



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES POZOLÂNICAS DE  
UM RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA PARA  
EMPREGO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO  
SUPLEMENTAR**

**DÉBORA MAGALI HANSEN**

São Leopoldo, Março de 2016.





DÉBORA MAGALI HANSEN

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES POZOLÂNICAS DE UM  
RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA PARA EMPREGO  
COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof<sup>ª</sup>. Dra. Feliciane Andrade Brehm

**Co-Orientador:** Prof<sup>ª</sup>. Dra. Marlova Piva kulakowski

**Banca examinadora:** Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Águida Gomes de Abreu

São Leopoldo, Março de 2016.

H249a Hansen, Débora Magali.

Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar / Débora Magali Hansen. – 2016.  
141 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

“Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Feliciane Andrade Brehm.”

“Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlova Piva Kulakowski

1. Engenharia civil. 2. Resíduo de cerâmica vermelha.  
3. Atividade pozolânica. I. Brehm, Feliciane Andrade. II. Kulakowski, Marlova Piva. III. Título.

CDU 624.012

**DÉBORA MAGALI HANSEN**

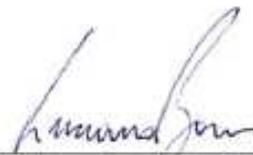
**“AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES POZOLÂNICAS DE UM  
RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA PARA EMPREGO  
COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 30 de março de 2016



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Feliciane Andrade Brehm  
Orientadora - UNISINOS

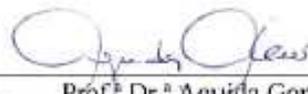


Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Paulo Gomes  
Coordenadora do PPGECC - UNISINOS

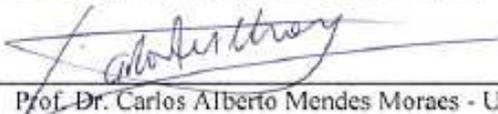


Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marlova Piva Kulakowski  
Coorientadora - UNISINOS

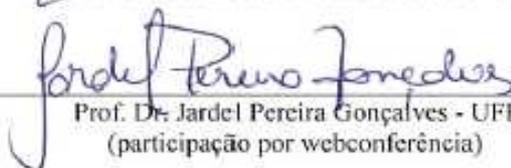
**BANCA EXAMINADORA**



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aguida Gomes de Abreu - UNISINOS



Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes - UNISINOS



Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves - UFBA  
(participação por webconferência)



*Dedico este trabalho ao meu marido  
Francor, minha mãe Maria Lourdes e  
ao meu pai José Remi Hansen  
Amo vocês!*



## AGRADECIMENTOS

À Deus pela força!

Ao órgão de fomento à pesquisa, CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A minha família de modo geral, as minhas dindas, Marli e Liane que sempre me incentivaram a estudar e buscar o conhecimento. A minha mãe e meu pai pelo apoio incondicional durante toda vida, e principalmente na vida acadêmica. Aos demais familiares pela compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu marido, que dividiu parte da sua vida comigo e com esse trabalho. AMOR sem seu apoio jamais teria conseguido.

Às pessoas que mesmo estando longe acompanharam os momentos deste trabalho, especialmente a minha Amiga Irmã Xenia, que mesmo da Alemanha, sempre esteve perto, prestando seu apoio.

O meu quarteto fiel e escudeiro: Lulu, Marco, Giba e Gui, por tantas vezes segurar o ônibus e por fazer as idas e vindas da Unisinos mais divertidas e por toda filosofia envolvida;

A todos que ajudaram a peneirar o resíduo cerâmico: Daiandra, Suellen, Kátia, Amanda, Luciano, Marco, Gilvani, Ivanor.

A empresa Sysnova Solution, em especial ao meu chefe Daniel Junges que sempre me incentivou nos estudos e que compreendeu os meus momentos de ausência. Às minhas colegas Paula e Isabel por todo apoio, e amizade.

À Construrohr que abriu as portas da empresa e disponibilizou seus dados produtivos para identificação do percentual de geração de resíduo cerâmico na realidade industrial, bem como colaborou com a amostragem e a doação do resíduo cerâmico objeto de estudo. Um Muito Obrigada ao Gerson, Tiago, Vilson e Leonardo que não mediram esforços para o êxito da amostragem e o fornecimento dos dados produtivos, e em especial ao Sr. Plínio, proprietário da empresa, que me recebeu e se mostrou disposto a ajudar desde o primeiro contato.

Aos colegas e amigos que fiz durante o mestrado pelo apoio e pela troca de experiência e conhecimento. Em especial Adriana, colega, amiga, irmã, confidente de longa data.

Ao pessoal do NUCMAT, pela energia boa.

Aos professores, Luciana Paulo Gomes, Carlos Alberto Mendes Moraes, Mauricio Mancio, Claudio de Souza Kazmierczak, Luis Alcides Schiavo Miranda, Marco Aurélio Stumpf González.

A minha querida orientadora Feliciane Andrade Brehm pela paciência, compreensão, inspiração, aprendizado proporcionado, pelo carinho, pela motivação, pelo ombro de mãe, irmã, amiga. Te admiro muito!!!

A minha coorientadora Marlova Piva Kulakowski, pela paciência e por todo conhecimento e experiências repassadas, suas contribuições foram valiosas, muito obrigada!!!!

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção – LMC, Maurício, Ingrid, Júlio César e David, que sempre me receberam com um sorriso no rosto, dividiram comigo suas experiências, por suas várias sugestões no intuito de facilitaram ao máximo a parte experimental deste trabalho.

Às gurias do Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMAT, Alini, Tamires e Débora por toda atenção e carinho.

Às gurias, Daiandra, minha bolsista amada, que apesar do trabalho ter sido pesado, duro, intenso, e exaustivo, sempre esteve com sorriso no rosto, sempre confiante. Não fomos apenas mestranda e bolsista, criamos um laço de amizade, e passamos a compartilhar experiências sobre tudo das nossas vidas. Afinal passamos muito mais tempo juntas, do que com nossas famílias. Suellen pelos inúmeros momentos que passou no laboratório peneirando RCV.

À Lucas Deivid Sebastiany precursor deste trabalho, pela colaboração sempre que solicitada.

À Graciele e Lisiane por todo apoio e pelo ombro amigo, principalmente em seus momentos finais.

À Rafael Sehnem, pela ajuda.

À todos, muito obrigada!

## **FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA**

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares  
(PROSUP)



**CONSTRUROHR**  
A base de confiança da sua obra.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>26</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	28
1.2	OBJETIVOS .....	29
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	29
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	29
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	29
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
2.1	CIMENTO PORTLAND.....	31
2.1.1	<i>Matérias-primas.....</i>	32
2.1.2	<i>Hidratação do cimento .....</i>	33
2.2	CERÂMICA VERMELHA .....	36
2.2.1	<i>Argila.....</i>	36
2.2.2	<i>Indústria da Cerâmica Vermelha.....</i>	38
2.2.3	<i>Processo Produtivo e Geração de Resíduos .....</i>	41
2.2.4	<i>Perdas no processo e geração do RCV.....</i>	43
2.3	MATERIAIS POZOLÂNICOS .....	46
2.3.1	<i>Reação pozolânica e potencial pozolânico.....</i>	49
2.3.2	<i>Potencial pozolânico das argilas calcinadas.....</i>	53
2.3.3	<i>Estudos envolvendo a utilização da argila calcinada e RCV como pozolana .....</i>	57
2.4	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	60
2.4.1	<i>Condutividade Elétrica .....</i>	63
2.4.2	<i>Índice de Atividade Pozolânica (IAP).....</i>	63
2.4.3	<i>Análises Térmicas.....</i>	64
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>68</b>
3.1	AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE RCV .....	70
3.1.1	<i>Amostragem do resíduo cerâmico.....</i>	72
3.2	BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO .....	75
3.2.1	<i>Piloto de Moagem.....</i>	75
3.3	MATERIAIS .....	78
3.3.1	<i>Aglomerantes .....</i>	78
3.3.2	<i>Material Pozolânico.....</i>	78
3.3.3	<i>Areia .....</i>	79
3.3.4	<i>Água.....</i>	80
3.3.5	<i>Aditivo.....</i>	80
3.4	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	80
3.4.1	<i>Caracterização química.....</i>	80
3.4.2	<i>Caracterização Física.....</i>	81
3.4.3	<i>Caracterização Mineralógica.....</i>	82
3.5	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	83
3.5.1	<i>Condutividade Elétrica .....</i>	83
3.5.2	<i>Resistência à Compressão e Índice de Atividade Pozolânica (IAP) .....</i>	83
3.5.3	<i>Análises Térmicas.....</i>	85
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>89</b>
4.1	GERAÇÃO DE RCV .....	89
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	91
4.2.1	<i>Caracterização Química.....</i>	91
4.2.2	<i>Caracterização Física.....</i>	94
4.2.3	<i>Caracterização Mineralógica.....</i>	98
4.3	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	100
4.3.1	<i>Condutividade Elétrica .....</i>	100
4.3.2	<i>Índice de atividade pozolânica (IAP) com o cimento Portland .....</i>	102
4.3.3	<i>Atividade pozolânica com a cal .....</i>	112

4.3.4	<i>Análises térmicas</i> .....	114
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>118</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>121</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>134</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Panorama do indústria brasileira do cimento.....	31
Tabela 2 - Produção anual de cimento Portland, segundo os tipos.....	32
Tabela 3 - Propriedades dos principais elementos constituintes das argilas.....	37
Tabela 4 - Panorama do setor cerâmico Brasileiro .....	38
Tabela 5 - Dados do Setor de Cerâmica Vermelha.....	39
Tabela 6 – Consumo mensal de argila das indústrias de cerâmicas vermelha no RS.....	41
Tabela 7 - Temperatura máxima de sinterização das cerâmicas vermelhas do RS.....	43
Tabela 8 - Percentuais de geração de resíduo cerâmico em relação ao tipo de forno utilizado.....	44
Tabela 9 – Diferentes percentuais de geração de RCV apresentados pela literatura.....	44
Tabela 10 - Percentual de perdas na fabricação de cerâmica vermelha no RS.....	44
Tabela 11 - Classificação das pozolanas.....	48
Tabela 12 – Comparativo entre os requisitos físicos das pozolanas conforme NBR 12653:2012 e NBR 12653:2014 .....	48
Tabela 13 - Requisitos químicos das pozolanas (valores em porcentagem (%)).....	49
Tabela 14 – Melhores resultados alcançados por autores que substituíram resíduo cerâmico por cimento .....	60
Tabela 15 - Métodos de avaliação da atividade pozolânica identificados na literatura.....	62
Tabela 16 – Quantidade de corpos-de-prova moldados para os ensaios de resistência à compressão.....	84
Tabela 17 – Dados produtivos e de geração de RCV da empresa objeto do estudo.....	89
Tabela 18 - Composição em óxidos, por FRX do metacaulim e do RCV.....	91
Tabela 19 – Atendimento aos requisitos químicos da NBR 12653:2014 .....	93
Tabela 20 - Resultados de área superficial específica do metacaulim e do RCV.....	94
Tabela 21 - Resultados de massa específica do metacaulim e RCV.....	95
Tabela 22 – Resultados da granulometria a laser do metacaulim e do RCV.....	96
Tabela 23 - Resultados do ensaio de finura .....	97
Tabela 24 - Resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 7, 28, 63 e 91 dias pela NBR 5752:2014 .....	103
Tabela 25A - Composição em óxidos, por FRX do cimento CP II-F-32 e da argila.....	130
Tabela 26A - Fluorescência de Raios X qualitativa.....	130
Tabela 27A – Resultados de PF dos aglomerantes .....	130
Tabela 28A - Resultados de área superficial específica e massa específica dos materiais....	130
Tabela 29A – Resultados de granulometria a laser dos aglomerantes.....	130
Tabela 30A – Resultados de granulometria a laser do RCV submetido a diferentes tempos de moagem no moinho de bolas. ....	131
Tabela 31B - ANOVA dos resultados de condutividade elétrica .....	132
Tabela 32B - ANOVA dos resultados de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 7 dias em relação a composição de meta_20% e RCV_20%.....	132
Tabela 33B - ANOVA dos resultados de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 7 dias em relação a composição de meta_25% e RCV_25%.....	132
Tabela 34B - ANOVA dos resultados de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 7 dias em relação a composição de meta_35% e RCV_35%.....	132
Tabela 35B – ANOVA dos resultados do ensaio de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 63 dias em relação a composição de meta_35% e RCV_35% .....	132
Tabela 36B - ANOVA dos resultados do ensaio conforme NBR 15894:2010 aos 7 dias.....	132
Tabela 37B –ANOVA resultados do ensaio conforme NBR 15894:2010 aos 7 dias comparação entre as amostras 15%_meta e 15%_RCV .....	133

Tabela 38B - ANOVA dos resultados do ensaio conforme NBR 5751:2015 para argamassas de $\text{Ca(OH)}_2$ co metacaulim comparativo dos 7 para os 28 dias. ....	133
Tabela 39B - Tabela 41 - ANOVA dos resultados do ensaio conforme NBR 5751:2015 para argamassas de $\text{Ca(OH)}_2$ com RCV comparativo dos 7 para os 28 dias. ....	133

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma básico dos compostos envolvidos na produção do cimento.....	33
Figura 2 - Esquema do processo de hidratação do Cimento Portland .....	35
Figura 3 –Panorama de áreas outorgadas pelo DNPM para a mineração da argila no Brasil .	40
Figura 4 - Fluxograma do processo produtivo convencional de blocos cerâmicos. ....	41
Figura 5 - Fluxograma da classificação das pozolanas .....	47
Figura 6 – Representação de uma pasta de cimento Portland bem hidratada “1”, e uma pasta de cimento Portland pozolânica bem hidratada “2”.....	51
Figura 7 - Difratoograma do metacaulim.....	54
Figura 8 – Difratoograma de uma amostra de metacaulim.....	55
Figura 9 - Difratoograma da argila calcinada a 700°C .....	55
Figura 10 - Difratoograma de argila calcinada a 900°C .....	56
Figura 11 - Difratoograma de argila calcinada a 1000°C .....	56
Figura 12 – IAP das argilas caulínicas calcinadas em diferentes gradientes de temperatura	58
Figura 13 - Curvas de TG e DTG de pastas e argamassas hidratadas a 28 dias com base em massa inicial da amostra .....	65
Figura 14 - Curvas TG/ DTG de pastas de cimento aos 28 dias.....	66
Figura 15 – Percentuais de perda de massa relativo a decomposição do hidróxido de cálcio das pastas de cimento aos 7 e 28 dias.....	67
Figura 16 - Principais etapas desenvolvidas no estudo.....	69
Figura 17 – Registro do Painel de controle de temperatura do forno na Cerâmica 2 .....	71
Figura 18 – Exemplo de alguns produtos produzidos pela empresa avaliada. ....	71
Figura 19 - Peças avariadas após processo de sinterização .....	72
Figura 20 - Fluxograma detalhando o processo de amostragem do RCV na empresa objeto de estudo .....	74
Figura 21 - Moinho de rolos .....	75
Figura 22 - Moinho de bolas .....	76
Figura 23 – Tamanho de partícula do RCV nas 3 etapas de beneficiamento do projeto piloto de moagem .....	77
Figura 24 - Peneiramento manual do RCV com auxílio de um pincel .....	77
Figura 25 – Etapas de beneficiamento do RCV .....	78
Figura 26 - Comparação entre areia do IPT e areia convencional utilizada no estudo.....	80
Figura 27 – Comparativo entre a Produção e geração de RCV nas cerâmicas 1 e 2 .....	90
Figura 28 – Distribuição granulométrica dos materiais .....	97
Figura 29 - Resultados da Difração de Raios X.....	98
Figura 30 – Resultado do ensaio de condutividade elétrica.....	101
Figura 31 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 7 dias .....	105
Figura 32 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 28 dias .....	106
Figura 33 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 63 dias .....	109
Figura 34 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 91 dias .....	110
Figura 35 - Comparativo da evolução do IAP nas diferentes idades para os diferentes teores de substituição.....	111
Figura 36 - Resistência à compressão ensaiado de acordo com a NBR 15894:2010 aos 7 dias .....	111
Figura 37 - Índice de atividade pozolânica aos 7 dias .....	112
Figura 38 - Resistência a compressão de argamassas de Ca(OH) <sub>2</sub> - P.A. aos 7 e 28 dias .....	113
Figura 39 - Resistência à compressão de argamassas usando aglomerante CH I aos 7, 28, 63 e 91 dias .....	113

Figura 40 - TG/DTG pasta de cimento referência.....	114
Figura 41 - TG/DTG pasta de cimento com 25% de substituição por RCV .....	115
Figura 42 - TG/DTG pasta de cimento com 25% de substituição por metacaulim.....	116
Figura 43 - Perda de massa relativo a decomposição do $\text{Ca(OH)}_2$ nas pastas aos 28 dias. ....	116
Figura 44A - Distribuição granulométrica do RCV submetido a diferentes períodos de moagem .....	131
Figura 45C - Análise térmica do cimento anidro .....	134

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

BET – Brunauer, Emmett e Teller

Cal/g – Calorias por grama

CP – Cimento Portland

CP II-F-32 – Cimento Portland composto com fíler calcário, no teor de 6 a 10%

CH – Hidróxido de cálcio (química do cimento)

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX – Difração de Raios X

DTA – Análise térmica diferencial

DTG – Termogravimetria derivada

EELA - EFICIENCIA ENERGÉTICA EM LADRILLERAS ARTESANALES

FRX – Fluorescência de Raios X

g – gramas

GEE – Gases de efeito estufa

GWH – Giga Watt Hora

IAP – Índice de atividade pozolânica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológicas

LCVMAT - Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais

LMC – Laboratório de Materiais de Construção

MCAR – Metacaulim de alta reatividade

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NCDTA - Análise térmica diferencial não convencional

NM – Norma Mercosul

PF – Perda ao Fogo

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCV – Resíduo de Cerâmica Vermelha

RS – Rio Grande do Sul

SINDICER/RS - Sindicato das Indústrias de Olaria e de Cerâmica para Construção no Estado do Rio Grande do Sul

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

TG – Termogravimetria

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

## RESUMO

HANSEN, D.M. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar.** São Leopoldo, 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2016.

A destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos industriais é uma problemática que veio ganhando maior importância ao longo dos anos. O setor da construção civil consome grandes quantidades de insumos, gerando paralelamente grandes quantidades de resíduos. Quando o assunto é reciclagem de resíduos industriais, o setor da construção civil exerce um papel importante, reciclando resíduos de diversos setores da economia. Tendo em vista a existência do polo cerâmico no Rio Grande do Sul, e totalidade de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) resultante desse polo, buscou-se através deste estudo, verificar qual é o percentual de geração de RCV em uma empresa específica, devido a grande variabilidade dos dados apresentados pela literatura. E em paralelo buscou-se avaliar o potencial pozolânico do RCV e comparar o seu desempenho com o metacaulim, material já consagrado como pozolana. Os aglomerantes (cimento CP II-F-32,  $\text{Ca(OH)}_2$  – P.A., CH-I) e os materiais pozolânicos (RCV e metacaulim) empregados na pesquisa foram caracterizados quimicamente por ensaios de fluorescência de raios X (FRX) e Perda ao Fogo (PF), mineralogicamente por ensaios de difração de raios X (DRX) e fisicamente por ensaios de granulometria a laser, massa específica e área superficial específica (BET). Além disso, o RCV e o metacaulim foram submetidos a ensaios para determinação do teor de umidade e finura. Para avaliar a atividade pozolânica do RCV e comparar seu desempenho ao metacaulim foram realizados ensaios de condutividade elétrica, termogravimetria e ensaios de resistência à compressão, orientados pelas NBR 5752:2014, NBR 5751:2015 e NBR 15894:2010. Mediante os resultados obtidos, verificou-se que o percentual de geração de RCV na empresa objeto de estudo, com os ensaios de caracterização foi possível verificar que o RCV atende aos requisitos químicos estabelecidos pela NBR 12653:2014. O procedimento de moagem conferiu ao RCV uma granulometria adequada para uso como pozolona. Quanto a atividade pozolânica, verificou-se que o RCV atendeu ao requisito da NBR 12653:2014, no que diz respeito à resistência com o aglomerante  $\text{Ca(OH)}_2$  P.A., já quando ensaiado com o aglomerante CH-I, o RCV apresentou resistência à compressão consideravelmente superior ao metacaulim. Já nas argamassas moldadas com cimento, o RCV não atingiu o índice de atividade pozolânica (IAP) exigido na NBR 12653:2014, impedindo sua classificação como material pozolânico. Nas argamassas ensaiadas sob as prescrições da NBR 15894:2010, contendo 15% de substituição do cimento pelo RCV, os resultados de resistência à compressão não apresentaram diferenças significativas em relação às argamassas referência, apontando indícios de melhor desempenho em menores teores de substituição. As análises térmicas evidenciaram o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas. As pastas formuladas com 25% de substituição do cimento por metacaulim apresentaram maior consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  em relação as pastas formuladas com 25% de RCV, evidenciando a atividade pozolânica dos materiais.

Palavras-chave: resíduo de cerâmica vermelha (RCV); pozolana; atividade pozolânica.



## ABSTRACT

HANSEN, D.M.. **Evaluation of the pozzolanic properties of a red ceramic waste for use as supplementary cementitious materials.** São Leopoldo, 2016. 141 f. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo. 2016.

The final destination environmentally suitable for industrial solid waste is a problem that came gaining more importance over the years. The construction industry consumes large amounts of supplies, generating parallel large quantities of waste. When it comes to recycling of industrial waste, the construction sector plays an important role, recycling waste from various sectors of the economy. Considering the existence of the ceramic polo at the Rio Grande do Sul, and all red ceramic waste (RCV) resulting from this pole, we sought through this study, find what is the percentage of RCV generation in a specific company due the great variability of the data presented in the literature. And in parallel we sought to evaluate the potential of pozzolan RCV and compare their performance with metakaolin, material already recognized as pozzolan. The binder (cement CP II-F-32,  $\text{Ca(OH)}_2$  – P.A., CH-I) and pozzolanic materials (RCV and metakaolin) employed in the study were chemically characterized by X-ray fluorescence assays (XRF) and Loss Fire (PF), mineralogically by testing X-ray diffraction (XRD) and physically by tests of laser granulometry, specific gravity and specific surface area (BET). Furthermore, the RCV and metakaolin were subjected to tests for determination of humidity content and fineness. To evaluate the pozzolanic activity of the RCV and compare its performance to metakaolin were performed electrical conductivity tests, thermogravimetry and compressive strength tests, guided by the NBR 5752:2014, NBR 5751:2015 and NBR 15894:2010. From the results obtained, found to the percentage of RCV generation in study subject company with the characterization tests it was verified that the RCV meets chemical requirements of the NBR 12653:2014. The grinding procedure gave the RCV adequate particle size for use as pozzolana. As the pozzolanic activity, it was found that the RCV met requirement the NBR 12653:2014 with regard to resistance to  $\text{Ca(OH)}_2$  P.A. agglomerating, since when tested with CH-I agglomerating, the RCV showed compression resistance the considerably higher than metakaolin. Already in the cast with cement mortar, the RCV has not reached the pozzolanic activity index (IAP) required in NBR 12653:2014 preventing classification as pozzolanic material. In mortars tested under the requirements of NBR 15894:2010, containing 15% replacement of cement by RCV, the compressive strength results showed no significant differences from the reference mortar, indicating better performance indications in lower replacement levels. The thermal analysis showed the consumption of  $\text{Ca(OH)}_2$  pastes. The pastes formulated with 25% of the cement replaced by metakaolin showed increased consumption of  $\text{Ca(OH)}_2$  relative pastes formulated with 25% RCV, showing the pozzolanic activity of the materials.

Keywords: red ceramic waste; pozzolan; pozzolanic activity.



## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao exponencial crescimento populacional, o aumento da renda da população e a mudança de um padrão de consumo tradicional para um padrão de alto consumo, o mercado impulsiona o crescimento de todos os setores da economia. Com o aumento do consumo, todos os setores produtivos necessitam ampliar seus negócios e suas cargas produtivas. Aliada a essa alteração no padrão de consumo estão vinculadas duas grandes problemáticas. A primeira delas é a desenfreada exploração dos recursos naturais, que traz consigo a escassez de determinadas matérias-primas na atualidade, e provável exaustão das mesmas no futuro. A segunda questão que acompanha o atual padrão de consumo é a geração de resíduos, que cada vez se torna mais frequente, apresentando maior quantidade e diversidade.

Diante do atual cenário ambiental, Pinto et al. (2014) afirmam que uma das grandes preocupações da atualidade é o destino das grandes quantidades de resíduos gerados, principalmente dos resíduos industriais.

A destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos veio ganhando maior importância ao longo dos anos, e em 2010 passou a ser norteada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS preconiza que a disposição final em aterros deve ser a última opção de destino final de um resíduo, quando nenhuma das outras soluções propostas na lei como a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético sejam viáveis (BRASIL, 2010).

O comprometimento estético da paisagem, ocupação de espaço, custo do recolhimento-processamento e a degradação dos recursos naturais têm sido apontadas como as principais problemáticas relacionadas com a disposição de resíduos (MEDEIROS et al., 2010).

Pesquisas têm sido desenvolvidas e intensificadas em relação à reciclagem e incorporação de resíduos em novos produtos ou componentes, cujo principal objetivo é encontrar alternativas para minimizar os problemas ambientais e econômicos causados pela disposição inadequada dos mesmos. Medeiros et al. (2010) salientam ainda, que um aspecto importante a ser considerado com a possibilidade de desenvolver novos produtos a partir da incorporação de resíduos, é a possibilidade de na maioria dos casos, ser possível diminuir o custo final do produto.

Estudos sugerem como alternativa a incorporação de resíduos em variados segmentos da indústria, principalmente no setor da construção civil. Sabe-se que o setor da construção civil é impactante ao meio ambiente, tanto na questão do consumo dos recursos naturais e geração de resíduos, quanto nas emissões dos gases de efeito estufa, principalmente no caso das indústrias de produção de cimento.

O setor da construção consome de 12 a 15 % do total de energia industrial consumida mundialmente (ALI et al., 2011). Essa indústria é uma das principais colaboradoras para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente de CO<sub>2</sub>, oriundas da calcinação de matérias primas para a produção de cimento e da queima de combustíveis, em sua maioria de origem fóssil. A indústria do cimento contribui com cerca de 7% do total de emissões de CO<sub>2</sub> em todo o mundo (ALI et al., 2011; KUA; KAMATH, 2014).

Ao fazer uso de materiais suplementares, principalmente coprodutos, na produção de materiais cimentícios, é possível reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, reduzir o consumo de energia associados à produção do cimento e ainda contribuir para a redução do impacto ambiental relacionado com a destinação final do resíduo. O uso destes materiais pode proporcionar ganhos no desempenho dos novos produtos, tanto no estado fresco como no estado endurecido, e ainda pode proporcionar ganhos em relação às propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais (GONÇALVES, 2005; 2007).

O setor cerâmico gera resíduos em quantidades que variam de acordo com os métodos de produção utilizados (SALES; ALFERES FILHO, 2014). Os resíduos cerâmicos apresentam diferentes potenciais de reciclagem, desde sua utilização como agregados para concretos, argamassas ou artefatos de cimento, onde participam como inertes ou fíler, com alguma atividade pozolânica. Podem também ser utilizados como material para sub-base ou base para pavimentações, e ainda podem ser reaproveitados no próprio processo de produção da indústria cerâmica. Conhecer a composição química, física, mineralógica e estrutural do resíduo é essencial para verificar a aplicabilidade do mesmo (DIAS, 2004).

Vários pesquisadores têm estudado o uso de resíduos cerâmicos como adições minerais em matrizes cimentícias (CORDEIRO; DÉsir, 2010; DÉsir et al., 2005; GONÇALVES, 2007; PAYÁ, 2014; PEREIRA-DE-OLIVEIRA; CASTRO-GOMES; SANTOS, 2012; SALES; ALFERES FILHO, 2014; SEBASTIANY, 2014; SILVA; BRITO; VEIGA, 2010; TIRONI et al., 2013; TRINDADE, 2011). Esse tipo de adição proporciona uma destinação final ambientalmente adequada ao resíduo de acordo com a PNRS.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A região do Vale do Caí/RS é um grande polo produtor de cerâmica vermelha no estado do Rio Grande do Sul, destacando-se a cidade de Bom Princípio. Junto com esse volume produzido, as empresas em sua maioria com baixo controle tecnológico e produtivo geram resíduos de cerâmica vermelha (RVC), em quantidades muitas vezes não contabilizadas (SINDICER/RS, 2008).

Em tempos onde a racionalização de recursos naturais, e a destinação final ambientalmente correta dos resíduos estão sendo vistas como primordiais para a preservação dos recursos naturais e sobrevivência dos sistemas produtivos, surge a necessidade de buscar uma solução ambientalmente correta e financeiramente atrativa para o resíduo cerâmico.

A literatura apresenta diferentes alternativas sobre a reciclagem do resíduo cerâmico, surgem diferentes pesquisas, entre as quais se destacam a incorporação na própria indústria cerâmica ou na indústria do concreto. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) fazer uso de material como agregado em concretos, ou na construção de bases de estradas é um uso de baixo valor e pouco nobre, e que não aproveita o potencial pozolânico e cimentício dos materiais. Com controle de qualidade adequado, grandes quantidades de muitos coprodutos industriais podem ser incorporadas aos concretos e argamassas em forma de cimento Portland composto ou adição mineral, agregando maior valor ao resíduo.

O concreto apresenta-se como uma alternativa para incorporar os resíduos da indústria cerâmica com benefícios ambientais, e o uso do resíduo cerâmico como pozolana pode melhorar a durabilidade de concretos (GONÇALVES, 2007). Tendo como resultado alterações tanto na composição química do sistema do cimento hidratado, bem como alterações na microestrutura da pasta, fato que contribui para uma significativa redução da permeabilidade do concreto (BARGER et al., 2001).

Em estudo recente Garcia et al. (2014) constataram que o resíduo de cerâmica vermelha poderá constituir uma nova fonte de material pozolânico para a indústria do cimento, que apresenta demanda emergente por adições minerais que agreguem além de benefícios técnicos nos seus produtos, maior sustentabilidade à cadeia produtiva.

Em estudos realizados por Sebastiany (2014), utilizando blocos cerâmicos sinterizados em laboratório, sob condições controladas, comprovou-se o efeito pozolânico da argila calcinada, em argamassas. No intuito de dar continuidade na pesquisa realizada pelo autor, o objetivo proposto neste estudo é avaliar as propriedades pozolânicas de um resíduo de

cerâmica vermelha (RCV) gerado no processo de sinterização e controle de qualidade de uma indústria cerâmica vermelha, com a finalidade de empregá-lo como um material cimentício suplementar. Tendo em vista todos os contratempos de um sistema produtivo, onde nem sempre é possível manter um patamar de temperatura estável e uniforme e a variabilidade da matéria-prima. Desta forma pretende-se verificar o comportamento do RCV em comparação às argilas calcinadas em laboratório, no intuito de confirmar o potencial pozolânico do material, com a finalidade de classificá-los como um coproduto.

## **1.2 OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho são distribuídos em Objetivo Geral e Objetivos Específicos conforme apresentados a seguir:

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar as propriedades pozolânicas de um RCV para emprego como material cimentício suplementar.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Conhecer a geração do RCV de uma indústria cerâmica;
- b) Caracterizar física-química-mineralogicamente o RCV;
- c) Investigar a influência do teor de substituição do cimento pelo RCV e comparar seu desempenho ao do metacaulim (pozolana comercial).

## **1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA**

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo:

Capítulo 1: apresenta uma introdução ao tema, a justificativa e a importância da pesquisa, bem como os seus objetivos.

Capítulo 2: compreende uma revisão da literatura que visa contextualizar a respeito do cimento Portland, da argila, da indústria cerâmica vermelha, com enfoque no principal resíduo gerado, o resíduo cerâmico. Abordando a temática dos materiais pozolânicos, suas reações e métodos de avaliação da atividade pozolânica. Buscou-se também trazer estudos que avaliam a aplicabilidade do RCV em diferentes materiais, focando principalmente na indústria do concreto.

Capítulo 3: apresenta a metodologia aplicada à pesquisa, bem como as etapas desenvolvidas para alcançar os objetivos propostos.

Capítulo 4: consiste na apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos no programa experimental.

Capítulo 5: apresenta as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros, em função dos resultados obtidos.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo contextualizar a respeito do cimento Portland, da argila, da indústria cerâmica vermelha com enfoque no principal resíduo gerado, o RCV, abordando a temática dos materiais pozolânicos, suas reações e métodos de avaliação da atividade pozolânica. Foram apresentados também, estudos que avaliaram a aplicabilidade do RCV na indústria do concreto.

### 2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é o componente básico para argamassas e concretos (SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DO CIMENTO - SNIC, [2014]). Devido as suas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água. O elevado nível de consumo está associado às propriedades que lhe são peculiares. Trabalhabilidade e moldabilidade no estado fresco e alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo no estado endurecido (ABCP, [2009]).

O último relatório anual disponível da indústria do cimento é referente ao ano de 2013. Em 2013, o Brasil aparecia como 6º maior produtor de cimento do mundo, ocupando a 13ª posição no *ranking* dos maiores importadores de cimento, e era o 4º maior consumidor de cimento em escala mundial (SNIC, [2014]).

Através da Tabela 1, que apresenta o panorama de crescimento da indústria brasileira do cimento do período entre o ano de 2009 e 2013, é possível observar o crescimento exponencial tanto na produção, quanto no consumo de cimento nos últimos anos, destaca-se o ano de 2010, que apresentou uma taxa de crescimento superior aos demais anos apresentados.

**Tabela 1 - Panorama do indústria brasileira do cimento.**

Ano	Produção nacional*	Consumo Estimado*	Consumo per capita (kg/hab/ano)	Importação*	Exportação*
2009	51.747	51.892	268	391	46
2010	59.117	60.008	307	853	36
2011	64.093	64.972	329	1.091	44
2012	68.809	69.324	348	977	26
2013	70.163	70.967	353	1.027	22

\*em 1.000 toneladas

Fonte: SNIC, [2014].

Já na Tabela 2 é possível observar o comparativo dos dados produtivos do cimento Portland por tipo de cimento, em uma relação entre os anos 2007 a 2013. É possível

observar que o cimento que teve maior taxa de produção ao longo do período foi o cimento Portland CP II – composto.

**Tabela 2 - Produção anual de cimento Portland, segundo os tipos.**

Ano	Tipo de Cimento (em 1.000 toneladas)					
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	BRANCO
2007	1.034	29.848	7.842	3.876	3.254	115
2008	346	33.080	8.879	5.714	3.577	86
2009	84	34.662	7.967	5.097	3.377	-
2010	88	38.474	8.345	6.686	4.211	-
2011	103	38.659	9.347	8.247	4.973	-
2012	98	39.743	10.000	9.612	5.580	-
2013	263	41.249	9.405	9.863	5.660	-

Fonte: SNIC ([2014], p.17)

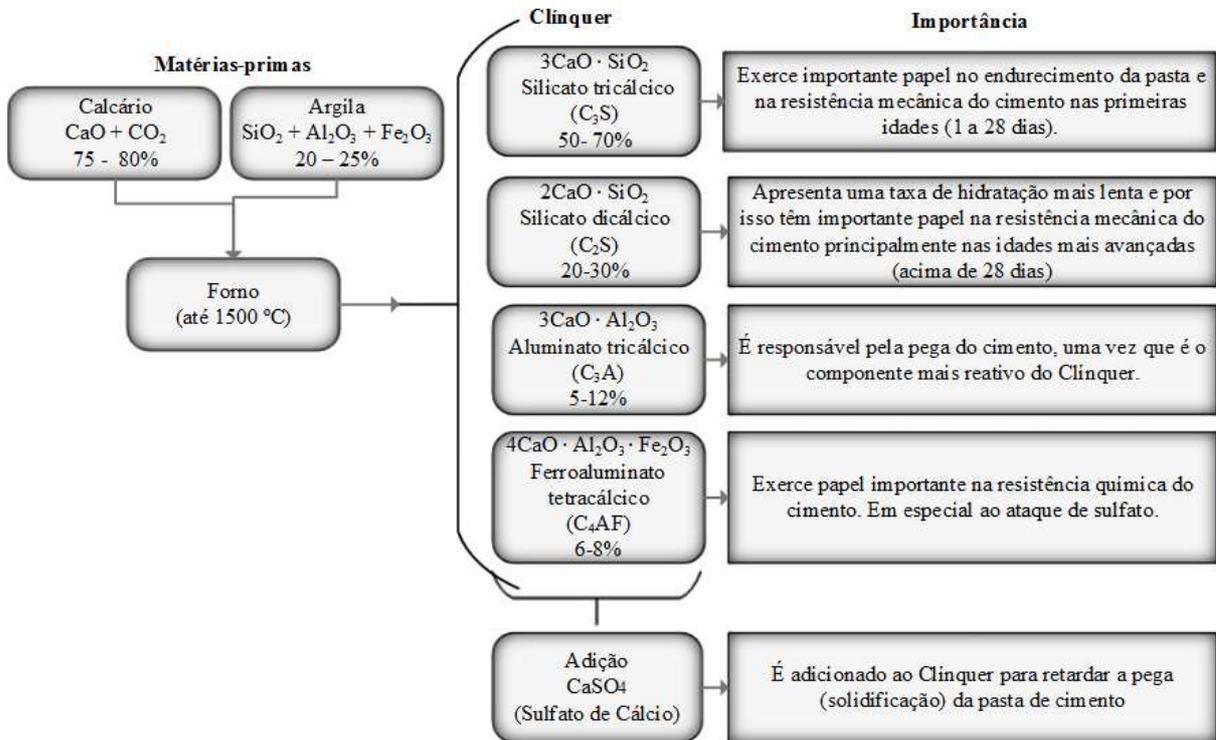
O cimento Portland composto gera calor em uma velocidade menor do que o cimento Portland comum. Portanto seu uso é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Cada um dos tipos de cimento Portland composto, CP II-Z (com adição de material pozolânico), CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno) e o CP II-F (com adição de material carbonático - fíler) possui características específicas e diferentes recomendações de aplicação (ABCP [2009]).

### 2.1.1 Matérias-primas

O clínquer é o principal componente do cimento e está presente em todos os tipos de cimento Portland (ABCP, 2002). O clínquer é resultado de um processo de calcinação a uma temperatura de até 1450°C de uma mistura adequada de calcário, argila e componentes corretivos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera de modo a garantir uma composição química específica, garantindo a formação dos compostos hidráulicos e atribuindo a propriedade ligante do cimento Portland (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010). Os mesmos autores afirmam que em média, para a produção de 1 tonelada de clínquer são empregados:

- 1.250 kg de calcário;
- 300 kg de argila;
- 14 kg de minério de ferro;
- 60 a 130 kg de combustível
- 110 a 130 kWh de energia elétrica

No fluxograma da Figura 1 é possível observar as matérias-primas, e os compostos formados a partir das reações que ocorrem no interior do forno, destacando a importância de cada composto nas propriedades do cimento Portland.



**Figura 1 - Fluxograma básico dos compostos envolvidos na produção do cimento**

Fonte: Elaborado pela autora, com base em Battagin (2011) e Metha e Monteiro (2008).

Para a produção de 1 tonelada de cimento são emitidos aproximadamente 800kg de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ . (ISAIA, 2011). No Brasil, graças a modernidade da indústria cimenteira esse número fica aproximadamente em 600kg por tonelada de cimento (DAL MOLIN, 2011). Em 2010, foram produzidas no mundo aproximadamente 3 bilhões de toneladas de cimento, representando um carga de 2,4 bilhões de toneladas de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , consumindo 330.000 GWh de energia (ISAIA, 2011).

### 2.1.2 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento Portland é um sistema complexo. Apesar de cada fase apresentar uma reação característica com a água, o teor relativo de cada composto presente no cimento Portland possui efeito sobre a evolução da hidratação como um todo (CINCOTTO, 2011).

Vários são os fatores que podem influenciar nas características dos compostos do cimento Portland e na hidratação, como: condições da produção do clínquer (dimensões dos

cristais, morfologia, textura, teor de substituintes, polimorfismo) condições do resfriamento e moagem (CINCOTTO, 2011).

Os compostos presentes no cimento Portland são anidros, mas quando entram em contato com a água, reagem com a mesma, formando produtos hidratados. Todavia, nem todos os compostos se hidratam na mesma velocidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Taylor (1997) explica o que ocorre com os principais compostos, no processo de hidratação do cimento:

$C_3S$  – a hidratação inicia dentro de poucas horas, ocorre a liberação de calor. Como produtos da hidratação têm-se o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

$C_2S$  – a reação com a água ocorre de maneira mais lenta quando comparado ao  $C_3S$ . Ocorre a formação de  $Ca(OH)_2$ , porém em menor quantidade em relação a hidratação do  $C_3S$ .

$C_3A$  – reage imediatamente com a água, cristaliza em poucos minutos. O  $Ca(OH)_2$  não é formado, porém se produz aluminato hidratado. Como resultado da reação de hidratação, ocorre a liberação de muito calor.

$C_4AF$  – a reação é de menor intensidade em relação a do  $C_3A$ , não ocorre a liberação de  $Ca(OH)_2$ , como resultado também é formado aluminato hidratado.

O aluminato de cálcio hidratado resultante da hidratação do  $C_3A$  e  $C_4AF$ , reage com o sulfato de cálcio, adicionado ao cimento para retardar a pega, formando sulfoaluminato.

O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) principal componente de uma pasta de cimento hidratada é formado a partir da hidratação dos silicatos e aluminatos (LAGUNA; IKEMATSU, 2009). O volume de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratada é composto de 50% a 60% por C-S-H, que é a fase mais importante e determinante em relação às propriedades da pasta de cimento (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

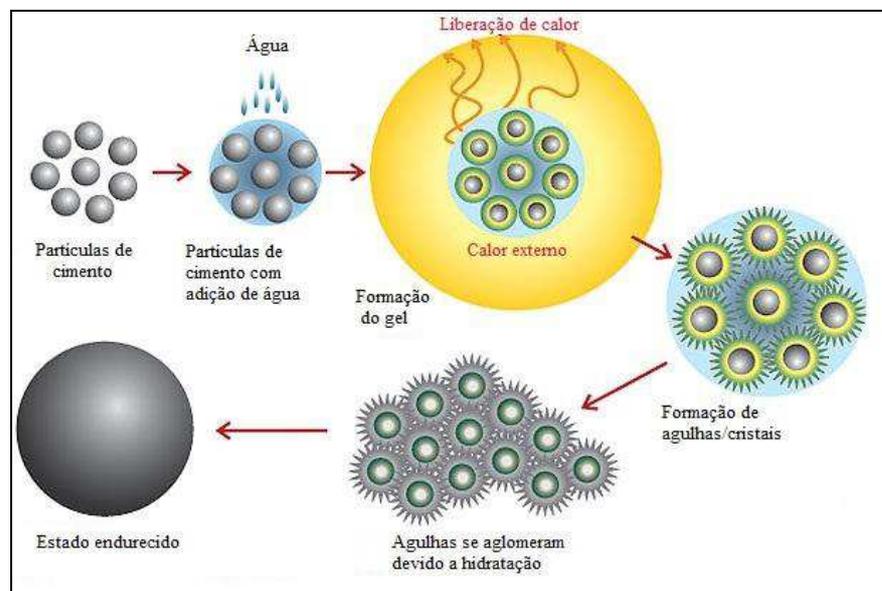
O hidróxido de cálcio (CH), também conhecido com portlandita é responsável por 20 a 25% do total de sólidos de uma pasta de cimento hidratada. Sua formação é afetada pela disponibilidade de espaço, pela temperatura de hidratação e pelas impurezas do sistema. Esses cristais contribuem pouco para a resistência, principalmente pelo fato da baixa área superficial (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

Os sulfoaluminatos de cálcio representam de 15% a 20% da pasta de cimento hidratada, possuindo um papel secundário na relação microestrutura-propriedades. Nas primeiras idades, a relação sulfato/alumina favorece a formação do trissulfato hidratado (etringita), que em idades mais avançadas pode transformar-se em monossulfoaluminato hidratado, deixando o sistema vulnerável ao ataque de sulfatos (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

Grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na pasta de cimento hidratada, devido a fatores como o tamanho das partículas do cimento anidro e do grau de hidratação da pasta. Além dos sólidos as pastas de cimento hidratadas apresentam vazios que influenciam de forma importante suas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A reatividade dos compostos de cimento Portland com a água no processo de hidratação sofre influência de fatores como a dimensão da partícula e a temperatura de hidratação, mas outro fator que influencia no potencial reativo do cimento é a estrutura cristalina dos compostos. Imperfeições na estrutura cristalina dos compostos podem desenvolver a instabilidade dos compostos em meio aquoso (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A Figura 2 apresenta de forma esquemática as fases de hidratação do cimento Portland.



**Figura 2 - Esquema do processo de hidratação do Cimento Portland**

Fonte: Laguna e Ikematsu (2009)

## 2.2 CERÂMICA VERMELHA

### 2.2.1 Argila

A argila é o insumo fundamental da indústria cerâmica, tem seu valor fundamentado enquanto matéria-prima na sua plasticidade, no seu teor de umidade, dureza ao secar e rigidez quando sinterizadas (SINDICER/RS, 2008).

“A argila é um material natural, terroso, de granulometria fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade; quimicamente, são as argilas formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio” (SANTOS, 1989, p. 1). São provenientes da decomposição de rochas sedimentares com altos teores de ferro, e é o ferro o responsável pela coloração avermelhada após a sinterização (KAZMIERCZAK, 2010).

As argilas são constituídas essencialmente por partículas cristalinas, muito pequenas, compostas de um número restrito de minerais conhecidos como argilominerais. Podem ser compostas por partículas de um argilomineral ou por uma mistura de vários argilominerais. Quimicamente os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo geralmente ainda na sua composição certo teor de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Além desses componentes as argilas podem conter outros materiais e minerais como a matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter ainda minerais amorfos (SANTOS, 1989).

Kazmierczak (2010) afirma que um fator importante a ser considerado é que alguns depósitos de argila possuem elevado teor de pureza, contendo um argilomineral predominante, e pequenas frações de outros argilominerais, além de impurezas. Entretanto, quando um depósito não atende as especificações necessárias para a produção de uma determinada cerâmica, é comum que ocorra a mistura de duas ou mais argilas, elaborando desta forma uma massa que possua características específicas e propícias para a produção da cerâmica vermelha.

A maioria dos materiais cerâmicos é tipicamente composto por sílica, alumina, magnésia ou cal, apresentando estrutura cristalina. Esses produtos são compostos à base de silicatos hidratados de alumínio, presentes nas argilas cauliníticas, haloisitas, pirofilitas e montmorilonitas. As cerâmicas convencionais são obtidas a partir dos argilominerais e areia (ISAIA, 2010).

Kazmierczak (2010) apresenta os principais elementos que constituem os argilominerais, estes podem ser observados na Tabela 3, onde é apresentada também de forma sucinta as principais propriedades que esses elementos conferem às argilas.

**Tabela 3 - Propriedades dos principais elementos constituintes das argilas.**

<b>Elemento</b>	<b>Principais Propriedades</b>
Alumina	Propicia estabilidade dimensional em temperaturas elevadas.
Carbonato e sulfato de cálcio e magnésio	Resultam em expansão volumétrica, agem como fundentes.
Matéria Orgânica	Resulta em retração, fissuras durante os processos de sazonalidade e sinterização e diferenças de coloração em um mesmo componente cerâmico.
Sílica livre	Diminui a retração durante os processos de sazonalidade e sinterização, reduz a plasticidade da argila.
Silicatos e fosfatos	São fundentes, alguns aumentam a resistência da cerâmica.
Sais solúveis	Propiciam o aparecimento de eflorescências nos componentes cerâmicos.

Fonte: Kazmierczak (2010, p.566)

De acordo com Kazmierczak (2010), os principais grupos de argilominerais são: a caulinita, a illita e as montmorilonitas. Destes, a caulinita é utilizada para a fabricação de materiais refratários, enquanto que a illita e montmorilonitas são mais apropriadas para a produção de cerâmicas vermelhas.

Fernandez, Martiren e Scrivener (2010) realizaram estudo comparativo entre os três principais grupos de argilominerais (a caulinita, a illita e a montmorilonita). Os autores concluem que a caulinita calcinada apresenta maior reatividade, seguidas da montmorilonita calcinada, enquanto que a illita calcinada apresentaram comportamento como um material inerte de enchimento. Em seu estudo, os autores afirmaram que a temperatura de calcinação não influenciou significativamente as propriedades pozolânicas dos minerais da argila calcinada, exceto para a montmorilonita, cuja distribuição do tamanho de partícula e a superfície específica foi fortemente afetadas pelo aumento da temperatura de calcinação.

Tironi et al. (2013) confirmam que entre os diferentes tipos de argilas, as argilas cauliniticas quando são ativadas termicamente, aparecem como pozolanas altamente reativas após adequado processo de moagem.

Sob outra óptica, Dal Molin (2011) afirma que normalmente as argilas cauliniticas utilizadas para a produção do metacaulim convencional possuem grande porcentagem de fases pozolanicamente inertes, como o quartzo e a muscovita. Já o metacaulim de alta reatividade (MCAR) é produzido a partir da calcinação de argilas extremamente finas, com elevados teores de caulinita e material não cristalino.

Quando as argilas cauliniticas e os caulins são submetidos a temperaturas que variam dos 600 °C a 900°C, os íons hidroxila são removidos da estrutura cristalina, ocorre a

destruição do arranjo atômico, resultando em um componente não cristalino e instável quimicamente, denominado de metacaulinita ( $Al_2Si_2O_7$ ), responsável pela atividade pozolânica do material. Porém, quando essa mesma caulinita é exposta a temperaturas acima dos  $900^\circ C$  são formados compostos cristalinos estáveis e com praticamente nenhuma atividade pozolânica (DAL MOLIN, 2011).

Diante do exposto, é possível prever uma tendência do melhor desempenho de adições pozolânicas oriundas de argilas caulínicas calcinadas, que dão origem ao produto comercial metacaulim, em relação ao RCV, que geralmente é oriundo da produção de artefatos cerâmicos que utilizam argilas do grupo illita e montmorilonitas.

### 2.2.2 Indústria da Cerâmica Vermelha

A cerâmica vermelha compreende os “materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno”(ABC, [2011a]).

O setor cerâmico possui um grande número de empreendimentos, distribuídos em vários estados do Brasil, e de maneira geral existe uma precariedade e deficiência em dados estatísticos e indicadores de desempenho consolidados do segmento. Esses dados seriam fundamentais para acompanhar o desenvolvimento do setor e monitorar a qualidade (CERÂMICA vermelha..., 2014).

Os dados mais recentes do setor cerâmico são dados do INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) de 2008 e são essas as informações utilizadas pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) para apontar as estatísticas. A ANICER (2014) indica que a Indústria da Cerâmica Vermelha representa 4,8% da Indústria da Construção Civil, e existem no Brasil, aproximadamente 6.903 empresas cerâmicas e olarias. O setor gera 293 mil empregos diretos, aproximadamente 900 mil empregos indiretos e apresenta um faturamento anual de 18 bilhões de reais (ANICER, 2014). A Tabela 4 apresenta o panorama Brasileiro do setor cerâmico, com base em dados de 2008.

**Tabela 4 - Panorama do setor cerâmico Brasileiro**

	Nº de Empresas Aproximado	% Aproximado por Área	Prod./Mês (Nº de Peças)	Consumo Ton/Mês (Matéria Prima: Argila)
Blocos/Tijolos	4346	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	36%	1.300.000.000	2.500.000

Fonte: ANICER, 2014

Ao observar a Tabela 4, é possível verificar que em 2008 a indústria de blocos e tijolos representava aproximadamente 63% da indústria cerâmica nacional, com um consumo de 7,8 milhões de toneladas de argila por mês.

O anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos do governo federal referentes ao ano de 2014 apresenta informações estimadas do setor de cerâmica vermelha tendo por base os dados da ANICER de 2008, uma vez que não existem informações atualizadas sobre o setor posteriores a 2008. Na Tabela 5 é possível observar os dados estimados quanto à produção, consumo per capita e faturamento entre os anos de 2009 a 2013. Conforme o anuário, os dados foram estimados conforme índice de crescimento do setor da construção civil (CERÂMICA VERMELHA...2014).

**Tabela 5 - Dados do Setor de Cerâmica Vermelha**

	2009	2010	2011	2012	2013
<b>Produção (10<sup>9</sup> peças)</b>	59,4	66,3	68,7	69,7	70,8
<b>Consumo per Capita (peças/habitante)</b>	315	348	357	359	354
<b>Faturamento – R\$ bilhões</b>	18	20	21	21	21

Fonte: CERÂMICA vermelha... (2014, p. 34)

Analisando a Tabela 5, é possível observar que de modo geral, houve um crescimento contínuo entre os anos de 2009 e 2013. Em relação à produção, esse aumento representou 16%. Houve um crescimento de 11% em relação ao consumo per capita, e um aumento aproximado de 14% no faturamento.

O setor de cerâmica vermelha é considerado um dos mais antigos da sociedade e em consequência disso, a produção em muitas empresas é feita através de processos artesanais, em geral, a maioria das empresas utiliza bases tecnológicas desenvolvidas a mais de 30 anos (SINDICER/RS, 2008).

O segmento cerâmico apresenta uma estrutura diversificada, onde prevalecem as microempresas familiares (olarias que em grande parte não estão incorporadas às bases oficiais estatísticas), com técnicas produtivas artesanais. Constituído por empreendimentos de pequeno e médio porte, com deficiências tecnológicas e de gestão e, empresas de médio e grande porte que adotam tecnologias modernas de produção (CERÂMICA vermelha..., 2014).

Os principais combustíveis utilizados pela indústria são a lenha nativa representando 50% do consumo, seguido dos resíduos de madeira como os cavacos, a serragem, os briquetes, entre outros resíduos representando 40%. A queima de biomassa,

resíduo do setor agroindustrial como a casca de arroz e bagaço de cana de açúcar, e o uso de madeira de reflorestamento vêm sendo uma estratégia adotada pelas empresas que buscam tornar seus processos mais sustentáveis (CERÂMICA vermelha..., 2014).

A localização das jazidas e dos centros consumidores são os principais fatores determinantes para a localização das fábricas (CERÂMICA vermelha..., 2014).

No que tange a extração de argila, a Figura 3 apresenta um mapa onde são exibidas todas as Concessões de Lavra e Licenciamento que autorizam a extração de argila no Brasil para todas as finalidades. De acordo com Heider (2014) no final de 2013, foram emitidos cerca de 3.650 títulos de lavra para a substância denominada de argila, independente de seu fim (cerâmica vermelha, branca, caulim, etc). É possível observar que os estados que se destacam são: Minas Gerais (MG), São Paulo (SP), Rio Grande do Sul (RS) e Goiás (GO) (50% do total no Brasil). Heider (2014) afirma que ao considerar os dados sobre o número aproximado de empresas no Brasil, pode-se estimar um expressivo percentual de fornecimento de argilas sem formalização.

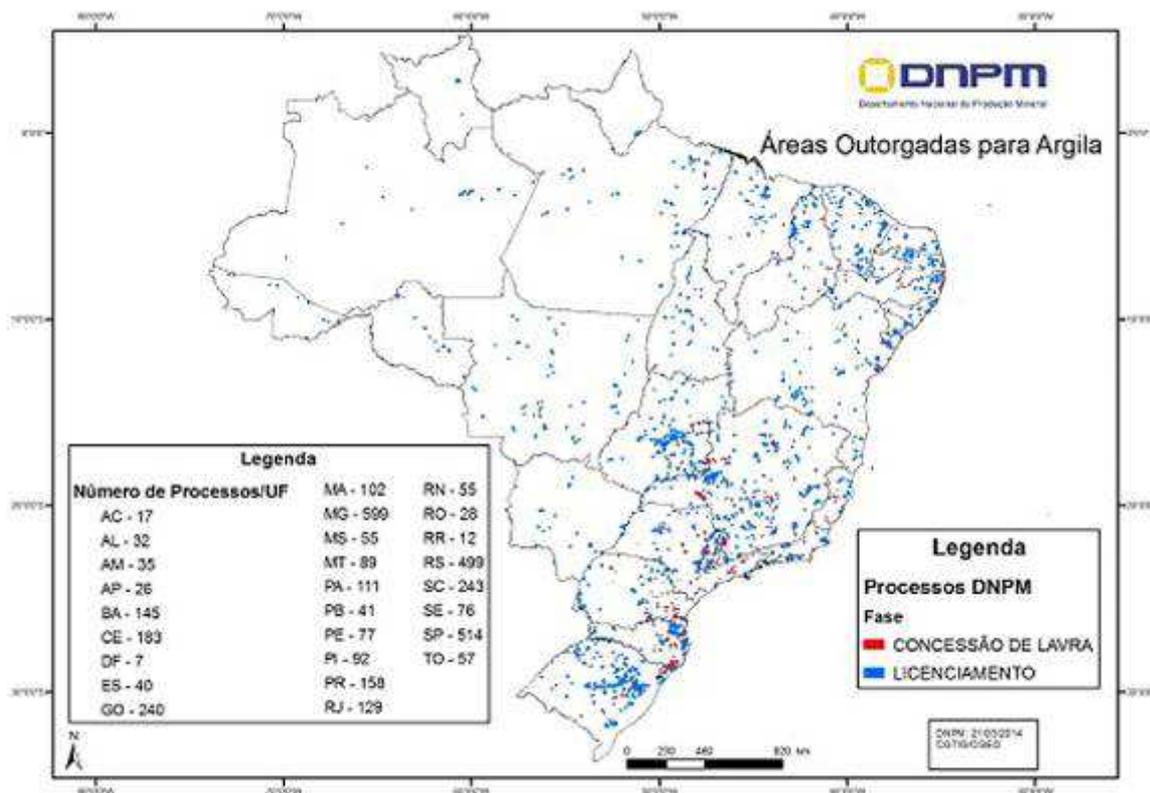


Figura 3 –Panorama de áreas outorgadas pelo DNPM para a mineração da argila no Brasil

Fonte: Heider (2014)

Quanto ao consumo de argila, o estudo do Sindicer/RS (2008) apontou que mais da metade das indústrias gaúchas pesquisadas, 77,7% utiliza menos de 500 toneladas de argila/ mês. A distribuição do consumo das demais empresas pesquisadas neste quesito pode ser verificada na Tabela 6.

**Tabela 6 – Consumo mensal de argila das indústrias de cerâmicas vermelha no RS.**

Consumo Mensal de Argila	Nº respostas	Percentual (%)
Abaixo de 500 toneladas	597	77,7
De 500 a 1.000 toneladas	121	15,8
De 1.000 a 1.500 toneladas	29	3,8
Acima de 1.500 toneladas	21	2,7
<b>Total*</b>	<b>768</b>	<b>100,0</b>

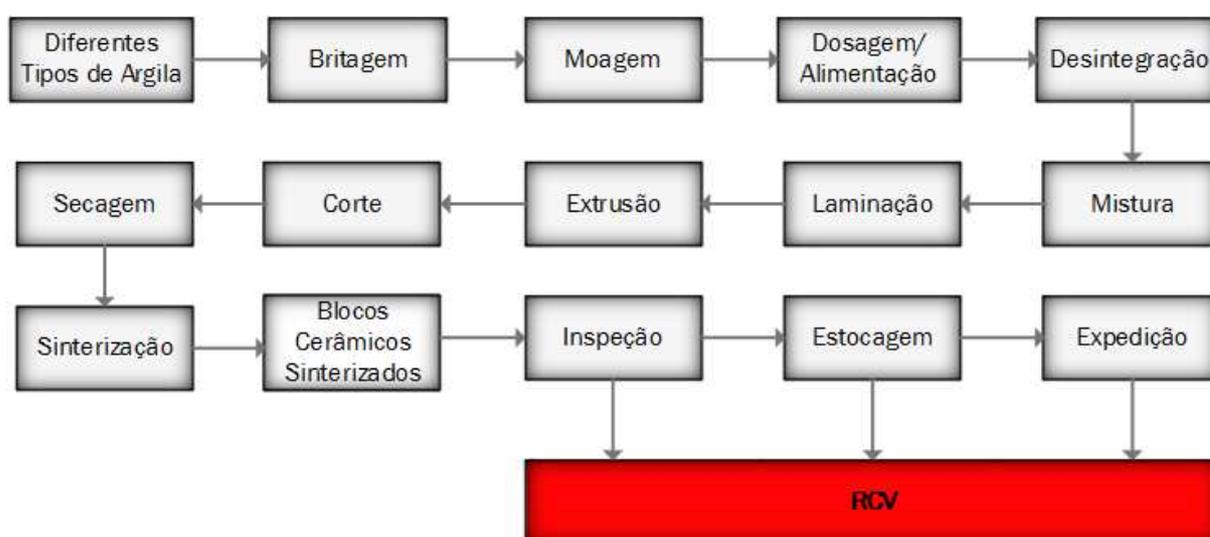
\* 27 empresa não responderam sobre este item no questionário

Fonte: Sindicer/RS (2008, p. 27)

### 2.2.3 Processo Produtivo e Geração de Resíduos

As cerâmicas são obtidas a partir de uma massa a base de argila, essa massa é submetida a um processo de secagem lenta com a finalidade de retirar grande parte da água presente no material, posteriormente é sinterizada em temperaturas elevadas (KAZMIERCZAK, 2010).

O processo produtivo do bloco cerâmico envolve várias etapas, que vão desde a extração e preparação da matéria-prima, até a obtenção do produto final. As principais etapas do processo produtivo são apresentadas na Figura 4. As etapas responsáveis pela geração do RCV são: a inspeção pós sinterização para fins de controle de qualidade, a estocagem e a expedição. Estas etapas estão destacadas na Figura 4.



**Figura 4 - Fluxograma do processo produtivo convencional de blocos cerâmicos.**

Fonte: Adaptado de ABC (2011b).

Além das características da argila, outros fatores são determinantes para as propriedades finais da cerâmica sinterizada. Entre esses fatores, pode-se destacar a velocidade em que ocorre o acréscimo de temperatura, a temperatura máxima atingida durante o processo de sinterização, o tempo de manutenção dessa temperatura máxima, a velocidade de resfriamento após a sinterização, que deve ser lenta (período que varia de 8 a 24 horas geralmente) e a uniformidade da temperatura no forno (KAZMIERCZAK, 2010).

A sinterização é a última etapa do processo, e deveria receber especial atenção no que diz respeito a triagem dos produtos para expedição, desta forma se evitaria o encaminhamento de produtos de baixa qualidade e com defeitos para o consumidor final. Apesar disso, o controle das perdas nessa etapa do processo ainda é muito baixo (SINDICER/RS, 2008).

O processo de sinterização é responsável pelas transformações que ocorrem na argila. O aquecimento da argila provoca alterações físico-químicas irreversíveis, que tem como resultado alterações nas suas propriedades. No aquecimento até 150° C, ocorre a evaporação da água livre, a partir dessa temperatura até cerca de 600°C, ocorre a perda de água adsorvida. A partir dessa temperatura, iniciam-se várias reações químicas, ocorrendo desidratação química e decomposição da matéria orgânica presente na argila. Após este processo, ocorre a oxidação e a partir de 800°C a 1100°C, ocorre a vitrificação da argila (KAZMIERCZAK, 2010).

A temperatura e o tempo de sinterização são de extrema importância para garantir a qualidade do produto final. A falta de cuidados nesses quesitos podem gerar produtos de baixa qualidade (SINDICER/RS, 2008).

Na pesquisa realizada pelo Sindicer/RS (2008), verificou-se que a maioria das empresas do Rio Grande do Sul estudadas (53,8%) utiliza a temperatura de sinterização na faixa entre 700°C e 800°C, seguido de 33,1% das empresas que sinterizam seus produtos na faixa entre 800°C a 900°C, e apenas 4,6 % das empresas realizam a sinterização de seus produtos na faixa entre 900°C e 1.000°C, esta última apontada pelo estudo do Sindicer/RS como a temperatura ideal. As demais empresas realizam a sinterização em gradientes de temperatura até os 700°C ou acima dos 1.000°C, como pode ser observado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Temperatura máxima de sinterização das cerâmicas vermelhas do RS**

<b>Temperatura máxima de sinterização</b>	<b>Nº de empresas</b>	<b>Percentual (%)</b>
Até 700°C	45	7,3
De 700°C a 800°C	330	53,8
De 800°C a 900°C	203	33,1
De 900°C a 1.000°C	28	4,6
Mais de 1.000°C	7	1,2
<b>Total*</b>	<b>613</b>	<b>100,0</b>

\* 182 empresa não responderam sobre este item no questionário

Fonte: Sindicer/RS (2008, p. 44)

O estudo do Sindicer/RS (2008) apontou também, que no Rio Grande do Sul, 85,2% das empresas entrevistadas não realizam nenhum tipo de controle sobre a quantidade de produtos produzidos.

### 2.2.4 Perdas no processo e geração do RCV

A literatura é muito divergente em relação ao percentual de geração do RCV das empresas (GONÇALVES, 2007), uma vez que os processos de medição de muitas empresas são falhos e muitas delas não possuem registro, operando de forma clandestina. Desta forma, não são englobadas nas estatísticas estaduais e federais que também são deficientes (SINDICER/RS, 2008).

Os dados acerca das quantidades de resíduos cerâmicos gerados são muito divergentes e vagos. Conforme dados encontrados na literatura, o percentual mínimo de geração do RCV foi de 0,5% (VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004) já o percentual máximo apresentado foi de 30% (DIAS, 2004), percentual este que foi alcançado para os fornos do tipo Caieiras (HENRIQUES et al., 1993 apud DIAS, 2004). Percentuais de 20 % são esperados para os fornos tipo caipira (intermitente de chama invertida) e, para os demais tipos de fornos, o percentual de geração de RCV pode chegar aproximadamente a 2% (EFICIENCIA ENERGÉTICA EM LADRILLERAS ARTESANALES (EELA), 2013).

Para as grandes quantidades de argila consumida, 1% de geração de RCV ainda representa um volume considerável de material a ser gerenciado, e medidas são necessárias tanto da questão da melhoria da eficiência do processo quanto no gerenciamento do montante de resíduos gerados. A Tabela 8 apresenta a correlação entre o tipo de forno utilizado com o percentual de geração de RCV atribuído.

**Tabela 8 - Percentuais de geração de resíduo cerâmico em relação ao tipo de forno utilizado**

Tipo de Forno	Caieiras	Caipira	Abóbada redondo	Câmaras	Hoffmann	Cedan	Túnel
Autor	Dias (2004)	ELLA (2013)					
% geração de RCV	30	10-20	~2	~2	~1	~1	<1
~ aproximadamente							

Fonte: ELLA, 2013

Ao consultar a bibliografia é possível verificar que existe uma ampla faixa de perdas no setor cerâmico em relação à geração do RCV, conforme pode ser observado na Tabela 9.

**Tabela 9 – Diferentes percentuais de geração de RCV apresentados pela literatura**

Autor	Geração de RCV de até (%)
Dias (2004)	30
Vieira, Souza e Monteiro (2004)	10
Viera (2005)	10
Saboya (2000) apud Désir et.al (2005)	10
Gonçalves (2005)	30
Senthamarai e Monaharan (2005)	30
Sindicer/RS (2008)	15
EELA (2013)	20
Sales e Alferes Filho (2014)	1,6
Garcia et al. (2014)	5

Fonte: Elaborado pelo autora.

Tratando-se da cerâmica vermelha, os resíduos geralmente são fragmentos de blocos, tijolos, telhas e lajotas, gerados pela quebra dessas peças, seja na etapa de sinterização, seja na etapa do transporte (SALES; ALFERES FILHO, 2014).

Conforme estudo realizado pelo Sindicer/RS (2008), com um total de 795 empresas, quando estas foram questionadas sobre as perdas ao longo do processo, 87% das empresas afirmaram ter perdas de até 5%, conforme pode ser observado na

Tabela 10.

**Tabela 10 - Percentual de perdas na fabricação de cerâmica vermelha no RS**

Percentual aproximado de perdas na fabricação de seus produtos	Nº de empresas	Percentual (%)
De 0 a 5%	657	87,0
De 5 a 10%	78	10,30
De 10 a 15%	18	2,4
Acima de 15%	2	0,3
Total*	755	100,0

\* 40 empresa não responderam sobre este item no questionário

Fonte: Sindicer/RS (2008, p. 17)

O percentual de perda acima de 15% pode ser considerado quase nulo, representando a realidade de apenas 2 empresas do total das 755 avaliadas. Porém o mesmo

estudo apontou que das 755 empresas que responderam ao questionário 81% não calculam ou avaliam as perdas na produção, apenas 19% das empresas se preocupam em controlá-las e destas, apenas 7% mantêm uma avaliação contínua (SINDICER/RS, 2008). Diante destas estatísticas, surge a dúvida em relação aos 87% das empresas que afirmam ter até 5% de perdas, uma vez que o controle é realizado por apenas 19 % destas.

Quanto à sinterização, que é a última etapa do processo produtivo, conforme o estudo do Sindicar/RS (2008), o controle sobre a geração de RCV oriundo dessa etapa do processo especificamente é muito baixo. O estudo apontou que 79,6% das empresas não possuem nenhum tipo de controle sobre essas perdas que ocorrem na etapa de sinterização, ou seja, não sabem a quantidade de RCV gerado em relação à sua produção.

O estudo apontou que 82,4% das empresas realizam o transporte interno de produtos de forma manual. Esse meio de transporte pode gerar batidas, quedas e choques, principalmente se o piso for de chão batido, como é o caso de 82,1% das empresas pesquisadas. Conforme o estudo, o melhor sistema de transporte é o automático ou motorizado, este praticamente elimina os defeitos da mão-de-obra sobre o produto (SINDICER/RS, 2008)

Os resíduos cerâmicos gerados no processo de fabricação são peças inteiras que, após a sinterização, não atendem as especificações necessárias para a comercialização, e/ou pedaços de peças (cacos) que são originados da quebra de peças na própria sinterização, ou devido a movimentações as quais são submetidas (DIAS, 2004).

Na maioria dos casos, esses resíduos são dispostos em locais como pátios das indústrias cerâmicas, propriedades pertencentes às indústrias ou áreas de extração de argila.

Segundo Berni, Bajay e Gorla (2010), o resíduo cerâmico pode ser assimilado pela natureza, sem causar impacto ambiental. Porém em estudo realizado posteriormente por Brehm et al. (2013) que realizaram a avaliação ambiental de artefatos cerâmicos, com ensaios de lixiviação e solubilização, obtiveram como resultado a solubilização de compostos de ferro e sulfato acima dos limites permitidos pela norma NBR 10004: 2004, e, desta forma, o RCV gerado a partir desse material também seria classificado como resíduo sólido Classe IIA – Não Inerte. A partir desta constatação, a disposição do RCV no solo como material inerte deve ser avaliada previamente, mesmo que os solos apresentem altos valores de ferro, trata-se da disposição de um resíduo industrial.

### 2.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS

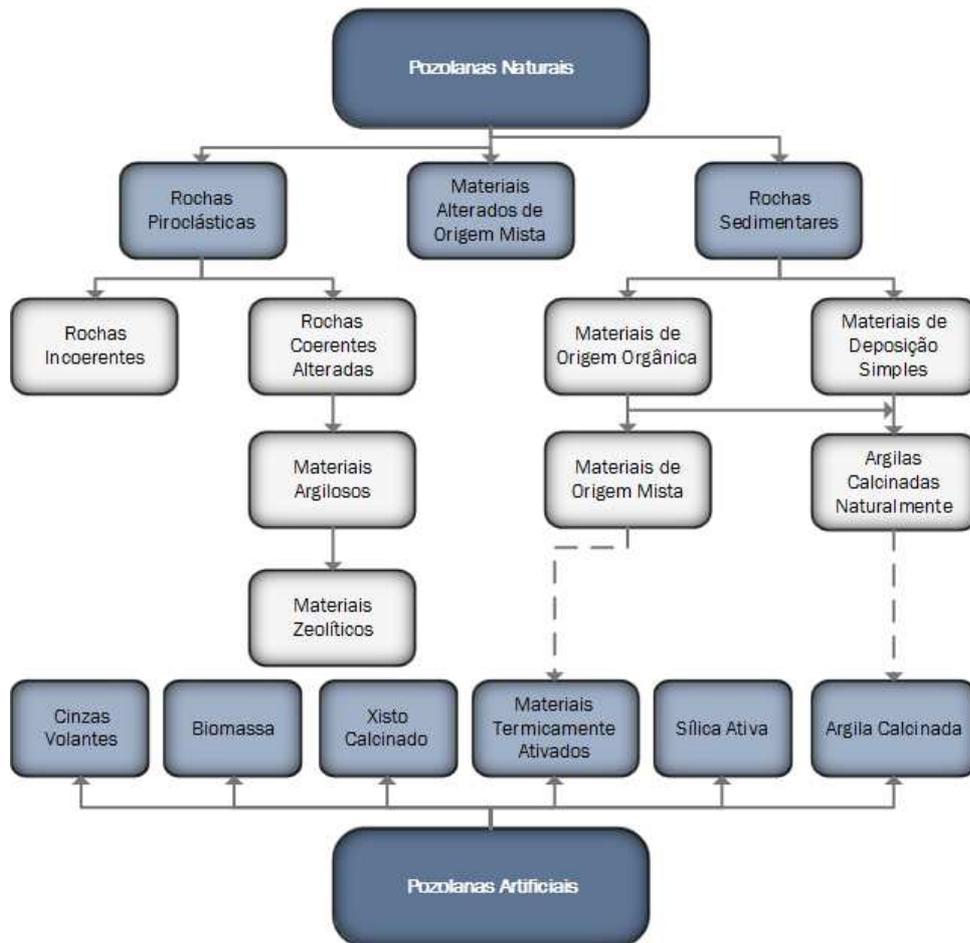
O material pozolânico é definido como todo material de composição silicosa ou silicoaluminosa que, isolado, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando moídos e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (ABNT, 2014b).

Battagin e Battagin (2010) afirmam que não basta colocar os materiais pozolânicos sob forma de pó fino em contato com a água. A presença do  $\text{Ca(OH)}_2$  é vital para que as reações químicas ocorram, e o processo de endurecimento da mistura aconteça. O  $\text{Ca(OH)}_2$  é liberado no processo de hidratação do cimento e, conseqüentemente, reage com a pozolana do meio.

Os materiais pozolânicos podem ter origens naturais ou artificiais. Os materiais de origem natural são aqueles materiais de origem vulcânica ou sedimentar (ABNT, 2014b), que são processados na finalidade única de produzir uma pozolana. Passando por etapas de beneficiamento, como britagem, moagem, e separação por tamanho, e em algum caso pode incluir ainda a ativação térmica. Já os subprodutos industriais, que não são os produtos primários das indústrias, mas a geração deles advém da produção destes também podem necessitar de algum tipo de beneficiamento prévio como secagem e pulverização, antes de serem utilizados como adições minerais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Dal Molin (2011) afirma que pode ser necessário aplicar aos materiais processos de beneficiamento adicional, como a britagem e moagem, para adequá-lo ao uso como material pozolânico em cimentos e concretos.

Battagin e Battagin (2010) afirmam que os materiais pozolânicos mais amplamente utilizados pela indústria cimenteira são: a pozolana natural, a cinza volante, a sílica ativa e as argilas calcinadas entre 500°C a 900°C, onde se enquadra o metacaulim.

De forma mais detalhada a Figura 5 apresenta um organograma elaborado por Massazza (1993) apresentando a classificação dos materiais pozolânicos de acordo com as diferentes origens.



**Figura 5 - Fluxograma da classificação das pozolanas**

Fonte: Massazza (1993, p.186).

A utilização de coprodutos industriais como pozolanas pode melhorar determinadas propriedades do produto final, além de colaborar com a preservação ambiental, pelo fato de diminuir a extração de matérias-primas virgens (ABCP, [2009]). O lançamento desses produtos em aterros, córregos ou o descarte no meio ambiente causaria impactos ambientais, e seria um desperdício de material passível de uso de acordo com Mehta e Monteiro (2008).

**No Brasil, os requisitos a serem atendidos pelos materiais pozolânicos destinado ao uso com o cimento Portland para a produção de concretos, argamassas e pastas são estabelecidos pela NBR 12653:2014. Esta, também classifica as pozolanas em três grupos: Classe N, C e E, de acordo com sua origem. A definição de cada uma dessas classes é apresentada na**

Tabela 11.

**Tabela 11 - Classificação das pozolanas**

Classificação	Definição
<b>Classe N</b>	Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos da NBR 12653:2014, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
<b>Classe C</b>	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedecem aos requisitos da NBR 12653:2014.
<b>Classe E</b>	Quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C, que obedecem aos requisitos da NBR 12653:2014.

Fonte: ABNT (2014b, p.3)

**A NBR 12653:2014 também apresenta os requisitos físicos e químicos, que o material deve atender para que o mesmo possa se enquadrar em uma das classes apresentadas na**

Tabela 11.

A NBR 12653:2014 em sua última atualização sofreu alterações significativas em relação à versão anterior da norma (NBR 12653:2012). Uma das principais diferenças observadas diz respeito aos requisitos físicos a serem atendidos pelo material, para este poder ser classificado como material pozolânico. A Tabela 12 apresenta um comparativo entre os requisitos físicos conforme a NBR 12653:2012 e 12653:2014.

**Tabela 12 – Comparativo entre os requisitos físicos das pozolanas conforme NBR 12653:2012 e NBR 12653:2014**

Propriedades	Classe de material pozolânico					
	N		C		E	
	2012	2014	2012	2014	2012	2014
Material retido na peneira 45µm	≤ 34%	≤ 20%	≤ 34%	≤ 20%	≤ 34%	≤ 20%
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 75%	≥90%	≥75%	≥90%	≥75%	≥90%
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6MPa	≥6 MPa	≥6MPa	≥6MPa	≥6MPa	≥6MPa
Água requerida.	≤115%	-	≤110%	-	≤110%	-

Fonte: ABNT (2012; 2014b)

É possível observar na versão da NBR 12653:2014, que os requisitos físicos que sofreram alterações significativas são os que dizem respeito ao material retido na peneira nº 325 (abertura de malha de 0,045mm), onde na versão de 2012 o limite era ≤ 34%, e com a atualização da norma em 2014 passou para ≤ 20%. Essa redução no percentual de material retido na peneira nº 325, exige que o material apresente uma granulometria ainda menor que na versão da norma de 2012, o que restringe o uso de alguns materiais ou exige processos de moagem ainda mais eficientes. O uso de processos de moagem mais eficientes, ou o beneficiamento por um período de tempo maior, ou que envolva mais etapas, pode inviabilizar a uso de alguns materiais, devido aos altos custos energéticos envolvidos.

Outro requisito que sofreu mudança foi o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Na versão de 2012, esse índice era  $\geq 75\%$  e com esta atualização da norma, passou a ser de  $\geq 90\%$ .

A NBR 12653:2014 remete a NBR 5752:2014 para os ensaios de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Esta norma também sofreu alterações importantes no que diz respeito ao percentual de substituição do cimento pelo material pozolânico que na NBR 5752:2012 era de 35% (em volume), e na NBR 5752:2014 passou a ser 25% (em massa).

Na NBR 12653:2012 o teor de água requerida para a formulação da argamassa foi extinto, pois a NBR 5752:2014 fixou a quantidade de água da mistura. A NBR 5752:2014 passou a preconizar o uso de aditivo superplastificante para o ajuste da consistência das argamassas.

Além dos requisitos físicos, a NBR 12653:2014 prevê também o atendimento a determinados requisitos químicos. A Tabela 13 apresenta os requisitos químicos que devem ser atendidos por um material para este ser classificado como pozolânico. Esses requisitos não sofreram alterações com a atualização da norma em relação à versão de 2012.

**Tabela 13 - Requisitos químicos das pozolanas (valores em porcentagem (%))**

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\geq 70$	$\geq 70$	$\geq 50$
SO <sub>3</sub>	$\leq 4$	$\leq 5$	$\leq 5$
Teor de umidade	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$
Perda ao fogo	$\leq 10$	$\leq 6$	$\leq 6$
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$

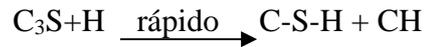
Fonte: ABNT (2014, p.3)

A NBR 12653:2014 descreve que os materiais enquadrados como pozolanas quando entram em contato com o cimento Portland modificam a reologia dos concretos, argamassas e pastas, no estado fresco, conferindo a estes propriedades diferenciadas relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido (ABNT, 2014b).

### 2.3.1 Reação pozolânica e potencial pozolânico

Metha e Monteiro (2008) explicam que a reação entre a pozolana e o Ca(OH)<sub>2</sub> é chamada de reação pozolânica. Para entender a diferença no comportamento entre o cimento Portland e o cimento Portland pozolânico no que diz respeito à principal reação de formação do C-S-H, segue abaixo, o comparativo das reações:

Cimento Portland:



Cimento Portland Pozolânico:



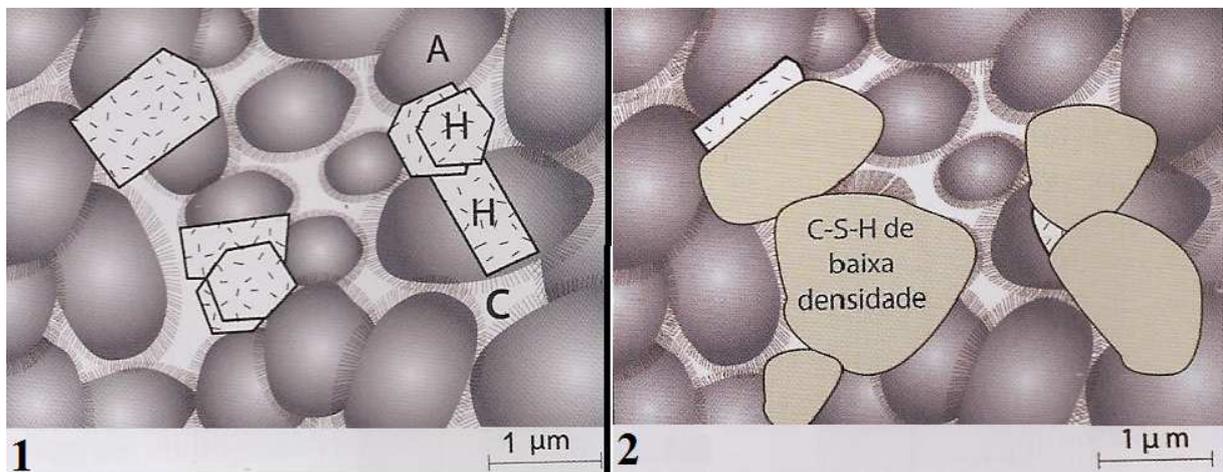
Dependendo da superfície específica das partículas e da composição química, as reações pozolânicas podem ser mais lentas ou mais rápidas (DAL MOLIN, 2011).

Massazza (1983) afirma que reatividade de uma pozolana baseia-se em dois parâmetros: a quantidade máxima de cal que a pozolana é capaz de consumir e a velocidade em que essa reação ocorre. Ambos os fatores dependem da natureza das pozolanas, e mais precisamente da qualidade e da quantidade de fases ativas presentes no material.

Três fatores da reação pozolânica justificam a importância técnica do uso de cimentos pozolânicos. Primeiro, a reação é lenta, desta forma, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento de resistência também são lentas. Segundo, a reação consome CH ao invés de produzi-lo, o que beneficia a durabilidade da pasta hidratada em relação a ambientes ácidos. Terceiro, a reação pozolânica melhora a distribuição do tamanho dos poros nas pastas hidratadas, indicando que os produtos da reação são muito eficientes ao preencher os espaços capilares, desta forma melhorando a resistência e a impermeabilidade do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2008), a reação pozolânica provoca dois efeitos físicos na pasta de cimento hidratada. O primeiro deles é o refinamento do tamanho dos poros, devido à formação de produtos de hidratação secundários, principalmente silicatos de cálcio hidratados no entorno das partículas de pozolana, onde existe uma tendência ao preenchimento dos vazios capilares grandes com um material microporoso de baixa densidade. Isto substitui os grandes vazios capilares por um sistema microporos contendo numerosos poros finos. O segundo efeito físico da reação pozolânica, é o refinamento do tamanho do grão, que ocorre devido à nucleação do CH no entorno das partículas finas da pozolana, substituindo os grandes cristais do CH por numerosos cristais menores e pouco cristalinos. Ambos os efeitos físicos aumentam a resistência da pasta de cimento. Já no concreto esses aspectos físicos contribuem para reforçar a pasta de cimento na zona de transição, desta forma reduzindo as microfissuras e aumentando a impermeabilidade do concreto.

Na representação esquemática da Figura 6 é possível observar o efeito de uma adição pozolânica em uma pasta de cimento. A imagem “1” representa uma pasta de cimento Portland bem hidratada, onde a letra ‘A’ representa uma agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas. O ‘H’ representa produtos cristalinos hexagonais na forma de grandes cristais como o CH. O ‘C’ representa as cavidades capilares ou vazios existentes devido ao não total preenchimento dos espaços originalmente ocupados por água pelos produtos da hidratação do cimento. Já a imagem “2” representa uma pasta de cimento Portland pozolânico bem hidratada. Quando comparada a imagem “1”, com a imagem “2”, é possível observar que como resultado de uma reação pozolânica, os vazios capilares são eliminados ou seu tamanho é reduzido, e os cristais de hidróxido de cálcio são substituídos por C-S-H adicional de baixa densidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).



**Figura 6 – Representação de uma pasta de cimento Portland bem hidratada “1”, e uma pasta de cimento Portland pozolânica bem hidratada “2”.**

Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p.28; p.238)

As adições minerais quando usadas em substituição parcial ao cimento Portland habitualmente possuem efeito retardador sobre a resistência durante as primeiras idades. Porém a capacidade da adição mineral reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$  presente na pasta de cimento hidratada, e diante desta reação formar silicato de cálcio hidratado adicional pode levar a uma considerável redução na porosidade da matriz e da zona de transição na interface. Em contrapartida, melhorias significativas na resistência final e na estanqueidade do concreto são alcançadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A redução da porosidade na matriz implica em uma menor permeabilidade de fluidos no concreto. Essa redução da permeabilidade é decorrente de ações físicas, através do efeito fíler e das ações químicas, através das reações pozolânicas que ocorrem durante o

processo de hidratação do cimento. A pozolanicidade e a finura do material são as principais propriedades que interferem no desempenho das adições minerais (TRINDADE, 2011).

As propriedades conferidas aos concretos, argamassas e pastas, no estado fresco e endurecido através do uso de materiais pozolânicos dependem de vários fatores, como: tipo e desempenho do material pozolânico utilizado, teor adicionado em relação à massa de cimento Portland, da proporção dos materiais (traço), aditivos utilizados, modo de preparo, lançamento, adensamento, condições de cura e outros (ABNT, 2014b).

Battagin e Battagin (2010) fazem a ressalva que o cimento pozolânico deve ser utilizado com cautela, onde existe a exigência de resistência inicial alta, em concretagens em ambientes muito secos ou com temperatura ambiente muito baixa.

Não existe diferença nos mecanismos pelos quais a reação pozolânica exerce seu efeito benéfico nas propriedades do concreto, independente do fato de o material pozolânico ser adicionado na forma de adição mineral ao concreto ou como componente de um cimento Portland composto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Os efeitos que uma adição mineral provoca no comportamento de um concreto são determinados em maior escala pela composição mineralógica e as características da partícula, do que pela composição química ou a origem do material. Justificando-se desta forma a realização de ensaios de caracterização do material a ser estudo, no caso o RCV.

Todas as vantagens apresentadas pelo uso de adições minerais em concretos dependem de vários fatores como: finura e forma das partículas, a área superficial específica, a relação água/aglomerante da mistura, a composição química, mineralógica e a quantidade da adição (DAL MOLIN, 2011).

Massazza (1993) apresenta os principais fatores que influenciam no potencial pozolânico de um material:

- A natureza das fases ativas do material: caracterizada pela reatividade do material, ou seja, pelo seu grau de amorfismo. Pontes (2011) contribui com o exemplo claro na diferença de estrutura de um material de uma mesma família, o caso da cristobalita e do quartzo, ambos constituídos de sílica, porém a cristobalita com sua estrutura amorfa é mais reativa quando comparada ao quartzo com sua estrutura mais cristalina e, conseqüentemente, menos reativa.

- O percentual de fases ativas nas pozolanas: quanto maior o grau de amorfismo de uma pozolana, maior será a porcentagem de cal consumida, e quanto maior o grau de cristalinidade menor será o consumo de cal.

- O percentual de  $\text{SiO}_2$  presente nas fases ativas: o percentual de sílica nas fases ativas pode variar entre 45% a 85%, e está relacionado com o percentual de cal consumida. O autor alerta que não deve ser negligenciado o longo tempo de conclusão da reação pozolânica, nem a presença e a influência de outros compostos como a alumina.

- A razão pozolana/cal presente na mistura: conforme o autor, em trabalhos realizados anteriormente, verificou-se que quando a razão cal/pozolana é diminuída, o percentual de cal consumida aumenta. Verifica-se também que pozolanas mais reativas consomem mais cal quando comparadas a pozolanas menos reativas.

- A superfície específica: a curto prazo, a reatividade está mais relacionada com a superfície específica (BET), enquanto que a longo prazo, a composição química e mineralógica das pozolanas torna-se de extrema importância. O autor comenta que tem sido relatada uma relação, onde a velocidade de reação pozolânica é proporcional ao quadrado da superfície específica da pozolana.

- A temperatura: o aumento de temperatura provoca alterações na velocidade da reação cal/pozolana. O autor cita como exemplo, que entre 50°C e 90°C o consumo de cal foi rápido (24h), e que aos 70°C verifica-se um decréscimo de consumo de cal quando comparado com os 60°C.

Além dos fatores citados por Massazza (1993), Matias, Farias e Torres (2014a) mencionam em seu estudo, que a reação pozolânica depende principalmente da quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  disponível para reagir com cal.

### **2.3.2 Potencial pozolânico das argilas calcinadas**

De acordo com Dal Molin (2011), a argila por si só não se apresenta como um material pozolânico, é necessário aplicar-lhe um tratamento térmico para que a estrutura cristalina dos argilominerais seja transformada em uma estrutura não cristalina, desordenada e instável.

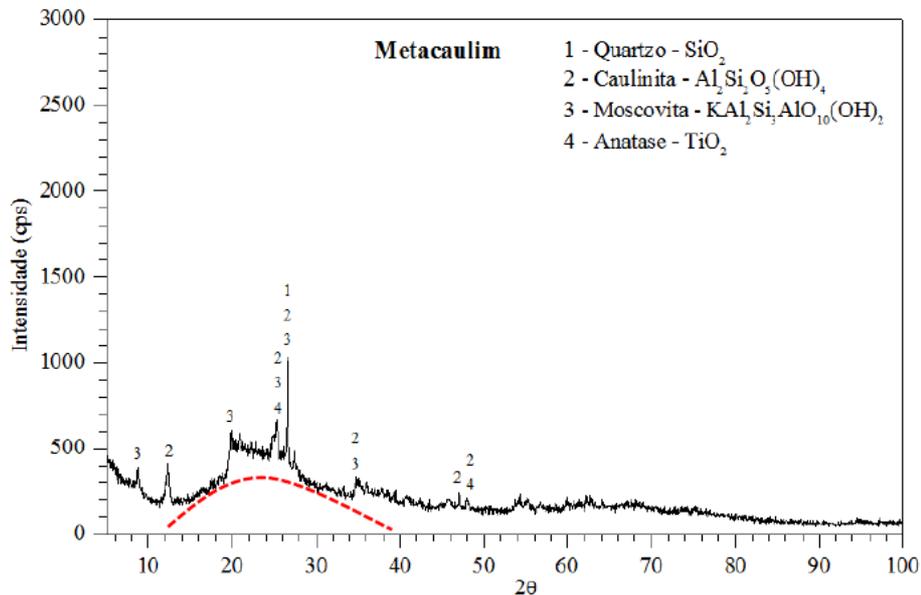
No contexto da NBR 12653:2014 as argilas calcinadas são materiais provenientes da calcinação de certas argilas, que são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas, que variam entre 500°C e 900°C, com atividade pozolânica. (ABNT, 2014b). Caso esse

tratamento térmico não ocorra, as argilas não apresentarão reatividade considerável com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , devido a não destruição da estrutura cristalinas dos minerais argilosos presentes (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Argilas contendo grandes quantidades de quartzo e feldspato, mesmo que submetidas a um tratamento térmico adequado podem produzir uma pozolana de má qualidade, inadequada para o uso em matrizes cimentícias (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Diante destes apontamentos é evidente a necessidade da realização de ensaios como análises de DRX da massa cerâmica crua e sinterizada, para verificar as diferenças na estrutura do material após a sinterização e avaliar o efeito do processo de sinterização sobre a estrutura da argila.

Sebastiany (2014) realizou a análise de DRX em metacaulim e amostras de argilas calcinadas em três distintos gradientes de temperatura. A Figura 7 e a Figura 8 apresentam difratogramas do metacaulim e a Figura 9, Figura 10 e Figura 11 ilustram as argilas calcinadas produzidas por Sebastiany (2014) sinterizadas a  $700^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$  e  $1000^\circ\text{C}$  respectivamente.

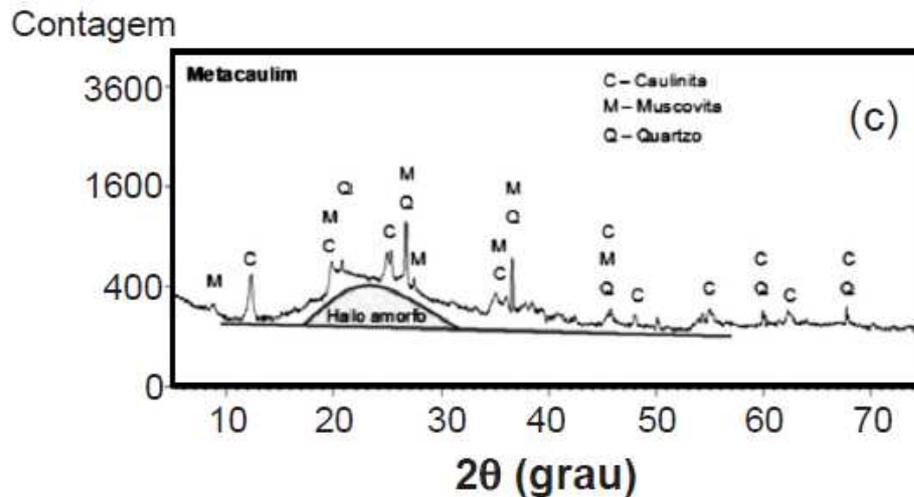


**Figura 7 - Difratograma do metacaulim**

Fonte: Sebastiany (2014, p.84)

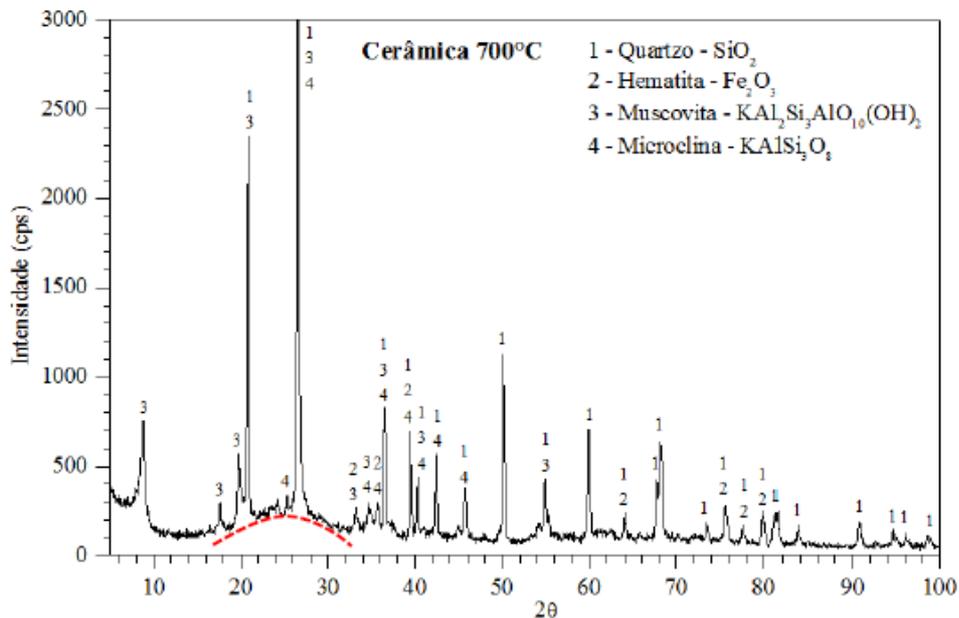
Em comparação ao metacaulim de Sebastiany (2014), a Figura 8 apresenta o difratograma obtido por Hoppe Filho et al. (2015) para um metacaulim, mostrando que os compostos que se destacam são o quartzo, a caulinita e a muscovita, ambos apresentando o halo de amorfismo característico do material. Verifica-se também que a amostra de

metacaulim de Hoppe Filho et al. (2015) apresenta maior incidência de picos cristalinos, em relação à amostra de Sebastiany (2014), indicando maior cristalinidade e, conseqüentemente, menor reatividade, levando em consideração o exposto por Massazza (1993).



**Figura 8 – Difratograma de uma amostra de metacaulim**

Fonte: Hoppe Filho et al.(2015)



**Figura 9 - Difratograma da argila calcinada a 700°C**

Fonte: Sebastiany (2014, p.84)

Ao avaliar os resultados das DRX apresentados nas Figura 7 e Figura 9 é possível observar que a amostra de metacaulim apresenta uma menor incidência de picos cristalinos em relação à argila calcinada a 700°C, apresentando uma tendência de maior reatividade de acordo com Massazza (1993).

Sebastiany (2014, p. 84) afirma “que a temperatura de calcinação é diretamente proporcional à formação de picos cristalinos e, portanto inversamente favorável ao potencial pozolânico das argilas calcinadas.” Tal afirmação pode ser verificada na comparação entre as: Figura 9, Figura 10 e Figura 11.

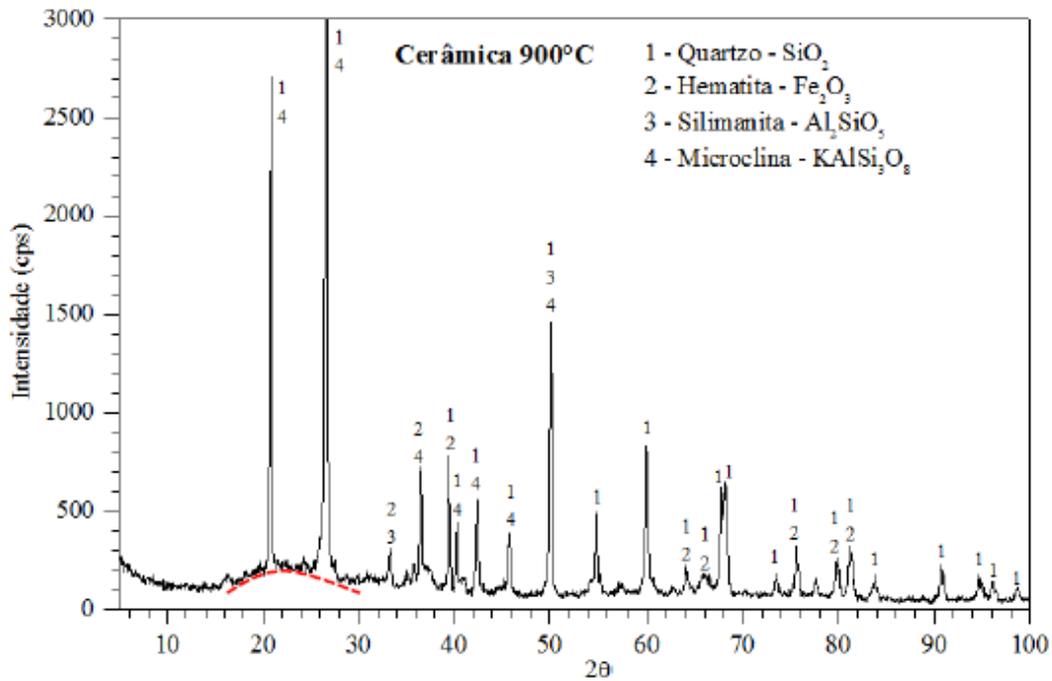


Figura 10 - Difratoograma de argila calcinada a 900°C

Fonte: Sebastiany (2014, p.85)

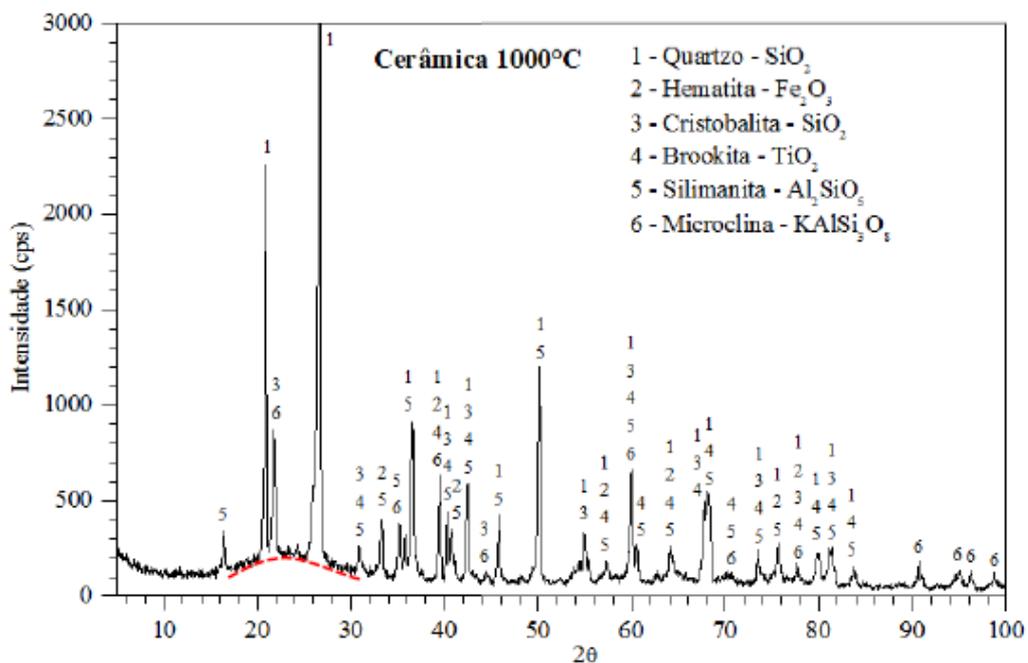


Figura 11 - Difratoograma de argila calcinada a 1000°C

Fonte: Sebastiany (2014, p.85)

Com relação aos fatores que influenciam a atividade pozolânica do RCV, Tironi et al. (2013) mencionam que a atividade pozolânica de argilas calcinadas é determinada por vários fatores, entre eles, o tipo e quantidade de minerais argilosos, a natureza e quantidade de impurezas, o tratamento térmico utilizado para a sua ativação e a superfície específica obtida após sinterização. Além dos fatores citados pelo autor, a taxa de resfriamento exerce influência sobre a atividade pozolânica dos materiais.

Em consenso, Gonçalves (2005) afirma que o tipo de argila utilizada na fabricação das cerâmicas vermelhas é de extrema importância, uma vez que é este fator que define as composições químicas e mineralógicas do RCV, o autor afirma que o método de produção das cerâmicas também exerce influência sobre as características do resíduo cerâmico, fatores como a temperatura de sinterização, o tempo de residência e a uniformidade da temperatura no interior dos fornos podem afetar de forma significativa as características dos resíduos. E conclui que a interação entre todas estas variáveis é que determina o nível de atividade pozolânica do RCV gerado.

Além dos fatores já citados, Santos (1966 apud CORDEIRO; DÉ SIR, 2010) menciona que as argilas calcinadas necessitam sofrer um processo de beneficiamento (moagem) para obterem uma finura ideal e assim desenvolverem satisfatoriamente a atividade pozolânica.

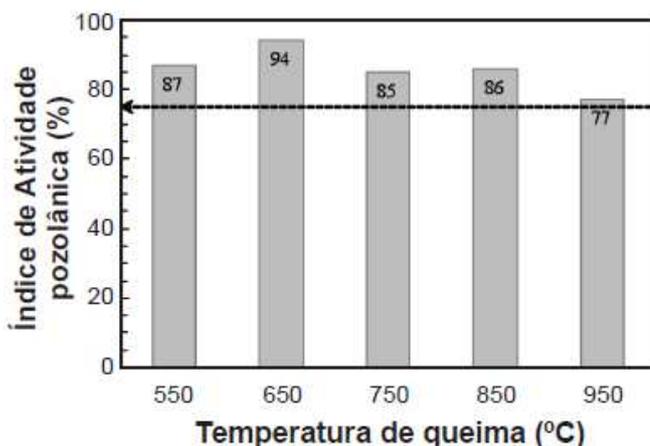
### **2.3.3 Estudos envolvendo a utilização da argila calcinada e RCV como pozolana**

O RCV é um resíduo de argila calcinada, desta forma, serão apresentados estudos envolvendo argilas calcinadas produzidas em laboratório, sob condições controladas e adequadas, ou seja, preparadas para as pesquisas, e estudos envolvendo o uso de resíduos da produção de artefatos de cerâmica vermelha.

Gonçalves (2007) e Sales e Alferes Filho (2014) utilizaram o RCV moído adicionado a matrizes cimentícias, e o mesmo apresentou propriedades pozolânicas. Porém, todos os estudos apresentados pela literatura seguem as prescrições da NBR 12653:2012 ou anterior (1991). Fato que evidencia a necessidade de novos estudos na área tendo em vista a atualização na norma, buscando verificar o atendimento do RCV às atuais exigências da norma.

Cordeiro e Désir (2010) avaliaram o potencial pozolânico de uma argila caulínica, que foi submetida a um processo de sinterização controlada em laboratório, sob diferentes gradientes de temperatura. E concluíram que a mesma é adequada para uso como

pozolana, pois todas atenderam ao índice de atividade pozolânica (IAP) da norma  $\geq 75\%$ , destacado pela linha tracejada na Figura 12. O melhor desempenho foi apresentado pelas argilas sinterizadas na temperatura de  $650^{\circ}\text{C}$  que atingiram um IAP de 94%, conforme pode ser observado na Figura 12.



**Figura 12 – IAP das argilas caulínicas calcinadas em diferentes gradientes de temperatura**

Fonte: Cordeiro e Désir (2010, p. 74)

Diante dos resultados apresentados por Cordeiro e Désir (2010) e correlacionados com a NBR 12653:2014 vigente que especifica que o índice de atividade pozolânica deve ser  $\geq 90\%$ , apenas a argila sinterizada a  $650^{\circ}\text{C}$  atenderia a norma vigente. Devido aos vários outros fatores que sofreram alteração com a atualização da norma, que já forma citados anteriormente, existe a necessidade da realização de novos ensaios para confirmar os resultados apresentados.

Gonçalves (2005), Meira et al. (2014), Sales e Alferes Filho (2014), Tydlitát et al. (2012), Vejmelková et al. (2012) e Vieira (2005) realizaram seus ensaios de pozolanicidade com o RCV. Entre os resultados alcançados pelos autores, o percentual de 20% apresentou de forma geral os melhores resultados em relação ao demais percentuais estudados em cada pesquisa.

Sales e Alferes Filho (2014) avaliaram a substituição de 10%, 20% e 40% do cimento Portland por RCV em concreto. Os ensaios de resistência à compressão, realizados aos 28 dias mostraram que para a substituição de 10% houve redução de 11% dessa propriedade. Por outro lado houve aumento na resistência de 11% para a substituição de 20%. Já para a substituição de 40% houve uma redução de 17% na resistência à compressão.

Tydlitát et al. (2012) concluem que as substituições estudadas têm efeito sobre a hidratação do cimento somente até o limite de substituição de 20%, e o percentual excedente

atua essencialmente na forma de fíler. No mesmo sentido, Vejmelková et al. (2012) observaram que a resistência mecânica do material tende a aumentar até uma faixa máxima de substituição de 20%, e em seguida a resistência diminui consideravelmente.

Gonçalves (2005) produziu argamassas com diferentes percentuais de substituição de cimento pelo RCV (10%, 20%, 30% e 40%). Conclui que, a argamassa que apresentou o melhor desempenho foi a que possuía 20% de substituição. Os resultados indicaram que resistência à compressão não foi alterada significativamente em relação à argamassa referência. Promoveu-se um maior refinamento da estrutura de poros, que proporcionou a redução em até 6 vezes da penetração acelerada de íons cloretos. De modo geral, a incorporação de RCV contribuiu para a redução da absorção de água de todas as misturas. O autor conclui que o uso do RCV como substituto parcial do cimento Portland para a produção de argamassas e concretos é viável tecnicamente.

Por outro lado Vieira (2005) obteve como resultado a redução da resistência à compressão simples em concretos formulados com substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico nos teores de 20% e 40%, porém observa que esta redução não foi proporcional ao teor de substituição utilizado, tendo em vista que, amostras contendo 40% de substituição ainda apresentaram 89% da resistência das amostras de controle, em razão da satisfatória atividade pozolânica do RCV além de seu efeito fíler.

Meira et al. (2014) também concluem que a adição de resíduo cerâmico ao concreto tende a reduzir a resistência mecânica do material. Porém, essa redução é minimizada ao longo do tempo com o avanço das reações pozolânicas. Os autores afirmam que a adição do RCV contribui para a redução da velocidade de transporte dos íons cloreto. Desta forma, os valores dos teores críticos de cloretos livres e totais tendem a diminuir com a substituição de cimento por RCV, em virtude da redução de alcalinidade dos concretos que incorporam esse tipo de resíduo.

Gonçalves (2007) substituiu 20% do cimento por RCV, na produção de concretos. Como resultado, ocorreu uma redução do módulo de elasticidade dos concretos, porém, a presença do RCV não influenciou significativamente na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral e na resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias, independentemente da relação a/c utilizada.

Os resíduos de argila calcinada são adequados para a substituição até 30% em massa de cimento, sem um efeito prejudicial sobre a resistência (LAVAT; TREZZA; POGGI, 2009).

Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) estudaram a possibilidade de reutilizar resíduos de cerâmica vermelha (blocos e telhas) como substituição parcial do cimento em argamassa e concreto. A temperatura de sinterização dos resíduos não era conhecida. Porém os autores afirmam que a média praticada na indústria portuguesa para telhas varia entre 1100°C a 1200°C e para os blocos varia entre 800°C e 1000°C. O IAP foi determinado por ensaios em argamassa com diferentes teores de substituição (0%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%). Como conclusão do estudo, os autores afirmaram que apenas os resíduos de telha apresentaram um potencial de reatividade pozolânica. Quanto aos blocos, os autores acreditam que a temperatura (levando em consideração a média da região) do forno de sinterização não tenha fornecido condições apropriadas para o desenvolvimento das propriedades pozolânicas do material.

No intuito de sintetizar dados, foi elaborada a Tabela 14, aonde são apresentadas algumas pesquisas relacionadas a área do estudo. Analisando a Tabela 14 é possível observar que o teor de substituição do cimento Portland pela argila calcinada/ RCV que apresenta o melhor desempenho é o de 20%.

**Tabela 14 – Melhores resultados alcançados por autores que substituíram resíduo cerâmico por cimento**

Autor	Tipo de argila Calcinada	Temperatura	Percentuais estudados	Percentual que apresentou melhor resultado	Matriz
Gonçalves (2005)	RCV	850°C	20%, 30% e 40%	20%	Argamassa
Vieira (2005)	RCV	Não apresenta	20 e 40%	20%	Argamassa
Cordeiro e Désir (2010)	Argila calcinada	550 °C a 950°C	5, 10 e 15%	15%	Concreto
Meira et al. (2014)	RCV	Não apresenta	10% e 30%	10%	Concreto Armado
Sales e Alferes Filho (2014)	RCV	Não apresenta	10%, 20% e 40%	20%	Concreto

Fonte: Elaborado pela autora.

## 2.4 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA

A verificação da reatividade pozolânica pode ser determinada através da medição de propriedades mecânicas, físicas e químicas (MADALENA, 2013). Os métodos utilizados podem ser classificados como diretos ou indiretos (DONATELLO; TYRER; CHEESEMAN, 2010).

Donatello, Tyrer e Cheeseman (2010) afirmam que os métodos diretos monitoram a presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  e a sua variação com o tempo ao longo da reação pozolânica. Tal avaliação pode ser feita usando métodos como a DRX e análise termogravimétrica. Por sua vez, os métodos indiretos medem as variações que ocorrem nas propriedades físicas, como por exemplo, a resistência à compressão, condutividade elétrica ou liberação de calor por calorimetria. Os resultados dos métodos indiretos são geralmente validados através dos métodos diretos, confirmando (ou não) a ocorrência de reatividade pozolânica do material.

Silva (2010) relata que existem vários métodos que avaliam a atividade pozolânica, entre eles: método de Chapelle, a determinação da resistência mecânica, a DRX, a determinação do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  pela termogravimetria e a determinação do calor de hidratação por meio de técnicas calorimétricas.

Cunha (2012) apresenta como métodos utilizados para avaliação da atividade pozolânica, os ensaios de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG), ou ainda, através da análise térmica diferencial (DTA), o método de Chapelle, o método de Chapelle modificado, o ensaio de Frattini, a condutividade elétrica e o IAP com cimento, no Brasil preconizado pela NBR 5752:2014.

Já Pontes (2011) trabalhou em sua pesquisa com cinco diferentes métodos de avaliação de atividade pozolânica, que conforme o autor foram selecionados para o seu estudo com base na sua relevância em termos bibliográficos. Os métodos empregados foram: método de Chapelle, Chapelle modificado, método de Frattini, análise termogravimétrica e diminuição da condutividade por medição da resistência elétrica. O autor afirma que todos os métodos baseiam-se na capacidade das pozolanas em combinarem-se com o  $\text{Ca(OH)}_2$  formando silicatos e aluminatos de cálcio com propriedades ligantes. A diferença entre estes métodos encontra-se essencialmente nas proporções dos reagentes e na forma como é medida a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  consumida.

Gava (1999 apud SANTOS, 2006) utiliza em seu estudo diferentes normas para a determinação da reatividade e diferentes metodologias de classificação das pozolanas. Como exemplo, ao aplicar a NBR 5752 e a BS EM 450, para a cinza volante, esta seria considerada de baixíssima reatividade, podendo até ser classificada como material não pozolânico, já que em ambos os cimentos sua reatividade ficou muito próxima ou até inferior ao limite mínimo estabelecido. Para as demais metodologias, a cinza volante seria considerada material pozolânico, apresentando inclusive reatividade superior ao material de referência no ensaio ASTM C 311/1996a.

Diante do apresentado, Santos (2006) conclui que o ideal para avaliação de um material pozolânico, é analisá-lo sob as reais condições em que será empregado, seja para a produção de argamassas ou concretos, utilizando o mesmo teor de substituição, a mesma trabalhabilidade, a mesma relação água/cimento e a mesma marca de cimento.

Através da literatura é possível verificar que não existe um método padrão, para avaliação da atividade pozolânica. Tal informação pode ser justificada ao analisar a Tabela 15.

**Tabela 15 - Métodos de avaliação da atividade pozolânica identificados na literatura.**

Autor (Ano)	Método	País do Estudo
Amori, Lira e Ferreira (2003)	Chapelle modificado	Brasil
Cordeiro e Désir (2010)	Chapelle modificado ÍAP – NBR 5752	Brasil
Pontes (2011)	Chapelle Chapelle modificado Fratini IAP – NP EN 450 Termogravimetria Condutividade Elétrica	Portugal
Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	IAP - NP EN 450	Portugal
Cunha (2012)	Análise térmica diferencial não convencional Análises TG/DTG e DTA Resistência à compressão - NBR 7215	Brasil
Pontes, Silva e Faria (2012)	Chapelle Chapelle modificado Fratini IAP - NP EN 450	Portugal
Sales e Alferes Filho (2014)	IAP - NBR 5752	Brasil
Tironi et al.(2013)	Fratini Condutividade Elétrica	Argentina
Madalena (2013)	Ensaio de Chapelle modificado Fratini IAP - NP EN 450	Portugal
Sebastiany (2014)	Condutividade Elétrica Análises Termogravimétricas IAP - NBR 5752	Brasil

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a avaliação da atividade pozolânica, serão detalhados os métodos de condutividade elétrica, IAP e análise térmica, em função deste serem os empregados no presente estudo. A escolha dos mesmos foi determinada pelo fato deste trabalho buscar uma comparação com os resultados obtidos por Sebastiany (2014), que fez uso das mesmas técnicas.

### 2.4.1 Condutividade Elétrica

Tendo em vista o aumento da utilização de materiais pozolânicos, em matrizes cimentícias, existe um grande interesse em um método rápido e eficiente para avaliar a reatividade de possíveis materiais pozolânicos. Visando atender esta necessidade Luxán et al. (1989) propuseram um método para a avaliação da atividade pozolânica baseada na mensuração da condutividade elétrica.

Conforme Kieling (2009), com a adição de materiais pozolânicos, a condutividade elétrica decresce em função da menor quantidade de íons  $\text{Ca}^{+2}$  e  $(\text{OH})^-$  livres na solução. Desta forma, a atividade pozolânica pode ser determinada a partir da diferença entre a condutividade elétrica antes e depois da adição de RCV à solução. Cunha (2012) afirma que quanto maior a diferença da condutividade da solução, maior a reatividade do material.

### 2.4.2 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

No Brasil, a determinação da atividade pozolânica é regida pelas normas NBR 5751:2015 e NBR 5752:2014. Estas normas baseiam-se em medir a resistência mecânica de argamassas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e cimento, respectivamente, a partir da incorporação de materiais pozolânicos.

Na NBR 5751:2015 são preparadas argamassas que utilizam uma parte (em massa) de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  P.A. e o dobro do volume do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de material pozolânico. Os corpos de prova são submetidos a ensaios de resistência à compressão aos 7 dias. A NBR 12653:2014 determina que a argamassa deve apresentar uma resistência  $\geq 6\text{MPa}$ , para o material ser considerado pozolânico.

Na NBR 5752:2014 são comparadas as resistências à compressão de amostras com e sem adição de material pozolânico. É preparada uma argamassa “A”, constituída de cimento CP II-F-32, areia normal e água, e uma argamassa “B” onde é substituída 25% em massa do cimento pelo material pozolânico, os demais materiais são adicionados nas mesmas quantidades. Quanto à consistência, a NBR 5752:2014 preconiza que o ensaio seja realizado conforme a NBR 7215 para a argamassa A, e que se faça uso de um aditivo superplastificante para que o índice de consistência da argamassa B permaneça no limite de  $\pm 10$  mm.

A NBR 12653:2014 estabelece que a argamassa apresente um IAP  $\geq 90\%$  para que o material possa ser classificado como pozolânico.

O metacaulim como uma pozolana já consagrada, possui norma específica para avaliação do IAP, a NBR 15894:2010. A NBR 15894:2010 estabelece que seja preparada uma

argamassa “A” de cimento e uma argamassa “B” com 15% de substituição do cimento pelo metacaulim. Os ensaios de resistência à compressão são realizados aos 7 dias. A norma preconiza a produção de argamassas nos mesmos moldes da NBR 5752:2014, porém o teor de cimento substituído é de 15%. A argamassa B deve apresentar um IAP  $\geq 105\%$  aos 7 dias.

### 2.4.3 Análises Térmicas

Técnicas de análise térmica (TG, DTG e DTA) têm sido utilizadas ao longo dos anos por diversos autores para analisar pastas de cimento hidratadas (CUNHA, 2012; DWECK et al., 2000; DWECK et al., 2009; DWECK et al., 2013; GONÇALVES, 2006). Através destas técnicas, principalmente dos dados de TG e DTG é possível quantificar por meio da perda de massa de desidratação, a água combinada dos produtos hidratados. Um dos parâmetros mais importantes na avaliação é a água liberada no processo de desidroxilação do  $\text{Ca(OH)}_2$ , a partir do qual é normalmente avaliado o grau de hidratação do cimento (DWECK et al., 2000).

As análises térmicas são utilizadas para avaliar materiais à base de cimento que contêm adições, incluindo as adições pozolânicas. A atividade pozolânica é medida a partir do consumo do  $\text{Ca(OH)}_2$  (DWECK et al., 2009). Desta forma caracteriza-se pelo menor teor de hidróxido de cálcio presente na amostra após a reação pozolânica.

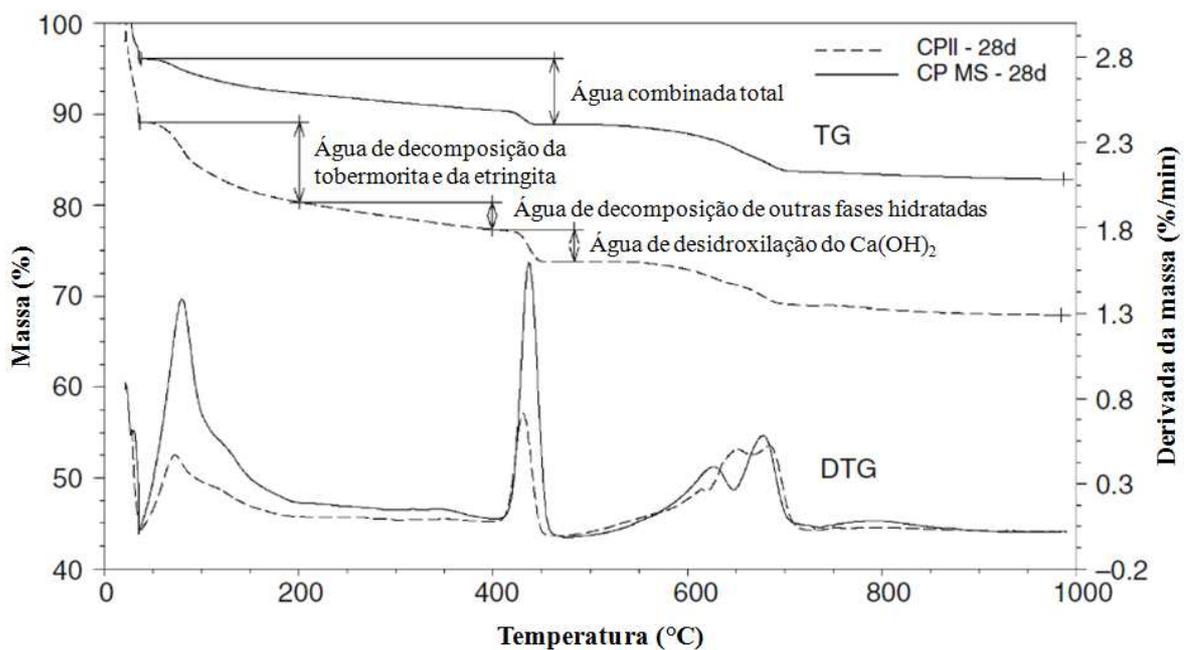
Nas análises térmicas, as mudanças de massa podem ser originadas de transformações químicas ou físicas. O registro dessa análise é a curva TG, que relaciona a massa com a temperatura ou o tempo, apresentando dados relativos à estabilidade térmica, velocidades de reação e composição da amostra. Aconselha-se o registro da curva termogravimétrica derivada (DTG) para a resolução de curvas complexas de TG. Com a DTG é possível obter um resultado mais detalhado do comportamento da amostra. A DTG indica com precisão, por exemplo, a temperatura em que a velocidade de perda de massa é máxima (DAL MOLIN, 2010).

As perdas de massa dos silicatos, sulfoaluminatos e aluminatos são sequenciais sendo unicamente diferenciadas pela curva DTG que é traçada juntamente com a TG. Os eventos térmicos que ocorrem passam a ser indicados por picos em faixas características de temperatura, com a respectiva perda de massa (CINCOTTO, 2011).

De acordo com Dweck et al. (2013), até a temperatura de  $35^\circ\text{C}$  ocorre a perda de massa que corresponde à água livre, não combinada, pelo processo de secagem. A massa

continuamente perdida dos 35°C até a completa desidroxilação do hidróxido de cálcio em torno dos 450°C corresponde ao total de água combinada da amostra.

Cunha (2012), cita que os picos na faixa entre os 35°C e 200°C correspondem à perda de massa em função da água de decomposição da tobermorita ( $\text{Ca}_5(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) e da etringita ( $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$ ) que são sobrepostos e analisados em conjunto. A partir dessa temperatura até os 350°C ocorre a decomposição de outras fases hidratadas. Picos formados entre 350°C e 450°C correspondem a desidroxilação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e por fim, picos formados entre 550°C e 750°C correspondem caracteristicamente a decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Essas informações podem ser observadas na Figura 13.



**Figura 13 - Curvas de TG e DTG de pastas e argamassas hidratadas a 28 dias com base em massa inicial da amostra**

Fonte: Adaptado de Dweck et al. (2013, p. 1486)

A água quimicamente combinada é a água que integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento. Essa água não se perde durante o processo de secagem, é somente liberada na decomposição por aquecimento dos produtos de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Sebastiany (2014) utilizou da técnica de análise termogravimétrica para avaliar a atividade pozolânica de diferentes materiais: amostras de metacaulim e argilas calcinadas à 700°C, 900°C e 1000°C, respectivamente. Destes materiais o autor produziu pastas com substituição de 35% (em volume) do cimento por metacaulim e pelas argilas calcinadas. As

pastas foram analisadas aos 7 e 28 dias de idade. O autor observou a formação dos picos de perda de massa conforme exposto por Cunha (2012), ilustrados na Figura 14. Os dados de TG/DTG do autor foram transformados conforme a metodologia desenvolvida por Dweck et al. (2013).

Além disso, Sebastiany (2014, p. 93) ressalta que:

“a pozolanicidade de um determinado material fica evidenciada à medida em que o percentual de perda de massa dada pela decomposição do hidróxido de cálcio diminui em relação à pasta de referência. Explica-se: quanto menor o percentual de perda de massa de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , apontado pelas análises termogravimétricas, maior terá sido o consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica resultante da incorporação do material analisado à pasta de cimento.”

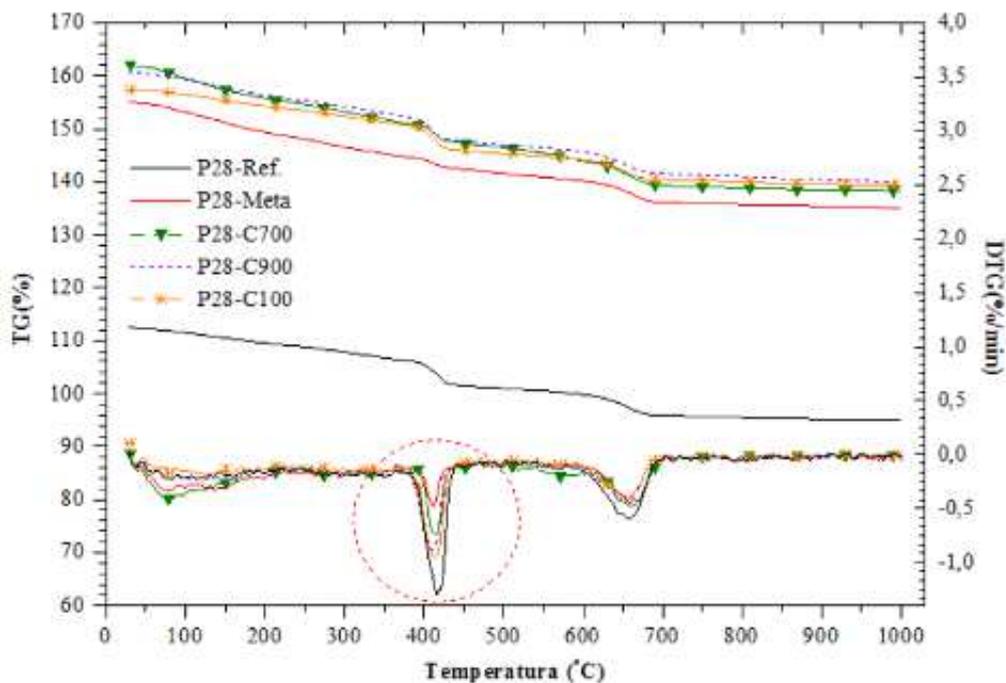
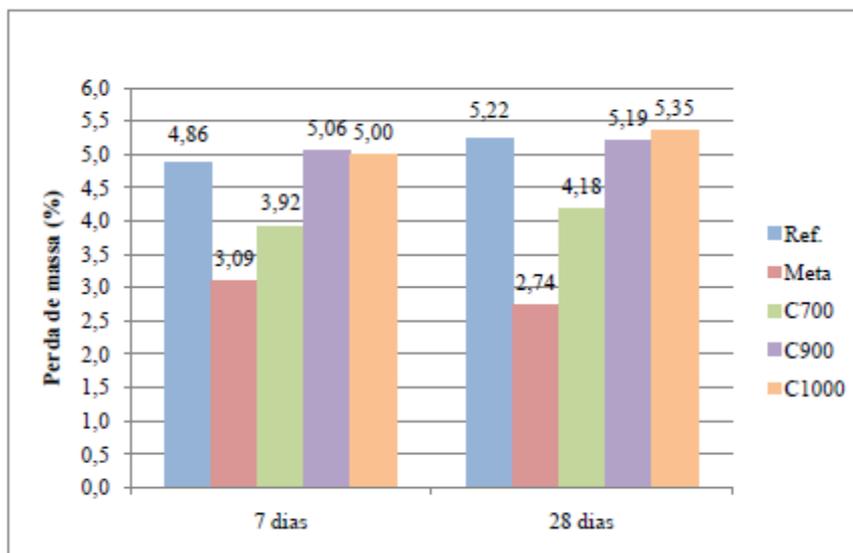


Figura 14 - Curvas TG/DTG de pastas de cimento aos 28 dias.

Fonte: Sebastiany (2014, p. 92)

Na curva de TG/DTG da Figura 14 e a Figura 15 apresentado por Sebastiany (2014), é possível verificar que as pastas formuladas com 35% de substituição do cimento por metacaulim apresentaram maior consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e, portanto apresentaram maior atividade pozolânica. Entre as pastas produzidas com argila calcinada, o melhor desempenho pozolânico foi obtido pela argila calcinada a 700°C. As pastas com argilas calcinadas a 900°C e 1000°C não apresentaram diferenças significativas em comparação às pastas de referência.



**Figura 15 – Percentuais de perda de massa relativo a decomposição do hidróxido de cálcio das pastas de cimento aos 7 e 28 dias.**

Fonte: Adaptado de Sebastiany (2014, p. 93)

Gonçalves et al. (2006) avaliaram através de análise TG e DTG a influência da utilização de RCV na quantidade de produtos hidratados em pastas de cimento. Foram produzidas 5 pastas com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de substituição (em massa) do cimento CP II-F-32 por RCV. Foi padronizada uma relação água/aglomerante igual a 0,40. As pastas foram ensaiadas aos 28 dias. Como parâmetro de avaliação, foi avaliado o teor de água quimicamente combinada relativo ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e o teor de água quimicamente combinada relativo aos sais hidratados (silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado), em relação à perda total de massa.

Com os resultados das análises termogravimétricas Gonçalves et al. (2006) concluem que a análise térmica apresenta-se como uma técnica adequada para avaliar o teor de água quimicamente combinada dos hidratos nas pastas de cimento contendo RCV. Afirmam que o aumento no teor de substituição do cimento RCV promoveu a redução no teor de água quimicamente combinada relativa ao hidróxido de cálcio. O teor de 10% de substituição de cimento por RCV foi o que apresentou o melhor desempenho em relação à maior quantidade de hidratos formados.

Dweck et al. (2013) apresenta uma metodologia com base na massa inicial de cimento para a avaliação da atividade pozolânica por TG e DTG, uma vez que, devido às diferentes composições iniciais das amostras analisadas, os cálculos em base de massa inicial da amostra não são representativos. E será esta a metodologia utilizada no presente estudo. O cálculo sugerido por Dweck et al.(2013) está detalhado na metodologia, no item 3.5.3.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

O planejamento experimental desta pesquisa foi estruturado de forma a atender aos objetivos propostos por este estudo.

Para o melhor entendimento, o trabalho foi dividido em 4 etapas distintas:

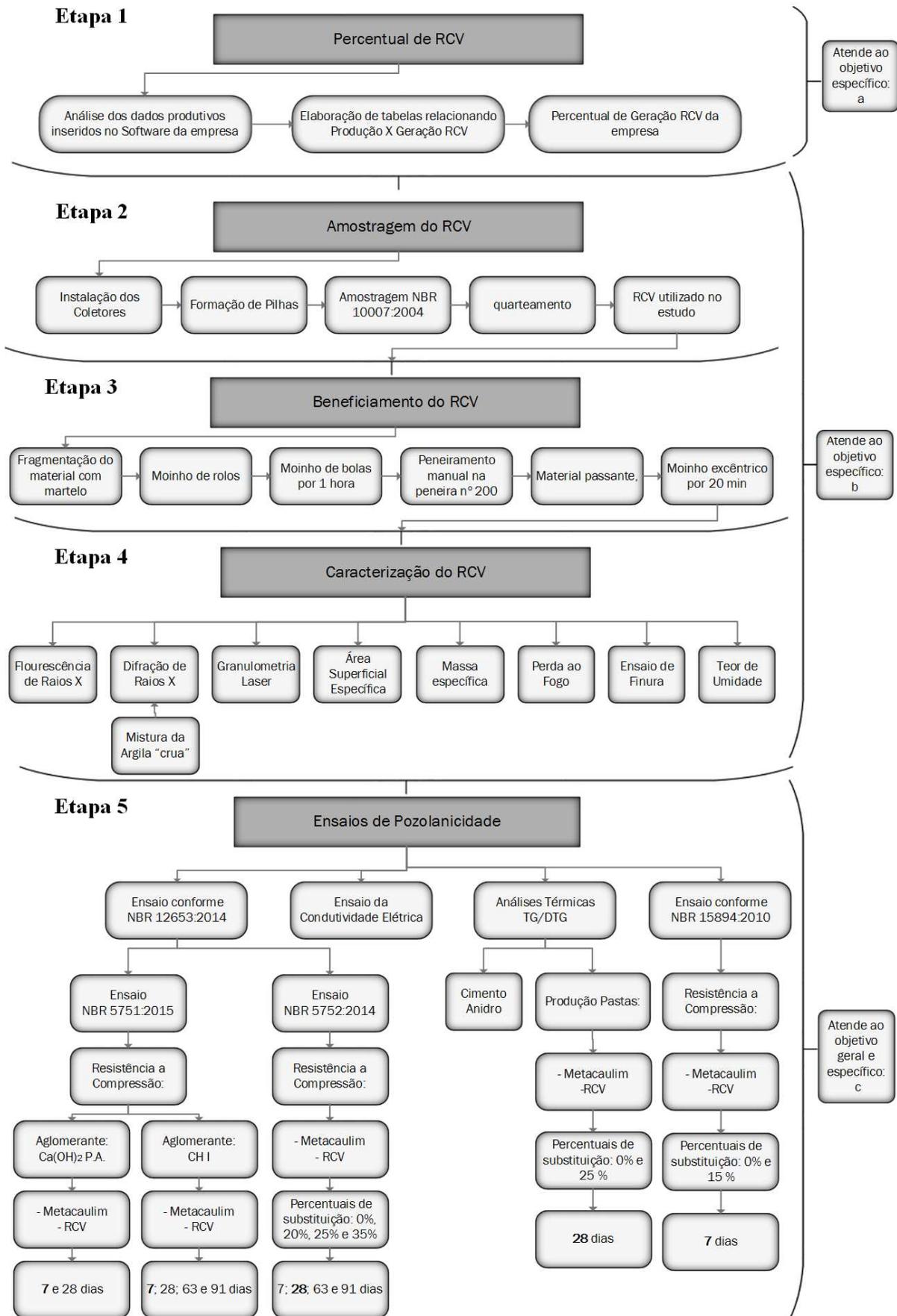
Etapa 1 – Amostragem do RCV;

Etapa 2 – Beneficiamento do RCV;

Etapa 3 – Caracterização dos aglomerantes e materiais pozolânicos utilizados na pesquisa;

Etapa 4 – Ensaio de pozolanicidade;

Os principais procedimentos metodológicos realizados estão apresentados em formato de fluxograma na Figura 16.



**Figura 16 - Principais etapas desenvolvidas no estudo**

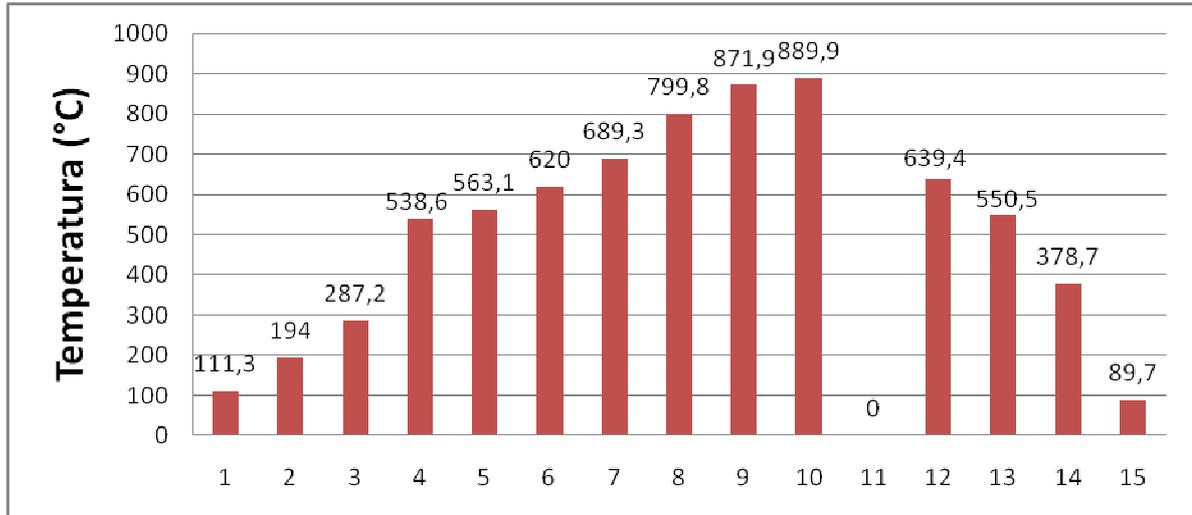
### 3.1 AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE RCV

O RCV utilizado neste estudo é proveniente de uma empresa de produção de artefatos cerâmicos localizada no município de Bom Princípio/RS.

A empresa é formada por dois processos produtivos de artigos cerâmicos independentes. O sistema denominado Cerâmica 1 é formado por um sistema de produção mais artesanal, e com equipamentos mais antigos, e o sistema denominado Cerâmica 2 possui tecnologias mais modernas e automatizadas.

A Cerâmica 1 possui um sistema de sinterização distinto da Cerâmica 2. Na Cerâmica 1 o sistema de sinterização dos artefatos cerâmicos é robusto, o controle da temperatura é feito através de um termopar (sensor de temperatura) que lê a temperatura do teto do forno e controla a temperatura de 4 fornalhas (2 de cada lado do forno), o sistema de alimentação do forno, injeta o combustível, levando em consideração a temperatura programada. Os registros de temperatura ocorrem de forma manual, ou seja, o operador do forno anota as temperaturas da zona de sinterização, que variam de 700°C a 900°C em média, da rampa de aquecimento e de resfriamento em planilhas, posteriormente esses dados são inseridos no software da empresa.

A cerâmica 2 possui um Forno túnel marca ZUCCO, com 120 m de comprimento, destes, 35 m representam a rampa de aquecimento, 40 m representam a faixa de sinterização (queima) e 45 m formam a rampa de resfriamento. A temperatura de sinterização varia entre 700°C e 900°C dependendo do ritmo da produção. O sistema de aquecimento é controlado por equipamentos da CLP Unitronics, com equipamentos eletrônicos Schneider e máquina de injeção de serragem e ar da marca Zucco, modelo QFSZ02. A Figura 17 apresenta o registro do controle da temperatura de sinterização em um determinado momento, indicando a temperatura em cada um dos 14 pontos avaliados. A temperatura máxima no momento do registro da imagem foi de 889,90°C no ponto 10 (zona de queima). O Ponto 11, mede a pressão no interior do forno e esse medidor de pressão não possui termopar.



**Figura 17 – Registro do Painel de controle de temperatura do forno na Cerâmica 2**

A empresa produz 80 diferentes produtos cerâmicos, entre blocos cerâmicos de vedação (tijolos furados), elementos de enchimento para lajes (tavelas) e canaletas. A produção aproximada da empresa é de 350 toneladas de produtos sinterizados/dia. A Figura 18 apresenta alguns dos produtos fabricados pela empresa avaliada.



**Figura 18 – Exemplo de alguns produtos produzidos pela empresa avaliada.**

Fonte: Registrado pela autora.

Os artefatos cerâmicos denominados de tavelas são elaborados utilizando um tipo de mistura de argila diferente dos artefatos denominados de blocos. A sinterização dos blocos ocorre a uma temperatura média de 900°C, enquanto que as tavelas são sinterizadas a uma temperatura média de 915°C.

Todos os dados produtivos da empresa são registrados e lançados diariamente em um software de gestão adquirido pela empresa. A quantidade de RCV gerada foi avaliada a partir de um relatório extraído deste software. O controle de cada peça produzida e rejeitada é realizado a partir da massa estimada de cada peça. Na Figura 19 são apresentados exemplos de peças avariadas, ou seja, do RCV.



**Figura 19 - Peças avariadas após processo de sinterização**

Fonte: Registrado pela autora.

O atual destino final do RCV gerado na empresa é seu encaminhamento às zonas rurais, onde estão localizadas as jazidas de extração de argila, e as propriedades agropecuárias do grupo empresarial. O resíduo é utilizado para a pavimentação das ruas de acesso às propriedades.

### **3.1.1 Amostragem do resíduo cerâmico**

Todo o RCV da empresa é disposto em coletores específicos para esse material.

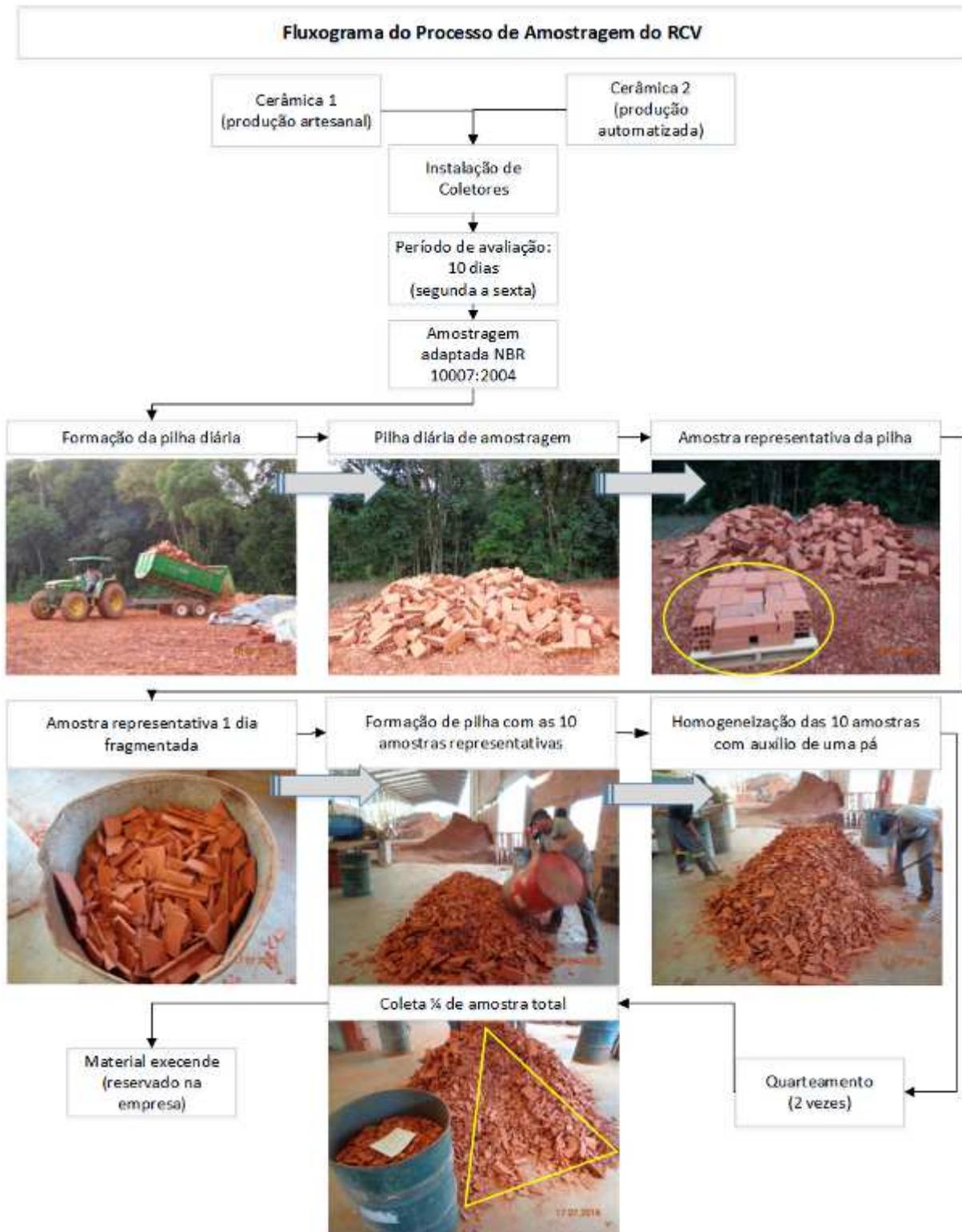
Quando os coletores alcançam sua capacidade, são esvaziados em um local a céu aberto no pátio da empresa. A pilha fica disposta no pátio até alcançar um montante mínimo necessário para completar o volume de uma caçamba de caminhão. Neste momento o RCV é carregado e encaminhado à sua disposição final.

Para a amostragem do resíduo cerâmico foi adotado o procedimento descrito a seguir:

- a) para iniciar o procedimento de amostragem, os coletores foram todos esvaziados e formou-se uma pilha com este material que foi encaminhado para seu destino final habitual;

- b) a coleta do RCV foi iniciada com os materiais oriundos do processo de classificação (controle de qualidade) no dia 6 de junho de 2015;
- c) todo o RCV gerado, elaborados com diferentes composições de argilas e sinterizado a diferentes gradientes de temperatura foi tratado em conjunto, devido a essa prática representar a realidade das empresas no geral, inclusive na empresa avaliada. A empresa formou uma pilha para o RCV gerado em cada dia;
- d) o projeto foi executado por 10 dias, de segunda à sexta-feira, entre os dias 6 e 17 de junho de 2015. No sábado e no domingo não é realizada a etapa de controle de qualidade, desta forma não ocorre o descarte de peças avariadas;
- e) foi realizada a amostragem do RCV na pilha de acondicionamento temporário, ainda no pátio da empresa, devido às dificuldades de acesso as diferentes zonas de disposição. Foram coletados aproximadamente 160 kg de material, durante cada um dos 10 dias do procedimento de amostragem. Como a empresa não possuía balança, a massa diária foi estimada na massa das peças que foram amostradas. Ao final, a quantidade de RCV coletado foi de aproximadamente 1.600 kg. O procedimento de amostragem seguiu as instruções da NBR 10007:2004 (ABNT, 2004), porém sofreu uma adaptação devido às características do material. A separação da amostra representativa teve que ser executada de forma manual, devido a característica do resíduo inviabilizar o uso de qualquer instrumento previsto pela norma;
- f) o RCV referente a cada dia de coleta foi fragmentado com o auxílio de um martelo, separando-se a amostra representativa de cada dia em um recipiente;
- g) foi realizado o procedimento de quarteamento do material amostrado com o uso de uma pá, para seleção do RCV utilizado no estudo. A amostra final de estudo foi composta por 100 kg de material;
- h) o material excedente do procedimento de quarteamento foi reservado na empresa, para contraprova;

O procedimento de amostragem do RCV está apresentado de forma detalhada no fluxograma da Figura 20.



**Figura 20 - Fluxograma detalhando o processo de amostragem do RCV na empresa objeto de estudo**

Fonte: Elaborado pela autora.

## 3.2 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO

### 3.2.1 Piloto de Moagem

No intuito de se estabelecer o tempo ideal de moagem e obter uma boa resposta de finura, com o menor consumo de energia possível realizou-se um projeto piloto de moagem. Seguiu-se a metodologia já empregada por Sebastiany (2014) para a cominuição do material.

O procedimento consiste na fragmentação manual do RCV com a utilização de um martelo. Em seguida, o resíduo foi submetido a dois processos de moagem. O primeiro processo de moagem ocorreu em um laminador da Verdés Ltda, Modelo 080, com distância entre os rolos de, aproximadamente 3,0 mm, ilustrado na Figura 21.



a) Laminador



b) Abertura entre rolos de aproximadamente 3 mm.

**Figura 21 - Moinho de rolos**

Fonte: Registrado pela autora.

O segundo processo de moagem foi realizado em um moinho de bolas, onde foram beneficiados 3,0 kg de cerâmica, utilizando 5,0 kg de bolas de porcelana. Na Figura 22 é apresentado o moinho de bolas da Servitech Serviços Técnicos e Representações Ltda, Modelo CT – 240/B e o RCV após o processo de moagem.



a) Moinho de bolas



b) RCV moído em moinho de bolas por 1 hora.

**Figura 22 - Moinho de bolas**

Fonte: Registrado pela autora.

Para o projeto piloto foram cominuídos aproximadamente 28 kg de RCV, todo o material foi submetido ao processo de moagem no laminador. Posteriormente foram separadas quatro frações de 3 kg de RCV, que foram submetidas ao processo de moagem no moinho de bolas durante os períodos de tempo de 45 min, 1 h, 1,5 h e 2 h.

A Figura 23 apresenta as características granulométricas do RCV após cada uma das etapas de cominuição do material.



a) RCV fragmentação manual com martelo



b) RCV moído no moinho de rolos



c) RCV cominuído no moinho de bolas 1 hora.

**Figura 23 – Tamanho de partícula do RCV nas 3 etapas de beneficiamento do projeto piloto de moagem**

Realizadas as etapas de moagem, separou-se uma fração de cada tempo de moagem que foi submetido a um processo de peneiramento manual com auxílio de um pincel na peneira nº 200 com abertura de malha de 0,075 mm, conforme apresentado na Figura 24, para ensaios de granulometria a laser.



**Figura 24 - Peneiramento manual do RCV com auxílio de um pincel**

Fonte: Registrado pela autora.

Os resultados de granulometria a laser de cada tempo de moagem podem ser observados na Tabela 30A e na Figura 44A em apêndice.

Sebastiany (2014) utilizou como referência a NBR 12653:2012, que em seus requisitos físicos determinava que o material retido na peneira com abertura de malha de 45  $\mu\text{m}$  deveria ser  $\leq 34\%$ . O autor constatou através de ensaios de granulometria a laser que as cerâmicas calcinadas a 700°C e o metacaulim cumpriam as recomendações da norma. As cerâmicas calcinadas a 900°C e 1000°C não atenderam ao requisito de finura da norma, pois apresentaram 42% de partículas superiores a 45  $\mu\text{m}$  no ensaio de granulometria a laser.

Tendo em vista a ressalva feita por Sebastiany (2014) e a alteração da NBR 12653:2014 que diminuiu o percentual de material retido na peneira com abertura de malha de 45  $\mu\text{m}$  de  $\leq 34\%$  para  $\leq 20\%$ , realizou-se o ensaio de finura conforme prescrito na NBR 15894:2010 parte 3 e constatou-se que o RCV, objeto deste estudo, não atendia ao requisito de finura da norma. Por este motivo adicionou-se ao processo de beneficiamento do RCV uma etapa de moagem do RCV passante na peneira nº 200 pelo tempo de 20 minutos em um

moinho excêntrico, da BP Engenharia Indústria e Comércio Ltda, Modelo CB2 – T, conhecido como periquito.

Desta forma, o RCV utilizado no estudo foi submetido a 5 etapas de beneficiamento, ilustradas de forma sucinta na Figura 25.

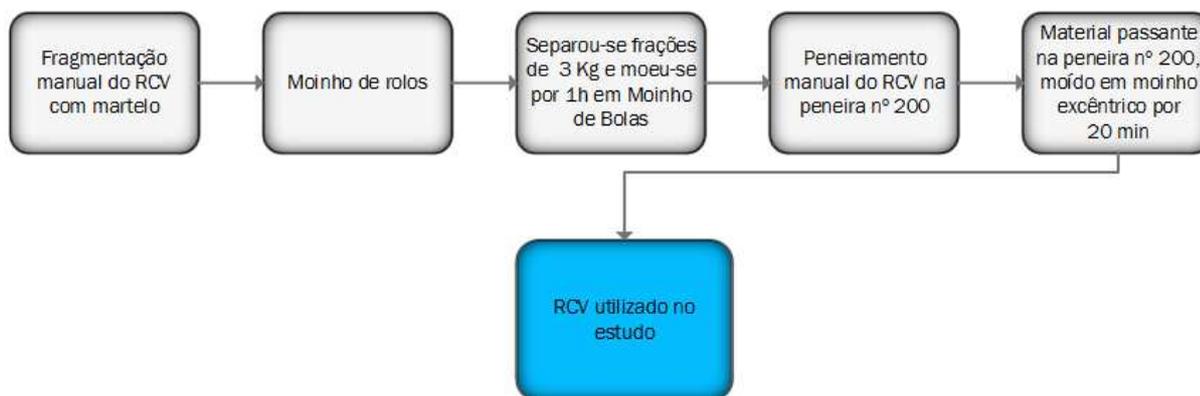


Figura 25 – Etapas de beneficiamento do RCV

### 3.3 MATERIAIS

#### 3.3.1 Aglomerantes

Foram utilizados para a realização dos ensaios de resistência à compressão desta pesquisa os seguintes aglomerantes:

- cimento CP II-F-32, conforme prescrições da NBR 5752:2014 e NBR 15894:2010. O cimento CP II-F-32 também foi utilizado para a preparação das pastas para a análise térmica;
- $\text{Ca(OH)}_2$  - P.A., conforme prescrições da NBR 5751:2015;
- CH-I, para a produção de argamassas de acordo com a NBR 5751:2015. Sebastiany (2014) utilizou o CH-I ao invés do  $\text{Ca(OH)}_2$  para a produção das argamassas conforme NBR 5751. No intuito de comparar resultados com Sebastiany (2014) foram produzidas argamassas utilizando CH-I.

#### 3.3.2 Material Pozolânico

- metacaulim conforme prescrições da NBR 15894:2010, NBR 5751:2015, NBR 5752:2014 e para a formulação das pastas de análise térmica. Para o presente estudo foi utilizado o metacaulim HP ULTRA.
- RCV, conforme prescrições da NBR 5752:2014, NBR 5751:2015 e NBR 15894:2010 e para a formulação das pastas de análise térmica.

### 3.3.3 Areia

As Normas NBR 5751:2015, NBR 5752:2014 e NBR 15894:2010 indicam o uso de areia normal conforme NBR 7214:2012, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo.

De acordo com Recena (1994), não existem diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão simples de argamassas produzidas com areia do Guaíba em relação a argamassas produzidas com areia do IPT.

Recena (1994) menciona em seu estudo que utilizou o mesmo procedimento utilizado pelo IPT. O autor realizou o peneiramento da areia, obtendo quatro frações definidas como o material passante na peneira 2,4 mm e retido na peneira 1,2 mm, o material passante na peneira 1,2 mm e retido na peneira 0,6 mm, o material passante na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0,3 mm e o material passante na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0,15 mm. Após peneiramento, Recena (1994) imergiu cada fração em solução de hidróxido de sódio (Na(OH)) a 1% durante 24 horas para a remoção da matéria orgânica e posteriormente lavou essas frações em água corrente. Após a lavagem cada fração foi seca em estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C por 72 horas, após o período de secagem, a areia foi mantida no laboratório por 24 horas para resfriamento.

Para a preparação das argamassas do presente estudo foi utilizada areia convencional da Bacia do Rio Jacuí/RS submetida ao procedimento utilizado por Recena (1994) de peneiramento mecânico nas frações granulométricas previstas pela NBR 7214:2012 (1,2, 0,6, 0,3 e 0,15mm). Cada fração foi lavada em água corrente com auxílio da peneira com abertura de malha correspondente a granulometria da fração, garantindo assim a uniformidade granulométrica da areia e isentando-a de material pulverulento. Posteriormente cada fração foi seca em estufa e reservada em recipiente limpo e fechado até o momento da moldagem.

Em relação ao procedimento adotado por Recena (1994), no presente abdicou-se do processo de imersão da areia convencional em solução de Na(OH), devido a geração de um efluente com um potencial altamente agressivo ao meio ambiente.

A Figura 26 ilustra a diferença entre a areia do IPT e a areia convencional utilizada no presente estudo.



**Figura 26 - Comparação entre areia do IPT e areia convencional utilizada no estudo**

O método proposto por Recena (1994) para utilização do padrão secundário de areia já foi utilizado por outros autores como Cordeiro (2009) e Young (2010).

### 3.3.4 Água

A água utilizada nos ensaios foi oriunda do Serviço Municipal de Água e Esgotos (SEMAE) do município de São Leopoldo/RS.

### 3.3.5 Aditivo

O aditivo utilizado para a preparação das argamassas conforme prescrições da NBR 5752:2014 e NBR 15894:2010 foi o aditivo superplastificante Glenium® 51.

## 3.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização dos materiais foram separados em caracterização química e física e mineralógica. Quanto à caracterização química foram utilizadas as técnicas de espectrometria de Fluorescência de Raios X, Perda ao Fogo e teor de umidade. Já em relação à caracterização física, foram realizados ensaios de área superficial específica, massa específica, granulometria por difração a laser e finura. No que diz respeito à caracterização mineralógica foram realizados ensaios de Difração de Raios X.

### 3.4.1 Caracterização química

#### 3.4.1.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A NBR 12653:2014 estabelece requisitos químicos que o material deve atender para que este possa ser classificado como um material pozolânico. Torna-se fundamental a

realização de ensaios de FRX para conhecer a composição química dos materiais, e mediante os resultados obtidos verificar o atendimento aos requisitos previstos na norma.

Os ensaios de FRX foram realizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMAT) da Unisinos. O cimento CP II-F-32, o metacaulim, o RCV e a argila foram analisados quantitativamente, já a CH-I e o  $\text{Ca(OH)}_2$  - P.A. foram analisados qualitativamente utilizando o método de energia dispersiva, EDS. O equipamento utilizado para determinar a composição química dos materiais foi Espectrômetro de FRX da marca Shimadzu modelo EDX-720.

#### 3.4.1.2 Perda ao Fogo (PF)

A NBR 12653:2014 estabelece em seus requisitos químicos, um valor máximo de PF para o material ser enquadrado como pozolana. Os ensaios de PF foram realizados no LCVMAT da Unisinos, utilizando como referência a norma ABIFA CEMP-120:2003. Essa característica foi avaliada para o cimento, o metacaulim e o RCV.

#### 3.4.1.3 Teor de Umidade

A NBR 12653:2014 especifica o teor máximo de umidade que um material deve apresentar para poder ser classificado como uma pozolana. A mesma norma determina que o ensaio de umidade seja realizado conforme instruções da NBR NM 24.

Os ensaios de umidade foram realizados para o metacaulim e para o RCV no LCVMAT da Unisinos.

### 3.4.2 Caracterização Física

#### 3.4.2.1 Área Superficial Específica

Os ensaios de área superficial específica foram determinados através do método BET em equipamento TriStar II Plus da Micromeritics®. Os ensaios foram realizados no LCVMAT da Unisinos para o cimento, a CH-I, o  $\text{Ca(OH)}_2$  - P.A., o metacaulim e o RCV.

#### 3.4.2.2 Massa Específica

O ensaio se faz necessário, devido a necessidade de realização de um cálculo de compensação de massa do material pozolânico em relação ao  $\text{Ca(OH)}_2$  P.A. exigido pela NBR 5751:2015 para dosar a argamassa a ser ensaiada.

Foram determinadas as massas específicas do cimento, da CH-I, do  $\text{Ca(OH)}_2$  - P.A., do metacaulim e do RCV.

Embora as normas que orientam o presente estudo especifiquem que a massa específica seja determinada pela NBR NM 23, este procedimento gera efluentes. No caso do cimento, por exemplo, é necessário o uso do reagente xilol. Os efluentes necessitam de um tratamento para serem lançados no meio ambiente. A picnometria por gás hélio é uma técnica de determinação de massa específica não destrutiva e que não gera efluentes.

Para o presente estudo, a massa específica dos materiais foi determinada utilizando a técnica da Picnometria por gás hélio em Picnômetro modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics®. Os ensaios foram realizados no LCVMAT da Unisinos.

#### 3.4.2.3 Granulometria por difração a laser

O ensaio de granulometria por difração a laser foi realizado em granulômetro a laser da Microtrac modelo S3550 no LCVMAT da Unisinos. O ensaio foi realizado no intuito de identificar a dimensão média das partículas do cimento, da CH-I, do  $\text{Ca(OH)}_2$  - P.A., do metacaulim e do RCV (em seus diferentes processos e tempos de moagem).

#### 3.4.2.4 Finura

A NBR 12653:2014, nos seus requisitos físicos, estabelece que o material seja submetido a um ensaio de finura conforme NBR 15894:2010 – parte 3. O ensaio de finura foi realizado de acordo com as prescrições da norma, para o metacaulim e para RCV submetido a dois processos distintos de beneficiamento. O beneficiamento proposto por Sebastiany (2014) onde se utilizou o RCV passante na peneira nº 200 (abertura de malha de 0,075mm). Também foi submetido ao ensaio o RCV passante na peneira nº 200 (abertura de malha de 0,075mm) e submetido a um processo de moagem por 20 minutos em moinho excêntrico.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos.

### 3.4.3 Caracterização Mineralógica

#### 3.4.3.1 Difração de Raios X (DRX)

A análise de DRX foi realizada no intuito de avaliar a estrutura cristalina dos materiais. Os ensaios foram realizados no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em um difratômetro de raios X da marca Siemens, modelo D5000.

Os ensaios foram realizados nas amostras de cimento, de CH-I, de metacaulim, de RCV e na massa de argila não sinterizada obtida através de uma peça recém extrusada na empresa.

A amostra de argila foi seca em estufa e posteriormente moída em um gral de ágata até que grãos não fossem mais sentidos ao toque.

### **3.5 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA**

#### **3.5.1 Condutividade Elétrica**

Conforme Luxán et al. (1989), para a realização do ensaio os materiais foram secos em estufa a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5$  até a constância de massa.

Procedeu-se conforme o método, em um becker de 600 ml adicionou-se 200 ml de solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  P.A. Esta foi mantida à constância de temperatura ( $40 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ). Em seguida, introduziu-se um agitador magnético e um condutivímetro à solução, medindo-se a condutividade inicial da solução. Em seguida, adicionou-se 5,0 g do material a ser testado, mantendo-se a agitação da mistura constante por 120 segundos, ao final mediu-se a condutividade final da solução. Quanto maior a diferença da condutividade da solução, maior terá sido a reatividade do material.

O ensaio de condutividade elétrica foi realizado para as amostras de RCV e metacaulim, ambas em triplicata. Os ensaios foram realizados no LCVMAT da Unisinos em condutivímetro DM-32 da Digimed.

#### **3.5.2 Resistência à Compressão e Índice de Atividade Pozolânica (IAP)**

No intuito de avaliar a atividade pozolânica do RCV através de ensaios de resistência à compressão, e determinar o IAP foram moldados corpos de prova conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Quantidade de corpos-de-prova moldados para os ensaios de resistência à compressão

Ensaio	CPs moldados	Material	Critério a ser atendido	Total de CPs do ensaio	Idades dos ensaios	Total de CPs para a pesquisa
NBR 5751:2015 CH-I	8	Metacaulim	$\geq 6\text{MPa}^*$	16	7, 28, 63 e 91 dias	64
	8	RCV	$\geq 6\text{MPa}^*$			
NBR 5751:2015 Ca(OH) <sub>2</sub> - P.A.	6	Metacaulim	$\geq 6\text{MPa}^*$	12	7, 28	24
	6	RCV	$\geq 6\text{MPa}^*$			
NBR 5752:2014	8	Referência (Ref)	-	56	7, 28, 63 e 91 dias	224
	8	Metacaulim – 20% - (Meta_20%)	$\geq 90\%^{**}$			
	8	Metacaulim – 25% - (Meta_25%)	$\geq 90\%^{**}$			
	8	Metacaulim – 35% - (Meta_35%)	$\geq 90\%^{**}$			
	8	RCV – 20% - (RCV_20%)	$\geq 90\%^{**}$			
	8	RCV – 25% - (RCV_25%)	$\geq 90\%^{**}$			
	8	RCV – 35% - (RCV_35%)	$\geq 90\%^{**}$			
NBR 15894:2010	8	Referência	-	24	7 dias	24
	8	Metacaulim	$\geq 105\%^{**}$			
	8	RCV	$\geq 105\%^{**}$			
Total de CPs						336

\* Resistência a Compressão

\*\* Índice de Atividade Pozolânica

Com relação às idades de ensaio de resistência a compressão, a NBR 5751: 2015 estabelece que os corpos-de-prova sejam rompidos aos 7 dias. Contudo, para comparar resultados com a pesquisa desenvolvida por Sebastiany (2014), os corpos-de-prova foram ensaiados aos 7, 28, 63 e 91 dias para o aglomerante CH-I. Como a NBR 5751:2015 prevê a utilização do aglomerante Ca(OH)<sub>2</sub> - P.A., foram moldados corpos-de-prova utilizando o aglomerante previsto na norma, e ensaiados aos 7 e 28 dias.

Já a NBR 5752:2014 define a idade de ensaio aos 28 dias, porém os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28, 63 e 91 dias, com a finalidade de comparar resultados com os obtidos por Sebastiany (2014), e verificar o desempenho pozolânico dos materiais em idades mais avançadas.

Em relação aos percentuais de substituição nas argamassas de cimento, a literatura apresenta o percentual de 20% como percentual de substituição do cimento pelo RCV que atinge resultados satisfatórios (GONÇALVES, 2005; VIEIRA, 2005; TYDLITÁT et al., 2012; VEJMELKOVÁ et al., 2012 ; MEIRA et al., 2014). Já a NBR 5752:2014 estabelece que o percentual de cimento a ser substituído é de 25%. E no intuito de comparar de forma

indireta os resultados obtidos com os resultados apresentados por Sebastiany (2014), foi realizado o ensaio também com o teor de substituição de 35%.

O IAP é calculado através dos resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Para calcular o IAP é necessário aplicar a fórmula:

$$\text{Icimento} = \frac{F_{cB}}{F_{cA}} \cdot 100$$

**Equação 1**

Onde:

Icimento = é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado, expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro.

$F_{cB}$  = é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa);

$F_{cA}$  = é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A), aproximada ao ao décimo e expressa em megapascals (MPa);

A NBR 15894:2010 apresenta os requisitos que o metacaulim deve atender para ser utilizado como um material pozolânico. A norma prevê que seja realizado o ensaio de resistência a compressão aos 7 dias e que seja realizado o cálculo de IAP nos mesmos critérios da NBR 5752:2014, porém com uma substituição de 15% do cimento pelo metacaulim. O valor do IAP deve ser  $\geq 105\%$ . Levando em consideração que a NBR 15894:2010 é uma norma específica para o metacaulim, um material pozolânico já consagrado, moldou-se argamassas com 15% de substituição do cimento por RCV no intuito de comparar resultados.

### **3.5.3 Análises Térmicas**

Para o presente estudo utilizou-se a metodologia empregada por Dweck (2009) para preparação das pastas para análise térmica. Foram utilizados os seguintes materiais: água deionizada, cimento Portland CP II-F-32, metacaulim e o RCV. Foram preparadas três pastas para análise térmica, uma pasta referência (1), composta por cimento e água. Uma pasta formulada com 25% de substituição do cimento por metacaulim e água (2) e uma terceira pasta formuladas com 25% de substituição do cimento por RCV e água (3).

Para a preparação das pastas 2 e 3 o material substituinte foi previamente homogeneizado por 2 min, seguindo o procedimento adotado pela NBR 5752:2014. A água

foi pesada dentro do saco plástico no qual foi realizada a mistura do material e a cura. O cimento foi adicionado à água e foi realizada a homogeneização manual do material por 1 minuto. Posteriormente a embalagem foi hermeticamente fechada e mantida em sala com temperatura controlada na faixa dos  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 28 dias.

A relação água/aglomerante da mistura foi de 0,55, por representar a relação água/aglomerante que apresentou os melhores resultados em relação à formação de produtos hidratados e água total combinada no estudo realizado por Neves Junior et al. (2013).

Aos 28 dias, as pastas foram imersas em acetona e inseridas em uma embalagem contendo sílica gel, para secagem. A moagem do material ocorreu em uma embalagem plástica hermeticamente fechada, para evitar a carbonatação da amostra.

As análises térmicas foram realizadas no Laboratório de Materiais Poliméricos - LaPol da UFRGS, em equipamento TGA Q50 TA Instruments. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , partindo da temperatura ambiente a  $900^{\circ}\text{C}$ , em atmosfera de nitrogênio, para evitar a carbonatação da amostra.

Os resultados dos ensaios de TG/DTG são transformados, com a finalidade de que os valores de perda de massa nas temperaturas "T" (que refere-se ao pico de decomposição do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , no intervalo entre  $350^{\circ}\text{C}$  e  $450^{\circ}\text{C}$ ) sejam obtidos em base de massa inicial do cimento, conforme metodologia proposta do Dweck et al., (2013).

Para que os valores de perda de massa nas temperaturas "T" sejam obtidos em base de massa inicial de cimento, no método, o cálculo inicia com a determinação da massa percentual da amostra, em base de massa calcinada, conforme mostra a Equação 2

$$M, cb = \frac{M, ib}{M_c, ib} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$M, cb$  = massa percentual na temperatura "T", em base de massa calcinada;

$M, ib$  = massa percentual na temperatura "T", obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra;

$M_c, ib$  = massa percentual da amostra calcinada a  $900^{\circ}\text{C}$ , obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

A partir da Equação 3, a massa percentual da amostra, calculada em base de massa calcinada ( $M, cb$ ) é transformada a partir da massa de cimento calcinado, com base na massa inicial de cimento.

$$M, cim = M, cb \times \frac{Mc, cim}{100} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$M, cim$  = massa percentual na temperatura "T", com base na massa inicial de cimento;

$Mc, cim$  = massa percentual de cimento calcinado a 900°C, com base na massa inicial de cimento;

Quando ocorre a adição de outros materiais (agregados) em pastas de cimento ou argamassas, a fração de massa dos óxidos de cimento originais presentes na amostra calcinada pode ser estimada conforme a Equação 4.

$$f_{oxcim, ib} = \frac{(M_{cim} \times Mc, cim)}{((M, cim \times Mc, cim) + \sum_{k=1}^k (M_k \times M_{ck, ib}))} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$f_{oxcim, ib}$  = fração de massa de óxidos originais do cimento presentes no resíduo calcinado a 900°C, com base na massa inicial da amostra;

$M_{cim}$  = massa de cimento utilizada na composição da pasta/argamassa;

$M_k$  = massa de agregado "K" utilizado na composição da pasta/argamassa;

$M_{ck, ib}$  = massa percentual de agregado "K" calcinado a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

Para obter a massa percentual de cada composição na base de massa calcinada de cimento, utiliza-se a Equação 5.

$$M_{f, cbf} = \frac{100 \times \frac{M_{f, ib}}{M_{f, cif}}}{f_{oxcim, ib}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$Mf, cbf$  = massa percentual da composição na temperatura "T", em base de massa de cimento calcinado;

$Mf, if$  = massa percentual da composição na temperatura "T", obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra;

$Mf, cif$  = massa percentual da composição calcinada a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

Por fim, a exemplo do previsto na Equação 2, os resultados de perda de massa das pastas de cimento/argamassas, obtidos em base de massa calcinada, são transformados em base de massa inicial de cimento ( $Mf, cim$ ) através da Equação 6.

$$Mf, cim = Mf, cbf \times \frac{Mc, cim}{100}$$

Equação 6

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta etapa do estudo, serão apresentados e discutidos os resultados em relação à geração de RCV no primeiro momento, em seguida serão apresentados os resultados referentes às caracterizações do metacaulim e do RCV, e por fim os ensaios de avaliação da atividade pozolânica.

### 4.1 GERAÇÃO DE RCV

Com base nos dados extraídos do software de gestão da empresa, foi possível tomar conhecimento sobre os dados produtivos e a quantidade de RCV gerado na empresa. Essas informações estão apresentadas na Tabela 17.

**Tabela 17 – Dados produtivos e de geração de RCV da empresa objeto do estudo.**

Mês/Ano	CERÂMICA 1			CERÂMICA 2		
	Produto Acabado (t)	RCV Gerado (t)	RCV (%)	Produto Acabado (t)	RCV Gerado (t)	RCV (%)
41.791,0	4.651,9	764,7	14,1	4.256,2	200,8	4,5
41.821,0	5.109,0	707,9	12,2	4.659,8	157,7	3,3
41.852,0	4.827,4	661,9	12,1	4.260,2	124,7	2,8
41.883,0	4.881,1	418,6	7,9	4.965,5	47,0	0,9
41.913,0	5.378,5	286,4	5,1	5.463,0	2,8	0,1
41.944,0	4.711,8	347,9	6,9	5.110,4	24,6	0,5
41.974,0	2.471,3	202,9	7,6	3.539,1	7,5	0,2
42.005,0	3.184,8	57,3	1,8	4.665,5	82,3	1,7
42.036,0	4.141,0	581,1	12,3	5.711,6	38,6	0,7
42.064,0	3.989,6	575,6	12,6	5.265,3	56,9	1,1
42.095,0	4.197,0	188,8	4,3	5.654,5	193,7	3,3
42.125,0	3.947,2	402,4	9,3	5.950,5	83,1	1,4
42.156,0	3.924,8	383,7	8,9	4.918,4	151,5	3,0
<b>Total:</b>	<b>55.415,2</b>	<b>5.585,4</b>		<b>64.420,0</b>	<b>1.180,2</b>	
<b>Média</b>	<b>4.262,7</b>	<b>429,2</b>	<b>8,8</b>	<b>4.955,4</b>	<b>90,1</b>	<b>1,8</b>

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme dados apresentados na Tabela 17 é possível observar que na cerâmica 1 foram produzidos no período analisado um total de 55.415,22 toneladas de cerâmicas, com uma média de 4.262,71 toneladas/mês. No mesmo período foram geradas 5.585,36 toneladas de RCV, com uma média de aproximadamente 429 toneladas/mês. Desta forma, analisando os valores médios apontados da produção de artefatos cerâmicos com a geração de RCV, é possível afirmar que o percentual médio mensal de geração de RCV na cerâmica 1 foi de 8,8%. Já na Cerâmica 2 foram produzidas no mesmo período 64.420,03 toneladas de cerâmica, que resultou em uma produção média de 4.955,39 toneladas/mês. Foram geradas

1.180,23 toneladas de RCV no período, em média 90,09 toneladas/mês. O percentual médio mensal de geração de RCV desse sistema de produção foi 1,8%.

A Figura 27 apresenta os dados relacionados ao período em relação à produção e geração de RCV em um comparativo entre as cerâmicas 1 e 2.

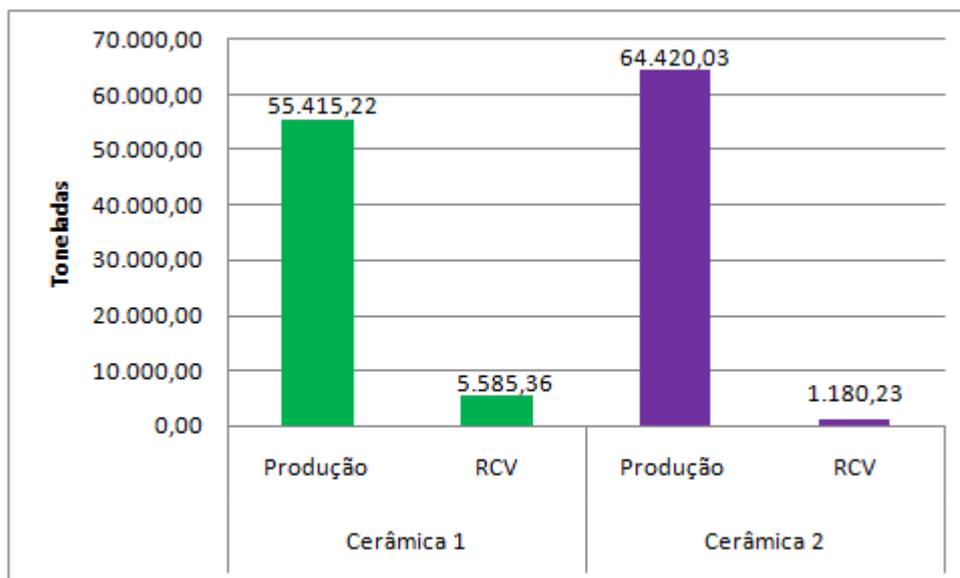


Figura 27 – Comparativo entre a Produção e geração de RCV nas cerâmicas 1 e 2

O sistema Cerâmica 1 apresentou uma geração de RCV em média 376 % maior que o sistema Cerâmica 2. Tal fato pode ser explicado pelo sistema produtivo adotado, na Cerâmica 1 utiliza-se uma produção mais artesanal, com bastante interferência humana no processo em relação à Cerâmica 2 que utiliza um sistema automatizado, onde a interferência humana, ocorre basicamente na operação de máquinas e no controle do processo.

Diante dos resultados obtidos, os mesmos estão em acordo com os apresentados por Sales e Alferes Filho (2014), cujo percentual apresentado foi de 1,6% e o relatório EELA (2013) que apresentou o resultado de < 1% de geração de RCV para os fornos do tipo túnel, o mesmo utilizado pela empresa objeto de estudo. Desta forma é possível inferir que os dados apresentados pelos autores foram obtidos a partir de uma empresa com um processo produtivo similar ao empregado na Cerâmica 2.

Já o percentual de geração de RCV obtido através do processo produtivo Cerâmica 1 (8,8%) ficou mais próximo do percentual de 10%, admitido por Gonçalves (2007), e apresentado por Viera (2005) e Vieira, Souza e Monteiro (2004) como percentual máximo de geração de RCV das empresas cerâmicas. Grigoletti (2001) expõe que cerca de

30% das empresas avaliadas apresentavam um percentual de geração de RCV entre 5% a 10%, caso em que se enquadra a Cerâmica 1.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados das análises físico-químicas e mineralógicas do metacaulim e do RCV utilizados. Os resultados dos ensaios de caracterização dos aglomerantes (cimento, CH-I e  $\text{Ca(OH)}_2$  P.A.) são apresentados no apêndice A.

### 4.2.1 Caracterização Química

#### 4.2.1.1 Fluorescência de Raios X

Os ensaios de FRX foram necessários para avaliar o atendimento do metacaulim e do RCV aos requisitos químicos da NBR 12653:2014. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos via FRX do metacaulim e do RCV.

**Tabela 18 - Composição em óxidos, por FRX do metacaulim e do RCV**

Elemento	Metacaulim	RCV
$\text{Al}_2\text{O}_3$	32,81	20,83
$\text{SiO}_2$	57,50	62,05
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,13	11,31
$\text{MgO}$	1,00	0,62
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,18	0,12
$\text{SO}_3$	0,03	ND
$\text{K}_2\text{O}$	2,58	1,38
$\text{Na}_2\text{O}$	0,04	1,37
$\text{CaO}$	0,10	0,46
$\text{TiO}_2$	1,06	1,21
$\text{MnO}$	ND	0,14
PF	2,57	0,5

ND – Não detectado

Fonte: Elaborado pela autora.

Tanto para o metacaulim como para o RCV pode-se verificar que os elementos majoritários são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em menor proporção. Enquanto que o metacaulim apresenta 57,50% de  $\text{SiO}_2$ , 32,81%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 2,13%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o RCV apresenta 62,05% de  $\text{SiO}_2$ , 20,83%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 11,31% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

O metacaulim e o RCV do presente estudo encontram-se dentro da faixa indicada por Santos (1989). O autor afirma que os materiais argilosos utilizados como pozolanas apresentam em geral teores de 50% a 65% de  $\text{SiO}_2$  e 17% a 38% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

A NBR 12653:2014 estipula que a soma dos óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  seja igual ou superior a 70%. Nesse quesito tanto o metacaulim que apresentou soma destes

elementos de 92,44%, como o RCV que apresentou soma de 94,19% dos mesmos elementos atenderam a exigência da norma.

Em relação ao teor mais elevado de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no metacaulim, quando comparado ao RCV, Santos (1989) afirma que a atividade pozolânica aumenta com o aumento do teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Massazza (1993) também alerta para presença e a influência de compostos de alumina na reação pozolânica. A influência do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na reação pozolânica também é citada por Matias, Farias e Torres (2014a). Tais afirmações sugerem que o metacaulim, no que se refere à sua composição química, que possui 12% mais  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em relação ao RCV, apresentará uma maior atividade pozolânica.

O resultado da soma dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  alcançado para o RCV ficou dentro do intervalo obtido pela literatura, a exemplo, Sales e Alferes Filho (2014) obtiveram um valor de 76,76% (valor inferior) para o RCV. Já Gonçalves (2007) apresentou o valor de 97,11% (valor superior). A diferença entre os valores pode ser explicada devido às diferentes regiões de origem das argilas, como solos com proporções mineralógicas distintas.

Os teores de  $\text{SO}_3$  e de elementos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) são controlados pela NBR 12653:2014. A presença desses elementos em quantidades superiores às indicadas na norma pode afetar as matrizes cimentícias. Taylor (1997) explica que a presença desses elementos em quantidades superiores às especificadas pode causar expansões deletérias em matrizes cimentícias. Valores elevados de  $\text{SO}_3$  podem provocar expansão durante a hidratação das partículas de cimento Portland (KANNING, 2013).

Para o teor de  $\text{SO}_3$ , a NBR 12653:2014 exige que o valor seja igual ou inferior a 4% para as pozolanas de classe N. Tanto o metacaulim, quanto o RCV atenderam ao limite da norma. O metacaulim possui um traço de  $\text{SO}_3$  (0,03%) enquanto que no RCV a sua presença não foi detectada. Desta forma, o teor de  $\text{SO}_3$  não deve influenciar de forma significativa nas propriedades das argamassas/pastas produzidas.

No requisito álcalis disponíveis em  $\text{Na}_2\text{O}$ , a NBR 12653:2014 estabelece como limite máximo, o valor de 1,5%. O metacaulim apresentou um teor de álcalis disponíveis em  $\text{Na}_2\text{O}$  igual a 0,06%, enquanto que o RCV apresentou um teor de 1,38%. Ambos os materiais atenderam ao limite estipulado pela norma. A quantidade de  $\text{Na}_2\text{O}$  é responsável pelo aparecimento de eflorescência ou da ocorrência da reação álcali agregado (KANNING, 2013). Altos teores de álcalis podem desencadear reações expansivas nas matrizes cimentícias, podendo provocar fissurações, perda de resistência, aumento da deformação, redução da

durabilidade da estrutura (SILVA; KUPEIMAN, 2008). Diante do exposto, no quesito das álcalis disponíveis em  $\text{Na}_2\text{O}$ , o metacaulim tende a apresentar um melhor desempenho em relação ao RCV.

#### 4.2.1.2 Perda ao Fogo

Para os materiais pozolânicos a NBR 12653:2014 especifica que a PF deve ser igual ou inferior a 10% para pozolanas de classe N. Analisando os resultados apresentados na Tabela 19, verifica-se que o metacaulim apresentou uma PF de 2,57%, já o RCV apresentou uma PF de 0,5%, desta forma, ambos os materiais atenderam ao limite estipulado pela norma.

O valor de PF apresentado pelo RCV evidencia a eficiência do processo de sinterização empregado pela indústria cerâmica objeto do estudo. Tanto o metacaulim quanto o RCV apresentaram valores de PF superiores aos obtidos por Sebastiany (2014), que obteve uma PF de 2,03% para metacaulim. Já para as argilas calcinadas Sebastiany (2014) obteve valores de PF de 0,21% e 0,22% para as argilas calcinadas a 900°C e 1000°C, respectivamente. Segundo Kanning (2013), a PF apresenta como resultado a quantidade de material não totalmente sinterizado e influencia na quantidade de água de amassamento das argamassas e concretos.

#### 4.2.1.3 Teor de umidade

Quanto a umidade do material, a NBR 12653:2014 exige que esta seja igual ou inferior a 3%. Os ensaios resultaram em valores de teor de umidade de 1,1% para o metacaulim e 0,8% para o RCV. Ambos os materiais atenderam ao requisito. Cordeiro et al. (2010) encontraram para a argila calcinada em laboratório exatamente o mesmo valor para o teor de umidade 0,8%.

A Tabela 19 apresenta de forma sucinta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química e as especificações da norma para cada propriedade. É possível observar que tanto o metacaulim, quanto o RCV atenderam a todos os requisitos químicos para a classificação do material como uma pozolana classe N.

**Tabela 19 – Atendimento aos requisitos químicos da NBR 12653:2014**

Propriedade	Limite NBR 12653:2014 (%)	Metacaulim (%)	RCV (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70$	92,44	94,19
$\text{SO}_3$	$\leq 4$	0,03	ND
Teor de Umidade	$\leq 3$	1,1	0,8
Perda ao Fogo	$\leq 10$	2,57	0,50
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$	$\leq 1,5$	0,06	1,38

Fonte: Elaborado pela autora.

## 4.2.2 Caracterização Física

### 4.2.2.1 Área superficial específica

Os resultados de área superficial específica do metacaulim e do RCV são apresentados na Tabela 20. Comparando os materiais é possível observar que o RCV apresenta um valor de área superficial maior em relação ao RCV. Conforme Cunha (2012), uma maior área superficial contribui para uma maior atividade pozolânica do material.

**Tabela 20 - Resultados de área superficial específica do metacaulim e do RCV**

Material	Área Superfície Específica BET (m <sup>2</sup> /g)
Metacaulim	16,63
RCV	17,81

Fonte: Elaborada pela autora.

Diante dos resultados de área superficial específica, onde o RCV apresentou valor de área superficial superior ao metacaulim em 7,2%, existiria um indício de melhor atividade pozolânica do RCV em relação ao metacaulim quando esta característica é considerada de forma isolada.

Quanto à área superficial específica, a literatura apresenta diferentes valores, por exemplo, Gonçalves (2007) obteve para o RCV área superficial BET de 18.987 m<sup>2</sup>/kg, superior ao obtido pelo presente estudo. O metacaulim utilizado no presente estudo apresentou valor 16,63 m<sup>2</sup>/g, valor inferior ao obtido por Sebastiany (2014), que obteve para o metacaulim o valor 27,00 m<sup>2</sup>/g, valor que supera em 60% o valor obtido para o metacaulim do estudo.

Levando em consideração o exposto por Matias, Faria e Torres (2014a) que afirmam que elevados valores de superfície específica podem potencializar o potencial pozolânico do RCV. E que a atividade pozolânica a curto prazo está relacionada com a área superficial específica (MASSAZZA, 1993), seria possível inferir que diante deste requisito e considerado-o de forma isolada, o RCV apresentaria o melhor desempenho pozolânico. Já o metacaulim utilizado no presente estudo, tenderia a apresentar uma atividade pozolânica menor, quando comparada com os resultados obtidos por Sebastiany (2014).

De acordo com Battagin (2011), uma elevada área superficial melhora aspectos reológicos em função da otimização da distribuição granulométrica da pasta, trazendo benefícios na retenção de água, aumentando a coesão, redução da exsudação e segregação, facilitando operações de acabamento final. Carvalho (2010) afirma que quanto mais fina a

textura do material, mais elevada será a sua superfície específica, maior será a capacidade de retenção de água.

Em relação a área superficial específica, Pinheiro e Holanda (2010) assumem que o aumento da temperatura de sinterização das cerâmicas gera uma redução na sua área superficial específica. Afirmção que pode ser confirmada ao se analisar os dados de área superficial específica apresentados por Sebastiany (2014), que para argilas calcinadas a 700°C, 900°C e 1000°C obteve valores de área superficial específica na ordem de 16.891m<sup>2</sup>/g, 2.585m<sup>2</sup>/g e 874m<sup>2</sup>/g, respectivamente.

Porém os valores de área superficial específica obtidos para o RCV no presente estudo convergem com os obtidos por Sebastiany (2014). Tendo em vista que a temperatura de sinterização do RCV do estudo está no patamar entre 900°C e 950°C, os valores superiores de área superficial obtidos podem ser explicados pela otimização do processo de moagem. Sebastiany (2014) obteve os melhores resultados em relação à pozolanicidade para as argilas calcinadas a 700°C, que também apresentaram a maior área superficial específica.

O aumento nos níveis de substituição de cimento por um material pozolânico resulta em um aumento correspondente na área de superfície total a ser molhada pelo teor de água adicionado (CHEAH e RAMLI, 2012), aumentando o consumo de água da matriz. Walker e Pavía (2011) concluem que a área superficial específica é responsável por regular o consumo de água da pasta. Souza (2006) afirma que uma área específica maior reflete em uma maior reatividade, uma vez que a área de contato das partículas com a água é maior.

#### 4.2.2.2 Massa específica

No que diz respeito à massa específica, a Tabela 21 apresenta os valores de massa específica obtidos para o metacaulim e o RCV.

**Tabela 21 - Resultados de massa específica do metacaulim e RCV**

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Metacaulim	2,6423
RCV	2,7900

Fonte: Elaborado pela autora.

O RCV apresentou massa específica de 2,79 g/cm<sup>3</sup>, inferior a do cimento. Sendo assim, para que seja possível fazer a substituição do cimento é necessário realizar uma compensação de massa e não de volume (FASTOFSKI, et al., 2014). O mesmo ocorre para o metacaulim que atingiu uma massa específica de 2,64 g/cm<sup>3</sup>, inferior ao obtido para o RCV.

Quanto maior a massa específica do material, menor é a sua porosidade, e maior será a resistência proporcionada pelo material às argamassas.

Comparando os resultados com a literatura, é possível observar que a massa específica do RCV foi superior ao apresentado por Toledo Filho et al. (2007) e Lavat, Trezza e Poggi (2009) que obtiveram como massa específica para o RCV o valor de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, Meira et al. (2014) obteve valores de massa específica de 2,62 g/cm<sup>3</sup> e Fastofski et al. (2014) 2,51 g/cm<sup>3</sup>. Porém o valor de massa específica obtido foi inferior ao alcançado por Pinheiro (2008) que obteve 2,82 g/cm<sup>3</sup>. Esse resultado indica o RCV do presente estudo apresenta uma massa específica dentro da faixa apresentada pela literatura.

#### 4.2.2.3 Granulometria por difração a laser

Os resultados obtidos para a técnica de granulometria a laser vão ao encontro dos resultados do ensaio de área superficial específica. A Tabela 22 apresenta os resultados de granulometria a laser do metacaulim e do RCV.

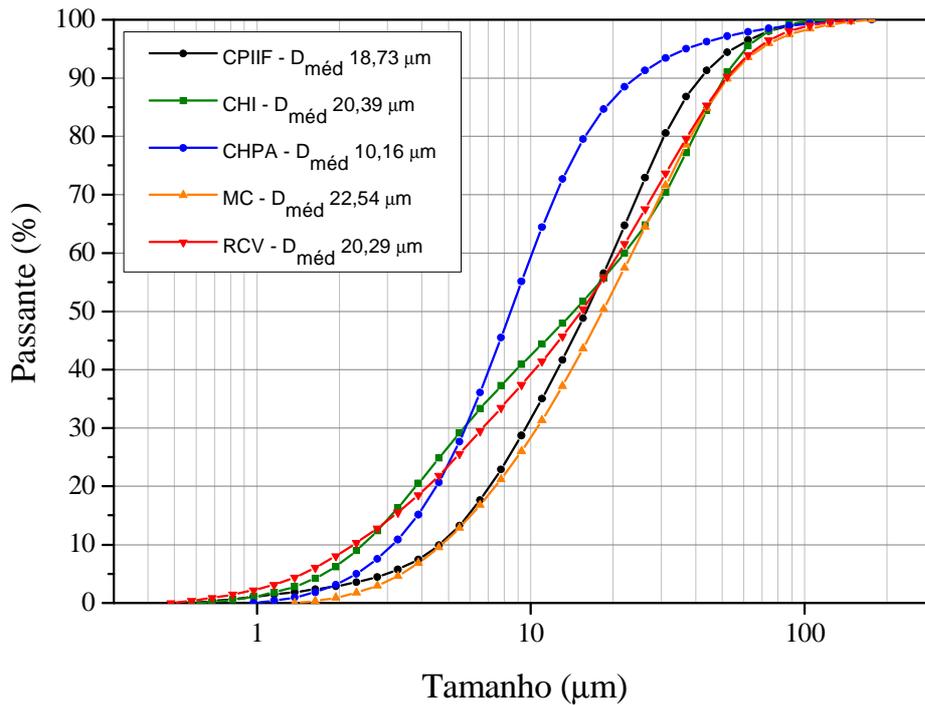
**Tabela 22 – Resultados da granulometria a laser do metacaulim e do RCV**

Análise granulométrica	Metacaulim (μm)	RCV (μm)
D <sub>10</sub>	4,74	2,26
D <sub>50</sub>	18,31	15,32
D <sub>90</sub>	52,59	51,83
Dimensão Média	22,54	20,29

Fonte: Elaborado pela autora.

O RCV apresentou partículas com dimensão média de 20,29μm, cujo 10% (D<sub>10</sub>) das partículas apresentaram diâmetro inferior a 2,26μm, 50% (D<sub>50</sub>) das partículas apresentam diâmetro inferior a 15,32μm e 90% (D<sub>90</sub>) das partículas apresentam diâmetro inferior a 51,83μm. Comparado ao metacaulim que apresentou dimensão média das partículas de 22,54μm, valores de D<sub>10</sub> de 4,74μm, D<sub>50</sub> de 18,31μm e D<sub>90</sub> de 52,59μm, o RCV apresentou partículas com dimensões menores, indicando que em função da granulometria o RCV tende a apresentar melhor desempenho pozolânico quando comparado ao metacaulim.

No intuito de apresentar uma comparação entre a granulometria atingida pelo RCV, com o metacaulim e os aglomerantes utilizados, a Figura 28 apresenta a distribuição granulométrica do RCV, do metacaulim e do cimento CP II-F-32, CH-I e do Ca(OH)<sub>2</sub> P.A.



**Figura 28 – Distribuição granulométrica dos materiais**

Fastofski et al. (2014) obtiveram diâmetro de partículas maiores para o RCV quando comparado ao presente estudo. O processo de moagem empregado no presente estudo garantiu uma otimização da finura do material em relação ao utilizado por Sebastiany (2014) e Fastofski et al. (2014).

#### 4.2.2.4 Finura

A NBR 12653:2014 especifica em seus requisitos físicos, que o material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ , seja igual ou inferior a 20 %, além disso, a norma recomenda que o teor retido esteja na faixa de 10% a 15%, preferencialmente.

Os resultados do ensaio de finura vão ao encontro dos ensaios de área superficial específica e granulometria a laser. Os resultados indicam que ambos os materiais atendem ao limite especificado na norma. O metacaulim apresentou um teor de 10% de resíduo na peneira e o RCV apresentou um teor de 7%, conforme pode ser observado na Tabela 23.

**Tabela 23 - Resultados do ensaio de finura**

Limite NBR 12653:2014	Metacaulim	RCV	RCV (método proposto por Sebastiany (2014))
$\leq 20 \%$	10%	7%	26%

Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio de finura também foi realizado para um RCV beneficiado pelo método proposto por Sebastiany (2014), cujo resultado apresentou 26% de resíduo na peneira, valor

que não atende ao limite estipulado pela NBR 12653:2014, justificando desta forma, o procedimento adicional de moagem utilizado no presente estudo.

### 4.2.3 Caracterização Mineralógica

#### 4.2.3.1 Difração de Raios X

Os resultados do ensaio de Difração de Raios X podem ser observados na Figura 29.

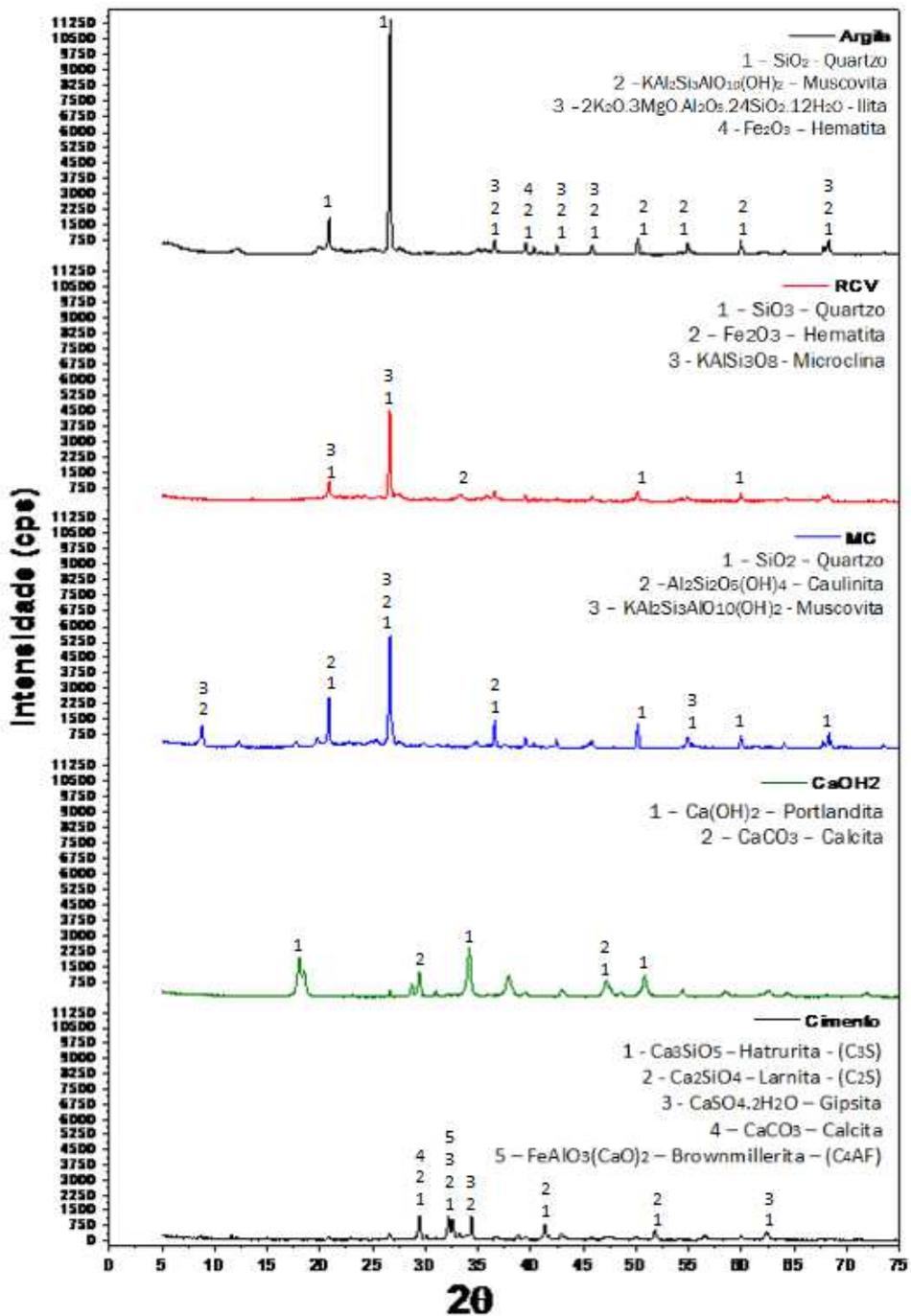


Figura 29 - Resultados da Difração de Raios X

Através dos difratogramas são apresentadas as composições mineralógicas dos picos cristalinos dos materiais envolvidos na pesquisa. Os dados foram convertidos em uma mesma escala para facilitar a comparação.

Serão discutidos os resultados de DRX da argila, do RCV e do metacaulim. Nestes três materiais percebe-se a presença predominante de picos cristalinos de Quartzo.

Para avaliar o efeito da sinterização sobre a estrutura mineralógica da argila, são apresentados os difratogramas, tanto da massa de argila não sinterizada como do RCV. O difratograma da argila apresentou o pico característico de quartzo, além dos picos de Muscovita, ilita e hematita, em acordo com o difratograma apresentado por Cabral et al. (2008).

Através do difratograma da massa de argila não sinterizada foi possível verificar a presença da fase ilita, fato que caracteriza a argila como ilitica, conforme indicado por Kazmierczak (2010), que são mais comumente utilizadas para a produção de artefatos de cerâmica vermelha.

Comparando os difratogramas apresentados na Figura 29 é possível verificar que a argila quando ativada termicamente (gerando o RCV), não apresenta halo de amorfismo, As fases de quartzo e hematita estão presentes em ambas as amostras. A muscovita e a ilita presentes na argila não estão mais presentes no RCV, que passa a apresentar picos de microclina, tal transformação de fases pode ter ocorrido devido às transformações que ocorrem no processo de sinterização (KAZMIERCZAK, 2010).

No difratograma do metacaulim (MC) apresentado também na Figura 29 além dos picos de quartzo foram identificados os picos relativos a caulinita e a muscovita.

Ao analisar o difratograma do metacaulim e comparar com os difratogramas apresentados pela literatura observa-se uma maior presença de picos cristalinos, principalmente quando comparado ao difratograma apresentado por Sebastiany (2014) e Hoppe Filho et al. (2015). Através deste ensaio pode-se inferir que a amostra de metacaulim utilizada no presente estudo apresenta maior grau de cristalinidade em relação ao utilizado pelos demais autores. Uma estrutura mais cristalina pode comprometer o desempenho pozolânico do material, uma vez que atividade pozolânica de um material está diretamente ligada ao seu grau de amorfismo (MASSAZZA, 1993).

Ao analisar os dados de caracterização do metacaulim e do RCV, é possível afirmar que ambos atendem aos requisitos químicos para serem classificados como pozolanas de Classe N, conforme especificações da NBR 12653:2014.

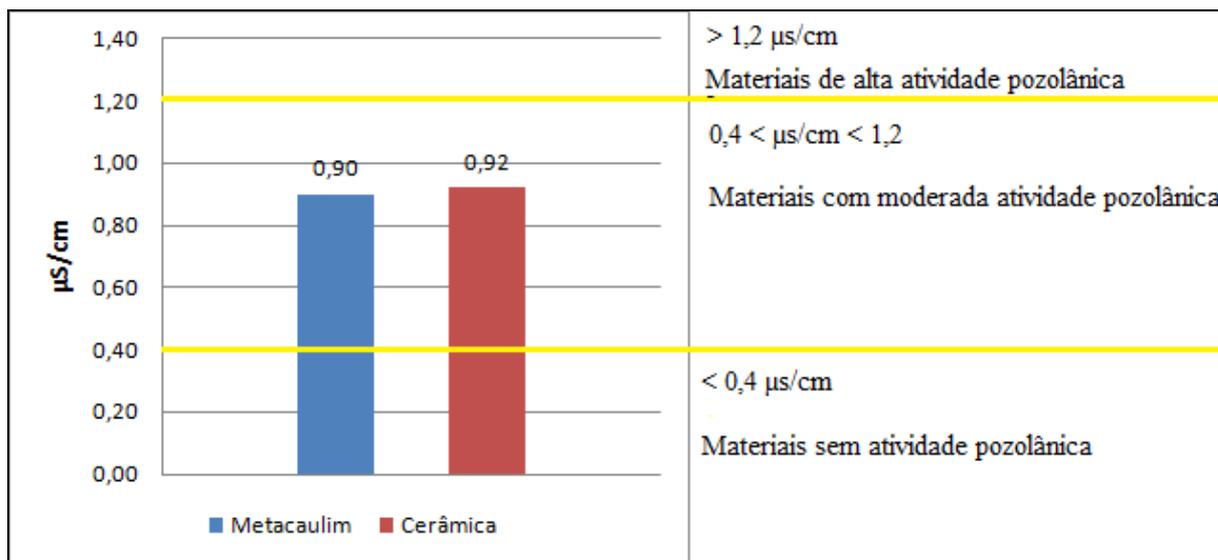
Quanto as características químicas, O RCV apresentou uma soma de óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  maior em relação ao metacaulim, porém o teor superior de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do metacaulim, pode promover uma maior atividade pozolânica nas amostras de metacaulim quando comparadas ao RCV. No que diz respeito aos valores de PF e de teor de umidade foram inferiores aos obtidos para o metacaulim. Quanto às características físicas, o RCV apresentou uma granulometria menor, uma área superficial específica e uma finura maior quando comparado ao metacaulim, adequadas conforme a literatura para garantir a atividade pozolânica do RCV. Já no que diz respeito a caracterização mineralógica, observou-se que o RCV é oriundo de uma argila do grupo ilita, que apesar de apresentar o halo de amorfismo, apresenta picos cristalinos que podem comprometer a atividade pozolânica do material.

Quanto ao metacaulim, observou-se que a área superficial obtida é inferior à apresentada pela literatura, e o difratograma obtido apresentou picos cristalinos mais definidos quando comparado aos apresentados pela literatura, fato que pode reduzir a atividade pozolânica do metacaulim quando comparado aos resultados apontados pela literatura.

### **4.3 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA**

#### **4.3.1 Condutividade Elétrica**

No ensaio de condutividade elétrica tanto o metacaulim quanto o RCV apresentaram resultados similares conforme ilustra a Figura 30. Estatisticamente não há diferenças significativas entre os materiais conforme pode ser observado no teste de variância apresentado na Tabela 31A, em apêndice. Ambos os materiais, foram classificados de acordo com os resultados obtidos no ensaio como materiais de moderada atividade pozolânica.



**Figura 30 – Resultado do ensaio de condutividade elétrica**

Ao comparar os resultados obtidos, com os apresentados por Sebastiany (2014), verifica-se que ambos os materiais apresentaram valores de condutividade elétrica inferiores. Sebastiany (2014) obteve como resultado o valor de  $2,8\mu\text{S}/\text{cm}$  para o metacaulim e  $1,7\mu\text{S}/\text{cm}$  para as argilas calcinadas a  $700^{\circ}\text{C}$ ,  $1,3\mu\text{S}/\text{cm}$  para as argilas calcinadas a  $900^{\circ}\text{C}$  e  $1,5\mu\text{S}/\text{cm}$  para as argilas calcinadas a  $1000^{\circ}\text{C}$ .

O resultado de condutividade elétrica inferior do metacaulim quando comparado ao apresentado por Sebastiany (2014) pode ser explicado devido a fatores como a menor área superficial específica e a estrutura com picos cristalinos mais definidos, quando comparado ao metacaulim utilizado pelo autor.

Quanto ao menor atividade pozolânica do RCV fatores como composição química podem ter contribuído para tais resultados. Como Sebastiany (2014) não apresentou dados quantitativos das amostras de argila calcinada, torna-se difícil a comparação dos resultados de forma direta. Diferenças podem ter sido relacionadas ao equipamento utilizado pelo autor para determinação da condutividade elétrica, foi distinto do utilizado no presente estudo.

Sebastiany (2014) utilizou para medição da condutividade elétrica das soluções, um condutímetro de marca Digimed, modelo DM 31. Este equipamento informa a condutividade das soluções em  $\text{mS}/\text{cm}$  (miliSiemens por centímetro) a  $25^{\circ}\text{C}$ . Como as tomadas de condutividade ocorreram com a solução a  $40^{\circ}\text{C}$ , segundo o autor, foi necessário converter os resultados obtidos, através da Equação 7:

$$\text{Cond. elétrica a } 40^{\circ}\text{C} = \text{Cond. elétrica a } 25^{\circ}\text{C} \times [1 + 0,019(40 - 25)] \quad \text{Equação 7}$$

#### 4.3.2 Índice de atividade pozolânica (IAP) com o cimento Portland

Os resultados de resistência à compressão, obtidos através dos ensaios realizados conforme NBR 5752:2014 e NBR 15894:2010 apresentaram grande variabilidade. A NBR 7215 prescreve que o desvio relativo máximo de 4 valores não pode exceder 6%. Como fator de ajuste se optou por excluir os resultados que apresentavam o maior desvio relativo máximo, mantendo quatro resultados. Mesmo aplicando esse tratamento alguns resultados não conseguiram se enquadrar no valor de 6%, mesmo assim foram utilizados na apresentação dos resultados. Optou-se por apresentar os dados de resistência à compressão em formato de tabela, para facilitar a compreensão.

Os resultados dos ensaios conforme NBR 5752:2014 são apresentados a seguir indicando a tensão obtida para cada corpo de prova, a tensão média e o desvio relativo máximo obtido.

A Tabela 24 apresenta os resultados das argamassas ensaiadas aos 7, 28, 63 e 91 dias.

Tabela 24 - Resistência à compressão das argamassas ensaiadas aos 7, 28, 63 e 91 dias pela NBR 5752:2014

Composição Argamassa	7 dias			28 dias			63 dias			91 dias		
	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)
Referência	32,36	33,27	2,75	43,81	43,15	-1,52	50,44	49,88	-1,13	40,03	38,16	-4,88
	34,05		-2,33	41,42		4,01	47,78		4,22	37,39		2,02
	34,62		-4,04	44,04		-2,06	50,60		-1,45	35,92		5,89
	32,07		3,62	43,33		-0,43	50,70		-1,64	39,32		-3,03
Meta_20%	21,05	21,79	3,39	32,21	31,01	-3,86	45,67	44,59	-2,40	33,85	32,97	-2,66
	22,44		-3,00	30,21		2,58	45,12		-1,17	31,42		4,69
	23,00		-5,55	30,22		2,54	43,63		2,16	32,62		1,05
	20,67		5,16	31,40		-1,26	43,96		1,42	33,98		-3,08
RVC_20%	21,29	21,39	0,47	26,19	23,09	-13,40	43,15	43,28	0,28	29,31	30,07	2,51
	21,82		-2,03	21,54		6,71	44,12		-1,96	31,66		-5,30
	21,23		0,75	21,10		8,60	42,53		1,72	28,31		5,86
	21,21		0,82	23,53		-1,91	43,30		-0,05	30,99		-3,07
Meta_25%	24,44	23,62	-3,51	38,36	41,34	7,21	40,22	40,71	1,20	34,25	32,75	-4,59
	21,72		8,03	43,95		-6,32	42,12		-3,47	31,69		3,22
	24,91		-5,48	41,71		-0,89	40,32		0,97	34,79		-6,23
	23,39		0,96	39,52		4,40	40,18		1,31	30,26		7,59
RVC_25%	17,70	18,66	5,14	26,55	26,54	-0,05	38,46	40,88	5,91	36,71	37,72	2,69
	18,19		2,49	26,64		-0,38	42,32		-3,52	40,47		-7,28
	18,50		0,83	23,98		9,67	41,68		-1,96	37,53		0,50
	20,24		-8,46	28,99		-9,24	41,05		-0,43	36,18		4,09
Meta_35%	27,51	27,77	0,93	27,11	25,15	-7,81	40,29	39,08	-3,10	37,78	39,44	4,21
	27,94		-0,61	21,18		15,77	37,14		4,97	38,88		1,41
	27,93		-0,59	26,60		-5,76	40,33		-3,20	40,48		-2,64
	27,69		0,27	25,70		-2,20	38,56		1,34	40,61		-2,98
RCV_35%	16,94	16,80	-0,87	32,07	32,65	1,79	34,64	35,57	2,61	36,35	39,13	7,12
	17,18		-2,25	31,75		2,76	35,81		-0,68	37,64		3,80
	16,57		1,38	33,69		-3,17	35,64		-0,20	40,74		-4,11
	16,51		1,73	33,11		-1,38	36,19		-1,73	41,80		-6,82

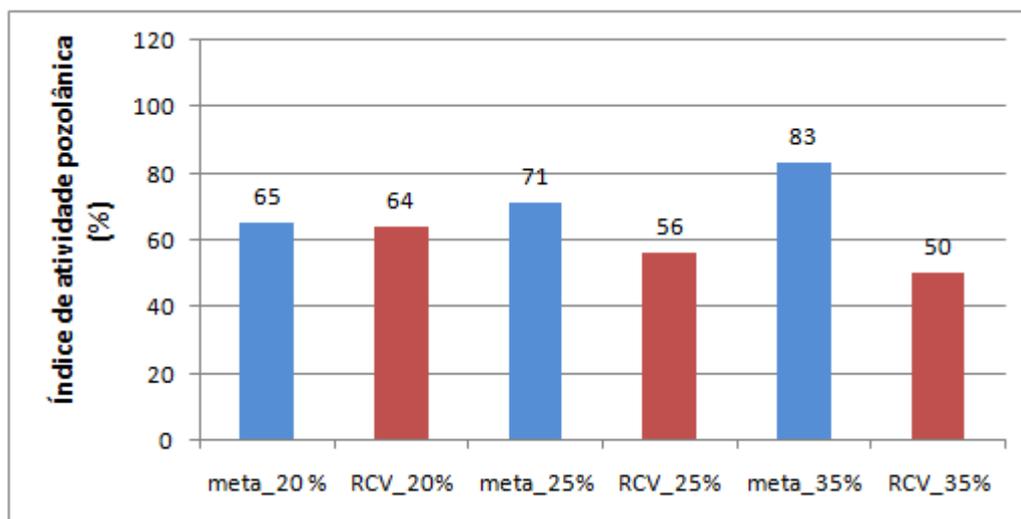
Ao avaliar os resultados das argamassas ensaiadas aos 7 dias, e comparar os valores de resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de substituição e diferentes materiais, em relação à argamassa referência, observa-se que a composição que apresentou o melhor desempenho foi a que possuía 35% de substituição de cimento por metacaulim, porém a mesma apresentou uma redução na resistência à compressão de 19,8% em relação ao referência (comparando valores de média).

Já aos 28 dias, a argamassa que apresentou o melhor desempenho comparado à argamassa referência foi a argamassa com 25% de substituição do cimento por metacaulim, que apresentou uma redução na resistência à compressão de 4,37%. A argamassa contendo 35% de substituição do cimento por RCV (que apresentou o melhor desempenho depois da Meta\_25%) apresentou uma redução de 32% na resistência à compressão (comparando valores de média).

Ao observar os resultados das argamassas ensaiadas aos 63 dias, verifica-se que as composições com 20% de substituição tanto de metacaulim, quanto de RCV apresentaram o melhor desempenho em relação as demais argamassas quando comparadas as argamassas referências, mesmo assim, ainda apresentaram redução na resistência à compressão na ordem de 11,8% para a argamassa com 20% de metacaulim e 15,2% para as argamassa com 20% de RCV (comparando valores de média). Para as demais argamassas a redução da resistência à compressão foi ainda maior, alcançando uma redução de 40% para argamassa com 35% de RCV.

Aos 91 dias observa-se que as argamassas referência apresentaram redução na resistência à compressão, esse comportamento é contrário ao esperado, onde o avanço da idade sugere incremento na resistência à compressão, principalmente na argamassa referência, que não possui adição de nenhum material que possa provocar esse tipo de comportamento. Pelo fato das argamassas ensaiadas aos 91 dias terem sido as primeiras a ser moldadas, pode ter ocorrido algum erro humano, que possa ter causado tal resultado ímpar. A redução da resistência à compressão também foi observada nas argamassas contendo 20% e 25% de substituição de ambos os materiais.

A partir dos resultados de resistência à compressão foi realizado o cálculo de IAP conforme indicado pela NBR 5752:2014 para cada idade ensaiada. A Figura 31, apresenta o IAP obtido a partir das resistências à compressão dos corpos de prova ensaiados aos 7 dias.



**Figura 31 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 7 dias**

Ao observar a Figura 31 pode-se verificar que o metacaulim apresentou de forma geral um IAP superior ao RCV, porém na composição de 20% de substituição, tanto de metacaulim, quanto de RCV, não apresentaram diferenças significativas em relação a resistência à compressão, conforme teste de variância apresentado na Tabela 32B, em apêndice. Já para as demais composições, as diferenças são significativas, conforme Tabela 33B e Tabela 34B.

Na sua composição química, o metacaulim apresenta valores de  $Al_2O_3$  superiores em 12% em relação ao RCV, sugerindo que do mesmo modo como na hidratação do cimento, os aluminatos se hidratam muito mais rapidamente que os silicatos (MEHTA; MONTEIRO, 2008), podendo a  $Al_2O_3$  ser responsável pelo melhor desempenho do metacaulim nas primeiras idades. A análise dos resultados também encontra suporte em Santos (1989), que afirma que as argilas contendo maiores teores de  $Al_2O_3$  proporcionam um metacaulim de maior atividade pozolânica.

Para as argamassas contendo metacaulim, Sebastiany (2014) obteve aos 7 dias um IAP de 108%, já para as argamassas contendo argilas calcinadas a 700°C, 900°C e 1000°C alcançou o IAP de 113,2%, 83,7% e 61,6%, respectivamente. Para as argamassas onde o autor fixou o teor de água e utilizou o aditivo superplastificante para correção da consistência (que é o método que se assemelha ao utilizado no presente estudo) obteve valores de IAP ainda maiores, na ordem 150,6% para o metacaulim, 130,2%, 99,9% e 76,1% para as argilas calcinadas a 700°C, 900°C e 1000°C, respectivamente.

Comparando os resultados de Sebastiany (2014) com os obtidos no presente estudo, é possível observar que tanto para o metacaulim, quanto para o RCV, o IAP obtido foi

inferior ao apresentado pelo autor. Resultados inferiores aos obtidos por Sebastiany (2014) já eram esperados para o metacaulim, devido aos resultados de caracterização e dos apontamentos da literatura. Quanto ao RCV, o autor concluiu em seu trabalho que a melhor atividade pozolânica foi desenvolvida por argilas calcinadas a 700°C. Diante da análise das características físicas das partículas das argilas calcinadas a 900°C e 1000°C, estas apresentam-se maiores e com área superficial menor, fatores que segundo a literatura não colaboram com a atividade pozolânica. Tendo em vista que o autor não apresentou dados quantitativos de análise química, não é possível afirmar qual fator pode ter provocado a maior atividade pozolânica das argilas calcinadas, quando comparadas ao presente estudo.

Atendendo a NBR 12653:2014, na Figura 32 são apresentados os valores de IAP obtidos para as argamassas ensaiadas aos 28 dias.

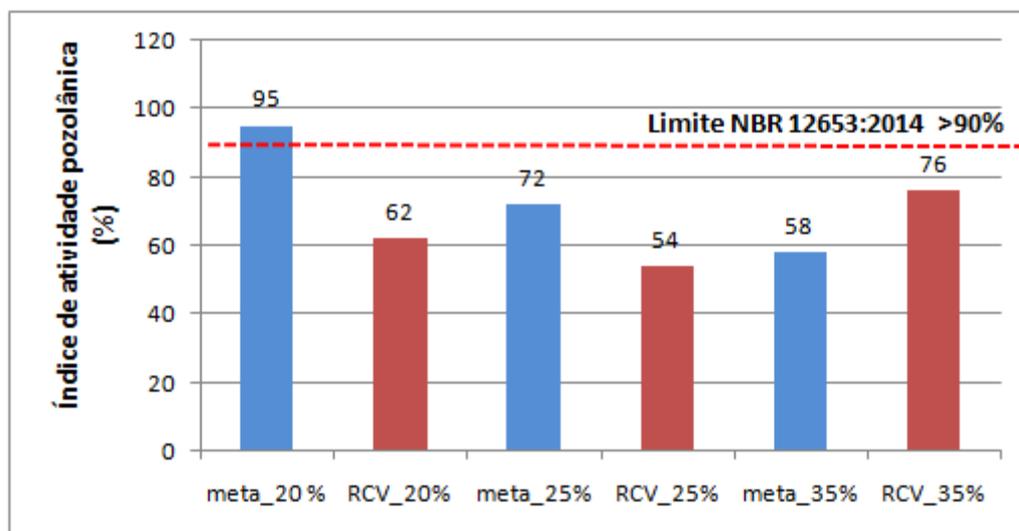


Figura 32 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 28 dias

Nos requisitos físicos da NBR 12653:2014, existe a exigência de que o material atinja um IAP igual ou superior a 90%, nas argamassas formuladas com 25% de substituição. Analisando a Figura 32 é possível verificar que nem o metacaulim, nem o RCV atingiram o IAP estipulado na referida norma. Desta forma, não seria possível enquadrar nenhum dos materiais como material pozolânico, mediante resultados alcançados no presente estudo. A argamassa contendo 20% de metacaulim foi a única que atingiu o limite estabelecido pela NBR 12653:2014. As demais composições não atingiram o limite.

Comparando os resultados com a literatura, é preciso salientar que os dados apresentados referem-se a versões anteriores da norma, onde as argamassas eram produzidas sob diferentes parâmetros (como já foi citado anteriormente) onde o teor de substituição era

de 35% (em volume). Diante dessa situação, serão comparados de forma indireta os resultados de 35% de substituição do presente estudo.

Gonçalves (2007) alcançou um IAP de 88% em seus ensaios com o RCV, através da caracterização apresentada pelo autor, cuja a soma de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foi igual a 97,11%, e o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foi de 25,49%, a temperatura de sinterização em torno de 850°C, uma área superficial de 18.987  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Todas essas características apresentam-se favoráveis para o maior desenvolvimento de atividade pozolânica do RCV utilizado pelo autor, quando comparado as características apresentadas pelo RCV objeto deste estudo.

Por outro lado, Sales e Alferes Filho (2014) obtiveram em seu estudo um IAP de 76,9%, valor similar ao obtido com os 35% de substituição do presente estudo. Comparando os resultados de caracterização do RCV apresentados pelos autores, onde a soma dos óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foi de 76,76%, e o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foi de 15,32%. No ensaio de finura obtiveram um valor de 7,5%, adequada para o uso como pozolana. Ao comparar o IAP de Sales e Alferes Filho (2014) e o obtido no presente estudo aos obtido por Gonçalves (2007), a menor atividade pozolânica pode estar relacionada com a soma de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e um teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menor, com a área superficial e com a temperatura de sinterização do material, que no estudo de Sales e Alferes Filho (2014) não é apresentada.

Cordeiro e Désir (2010), apesar de estudar uma argila caulínica, adequada para uso como pozolana conforme apresentado pela literatura, obtiveram um IAP de 77% para as argilas calcinadas a 950°C e um IAP de 94% para as argilas calcinadas a 650°C. Esses resultados tender a indicar que a temperatura de sinterização exerce influência sobre o potencial pozolânico das argilas calcinadas, conforme já indicado por Gonçalves (2005) e Dal Molin (2011). A soma de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentada por Cordeiro e Désir (2010) alcançou os 92 % e as argilas calcinadas apresentavam um teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 37,6%. Esta informação confronta a literatura, no que diz respeito, a elevados teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  promoverem um melhor desempenho pozolânico nos materiais.

Sebastiany (2014) obteve um IAP de 79,2% para o metacaulim, 86,40% para as argilas calcinadas a 700°C, 84,5% para argilas calcinadas a 900°C e 69,6% para as argilas calcinadas a 1000°C. Ao comparar os resultados de IAP entre as argilas calcinadas, é possível evidenciar o efeito da temperatura de sinterização sobre a pozolanicidade do material, apresentando comportamento similar aos resultados apresentados por Cordeiro e Désir (2010).

Ao comparar o desempenho do metacaulim aos resultados apresentados por Sebastiany (2014), o que chama a atenção é a elevada área superficial (27,00 m<sup>2</sup>/g), quando comparado ao metacaulim do presente estudo que apresentou valores de área superficial de 16,63 m<sup>2</sup>/g. Tendo em vista as informações obtidas na literatura, que relacionam a área superficial à pozolanicidade, pode este fator ter influenciado no menor desempenho do metacaulim utilizado no presente estudo.

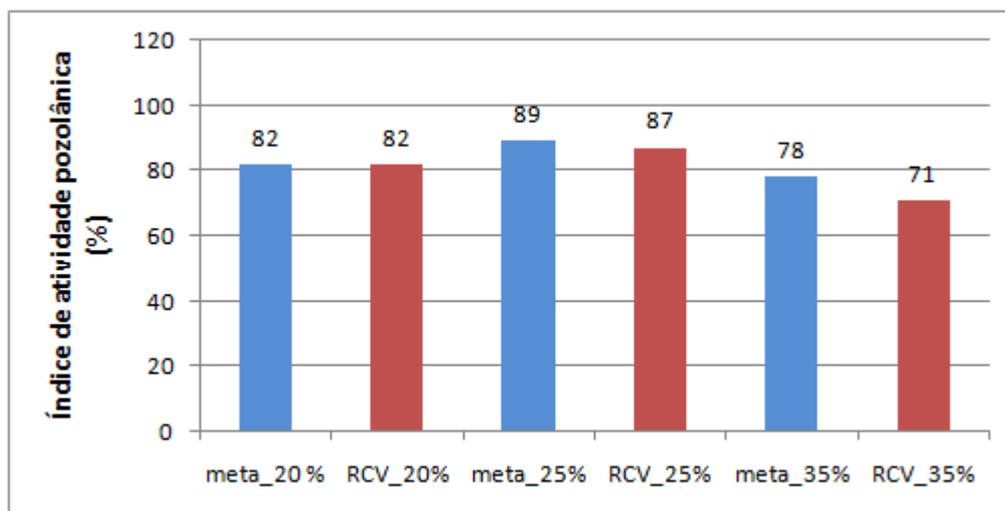
No que tange o IAP do RCV, quando comparado a literatura, observa-se que conforme apontado no estudo de Gonçalves (2007), onde se obteve o maior valor de IAP, a temperatura de sinterização foi inferior a utilizada no RCV do presente estudo, fator que pode ter exercido efeito sobre a estrutura do material. Outros fatores que podem ter contribuído para o melhor desempenho pozolânico do RCV de Gonçalves (2007), cuja soma dos óxidos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a área superficial foram superiores aos obtidos no presente estudo como já citado anteriormente.

Os resultados obtidos no presente estudo são superiores aos apresentados por Pinto et al. (2014) que obtiveram um IAP de 67% para as argamassas produzidas com RCV. O IAP alcançado pelo presente estudo, alcançou resultados superiores aos obtidos por Pinto et al. (2014) em 13,4%.

Vale ressaltar que todos os dados apresentados pela literatura tomavam por base a versão anterior da NBR 12653, cujo IAP aos 28 dias deveria ser  $\geq 75\%$  e que utilizava o valor de 35% (em volume) de substituição. Desta forma, novos ensaios se fazem necessários para verificar o atendimento do RCV e das argilas calcinadas à norma vigente.

Quanto à redução do valor de IAP em relação ao avanço da idade de 7 para 28 dias, um comportamento similar foi observado nas argamassas de metacaulim e argilas calcinadas a 700°C de Sebastiany (2014). Zhang e Malhotra (1995) também observaram a redução da resistência à compressão na produção de concretos contendo 10% de substituição do cimento por metacaulim. Os autores afirmam que os concretos desenvolveram nas idades iniciais maiores resistências à compressão em relação a idades avançadas, quando comparado ao concreto referência, porém aos 91 dias, o concreto referência e o concreto contendo 10% de metacaulim apresentaram valores resistência à compressão similares.

O IAP alcançado pelas argamassas aos 63 dias é apresentado na Figura 33.



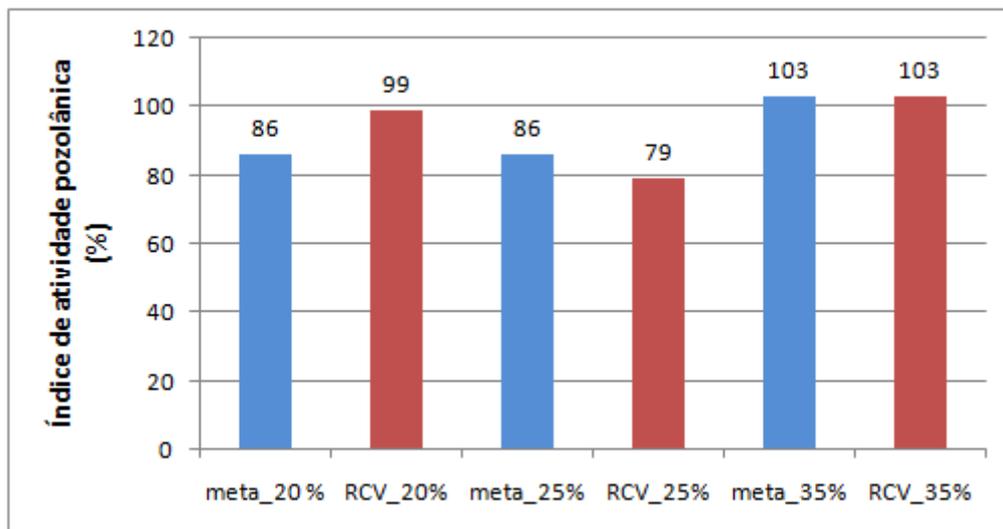
**Figura 33 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 63 dias**

Conforme pode ser observado na Figura 33, aos 63 dias, as argamassas apresentaram um comportamento paralelo ao teor de substituição utilizado, independente do material substituído, apenas nas argamassas com 35% de substituição, a diferença de resistência a compressão é significativa (teste de variância apresentado na Tabela 35). O melhor IAP para a idade de 63 dias, foi obtido para as argamassas com 25% de substituição, e o tipo de substituição não promoveu alterações significativas na resistência à compressão das argamassas.

Sebastiany (2014) atingiu valores de IAP para o metacaulim de 88,5%, já para as argilas calcinadas a 700°C, 900°C e 1000°C, o IAP atingido foi de 97,7%, 88,5% e 76,3%, respectivamente aos 63 dias. Como Sebastiany(2014) utilizou o percentual de substituição de 35% em volume, ao tomar como base de título de comparação, as argamassas com 35% de substituição percebe-se que o autor obteve melhores resultados ao relação ao obtidos no presente estudo.

Como a NBR 12653:2014 prevê que os ensaios da NBR 5752:2014 sejam realizados aos 28 dias, poucos são os estudos que realizam os ensaios em idades de 63 e 91 dias para a comparação dos resultados.

A Figura 34 apresenta o IAP atingido pelas argamassas aos 91 dias.

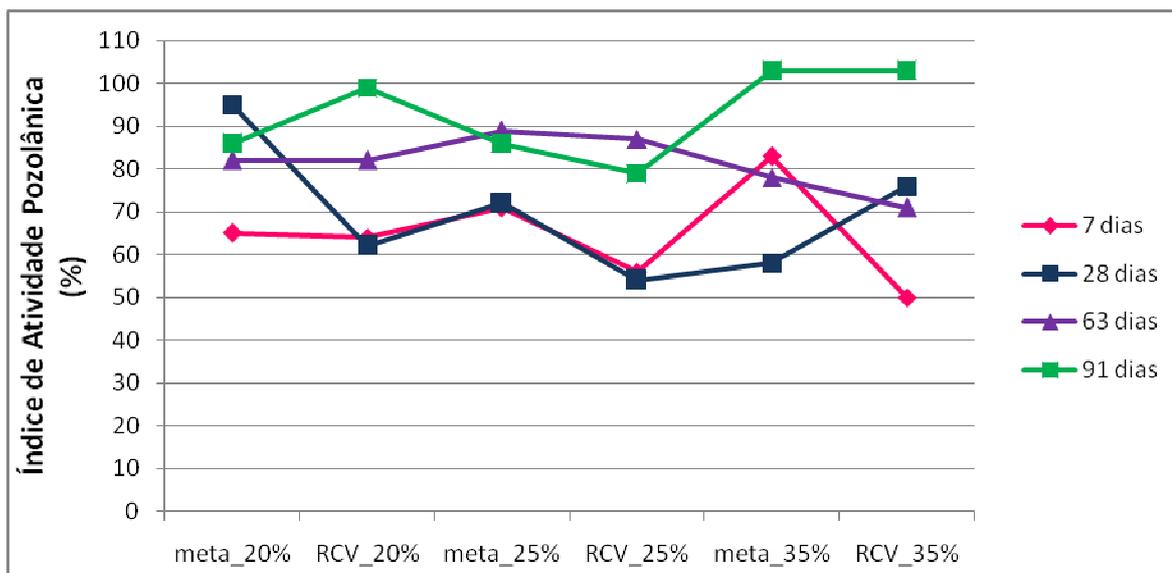


**Figura 34 - IAP conforme NBR 5752:2014 aos 91 dias**

Avaliando os resultados de IAP obtidos a partir desta pesquisa através dos ensaios de resistência à compressão, é possível verificar que aos 91 dias, o melhor IAP foi alcançado pelas argamassas com 35% de substituição, independente do material substituído. A argamassa com 20% de substituição do cimento pelo RCV apresentou o segundo melhor desempenho com um IAP de 99%. Mesmo o percentual de substituição de 35% tendo apresentado um valor de IAP superior as demais composições, não é possível afirmar que é o teor que apresenta os melhores resultados. Ao fazer a comparação direta entre as resistências à compressão, observa-se que a argamassa referência apresentou redução nos valores de resistência à compressão, como já discutido anteriormente, fator que afeta o cálculo do IAP de todas as composições.

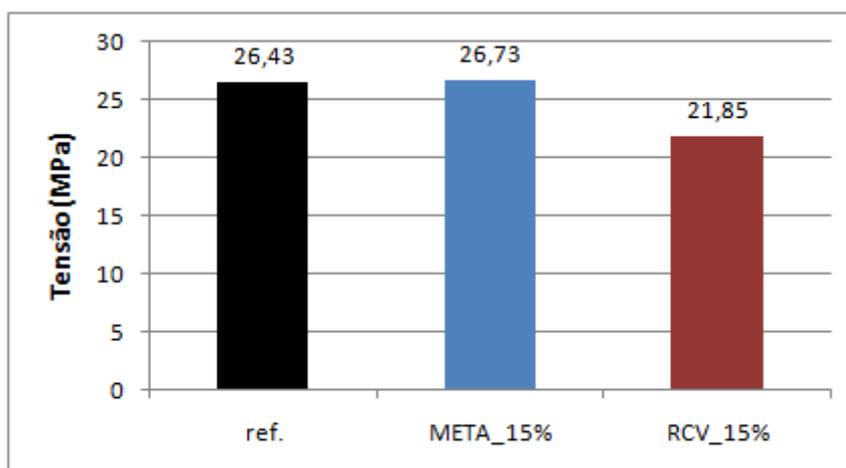
De modo geral o metacaulim e o RCV apresentaram um comportamento contrário ao exposto por O' Farrell et al. (2006) que verificaram que a resistência à compressão de suas argamassas diminui à medida que o nível de substituição aumenta.

Para fins de comparação das discussões já realizadas, a Figura 35 apresenta os valores de IAP nas diferentes idades para as diferentes composições de argamassa.



**Figura 35 - Comparativo da evolução do IAP nas diferentes idades para os diferentes teores de substituição**

Ainda no intuito de avaliar a atividade pozolânica do RCV e comparar seu desempenho ao metacaulim, serão apresentados os resultados do ensaio realizado conforme as prescrições da NBR 15894:2010. A Figura 36 apresenta os resultados de resistência à compressão, obtidos através de argamassas de cimento, com 15% de substituição.



**Figura 36 - Resistência à compressão ensaiado de acordo com a NBR 15894:2010 aos 7 dias**

Foi realizado cálculo de variância pelo método Anova (apresentados no apêndice B), para avaliar se a diferença entre as resistências à compressão das amostras de metacaulim e RCV foi significativa ou não. O cálculo apresentou como resultado que as diferenças na resistência à compressão não eram significativas, porém tecnicamente sabe-se que essas diferenças são significativas. Quando as argamassas de metacaulim e RCV são tratadas em conjuntos às argamassas referência, o teste de variância também apresenta como resultado, que as diferenças nas resistências à compressão não são significativas. Estatisticamente a

substituição de 15 % de cimento por metacaulim ou RCV não afeta de forma significativa os resultados de resistência à compressão no ensaio realizado aos 7 dias para o presente estudo.

Com base nos resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 36, foi realizado o cálculo do IAP de ambos os materiais. Os resultados do IAP estão ilustrados na Figura 37.

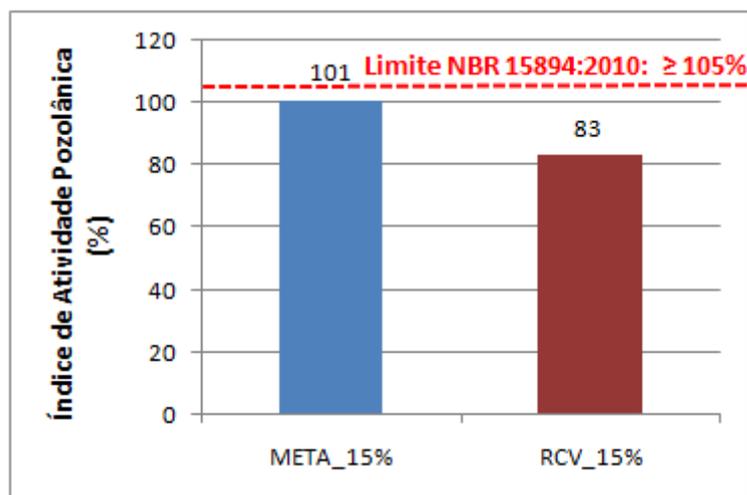


Figura 37 - Índice de atividade pozolânica aos 7 dias

A NBR 15894-1:2010 exige que o metacaulim apresente um valor de IAP igual ou superior a 105%, verifica-se que o metacaulim não atendeu ao limite estipulado na norma. Porém ao comparar os resultados obtidos com o teor de 15% de substituição, aos resultados do ensaio aos 7 dias através NBR 5752:2014, apresentado na Figura 31, verifica-se que o IAP obtido apresenta-se superior, apresentando indícios que o teor de 15% de substituição atinja o IAP de  $\geq 90\%$  aos 28 dias.

#### 4.3.3 Atividade pozolânica com a cal

A NBR 12653:2015 estabelece que argamassas produzidas com o  $\text{Ca(OH)}_2$ - P.A., ensaiadas aos 7 dias atinja uma resistência à compressão  $\geq 6$  MPa, para o material poder ser classificado como pozolânico. Através da Figura 38 é possível observar que ambos os materiais atingiram aos limites estipulados pela norma. Porém, as argamassas produzidas com o metacaulim apresentaram valor de resistência à compressão superior em relação às argamassas produzidas com o RCV em ambas as idades.

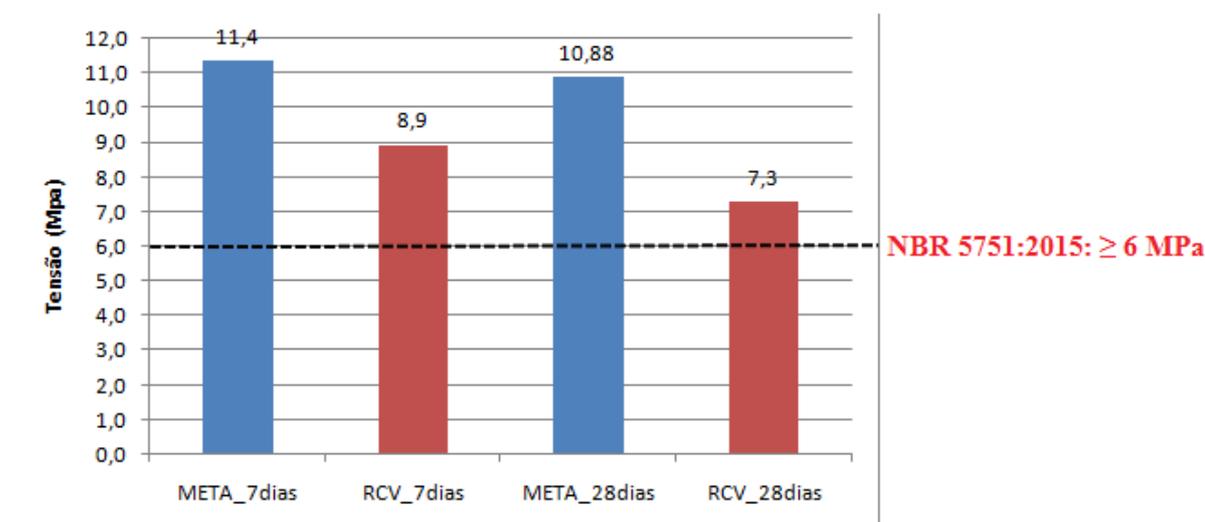


Figura 38 - Resistência a compressão de argamassas de  $\text{Ca(OH)}_2$  - P.A. aos 7 e 28 dias

Hoppe Filho et al. (2015) alcançaram a resistência máxima de 4,8 MPa para argamassas produzidas com cerâmicas, e 16 MPa para argamassas produzidas com metacaulim. O RCV do presente estudo atingiu maior resistência à compressão que as cerâmicas utilizadas por Hoppe Filho et al. (2015), porém as argamassas de metacaulim produzidas pelos autores obtiveram melhores resultados quando comparados ao presente estudo, os possíveis fatores para tal comportamento já foram abordados anteriormente.

Ao realizar o ensaio de pozolanicidade usando o  $\text{Ca(OH)}_2$  P.A., um produto específico de laboratório, com elevado grau de pureza, observa-se a atividade pozolânica do RCV. Tal atividade pozolânica também foi evidenciada nas argamassas moldadas usando a CH-I. Porém nas argamassas moldadas com CH-I, o metacaulim apresentou uma atividade pozolânica inferior às argamassas produzidas com RCV, conforme pode ser observado na Figura 39.

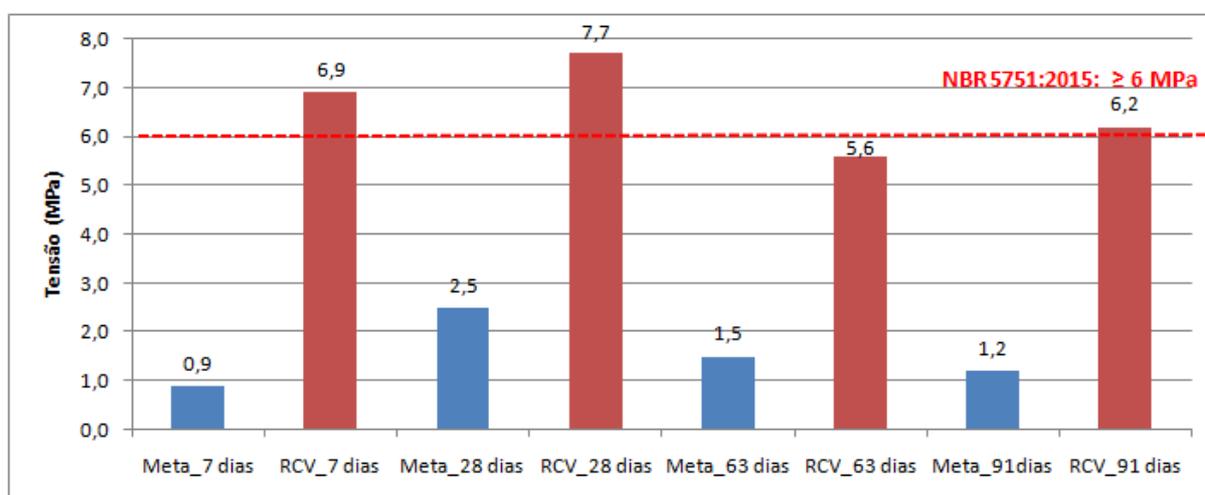


Figura 39 - Resistência à compressão de argamassas usando aglomerante CH I aos 7, 28, 63 e 91 dias

Nas argamassas produzidas com CH-I, o metacaulim apresentou uma resistência a compressão, que aos 7 dias, não alcançou 1 MPa. Já o RCV apresentou 6,9 MPa de resistência a compressão aos 7 dias, atendendo desta forma aos limites da NBR 5751:2015.

Em relação ao desempenho, Sebastiany (2014) obteve comportamento similar ao ensaiar suas argamassas produzidas com o CH-I. As argamassas produzidas com metacaulim apresentaram resistência a compressão inferior às argamassas produzidas com argilas calcinadas, independente da temperatura de calcinação.

#### 4.3.4 Análises térmicas

As análises térmicas foram realizadas em uma pasta de cimento, uma pasta contendo 25% de substituição do cimento pelo metacaulim, e uma pasta contendo 25% de substituição do cimento por RCV.

A Figura 40 apresenta as curvas TG e DTG para a pasta de cimento.

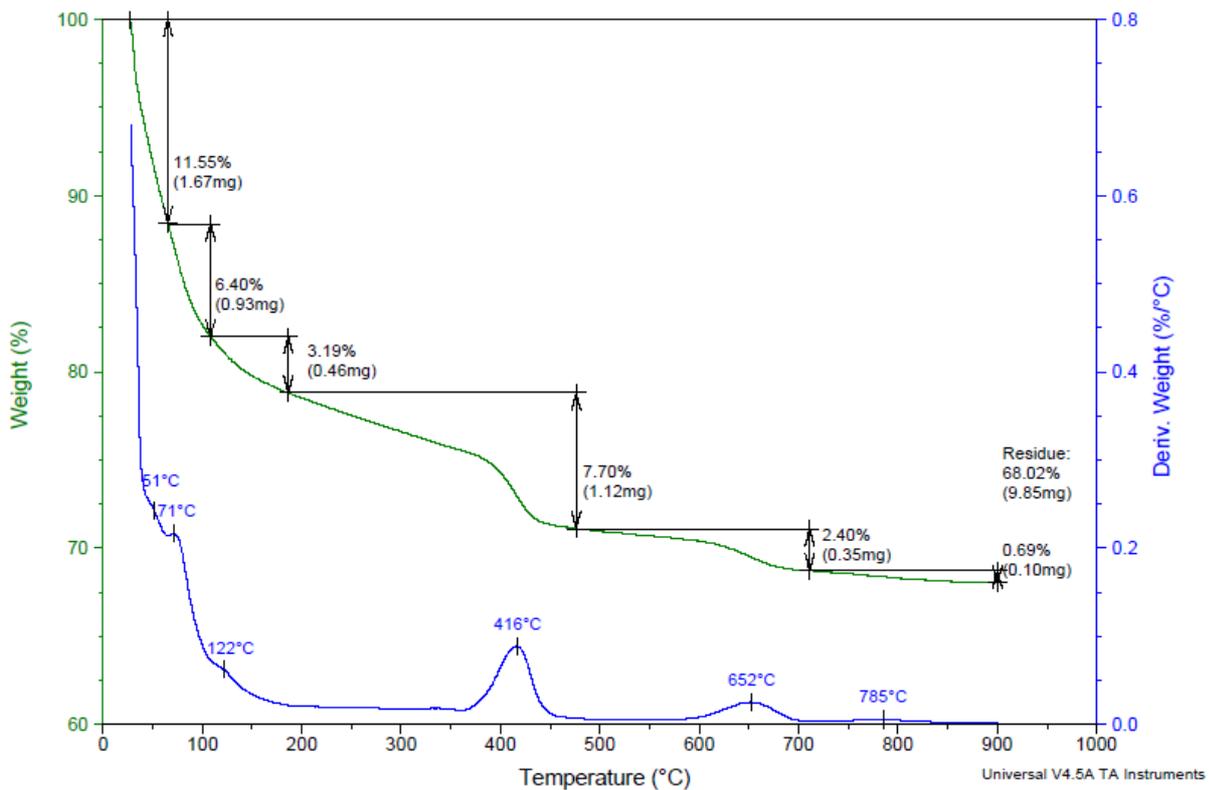


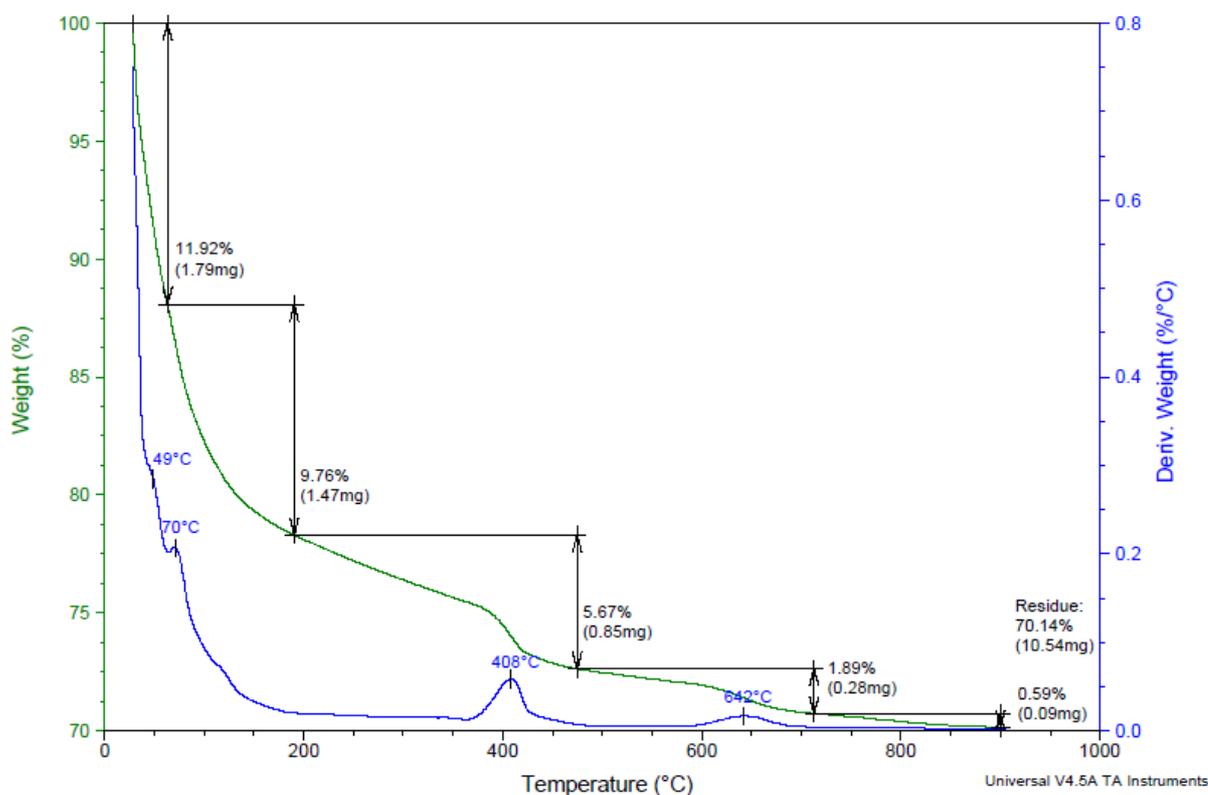
Figura 40 - TG/DTG pasta de cimento referência

Ao analisar as curvas TG/DTG da Figura 40, é possível verificar os picos de decomposição conforme apresentado por Cunha (2012), onde os picos na faixa entre os 35°C e 200°C correspondem à perda de massa em função da água de decomposição da etringita e de outros produtos formados na hidratação do cimento. O pico entre os 350°C e 450°C

corresponde a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$ , e o pico formado entre  $600^\circ\text{C}$  e  $700^\circ\text{C}$  corresponde a decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Ao analisar as demais pastas é possível observar a formação dos mesmos picos de decomposição citados anteriormente. Dweck et al. (2009) afirmam que a atividade pozolânica é medida a partir do consumo do  $\text{Ca(OH)}_2$ , caracterizada nas análises térmicas pelo menor teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  presente na amostra após a reação pozolânica.

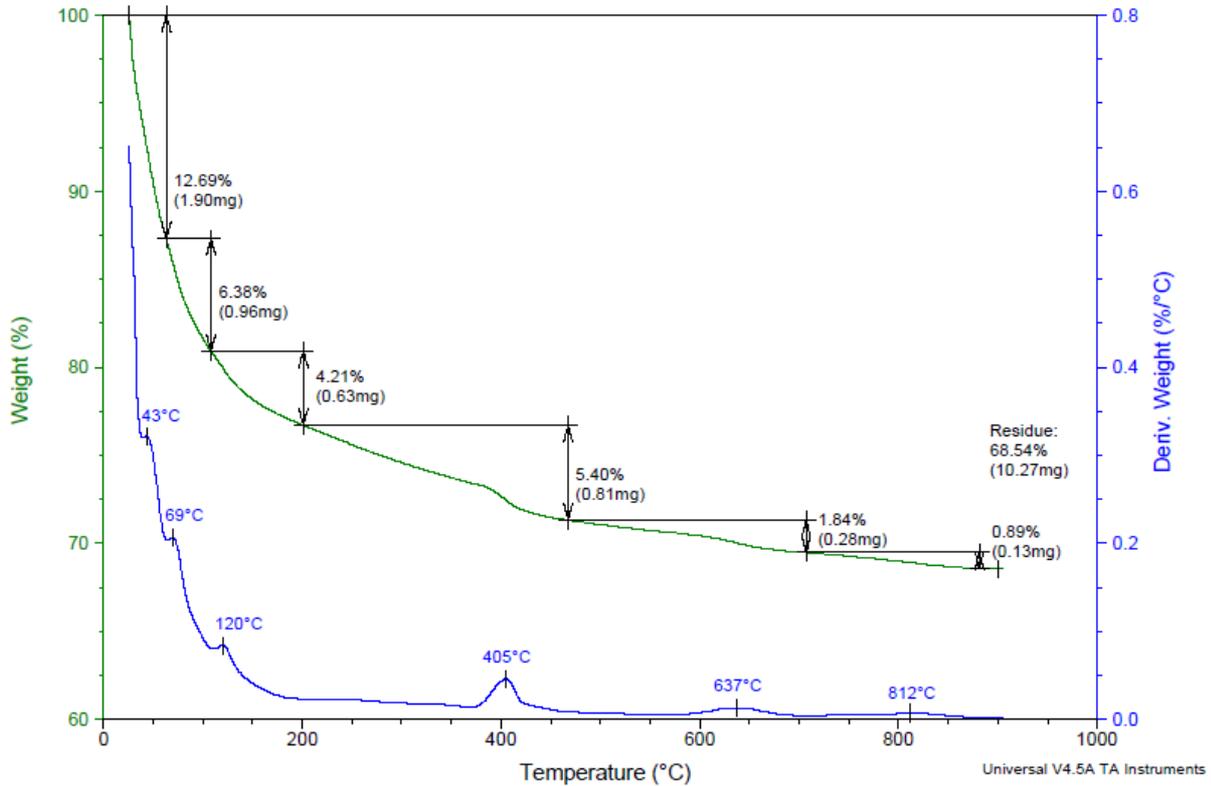
A Figura 41 apresenta a perda de massa da pasta contendo 25% de cerâmica.



**Figura 41 - TG/DTG pasta de cimento com 25% de substituição por RCV**

Ao analisar visualmente o gráfico da análise térmica da pasta contendo 25% de RCV e comparar com a DTG da pasta de cimento verifica-se que o pico de decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  entre  $350^\circ\text{C}$  e  $450^\circ\text{C}$  é menor, evidenciando a perda de massa em relação a pasta referência.

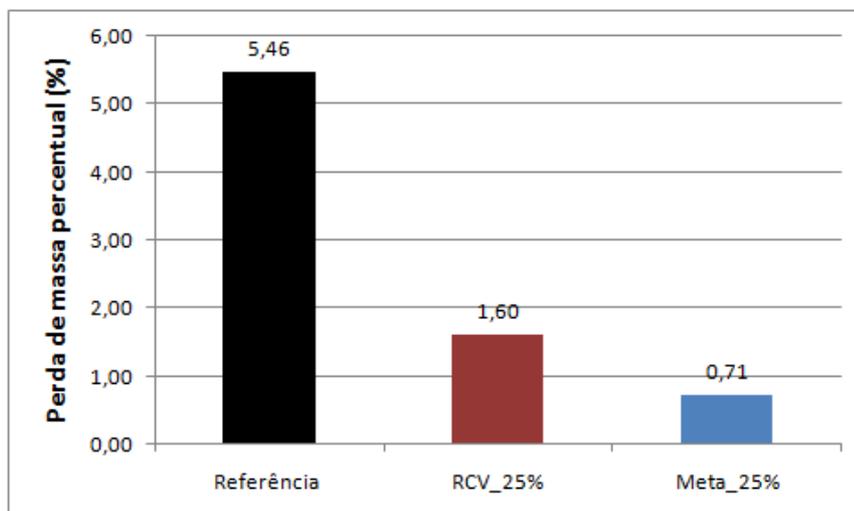
A Figura 42 apresenta os resultados da análise térmica obtidos a partir da pasta contendo 25% de substituição do cimento por metacaulim.



**Figura 42 - TG/DTG pasta de cimento com 25% de substituição por metacaulim**

Ao observar a curva DTG observa-se que o pico referente a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  entre  $350^\circ\text{C}$  e  $450^\circ\text{C}$  é ainda menor em relação à pasta formulada com 25% de RCV, indicando que a reação pozolânica do metacaulim consumiu mais  $\text{Ca(OH)}_2$  quando comparado a pasta contendo 25% de RCV.

Diante dos resultados de análise térmica, realizou-se o cálculo conforme metodologia proposta por Dweck et al.(2013) para avaliar a perda de massa em base de massa inicial do cimento. Os resultados são apresentados na Figura 43.



**Figura 43 - Perda de massa relativo a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  nas pastas aos 28 dias.**

Ao analisar as curvas de TG/DTG é possível confirmar os resultados apresentados pelos ensaios da NBR 15894:2010, NBR 5752:2014, NBR 5751:2015 (utilizando o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  P.A.) cujos resultados aos 28 dias, apresentaram melhor desempenho para o metacaulim.

A pasta contendo 25% de substituição do cimento pelo metacaulim apresentou menor perda de massa (0,71%) na faixa de decomposição característica do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (entre 350°C e 450°C) quando comparada à pasta contendo 25% de substituição do cimento por RCV, que apresentou uma perda de massa de 1,60%.

Sebastiany (2014) também obteve a menor perda de massa para a pasta formulada com cimento e metacaulim, a pasta formulada com 35% de metacaulim apresentou 2,74 % de perda de massa no pico de decomposição do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Já as pastas formuladas com argila calcinada a 700°C, 900°C e 1000°C apresentaram perdas de massa de 4,18%, 5,19% e 5,35%, respectivamente. O autor ressalta que quanto menor o percentual de perda de massa de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , maior terá sido o consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pela reação pozolânica. O autor conclui que as pastas produzidas com argilas calcinadas a 900°C e 1000°C não produziram alterações significativas nas pastas de cimento em relação às pastas referência.

Nas pastas analisadas no presente estudo, verificou-se a atividade pozolânica de ambas as composições, devido a redução da perda de massa referente à decomposição do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em relação a pasta referência.

Na análise térmica realizada por Gonçalves (2005) utilizando RCV, é possível observar que as pastas contendo RCV apresentam teores de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  inferior à pasta de referência. O autor afirma que um teor menor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é observado para a pasta com o menor teor de RCV. Nas pastas com teores de RCV superiores a 20%, os valores são muito próximos da pasta referência, diferentemente do que foi observado no presente estudo.

Diante de todos os resultados obtidos no presente estudo, verificou-se que o RCV não pode ser classificado como uma pozolana Classe N conforme NBR12653:2014. Porém ao avaliar os resultados obtidos, existe a necessidade de novos estudos que avaliem teores menores de substituição do cimento pelo RCV, no intuito de verificar se uso como uma adição mineral. Conforme citado por Gonçalves (2005, 2007) ao fazer uso de coprodutos industriais (como o RCV) como adição mineral, é possível reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$ , reduzir o consumo de energia associados à produção do cimento e ainda contribuir para a redução do impacto ambiental relacionado com a destinação final do resíduo.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo de finalização do estudo, serão apresentadas as considerações finais, e as sugestões para trabalhos futuros, tendo como base a revisão bibliográfica, o programa experimental desenvolvido e a análise dos resultados obtidos sobre a viabilidade técnica do uso do RCV em substituição parcial ao cimento Portland.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sobre a viabilidade técnica do uso do RCV como pozolana em substituição parcial ao cimento Portland em argamassas, foi possível concluir:

**Quanto à avaliação do percentual de geração do RCV**, no que se refere à empresa objeto de estudo, foi possível verificar, que a mesma apresenta um percentual de geração de 8,8% (em média) para a unidade fabril denominada neste trabalho como Cerâmica 1 e um percentual de geração de 1, 8% para a fábrica denominada de Cerâmica 2.

**Quanto à caracterização física-química e mineralógica do RCV**, no que se refere aos aspectos químicos da NBR 12653:2014, o RCV atendeu a todos os requisitos para ser classificado como uma pozolana classe N. Quanto aos aspectos físicos, o processo de moagem empregado proporcionou uma área superficial compatível com a apresentada pela literatura para o RCV desenvolver a atividade pozolânica, atingindo uma granulometria inferior a do metacaulim e do cimento utilizado. Quanto à finura do RCV, esta atendeu de forma satisfatória as exigências da NBR 12653:2014. Já na análise mineralógica o RCV apresentou picos cristalinos mais definidos, sugerindo maior cristalinidade deste. Também foi possível comprovar que se tratava de uma argila ilítica, indicada pela literatura por não contribuir para a pozolanicidade do material.

**Quanto à influência do teor de substituição do cimento pelo RCV e a comparação do desempenho com o metacaulim**, os resultados obtidos mostraram que o metacaulim utilizado no presente estudo apresentou um desempenho inferior aos resultados obtidos pela literatura no uso desse tipo de material, porém o metacaulim apresentou maior atividade pozolânica quando comparada ao RCV, exceto nas argamassas produzidas com CH-I pela NBR 5751:2015. Em relação aos ensaios de pozolanicidade realizados é possível fazer alguns apontamentos:

- Nos ensaios de condutividade elétrica a diferença entre os materiais não foi significativa, e ambos foram classificados como materiais com moderada atividade pozolânica;
- Nos ensaios da NBR 5752:2014 o metacaulim apresentou uma maior atividade pozolânica quando comparado ao RCV, exceto a composição de RCV\_35% aos 28 dias e a composição RCV\_25% aos 91 dias. No que diz respeito ao IAP das argamassas de cimento aos 28 dias, nenhum dos materiais alcançou o limite estipulado na NBR 12653:2014 no presente estudo, desta forma nenhum dos materiais poderá ser classificado como pozolana perante este requisito;
- Nos ensaios da NBR 5751:2015 utilizando o  $\text{Ca(OH)}_2$  P.A. como aglomerante, ambos os materiais atingiram a resistência especificada pela NBR 12653:2014; Já nos ensaios utilizando a CH-I, o RCV apresentou maior atividade pozolânica, quando comparado ao metacaulim;
- Nos ensaios da NBR 15894:2010, cujo teor de substituição foi de 15%, o metacaulim não atendeu as exigências da norma, mas apresentou maior IAP quando comparado ao RCV. Avaliando os resultados de resistência à compressão, foi possível verificar que as alterações nas resistências não são significativas;
- Nos ensaios de análise térmica pode-se observar que a pasta contendo 25% de metacaulim apresentou maior consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ , quando comparado a pasta contendo 25% de RCV, indicando atividade pozolânica. Ambas as pastas, quando comparadas a pasta referência, apresentaram atividade pozolânica.

Diante dos resultados obtidos, pelo fato do RCV apresentar atividade pozolânica nas argamassas moldadas com CH-I, nas argamassas com 15% de substituição, e nas análises térmicas e apresentando moderada atividade pozolânica no ensaio de condutividade elétrica existe a necessidade de novas pesquisas onde teores menores de substituição sejam estudados, no intuito de avaliar o uso do RCV como uma adição mineral.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, novas perspectivas de estudo foram criadas, sugere-se:

- Realizar adições de RCV com teores inferiores a 20%, a fim de avaliar a possibilidade de substituição do cimento por RCV nas argamassas;
- Determinar a atividade pozolânica do RCV através de outras técnicas existentes (Fratini, Chappelle modificado, DRX, técnicas calorimétricas, etc);
- Avaliar a viabilidade do uso do RCV como pigmento;
- Analisar as reações de hidratação a partir das relações nas técnicas DRX, e análise térmica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, M.B.; Saidur, R.; Saidur, M.S.; Hossain, M.S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Junho 2011, Vol.15 (5), pp.2252-2261.

AMORIM, L.V. ; LIRA, H.L. ; FERREIRA, H.C..Use of residential construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars. **Journal of Environmental Engineering**, Outubro 2003, Vol.129 (10), p.916-920.

Antiohos, S.K.; Chouliara, E.; Tsimas, S..Re-use of spent catalyst from oil-cracking refineries as supplementary cementing material. **China Particuology**, 2006, Vol.4(2), pp.73-76

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABC). **Informações técnicas -definição e classificação**. São Paulo, [2011a]. Disponível em:< <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4>>. Acesso em: 29 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Processo de fabricação de cerâmica vermelha**. São Paulo, [2011b]. Disponível em:< <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=45#>>. Acesso em: 03 jan. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - (ABCP). **Básico sobre cimento**. São Paulo, [2009]. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento#.VEuP2iLF-7k>>. Acesso em: 28 out 2014.

\_\_\_\_\_. **Guia Básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106). Disponível em:< [http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf) >. Acesso em: 25 out. 2014.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland CP II (NBR 11578)**,São Paulo, [2009]. Disponível em:< <http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=19>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751:2015: materiais pozolânicos - determinação da atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2015. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752:2014: materiais pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014a. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 7214:2012: areia normal para ensaio de cimento - especificação**. Rio de Janeiro, 2012. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007:2004: amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653:2014: materiais pozolânicos: requisitos**. Rio de Janeiro, 2014b. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-1:2010: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: requisitos.** Rio de Janeiro, 2010. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-2:2010: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2010. Norma eletrônica.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-3:2010: determinação da finura por meio da peneira 45 µm.** Rio de Janeiro, 2010. Norma eletrônica.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br>>. Acesso em: 25 out. 2014.

BARGER, G. S.; HANSEN, E. R.; WOOD, M. R.; NEARY, T.; BEECH, D. J.; JAQUIER, D.. Production and Use of Calcined Natural Pozzolans in Concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, Vol. 23, No. 2, Dezembro 2001, pp. 73–80.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.**, v.1, 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L.S..O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais.** São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 ed., 2010. v. 1, cap. 24, p. 761-790.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007\\_2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007_2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 18 mar. 2016.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B.. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 15-27, abr./jun. 2013.

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de eficiência energética na indústria: relatório setorial: setor cerâmico.** Brasília, DF: Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2010. Disponível em: <[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_24/2012/09/06/262/20121127140253106351i.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/06/262/20121127140253106351i.pdf)>. Acesso em: 09 jan 2016.

CABRAL, E. M.; SÁ, R. J. de; VIEIRA, R. K.; VASCONCELOS, R. P.. Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, p. 404-410, 2008.

**CERÂMICA** vermelha. Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos, Brasília, DF, ed. 9, p. 30-34, 2014. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/Anu%C3%A1rio+Estat%C3%ADstico+do+Setor+de+Transforma%C3%A7%C3%A3o+de+N%C3%A3o-Met%C3%A1licos+-+2014+-+ano+base+2013\\_PDF+/2105180e-73be-4904-bc64-1f19c8fa2dca;jsessionid=06D90189BB FA63BA30671E7F1177 AB34.srv155](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/Anu%C3%A1rio+Estat%C3%ADstico+do+Setor+de+Transforma%C3%A7%C3%A3o+de+N%C3%A3o-Met%C3%A1licos+-+2014+-+ano+base+2013_PDF+/2105180e-73be-4904-bc64-1f19c8fa2dca;jsessionid=06D90189BB FA63BA30671E7F1177 AB34.srv155)>. Acesso em: 24 jan. 2015.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M..Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, 2012, Vol.30, p.320-329.

CARVALHO, J. C.Solo como material de construção. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 ed., 2010. v. 1, cap. 17, p. 527-563.

CINCOTTO, M.A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**., v.1, 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 381- 413.

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

CORDEIRO, L. N. P.. **Análise de variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. 2009.

CUNHA, A. C. **Caracterização e estudo de aplicação de rejeito catalítico de unidade de FCC como material pozolânico**. 2012. 110 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas experimentais para estudo da microestrutura. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 ed., 2010. v. 1, cap. 14, p. 405-438.

\_\_\_\_\_. Adições minerais. In: ISAIA, G. C..**Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 1 ed., 2011. v. 1, cap. 8, p. 261-309.

DÉ SIR J. M.; DIAS, D. P.; ROCHA, C. A. A.; DANTAS, D. F..Avaliação da contribuição da atividade pozolânica do resíduo de tijolo moído na resistência de argamassas. In: CONFERÊNCIA INTERAMERICANA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA E SUSTENTÁVEL - IAC-NOCMAT, 2005, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABMTENC, 2005. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/262564995\\_Avaliao\\_da\\_Contribuicao\\_da\\_Atividade\\_Pozolanica\\_do\\_Resduo\\_do\\_Tijolo\\_modo\\_na\\_Resistncia\\_de\\_Argamassas](http://www.researchgate.net/publication/262564995_Avaliao_da_Contribuicao_da_Atividade_Pozolanica_do_Resduo_do_Tijolo_modo_na_Resistncia_de_Argamassas)>. Acesso em: 03 jan. 2015.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. f.268. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), São Paulo, 2004.

DONATELLO, S; TYRER, M; CHEESEMAN, C. R..Comparison of test methods to assess pozzolanic activity.**Cement & Concrete Composites**, 2010 Feb, Vol.32(2), pp.121-127

DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO, A. C. V.; CARTLEDGE, F. K.. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**, 2000, Vol.346 (1), p.105-113.

DWECK, J.; CUNHA, A. C.; PINTO, C.; GONÇALVES, J. P.; BÜCHLER, P. Thermogravimetry on calcined mass basis — hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2009, Vol.97 (1), p.85-89

DWECK, J.; MELCHERT, M.; VIANA, M.; CARTLEDGE, F.; BÜCHLER, P..Importance of quantitative thermogravimetry on initial cement mass basis to evaluate the hydration of cement pastes and mortars. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2013, Vol.113 (3), p.1481-1490.

EFICIENCIA ENERGÉTICA EM LADRILLERAS ARTESANALES (EELA). Programa de eficiência energética na indústria de cerâmica vermelha da América Latina visando mitigar a mudança climática. **Manual de eficiência energética na indústria de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro, abr. 2013. Material em PDF.

FASTOFSKI, D. C.; SCHAFER, M.; TELES, R. D.; KULAKOWSKI, M. P.; GONZÁLEZ, M. A. S.; KAZMIERCZAK, C. S.. Metodologia de caracterização de resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material pozolânico em pasta de cimento. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 5, 2014. São Leopoldo. **Anais eletrônicos...** São Leopoldo, 2014. Disponível em: < [http://www.5firs.institutoventuri.org.br/conteudo/view?ID\\_CONTEUDO=191](http://www.5firs.institutoventuri.org.br/conteudo/view?ID_CONTEUDO=191) >. Acesso em: 15 jan 2015.

FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K..The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, Janeiro 2011, Vol.41 (1), p.113-122.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. Â.; CHOTOLI, F. F.. Resíduo de cerâmica vermelha (rcv): uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, 19 (4) Julho/Agosto, 2014, p 31-38. Disponível em: <<http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v19n4/v19n4a05.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2015.

GONÇALVES, J. P.. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial**. 2005. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94 out./dez. 2006.

\_\_\_\_\_. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. REM: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, vol. 60, n. 4, p. 639-344, out.-dez. 2007

GRIGOLETTI, G. C.. Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul. 2001. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2001.

HEIDER, M.. Cerâmica vermelha e sustentabilidade. **In the Mine, São Paulo, 30 jun. 2014.** Disponível em: <<http://inthemine.com.br/site/index.php/ceramica-vermelha-e-sustentabilidade/>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F.. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 168-177, 2015.

ISAIA, G. C.. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 1 ed., 2011. v. 1, cap. 1, p. 1-55.

\_\_\_\_\_. A ciência e a engenharia de materiais de construção civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 ed., 2010. v. 1, cap. 1, p. 1-35.

KANNING, R. C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento portland**. 2013. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos de cerâmica vermelha. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2010. v. 1, cap. 18, p. 565-588

KIELING, A. G.. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2009.

KUA, H. W.; KAMATH, S..An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. **Journal of Cleaner Production**, 15 out 2014, Vol.81, p.190-200.

LAGUNA, L. A; IKEMATSU, P. A influência da temperatura na desforma do concreto. **Revista Técnica**. Ed. 150, 2009.

LAVAT, A.E.; TREZZA, M. A.; POGGI, M..Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Waste Management**, 2009, Vol.29 (5), p.1666-1674

LUXÁN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J..Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, Janeiro 1989, Vol.19(1), p.63-68.

MADALENA, L. M. N. **Influência do teor em pozolana na reatividade e nas características mecânicas de argamassas**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

MATIAS, G; FARIA, P; TORRES, I. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: a Review. **Construction and Building Materials**, 2014a, Vol.73, p.125-136

\_\_\_\_\_. Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behavior. **Construction and Building Materials**, 2014b, Vol.73, p. 523-534

MASSAZZA, F. Pozzolanic cements. **Cement & Concrete Composites**, 1993, Vol.15 (4), p.185-214

MEDEIROS, E. N. M de; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. de A. e MENEZES, R. R. .Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica: utilização da técnica de planejamento. **Cerâmica**. 2010, vol.56, n.340, p. 399-404.

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

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; JERÔNIMO, V. L.; CARNEIRO, A. M. P. C Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 33-52, out./dez. 2014.

NEVES JUNIOR, A.; TOLEDO FILHO, R.; FAIRBAIRN, E.; DWECK, J.. CO 2 sequestration by high initial strength Portland cement pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2013, Vol.113(3), p.1577-1584.

O'FARRELL, M.; SABIR, B. B.; WILD S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. **Cement & concrete composites**, v. 28, p. 790-799, 2006.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**., v.1, 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 586- 614.

PAYÁ, J.; REIG, L.; CARRIÓN, M. A. M.; MONZÓ, J.; PEDROSA, P. I.; BORRACHERO, M.V.. Resíduos cerâmicos: una adición mineral alternativa para sistemas con cemento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC2014, 56, 2014. Natal. **Anais eletrônicos...**Natal, 2014. Disponível em CD-ROM

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES J. P., SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars componentes. **Construction and building materials**, Portugal, n. 31, p. 197-203, 2012.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N.F.. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**. 2010, vol.56, p. 237-243.

PINTO, R. L.; MIRANDA, G. C. M.; VELASCO, R. V.; SILVOSO, M. M.. Análise comparativa de argamassas com incorporação de resíduos cerâmico e de rochas ornamentais.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC2014, 56, 2014.Natal. **Anais eletrônicos...**Natal, 2014. Disponível em CD-ROM

PONTES, J. M. P. N. **Reatividade de pozolanas para argamassas e betões**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

PONTES, J.; SILVA, A. S.; FARIA, P. **Contributos para a melhoria da durabilidade e sustentabilidade de argamassas e betões** - avaliação da reatividade de pozolanas artificiais. In: CONGRESSO CONSTRUÇÃO, 4., 2012, Coimbra.

RECENA, F. A. P.. Estabelecimento de um padrão secundário para a areia normal do Rio Tietê a partir da areia do Rio Guaíba. 1994. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 1994.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 2 ed.,v. 1.

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. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SEBASTIANY, L. D.. **Avaliação de métodos de determinação do potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). São Leopoldo, 2014.

SENTHAMARAI, R; MANOHARAN, P.D..Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**, Out-Nov 2005, Vol.27 (9-10), p. 910-913.

SILVA, M.G.. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIÁ, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 ed., 2010. v. 1, cap. 25, p. 791-823.

SILVA, J.; BRITO, J.; VEIGA, R.. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. **Journal of Materials in Civil Engineering. Portugal, vol. 22, n. 3, p. 236-244, 2010.**

SILVA, P. N. KUPEIMAN, S.C.. Reação álcali-agregado nas usinas hidroelétricas do complexo Paulo Afonso/CHESF. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. (BT/PCC/480). Disponível em: <[http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT\\_00480.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00480.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2016.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE OLARIA E DE CERÂMICA PARA CONSTRUÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - SINDICER. **Diagnóstico da Indústria da Cerâmica Vermelha no Estado do Rio Grande do Sul**. Relatório de pesquisa. Porto Alegre, 2008. 60 p.

\_\_\_\_\_. Sindicato nacional da indústria do cimento 2013. **Números da indústria do cimento**. 2013. Rio de Janeiro, [2014a]. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/gfrel2013/responsive.html#rel2013/16-17>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

SOUZA, R.B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TAYLOR, H. F. W.: *Cement chemistry*. 2ª edição. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F.. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement & Concrete Composites**. Argentina, n. 37, p. 319-327, 2013.

TOLEDO FILHO, R.D.; GONÇALVES, J.P.; AMERICANO, B.B.; FAIRBAIRN, E.M.R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, 2007, Vol.37(9), p.1357-1365

TRINDADE, G. H.. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem**: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos. 2011. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) Rio Grande do Sul, 2011.

TYDLITÁT, V.; ZÁKOUTSKÝ, J.; VOLFOVÁ, P.; ČERNÝ, R. Hydration heat development in blended cements containing fine-ground ceramics. **Thermochimica Acta**, v. 543, p. 125-129, 2012.

VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ONDRÁČEK, M.; KERŠNER, C.; ČERNÝ, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement & concrete composites**, v. 34, p. 55-61, 2012.

VIEIRA, A. A. P.. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2005.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura da cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, n. 315, p. 254-260, 2004.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. **Materials and Structures**, 2011, Vol.44(6), p.1139-1150

YOUNG, J.. **Caracterização de areias de dragagem de arroio urbano para avaliação do seu potencial de uso como agregado miúdo em argamassas**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. 2010.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and Concrete Research**, 1995, Vol.25(8), p.1713-1725

## APÊNDICE A

**Tabela 25A - Composição em óxidos, por FRX do cimento CP II-F-32 e da argila**

Elemento	Cimento CP II-F-32 Quant (%)	Argila Quant (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,21	18,16
SiO <sub>2</sub>	21,07	56,17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72	11,49
MgO	6,49	0,97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,22
SO <sub>3</sub>	2,15	ND
K <sub>2</sub> O	1,03	1,42
Na <sub>2</sub> O	0,25	0,05
CaO	54,44	0,55
TiO <sub>2</sub>	0,27	1,40
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	-
MnO	0,09	0,13
ZnO	0,02	-
SrO	0,07	-
PF	5,13	10,38

**Tabela 26A - Fluorescência de Raios X qualitativa**

	Elementos majoritários ( >50%)	Menor quantidade ( 5% < x < 50%)	Elementos Traços ( < 5%)
<b>CH-I</b>	Ca	-	Si, Fe, K, Mn
<b>Ca(OH) – P.A.</b>	Ca	-	Sr, K, Fe, Cu

**Tabela 27A – Resultados de PF dos aglomerantes**

Material	Perda ao Fogo (%)
Cimento CP II-F-32	5,13
CH-I	24,73

**Tabela 28A - Resultados de área superficial específica e massa específica dos materiais**

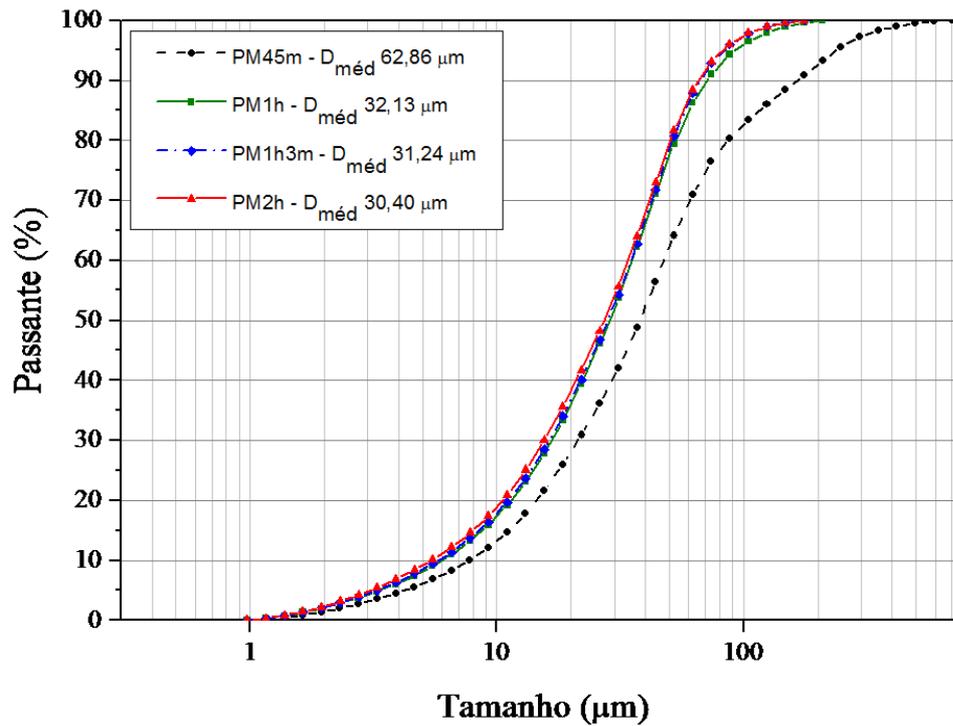
Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Área Superfície Específica BET (m <sup>2</sup> /g)
Cimento	3,0226	1.8772
CH-I	2,4345	10.3163
Ca(OH) <sub>2</sub> P. A.	2,1014	9.7405

**Tabela 29A – Resultados de granulometria a laser dos aglomerantes**

Análise granulométrica	Cimento CP II-F-32 (µm)	CH-I (µm)	Ca(OH) <sub>2</sub> P.A. (µm)
Diâmetro < 10%	4,66	2,44	3,14
Diâmetro < 50%	15,98	14,40	8,43
Diâmetro < 90%	41,60	50,79	24,01
Dimensão Média	18,73	20,39	10,16

**Tabela 30A – Resultados de granulometria a laser do RCV submetido a diferentes tempos de moagem no moinho de bolas.**

Análise granulométrica (μm)	45 min	1 hora	1,5 horas	2,0 horas
Diâmetro < 10%	07,77	06,04	05,82	05,44
Diâmetro < 50%	38,03	28,65	28,28	27,30
Diâmetro < 90%	166,00	70,81	66,52	65,50
Dimensão Média	52,95	32,13	31,24	30,40



**Figura 44A - Distribuição granulométrica do RCV submetido a diferentes períodos de moagem**

## APÊNDICE B

**Tabela 31B - ANOVA dos resultados de condutividade elétrica**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	0,000486	1	0,000486	0,034227	0,862227	7,708647	<b>NÃO</b>
Dentro dos grupos	0,056797	4	0,014199				
Total	0,057283	5					

**Tabela 32B - ANOVA dos resultados de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 7 dias em relação a composição de meta\_20% e RCV\_20%**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	0,327067909	1	0,327067909	0,495638936	0,50781118	5,9873775	<b>NÃO</b>
Dentro dos grupos	3,959348859	6	0,659891476				
Total	4,286416768	7					

**Tabela 33B - ANOVA dos resultados de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 7 dias em relação a composição de meta\_25% e RCV\_25%**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	49,1547	1	49,1547	30,52746	0,00148	5,987378	<b>SIM</b>
Dentro dos grupos	9,66108	6	1,61018				
Total	58,81578	7					

**Tabela 34B - ANOVA dos resultados de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 7 dias em relação a composição de meta\_35% e RCV\_35%**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	240,6238	1	240,6238	3342	1,8E-09	5,987378	<b>SIM</b>
Dentro dos grupos	0,432	6	0,072				
Total	241,0558	7					

**Tabela 35B - ANOVA dos resultados do ensaio de resistência à compressão da NBR 5752:2014 aos 63 dias em relação a composição de meta\_35% e RCV\_35%**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	24,64236784	1	24,64236784	17,64904408	0,005679026	5,987377584	<b>SIM</b>
Dentro dos grupos	8,377462619	6	1,39624377				
Total	33,01983046	7					

**Tabela 36B - ANOVA dos resultados do ensaio conforme NBR 15894:2010 aos 7 dias**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	59,829974	2	29,91499	1,935061	0,199972	4,256495	<b>Não</b>
Dentro dos grupos	139,13512	9	15,45946				
Total	198,96509	11					

**Tabela 37B –ANOVA resultados do ensaio conforme NBR 15894:2010 aos 7 dias comparação entre as amostras 15%\_meta e 15%\_RCV**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	47,600914	1	47,60091	2,50102	0,164857	5,987378	<b>Não</b>
Dentro dos grupos	114,19559	6	19,0326				
Total	161,7965	7					

**Tabela 38B - ANOVA dos resultados do ensaio conforme NBR 5751:2015 para argamassas de Ca(OH)<sub>2</sub> com metacaulim comparativo dos 7 para os 28 dias.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	0,471296	1	0,471296	6,415559	0,044505	5,98737758	<b>SIM</b>
Dentro dos grupos	0,440768	6	0,073461				
Total	0,912064	7					

**Tabela 39B - Tabela 41 - ANOVA dos resultados do ensaio conforme NBR 5751:2015 para argamassas de Ca(OH)<sub>2</sub> com RCV comparativo dos 7 para os 28 dias.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Efeito Significativo
Entre grupos	2,97728	1	2,97728	13,88913	0,009773	5,98737758	<b>SIM</b>
Dentro dos grupos	1,286162	6	0,21436				
Total	4,263442	7					

## APÊNDICE C

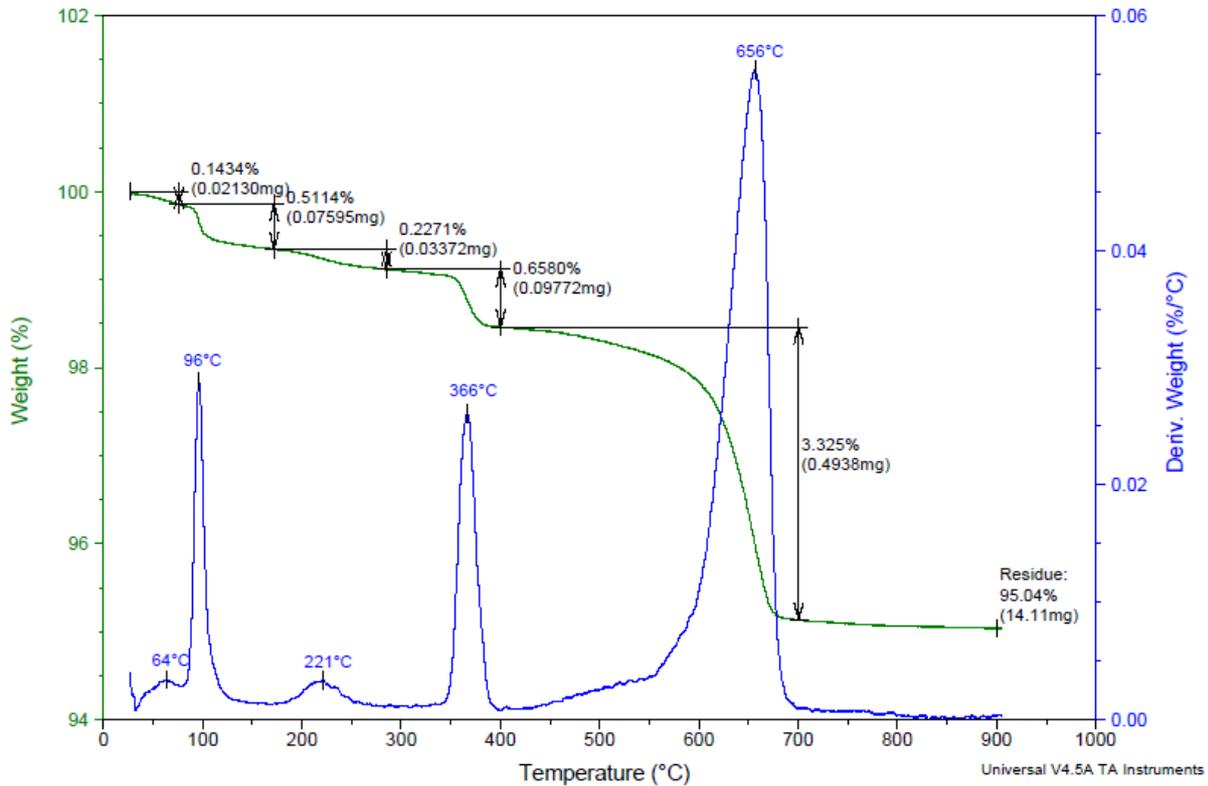


Figura 45C - Análise térmica do cimento anidro

**Observação:** A temperatura “T” considerada no presente estudo, é a temperatura de decomposição do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e ocorre na faixa de temperatura de  $350^\circ\text{C}$  e  $450^\circ\text{C}$ , conforme a Cunha (2012).

### Pasta referênci

O cálculo inicia com a determinação da massa percentual da amostra, em base de massa calcinada, conforme mostra a Equação 2

$$M, cb = \frac{M, ib}{M_c, ib} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$M, cb$  = massa percentual na temperatura "T", em base de massa calcinada;

$M, ib$  = massa percentual na temperatura "T", obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra;

$M_c, ib$  = massa percentual da amostra calcinada a  $900^\circ\text{C}$ , obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

### Resolução:

Considerou-se a perda de massa a partir dos 105°C

A amostra analisada: **cimento** – 14,487mg

105°C – 11,9126mg, correspondia a 82,23% da amostra ainda;

900°C (temperatura final) – 9,85 mg, correspondia a 68,02% da amostra;

**Perda ao Fogo = (82,23% (a 105°C)) – (68,02% (a 900°C)) = 14,21%**

Para obter a perda de massa na temperatura “T”

Temperatura e massa no início do pico correspondente a decomposição do

Ca(OH)<sub>2</sub>:

Temperatura: 320,61°C

Massa: 11,044

Massa em %: 76,23%

Temperatura e massa no final do pico correspondente a decomposição do

Ca(OH)<sub>2</sub>:

Temperatura: 450,01°C

Massa: 10,33

Massa em %: 71,33%

***M, ib* = massa percentual na temperatura "T", obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra:**

(Massa inicial em %: 76,23% ) – (Massa final em %: 71,33%)= **4,9%**

*Mc, ib* = massa percentual da amostra calcinada a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

*Mc,ib* = massa na temperatura de 105°C – PF (14,21)

*Mc, IB* = 100% da massa – 14,21% (PF) = 85,79

Aplica-se a fórmula:

$$M, cb = \frac{4,9}{85,79} \times 100$$

$$M,cb= 5,71\%$$

A partir da Equação 3, a massa percentual da amostra, calculada em base de massa calcinada ( $M, cb$ ) é transformada a partir da massa de cimento calcinado, com base na massa inicial de cimento.

$$M, cim = M, cb \times \frac{M_c, Cim}{100} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$M, cim$  = massa percentual na temperatura "T", com base na massa inicial de cimento;

$M_c, cim$  = massa percentual de cimento calcinado a 900°C, com base na massa inicial de cimento;

$$M_c, cim = (\text{massa do cimento a } 105^{\circ}\text{C}) - (\text{massa do cimento a } 900^{\circ}\text{C})$$

$$M_c, cim =$$

Massa a 105°C: 14,77 , em percentual: 99,48%

Massa a 900°C: 14,11, em percentual: 95,03%

Perda ao Fogo: 99,48% - 95,03% = 4,45%

$$M_c, cim: 100\% - 4,45\% = 95,55$$

Aplica-se a fórmula:

$$M, cim = 5,71 \times \frac{95,55}{100}$$

$M,cim= 5,46\%$  massa percentual na temperatura "T", com base na massa inicial de cimento;

### **Pasta contendo 25% RCV:**

Realizou-se o cálculo até aqui do mesmo modo com explicado anteriormente, porém usando os resultados de análise térmica do RCV ao invés do cimento.

$$M, Ib = 2,57\%$$

$$M_c, Ib = 88,30\%$$

$$M, cb = 2,60\%$$

$$M_{c,cim} = 95,55$$

$$M, cim = 2,49$$

Quando há adição de outros materiais (agregados) em pastas de cimento ou argamassas, a fração de massa dos óxidos de cimento originais presentes na amostra calcinada podem ser estimados conforme a Equação 4.

$$f_{oxcim, ib} = \frac{(M_{cim} \times M_{c, cim})}{(M, cim \times M_{c, cim}) + \sum_{k=1}^k (M_k \times M_{ck, ib})} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$f_{oxcim, ib}$  = fração de massa de óxidos originais do cimento presentes no resíduo calcinado a 900°C, com base na massa inicial da amostra;

$M_{cim}$  = massa de cimento utilizada na composição da pasta/argamassa;

$$M_{cim} = 135g$$

$M_k$  = massa de agregado "K" utilizado na composição da pasta/argamassa;

$$M_k = 45g$$

$M_{ck, ib}$  = massa percentual de agregado "K" calcinado a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

$$M_{ck, Ib} = 100\% - 1,76\% \text{ (perda de massa entre } 105^\circ\text{C a } 900^\circ\text{C)} = 98,24\%$$

$$f_{oxcim, ib} = \frac{(135g \times 95,55\%)}{(5,46\% \times 95,55\%) + \sum_{k=1}^k (45g \times 98,24\%)}$$

$$f_{oxcim, ib} = 2,60$$

Para obter a massa percentual de cada composição na base de massa calcinada de cimento, utiliza-se a Equação 5.

$$M_{f, cb} = \frac{100 \times \frac{M_{f,if}}{M_{f,cif}}}{F_{oxcim, ib}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$Mf, cb$  = massa percentual da composição na temperatura "T", em base de massa de cimento calcinado;

$Mf, if$  = massa percentual da composição na temperatura "T", obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra;

$$Mf, if =$$

Massa no início do pico de decomposição: 11,33mg, representando 75,43%

Massa no final do pico de decomposição: 10,95mg, representando 72,86%

$$75,43\% - 72,86\% = \mathbf{2,57\%}$$

$Mf, cif$  = massa percentual da composição calcinada a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

$$Mf, cif =$$

Massa a temperatura de 105°C: 12,30mg , perda de massa: 81,83%

Massa a temperatura de 900°C: 10,54mg perda de massa: 70,13%

$$\text{Perda de massa: } 81,83\% - 70,13\% = 11,70\%$$

$$\text{Perda de massa: } 100\% - 11,70\% = \mathbf{88,30\%}$$

$$Mf, cb = \frac{100 \times \frac{2,57}{88,30}}{2,60}$$

$$Mf, cb = 1,11 \text{ para o RCV}$$

Por fim, a exemplo do previsto na Equação 2, os resultados de perda de massa das pastas de cimento/argamassas, obtidos em base de massa calcinada, são transformados em base de massa inicial de cimento ( $Mf, cim$ ) através da Equação 6.

$$Mf, cim = Mf, cbf \times \frac{Mc, cim}{100}$$

Equação 6

$$Mf, cim = 1,11 \times \frac{95,55\%}{100}$$

$$Mf, cim = 1,06 \text{ base de massa inicial de cimento}$$

### Pasta contendo 25% de Metacaulim

Do mesmo modo como foram calculados os valores para o RCV foram calculados os valores para as pastas contendo 25% de metacaulim na sua composição.

Quando há adição de outros materiais (agregados) em pastas de cimento ou argamassas, a fração de massa dos óxidos de cimento originais presentes na amostra calcinada podem ser estimados conforme a Equação 4.

$$f_{oxcim, ib} = \frac{(M_{cim} \times M_{c, cim})}{(M_{, cim} \times M_{c, cim}) + \sum_{k=1}^k (M_k \times M_{ck, ib})} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$f_{oxcim, ib}$  = fração de massa de óxidos originais do cimento presentes no resíduo calcinado a 900°C, com base na massa inicial da amostra;

$M_{cim}$  = massa de cimento utilizada na composição da pasta/argamassa;

$M_k$  = massa de agregado "K" utilizado na composição da pasta/argamassa;

$M_{ck, ib}$  = massa percentual de agregado "K" calcinado a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

$$f_{oxcim, ib} = \frac{(135g \times 95,55\%)}{(5,46\% \times 95,55\%) + \sum_{k=1}^k (45g \times 96,34\%)}$$

$$f_{oxcim, ib} = 2,67$$

Para obter a massa percentual de cada composição na base de massa calcinada de cimento, utiliza-se a Equação 5.

$$M_{f, cb} = \frac{100 \times \frac{M_{f, if}}{M_{f, cif}}}{F_{oxcim, ib}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$M_{f, cb}$  = massa percentual da composição na temperatura "T", em base de massa de cimento calcinado;

$Mf, if$  = massa percentual da composição na temperatura "T", obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra;

$Mf, cif$  = massa percentual da composição calcinada a 900°C, obtida a partir da respectiva curva TG, com base na massa inicial da amostra.

$$Mf, cb = \frac{100 \times \frac{1,74}{87,36}}{2,67}$$

$$Mf, cb = 0,75 \text{ para o Metacaulim}$$

Por fim, a exemplo do previsto na Equação 2, os resultados de perda de massa das pastas de cimento/argamassas, obtidos em base de massa calcinada, são transformados em base de massa inicial de cimento ( $Mf, cim$ ) através da Equação 6.

$$Mf, cim = Mf, cbf \times \frac{Mc, cim}{100}$$

Equação 6

$$Mf, cim = 0,75 \times (95,74\% / 100)$$

$Mf, cim = 0,71$  para o metacaulim valor do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  em base de massa inicial de cimento