

***ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INCORPORAÇÃO
DE RESÍDUO CERÂMICO EM ARGAMASSAS***

BRUNO CORDEIRO COSTA

**UNIVERSIDADE EESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
OUTUBRO - 2006**

***ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INCORPORAÇÃO
DE RESÍDUO CERÂMICO EM ARGAMASSAS***

BRUNO CORDEIRO COSTA

“Dissertação de mestrado apresentada ao centro de Ciência e Tecnologia, da
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos
requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.”

Orientador: Jonas Alexandre

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
OUTUBRO 2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

20/2007

Costa, Bruno Cordeiro

Estudo da viabilidade técnica de incorporação de resíduo cerâmico em argamassas / Bruno Cordeiro Costa. – Campos dos Goytacazes, 2007. v, 63 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2007.

Orientador: Jonas Alexandre.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 59-63

1. Resíduo cerâmico 2. Pozolana 3. Tijolo I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 620.14

LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE TABELAS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Objetivos.....	5
1.2 – Justificativa e Relevância do Trabalho.....	6
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 – Resíduos Sólidos: Origem e Definição	7
2.1.1 –Definições.....	7
2.1.2 – Classificação dos Resíduos Sólidos	8
2.2 – Reciclagem de resíduos como materiais para a construção.....	10
2.3 – Aditivos Minerais	11
2.4 - Resíduo Cerâmico.....	17
2.4.1 - Geração do Resíduo Cerâmico.....	21
2.5.1 - Argamassa.....	29
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 – Materiais.....	29
3.1.1 – Resíduo Cerâmico Moído.....	29
3.1.2 – Agregado Miúdo.....	30
3.1.3 – Cimento.....	30
3.2 – Metodologia.....	31
3.2.1 – Localização e coleta do resíduo.....	31
3.2.2 – Moagem do material.....	31
3.2.3 – Caracterização química do material.....	32
3.2.4 –Composição mineralógica.....	33
3.2.5 – Propriedades Físico-mecânicas das argamassas.....	33
3.2.5.1 –Resistência a compressão das argamassas.....	35
3.2.5.2 –Índice de atividade pozolânica.....	36
3.2.5.3 – Capacidade de retenção de água.....	38
3.2.5.4 – Teor de ar incorporado e densidade de massa.....	39
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 – Moagem do material.....	40
4.2 – Caracterização química do material.....	44
4.3 – Composição mineralógica.....	45
4.4 – Índice de atividade pozolânica.....	46
4.5 – Capacidade de retenção de água.....	47
4.6 – Teor de ar incorporado.....	49
4.7 – Resistência a compressão.....	51
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	55
5.1 –Conclusões.....	55
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros.....	58

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Pilha de resíduo no pátio da Fábrica	4
Figura 2	Localização do Município	18
Figura 3	Localização das cerâmicas no Município	19
Figura 4	Matéria-prima estocada no pátio	22
Figura 5	Misturador	23
Figura 6	Maromba	24
Figura 7	Máquina para corte da peças	24
Figura 8	Secagem em estufa	25
Figura 9	Secagem natural	25
Figura 10	Moinho de Bolas Sonnex	32
Figura 11	Equipamento Shimadzu EDX-700 LECIV/CCT/UENF	33
Figura 12	Prensa Versa Tester	36
Figura 13	Curva granulométrica 30 min de moagem	40
Figura 14	Curva granulométrica 1 hora de moagem	41
Figura 15	Curva granulométrica 2 horas de moagem	42
Figura 16	Curva granulométrica 4 horas de moagem	42
Figura 17	Curva granulométrica 800°C	43
Figura 18	Difratograma dos resíduos	45
Figura 19	Gráfico do resultado do ensaio da NBR 5753	46
Figura 20	Retenção de água – 10% substituição	47
Figura 21	Retenção de água – 15% substituição	48

Figura 22	Retenção de água – 20% substituição	48
Figura 23	Teor de ar incorporado – 10% substituição	49
Figura 24	Teor de ar incorporado – 15% substituição	50
Figura 25	Teor de ar incorporado – 20% substituição	50
Figura 26	Resistência à compressão de argamassas com 10% de substituição	51
Figura 27	Resistência à compressão de argamassas com 15% de substituição	52
Figura 28	Resistência à compressão de argamassas com 20% de substituição	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação dos aditivos minerais segundo NBR 12653 (1992).	13
Tabela 2	Constituição química do cimento	31
Tabela 3	Exigências mecânicas e reológicas para argamassas (NBR 13281/2001)	34
Tabela 4	Composição Química do Resíduo	44

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO EM ARGAMASSAS

RESUMO

No Município de Campos dos Goytacazes, existe um pólo cerâmico constituído atualmente mais de 150 indústrias cerâmicas, produzindo cerca de 90 milhões de peças por mês, estima-se que 10% do total produzido por estas Indústrias Cerâmicas transformam-se em resíduo durante o processo de fabricação, este desperdício gera aproximadamente 19 mil toneladas/mês de resíduo. Resíduos estes que ainda não possuem destinação final adequada e nenhum valor agregado.

Pelo fato destas peças serem produzidas com solo que possui composição mineralógica predominantemente caulinítica, com propriedades pozolânicas quando calcinado, lhe confere potencial de uso em outros materiais. A argamassa, devido a sua abrangência de uso na construção civil e o fato de ser consumida em grandes volumes, configura-se como um produto propício para incorporação dos resíduos cerâmicos. Dentro deste contexto, o presente trabalho tem por objetivo caracterizar o resíduo e avaliar o desempenho das argamassas produzidas com este resíduo, por meio dos seguintes parâmetros: evolução da resistência à compressão, densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção de água, índice de consistência padrão, de acordo com normas nacionais e internacionais para argamassas industrializadas de múltiplo uso. Pôde se confirmar por meio dos dados e resultados obtidos durante a elaboração deste trabalho a potencialidade do Resíduo cerâmico, bem como sua viabilidade de emprego em argamassas, visto que, em todos os ensaios sua pozolanicidade foi confirmada, bem como resultaram em argamassas com bom desempenho mecânico e com menor consumo de cimento e menor custo.

Palavras-chave: resíduo cerâmico, pozolana, tijolo.

STUDY OF THE TECHNICAL VIABILITY OF ADDITION OF CERAMIC REJECTS IN MORTARS

In the Municipal District of Campos dos Goytacazes exists one ceramic conglomerate that it produces about 150 millions of brick/month, where 10% of the produced total if transform into reject during the process of manufacture and stockage, generating approximately 19 a thousand ton/months of rejects. This rejects not having specific destination and value. The mortar to has a larger use in the civil construction and consumed great volume, so it is one of the most suitable area for using ceramic residues. In this context, the purpose of this work was the study of characteristics of ceramic rejects and effect of addition in theses parameters, compressive strength, air content, water retention, according to Brazilian code for multiple-use mortars.

Keywords: ceramic reject, pozolana, brick.



1 – INTRODUÇÃO

A maioria dos bens que possuímos um dia se tornará resíduo e a este total devem-se somar os resíduos gerados durante os processos de extração de matéria-prima e de produção de bens, fazendo com que em qualquer sociedade a quantidade de resíduos supere a quantidade de bens consumidos (ROCHA E JOHN, 2003). Os processos de beneficiamento de matéria-prima, em sua grande maioria, se configuram como fontes geradoras de resíduos sólidos, que em análise preliminar não possuem valor, e que comprometem o meio ambiente ao longo do tempo (FELLENBERG, 1980). Portanto, a sociedade industrial desempenha fundamental papel neste processo ao multiplicar a produção de bens, agravando a problemática da geração de resíduos (ROCHA e JHON, 2003).

Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional e aumento de pessoas em centros urbanos, diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume acumulados, principalmente após 1980. Os problemas caracterizavam-se por escassez de área de deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, elevados custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (JOHN, 2000; BRITO, 1999; GÜNTHER, 2000; PINTO, 1986).

Pelo fato de consumir grandes volumes de materiais, existir em qualquer região do mundo e de seus componentes não exigirem grandes sofisticações técnicas, a construção civil se torna um mercado atrativo para reciclagem de resíduos. O setor de materiais da construção civil, apesar do desperdício no âmbito local, de modo geral já é o setor da economia que emprega o maior volume de resíduos reciclados (JOHN, 1997).

Apesar das leis estaduais e federais para a proteção do meio ambiente estabelecerem limites máximos para emissões e deposições de rejeitos líquidos, sólidos ou gasosos, a degradação é bastante evidente. Embora seja possível e prioritário



reduzir a quantidade de resíduos durante a produção, e até o pós-consumo, eles sempre serão gerados (ROCHA e JHON 2003).

O fechamento do ciclo produtivo, com a geração de novos produtos a partir da reciclagem de resíduos, é uma alternativa insubstituível. O conceito de desenvolvimento sustentável que requer uma redução do consumo de matérias-primas naturais não renováveis faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias para reciclagem de resíduos ambientalmente eficientes e seguras, que resultem em produtos com desempenho técnico adequado, inclusive do ponto de vista metodológico, que sejam economicamente competitivas e que busquem a utilização de subprodutos industriais disponíveis localmente, gerando uma interface direta do setor da construção com a cadeia produtiva fornecedora dos insumos.

Desde a invenção do cimento, o homem adicionou inúmeras substâncias à mistura de preparo de vários produtos, para atender necessidades específicas e melhorar o desempenho do mesmo, diante de muitas solicitações advindas do ambiente externo durante toda sua vida útil.

A incorporação de resíduos nos materiais de construção apresenta-se hoje como uma alternativa com grande potencial de minimização de impactos ambientais, diminuindo o volume de rejeitos a serem descartados, uma vez que o resíduo de um processo se torna insumo de outro, podendo atuar também como redutor de custos de produção, seja por economia de energia ou de matéria-prima. Logo, o desenvolvimento tecnológico de processos associados à reciclagem de resíduos industriais passa a ter hoje enorme relevância.

O aumento no descarte de rejeitos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, vem impulsionando os estudos sobre o aproveitamento destes resíduos como novos materiais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos industriais e a criação de novos empregos.

No Município de Campos dos Goytacazes, existe um pólo cerâmico constituído atualmente mais de 150 indústrias cerâmicas, este pólo é o segundo maior produtor de tijolos do Brasil, produzindo cerca de 90 milhões de peças por mês SABOYA *et al.*

(2000) estimaram que 10% do total produzido por estas Cerâmicas transformam-se em resíduo durante o processo de fabricação, seja na linha de produção ou na estocagem, este desperdício gera aproximadamente 19 mil toneladas/mês de resíduo.

O rejeito produzido por essas indústrias não possui ainda destinação final definida, ficando muitas vezes depositado nos pátios das empresas (figura 1), ou lançado em estradas não pavimentadas quando estas ficam em mau estado devido à ação das chuvas, ou nas cavas de extração de solo utilizado na produção do material cerâmico, entre outros fins, porém sem controle algum agredindo o meio ambiente. Fato este que, suscita a necessidade de se desenvolver tecnologias que venham prover um fim mais nobre e ecologicamente correto para este material.



Figura 1: Pilha de resíduo no pátio da Fábrica

Salienta-se que a indústria de cimento é responsável por aproximadamente 7% da emissão anual de gás carbônico (CO_2) na atmosfera, pois a produção de cada tonelada do produto, provoca o lançamento de 0,6 tonelada de CO_2 na atmosfera e, somente o Brasil, que responde por uma produção anual de 38 milhões de toneladas de cimento Portland (CP), libera na atmosfera a quantidade aproximada de 23 milhões de toneladas/ano de CO_2 (TOLEDO *et al.*, 2002). Em virtude disto, é possível ter, além dos benefícios financeiros e tecnológicos, o ambiental, gerado pelo aproveitamento do resíduo cerâmico, devido à potencialidade de, num futuro próximo, ele estar possibilitando a redução da quantidade de cimento necessária para a



produção de argamassas. E conseqüentemente, junto com a redução da produção viria atrelada a redução da poluição, contribuindo para um desenvolvimento sustentável.

Cordeiro 2001 avaliou o comportamento de argamassas produzidas com substituições parciais de cimento por cerâmica moída, demonstrando o potencial pozolânico das argilas da região do Município de Campos dos Goytacazes, quando calcinadas. Contudo, pesquisas com vistas ao emprego do RCM (Resíduo Cerâmico Moído) como material aplicado a dosagens cimentícias como adição mineral em argamassas são poucas e recentes e não contemplam a influencia das diferentes temperaturas de queima dos materiais cerâmicos.

A presente dissertação de mestrado está organizada em 5 capítulos, elaborados de forma a apresentar o trabalho de forma a corresponder à seqüência em que se deu o seu desenvolvimento.

Iniciando com a preocupação com o papel degradante da Industria Cerâmica; passando pelas possibilidades de contribuição deste mercado no aproveitamento de resíduos sólidos; conhecendo o processo de geração do resíduo cerâmico; entrando na caracterização do RCM; iniciando os estudos que envolvem seu aproveitamento em argamassa; estudando o comportamento destas argamassas; analisando os resultados obtidos e finalmente tirando as conclusões sobre o assunto abortado. Assim, os capítulos posteriores estão constituídos da seguinte forma:

- **CAPÍTULO I** – Faz uma discussão sobre: a problemática da geração de resíduos nos processos de beneficiamento de matéria-prima na indústria cerâmica; a potencialidade da construção civil para o aproveitamento de resíduos sólidos reduzindo o impacto ambiental. Apresenta de forma resumida uma proposta para o aproveitamento do RCM em argamassas.
- **CAPÍTULO II** – Dedicado exclusivamente ao RCM, apresenta as principais informações sobre o resíduo, como: processo de geração, localização, volume produzido, origem mineralógica etc.
- **CAPÍTULO III** – Neste capítulo é apresentada a metodologia seguida neste trabalho, descrevendo de forma detalhada cada passo da pesquisa.



Apresenta as análises de caracterização física e química realizadas no material, de forma a determinar suas potencialidades para emprego na produção de argamassa. Também é discutido o processo de beneficiamento (moagem) necessário a sua utilização em argamassas, bem como ensaios realizados nas argamassas e discussão dos resultados obtidos durante a caracterização do RCM e o estudo do comportamento das argamassas com ele produzidas.

- **CAPÍTULO IV** – Este capítulo destina-se a apresentar as conclusões obtidas nos estudos e análises realizadas neste trabalho, bem as sugestões para trabalhos seguintes.

1.1 - Objetivos

Este trabalho tem por finalidade caracterizar o Resíduo Cerâmico Moído (RCM) e avaliar o desempenho de argamassas com sua adição de Resíduo Cerâmico Moído produzido pelas indústrias do Município de Campos. A avaliação do desempenho foi realizada por meio da verificação do atendimento as especificações para argamassas industrializadas de múltiplo uso, de acordo com as normas técnicas vigentes (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas). Desenvolvendo uma argamassa que além de atender as especificações técnicas vigentes, alcance a aprovação do mercado de forma competitiva, quando comparada as mais utilizadas.

Gerar condições, através deste estudo técnico/científico, para a obtenção de uma argamassa de fácil manuseio e aplicação, que atenda às especificações técnicas, seja ecologicamente correto, durável, possa ter baixo custo final e que consiga fechar um ciclo produtivo, onde o resíduo de um processo seja inserido como insumo na cadeia produtiva de outro produto.



1.2 - Justificativa e relevância do trabalho

Na busca de um material com ampla abrangência de uso na construção civil e que seja consumido em elevados volumes, a argamassa apresentou-se como um material propício para incorporação dos resíduos provenientes da fabricação de produtos cerâmicos. Seguindo a concepção de um produto mais econômico e eficiente com a adição de RCM, buscou-se o desenvolvimento de argamassas com esta adição, visto que, hoje em dia é um produto quase que obrigatório em todas as construções e em elevados volumes.

A adoção da argamassa industrializada como produto a ser desenvolvido se deve aos ganhos potenciais deste produto em comparação com a argamassa tradicional preparada em obra e das características físicas do resíduo, visando também atender a demanda do mercado para este produto que vem aumentando nos últimos anos.

Os estudos relacionados com o aproveitamento do RCM como matéria-prima na construção civil, são poucos e recentes justificando a necessidade de desenvolver processos tecnológicos que sejam mais abrangentes e, principalmente viáveis para o aproveitamento deste material, para que possa ser realmente implementado nas obras.

A motivação, portanto, é a tentativa de aproveitamento de forma racional dos resíduos provenientes do processo industrial de produção de peças cerâmicas, que se encontram em grande disponibilidade no município, somando um total de mais de 19 mil toneladas/mês. Neste contexto, apresenta-se uma alternativa de destino do RCM através de uma metodologia para seu emprego na produção de argamassas, por meio da investigação do comportamento deste produto quando produzido com adição de RCM.



2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - RESÍDUOS SÓLIDOS: Origem e Definição

2.1.1 – Definições

De acordo a Associação Brasileira de Normas Técnicas --ABNT – todo material enquadrado dentro das especificações a seguir é considerado como lixo ou resíduo:"restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo-se apresentar no estado sólido, semi-sólido ou líquido, desde que não seja passível de tratamento convencional."

Deve se ressaltar, no entanto, a relatividade da característica inservível do lixo, pois aquilo que já não apresenta nenhuma serventia para quem o descarta, para outro pode se tornar matéria-prima para um novo produto ou processo. Nesse sentido, a idéia do reaproveitamento do lixo é um convite à reflexão do próprio conceito clássico de resíduos sólidos. Desta forma, somente quando não houver mais alguém para reivindicar uma nova utilização dos elementos então descartados, poderíamos então denominá-lo como lixo propriamente dito.

Diante da diversidade de materiais descartados atualmente na sociedade, bem como suas inúmeras características diferentes, tanto no âmbito de sua composição, origem ou natureza, riscos ao meio-ambiente e a saúde, quanto no âmbito de sua morfologia quando descartados, faz-se necessário para um melhor tratamento sua classificação de acordo com padrões pré-estabelecidos pela NBR 10.004 (Resíduos Sólidos – Classificação) e serão apresentados resumidamente a seguir.



2.1.2 – Classificação dos Resíduos Sólidos

A NBR 10.004 classifica os resíduos sólidos em três classes, quanto ao seu grau de risco à saúde e ao meio-ambiente, “Classe I - perigosos”, “Classe II – não inertes” e “Classe III – inertes” , como também em relação a sua origem, doméstico ou residencial, comercial, público, domiciliar especial e de fontes especiais. Para um melhor entendimento do assunto estes critérios serão apresentados de forma sucinta.

Quanto ao Risco a Saúde e ao Meio-ambiente

- **Classe I – perigosos:** São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- **Classe II – não inertes:** São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos – ou Classe III – Inertes.
- **Classe III – inertes:** São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos



padrões de potabilidade da água, conforme listagem nº 8 (Anexo H da NBR 10.004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Quanto a Natureza ou Origem

- **Doméstico ou residencial:** São os resíduos gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais.
- **Comercial:** São os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida.
- **Público:** São os resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos.
- **Domiciliar Especial:** Grupo que compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus. Observe que os entulhos de obra, também conhecidos como resíduos da construção civil, só estão enquadrados nesta categoria por causa da grande quantidade de sua geração e pela importância que sua recuperação e reciclagem vem assumindo no cenário nacional.
- **Fontes especiais:** São resíduos que, em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais em seu manuseio, acondicionamento, estocagem, transporte ou disposição final. Dentro da classe de resíduos de fontes especiais, merecem destaque: industrial (objeto de estudo deste trabalho), radioativo, de portos aeroportos e terminais rodoferroviários, agrícolas e resíduos de serviços de saúde.



Por fazer parte do escopo deste trabalho o item será descrito a seguir:

- **Lixo Industrial:** São os resíduos gerados pelas atividades industriais. São resíduos muito variados que apresentam características diversificadas, pois estas dependem do tipo de produto manufaturado. Devem, portanto, ser estudados caso a caso. Adota-se a NBR 10.004 da ABNT para se classificar os resíduos industriais: Classe I (Perigosos), Classe II (Não-Inertes) e Classe III (Inertes).

2.2 - Reciclagem de resíduos como materiais para a construção

Denomina-se reciclagem a separação de materiais do lixo com a finalidade de trazê-los de volta à indústria para serem beneficiados. Esses materiais são novamente transformados em produtos comercializáveis no mercado de consumo.

Destacam-se como principais vantagens da reciclagem:

- preservação de recursos naturais;
- economia de energia;
- economia de transporte (pela redução de material que demanda o aterro);
- geração de emprego e renda;
- conscientização da população para as questões ambientais.

.Diante deste quadro, a possibilidade de aproveitamento destes resíduos mostra-se como uma das alternativas mais sensatas na política de gerenciamento de resíduos sólidos.

A reciclagem pode contribuir bastante com a diminuição das áreas destinadas à deposição e redução das despesas relacionadas. A incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia para a produção do mesmo produto sem resíduos, e pode, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e seu



mercado consumidor potencial, reduzir distâncias de transporte e contribuir para a redução da poluição gerada.

A reciclagem de resíduos pode reduzir a poluição: a utilização de escória de alto forno e cinzas volantes pela indústria cimenteira brasileira reduz acentuadamente o volume de CO₂ liberado na atmosfera; a reciclagem de sucata de aço reduz em cerca de 90 % a geração de resíduos minerais.

A utilização de resíduos como matéria prima reduz a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente. A reciclagem de uma tonelada de sucata de aço permite uma redução em 90% no consumo de materiais primas naturais. O entulho de construção reciclado pode substituir em grande parte os agregados naturais empregados na produção de concreto, blocos e base de pavimentação. A substituição do clínquer de cimento Portland em 50 % por escória de alto forno permite uma redução de cerca 40 % no consumo de energia.

Os resíduos não reciclados são depositados em aterros sanitários. Estes aterros ocupam espaços cada vez mais valorizados, especialmente aqueles próximos aos grandes centros urbanos. Aterros sanitários concentram resíduos, muitos deles nocivos, e significam risco de acidentes ambientais, mesmo que tomadas todas as medidas de técnicas de segurança. Resíduo reciclado é produtivo e não ocupa espaço em aterros sanitários. Resíduos nocivos podem ser "encapsulados" no processo de reciclagem.

A reciclagem pode auxiliar na produção de materiais de menor custo, colaborando na redução do custo das habitações, um dos mais caros e inacessíveis bens que produzimos e da infra-estrutura - rodovias, estradas de ferro, barragens etc (<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>).

2.3 - Aditivos Minerais

Várias pesquisas têm sido conduzidas, visando uma redução do consumo de energia na fabricação de cimento Portland e uma melhor adequação do produto às



varias solicitações do mercado consumidor, apesar das qualidades e do uso difundido e generalizado do cimento.

Assim, a utilização de ‘adições ativas’ junto ao cimento Portland tem se tornado cada vez mais freqüente. Os aditivos são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que quase sempre não possuem propriedades cimentícias por si só. Somente quando colocados na presença de umidade é que eles reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH) liberado pelo cimento Portland durante sua hidratação, formando novos compostos com propriedades aglomerantes (SAAD *et al.*, 1983 a; (MALHOTRA e MEHTA, 1996; NBR 12653, 1992).

Os aditivos minerais, em geral, são de origem natural ou artificial. As pozolanas naturais mais comuns são: cinzas vulcânicas, pumicita, opalina, micas, calcedônias. Todas estas originadas de rochas vulcânicas. Pozolanas naturais têm sido largamente utilizadas como substitutas do CP em muitas aplicações devido às vantajosas propriedades, que incluem: redução de custo, redução na evolução do calor de hidratação, redução da permeabilidade, controle da expansão álcali-agregado, aumento de resistência química, redução da retração por secagem do concreto e a melhora das propriedades do concreto fresco (LEA, 1974).

Os aditivos artificiais mais freqüentemente estudados e utilizados são: as argilas calcinadas, cinzas volantes, escórias de alto-forno, sílica ativa e cinza da casca do arroz. Estes materiais são geralmente rejeitos industriais ou agrícolas, necessitando assim de pouco ou nenhum tratamento prévio. A metacaulinita, produzida por um tratamento térmico controlado da caulinita, pode ser usada como um constituinte do concreto, desde que esta tenha propriedades pozolânicas (Kaloumenou *et al.*, 1999).

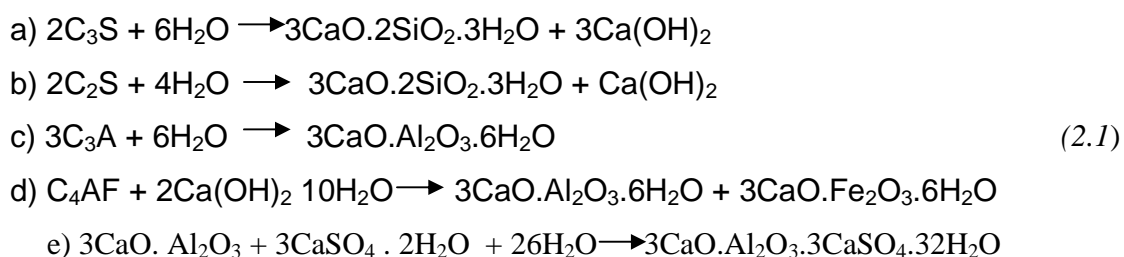
A norma ABNT NBR 12653 de 1992 adota a classificação dos aditivos em três grupos, apresentado na Tabela 1. Cujas classificações são baseadas apenas na origem do material, o que não engloba pozolanas de reatividade alta como sílica ativa e cinza da casca do arroz.

**Tabela 1** – Classificação dos aditivos minerais segundo NBR 12653 (1992).

Classe	Materiais que obedecem aos requisitos
N	Pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas.
C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso.
E	Cinza volante proveniente da queima do carvão sub-betuminoso e qualquer material que difere das classes anteriores.

Como mencionado anteriormente, os concretos e argamassas fabricados com CP apresentam muitas vezes problemas de degradação, que são devidos a duas causas principais: a permeabilidade da pasta de cimento, que permite o ingresso de água e de agentes químicos agressivos para o interior da estrutura e a elevada quantidade de CH formada durante o processo de hidratação do CP, que, além de ser solúvel, é altamente reativo.

A reação de hidratação dos componentes do CP na presença de água obedece às seguintes equações (Equações 2.1):



Da ocorrência destas reações, comumente sobra uma determinada quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita, CH) que pode tanto se carbonatar, formando CaCO_3 , como permanecer reativo, o que pode torna-lo um componente prejudicial aos PBC, pois nesta última forma, pode reagir com um agregado ácido (calcedônia, por exemplo)



dando origem a um silicato de cálcio hidratado com aumento de volume ou ser facilmente solubilizado e lixiviado, deixando a matriz porosa e mais vulnerável aos ataques de agentes externos (LEA, 1974).

Sendo de 20%, em massa, a quantidade aproximada de Ca(OH)_2 produzida durante a hidratação do CP, podemos compreender a importância de se controlar sua produção.

Uma maneira eficaz de se obter este controle é utilizada empiricamente, há cerca de vinte séculos (os romanos costumavam moer telhas, tijolos e louças cerâmicos para serem utilizados como material pozolânico) (MIELENZ, 1950). Somente no início do século XX é que foram propositalmente feitas as primeiras tentativas de substituir parte do cimento por material pozolânico, o que permitiu reduzir a quantidade de portlandita, visto que a pozolana reage com a portlandita formando compostos estáveis de poder aglomerante, ou seja, forma novos produtos cimentícios, tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H, por exemplo).

Assim, a sílica amorfa presente na pozolana reage com o hidróxido de cálcio formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e a alumina reativa presente em muitos aditivos, produz compostos cimentícios (como o C_4AH_{13}) em presença de Ca(OH)_2 , água e íons sulfato (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Essa reação é denominada reação pozolânica e ocorre basicamente da maneira indicada abaixo (*Equação 2.2*).



Como o hidróxido de cálcio é a fase mais fraca do cimento hidratado, contribuindo muito pouco para a resistência da pasta de cimento e é, dentre os produtos da hidratação, o primeiro a ser solubilizado e lixiviado pela água, assim, seu consumo pela pozolana traz implicações positivas sobre a resistência e a durabilidade de concretos e argamassas. Da mesma forma, o hidróxido de cálcio da pasta de cimento Portland é o composto mais suscetível à carbonatação.



No entanto, uma característica positiva do Ca(OH)_2 no concreto armado é que ele mantém um alto pH, o que melhora a estabilidade da camada óxida que protege e passiva a armadura de aço (AÏTCIN, 1998; NEVILLE,1997). Porém, não é necessário todo Ca(OH)_2 produzido na hidratação do cimento Portland (em torno de 20% em massa) para a passivação.

Basicamente, as vantagens obtidas pelo uso de aditivos minerais em substituição ao cimento em argamassas e concretos são:

- aumento da resistência mecânica;
- diminuição do calor de hidratação;
- aumento da trabalhabilidade;
- aumento da resistência ao ataque ácido;
- aumento da durabilidade por inibição da reação álcali-agregado.

Alguns aspectos peculiares da reação pozolânica devem ser observados. A combinação do CH com a pozolana leva à formação de compostos ligantes adicionais, de características similares àqueles decorrentes da hidratação direta dos grãos de clínquer, proporcionando uma estrutura mais compacta e química e mecanicamente mais resistente que a exibida pelo cimento Portland sem adições (ZAMPIERI, 1989). A reação pozolânica é uma reação lenta, pois necessita da formação prévia do hidróxido de cálcio e, desta forma, a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência são lentos. A redução do calor de hidratação é benéfica, pois evita o surgimento de fissuras térmicas.

Os efeitos benéficos da utilização de pozolanas em concretos não se limitam à reação pozolânica. Existe também um efeito físico que advém da capacidade das pequenas partículas deste material (que não reagiram) se posicionarem nos vazios



entre partículas de cimentos, e na interface agregado-pasta. Este efeito é conhecido como efeito microfíler ou simplesmente efeito filer (ROSENBERG e GAIDIS, 1989).

A incorporação de materiais finamente divididos geralmente aumenta a trabalhabilidade do concreto fresco (MEHTA e MONTEIRO, 1994), por reduzir o tamanho e o volume de vazios. Este refinamento dos poros reduz a permeabilidade do concreto e, aliado à redução de sua alcalinidade, contribui para a durabilidade da estrutura, principalmente quando exposta a ataques químicos.

Mehta (1981) obteve o controle da expansão álcali-agregado no concreto por meio da adição de vários teores de pozolana á mistura de preparo do concreto. Uma outra pesquisa, realizada por Monteiro et al. (1997), utilizando diferentes aditivos minerais, revelou uma significativa redução da expansão do concreto quando atingidos altos níveis de substituição por cinza volante. E foi verificada, praticamente, a ausência total de reação álcali-agregado quando empregados altos teores de escória de alto-forno no concreto.

Algumas normas, recomendações e especificações ditam parâmetros físicos, químicos ou mecânicos com o intuito de assegurar que o material seja qualificado como pozolânico. Diversos estudos (ISAIA e HELENE, 1994; MALHOTRA, 1996; MEHTA, 1987; GAVA, 1999) apresentam severas críticas em relação a essas exigências, pois são restritivas e inibidoras, devido à falta de correlação entre as características fixadas e as propriedades desejadas para o concreto. Para tais autores, os valores impostos para a soma dos óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) não garantem que a pozolana irá desenvolver propriedades cimentícias.

Por outro lado, há um consenso entre os pesquisadores sobre o fato do desempenho dos aditivos minerais estar ligado a sua reatividade, isto é, ao teor de material amorfo, e principalmente a finura. O aumento da quantidade de partículas finas (aumento da superfície específica) desempenha um papel preponderante mediante o efeito de nucleação das partículas de cimento, propiciando maior quantidade de locais para hidratação dos compostos. Segundo Calleja (1983), a pozolana, para desenvolver



compostos com atividades aglomerantes, deverá ser moída até obter uma superfície específica maior do que a do clínquer.

A influência da finura da pozolana tem sido reportada em vários artigos específicos; tal comportamento é, todavia, bastante previsível, uma vez que ao se incrementar a finura tem-se conseqüentemente um aumento da área de reação do material.

Para utilização em concreto de alto desempenho a uniformidade e a compatibilidade com outros aditivos devem ser verificadas, para assegurar o máximo desempenho. De acordo com Isaia e Helene (1993) há uma tendência atual em conjugar os efeitos benéficos e específicos de diferentes aditivos minerais para incrementar as propriedades do concreto e sua durabilidade. Ao empregar a sílica ativa em conjunto com a cinza volante, por exemplo, aglutina-se a alta reatividade da primeira com a melhoria que o segundo proporciona na reologia do concreto fresco.

A seguir será discutido, sucintamente, aspectos relativos à obtenção e principais propriedades do aditivo mineral empregado neste trabalho: argila caulinítica calcinada.

2.4 - RESÍDUO CERÂMICO

O Município de Campos dos Goytacazes está localizado na Região Norte do Estado do Rio de Janeiro, aproximadamente a 279 km da capital estadual, Rio de Janeiro, com uma área de 4.037 km², sendo o maior município do Estado (Figura 2) e possuindo uma população de 406.989 habitantes IBGE (2002).



Figura 2 - Localização do Município

No Município de Campos dos Goytacazes, existe um pólo cerâmico constituído atualmente por mais de 100 indústrias cerâmicas, este pólo é o segundo maior produtor de tijolos do Brasil, produzindo cerca de 90 milhões de peças por mês, de onde saem do Município aproximadamente 400 caminhões carregados de mercadorias por dia e a produção é basicamente vendida para os mercados do: Grande Rio, Sul Fluminense, Zona da Mata Mineira e Espírito Santo (RAMOS ,2003). Este pólo é responsável por 35% da produção cerâmica do Estado do Rio de Janeiro. A área de concentração das cerâmicas encontra-se à margem direita do Rio Paraíba do Sul, ao longo da estrada RJ-216 que liga Campos ao Farol de São Tomé no litoral conforme mostra a Figura 3(RAMOS, 2003).

SABOYA *et al.* (2000) estimaram que cerca de 10% do total produzido por estas indústrias transformam-se em resíduo durante o processo de fabricação, seja na linha de produção ou na estocagem, este desperdício gera aproximadamente 19 mil toneladas/mês de resíduo.



O hidróxido de cálcio é um dos produtos da hidratação do cimento não muito desejável por ser vulnerável ao ataque dos sulfatos e por possuir reatividade química com o dióxido de carbono (CO_2), processo conhecido por carbonatação, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), que é solúvel em água, sendo portanto facilmente lixiviado, tornando a matriz cimentícia mais susceptível a ataques (LEA, 1974), portanto, a reatividade do hidróxido de cálcio com a metacaulinita, conhecida como atividade pozolânica, é considerada muito benéfica por prevenir que ocorram patologias.

As pozolanas também contribuem para a durabilidade dos produtos a base de cimento, ao reduzirem a permeabilidade da matriz tornando a microestrutura mais densa e homogênea, seja por suas características de preenchimento ao ocupar os vazios existentes na matriz enquanto anidra (não hidratada), ou pelo crescimento dos cristais resultantes de sua hidratação.

Portanto, o aproveitamento do RTM na produção de argamassas industrializadas, além do apelo ecológico, pelo fato de abrandar uma agressão ao meio ambiente ao reduzir o lançamento de resíduos de forma indevida que continuam ocorrendo devido a falta de fiscalização dos órgãos competentes, a ausência de locais regulamentados para o descarte e a inexistência de um plano gestor para os resíduos, e por reduzir também o consumo de recursos naturais utilizados para a fabricação de argamassa, contribui para melhoria nas propriedades da argamassa e conseqüentemente para aumentar a durabilidade do produto final.

Este contexto suscita a necessidade de serem realizados estudos técnico/científicos, que contribuam para a solução da problemática do gerenciamento de resíduos sólidos, em específico neste trabalho o resíduo cerâmico.



2 -4 -1 – Geração do Resíduo Cerâmico

Para melhor compreensão dos mecanismos de geração de resíduos em uma indústria cerâmica, será feita uma breve revisão dos processos de fabricação dos produtos cerâmicos na história e no Município de Campos dos Goytacazes.

A necessidade de o homem criar espaços em busca de abrigo, remonta à pré-história. Utilizando recursos naturais precisava defender-se dos predadores, dos rigores da natureza e de seus próprios semelhantes. Não demorou a perceber que sua sobrevivência dependia da segurança destes refúgios. Fechar espaços, eis a questão! A arte de construir evoluiu por milhões e milhões de anos.

Grande parte das escavações arqueológicas sempre tem encontrado vestígios cerâmicos, materiais imensamente resistentes ao passar do tempo, demonstrando sua existência bastante antiga. Seu emprego, portanto, remonta a milhares de anos, sendo sua utilização tão antiga quanto a chamada "arquitetura da terra". Entre 8.000 ou 7.000 a.C. foram encontrados vestígios de casas feitas de tijolos de barro em Jericó, na Antiga Palestina, com muros de pedra. Nesse período, ainda não existia nessa região a cerâmica propriamente dita, mas apenas vestígios de uma cerâmica pré-neolítica (BRAUNAS, 2005). Neste período os tijolos eram utilizados no estado seco, ou seja, não eram queimados.

Os primeiros tijolos queimados datam de 3000 a.C. e eram empregados para revestimentos externos e mais freqüentemente como muros de proteção. No entanto, a arte de queimar objetos, em particular utensílios domésticos, já era conhecida a muitos séculos antes. Muitos exemplos de tijolos queimados, relativos ao período compreendido entre 1600 a 1100 a.C., foram encontrados em locais da antiga Babilônia. Embora a arte de produção de argila queimada já fosse conhecida na Roma primitiva, após as civilizações assíria, babilônica e egípcia, os tijolos queimados só foram empregados para a construção de paredes e muros, em geral, durante o período imperial compreendido entre 31 a.C. a 476 d.C. (OLIVEIRA, 2003).

Até o século XIX os sistemas de produção não se modificaram muito. A produção permaneceu manual, a secagem era realizada ao sol e a queima em fornos trapezoidais. No Brasil, a fabricação de tijolos e outros produtos afins (telhas, vasos e outros) ocorreu no início do século passado. Entretanto, foi somente na década de 30 que foram fabricados os primeiros tijolos furados através de processos mecanizados (OLIVEIRA, 2003). Será apresentada de forma resumida, como se configura o processo produtivo nas indústrias da região, desde a chegada da matéria-prima até o produto final pronto. A argila é extraída por retroescavadeiras que carregam os caminhões do tipo basculantes, estes transportam a matéria-prima até o pátio da indústria onde será estocado.



Figura 4 – Matéria-prima estocada no pátio

No depósito, uma máquina transportadora (pá carregadeira) abastece a caixa de alimentação com argila. Da caixa de alimentação, a argila segue por uma esteira até chegar ao misturador.



Figura 5 - Misturador

No misturador é adicionada água a argila, com o intuito de se controlar a umidade, esta mistura fica com aspecto de “massa”. Do misturador, a argila é conduzida por esteira até o laminador, que reduz a argila pastosa em lâminas finas, fazendo-a passar entre dois cilindros de ferro fundido que trituram por esmagamento todas as pedrinhas ou torrões ainda não desfeitos.

O material laminado é lançado na maromba a vácuo, onde calcadores forçam-no a passar através das grelhas, fragmentando-o em pequenas porções nas quais se processa a desaeração, reduzindo, ao mínimo, o ar contido ou incluído na massa cerâmica pela ação da água agregada.

Caindo no parafuso-sem-fim, a argila é impelida para frente, passa através da câmara de vácuo e depois através dos orifícios da boquilha, que funciona como molde dos tijolos.

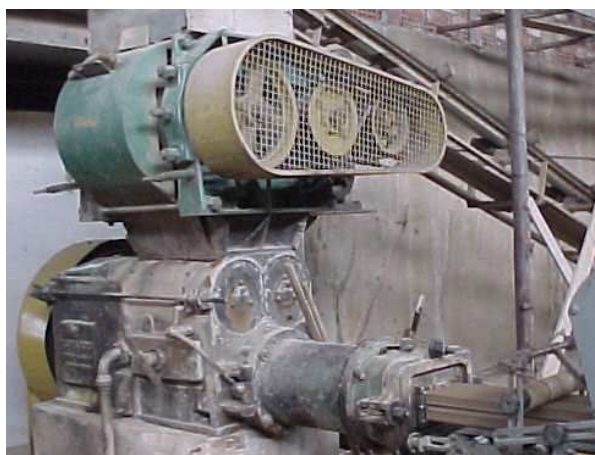


Figura 6 - Maromba

O bloco de argila (já na forma do tijolo), saindo da boquilha, corre sobre os rolos da máquina cortadora e é cortado no tamanho especificado.



Figura 7 – Máquina para corte da peças

Após o corte, os tijolos são transportados manualmente através de carrinhos de mão ou por esteiras até aos locais de secagem, podendo ser usados galpões para secagem natural ou estufas para secagem artificial, onde são colocados em prateleiras e permanecerão para secagem natural por um período médio de 7 (sete) dias com tempo bom ou por um período médio de 3 (três) dias para secagem em secadores artificiais.



Figura 8 – Secagem em estufa



Figura 9 – Secagem natural

Após a secagem, os tijolos são transportados manualmente ou mecanicamente até os fornos, onde serão arrumados da melhor forma possível para que a queima se processe de forma homogênea em todos os tijolos. Após a etapa de queima o forno é aberto para resfriamento dos tijolos. Após o resfriamento os tijolos adquirem temperatura ambiente, são retirados do forno, classificados (separa-se os tijolos de primeira e os de segunda), e encaminhados para consumo.

Apesar da evolução nos processos de fabricação dos produtos cerâmicos ao longo dos séculos, o pólo cerâmico do Município de Campos dos Goytacazes apresenta uma disparidade tecnológica entre as indústrias, onde a minoria das indústrias fazem uso de equipamentos mais modernos e automatizados, como fornos com queimadores a gás estufas, esteiras e outras máquinas automáticas, enquanto a grande maioria, 86% delas (RAMOS, 2003), ainda faz uso de processos mais rudimentares, como fornos à lenha e óleos combustíveis, secagem ao ar livre (figura 9), transporte em carrinhos de mão e outros equipamentos mais simples.

As fábricas que não utilizam o gás como combustível para a queima, comprometem a qualidade final de suas peças, devido as oscilações no poder calorífico de seus fornos e pela baixa temperatura alcançada, em torno de 650°C. Estas oscilações e o baixo patamar de queima, somados a falta de uma metodologia de



trabalho, geram peças com geometria irregular, baixa resistência, falta de uniformidade nas peças e com trincas devido a secagem durante a queima. Ramos 2003, considera que entre as etapas da produção, a fase denominada como queima é uma das principais responsáveis pela má qualidade das peças, assim como pelas perdas, conseqüentemente a que mais gera resíduo.

2.5 – Argamassa

O uso da argamassa remota aos tempos da Pérsia antiga, onde eram feitas misturas com Cal, o aglomerante conhecido naquela época, para assentamento de peças cerâmicas rudimentares, ou seja, aquelas cerâmicas secas ao sol. Devido a algumas dificuldades encontradas para o uso da Cal como aglomerante, tendo como principal o não endurecimento em locais de excessiva umidade ou embaixo d'água, começaram então a surgir outras misturas que atendessem as carências da Cal como aglomerante, a primeira delas foi a mistura de cinzas vulcânicas com barro cozido triturado. Mesmo sem ter domínio das reações químicas que aconteciam naquela mistura, eles alcançaram sucesso, pois a composição de sílica ativa e alumina das cinzas vulcânicas reagem com a cal formando um composto que quando endurecido apresentava alta resistência para os padrões da época, atualmente esta mistura é conhecida como cimento pozolânico.

Estas misturas deram origem ao aparecimento das argamassas, material que vem sendo utilizado até os dias de hoje, seja nas construções mais singelas como nas mais sofisticadas e luxuosas.

Outros ligantes também eram utilizados como o óleo de baleia, porém os mais utilizados tinham como constituinte principal a Cal, e foi dessa forma que foram confeccionadas as primeiras argamassas no Brasil, durante sua colonização.

Como todos os principais produtos de utilização na construção, as argamassas possuem uma série de documentos normativos que as definem, bem como estabelecem



suas especificações de acordo com seu uso. Dentre estes documentos temos como principal a NBR 13281 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.

De acordo com a NBR 13281 defini-se como argamassa uma mistura homogênea de agregados miúdos (o mais utilizados são as areias), aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria.

Para as argamassas estarem em conformidade com a norma devem cumprir algumas exigências apresentadas a seguir:

Para assentamento de blocos de alvenaria de vedação as argamassas devem possuir características apropriadas a este fim, tais como:

- Alta retenção de água, a ser verificada de acordo com o estabelecido pela NBR 13277;
- Baixo teor de ar incorporado, a ser verificada de acordo com o estabelecido pela NBR 13278;
- Resistência à compressão, a ser verificada de acordo com o estabelecido pela NBR 13279.

Porém existem outros parâmetros não contemplados na norma, que devem ser avaliados de modo a garantir um bom desempenho das argamassas, seguindo o conceito de que elas são destinadas a proteger as paredes de tijolos ou blocos, de forma a ajudar a proteger a edificação contra a penetração da chuva e de outros fenômenos atmosféricos, aumentando a durabilidade por meio de um cobrimento de superfícies.

Para tanto é necessário que tenham propriedades aos seguintes requisitos de desempenho:

- Capacidade de absorver deformações (movimento térmico, higroscópico e diferencial entre os componentes);



- Aderência à base (que depende da capacidade do revestimento de absorver deformações, da rugosidade da base e dos cuidados com a sua preparação);
- Resistência à compressão e ao desgaste superficial;
- Baixa permeabilidade ou impermeabilidade à água;
- Baixa absorção de água;
- Durabilidade.



3. – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Materiais

Para realização deste trabalho de mestrado, centrado no estudo do desempenho do resíduo cerâmico moído como produto constituinte de argamassas, foram utilizados além do próprio RCM, os componentes típicos de argamassas convencionais (cimento e areia). As características destes materiais são descritas abaixo

3.1.1 - Resíduo Cerâmico Moído

O resíduo utilizado neste trabalho é proveniente da região norte do Estado do Rio de Janeiro, mais especificamente de indústrias cerâmicas do município de Campos dos Goytacazes, coletados nos pátios de seis fábricas distintas, onde cada uma utiliza uma faixa de temperatura de queima, sendo 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C, as temperaturas usuais de queima praticadas pelas Cerâmicas da região, uma vez que estas temperaturas variam de acordo com o tipo de forno que cada fábrica possui e em função do produto a ser fabricado. Essas temperaturas além de serem informadas pelos donos das cerâmicas foram verificadas in loco por meio de “termopar”.

Esses materiais foram fragmentados em um moinho de bolas, onde foi avaliada a eficiência da moagem no moinho (de bolas Sonex) com capacidade de 14 kg por batelada, por meio de análise das curvas granulométricas para quatro tempos distintos de moagem: 0,5h, 1h, 2h e 4h, foi também levado em consideração o gasto de energia e a redução da granulometria do rejeito em função do tempo de moagem.

A redução do tamanho das partículas para cada tempo foi analisada comparando as curvas granulométricas para diferentes tempos de moagem, de modo a avaliar se a redução das partículas (quando houver) foi suficientemente significativa, de forma que compensasse o gasto de energia para se aumentar o tempo de moagem. Neste sentido, o estudo consistiu na avaliação do procedimento necessário para a obtenção de uma maior finura economicamente viável, ou seja, a melhoria das propriedades do



RCM causado pela redução do tamanho das partículas, compense o gasto de energia, resultante do aumento de tempo de moagem, para se alcançar tal patamar de redução.

3.1.2 - Agregado Miúdo

Os agregados utilizados também são naturais do Município de Campos dos Goytacazes. Para os ensaios foi empregada uma Areia Normal preparada conforme Norma Brasileira (NBR 7214/1992) fracionada em laboratório, proveniente do Rio Paraíba do Sul. O material, caracterizado conforme recomendações da ABNT, possui módulo de finura de 3,23 (NBR 7211/1983); massa específica aparente no estado solto de 1,39 g/cm³ (NBR 7251/1982) e massa específica teórica de 2,65 g/cm³ (NBR 6508/1984).

3.1.3 - Cimento

O cimento empregado na produção das argamassas foi o cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno (CP II E 32), da marca “Votoran”, por ser o mais utilizado na região. Suas características físicas são: massa específica teórica de 2,92 g/cm³ (NBR 6474/1984) e superfície específica Blaine de 342 m²/Kg (NBR NM 76/1998). Durante todo trabalho foi utilizado o mesmo lote de cimento para se evitar variações nos resultados devido a variação de composição do cimento. A tabela 2 mostra o resultado da análise de espectroscopia por fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX) para a determinação de sua composição química, em um equipamento Shimadzu EDX-700, onde a condição de ajuste era de “vácuo dois canais” e as amostras foram analisadas em pó, com o auxílio de um porta-amostra.



Tab. 2 – Constituição química do cimento

Elementos	Percentual
CaO	70,21%
SiO ₂	17,03%
Al ₂ O ₃	5,89 %
SO ₃	3,38 %
Fe ₂ O ₃	1,82 %
K ₂ O	0,86 %
TiO ₂	0,44 %
Outros	0,38 %

3.2 - METODOLOGIA

3.2.1 - Localização e coleta do Resíduo

Uma pesquisa realizada na base de dados da Oficina de Geologia e Geoprocessamento do LECIV (RAMOS, 2003), forneceu as informações pertinentes sobre o quantitativo das indústrias na região, bem como a localização delas e também a identificação da faixa de queima utilizada por cada uma na fabricação de seus artefatos cerâmicos. De posse destes dados, num segundo estágio, foram coletadas amostras em seis indústrias diferentes considerando a variável temperatura, ou seja: 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C. O motivo de utilizar amostras em diferentes temperaturas é de criar um conjunto representativo dos resíduos produzidos no pólo cerâmico e não de uma única indústria, englobando desta forma todas as temperaturas utilizadas na região.

3.2.2 - Moagem do Material

A atividade pozolânica aumenta com a superfície específica do material, parâmetro diretamente ligado a finura da pozolana. Neste sentido o estudo de eficiência do moinho consistiu na avaliação do procedimento necessário para a obtenção de uma finura economicamente viável, ou seja, a diminuição dos tamanhos das partículas

compense o aumento no consumo de energia relacionado ao maior tempo de moagem. Para isso, foi utilizado um moinho de bolas Sonnex (figura 10) trabalhando em sua capacidade máxima de 14 kg por batelada, fixando quatro tempos de moagem: 0.5h, 1h, 2h e 4h.

Para todas as classes de temperaturas estudadas as amostras de resíduos passaram por um triturador de rolos, sistema esse que fragmentava as partes maiores que 2cm de diâmetro equivalente, garantido um tamanho máximo de partícula para todas as amostras, no entanto, devido ao seu sistema de fragmentação ser constituído por rolos seqüenciais, desta forma as partículas menores mantinham seu tamanho original, este recurso foi utilizado para buscar o máximo de uniformidade nas amostras, garantindo desta forma resultados pós-moagem mais confiáveis.



Figura 10: Moinho de Bolas Sonnex

3.2.3 - Caracterização Química do Material

O RCM foi submetido à análise de espectroscopia por fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX) para a determinação de sua composição química, em um equipamento Shimadzu EDX-700 (figura 11), onde a condição de ajuste era de “vácuo dois canais” e as amostras foram analisadas em pó, com o auxílio de porta-amostra. Para tanto, o RCM passou por um processo de preparo de amostras, correspondendo à

secagem em estufa a 110°C e posterior peneiramento na malha ABNT 200 (abertura de 0,75 mm), para este tipo de análise esta malha é a mais recomendada por especialistas que trabalham com o equipamento.



Fig. 11 – Equipamento Shimadzu EDX-700 LECIV/CCT/UENF

3.2.4 – Composição Mineralógica (XRD)

Amostra do RCM foi analisada por meio de difração de Raios X em um difratômetro Freiburger Präzisionsmechanick GmbH modelo URD 65 com radiação $\text{Cu}_{K\alpha}$ operando a 35KV e 40mA. Esta análise foi realizada no Laboratório de Ciências Físicas (LCFIS – UENF). A preparação da amostra envolveu secagem em estufa à 110°C e posterior peneiramento na malha ABNT 325, abertura de 0,044mm, para este tipo de análise esta malha é a mais recomendada por especialistas que trabalham com o equipamento.

3.2.5 - Propriedades Físico-Mecânicas das Argamassas

Com o objetivo de avaliar as propriedades Físico-Mecânicas das argamassas adotou-se como procedimento seguir as determinações da Norma Brasileira NBR 13281/2001, que especifica e classifica as argamassas segundo os resultados obtidos nos ensaios relacionados abaixo:



- NBR 13279/1995 - Resistência à compressão;
- NBR 13277/1995 - Capacidade de retenção de água;
- NBR 13278/1995 - Teor de ar incorporado e densidade de massa;
- NBR 5753 - Índice de atividade pozolânica.

Segundo determinação da NBR 1327/1995, para todos os ensaios realizados as argamassas foram confeccionadas com sua dosagem de teor de água de acordo com a consistência em mesa de abatimento (flow table).

A cura dos corpos de prova ocorreu nas dependências do laboratório de engenharia civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), com condições controladas de temperatura, $23^{\circ} \text{C} \pm 2$, e umidade relativa do ar, $65\% \pm 5$, ambos parâmetros se enquadram nos requisitos da Norma.

Tomou-se como referência para a avaliação do comportamento das argamassas estudadas as prescrições impostas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que classificam as argamassas utilizadas no Brasil, onde os seus limites de classificação são apresentados abaixo.

As argamassas confeccionadas com substituições parciais de cimento por RCM terão seus resultados avaliados tendo como referência os valores limites da NBR 13281/2001, para verificação de seu enquadramento nos padrões mínimos estabelecidos.

Tab. 3 – Exigências mecânicas e reológicas para argamassas (NBR 13281/2001)

Características	Identificação	Limites	Método
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1 \text{ e } < 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,0 \text{ e } \leq 8,0$	
	III	$> 8,0$	
Capacidade de retenção de água (%)	Normal	$\geq 80 \text{ e } \leq 90$	NBR 13277
	Alta	> 90	
Teor de ar incorporado (%)	A	< 8	NBR 13278
	B	$\geq 8 \text{ e } \leq 18$	
	C	> 18	



O objetivo dos ensaios foi avaliar a influência do teor de substituição de cimento por RCM, e também da temperatura de queima na qual foram fabricados os produtos cerâmicos, na resistência à compressão das argamassas, comparando o desempenho das diferentes amostras. As argamassas foram confeccionadas conforme a NBR 11580-1991 com substituições de 10%, 15% e 20% da massa de cimento pelo RCM. O traço utilizado foi 1:3 (material cimentício: areia), com uma relação água/aglomerante igual a 0,52 inclusive para a argamassa de referência (sem substituições).

3.2.5.1 – Resistência à Compressão de Argamassas

A realização deste ensaio seguiu as recomendações das normas vigentes conforme apresentado a seguir.

A realização do ensaio de resistência à compressão, de acordo com a NBR 13279/1995. Foram moldados quatro (a NBR 13279/1995 recomenda no mínimo três) corpos-de-prova (CPs) cilíndricos por idade e para cada traço, com argamassa recém-preparada, em moldes de 5 cm x 10 cm. Cada molde foi preenchido por quatro camadas de argamassa, compactadas moderadamente com 30 golpes de soquete metálico(NBR 7215).

Todos os CPs permaneceram 48h nos moldes, com proteção contra perda de umidade. A seguir, foram desmoldados e curados em ambiente de laboratório até a idade de ensaio. Assim, todos os traços tiveram o mesmo tipo de cura, para manter o padrão para comparação.

Nas idades de ensaio (7,14 e 28 dias), os CPs foram capeados com enxofre e foi determinado, com auxílio do paquímetro, o diâmetro de cada CP, e realizado a ruptura dos corpos-de-prova em máquina de ensaio à compressão (Versa Tester – 250 KN, figura 9.1), de acordo com as recomendações da norma (velocidade de carregamento = 0,5 KN/s), registrando as cargas de ruptura.



Fig. 12 – Prensa Versa Tester

3.2.5.2- Índice de Atividade Pozolânica NBR 5753 (Cimentos – Método de determinação de atividade pozolânica em cimento portland pozolânico)

Entende-se por índice de pozolanicidade a maior ou menor capacidade que a adição, neste caso metacaulinita, tem de reagir com o hidróxido de cálcio formado durante o processo de hidratação do CP, gerando novos componentes com propriedades cimentícias mais estáveis e resistentes. Essa reação consome o CH e completa-se em duas semanas à temperatura ambiente (RAVERDY et al., 1980).

A atividade pozolânica foi determinada através de um ensaio químico onde se compara a quantidade de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado com a quantidade de hidróxido de cálcio que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade (NBR 5753 – Método de determinação da atividade pozolânica em cimento portland pozolânico).

A norma ABNT NBR 5736, especifica uma quantidade de material pozolânico misturada ao cimento Portland variando de 15 a 50%, em massa. Assim, foram preparadas amostras contendo os limites da faixa especificada na norma, 15 e 50%. A norma ABNT NBR 5753 indica a utilização de uma amostra de 20g, portanto foram



preparadas amostras compostas; umas de 17g de cimento CP II E 32 + 3g de resíduo (15% de substituição) e outras de 10g de cimento CP II E 32 + 10g de (50% de substituição).

Preparadas as misturas em massa dos constituintes, efetuadas num recipiente vedado e agitado energicamente até a obtenção de uma homogeneidade, as mesmas foram, então, colocadas em recipientes contendo água destilada a 40°C e foram novamente agitadas energicamente por 20 segundos e colocados num ambiente termoestático a 40°C, onde permaneceram por sete dias.

Após o período de sete dias, o líquido foi derramado sobre um filtro e o filtrado foi recolhido num frasco que foi mantido em repouso até que este entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente.

Em seguida, depois de homogeneizado, foram retirados 50ml da solução para que os mesmos fossem titulados com ácido clorídrico utilizando-se alaranjado de metila como indicador e determinado-se assim a alcalinidade, anotando-se a quantidade em ml de ácido consumido por cada amostra.

Em um próximo passo a amostra recebeu a adição de oxalato de amônia para permitir a precipitação do cálcio em forma de oxalato de cálcio. Depois filtrou-se e lavou-se com água destilada fria. Em seguida, o oxalato de cálcio separado foi titulado por meio de uma solução de permanganato de potássio, anotando-se a quantidade consumida em ml.

De posse das quantidades em ml consumidas nas duas titulações por cada amostra, calculou-se a alcalinidade total (OH^-/l) e o teor de óxido de cálcio (CaO/l), pelas equações apresentadas a seguir (*Equações 3.8*).

1 ml de solução HCl 0,1 N = 0,1 milimol de OH

$$\text{milimol OH / litro} = \frac{\text{ml sol HCl} * 0,1 * 1000}{50} = \text{ml HCl} * 2 \quad (3.8)$$

1 ml de solução KMnO_4 0,05 N = 0,025 milimol de CaO



$$\text{milimol CaO/litro} = \frac{\text{ml sol KMnO}_4 * 0,025 * 1000}{50} = \frac{\text{ml KMnO}_4}{2}$$

3.2.5.3 – Capacidade de Retenção de Água

A realização deste ensaio seguiu as recomendações das normas vigentes conforme apresentado a seguir.

Este ensaio seguiu as prescrições da NBR 13277/1995, começando pela introdução da argamassa, preparada de acordo com a NBR 13276/1995, num molde cilíndrico de aço, de dimensões preestabelecidas e com massa conhecida (Mm), por meio de dez incrementos, rasando o excesso com auxílio de uma espátula. Depois de regularizada a superfície de ser feita a limpeza externa do molde, é determinada a massa do recipiente com argamassa (Mma).

Colocando-se sobre a superfície da argamassa duas telas de gaze, o conjunto de doze discos de papel-filtro e uma placa metálica rígida com diâmetro correspondente ao do molde. Em seguida, aplica-se um carregamento centralizado de 2 Kg sobre a placa, durante dois minutos.

Finalizado o tempo, remove-se o carregamento e a placa metálica e determina-se a massa do conjunto de papel-filtro (Mf). De posse destes dados, procede-se o cálculo da retenção de água. Primeiramente calcula-se o fator água/argamassa fresca (AF):

$$AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad (1)$$

Onde:

M = soma das massas anidras dos componentes da argamassa;

Mw = Massa de água utilizada na mistura.



A retenção de água (Ra) pode ser então calculada com:

$$Ra = \left[1 - \frac{(Mf - Mse)}{AFx(Mma - Mm)} \right] x 100 \quad (2)$$

Onde:

Mse = massa do conjunto de discos;

O resultado é expresso em percentual de água retida pela argamassa.

3.2.5.4 – Teor de Ar Incorporado e Densidade de Massa

Este ensaio foi realizado conforme prescreve a NBR 13278/1995, começando com a introdução da argamassa, preparada de acordo com a NBR 13276/1995, num recipiente cilíndrico de PVC, previamente calibrado e com volume interno de aproximadamente 400 mL (V_r) e de massa conhecida (M_v), formando três camadas, compactadas com 20 golpes cada, correspondendo a entrada e à saída da espátula na posição vertical, sendo a última camada complementada com 5 golpes de soquete. Para finalizar esta etapa é feito o rasamento do recipiente com auxílio de uma régua metálica. Depois de regularizada a superfície de ser feita a limpeza externa do molde, é determinada a massa do recipiente com argamassa (M_c). Determina-se então a densidade de massa da argamassa no estado fresco (A), em g/cm^3 , por meio da seguinte expressão:

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r} \quad (3)$$

De posse deste resultado por obter o teor de ar incorporado das argamassas (AI), utilizando para isso a seguinte expressão:



$$Al = 100x \left(1 - \frac{A}{B} \right) \quad (4)$$

Onde A é determinado pela equação (1) e o fator B corresponde à densidade de massa teórica da argamassa, isto é a densidade de massa que esta teria se não houvesse vazios. Para argamassas dosadas e preparadas em obras (não-industrializadas), determina-se B com a seguinte expressão:

$$B = \frac{\sum Mi}{\sum \frac{Mi}{\gamma_i}} \quad (5)$$

Onde:

M_i = massa seca de cada componente da argamassa, inclusive a massa da água;

γ_i = massa específica de cada componente.

O teor de ar incorporado é expresso em percentual em relação ao volume total da argamassa.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Moagem do Material

Os resultados obtidos nas moagens dos resíduos, produzidos em cada faixa de temperatura (500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C e 1000°C) para os quatro tempos de moagem é apresentado nas curvas granulométricas abaixo, por meio dos diâmetros equivalentes das partículas moídas, de acordo com os percentuais retidos em cada malha do processo de peneiramento mecânico e dos valores obtidos nos ensaios de sedimentação.

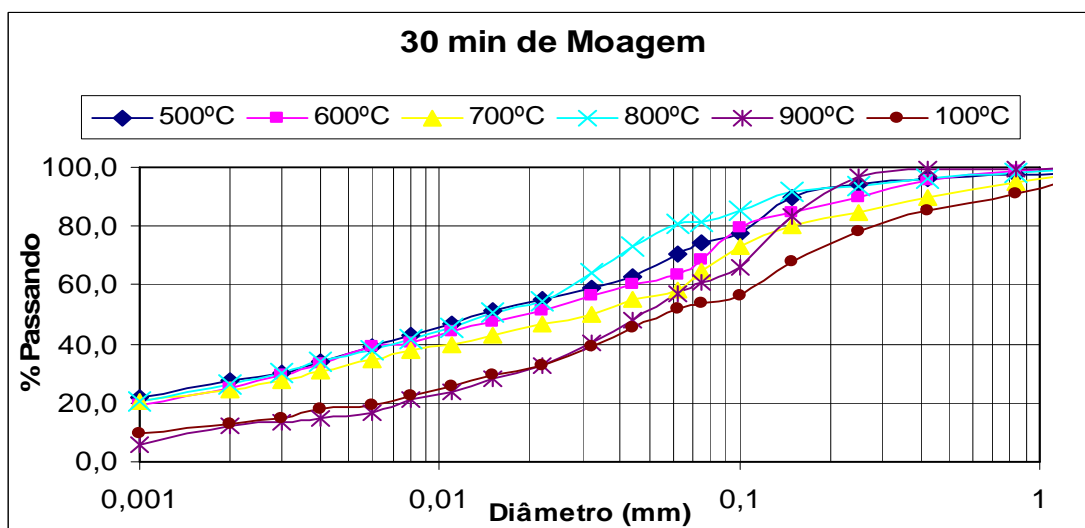


Figura 13: Curva granulométrica 30 min de moagem

Com exceção da curva referente a faixa de temperatura de queima de 800°C, as demais resultados se apresentaram coerentes, ou seja, as curvas referentes as faixas de temperaturas de queima mais altas resultaram em partículas maiores do que as partículas das faixas de temperaturas menores, para o mesmo tempo e mesmas condições de moagem. Isto se deve ao fato dos produtos cerâmicos adquirirem maior resistência quando produzidos a temperaturas mais altas.

Com relação ao comportamento do material produzido na faixa de temperatura de queima de 800°C ante ao processo de moagem não ter seguido a mesma tendência das outras faixas, onde as maiores temperaturas resultaram em partículas maiores que as partículas das temperaturas menores, deve ser levado em consideração o fato destes resíduos terem sido recolhidos nos pátios das empresas, não podendo se definir qual o motivo de seu descarte, se foi falha na queima, no transporte, na secagem, enfim, é possível que este material não tenha atingido a temperatura de queima usualmente utilizada por aquela indústria cerâmica.

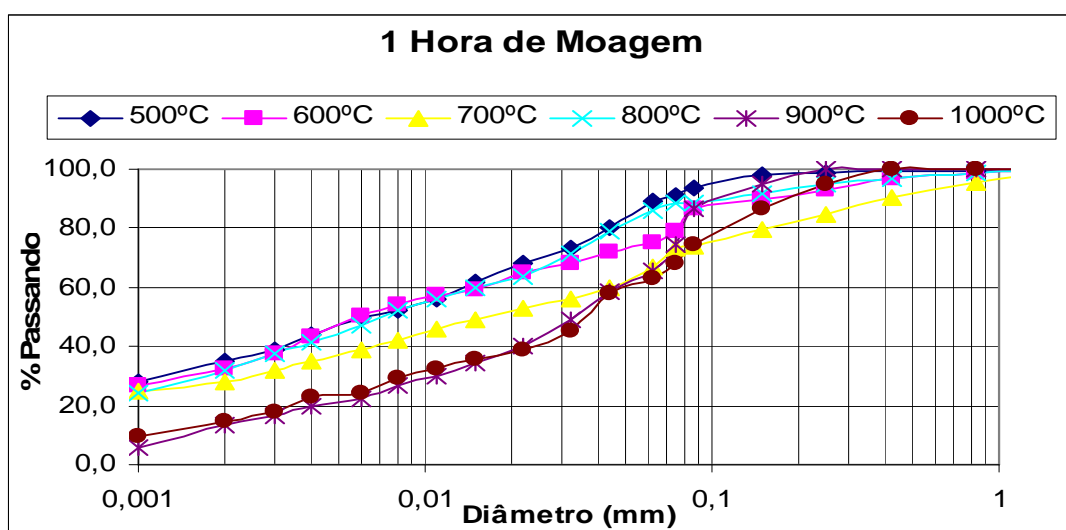


Figura 14: Curva granulométrica 1 hora de moagem

O aumento no tempo de moagem de 30 min para 1 hora ocasionou redução dos diâmetros equivalentes das partículas para todas as temperaturas estudadas, resultando num aumento médio de 15 a 20% de material com diâmetros equivalentes a 0,002 mm e 0,001mm.

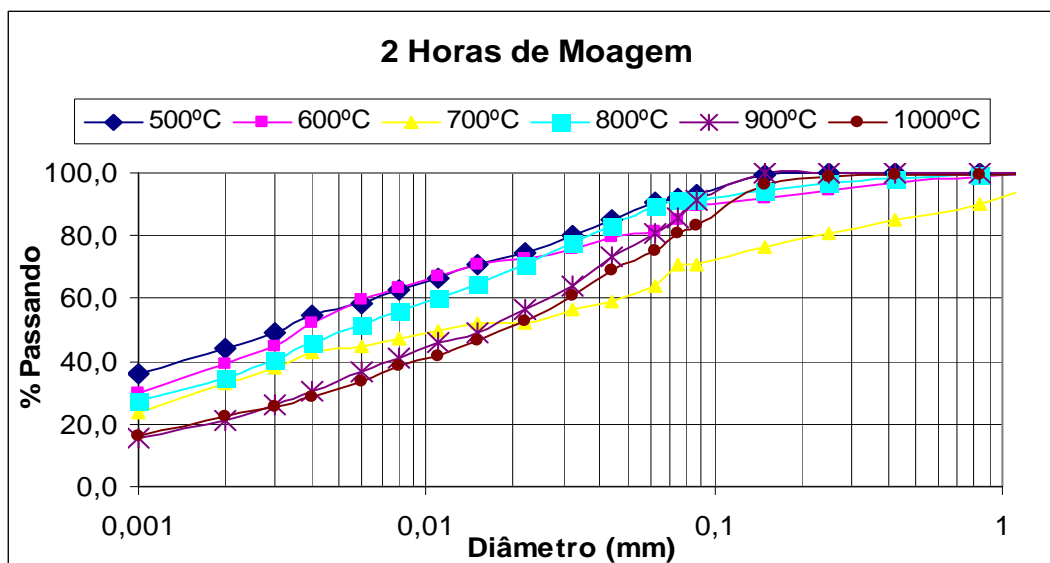


Figura 15: Curva granulométrica 2 horas de moagem

Comparando-se as curvas com 2 horas de moagem com a de 1 hora, observa-se que a redução dos diâmetros equivalentes das partículas continuou, porém, com menor intensidade que a ocorrida no aumento de 30 min para 1 hora, havendo um aumento médio de 10% de material com diâmetros equivalentes a 0,002 mm e 0,001mm.

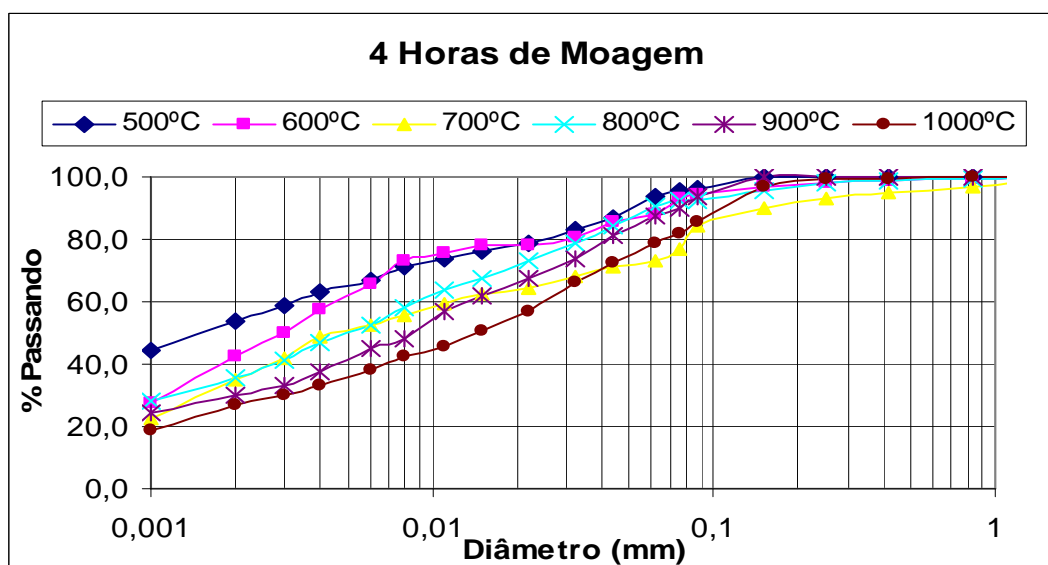


Figura 16: Curva granulométrica 4 horas de moagem

Apesar de se dobrar o tempo de moagem de 2 horas para 4 horas, obteve-se uma redução do diâmetro das partículas no intervalo de 2 para 4 horas menor que a encontrada nos intervalos de tempos de 30 min – 1 hora, 1 hora – 2 horas. Obtendo um aumento médio de 5% de material com diâmetros equivalentes a 0,002 mm e 0,001mm.

A diminuição do tamanho dos grãos entre os tempos de 30 minutos e 1 hora, foi da ordem de 20%, fato este que não ocorreu para os tempos de 2 horas e 4 horas, onde se observou uma diminuição mais suave, da ordem de 10% e 5% sucessivamente. Este fato revela a limitação do processo de redução de diâmetro médio de partículas, por moagem em moinho de bolas, visto que para maiores tempos de moagem este processo vai perdendo eficiência. Ocorre ainda o processo em que uma partícula é pressionada sobre uma outra pela bola do moinho, fazendo com estas fiquem estaticamente aderidas uma a outra, gerando com isso um falso diâmetro equivalente maior do que elas possuem.

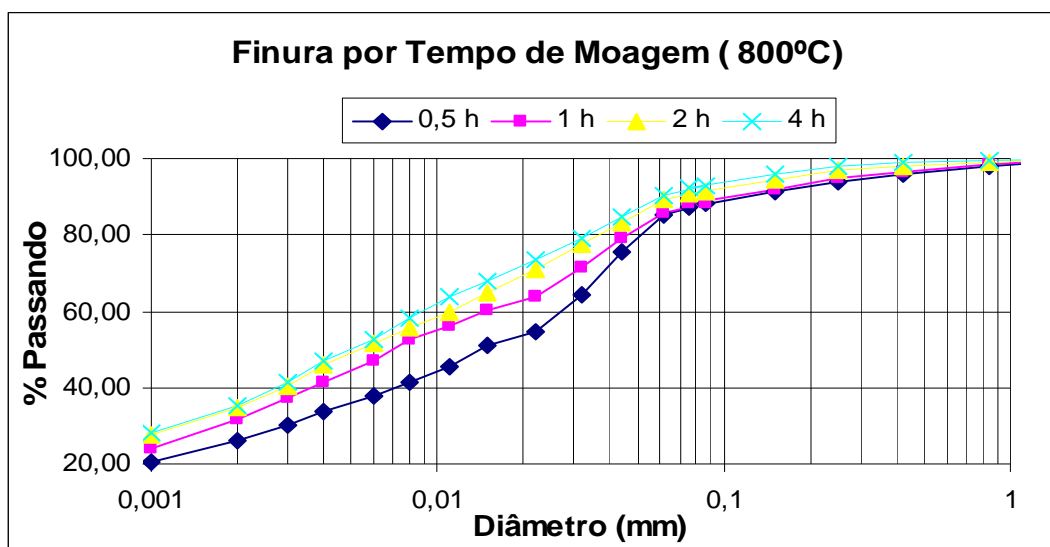


Figura 17: Curva granulométrica 800°C

Para as temperaturas mais elevadas, os diâmetros das partículas permaneceram maiores quando comparados aos diâmetros das partículas com o mesmo tempo de

moagem fabricados a menores temperaturas, ou seja, os resíduos fabricados em temperaturas mais elevadas apresentaram maior resistência a moagem.

As curvas referentes à temperatura de 800°C se comportaram de forma muito similar as de 500°C e 600°C para todos os tempos de moagem, indicando que este material fora produzido a temperatura menor que 800°C.

4.2 - Caracterização Química do Material

A análise de espectroscopia por fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX) para a determinação de sua composição química foi efetuada com os seis grupos de temperaturas, variando de 500°C a 1000°C. A Tabela 3 mostra em forma de óxidos os compostos químicos para cada temperatura.

Tabela 3 - Composição Química do Resíduo

Óxidos (%)	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C	1000°C	Média
SiO ₂	46,3	45,9	45,9	46,4	57,2	47,7	48,23
Al ₂ O ₃	39,1	38,3	38,0	37,9	33,1	37,4	37,30
Fe ₂ O ₃	8,6	9,5	8,5	8,3	3,2	8,5	7,77
SO ₃	2,0	1,6	2,3	2,4	1,6	1,9	1,97
TiO ₂	1,7	1,7	1,7	1,6	1,3	1,6	1,60
K ₂ O	1,7	2,4	2,5	2,7	2,7	2,3	2,38
Outros	0,6	0,6	1,1	0,7	0,9	0,6	0,75

A variação do valor do óxido de silício (SiO₂) em relação a média, pode ser explicada pelo fato da matéria-prima utilizada na fabricação das peças cerâmicas ser o solo natural da região, estando desta forma sujeito a “contaminações”, presença de outros minerais, variação comum na natureza.

4.3 – Composição Mineralógica (XRD)

O objetivo deste ensaio foi, a observação da transição de fases cristalina-amorfa-cristalina que experimenta o material (RCM). O difratograma obtido é exposto na *Figura 18*.

Observando os difratogramas, percebe-se uma estreita relação com o comportamento da metacaulinita, pois o XRD indica o início da fase amorfa em torno de 500°C pelo desaparecimento dos picos, que são indicativos de uma estrutura não cristalina, característica da metacaulinita. Indica também o fim da fase amorfa do material e início do processo de recristalização, representado pelo posterior reaparecimento dos picos em temperaturas acima de 900°C devido a recristalização do Si, resultando em estruturas diferentes da caulinita e metacaulinita.

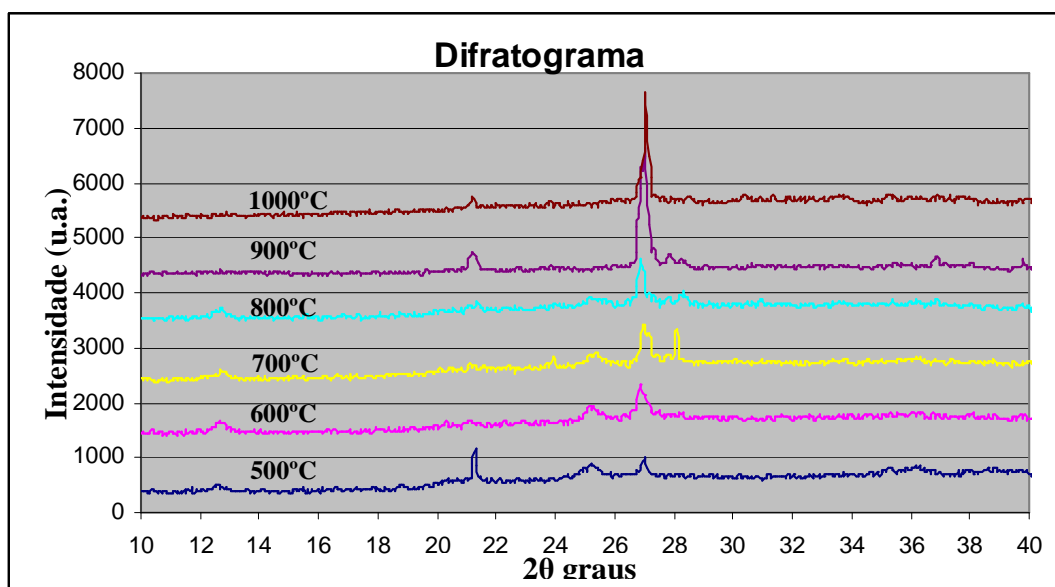


Figura 18 – Difratograma dos resíduos

No gráfico apresentado na *Figura 18*, as curvas foram defasadas para um melhor entendimento. Os picos obtidos nas curvas das temperaturas mais baixas, foram menores que os picos obtidos nas curvas das temperaturas mais altas, indicando maior

grau de amorfisidade para as temperaturas menores e conseqüentemente, maior grau de cristalização para temperaturas maiores.

4.4 - Índice de Atividade Pozolânica NBR 5753 (Cimentos – Método de determinação de atividade pozzolânica em cimento portland pozzolânico)

Os resultados obtidos são apresentados sob a forma gráfica na *Figura 19*, onde os pontos formados pelo par ordenado (alcalinidade total, teor de óxido de cálcio), (milimol de OH^-/l , milimol de CaO/l), localizados acima da isoterma de solubilidade são considerados cimentos não pozzolânicos, e quando os pontos estiverem localizados abaixo da isoterma pozzolânicos. Pode ser observado, que todas as amostras de cimento que receberam a adição de RCM geraram pontos situados abaixo da isoterma, ou seja, todas as temperaturas apresentaram atividade pozzolânica.

Os pontos representativos de cada amostra são considerados indicadores de maior atividade pozzolânica quanto mais afastados e abaixo estiverem da isoterma de solubilidade.

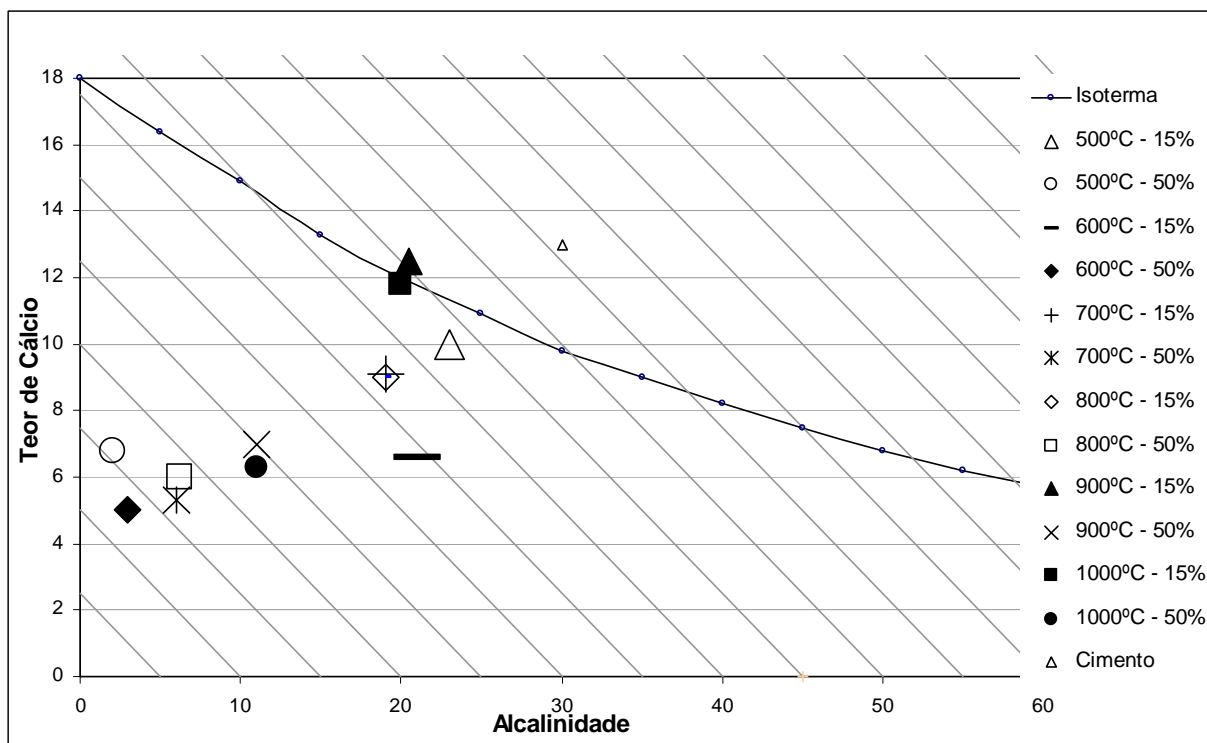


Figura 19– Gráfico do resultado do ensaio da NBR 5753

Os resultados demonstraram-se bastante coerentes para todas as temperaturas no que diz respeito a proximidade dos pontos a isoterma de solubilidade, visto que, as amostras com 15% de substituição de cimento por RCM se localizaram mais próximas da curva que as com teor de 50%, ou seja, maior porcentagem de RTM resultou em maior pozolanicidade.

O fato das temperaturas mais baixas (500°C, 600°C e 700°C) com 50% de RTM terem sido as mais pozolânicas, deve-se ao fato da metacaulinita sofrer uma recristalização as temperaturas mais elevadas, esse novo arranjo por ser mais cristalino e melhor organizado torna o material mais estável, menos reativo e menos pozolânico, este fato também explica a proximidade dos pontos representativos das temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C da isoterma de solubilidade.

4.5 – Capacidade de Retenção de Água

A metodologia utilizada para a obtenção da retenção de água é da NBR 13277, que já foi discutida no capítulo anterior. As figuras 20, 21 e 22 mostram os resultados obtidos.

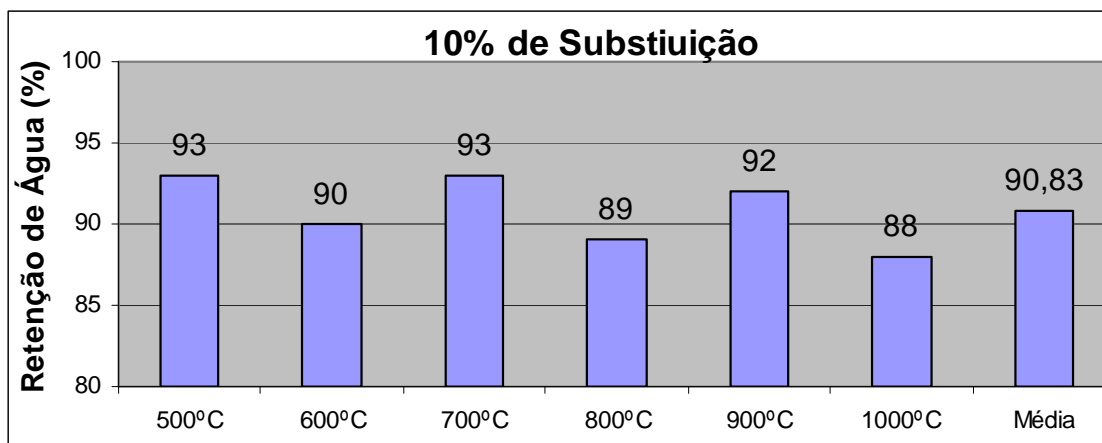


Figura 20 – Retenção de água – 10% substituição.

Apenas as argamassas confeccionadas com resíduos fabricados nas faixas de temperatura de 800°C e 1000°C não apresentaram retenção acima de 90%, sendo

classificadas segundo a NBR 13281 com retenção “normal”, enquanto as demais obtiveram retenção acima de 90% e, portanto, foram classificadas com retenção “alta”.

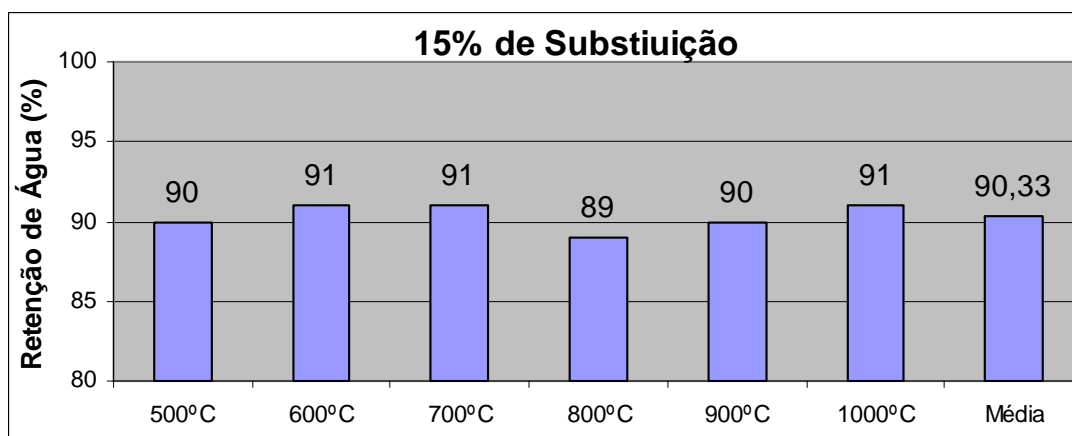


Figura 21 – Retenção de água – 15% substituição.

Apesar de apenas a argamassa produzida com RCM na faixa de temperatura de 800°C ter ficado abaixo de 90% de retenção, os valores obtidos para todas as demais argamassas produzidas com teor de substituição de 15% cimento por RCM, se comportaram de forma bastante similar, ou seja, com desvio padrão menor que 1%.

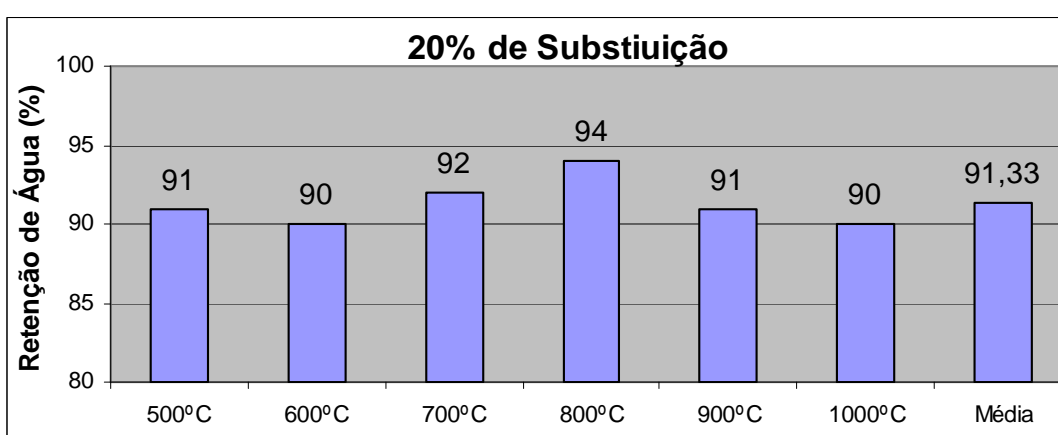


Figura 22 – Retenção de água – 20% substituição.

Para este teor de substituição todas argamassas obtiveram retenção maior de 90%, com classificação “alta”, porém observou-se que não houve grandes variações nos valores obtidos, fato este que pôde ser comprovado pela variação mínima (desvio padrão menor que 1%) obtida nas médias para os três teores de substituição.

4.6 – Teor de Ar Incorporado

O teor de ar incorporado foi determinado de acordo com a NBR 13278/1995, e será apresentado a seguir.

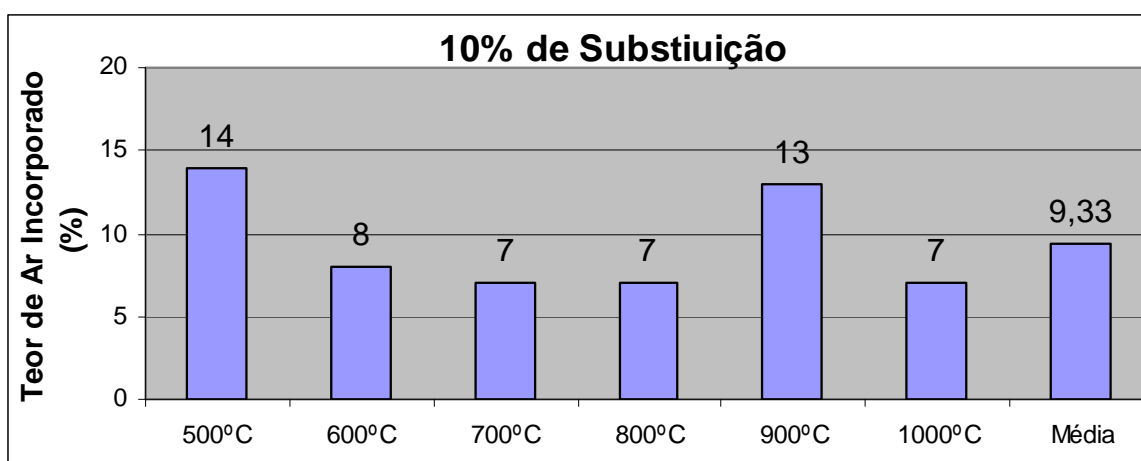


Figura 23 – Teor de ar incorporado – 10% substituição

As argamassas produzidas com todas as faixas de temperatura apresentaram comportamentos bastante diferenciados, grande variação entre si nos teores de ar incorporado, o que impossibilitou que fosse feita alguma comparação entre elas.

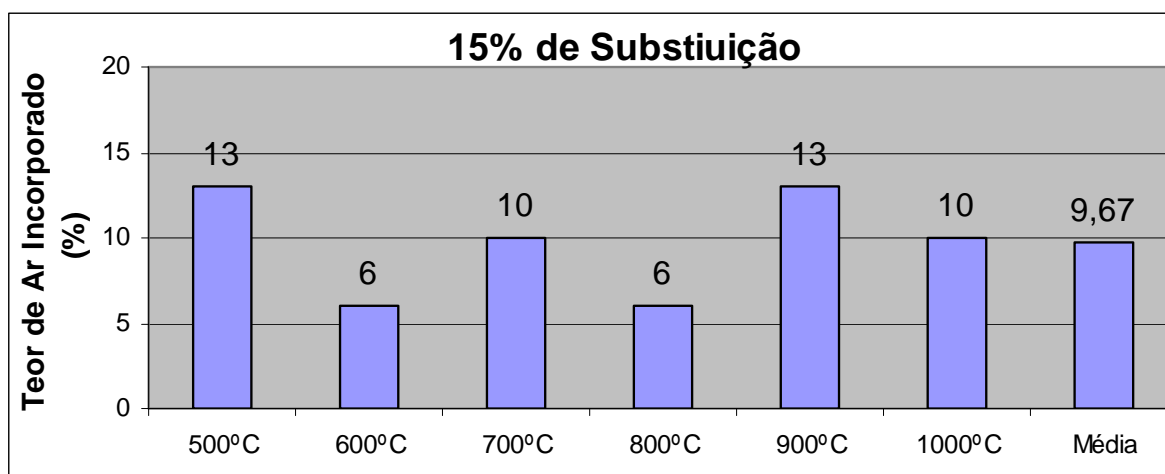


Figura 24 – Teor de ar incorporado – 15% substituição.

Não possível estabelecer um critério de avaliação para o aumento do teor de substituição de cimento por RCM, visto que, para as temperaturas de 500°C, 600°C e 800°C houve uma diminuição do teor de ar incorporado, fato este que já era esperado devido o preenchimento dos vazios pelo RCM não consumido nas reações de hidratação, porém, para as temperaturas de 700°C, 900°C e 1000°C houve um aumento, contrariando este conceito.

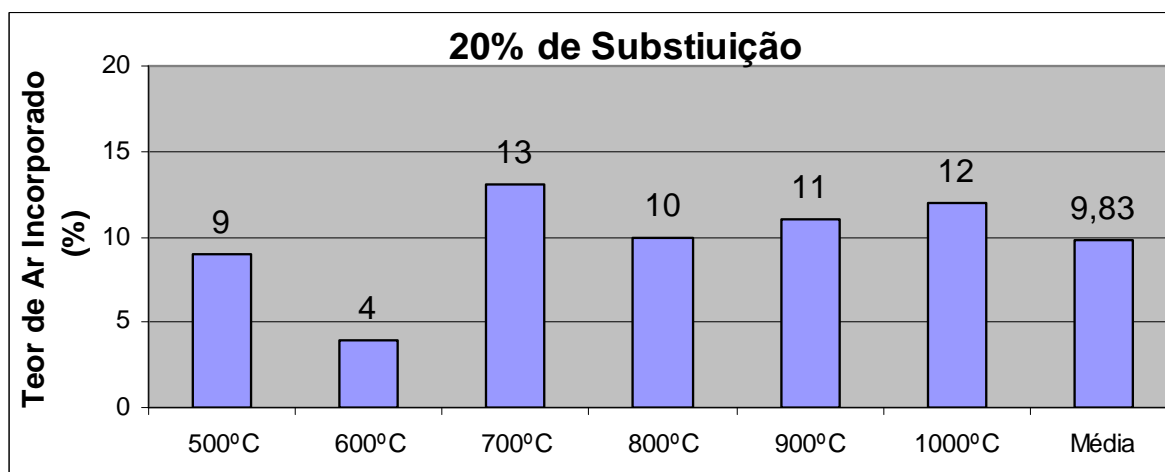


Figura 25– Teor de ar incorporado – 20% substituição.

Apesar das argamassas terem apresentado um comportamento incoerente com relação a variação dos teores de substituição, para todas as situações estudadas as argamassas ficaram dentro dos limites de utilização estabelecidos pela NBR 13278, sendo classificadas como “A” (para teores < 8) e “B” (≥ 8 e ≤ 18), este fato é muito importante pois, permite a utilização do RCM como substituto parcial do cimento em argamassas, no que diz respeito ao teor de ar incorporado, para as idades estudadas neste trabalho.

4.7 – Resistência à Compressão de Argamassas

Para a obtenção da Resistência a compressão das argamassas tomou-se como referência a NBR 13279, que estabelece como resistência a compressão a média das resistências individuais, expressa em MPa, de cada corpo-de-prova, sendo obtida pela razão entre a carga de ruptura e a área de seção do corpo-de-prova.

Atendendo recomendação da norma brasileira, para este ensaio aplicou-se como tratamento estatístico o desvio relativo máximo, tendo como limite superior o valor de 6% em relação a média para que cada resultado individual seja considerado válido. Os valores individuais com desvio relativo superiora 6% em relação a média eram desconsiderados, calculava-se então uma nova média, caso persistisse o fato , todos os valores eram descartados sendo refeito todo o ensaio.

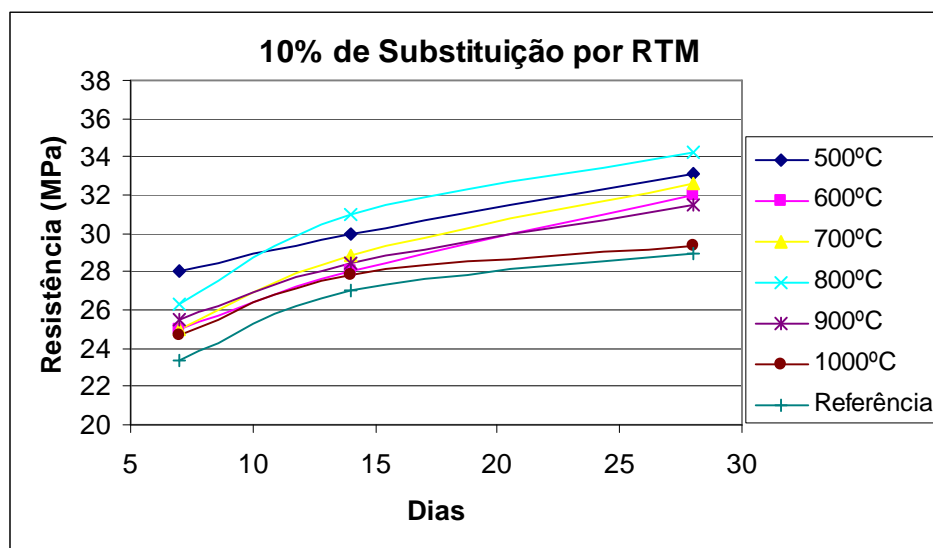


Figura 26 – Resistência à compressão de argamassas com 10% de substituição.

Para o teor de 10% de substituição de cimento por RCM, todas as temperaturas apresentaram valores acima da referência (argamassa sem substituição), ou seja, houve um ganho de resistência para todas as temperaturas estudadas. Argamassas produzidas com substituições parciais de cimento apresentaram um aumento de resistência mais significativo que a referência na última idade estudada, ou seja, a atividade pozolânica por ser uma reação mais lenta teve maior influência na maior idade. O fato da primeira idade também ter apresentado um aumento de resistência apesar de a reação pozolânica ser mais lenta, deve-se também ao efeito *filler* (preenchimento) proporcionado pelo RCM.

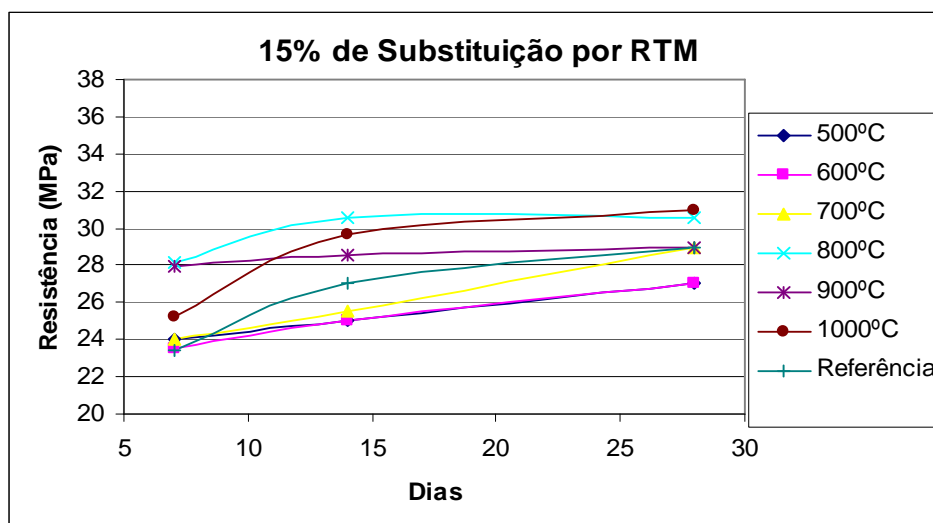


Figura 27 – Resistência à compressão de argamassas com 15% de substituição.

Em todas as faixas de temperatura houve diminuição na resistência das argamassas produzidas com teor de substituição cimento de 15% quando comparadas ao teor de 10% de substituição, menor até que a referência em alguns casos, indicando que para o traço utilizado (1:3, cimento: areia) este teor de substituição não é adequado, seja por apresentar material pozolânico a mais que a quantidade de hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento, ficando desta forma material pozolânico sem reagir não formando o silicato de cálcio hidratado, responsável pelo ganho de resistência.

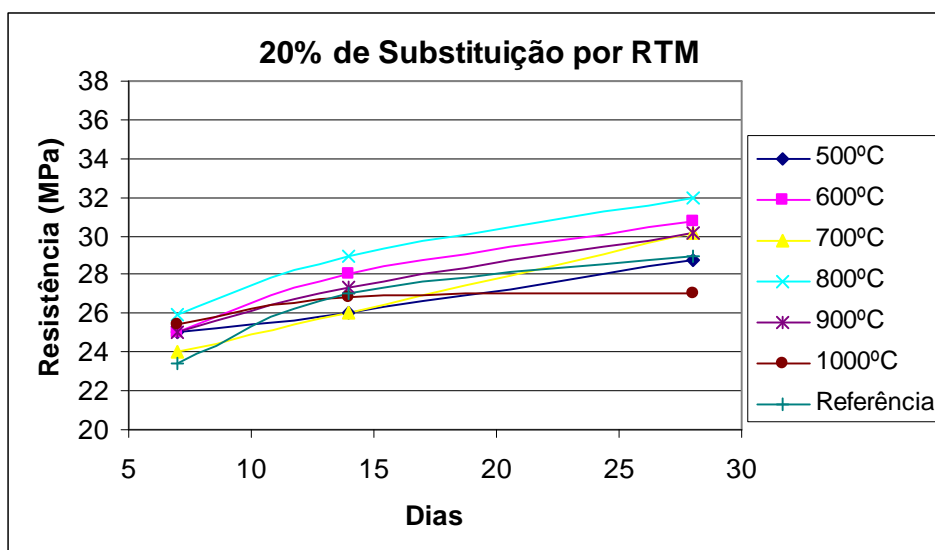


Figura 28– Resistência à compressão de argamassas com 20% de substituição.

De forma semelhante, porém mais acentuada, também houve diminuição na resistência para o teor de 20% de substituição, fenômeno causado pelo mesmo efeito ocorrido para o teor de 15%, somado com uma maior redução no percentual de cimento na argamassa.

Como era esperado, pelo fato de estar próximo ao patamar de temperatura (489°C- MOTHÉ,2004) em que ocorre a transformação da caulinita em metacaulinita, a curva referente a faixa de temperatura de 500°C, e as curvas de faixa de temperatura que estavam mais próximas a ela – 600°C e 700°C, se mantiveram com valores de resistência acima dos valores de referência, exceto para os teores de 20% de substituição, onde esta tendência não foi verificada, havendo até para alguns casos redução da resistência quando comparado aos valores da referência (sem substituição).

O fato de se ter trabalhado com um resíduo que não recebe nenhum tratamento diferenciado, estando portanto sujeito a contaminações diversas, e ao fato de sabermos que o processo produtivo dos produtos cerâmicos produzidos na região abordada neste trabalho, ainda não ser muito moderno e em alguns casos arcaico, possuindo um precário controle tecnológico gerando um produto final muitas vezes de má qualidade e fora das especificações, é possível que este material não tenha sido produzido a 800°C



e sim a temperaturas menores. Apesar dos cuidados tomados, este resíduo pode ter sido contaminado com algum outro produto cerâmico produzido a temperatura diferente, enquanto ainda se encontrava no pátio da indústria antes da coleta das amostras, visto que não há critérios para armazenamento destes resíduos nas empresas da região. Estes fatos justificam seu comportamento bastante similar ao comportamento dos materiais produzidos a temperaturas menores, como 500°C, 600°C e 700°C, em todos os ensaios e análises realizados neste trabalho.



5– CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

Por meio do estudo de moagem foi constatado que para os RCM's produzidos a temperaturas mais elevadas apresentaram maior resistência a fragmentação, isto se deve ao fato dos produtos cerâmicos adquirirem maior resistência a temperaturas mais elevadas. Pôde se constatar ainda, uma redução na eficiência do sistema de moagem utilizado para tempos de moagem acima de 2 horas que não resultaram em diminuição significativa do diâmetro dos grãos, o que torna economicamente inviável a moagem com tempo acima de 2 horas devido ao aumento de consumo de energia.

A grande semelhança de composição entre os grupos deve-se ao fato de os produtos cerâmicos fabricados nesta região utilizarem o solo retirado na mesma região, portanto, com características mineralógicas bem semelhantes.

A relação proporcional dos Óxidos de Silício (SiO_2) e Alumínio (Al_2O_3) encontrada bem semelhante à relação existente destes componentes na célula unitária da metacaulinita, pôde ser comprovada pela ausência de picos no difratograma e pelo índice de atividade pozolânica.

A ausência de picos nos difratogramas das temperaturas acima dos 500°C comprova a amorfisidade da metacaulinita, uma vez que a caulinita se transforma a 490°C em metacaulinita, bem como o fim da fase amorfa do material e início do processo de recristalização, representado pelo posterior reaparecimento dos picos em temperaturas acima de 900°C .

O índice de atividade pozolânica comprovou a pozolanicidade do RCM para todas as temperaturas estudadas, comprovou ainda que as temperaturas mais baixas, por resultarem em produtos cerâmicos mais amorfos possuem maior atividade pozolânica, em contrapartida, as temperaturas mais elevadas resultam em produtos cerâmicos com um arranjo mais cristalino e conseqüentemente com menor atividade pozolânica.



Os altos valores de retenção de água obtidos (apenas três resultados abaixo dos 90%, limite mínimo estabelecido pela NBR 13281 para a argamassa ser considerada com “alta” retenção) e o baixo teor de ar incorporado para todas as argamassas produzidas, comprovam o fato de que ao se adicionar finos a argamassa esta se torna mais densa. Maior retenção de água e maior densidade contribuem para uma maior durabilidade das argamassas.

Argamassas produzidas com substituições parciais de cimento apresentaram um aumento de resistência mais significativo que a referência na última idade estudada, ou seja, a atividade pozolânica por ser uma reação mais lenta teve maior influência na maior idade. O fato da primeira idade também ter apresentado um aumento de resistência apesar de a reação pozolânica ser mais lenta, deve-se também ao efeito *filler* (preenchimento) causado pelo RCM.

Os resultados de resistência a Compressão demonstraram que, para teores de substituição maiores que 15% a substituição não resultou em melhoria de desempenho em relação a resistência quando comparada ao teor de 10% de substituição, seja por apresentar material pozolânico a mais que a quantidade de hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento poderia consumir, ficando desta forma material pozolânico sem reagir não formando o silicato de cálcio hidratado, responsável pelo ganho de resistência ou, por redução excessiva no percentual de cimento na argamassa.

Como demonstrado pelo índice de atividade pozolânica e pelo difratograma, o resíduo produzido a 1000°C se comportou como o de menor pozolanicidade dentre todos os resíduos estudados. Como o ganho de resistência se deve a soma de efeitos da hidratação da pozolana, as maiores idades, com o efeito *filler*, verificado desde a primeira idade, para o teor de 20% de substituição, explica-se porque a primeira idade os valores de resistência permaneceram maiores que a referência e a última idade não houve o ganho esperado, devido ao baixo grau de pozolanicidade do resíduo, e sim uma redução na resistência devido diminuição do teor de cimento.



O comportamento do material em todas as análises realizadas foi determinado pela recristalização que o mesmo sofre por volta de 900°C, na granulometria os resíduos produzidos acima deste patamar de temperatura se fragmentaram menos, devido a maior resistência mecânica alcançada após a recristalização.

O efeito fíler, ou melhor, de preenchimento oferecido pelo RCM à matriz cimentícia das argamassas é um dos principais fatores que contribuíram para um bom desempenho dos produtos finais. Outro ponto importante diz respeito ao efeito plastificante do resíduo; fez com que as argamassas apresentassem uma consistência mais plástica, com maior trabalhabilidade, este fato foi observado durante a confecção dos corpos de prova.

A utilização do Resíduo Cerâmico Moído como aditivo mineral (pozolana), se revelou viável para todas as temperaturas abordadas por este trabalho. Este fato pode ser confirmado pelo ganho de resistência à compressão em argamassas, para todas as temperaturas.

Pôde se confirmar por meio dos dados e resultados obtidos durante a elaboração deste trabalho a potencialidade do setor de construção civil em colaborar com a sustentabilidade do meio, seja pelo maior controle com as obras durante sua elaboração e execução, evitando desperdícios e/ou geração de rejeitos, ou por meio de propostas que visam o aproveitamento de certos resíduos como materiais para construção, que foi o objeto deste trabalho.

Diante de todo o exposto, os resultados obtidos neste trabalho vêm contribuir para correta e racional utilização do RCM, contribuindo efetivamente e continuamente com a redução dos impactos ambientais causados por este material e de forma indireta, pela construção civil. Tudo isso por meio da indicação de uma nova argamassa, ecologicamente correta, durável, com bom desempenho mecânico e ainda com e menor custo de produção.



5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

A influência da adição de resíduo cerâmico moído:

Nos mecanismos de retração e possíveis processos de fissuração originados devem também ser analisados;

Na resistência de aderência no tempo;

Sobre o tamanho dos poros das argamassas no tempo;

Na absorção de água.