. 56-62, Nov.Dez./2012.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 77-90, jan./mar. 2010.

VARELA, M. L.; FORMIGA, F. L.; DUTRA, R. P. S.; NASCIMENTO, R. M.; PASKOCIMAS, C. A. Influência da adição de resíduo de caulim nas propriedades tecnológicas de uma massa padrão de porcelanato produzido em escala industrial. **Cerâmica**. v. 55, p. 209-215, 2009.

VU, D. D.; STROEVEN, P.; BUI, V. B. Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 23, p. 471-478, 2001.

WELLENKAMP, F. J. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão**. 56p. Série Tecnologia Mineral, 75. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 191p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – São Paulo, SP: Universidade de São Paulo, 1989.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 217-226, 2008.

Sites consultados:

www.etc.br – Inteligência Empresarial da Construção.

www.abcp.org.br - Associação Brasileira de Cimento Portland.

www.sinaprocim.org.br - Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento.

www.blocobrasil.com.br - Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto.

www.cimentoitambe.com.br

www.metacaulim.com.br - Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Distribuição granulométrica do resíduo (50% RGC + 50% RFC) após cominuição

a) Sem calcinação



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra : RC -O	Ultrasom : 60 s
Type produit : Argila	Concentração : 149
Client : UFGC	Diâmetro a 10% : 1.48 mu
Comentários : Çalibrado	Diâmetro a 50% : 9.37 mu
Líquido : Água	Diâmetro a 90% : 25.88 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 12.10 mu
Operador : Josileido	Fraunhofer
Empresa : UFGC	Densidade/Fator : -----
Localização : Campina Grande - PB	Superfície específica : -----
Data : 30/08/2011 Hora : 08:59:26	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 1818	Medida./Limp. : 60/60/3
	SOP : Argila

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.08	0.25	0.38	0.83	1.38	1.82	2.23	2.75	3.42	4.28
q3	0.02	0.02	0.03	0.05	0.10	0.11	0.13	0.21	0.32	0.48
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	5.14	6.03	6.91	7.75	8.57	9.36	10.86	12.26	13.57	14.80
q3	0.54	0.61	0.67	0.70	0.74	0.77	0.81	0.86	0.90	0.94
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	15.97	17.08	18.16	19.20	20.23	21.24	22.24	23.24	24.23	25.74
q3	0.98	1.01	1.06	1.09	1.16	1.21	1.27	1.34	1.40	1.51
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	27.24	29.25	30.76	32.27	34.27	36.75	39.21	41.61	43.95	46.22
q3	1.61	1.75	1.88	1.99	2.10	2.25	2.41	2.52	2.63	2.72
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	48.42	52.60	56.51	60.16	63.59	66.80	69.82	72.65	75.28	77.70
q3	2.79	2.88	2.98	3.04	3.11	3.14	3.17	3.18	3.15	3.07
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	79.92	81.93	83.75	85.37	86.82	89.19	91.84	93.17	94.26	95.16
q3	2.98	2.84	2.71	2.53	2.37	2.06	1.70	1.40	1.22	1.08
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	95.93	96.58	97.15	97.86	98.26	99.02	99.35	99.59	99.79	99.89
q3	0.98	0.87	0.81	0.71	0.64	0.52	0.41	0.32	0.21	0.15
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.95	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

b) Temperatura de calcinação – 600°C.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
CILAS 1064 Líquido



Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : RC -600	Ultrasom : 60 s
Type produit : Argila	Concentração : 151
Client : UFCG	Diâmetro a 10% : 2.99 mu
Comentários : Calibrado	Diâmetro a 50% : 14.34 mu
Líquido : Água	Diâmetro a 90% : 42.70 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 19.05 mu
Operador : Josileido	Fraunhofer
Empresa : UFCG	Densidade/Fator : -----
Localização : Campina Grande - PB	Superfície específica : -----
Data : 30/08/2011 Hora : 09:09:05	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 1819	Medida./Limp. : 60/60/3
	SOP : Argila

Valores cumulados característicos in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.02	0.06	0.09	0.22	0.41	0.55	0.85	0.80	0.99	1.25
q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.06	0.08	0.13
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.54	1.87	2.22	2.59	2.97	3.37	4.19	5.03	5.88	6.74
q3	0.17	0.22	0.25	0.29	0.33	0.37	0.42	0.49	0.56	0.62
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	7.60	8.43	9.25	10.05	10.83	11.59	12.35	13.09	13.83	14.93
q3	0.68	0.71	0.76	0.80	0.83	0.86	0.92	0.94	0.99	1.05
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	16.03	17.51	18.63	19.76	21.29	23.24	25.21	27.18	29.15	31.09
q3	1.12	1.22	1.32	1.41	1.53	1.68	1.83	1.97	2.10	2.20
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	32.99	36.66	40.09	43.29	46.28	49.09	51.74	54.26	56.67	58.97
q3	2.29	2.40	2.48	2.53	2.57	2.61	2.64	2.69	2.74	2.77
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	61.19	63.31	65.35	67.29	69.15	72.60	77.09	79.62	81.80	83.71
q3	2.83	2.85	2.88	2.87	2.88	2.85	2.73	2.52	2.33	2.17
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	85.41	86.94	88.32	90.18	91.29	93.71	94.92	95.97	97.14	97.85
q3	2.05	1.95	1.85	1.77	1.68	1.58	1.43	1.31	1.17	1.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	98.43	99.14	99.49	99.77	99.92	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.86	0.67	0.44	0.30	0.17	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

c) Temperatura de calcinação – 650°C.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
CILAS 1064 Líquido



Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : RC -650	Ultrasom : 60 s
Type produit : Argila	Concentração : 161
Client : UFGC	Diâmetro a 10% : 1.69 mu
Comentários : Calibrado	Diâmetro a 50% : 10.17 mu
Líquido : Água	Diâmetro a 90% : 29.77 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 13.65 mu
Operador : Josileido	Fraunhofer
Empresa : UFGC	Densidade/Fator : -----
Localização : Campina Grande - PB	Superfície específica : -----
Data : 30/08/2011 Hora : 09:25:21	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 1820	Medida./Limp. : 60/60/3
	SOP : Argila

Valores cumulados característicos in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.06	0.20	0.30	0.67	1.12	1.50	1.86	2.31	2.86	3.54
q3	0.01	0.02	0.02	0.04	0.08	0.09	0.12	0.18	0.26	0.37
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	4.27	5.03	5.79	6.54	7.28	8.00	9.40	10.71	11.96	13.13
q3	0.44	0.52	0.57	0.62	0.66	0.70	0.75	0.80	0.85	0.88
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	14.24	15.30	16.33	17.32	18.29	19.24	20.18	21.12	22.06	23.47
q3	0.91	0.95	1.00	1.03	1.08	1.12	1.18	1.25	1.31	1.40
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	24.89	26.78	28.21	29.63	31.53	33.90	36.25	38.57	40.83	43.05
q3	1.51	1.63	1.76	1.85	1.97	2.12	2.27	2.41	2.51	2.63
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	45.20	49.32	53.18	56.81	60.23	63.44	66.46	69.28	71.91	74.33
q3	2.70	2.80	2.90	2.99	3.06	3.11	3.14	3.13	3.11	3.04
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	76.55	78.56	80.38	82.01	83.47	85.91	88.71	90.16	91.40	92.45
q3	2.94	2.81	2.67	2.51	2.35	2.10	1.77	1.51	1.38	1.24
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	93.36	94.17	94.88	95.80	96.34	97.46	98.00	98.45	98.92	99.20
q3	1.14	1.07	0.99	0.91	0.85	0.76	0.66	0.59	0.49	0.41
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.43	99.69	99.82	99.92	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.35	0.26	0.17	0.11	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

d) Temperatura de calcinação – 700°C.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra : RC -700	Ultrasom : 60 s
Type produit : Argila	Concentração : 153
Client : UFCG	Diâmetro a 10% : 2.88 mu
Comentários : Çalibrado	Diâmetro a 50% : 14.10 mu
Líquido : Água	Diâmetro a 90% : 42.55 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 18.88 mu
Operador : Josileido	Fraunhofer
Empresa : UFCG	Densidade/Fator
Localização : Campina Grande - PB	Superfície específica
Data : 30/08/2011 Hora : 09:39:45	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 1821	Medida./Limp. : 60/60/3
	SOP : Argila

Valores cumulados característicos in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.03	0.09	0.12	0.28	0.52	0.67	0.77	0.91	1.09	1.35
q3	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.03	0.05	0.08	0.13
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.65	1.99	2.35	2.72	3.12	3.52	4.37	5.25	6.14	7.03
q3	0.18	0.22	0.26	0.29	0.34	0.37	0.44	0.52	0.58	0.64
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	7.92	8.80	9.65	10.49	11.30	12.09	12.88	13.65	14.42	15.56
q3	0.71	0.76	0.79	0.84	0.87	0.90	0.95	0.98	1.04	1.09
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	16.70	18.22	19.37	20.53	22.10	24.09	26.09	28.09	30.07	32.02
q3	1.17	1.26	1.36	1.45	1.57	1.71	1.86	2.00	2.12	2.22
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	33.93	37.57	40.96	44.09	47.00	49.73	52.30	54.75	57.10	59.35
q3	2.30	2.38	2.45	2.48	2.51	2.54	2.57	2.62	2.67	2.71
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	61.52	63.61	65.61	67.53	69.36	72.77	77.21	79.72	81.89	83.80
q3	2.77	2.81	2.83	2.85	2.84	2.82	2.70	2.51	2.32	2.17
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	85.50	87.03	88.41	90.27	91.37	93.78	94.99	96.03	97.18	97.88
q3	2.05	1.95	1.86	1.77	1.67	1.58	1.43	1.30	1.15	0.99
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	98.46	99.15	99.50	99.77	99.92	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.86	0.85	0.44	0.29	0.17	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

e) Temperatura de calcinação – 750°C.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
CILAS 1064 Líquido



Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes


Ref da amostra : RC-750	Ultrasom : 60 s
Type produit : Argila	Concentração : 150
Client : UFGC	Diâmetro a 10% : 2.69 mu
Comentários : Calibrado	Diâmetro a 50% : 13.89 mu
Líquido : Água	Diâmetro a 90% : 42.83 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 18.78 mu
Operador : Josileido	Fraunhofer
Empresa : UFGC	Densidade/Fator : -----
Localização : Campina Grande - PB	Superfície específica : -----
Data : 30/08/2011 Hora : 10:24:32	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 1823	Medida./Limp. : 60/60/3
	SOP : Argila

Valores cumulados característicos in volume / passante


x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.11	0.31	0.42	0.87	1.49	1.80	1.89	1.96	2.08	2.30
q3	0.03	0.02	0.02	0.05	0.11	0.07	0.03	0.03	0.05	0.11
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.56	2.87	3.20	3.55	3.92	4.31	5.14	6.00	6.90	7.80
q3	0.15	0.20	0.24	0.28	0.32	0.37	0.43	0.51	0.59	0.66
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	8.70	9.59	10.46	11.30	12.12	12.93	13.71	14.49	15.26	16.41
q3	0.72	0.77	0.82	0.85	0.88	0.93	0.95	1.00	1.04	1.11
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	17.55	19.08	20.23	21.40	22.97	24.96	26.96	28.95	30.92	32.86
q3	1.18	1.28	1.37	1.48	1.58	1.73	1.88	2.01	2.12	2.23
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	34.74	38.34	41.67	44.76	47.61	50.28	52.80	55.19	57.48	59.68
q3	2.29	2.38	2.43	2.47	2.48	2.51	2.54	2.58	2.63	2.68
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	61.80	63.85	65.81	67.70	69.50	72.88	77.29	79.77	81.89	83.76
q3	2.73	2.78	2.79	2.83	2.82	2.82	2.71	2.50	2.28	2.14
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	85.42	86.91	88.27	90.10	91.20	93.62	94.84	95.90	97.08	97.80
q3	2.02	1.92	1.84	1.76	1.68	1.60	1.46	1.34	1.19	1.03
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	98.40	99.12	99.48	99.76	99.92	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.90	0.69	0.46	0.30	0.18	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

f) Temperatura de calcinação – 800°C



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
CILAS 1064 Líquido
 Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



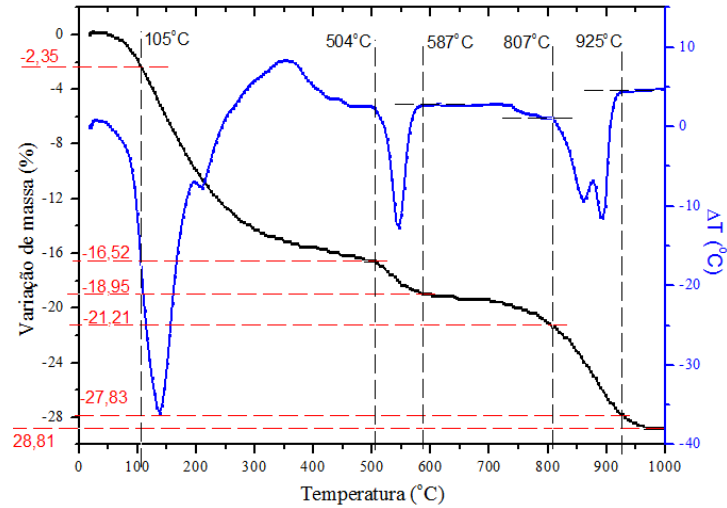
Ref da amostra : RC-800 Type produit : Argila Client : UFCG Comentários : Calibrado Líquido : Água Agente dispersante : Nenhum Operador : Josileido Empresa : UFCG Localização : Campina Grande - PB Data : 30/06/2011 Hora : 10:37:39 Índice med. : 1824	Ultrassom : 60 s Concentração : 167 Diâmetro a 10% : 1.59 mu Diâmetro a 50% : 9.45 mu Diâmetro a 90% : 27.86 mu Diâmetro médio : 12.84 mu Fraunhofer Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Não / Não Medida./Limp. : 60/60/3 SOP : Argila
---	--

		Valores cumulados característicos in volume / passante									
x		0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3		0.06	0.21	0.32	0.73	1.21	1.62	2.02	2.51	3.10	3.82
q3		0.02	0.02	0.02	0.04	0.09	0.10	0.13	0.19	0.28	0.39
x		0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3		4.60	5.41	6.22	7.03	7.83	8.61	10.10	11.52	12.85	14.11
q3		0.48	0.55	0.61	0.67	0.72	0.76	0.80	0.87	0.91	0.95
x		2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3		15.30	16.45	17.56	18.63	19.69	20.73	21.75	22.78	23.80	25.34
q3		0.99	1.04	1.08	1.12	1.18	1.24	1.29	1.37	1.43	1.54
x		4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3		26.88	28.92	30.45	31.97	33.99	36.49	38.95	41.34	43.67	45.92
q3		1.65	1.76	1.89	1.99	2.11	2.25	2.39	2.50	2.60	2.68
x		9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3		48.10	52.22	56.06	59.64	63.00	66.13	69.07	71.81	74.34	76.66
q3		2.75	2.82	2.91	2.97	3.03	3.05	3.07	3.06	3.01	2.93
x		19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3		78.78	80.70	82.42	83.95	85.32	87.57	90.11	91.41	92.51	93.44
q3		2.83	2.70	2.54	2.37	2.22	1.95	1.62	1.36	1.23	1.11
x		36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3		94.25	94.96	95.58	96.40	96.87	97.85	98.32	98.71	99.11	99.35
q3		1.02	0.95	0.87	0.82	0.75	0.67	0.58	0.51	0.42	0.35
x		66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3		99.53	99.75	99.86	99.94	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3		0.28	0.22	0.14	0.09	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
x		130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x		240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

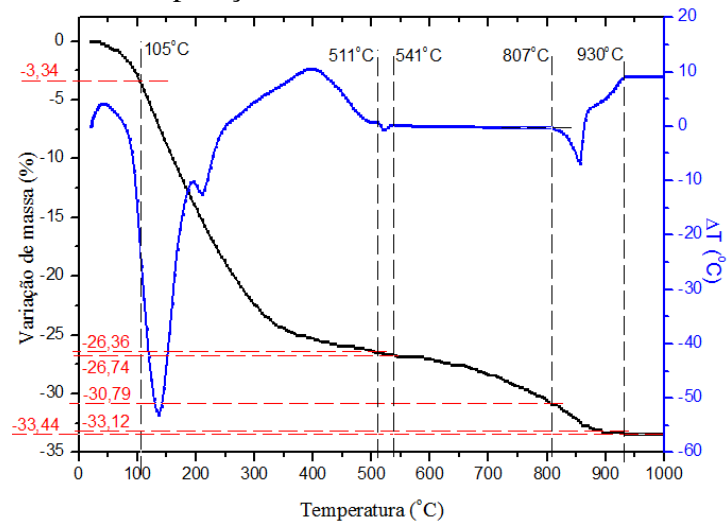
x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

APÊNDICE B – Análises térmicas (ATG e ATD) das argamassas para determinação da atividade pozolânica

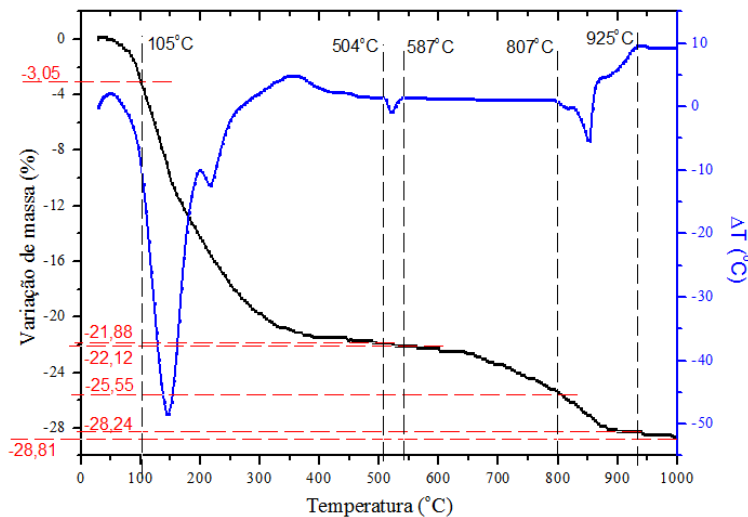
a) Argamassa A - de referência sem incorporação do resíduo



b) Argamassa B - com incorporação do resíduo calcinado a 650°C



c) Argamassa C - com incorporação do resíduo calcinado a 800°C

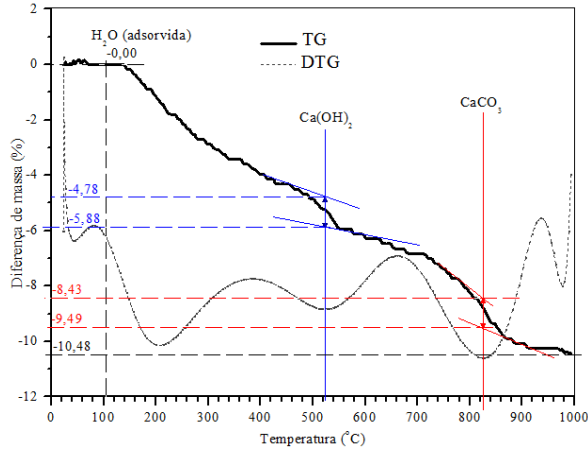


APÊNDICE C – Planejamento estatístico experimental e resultados das três repetições para os ensaios de resistência à compressão simples (f_c) e absorção de água por imersão (A_b).

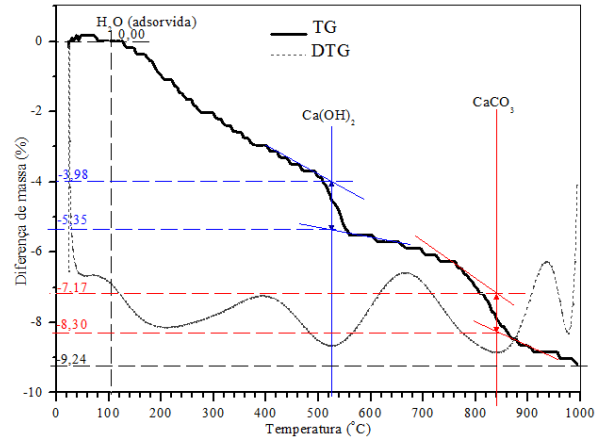
Experimento	Resistência à compressão – f_c (MPa)			Absorção A_b (%)		
	Repetições			Repetições		
	1	2	3	1	2	3
1	14,34	14,81	14,26	8,28	9,09	8,60
2	17,72	17,39	15,37	9,27	9,08	9,41
3	9,96	13,20	12,69	7,01	6,60	7,10
4	15,70	17,31	17,15	9,54	9,50	9,25
5	14,53	16,03	15,52	8,46	8,71	8,65
6	23,95	24,18	22,48	8,94	8,87	8,82
7	15,53	14,35	11,96	9,29	9,33	9,26
8	22,19	20,33	20,84	8,58	9,08	8,94
9	12,06	11,35	12,74	9,55	9,84	9,63
10	19,75	19,39	17,95	9,88	10,11	9,95
11	14,55	16,53	16,23	9,39	9,60	9,48
12	19,89	15,71	17,62	9,58	9,74	9,67
13	11,97	10,79	9,23	11,93	11,54	11,69
14	13,37	17,00	17,91	9,92	10,48	10,43
15	12,84	10,91	10,45	9,66	9,24	9,33
16	9,40	12,90	14,40	9,87	10,47	10,14
17	14,80	8,73	13,51	10,45	9,61	10,21

APÊNDICE D – Análises térmicas (TG e DTG) dos concretos nos traços utilizados no planejamento experimental.

a) Traço 1:5

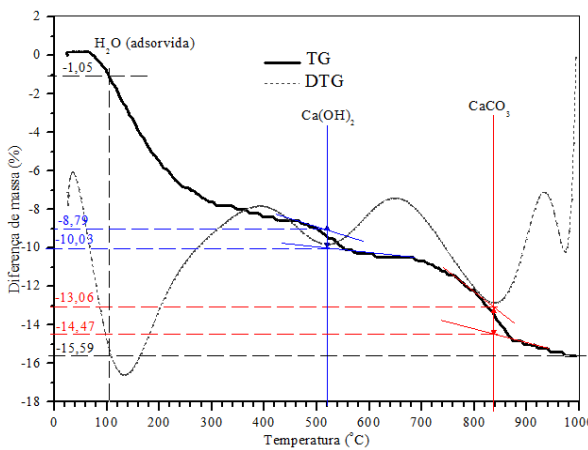


Ensaio 10 - 20% de resíduo - 16 dias de cura

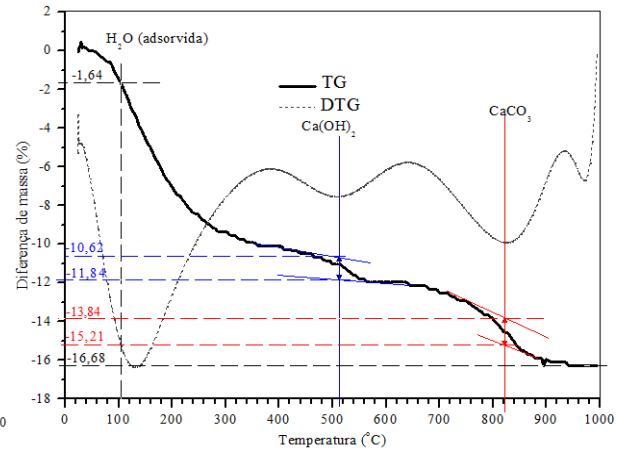


Ensaio 10 Ref. - 0% de resíduo - 16 dias de cura

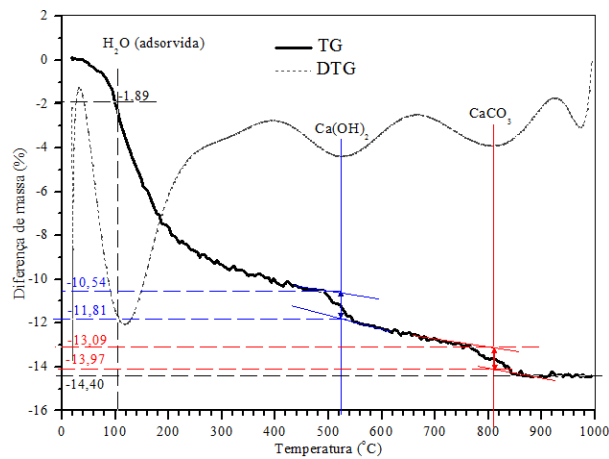
b) Traço 1:5,56



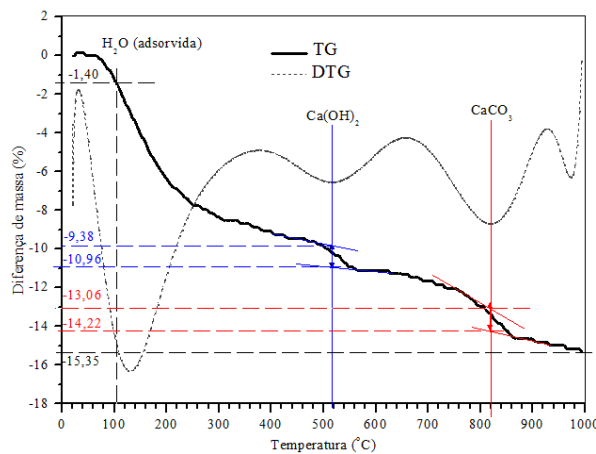
Ensaio 2 - 14% de resíduo - 8 dias de cura



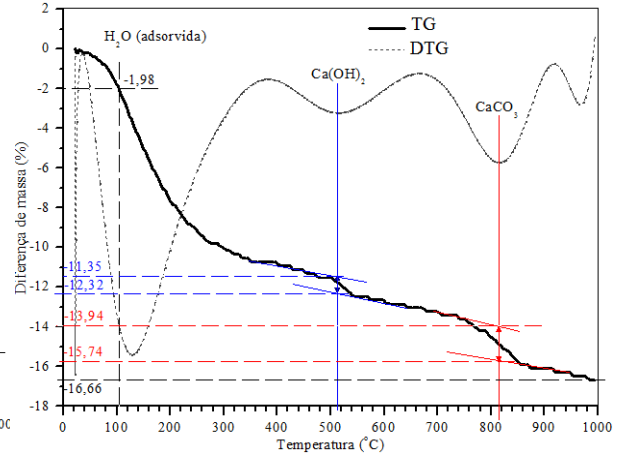
Ensaio 4 - 26% de resíduo - 8 dias de cura



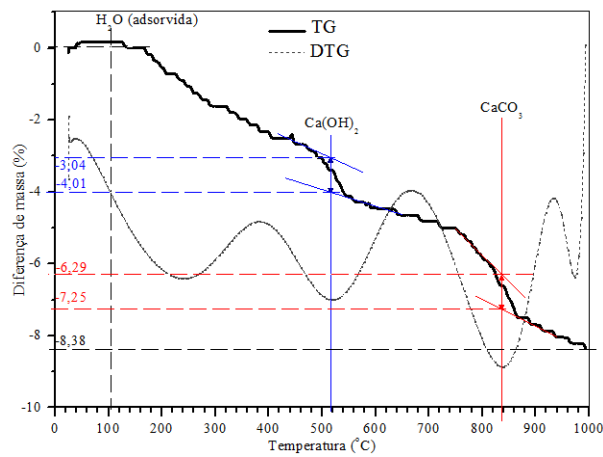
Referência - 0% de resíduo - 8 dias de cura



Ensaio 6 - 14% de resíduo - 24 dias de cura

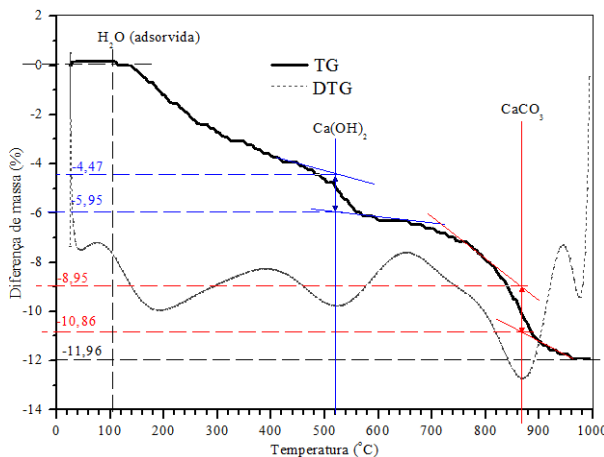


Ensaio 8 - 26% de resíduo - 24 dias de cura

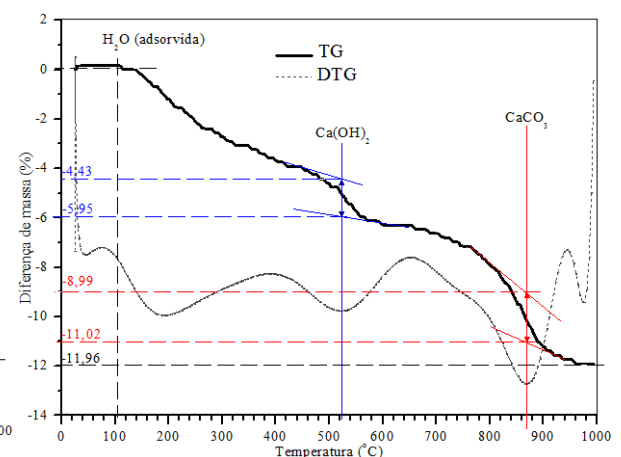


Referência - 0% de resíduo - 24 dias de cura

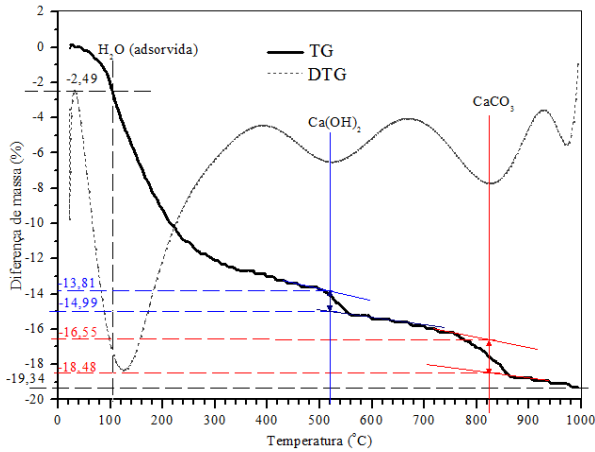
c) Traço 1:6,67



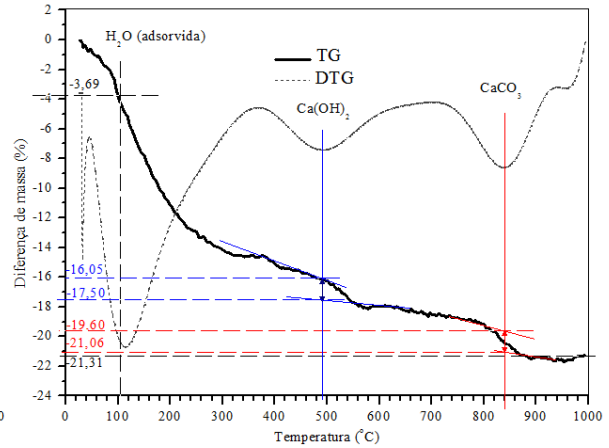
Ensaio 13 - 20% de resíduo - 3 dias de cura



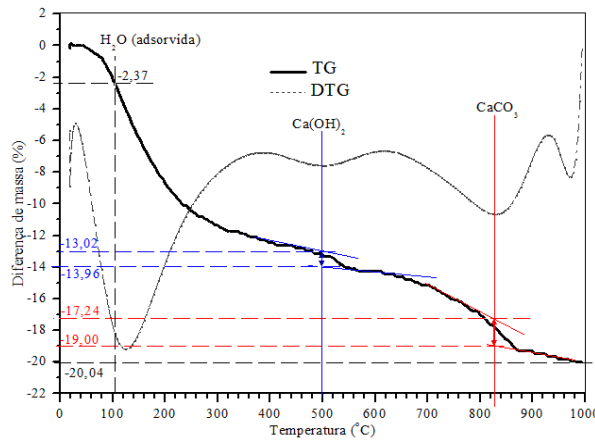
Ensaio 13 Ref. - 0% de resíduo - 3 dias de cura



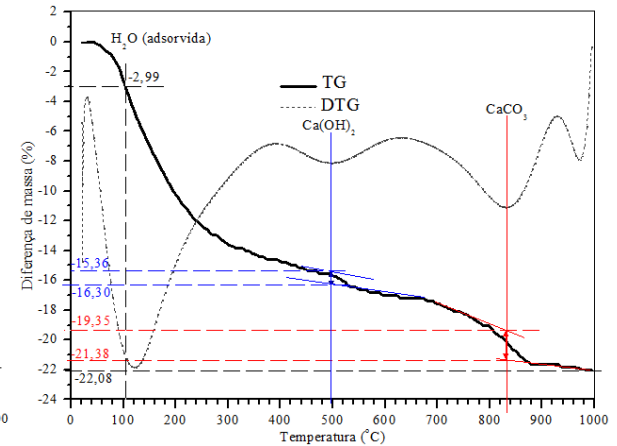
Ensaio 11 - 10% de resíduo - 16 dias de cura



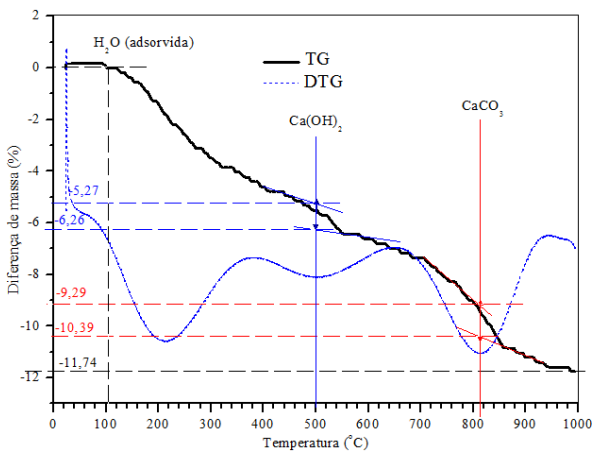
Ensaio 15 - 20% de resíduo - 16 dias de cura



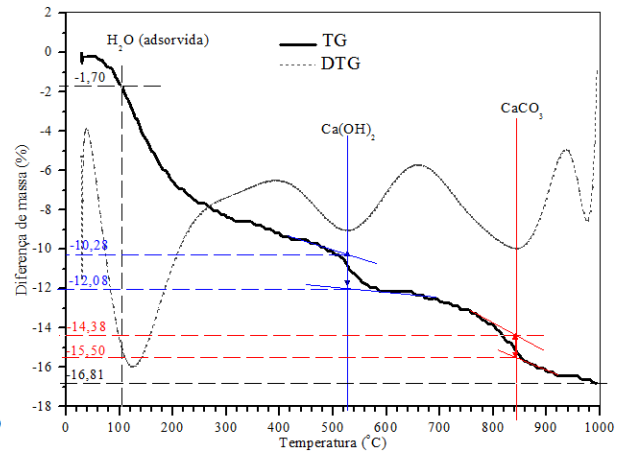
Ensaio 16 - 20% de resíduo - 16 dias de cura



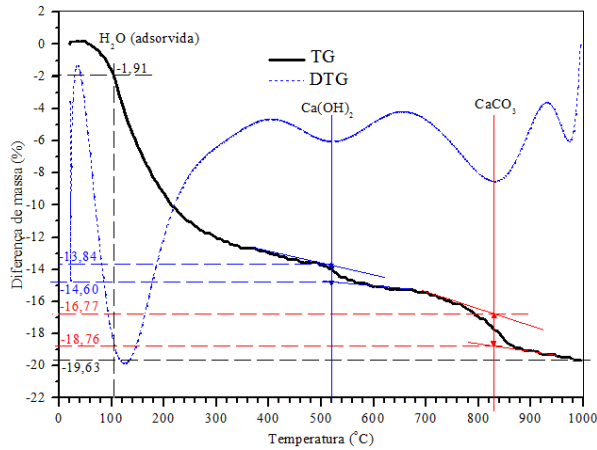
Ensaio 17 - 20% de resíduo - 16 dias de cura



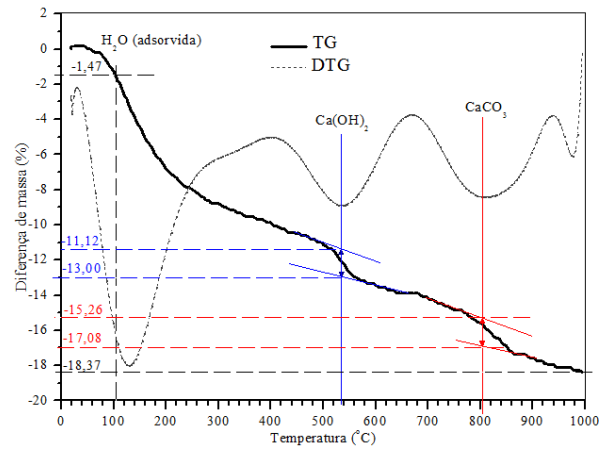
Ensaio 12 - 30% de resíduo - 16 dias de cura



Referência - 0% de resíduo - 16 dias de cura

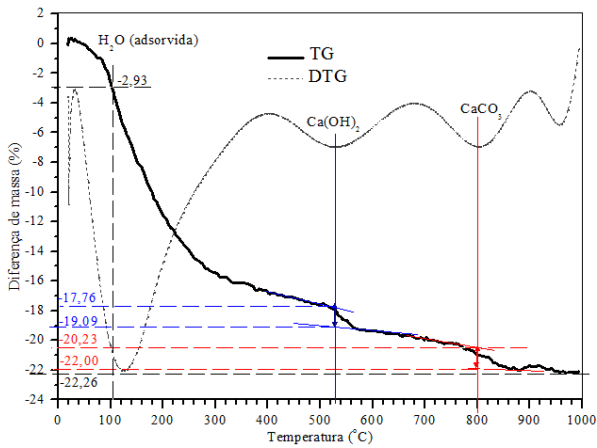


Ensaio 14 - 20% de resíduo - 29 dias de cura

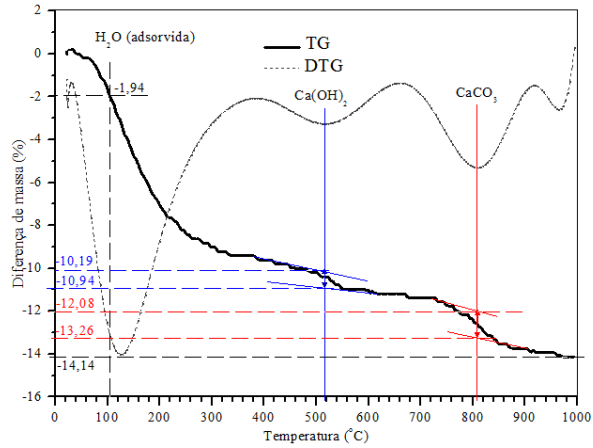


Referência - 0% de resíduo - 29 dias de cura

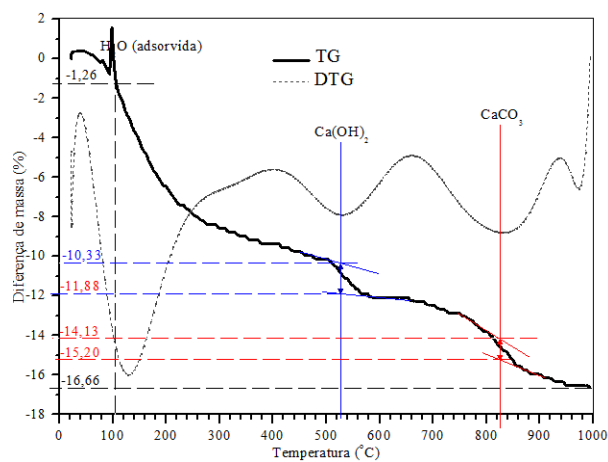
d) Traço 1:8,33



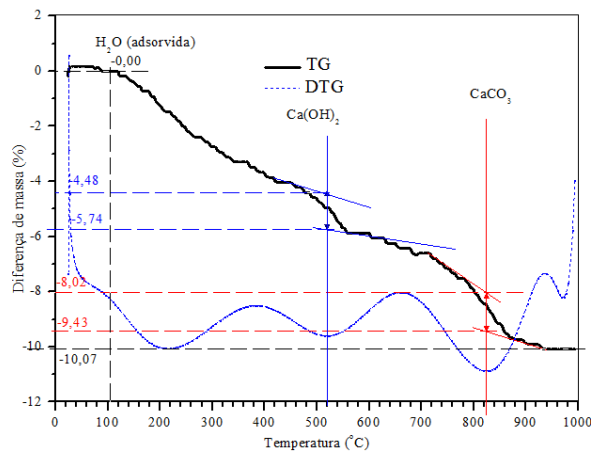
Ensaio 1 - 14% de resíduo - 8 dias de cura



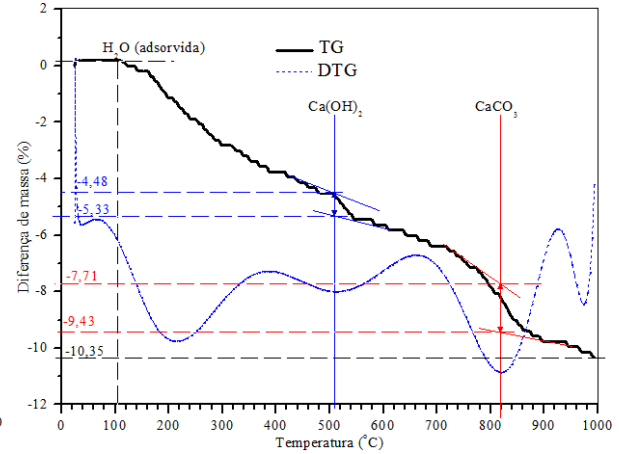
Ensaio 3 - 26% de resíduo - 8 dias de cura



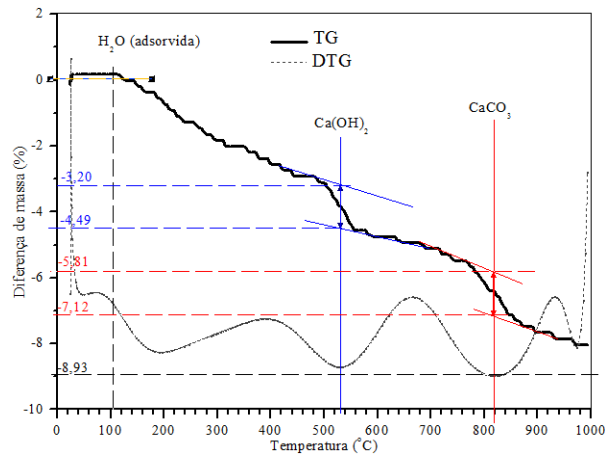
Referência - 0% de resíduo - 8 dias de cura



Ensaio 5 - 14% de resíduo - 24 dias de cura

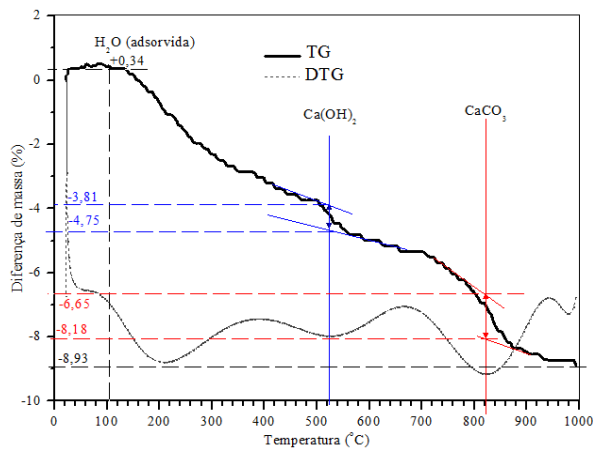


Ensaio 7 - 26% de resíduo - 24 dias de cura

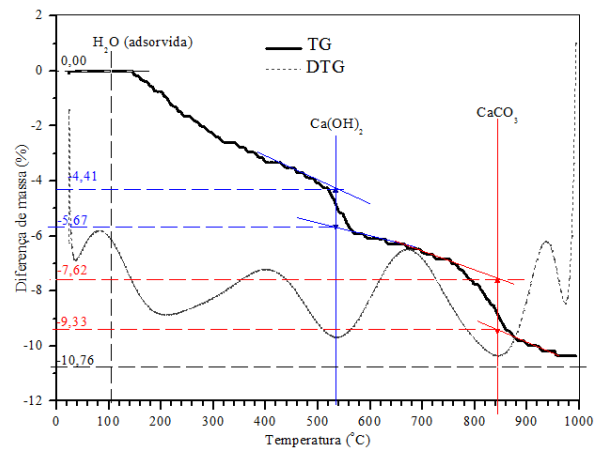


Referência - 0% de resíduo - 8 dias de cura

e) Traço 1:10



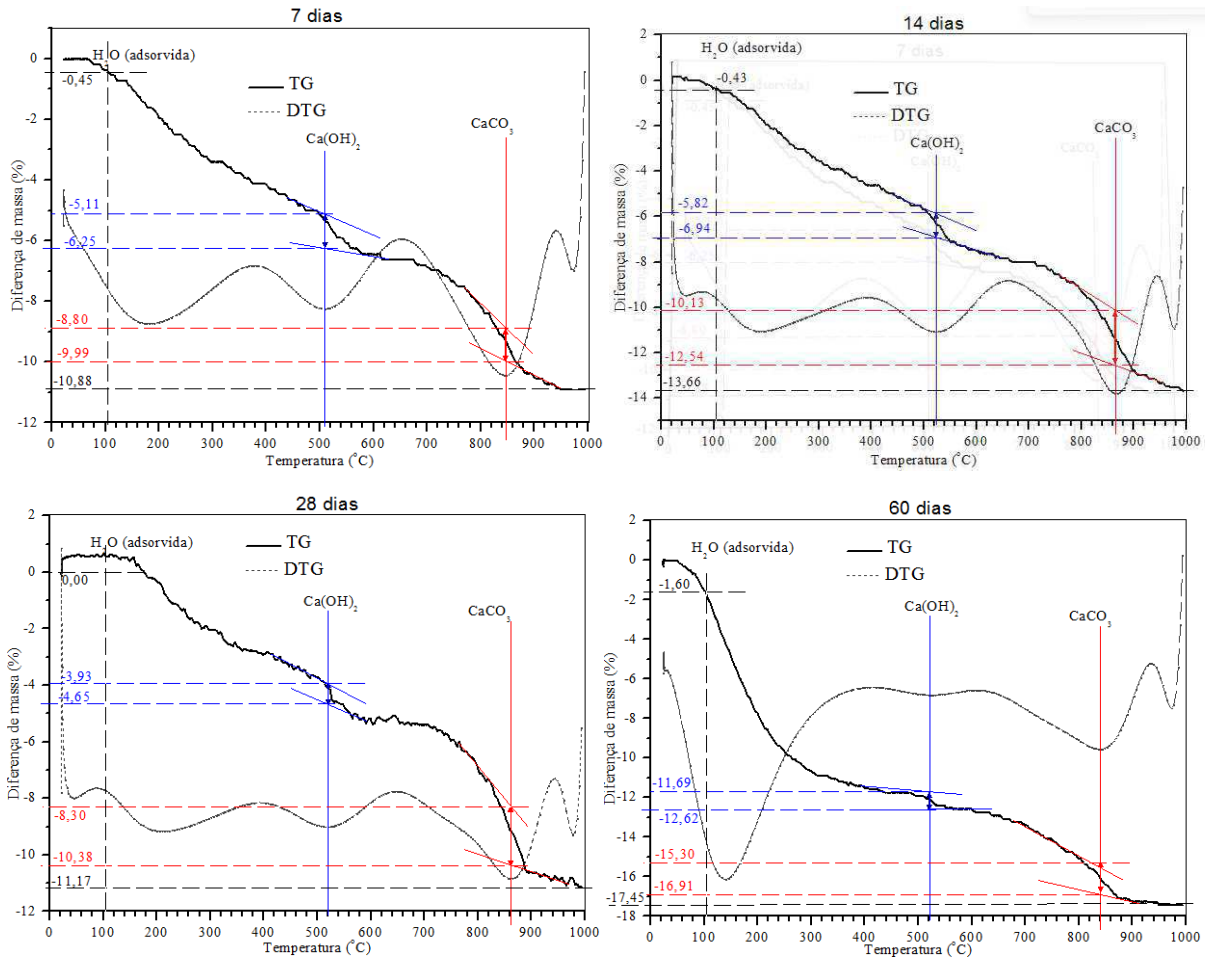
Ensaio 9 - 20% de resíduo - 16 dias de cura



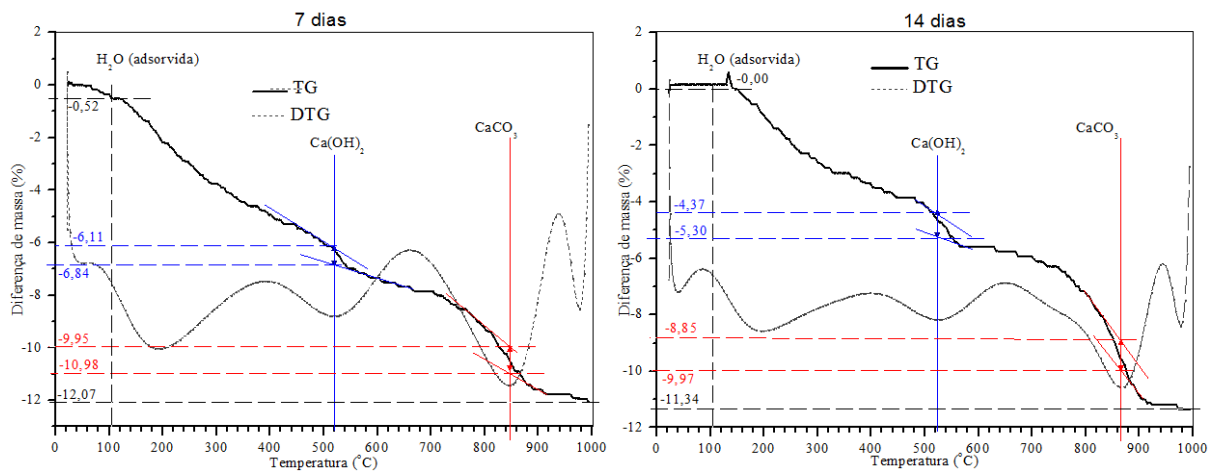
Referência - 0% de resíduo - 16 dias de cura

APÊNDICE E – Análises termogravimétricas para o traço 1:5,56 com e sem substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim.

0% de substituição (referência)

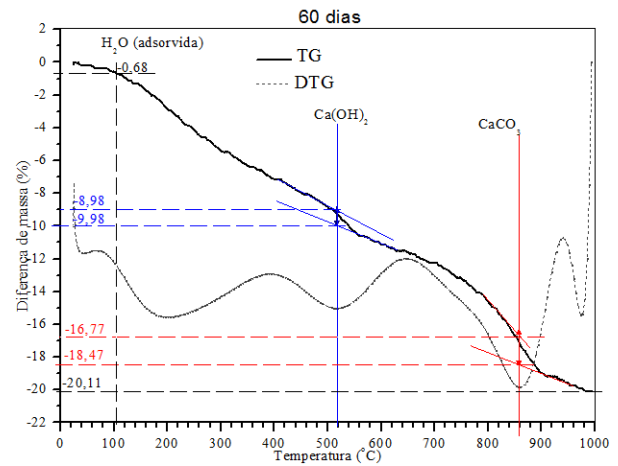
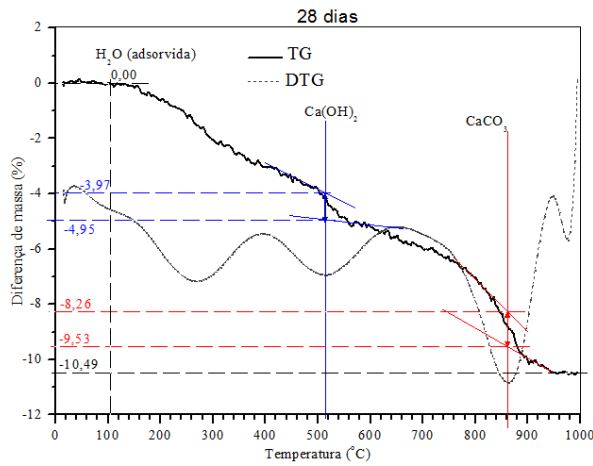


10% de substituição

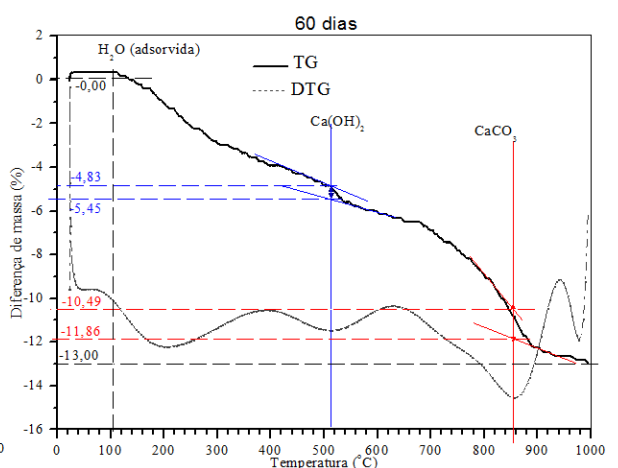
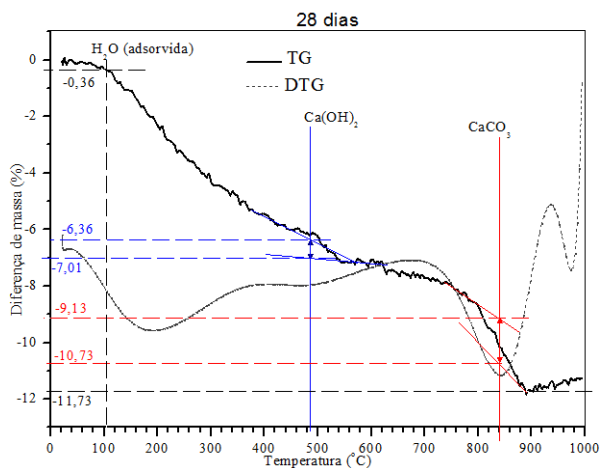
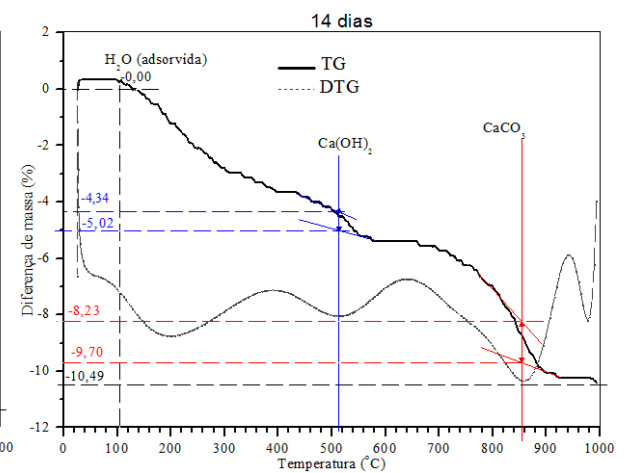
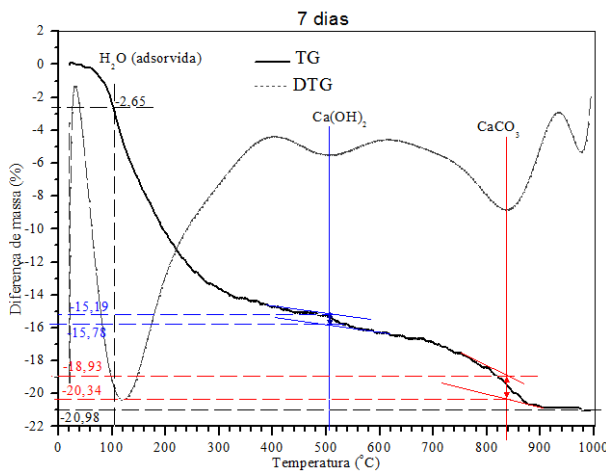


APÊNDICE E – Continuação

10% de substituição

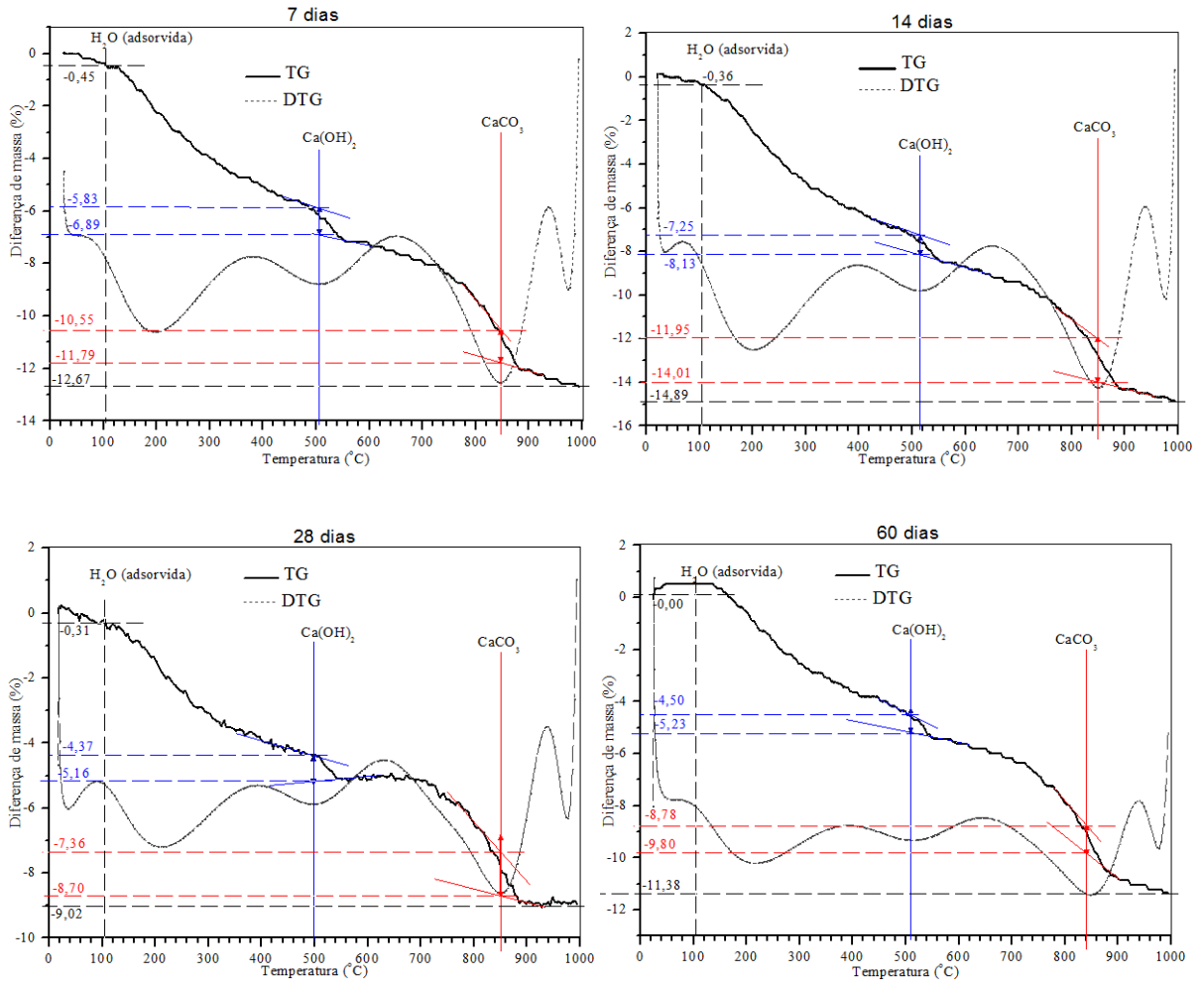


15% de substituição

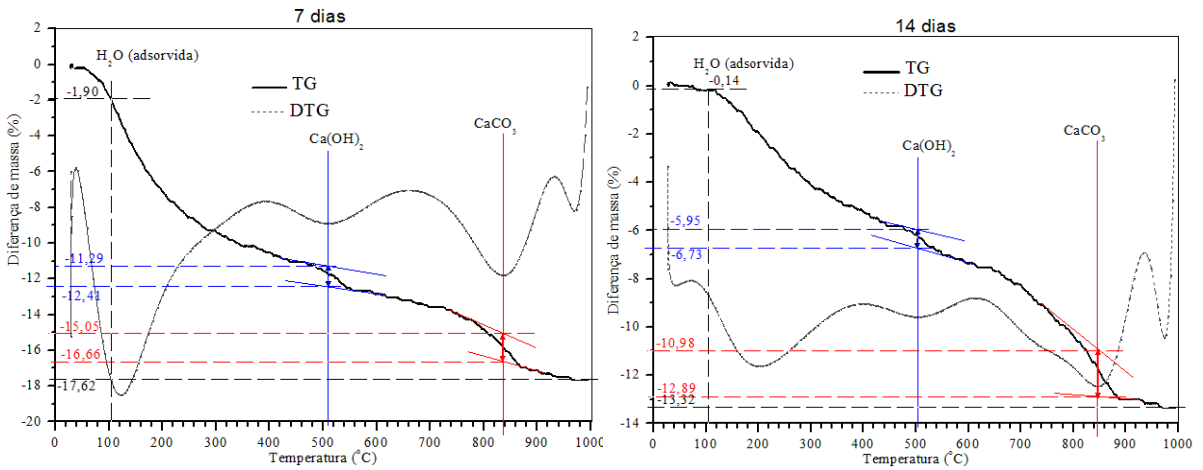


APÊNDICE E – Continuação

20% de substituição

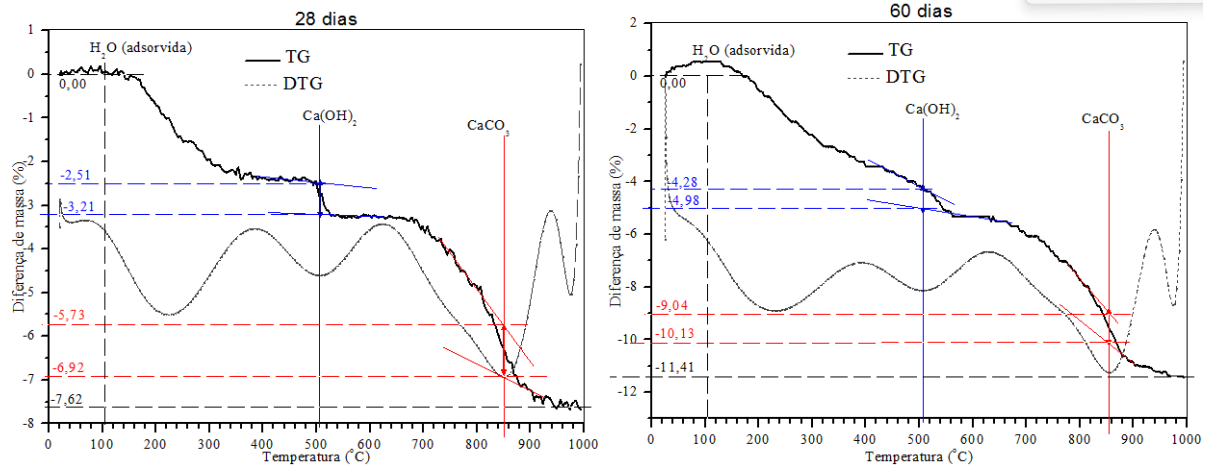


25% de substituição



APÊNDICE E – Continuação

25% de substituição



APÊNDICE F– Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH e do CaCO₃ e índice de hidratação e pozolanicidade para concretos no traço 1:5,53.

Idade (dias)	TS (%)	CH (%)	CaCO ₃ (%)	CH + CaCO ₃ (%)	I _{hidratação} (%)	I _p (%)
7	0	10,93	11,41	22,34	77,66	
	10	6,32	8,92	15,24	84,76	109,14
	15	3,22	7,69	10,91	89,09	114,72
	20	8,67	10,15	18,82	81,18	104,53
	25	7,12	10,24	17,37	82,63	106,40
14	0	8,47	18,22	26,68	73,32	
	10	9,96	9,88	19,84	80,16	109,33
	15	6,22	13,44	19,65	80,35	109,59
	20	6,06	14,18	20,23	79,77	108,80
	25	5,92	13,28	19,20	80,80	110,20
28	0	6,45	18,62	25,07	74,93	
	10	9,34	12,11	21,45	78,55	104,83
	15	5,72	14,07	19,79	80,21	107,05
	20	9,07	15,38	24,45	75,55	100,83
	25	9,19	15,62	24,80	75,20	100,36
60	0	5,87	10,16	16,03	83,97	
	10	5,15	8,75	13,90	86,10	102,54
	15	4,77	10,54	15,31	84,69	100,86
	20	6,41	8,96	15,38	84,62	100,77
	25	6,13	9,55	15,69	84,31	100,40

* TC – tempo de cura; ** TS – teor de substituição da massa do cimento por resíduo; *** I_p – Índice de pozolanicidade – relação entre os índices de hidratação dos concretos com resíduo e os de referência.

APÊNDICE G – Propriedades mecânicas dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56

Propriedade avaliada	Tempo de cura (dias)	Teor de substituição (%)									
		0	10		15		20		25		
			R	MC	R	MC	R	MC	R	MC	
Resistência à compressão simples (MPa)	7	média	17,38	14,89	17,84	15,26	16,78	15,05	14,39	14,71	13,84
		S _d	1,30	1,26	1,18	1,16	1,04	0,98	1,28	1,19	1,06
		CV (%)	7,46	8,49	6,68	7,57	6,20	6,50	8,86	8,41	7,69
	14	média	20,18	18,69	18,37	16,74	18,10	15,59	17,79	15,16	15,64
		S _d	1,57	0,63	1,12	0,87	1,89	1,17	1,11	1,45	0,75
		CV (%)	7,77	3,35	6,14	5,21	9,36	7,50	6,22	9,55	4,81
	28	média	21,77	21,20	20,68	17,74	20,18	16,98	17,98	15,23	16,65
		S _d	1,23	1,96	1,65	1,47	1,53	1,53	1,49	0,75	1,11
		CV (%)	5,64	9,24	7,96	8,30	7,57	9,01	8,31	4,90	6,69
	60	média	24,60	21,96	20,90	19,70	20,39	20,40	18,01	15,77	16,98
		S _d	0,61	1,86	1,81	0,40	2,05	0,77	1,13	1,29	1,37
		CV (%)	2,48	8,47	8,67	0,62	3,04	3,76	6,29	8,17	8,09
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7	média	1,90	2,09	2,23	2,05	2,02	1,74	1,92	1,65	1,48
		S _d	0,14	0,08	0,10	0,10	0,13	0,16	0,05	0,12	0,12
		CV (%)	7,42	3,83	4,57	4,91	6,20	9,01	2,71	7,18	8,36
	14	média	2,06	2,33	2,34	2,16	2,04	2,03	2,09	1,89	1,88
		S _d	0,13	0,18	0,10	0,06	0,17	0,15	0,04	0,05	0,16
		CV (%)	6,39	7,39	4,31	2,60	8,38	7,37	1,81	2,55	8,69
	28	média	2,71	2,45	2,40	2,32	2,29	2,32	2,27	2,06	2,07
		S _d	0,06	0,11	0,02	0,16	0,21	0,13	0,19	0,04	0,08
		CV (%)	2,20	4,44	5,90	6,69	9,02	5,61	8,55	2,12	3,92
	60	média	2,74	2,56	2,90	2,44	2,34	2,64	2,33	2,16	2,23
		S _d	0,25	0,08	0,16	0,13	0,16	0,19	0,14	0,08	0,10
		CV (%)	9,17	3,05	5,51	5,26	6,71	7,04	6,12	3,80	4,38
Módulo de Elasticidade (GPa)	7	média	18,02	17,26	19,00	16,87	18,64	16,72	16,55	15,56	16,38
		S _d	1,23	1,41	1,99	0,9	0,43	0,88	0,77	0,69	1,08
		CV (%)	8,83	8,18	10,49	5,32	2,30	5,26	4,67	4,22	5,32
	14	média	19,95	19,28	19,58	18,61	19,47	16,76	18,19	16,33	17,08
		S _d	0,78	0,88	0,69	1,24	0,15	0,79	1,07	0,38	1,03
		CV (%)	3,93	4,55	3,52	6,65	0,76	4,68	5,90	2,35	6,04
	28	média	20,18	20,04	19,92	18,94	20,27	18,07	18,57	16,84	17,54
		S _d	0,34	1,09	0,37	0,23	1,89	1,85	1,29	0,93	0,51
		CV (%)	1,66	5,42	1,84	1,20	9,31	10,22	6,96	5,52	2,93
	60	média	22,09	20,58	20,33	19,48	20,38	20,33	19,15	16,89	18,53
		S _d	0,82	0,53	0,89	0,90	0,04	0,89	1,83	0,85	1,52
		CV (%)	3,72	2,58	4,39	4,60	0,17	4,39	9,58	5,05	8,20

Sd – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; R - Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

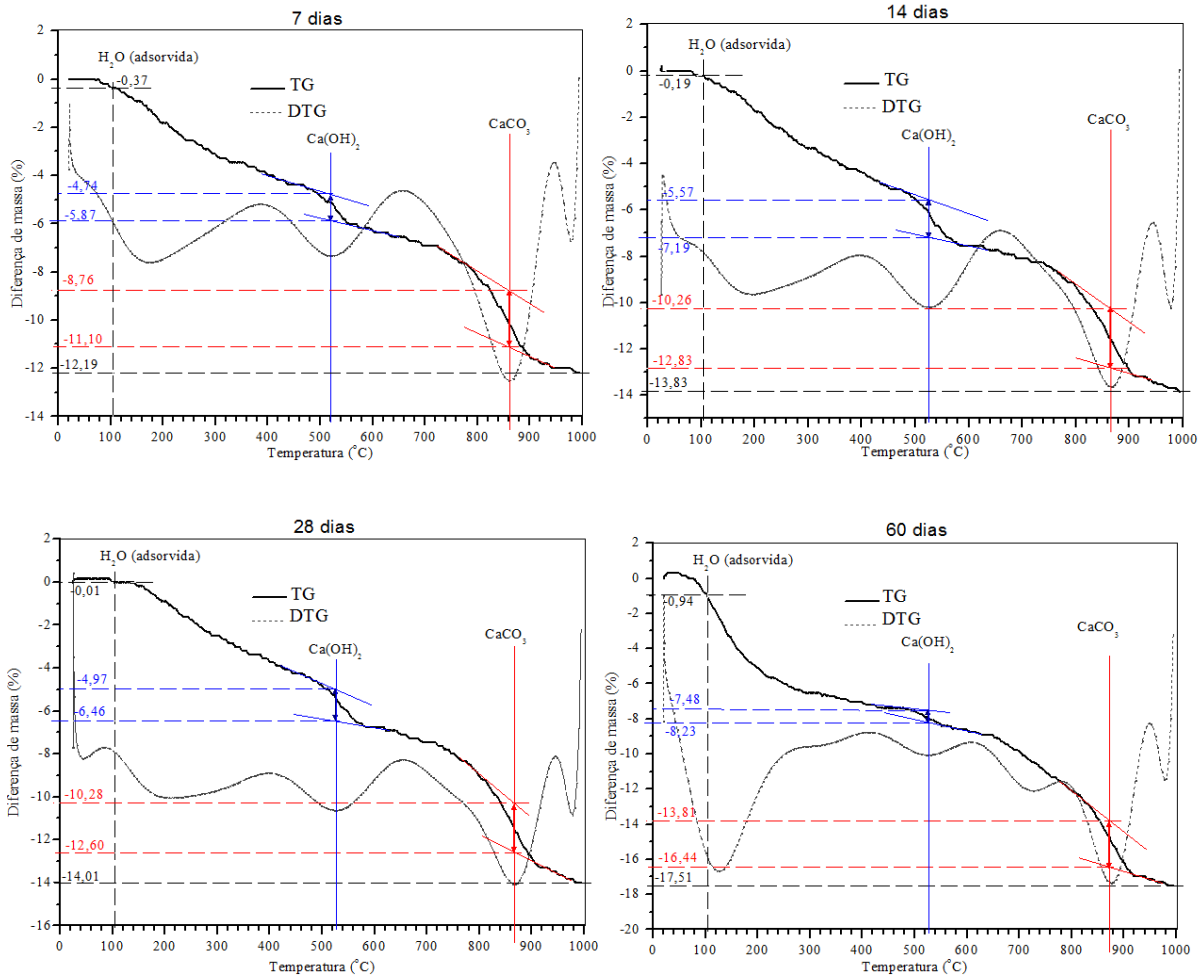
APÊNDICE H – Propriedades físicas dos corpos de prova de concreto no traço 1:5,56

Propriedade avaliada	Tempo de cura (dias)	Teor de substituição (%)									
		0	10		15		20		25		
			R	MC	R	MC	R	MC	R	MC	
Massa específica real	7	média	2,59	2,63	2,64	2,58	2,71	2,60	2,61	2,61	2,61
		S _d	0,02	0,16	0,01	0,04	0,15	0,02	0,01	0,01	0,02
		CV (%)	0,66	6,15	0,47	1,51	5,49	0,60	0,25	0,30	0,72
	14	média	2,62	2,62	2,66	2,64	2,55	2,60	2,61	2,62	2,62
		S _d	0,01	0,01	0,06	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02
		CV (%)	0,42	0,19	2,31	0,21	1,19	0,77	0,11	0,21	0,83
	28	média	2,63	2,56	2,61	2,62	2,62	2,60	2,50	2,63	2,61
		S _d	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,19	0,02	0,01
		CV (%)	0,66	0,45	0,72	0,43	1,51	0,42	7,49	0,60	0,43
	60	média	2,63	2,62	2,62	2,63	2,61	2,56	2,57	2,61	2,59
		S _d	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01
		CV (%)	0,33	0,53	0,84	0,13	0,40	0,30	0,71	1,04	0,43
Absorção de água por imersão (%)	7	média	8,73	9,25	9,05	8,81	9,51	9,31	9,39	9,21	9,32
		S _d	0,62	0,65	0,40	0,87	0,47	0,47	0,59	0,25	0,58
		CV (%)	7,06	7,07	4,40	9,92	4,95	5,02	6,26	2,68	6,21
	14	média	8,24	8,96	9,04	8,69	8,53	9,06	8,97	9,16	8,70
		S _d	0,41	0,23	0,36	0,52	0,68	0,92	0,31	0,20	0,28
		CV (%)	5,01	2,59	4,16	6,00	8,00	10,15	3,51	2,15	3,23
	28	média	8,00	8,63	8,54	8,06	8,42	8,94	8,94	8,92	8,69
		S _d	0,73	0,50	0,95	0,46	0,47	0,35	0,28	0,38	0,58
		CV (%)	9,18	5,83	11,10	5,66	5,57	3,96	3,14	4,27	6,62
	60	média	7,38	8,42	8,33	7,91	8,32	8,57	8,21	8,68	7,67
		S _d	0,72	0,50	0,86	0,46	0,57	0,13	0,40	0,40	1,01
		CV (%)	9,80	5,92	10,27	5,81	6,82	1,53	4,82	4,47	13,21
Índice de vazios (%)	7	média	18,41	19,58	19,25	18,48	20,51	19,46	19,67	19,37	19,56
		S _d	1,15	1,73	0,74	2,47	1,49	0,76	1,03	0,43	1,09
		CV (%)	6,24	8,86	3,83	13,36	7,25	3,91	5,21	2,24	5,55
	14	média	17,74	19,00	19,39	18,64	17,79	19,01	19,00	19,32	18,54
		S _d	0,78	0,41	0,83	0,94	1,69	1,67	0,53	0,35	0,42
		CV (%)	4,38	2,16	4,35	5,64	9,49	8,78	2,81	1,80	2,27
	28	média	17,35	18,09	18,14	17,45	18,09	18,86	18,24	18,57	18,48
		S _d	2,08	0,92	1,62	0,85	1,04	0,65	1,43	0,75	1,06
		CV (%)	11,99	5,09	8,91	4,88	5,74	3,43	7,87	3,93	5,75
	60	média	16,19	18,21	17,86	17,21	17,86	18,00	17,41	18,88	16,53
		S _d	1,73	0,96	1,64	0,84	1,06	0,27	0,76	0,61	1,86
		CV (%)	10,70	5,29	9,20	4,87	5,94	1,50	4,38	3,22	11,24

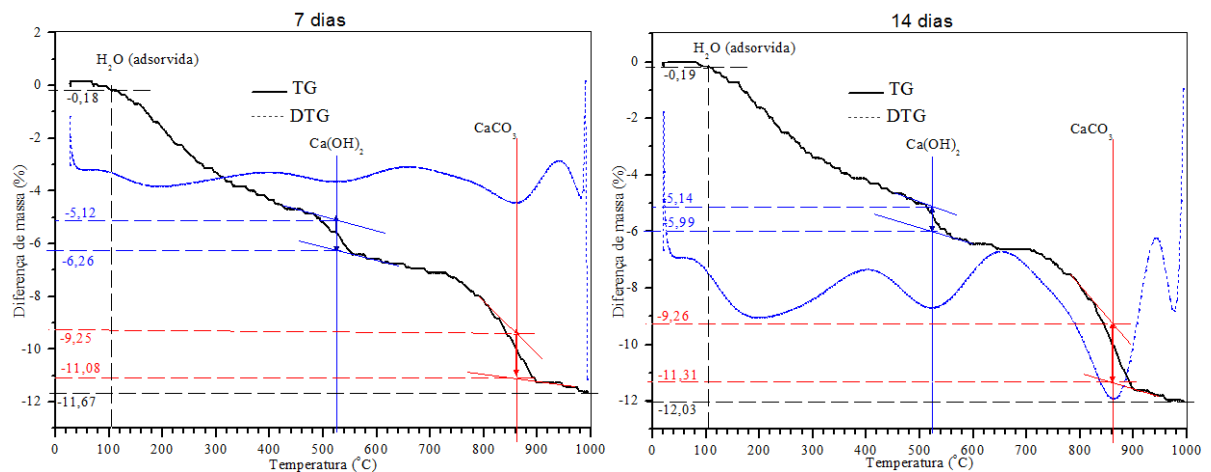
Sd – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; R – Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

APÊNDICE I – Análises termogravimétricas para o traço 1:6,67 com e sem substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim.

0% de substituição (referência)

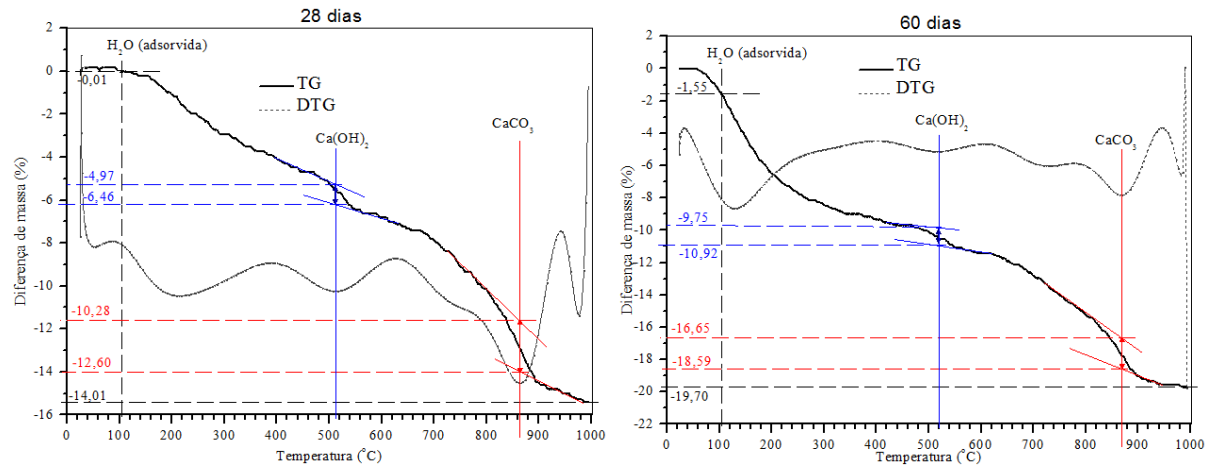


10% de substituição

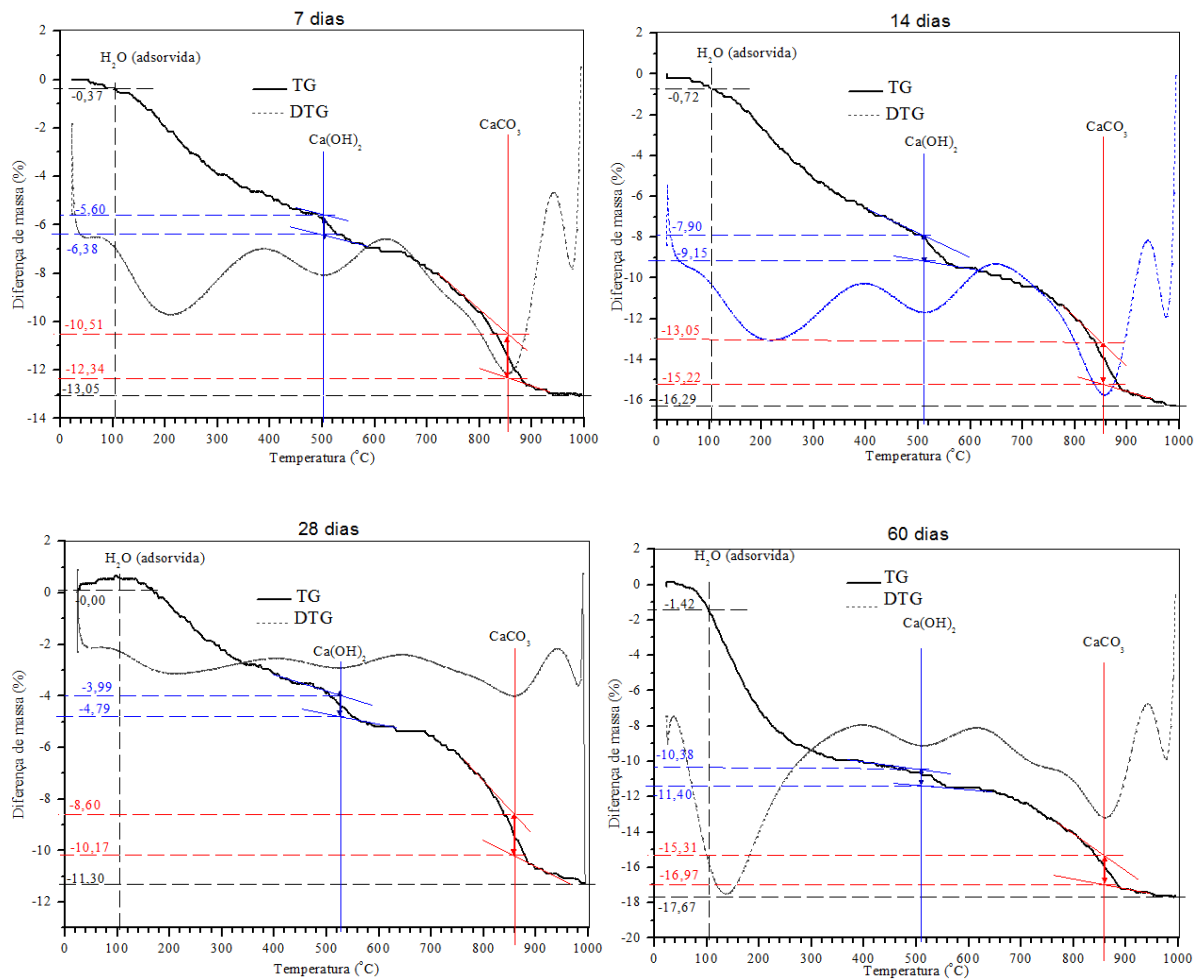


APÊNDICE I – Continuação

10% de substituição

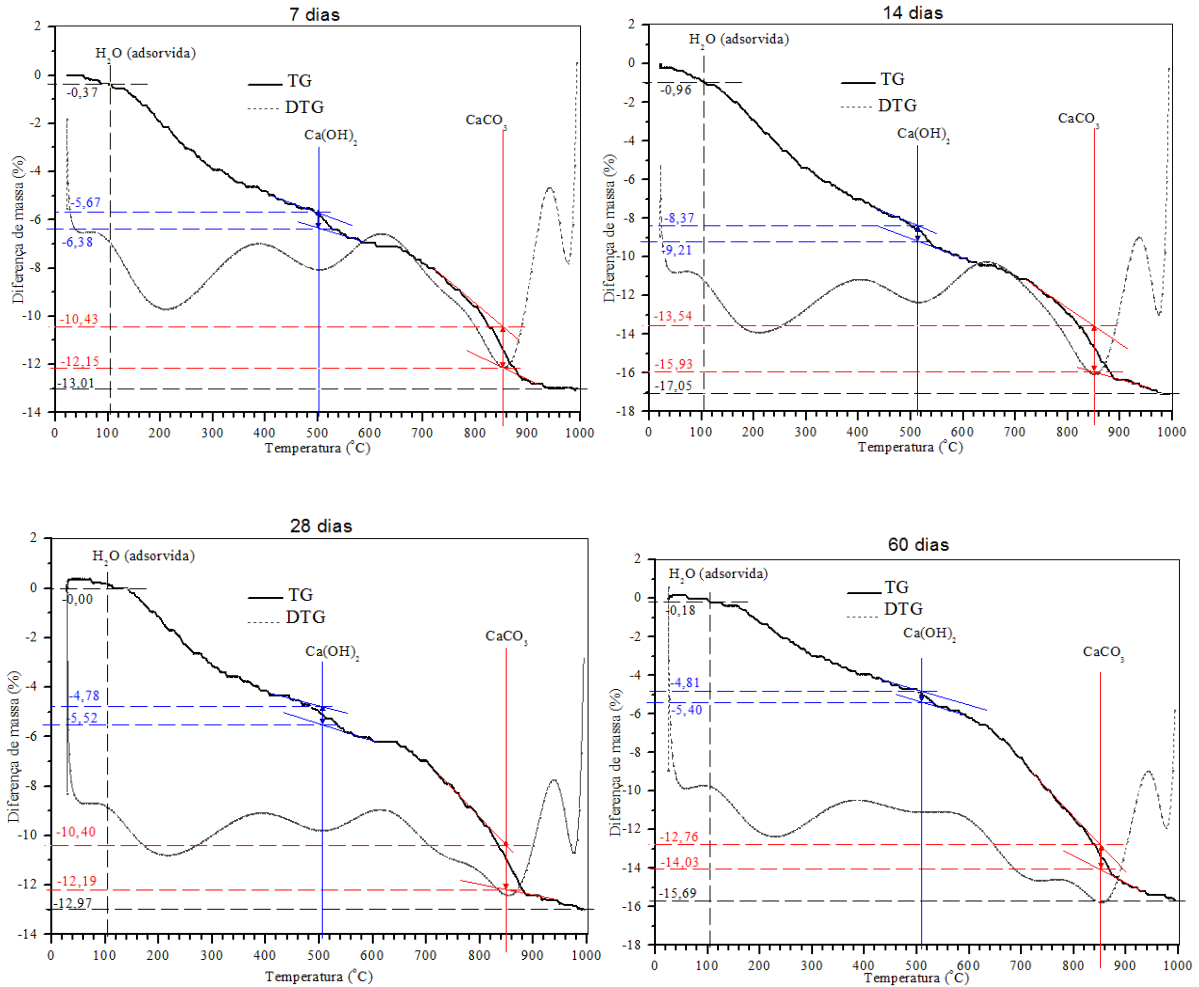


15% de substituição

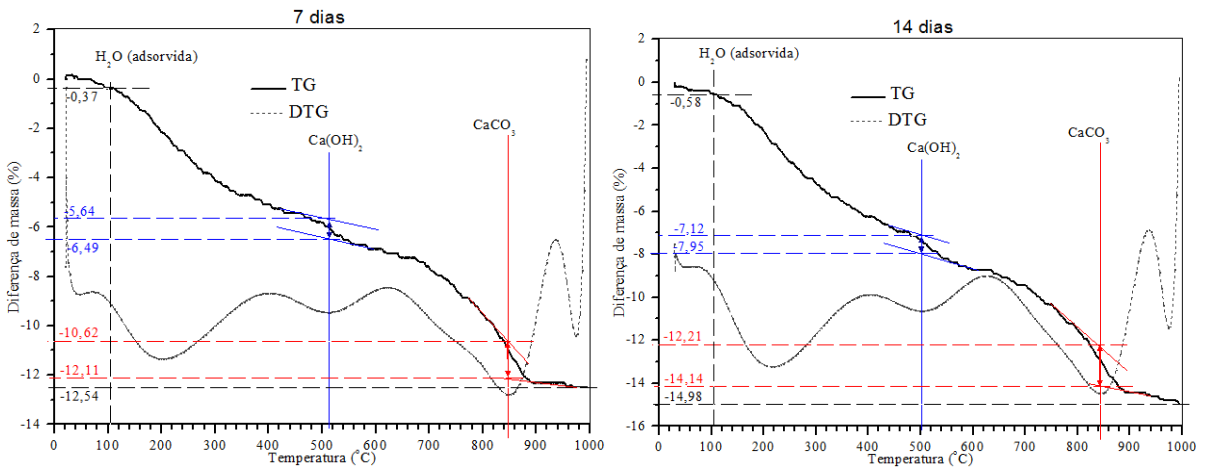


APÊNDICE I – Continuação

20% de substituição

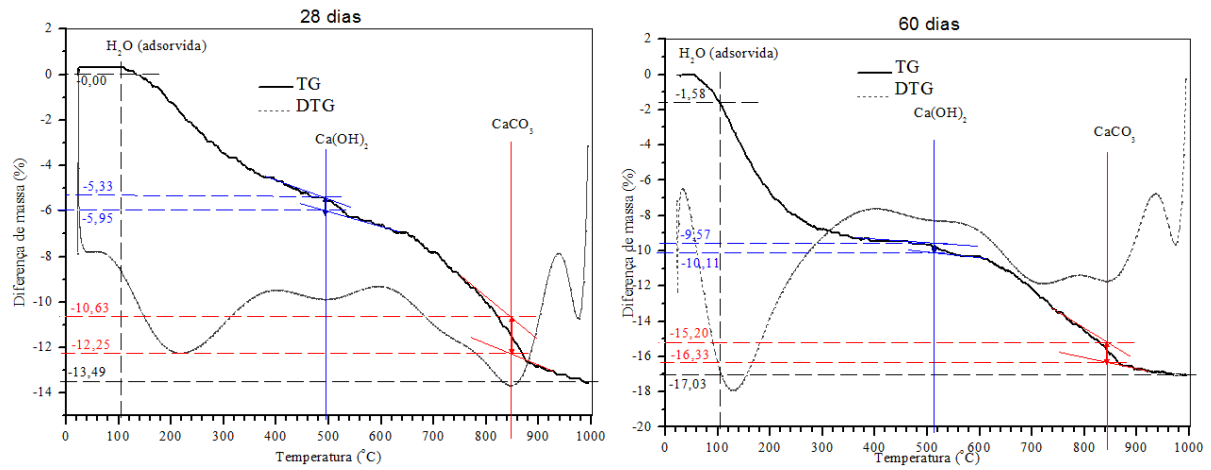


25% de substituição



APÊNDICE I – Continuação

25% de substituição



APÊNDICE J – Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH e do CaCO₃ e índice de hidratação e pozolanicidade para concretos no traço 1:6,67.

Idade (dias)	TS (%)	CH (%)	CaCO ₃ (%)	CH + CaCO ₃ (%)	I _{hidratação} (%)	I _p (%)
7	0	9,48	19,63	29,11	70,89	
	10	9,92	15,93	25,85	74,15	104,60
	15	6,15	14,43	20,58	79,42	112,03
	20	5,62	13,61	19,22	80,78	113,95
	25	6,98	12,24	19,23	80,77	113,94
14	0	11,88	18,84	30,72	69,28	
	10	7,18	17,31	24,49	75,51	108,99
	15	8,03	13,94	21,97	78,03	112,63
	20	5,22	14,85	20,07	79,93	115,36
	25	5,76	13,40	19,17	80,83	116,67
28	0	10,64	16,57	27,21	72,79	
	10	5,97	15,71	21,69	78,31	107,59
	15	7,08	13,89	20,97	79,03	108,57
	20	5,71	13,80	19,51	80,49	110,59
	25	4,60	12,01	16,60	83,40	114,58
60	0	4,53	15,87	20,40	79,60	
	10	6,45	10,69	17,13	82,87	104,10
	15	6,28	10,22	16,49	83,51	104,91
	20	3,80	8,19	11,99	88,01	110,56
	25	3,50	7,31	10,81	89,19	112,05

* TC – tempo de cura; ** TS – teor de substituição da massa do cimento por resíduo; *** I_p – Índice de pozolanicidade – relação entre os índices de hidratação dos concretos com resíduo e os de referência.

APÊNDICE K - Propriedades mecânicas dos corpos de prova no traço 1:6,67

Propriedade avaliada	Tempo de cura (dias)	Teor de substituição (%)									
		0	10		15		20		25		
			R	MC	R	MC	R	MC	R	MC	
Resistência à compressão simples (MPa)	7	média	14,33	13,73	16,92	13,17	16,46	12,17	15,98	11,23	13,21
		S _d	0,40	0,51	1,21	0,85	1,00	1,08	1,37	0,88	1,02
		CV (%)	2,80	3,33	7,17	6,42	6,10	8,84	1,54	7,86	7,74
	14	média	17,36	15,29	17,92	14,64	17,82	12,12	17,24	13,67	15,78
		S _d	1,56	1,20	1,16	1,39	0,66	1,25	1,58	1,04	0,94
		CV (%)	9,01	7,87	6,47	9,49	3,70	8,84	9,19	7,57	5,98
	28	média	17,46	16,86	18,61	17,15	18,30	16,22	18,53	14,22	17,55
		S _d	1,49	1,56	0,61	1,11	1,79	0,96	0,90	1,10	1,19
		CV (%)	8,52	9,23	3,29	6,45	9,77	6,93	4,86	7,71	6,80
	60	média	20,14	18,45	19,85	17,92	19,28	17,30	18,93	14,54	17,65
		S _d	1,55	1,82	1,31	1,61	1,03	0,65	2,71	1,45	1,57
		CV (%)	7,68	9,87	6,60	9,01	5,36	3,77	1,25	9,97	8,90
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7	média	1,95	1,96	2,10	2,00	2,06	1,64	1,96	1,41	1,92
		S _d	0,14	0,17	0,09	0,12	0,13	0,09	0,19	0,11	0,14
		CV (%)	7,18	8,67	4,29	6,00	6,31	5,49	9,69	7,80	7,69
	14	média	2,00	2,21	2,15	2,02	2,27	2,01	1,98	1,75	1,97
		S _d	0,12	0,08	0,20	0,14	0,21	0,13	0,15	0,13	0,18
		CV (%)	6,00	3,62	9,30	6,93	9,25	6,47	7,58	7,43	9,14
	28	média	2,30	2,24	2,18	2,11	2,36	2,06	2,11	2,09	2,19
		S _d	0,21	0,12	0,14	0,07	0,13	0,06	0,14	0,11	0,13
		CV (%)	9,13	5,36	6,42	3,32	5,51	2,91	6,64	5,26	5,94
	60	média	2,31	2,29	2,28	2,27	2,37	2,24	2,18	2,18	2,20
		S _d	0,08	0,03	0,16	0,06	0,22	0,16	0,11	0,19	0,16
		CV (%)	3,46	1,31	7,02	2,64	9,28	7,14	5,05	8,72	7,27
Módulo de Elasticidade (GPa)	7	média	17,08	17,45	17,58	15,72	18,11	15,23	17,54	15,84	16,13
		S _d	0,75	0,73	0,76	0,75	0,65	0,49	0,59	0,89	1,22
		CV (%)	4,37	4,18	4,31	4,74	3,57	3,23	3,34	5,59	7,55
	14	média	18,99	17,95	18,96	17,20	18,35	16,82	18,47	16,25	17,37
		S _d	1,10	0,72	0,03	0,74	0,76	0,97	1,29	1,50	0,63
		CV (%)	5,79	3,99	0,18	4,30	4,16	5,74	6,97	9,24	3,61
	28	média	18,89	17,98	18,50	18,52	18,49	17,80	18,76	16,43	18,51
		S _d	0,91	0,96	0,75	1,26	0,49	0,85	0,58	1,28	1,61
		CV (%)	4,82	5,35	4,03	6,80	3,78	4,79	0,76	7,80	8,71
	60	média	20,21	19,50	20,33	18,72	19,09	18,48	20,07	16,62	18,96
		S _d	0,56	0,30	1,08	1,65	1,09	1,65	0,99	0,84	1,64
		CV (%)	2,78	1,52	5,32	8,82	5,69	8,91	4,91	5,08	8,66

S_d – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; R – Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

APÊNDICE L – Relação entre a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.

Traço 1:5,56

Substituição (%)	f_{c7} (MPa)	f_{i7} (MPa)	f_{i7}/f_{c7} (%)	f_{c14} (MPa)	f_{i14} (MPa)	f_{i14}/f_{c14} (%)	f_{c28} (MPa)	f_{i28} (MPa)	f_{i28}/f_{c28} (%)	f_{c60} (MPa)	f_{i60} (MPa)	f_{i60}/f_{c60} (%)	
0	17,38	1,90	10,93	20,18	2,06	10,21	21,77	2,71	12,45	24,60	2,74	11,14	
10	R	14,89	2,09	14,04	18,69	2,33	12,47	21,20	2,45	11,56	21,96	2,56	11,66
	MC	17,84	2,23	12,50	18,37	2,34	12,74	20,68	2,40	11,61	20,90	2,90	13,88
15	R	15,26	2,05	13,43	16,74	2,16	12,90	17,74	2,32	13,08	19,70	2,44	12,39
	MC	16,78	2,02	12,04	18,10	2,04	11,27	20,18	2,29	11,35	20,39	2,34	11,48
20	R	15,05	1,74	11,56	15,59	2,03	13,02	16,98	2,32	13,66	20,40	2,64	12,94
	MC	14,39	1,92	13,34	17,79	2,09	11,75	17,98	2,27	12,63	18,01	2,33	12,94
25	R	14,71	1,65	11,22	15,16	1,89	12,47	15,23	2,06	13,53	15,77	2,16	13,70
	MC	13,84	1,48	10,69	15,64	1,88	12,02	16,65	2,07	12,43	16,98	2,23	13,13

Traço 1:6,67

Substituição (%)	f_{c7} (MPa)	f_{i7} (MPa)	f_{i7}/f_{c7} (%)	f_{c14} (MPa)	f_{i14} (MPa)	f_{i14}/f_{c14} (%)	f_{c28} (MPa)	f_{i28} (MPa)	f_{i28}/f_{c28} (%)	f_{c60} (MPa)	f_{i60} (MPa)	f_{i60}/f_{c60} (%)	
0	14,33	1,95	13,6	17,36	2,00	11,5	17,46	2,30	13,2	20,14	2,31	11,5	
10	R	13,73	1,96	14,3	15,29	2,21	14,5	16,86	2,24	13,3	18,45	2,29	12,4
	MC	16,92	2,10	12,4	17,92	2,15	12,0	18,61	2,18	11,7	19,85	2,28	11,5
15	R	13,17	2,00	15,2	14,64	2,02	13,8	17,15	2,11	12,3	17,92	2,27	12,7
	MC	16,46	2,06	12,5	17,82	2,27	12,7	18,30	2,36	12,9	19,28	2,37	12,3
20	R	12,17	1,64	13,5	12,12	2,01	16,6	16,22	2,06	12,7	17,30	2,24	12,9
	MC	15,98	1,96	12,3	17,24	1,98	11,5	18,53	2,11	11,4	18,93	2,18	11,5
25	R	11,23	1,41	12,6	13,67	1,75	12,8	14,22	2,09	14,7	14,54	2,18	15,0
	MC	13,21	1,92	14,5	15,78	1,97	12,5	17,55	2,19	12,5	17,65	2,20	12,5

Traço 1:8,33

Substituição (%)	f_{c7} (MPa)	f_{i7} (MPa)	f_{i7}/f_{c7} (%)	f_{c14} (MPa)	f_{i14} (MPa)	f_{i14}/f_{c14} (%)	f_{c28} (MPa)	f_{i28} (MPa)	f_{i28}/f_{c28} (%)	f_{c60} (MPa)	f_{i60} (MPa)	f_{i60}/f_{c60} (%)	
0	9,71	1,49	15,3	11,23	1,59	14,2	15,09	1,92	12,7	15,64	2,18	13,9	
10	R	10,38	1,49	14,4	11,94	1,65	13,8	15,74	1,87	11,9	17,55	1,98	11,3
	MC	11,29	1,56	13,8	13,43	1,77	13,2	15,02	1,79	11,9	17,15	2,07	12,1
15	R	12,21	1,66	13,6	13,08	1,64	12,5	14,12	1,82	12,9	16,51	1,98	12,0
	MC	11,15	1,41	12,6	14,62	1,54	10,5	15,02	1,70	11,3	16,07	1,91	11,9
20	R	10,25	1,39	13,6	11,59	1,52	13,1	12,63	1,78	14,1	13,26	1,90	14,3
	MC	12,45	1,49	12,0	14,51	1,67	11,5	14,52	1,83	12,6	14,79	1,87	12,6
25	R	8,86	1,42	16,0	10,07	1,56	15,5	12,22	1,73	14,2	12,62	1,77	14,0
	MC	9,41	1,13	12,0	9,73	1,33	13,7	10,62	1,56	14,7	11,46	2,00	17,5

R – Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

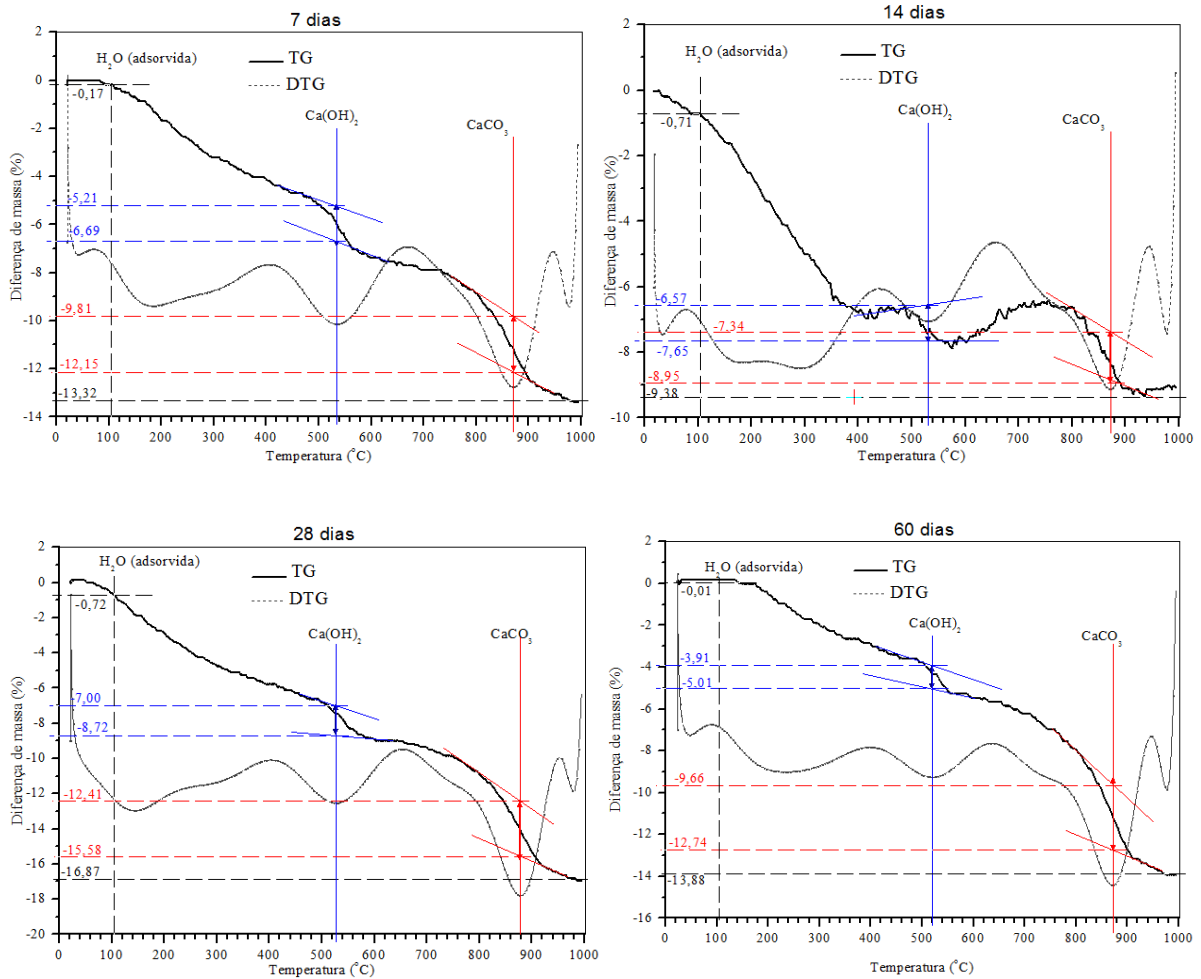
APÊNDICE M – Propriedades físicas dos corpos de prova de concreto no traço 1:6,67

Propriedade avaliada	Tempo de cura (dias)	Teor de substituição (%)									
		0	10		15		20		25		
			R	MC	R	MC	R	MC	R	MC	
Massa específica real	7	média	2,61	2,69	2,71	2,63	2,66	2,63	2,55	2,64	2,64
		S _d	0,03	0,07	0,14	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01	0,01
		CV (%)	1,14	2,68	4,98	0,23	1,46	0,19	2,26	0,26	0,35
	14	média	2,62	2,63	2,55	2,62	2,54	2,63	2,62	2,64	2,65
		S _d	0,01	0,01	0,08	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01
		CV (%)	0,38	0,29	2,98	0,25	2,22	0,54	0,55	0,40	0,48
	28	média	2,62	2,58	2,63	2,58	2,61	2,61	2,63	2,62	2,44
		S _d	0,02	0,04	0,01	0,09	0,05	0,01	0,01	0,01	0,13
		CV (%)	0,59	1,49	0,38	3,43	1,75	0,30	0,28	0,40	5,45
	60	média	2,54	2,57	2,62	2,53	2,60	2,58	2,56	2,46	2,55
		S _d	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,12	0,01	0,09	0,01
		CV (%)	0,63	1,20	0,35	0,42	0,47	4,49	0,17	3,62	0,58
Absorção de água por imersão (%)	7	média	7,95	9,10	10,26	9,00	8,75	8,59	9,48	9,43	9,01
		S _d	0,43	1,33	1,15	0,43	0,96	0,28	0,23	0,74	0,42
		CV (%)	5,39	14,58	11,25	4,79	10,98	3,20	2,45	7,80	4,70
	14	média	7,47	7,98	8,64	8,63	8,60	8,57	9,42	9,19	8,74
		S _d	0,14	0,39	0,47	0,22	0,51	0,40	0,48	0,34	0,23
		CV (%)	1,91	4,86	5,53	2,50	5,90	4,63	5,05	3,72	2,58
	28	média	7,02	7,41	8,48	8,45	7,61	8,08	9,21	8,70	7,92
		S _d	0,67	0,55	0,27	0,55	0,97	0,25	0,21	0,65	0,05
		CV (%)	9,49	7,39	3,21	6,53	12,82	3,07	2,31	7,42	0,64
	60	média	6,03	6,82	8,22	7,35	7,60	7,63	7,60	8,56	7,68
		S _d	0,09	0,50	0,39	0,10	0,46	0,55	0,14	0,29	0,08
		CV (%)	1,57	7,33	4,72	1,36	6,06	7,16	1,82	3,42	1,11
Índice de vazios (%)	7	média	17,17	19,62	21,57	19,13	18,80	18,42	19,45	19,88	19,22
		S _d	0,85	2,70	3,19	0,77	1,54	0,49	0,46	1,29	0,78
		CV (%)	4,93	13,78	14,78	4,04	8,20	2,64	2,39	6,50	4,06
	14	média	16,35	17,34	17,90	18,46	17,93	18,10	19,76	19,51	18,79
		S _d	0,29	0,74	1,12	0,41	0,54	1,07	0,89	0,62	0,47
		CV (%)	1,75	4,28	6,24	2,24	3,04	5,94	4,50	3,18	2,48
	28	média	15,54	16,16	18,21	17,89	16,46	17,54	19,48	18,57	16,22
		S _d	1,31	1,05	0,53	1,35	1,94	0,50	0,40	1,19	0,76
		CV (%)	8,45	6,42	2,93	7,55	11,79	2,84	2,07	6,41	4,68
	60	média	13,28	14,92	17,72	15,68	16,52	16,61	16,28	18,11	16,38
		S _d	0,20	0,80	0,74	0,23	0,90	1,04	0,27	1,03	0,11
		CV (%)	1,48	5,35	4,17	1,47	5,44	6,27	1,66	5,69	0,68

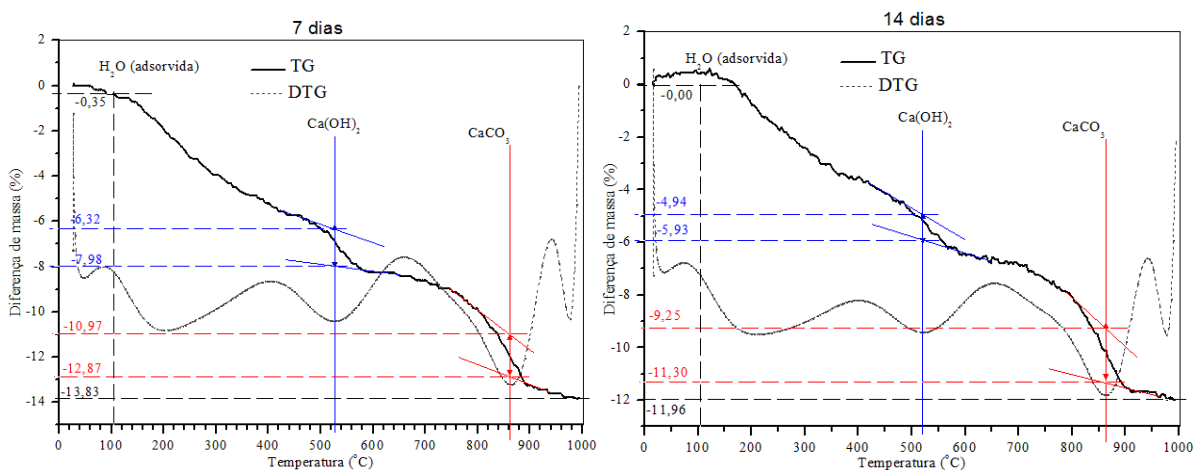
Sd – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; R – Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

APÊNDICE N – Análises termogravimétricas para o traço 1:8,33 com e sem substituição parcial do cimento pelo resíduo de caulim.

0% de substituição (referência)

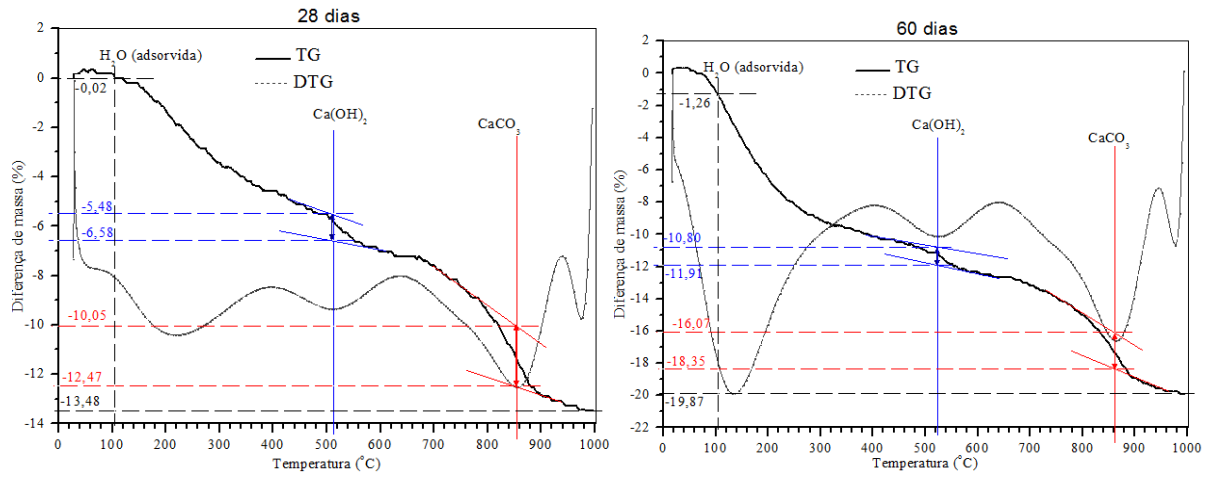


10% de substituição

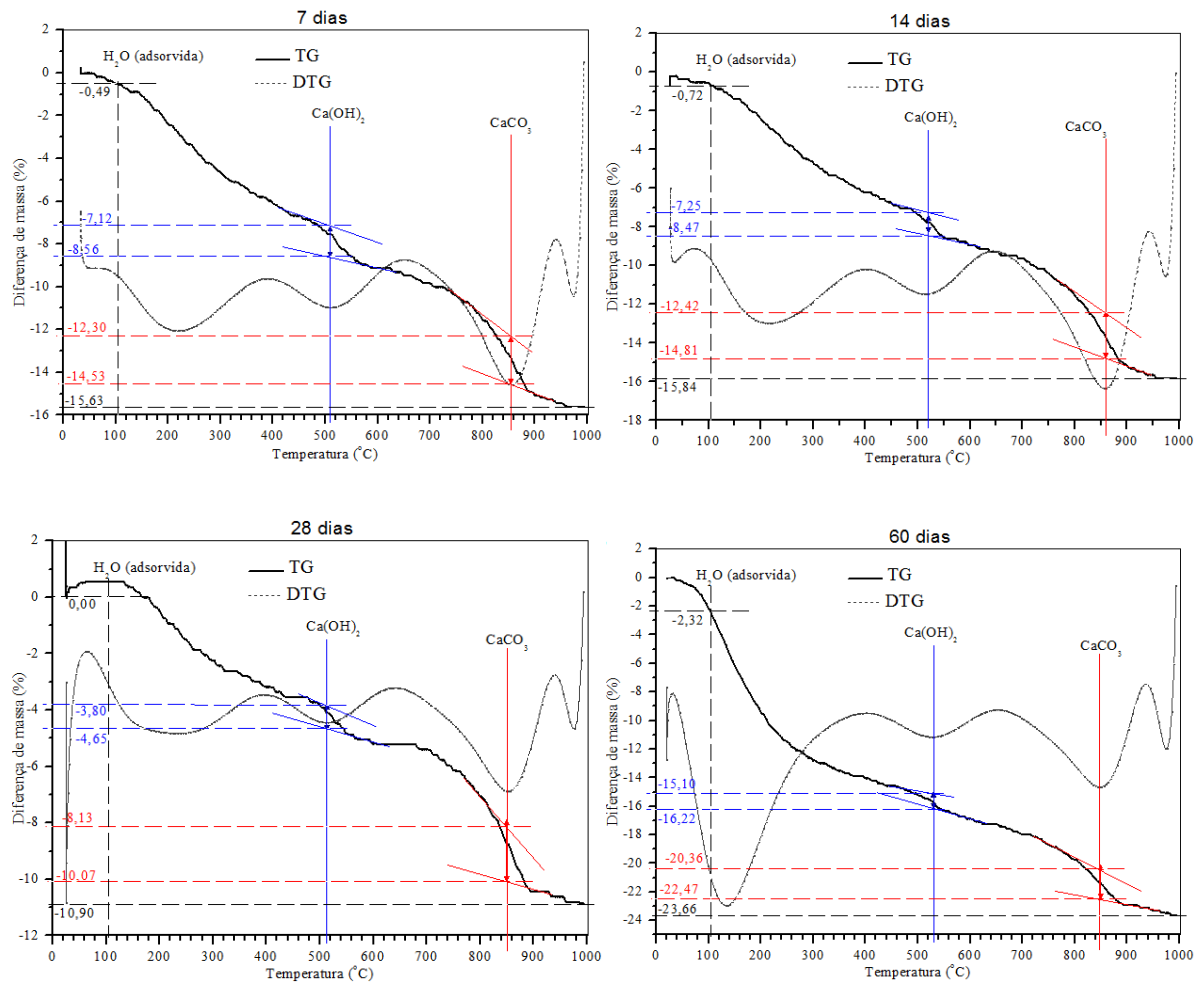


APÊNDICE N – Continuação

10% de substituição

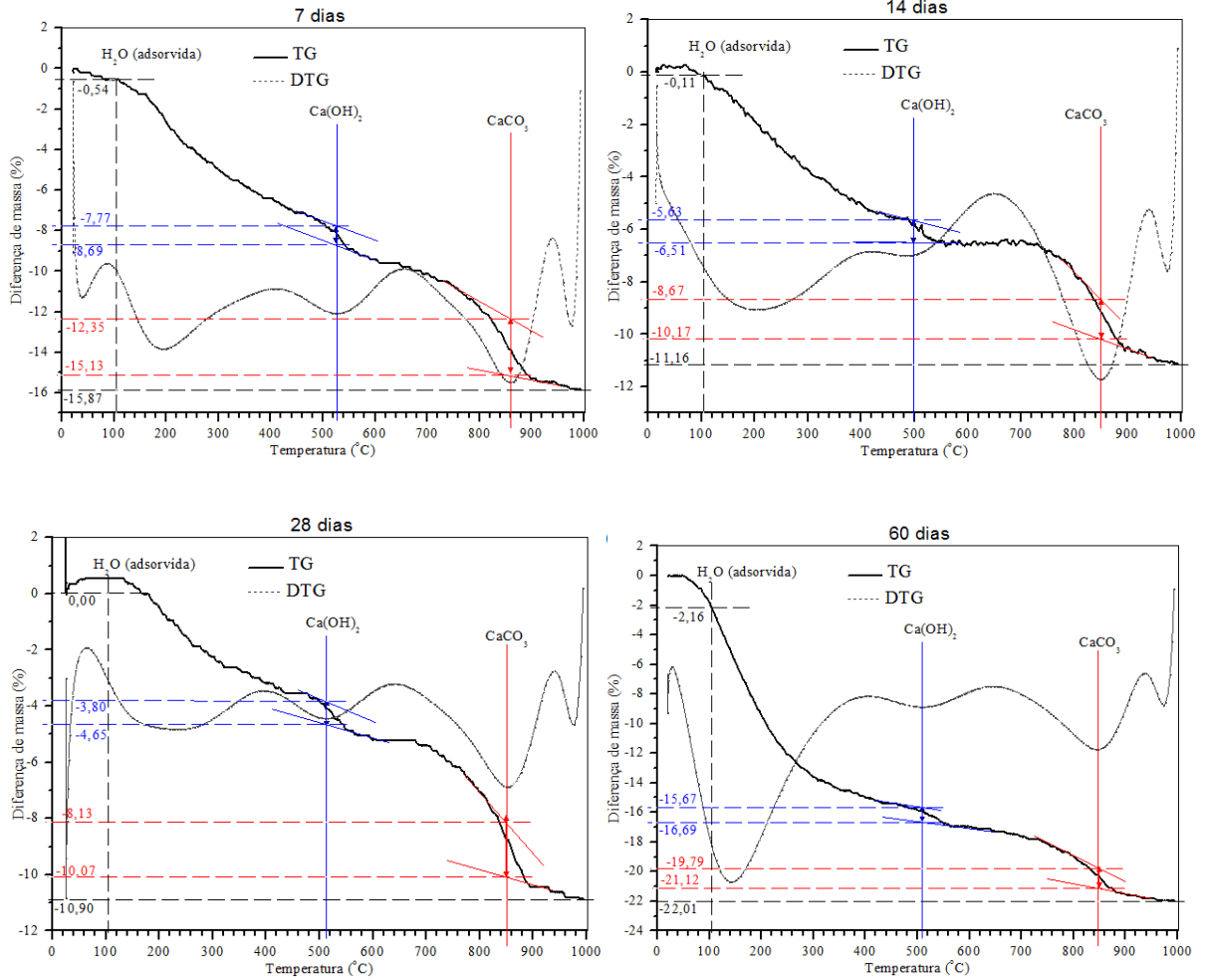


15% de substituição

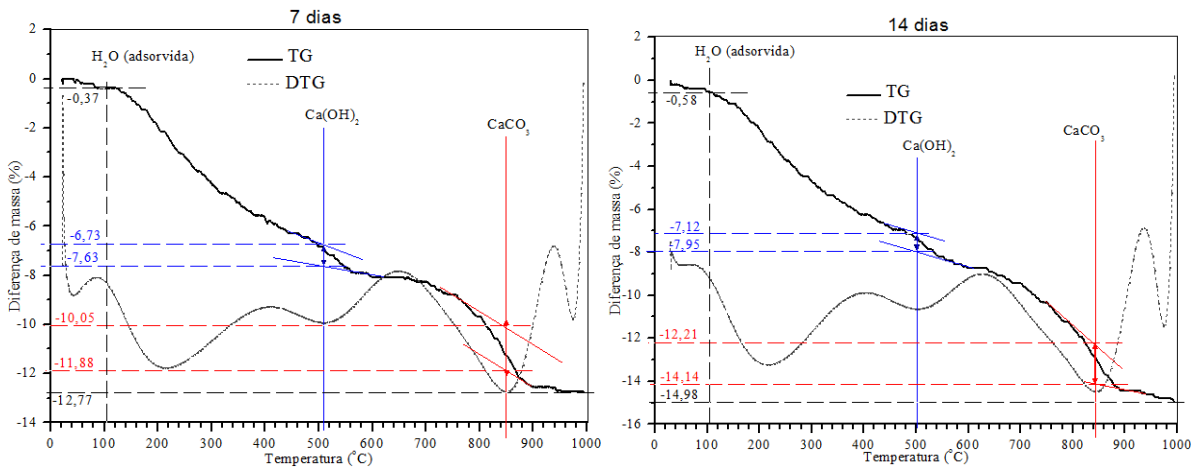


APÊNDICE N – Continuação

20% de substituição

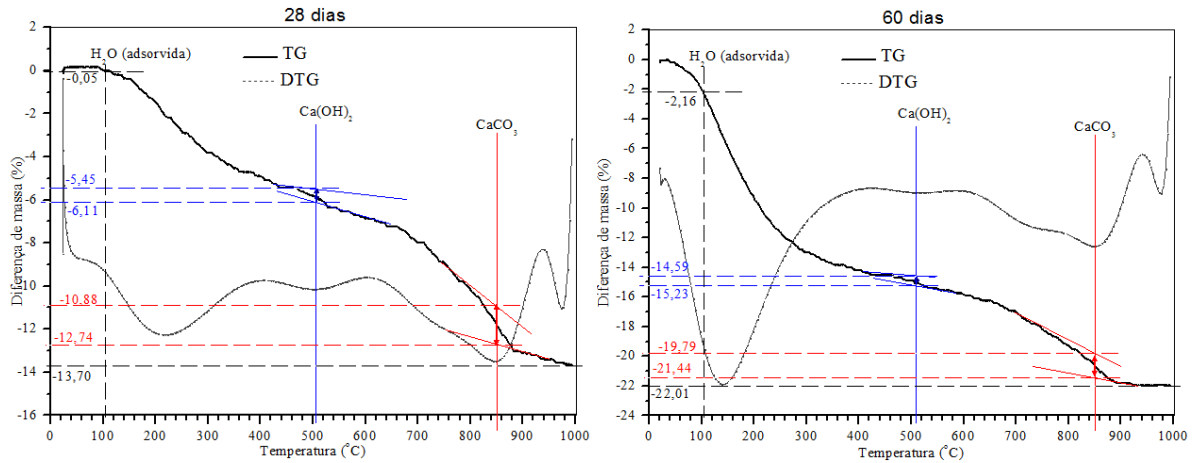


25% de substituição



APÊNDICE N – Continuação

25% de substituição



APÊNDICE O – Diferenças de massa decorrentes da desidroxilação do CH e do CaCO₃ e índice de hidratação e pozzolanicidade para concretos no traço 1:8,33.

Idade (dias)	TS (%)	CH (%)	CaCO ₃ (%)	CH + CaCO ₃ (%)	I _{hidratação} (%)	I _p (%)
7	0	11,25	17,79	29,05	70,95	
	10	12,31	14,09	26,41	73,59	103,72
	15	9,51	14,73	24,24	75,76	106,78
	20	6,00	18,07	24,07	75,93	107,02
	25	7,26	14,76	22,02	77,98	109,91
14	0	12,46	18,57	31,03	68,97	
	10	8,28	17,15	25,44	74,56	108,11
	15	8,07	15,81	23,88	76,12	110,34
	20	7,96	13,57	21,54	78,46	113,76
	25	6,25	14,43	20,68	79,32	115,01
28	0	10,65	19,63	30,28	69,72	
	10	8,17	17,98	26,15	73,85	105,92
	15	7,81	17,83	25,64	74,36	106,66
	20	5,40	15,97	21,37	78,63	112,78
	25	4,84	13,63	18,46	81,54	116,95
60	0	7,93	22,21	30,14	69,86	
	10	5,96	12,25	18,22	81,78	117,06
	15	5,25	9,89	15,14	84,86	121,47
	20	5,14	6,70	11,84	88,16	126,20
	25	3,22	8,31	11,54	88,46	126,63

* TC – tempo de cura; ** TS – teor de substituição da massa do cimento por resíduo; *** I_p – Índice de pozzolanicidade – relação entre os índices de hidratação dos concretos com resíduo e os de referência.

APÊNDICE P – Propriedades mecânicas dos corpos de prova no traço 1:8,33

Propriedade avaliada	Tempo de cura (dias)	Teor de substituição (%)									
		0	10		15		20		25		
			R	MC	R	MC	R	MC	R	MC	
Resistência à compressão simples (MPa)	7	média	9,71	10,38	11,29	12,21	11,15	10,25	12,45	8,86	9,41
		S _d	0,23	0,41	0,95	0,93	0,75	0,33	1,23	0,81	0,37
		CV (%)	2,39	3,95	8,43	7,65	6,75	3,19	9,91	9,12	3,92
		média	11,23	11,94	13,43	13,08	14,62	11,59	14,51	10,07	9,73
		S _d	0,93	0,79	1,16	1,30	1,27	0,34	1,37	0,78	0,57
		CV (%)	8,30	6,63	8,60	9,97	8,69	2,91	9,45	7,73	5,82
		média	15,09	15,74	15,02	14,12	15,02	12,63	14,52	12,22	10,62
		S _d	0,80	1,25	0,79	0,40	1,35	0,84	0,63	1,21	0,91
		CV (%)	5,32	7,96	5,27	2,84	9,01	6,64	4,32	9,93	8,54
		média	15,64	17,55	17,15	16,51	16,07	13,26	14,79	12,62	11,46
		S _d	1,41	1,06	0,15	1,18	1,38	0,80	0,24	0,09	0,74
		CV (%)	8,98	6,05	0,90	7,14	8,58	6,01	1,61	0,73	6,49
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	7	média	1,49	1,49	1,56	1,66	1,41	1,39	1,49	1,42	1,13
		S _d	0,11	0,09	0,14	0,13	0,10	0,07	0,07	0,07	0,08
		CV (%)	7,26	5,72	8,74	7,81	7,28	5,10	4,66	4,93	7,34
		média	1,59	1,65	1,77	1,64	1,54	1,52	1,67	1,56	1,33
		S _d	0,08	0,07	0,02	0,14	0,13	0,11	0,09	0,13	0,11
		CV (%)	4,72	4,00	1,15	8,43	8,31	7,22	5,42	8,52	8,35
		média	1,92	1,87	1,79	1,82	1,70	1,78	1,83	1,73	1,56
		S _d	0,16	0,18	0,15	0,14	0,16	0,10	0,14	0,15	0,13
		CV (%)	8,50	9,69	8,24	7,76	9,37	5,67	7,79	8,62	8,16
		média	2,18	1,98	2,07	1,98	1,91	1,90	1,87	1,77	2,00
		S _d	0,12	0,08	0,09	0,17	0,19	0,17	0,14	0,10	0,19
		CV (%)	5,47	3,81	4,55	8,81	9,82	8,84	7,60	5,44	9,30
Módulo de Elasticidade (GPa)	7	média	13,81	13,82	13,34	15,39	13,43	13,49	14,29	12,26	13,01
		S _d	0,46	0,73	0,54	0,99	1,02	0,36	1,10	0,06	0,43
		CV (%)	3,33	5,26	7,56	6,42	7,56	2,66	7,66	0,52	3,32
		média	14,22	14,60	14,98	15,54	16,08	14,59	15,56	12,86	12,79
		S _d	0,70	0,56	0,70	0,99	0,77	0,54	1,13	0,51	0,41
		CV (%)	4,89	3,82	4,65	6,35	4,78	3,69	7,29	3,99	3,19
		média	16,63	17,27	16,51	15,72	16,07	14,45	16,16	14,49	13,23
		S _d	0,89	1,55	0,75	0,49	1,11	0,65	0,46	0,76	0,78
		CV (%)	5,37	8,97	4,57	3,09	6,93	4,52	2,84	5,27	5,88
		média	17,06	18,11	17,09	17,55	16,11	15,64	15,56	14,63	14,72
		S _d	0,65	1,14	0,31	0,87	0,83	0,66	0,33	0,47	0,48
		CV (%)	3,80	6,28	1,82	4,93	5,12	4,21	2,13	3,22	3,29

Sd – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; R – Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

APÊNDICE Q - Propriedades físicas dos corpos de prova no traço 1:8,33

Propriedade avaliada	Tempo de cura (dias)	Teor de substituição (%)									
		0	10		15		20		25		
			R	MC	R	MC	R	MC	R	MC	
Massa específica real	7	média	2,50	2,65	2,66	2,67	2,70	2,62	2,64	2,62	2,66
		S _d	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,32	0,01	0,01
		CV (%)	0,60	0,55	0,26	0,59	0,13	0,09	3,29	0,13	0,31
	14	média	2,64	2,40	2,64	2,62	2,65	2,66	2,59	2,66	2,65
		S _d	0,01	0,16	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		CV (%)	0,02	6,78	0,20	0,17	0,12	0,24	0,16	0,16	0,18
	28	média	2,65	2,64	2,63	2,64	2,64	2,64	2,63	2,65	2,61
		S _d	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
		CV (%)	0,55	0,18	0,19	0,20	0,48	0,37	1,20	0,07	0,18
	60	média	2,53	2,53	2,65	2,53	2,60	2,53	2,77	2,64	2,61
		S _d	0,02	0,01	0,02	0,01	0,11	0,01	0,19	0,01	0,01
		CV (%)	0,63	0,16	0,59	0,34	4,32	0,57	6,83	0,27	0,21
Absorção de água por imersão (%)	7	média	8,90	9,20	9,18	8,64	9,54	9,72	9,76	9,37	10,43
		S _d	0,27	0,53	0,54	0,18	0,13	0,34	0,32	0,14	0,58
		CV (%)	3,01	5,73	5,83	2,03	1,41	3,53	3,29	1,53	5,51
	14	média	8,02	8,18	8,76	8,63	9,35	9,67	9,38	9,18	9,56
		S _d	0,27	0,30	0,50	0,66	0,60	0,45	0,28	0,13	0,07
		CV (%)	3,01	3,65	5,70	8,02	6,39	4,61	2,99	1,40	0,72
	28	média	7,46	8,00	8,74	8,28	9,25	8,59	9,26	8,82	9,49
		S _d	0,75	0,09	0,60	0,05	0,73	0,48	0,49	0,12	0,25
		CV (%)	9,99	1,11	5,70	0,55	7,94	5,63	5,34	1,40	2,60
	60	média	6,08	6,87	8,68	6,75	8,65	7,65	9,13	8,51	9,06
		S _d	0,20	0,18	0,43	0,03	0,77	0,07	0,44	0,24	0,53
		CV (%)	3,22	2,57	4,92	0,50	8,93	0,94	4,87	2,81	5,81
Índice de vazios (%)	7	média	18,22	19,59	19,61	18,74	20,50	20,41	20,48	19,74	21,69
		S _d	0,54	0,98	0,97	0,30	0,24	0,78	0,56	0,26	0,99
		CV (%)	2,95	5,01	4,93	1,61	1,18	3,80	2,72	1,31	4,56
	14	média	17,49	17,42	18,80	17,95	19,86	20,33	20,18	19,60	20,15
		S _d	0,48	0,17	0,89	0,10	1,01	0,57	1,84	0,25	0,11
		CV (%)	2,75	0,99	4,75	0,57	5,08	2,79	9,14	1,26	0,54
	28	média	16,42	16,40	18,78	17,74	19,63	18,46	19,59	18,92	19,87
		S _d	1,89	1,24	0,83	1,17	1,32	0,90	0,66	0,22	0,42
		CV (%)	11,49	7,58	4,42	6,59	6,71	4,86	3,39	1,16	2,11
	60	média	13,32	14,83	18,67	14,57	18,22	16,22	19,58	18,36	19,22
		S _d	0,34	0,34	1,07	0,06	1,54	0,19	0,46	0,44	0,89
		CV (%)	2,56	2,30	5,71	0,44	8,42	1,19	2,36	2,40	4,64

Sd – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; R – Resíduo de caulim; MC – Metacaulim convencional.

APÊNDICE R - Variação dimensional resultante da exposição a sulfatos (%).

Traço	Teor de substituição (%)		Tempo de imersão (dias)						
			7	14	21	28	35	42	
1:5,56	0		0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,03	
	10	R	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	
		MC	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	
	15	R	0,02	0,02	0,04	0,03	0,04	0,04	
		MC	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01	0,01	
	20	R	0,01	0,01	0,05	0,08	0,05	0,04	
		MC	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	
	1:6,67	0		0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04
		10	R	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,01
			MC	0,01	0,02	0,03	0,04	0,01	0,03
15		R	0,02	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	
		MC	0,01	0,05	0,04	0,06	0,04	0,06	
20		R	0,01	0,04	0,04	0,06	0,05	0,07	
		MC	0,01	0,04	0,03	0,02	0,09	0,08	
1:8,33		0		0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03
		10	R	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
			MC	0,03	0,02	0,01	0,03	0,06	0,05
	15	R	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	
		MC	0,01	0,06	0,07	0,09	0,09	0,09	
	20	R	0,02	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	
		MC	0,01	0,05	0,05	0,06	0,05	0,07	

MR – Resíduo de caulim; MC – metacaulim convencional.

APÊNDICE S - Variação de massa (seca) e absorção de água a cada 5 ciclos de exposição.

Propriedade avaliada	Traço	Ciclos	Teor de substituição (%)							
			0		10		15		20	
				R	MC	R	MC	R	MC	
Variação de massa (%)	1:5,56	5	1,84	2,26	2,39	2,52	2,31	2,95	4,03	
		10	1,87	2,09	3,27	2,49	3,55	2,82	4,03	
		15	1,80	2,33	3,51	3,00	3,98	2,86	4,20	
		20	1,73	2,28	2,63	2,46	3,08	2,93	3,33	
	1:6,67	5	3,24	3,46	2,92	3,88	2,98	3,84	3,43	
		10	2,80	3,21	3,94	4,28	3,83	4,59	4,23	
		15	3,22	3,46	3,93	3,62	4,23	3,78	4,47	
		20	3,07	3,39	3,46	3,77	3,48	3,88	3,79	
	1:8,33	5	3,24	3,40	2,84	3,50	2,91	4,12	5,51	
		10	2,95	3,46	3,63	3,46	3,55	3,29	3,80	
		15	3,16	3,29	3,90	3,53	3,92	4,58	4,09	
		20	3,04	3,30	3,28	3,34	3,27	3,82	3,56	
Absorção de água (%)	1:5,56	5	4,80	3,83	3,16	4,05	4,21	3,63	4,02	
		10	5,35	3,93	3,36	4,42	3,78	4,38	4,21	
		15	5,11	4,05	3,64	4,50	4,90	4,14	3,94	
		20	5,13	3,98	3,48	4,34	4,39	4,12	4,08	
	1:6,67	5	3,86	4,06	3,94	3,43	3,83	4,04	5,59	
		10	3,78	3,87	4,28	2,96	3,70	3,81	4,92	
		15	3,98	4,36	3,80	3,06	3,22	3,71	4,83	
		20	3,85	3,91	3,88	2,86	3,61	3,61	4,93	
	1:8,33	5	3,38	3,27	5,13	2,83	6,12	2,47	4,89	
		10	3,68	3,74	5,08	3,13	5,96	2,81	4,93	
		15	3,82	4,00	5,30	3,32	5,20	3,13	4,72	
		20	3,66	3,76	5,32	3,15	5,59	2,97	4,77	

R – Resíduo de caulim; MC – metacaulim convencional.