

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARCOS CARDOSO CASAGRANDE

**EFEITO DA ADIÇÃO DE CHAMOTE SEMI-GRESIFICADO NO
COMPORTAMENTO FÍSICO DE MASSA CERÂMICA PARA
PAVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área: Materiais Particulados

Orientador:

Prof. Dr. Ing. Antonio Pedro Novaes de Oliveira

FLORIANÓPOLIS
2002

MARCOS CARDOSO CASAGRANDE

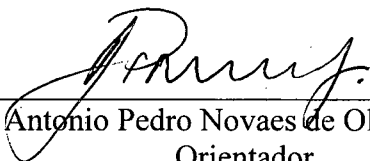
EFEITO DA ADIÇÃO DE CHAMOTE SEMI-GRESIFICADO NO
COMPORTAMENTO FÍSICO DE MASSA CERÂMICA PARA PAVIMENTO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

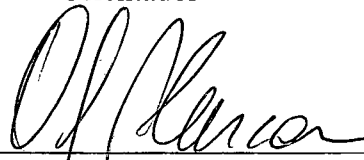


Prof. Dr. Dachamir Hotza - UFSC
Coordenador do PGMat

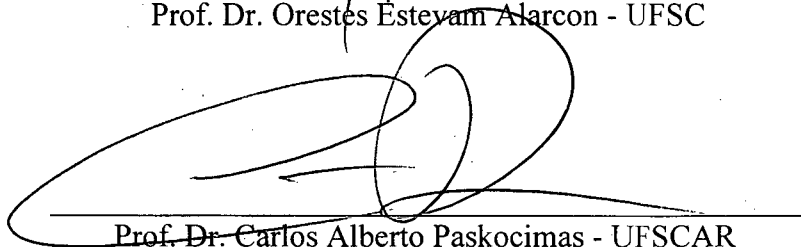
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Antonio Pedro Novaes de Oliveira - SENAI/CTC
Orientador



Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon - UFSC



Prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas - UFSCAR



Prof. Dr. Dachamir Hotza - UFSC

Ficha Catalográfica

CASAGRANDE, Marcos Cardoso.

Efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de massa cerâmica para pavimento. Florianópolis, UFSC, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2002.

xi, 66 p.

Dissertação: Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais (Área: Materiais Cerâmicos)

Orientador: Antonio Pedro Novaes de Oliveira

1.Cerâmica de revestimento 2.Massa cerâmica 3.Resíduos cerâmicos industriais

I. Universidade Federal de Santa Catarina

II. Título

A todas as pessoas que utilizam sua breve passagem pelo mundo dos homens como uma ferramenta, na construção de uma sociedade melhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar pelo dom da vida.

Ao Professor Antonio Pedro Novaes de Oliveira, pela orientação e esclarecimentos que muito contribuíram na elaboração e execução deste trabalho.

Ao Professor Dachamir Hotza, pela disponibilidade e pelo incentivo na realização do trabalho.

Ao Professor Idone Bringhenti, pela inspiração e confiança transmitida em suas aulas.

Ao professor Orestes Alarcon, pela oportunidade a mim confiada ao viabilizar minha vinda para o SENAI/Centro de Tecnologia em Cerâmica, em Criciúma.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - PGMAT da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao SENAI/Centro de Tecnologia em Cerâmica - CTC, pela disponibilidade de seus laboratórios e profissionais. Gostaria em particular de agradecer aos colegas que participaram do projeto que concorreu ao prêmio Finep 2001 de Inovação Tecnológica.

A empresa Cecrisa S.A. pela disponibilidade e como parceira do Projeto PADCT/CDT que viabilizou este trabalho.

À FINEP – Financiadora de Estudos e Pesquisas pelo suporte financeiro dado por meio do projeto PADCT/CDT que viabilizou este trabalho.

Aos meus colegas Oscar Montedo, Fabiana S. Magagnin e Morgana N. Sartor pelo companheirismo e pela imensa ajuda durante a realização do trabalho.

Aos meus avós, Emílio Casagrande (*in memoriam*), Rosa Brocca Casagrande, Adílio Cardoso (*in memoriam*) e Aládia Pereira Cardoso pelos exemplos de vida.

Aos meus pais, Mario Emilio Casagrande e Albertina C. Casagrande e aos meus irmãos Ricardo C. Casagrande e Morgana C. Casagrande por todo incentivo e apoio constante.

À minha esposa Alessandra Becker, por compartilhar comigo seus sonhos, tornando-se assim, parte dos meus.

E a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Pouco conhecimento, faz que as
criaturas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento,
que se sintam humildes.
É assim que as espigas sem grãos
erguem desdenhosamente a cabeça para o céu,
enquanto que as cheias as baixam
para a terra, sua mãe.”

Leonardo da Vinci

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
RESUMO.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	1
1.1.1 Aspectos ambientais.....	1
1.1.2 O Brasil no contexto mundial.....	2
1.1.3 Fatores Econômicos.....	2
1.2 OBJETIVO	5
1.3 DEFINIÇÕES	5
1.4 ESTRUTURA	5
2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1 PLACAS CERÂMICAS PARA REVESTIMENTO	6
2.1.1 Definições.....	6
2.1.2 Principais matérias-primas utilizadas	6
2.1.2.1 Matérias-primas plásticas	7
2.1.2.2 Matérias-primas não plásticas.....	8
2.1.3 Classificações dos revestimentos cerâmicos	10
2.1.3.1 Utilização.....	10
2.1.3.2 Cor da massa.....	11
2.1.3.3 Tecnologia de fabricação.....	12
2.1.4.4 Propriedades do produto acabado.....	14
2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PAVIMENTO SEMI-GRESIFICADO	15
2.2.1 Formulação da massa.....	15
2.2.2 Preparação da massa a úmido.....	16
2.2.3 Prensagem.....	17
2.2.4 Secagem	17
2.2.5 Preparação de esmaltes e tintas.....	18
2.2.6 Esmaltação.....	18
2.2.7 Queima em processo de monoqueima.....	19
2.2.8 Classificação.....	19
2.3 PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	20
2.3.1 Composição química.....	20
2.3.2 Viscosidade da suspensão	20
2.3.3 Distribuição de tamanho de partículas	21
2.3.4 Densidade aparente	22
2.3.5 Sinterização.....	24
2.3.6 Resistência à flexão.....	25
2.3.7 Absorção de água e retração linear.....	26
2.4 REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS CERÂMICOS.....	27
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.1 MATERIAIS	29
3.1.1 Chamote.....	29
3.1.2 Matérias-primas cerâmicas.....	29
3.1.3 Massas cerâmicas	29

3.2 METODOLOGIA	30
3.2.1 <i>Chamote</i>	30
3.2.2 <i>Preparação das matérias-primas</i>	32
3.2.3 <i>Processamento das massas cerâmicas</i>	32
3.2.4 <i>Determinação de propriedades</i>	34
3.2.5 <i>Análise estatística dos resultados</i>	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 INTRODUÇÃO	36
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CHAMOTE	36
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES CERÂMICAS	39
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPACTADO	43
4.5 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO FINAL	45
4.6 VIABILIDADE ECONÔMICA	50
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
5.1 CONCLUSÕES	51
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
TRABALHOS PUBLICADOS	57
ANEXOS	58

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – PRODUÇÃO BRASILEIRA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS (ANFACER, 2001).....	04
FIGURA 2.1 – GRÁFICO REFERENTE À RELAÇÃO ÍNDICE DE PLASTICIDADE VS SUPERFÍCIE ESPECÍFICA. (BARBA et al., 1997, p. 225).....	07
FIGURA 2.2 – ESQUEMA DO PROCESSO USUAL DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS.....	10
FIGURA 2.3 – VARIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE MISTURA DE PARTÍCULAS DE TAMANHOS DIFERENTES EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE PARTÍCULAS GRANDES. (BARBA et al., 1997, P.231).....	21
FIGURA 2.4 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA A FLEXÃO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APÓS SECAGEM (PAULA et al., 1999, p.30).....	23
FIGURA 2.5 – VARIAÇÃO DA RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DOS COMPACTADOS SECOS INDEPENDENTE DOS TEORES DE UMIDADE E PRESSÃO (PAULA et al., 1999, p.31).....	23
FIGURA 2.6 – VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DOS COMPACTADOS SECOS INDEPENDENTES DOS TEORES DE UMIDADE E PRESSÃO (PAULA et al., 1999, p.31).....	23
FIGURA 2.7 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APÓS SECAGEM INDEPENDENTE DOS TEORES DE UMIDADE E PRESSÃO (PAULA et al., 1999, p.31).....	23
FIGURA 2.8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA INTER-RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PROCESSO, A DENSIDADE DA PEÇA SECA E AS CARACTERÍSTICAS DA PEÇA QUEIMADA (PAULA et al., 1997, P. 31).....	24
FIGURA 2.9 – DIAGRAMA DE RETRAÇÃO LINEAR E ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA SUPORTES DE QUEIMA VERMELHA (SCR) E QUEIMA BRANCA (SCB) (GARCIA et al., 1999,p.19).....	26
FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DE OBTENÇÃO DE CHAMOTE MOÍDO.....	31
FIGURA 3.2 – PLANTA PILOTO DE RECICLAGEM (ICON, 2000).....	31
FIGURA 3.3 – FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	32
FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO CERÂMICO.....	33
FIGURA 4.1 – DTP DA MASSA STD MOÍDA A ÚMIDO EM MOINHOS DE BOLA.....	38
FIGURA 4.2 – DTP DO CHAMOTE, BRITADO E MOÍDO A SECO EM MOINHO DE BOLAS, UTILIZADO NA ADIÇÃO SOBRE A MASSA STD.....	38
FIGURA 4.3A – DTP DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS: a) STD; b) F3P.	40

FIGURA 4.3B – DTP DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS: c) F10P; d) F30P.....	41
FIGURA 4.4 – COMPORTAMENTO DA VISCOSIDADE DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	42
FIGURA 4.5 – Dap DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	43
FIGURA 4.6 – MRF DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	44
FIGURA 4.7 – Dap DO SINTERIZADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	45
FIGURA 4.8 – RL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	46
FIGURA 4.9 – AA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	47
FIGURA 4.10 – MRF EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	48
FIGURA 4.11 – MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DOS CORPOS DE PROVA, QUEIMADOS A 1150°C, DAS FORMULAÇÕES: a) STD; b) F3P; c) F10P; d) F30P (aumento: 100x).....	49
FIGURA 4.12 – MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DOS CORPOS DE PROVA, QUEIMADOS A 1200°C, DAS FORMULAÇÕES: a) STD; b) F30P (aumento: 100x).....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – PRINCIPAIS PRODUTORES MUNDIAIS DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO.....	3
TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS REVESTIMENTOS CERÂMICOS.....	14
TABELA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO E DEFINIÇÃO SEGUNDO AS NORMAS ASTM/ANSI A 137.1 (1980).....	15
TABELA 2.3 – MÓDULO DE RUPTURA A FLEXÃO POR CLASSE DE ABSORÇÃO.....	25
TABELA 3.1 – MASSAS CERÂMICAS FORMULADAS.....	30
TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DUAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO CERÂMICO SEMI-GRESIFICADO, DESCONSIDERANDO A PERDA AO FOGO.....	37
TABELA 4.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS MASSAS CERÂMICAS FORMULADAS.....	39
TABELA 4.3 – % DE SÓLIDOS DAS SUSPENSÕES DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.....	43

RESUMO

Os pavimentos cerâmicos (pisos) possuem espessuras maiores (6,5 a 11,0 mm) e são queimados a temperaturas mais elevadas (até 1220°C), quando comparados com os azulejos que são revestimentos porosos. Assim, pavimentos são mais densos e mais duros e, portanto, apresentam maior resistência ao processo de cominuição. Atualmente, 2/3 da produção nacional de revestimentos cerâmicos referem-se a pavimentos fabricados pelo processo de monoqueima, dos quais estima-se que 3% (67 mil toneladas) tornam-se produtos desqualificados, denominados “chamotes”, os quais são depositados em aterros. Esta ação vem gerando custos adicionais às empresas além de aumentar o passivo ambiental, constituindo-se assim em uma medida paliativa e também nociva. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo analisar o efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de uma massa cerâmica para pavimento. Foram preparadas composições com adições de 1%, 3%, 5%, 10% e 30% em peso de chamote à formulação padrão de massa cerâmica industrial. Com as formulações, resultantes foram preparadas amostras, em escala laboratorial, as quais foram submetidas a análises e ensaios para a determinação da distribuição de tamanhos de partículas, viscosidade, absorção de água, retração linear de queima e resistência à flexão após queima, seguindo os procedimentos descritos nas normas ABNT. Os resultados obtidos mostram que não houve alterações significativas na composição química dos materiais obtidos. Já as propriedades físicas analisadas, não se alteraram com a adição de chamote em percentuais de até 10%, quando comparadas com o padrão. Com adição de 30% de chamote, verificou-se uma sensível redução da resistência à flexão e aumento da absorção de água; porém, este efeito pode ser facilmente revertido com a adição de quantidades maiores de matérias-primas plásticas (argilas), o que viabiliza também esta composição. Assim, conclui-se que o chamote semi-gresificado, quando moído a tamanhos de partículas inferiores a 32 mesh (500 µm) e adicionado na etapa de moagem a úmido do processo de fabricação de pavimento semi-gresificado, em quantidades inferiores a 10% não altera o comportamento do material (massa cerâmica), sendo perfeitamente viável a reciclagem do rejeito em questão, com boa margem de operacionalização da produção, haja vista que a demanda atual é bastante inferior a este percentual (10%).

ABSTRACT

Ceramic floor tiles have higher thickness (6.5 to 11.0 mm) compared to ceramic wall tiles and they are fired at higher temperatures (up to 1220°C). Thus, ceramic floor tiles have higher density and they are harder and therefore they show resistance to be crushed during milling operation. At present, 2/3 of the Brazilian production of ceramic tiles are related to ceramic floor tiles manufactured by the single firing process, so that about 3 % (67,000 tons) become solid wastes which are currently deposited in landfills. This action comes generating additional costs to the companies besides magnifying the ambient liabilities, consisting thus in a palliative and also harmful measure. In this context, this work has for objective to analyze the effect of the addition of sintered ceramic solid wastes on the physical behavior of a ceramic body. Thus, ceramic body samples were prepared by adding 1, 3, 5, 10 and 30 wt% of sintered ceramic solid wastes in an industrial standard ceramic body. Subsequently, the prepared ceramic bodies were subjected to analyses and tests to determine characteristic parameters such as particle size distribution, viscosity, water absorption, linear thermal shrinkage and modulus of rupture (MOR) after firing, according to the ABNT procedures. The obtained results show that there were not significant alterations in the chemical composition of the ceramic materials. On the other hand, physical properties were not modified when 10 wt% of sintered ceramic solid wastes were added in the standard ceramic body. In the formulation containing 30 wt% of sintered ceramic solid wastes, it was verified a sensible reduction in the MOR values and an increasing of the water absorption. However, this effect can be readily reverted with the addition of higher amounts of plastic raw materials, such as clays, what also makes possible this composition. Thus, it is concluded that the sintered ceramic solid wastes, when crushed and milled to particle sizes lower than 500 μm (32 mesh) and added, in the wet milling step for ceramic floor tile manufacturing, in amounts lower than 10 wt%, do not modify the ceramic body behavior, being viable the recycling with good operation range for the existing demand.

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

1.1.1 Aspectos ambientais

Ao longo de toda sua existência, o homem sempre utilizou os recursos naturais do planeta e gerou resíduos com baixíssimo nível de preocupação: os recursos eram abundantes e a natureza aceitava sem reclamar os despejos realizados. Segundo TOFFLER (1993, p.25-30), a partir do século XVIII, com o surgimento da onda industrial, o modelo ou estratégia de desenvolvimento das nações consolidou suas bases técnicas e sociais. O objetivo principal era o crescimento econômico a curto prazo, mediante a utilização de novos processos produtivos e a exploração intensiva de energia e matérias-primas, cujas fontes eram consideradas ilimitadas. Este modelo gerou impressionantes excedentes de riqueza econômica, mas trouxe consigo grandes problemas sociais e ambientais, entre eles os resíduos.

O crescimento da atividade industrial, com conseqüente geração de maior quantidade de resíduos e poluentes, tem forçado o desenvolvimento de novas tecnologias para os processos produtivos, simultaneamente à necessidade de novas técnicas administrativas voltadas ao gerenciamento dessas atividades, com preocupação ambiental.

O desenvolvimento sustentável tem sido constantemente referido, parecendo ser a solução mais adequada à humanidade para conciliar interesses e necessidades aparentemente antagônicas. A visão exclusivamente preservacionista pode e deve existir, porém deve ser limitada a regiões específicas, pois hoje é difícil a aceitação de condições de vida que signifiquem abrir mão de confortos materiais já alcançados ligados ao uso de combustível, energia e bens materiais imprescindíveis à vida moderna (BARBOSA, 2001, p.92-5). Dentro deste contexto, já está sendo discutido um modelo econômico que considera o valor real para produtos obtidos por meio de matérias-primas não renováveis. Este modelo é denominado por alguns autores como "Capitalismo Natural" e além de apresentar uma nova forma de calcular os custos industriais também atribui o ônus do tratamento e beneficiamento dos rejeitos a seus produtores. A valorização do capital natural é de tal forma inevitável, que o Instituto Batelle (EUA) apontou o desenvolvimento da tecnologia verde (Green Integrated Technology) como uma das maiores tendências dos próximos vinte anos.

1.1.2 O Brasil no contexto mundial

O Brasil, assim como todo o mundo moderno, encontra-se no momento de reorientar as estratégias desenvolvimentistas em direção ao crescimento econômico ecologicamente sustentado. O país é considerado a 3ª economia emergente mundial, com um potencial estimado em 2 trilhões de dólares apenas em biodiversidade (ARNT, 2001, p.53-64). Manter o crescimento econômico sustentável sem afetar o meio ambiente será um grande desafio para os próximos anos. Para colaborar com este novo cenário, a constituição federal da república de 1988, determinou na forma do artigo 255, que cabe ao poder público a efetividade do direito de todos a um ambiente sadio.

Devido a abrangência e importância do tema, o governo federal sancionou em 12 de fevereiro de 1998 a Lei n.º 965 denominada de “lei da natureza”. Dentro das responsabilidades do estado estaria a assistência técnica, a divulgação de informações, incentivos fiscais ou de mercado, linhas de crédito para indústrias ecologicamente corretas, etc. As empresas, por outro lado, ficam mais expostas a cobranças de posturas mais ativas com relação aos seus processos industriais, os resíduos e efluentes produzidos e descartados, o desempenho dos produtos e serviços com relação ao seu ciclo de vida, não sendo mais suficiente analisar apenas o processo produtivo, mas sim olhando o produto desde a matéria-prima até o seu descarte final.

As indústrias brasileiras de revestimento cerâmico fizeram ao longo dos últimos anos uma série de investimentos em todos os seus departamentos, tendo como objetivo a acirrada competição no âmbito interno e também com o intuito de participar do mercado internacional de forma competitiva. Estes investimentos tiveram como resultado o aumento gradativo da produtividade/qualidade, atingindo uma produção nacional de 428,5 milhões de m² no ano de 1999. Do ponto de vista ecológico, esta produção representa uma imensa quantidade de matérias-primas naturais não renováveis sendo consumido a cada ano e por conseqüência, uma quantidade proporcional de resíduos. No que se refere às matérias-primas, percebe-se que este problema vem sendo solucionado com a adição de componentes alternativos ou recuperação das áreas de extração, conforme exigido no artigo 55, seção III, da lei ambiental n.º 9605 de fevereiro de 1998. Entretanto, com relação ao resíduo, o problema ambiental possui uma grandeza incomensurável.

1.1.3 Fatores Econômicos

As indústrias de revestimentos cerâmicos vem sofrendo uma significativa evolução tecnológica, como por exemplo, a substituição total de fornos túneis por fornos à rolo em processo de monoqueima, automação em todas as etapas do processo produtivo, emprego intensivo do gás natural, sistema de controle ambiental e desenvolvimento de produtos com elevada resistência mecânica, durabilidade, resistência a ataques químicos e novas aplicações. Fatores estes que de acordo com PASCHOAL e MENEGAZZO (1997, p.84) tem permitido uma expansão cada vez maior no emprego desses materiais na construção civil. O reflexo disso pode ser verificado nos dados mostrados na tabela 1.1, que exibem o desempenho crescente dos 5 maiores produtores mundiais, os quais já atingem cerca de 3,4 bilhões de m²/ano, onde pode ser percebido um incremento de 5%

na produção de 1998 em relação a 1997 e 9% na produção de 1999 em relação a 1998. (ANFACER, 2001).

TABELA 1.1 – PRINCIPAIS PRODUTORES MUNDIAIS DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO.

Países	Produção (milhões de m ² /ano)		
	1997	1998	1999
China	1.370	1.400	1.600
Itália	572	589	606
Espanha	485	564	602
Brasil	383	401	428
Turquia	148	154	150
Total	2.958	3.108	3.386

No Brasil, a indústria de revestimentos cerâmicos surgiu a partir de antigas fábricas de tijolos, blocos e telhas de cerâmica vermelha, que já no século XX começaram a produzir ladrilhos hidráulicos e, mais tarde, azulejos, pastilhas cerâmicas e de vidro. A partir da segunda metade da década de 60, com a criação do Sistema Financeiro de Habitação e do Banco Nacional da Habitação, toda a indústria nacional de materiais e componentes para a construção civil, vislumbrou a possibilidade de crescimento, em virtude da mudança radical na escala de produção de habitações no País.

Porém, segundo a ANFACER (1995, p.4-8), foi no início dos anos 70 com o surgimento de novas empresas, que a produção atingiu uma demanda continuada, ampliando-se significativamente. Na década de 80 a indústria cerâmica passou por um processo de desconcentração industrial e pulverização regional que levou ao número de 119 empresas produtoras de cerâmica para revestimentos, as quais passaram a buscar também o mercado externo. Porém, a maturidade dessa indústria foi atingida no final da década de 80 e início da década de 90, com um elevado grau de atualização tecnológica em relação aos países líderes, com a incorporação de tecnologias de última geração, automação do processo produtivo e implantação de sistemas de gestão da qualidade.

Atualmente, a indústria cerâmica brasileira é constituída por 127 empresas que movimentam R\$ 2,3 bilhões, geram 23 mil empregos diretos e 160 mil indiretos, consolidando-se como maior mercado consumidor do mundo ocidental e ocupando a 4^a posição no ranking de produtores, com a produção de 452,7 milhões de m² em 2000, conforme mostra a figura 1.1.

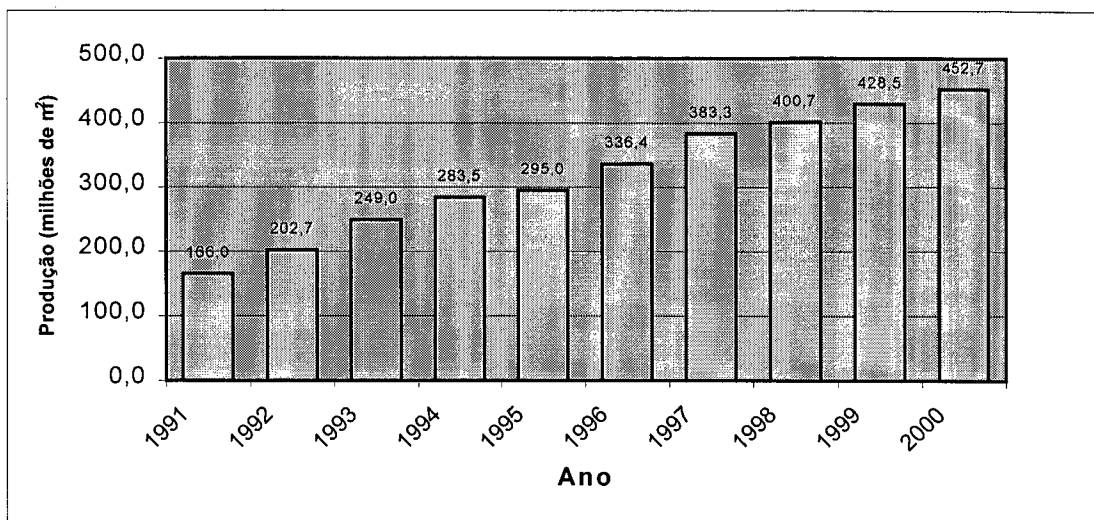


FIGURA 1.1 – PRODUÇÃO BRASILEIRA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS (ANFACER, 2001).

O volume de material descartado por quebra representa em média 3,0% de toda produção nacional de revestimento cerâmico. Correlacionando este percentual com a produção efetiva do Brasil em 2000 que foi de 452,7 milhões de m², temos aproximadamente 200 mil toneladas/ano deste tipo de material sendo gerado, das quais estima-se que 135 mil toneladas são oriundas de pavimentos cerâmicos fabricados por processo de monoqueima. Estes por possuírem espessuras maiores (6,5 a 11,0 mm) e serem queimados a temperaturas mais elevadas (até 1220°C), quando comparados com revestimentos porosos (azulejos), resultam, de acordo com HOTZA (1998, p.8), em produtos mais densos e conseqüentemente mais duros e resistentes ao processo de cominuição, sendo atualmente depositados em aterros. A ação de concentrar este material em uma área específica (aterro) constitui-se em uma medida paliativa e também nociva. Paliativa porque com este volume de rejeitos há uma ocupação de 60 km² de área anualmente. Nociva, pois estes materiais possuem em sua cobertura (vidrado), constituintes solúveis em água, que representam grande periculosidade à saúde humana, como é o caso do chumbo, cádmio e outros metais pesados.

Do ponto de vista econômico, levando em consideração o custo médio de fabricação de R\$ 2,80 por m², temos uma perda direta de R\$ 25.351.000,00/ano neste setor. Segundo OLIVEIRA et al. (2001), valor mais contundente é o quanto a indústria cerâmica com estes índices de rejeito, deixou de arrecadar, se tomarmos como referência o preço médio de venda de R\$ 5,50; isto representa uma quantia considerável de R\$ 50.000.000,00 por ano. Considerando o que a empresa deixou de ganhar e eventuais despesas com transporte, aterro e o impacto ambiental causado, os valores tornam-se ainda mais expressivos.

1.2 OBJETIVO

Avaliar o efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de massa cerâmica para pavimento, fabricado por processo de monoqueima, visando implementação em escala industrial

1.3 DEFINIÇÕES

Neste trabalho, “chamote semi-gresificado” constitui-se em pavimentos cerâmicos já sinterizados, pertencentes a classe BIIa (absorção de água entre 3 e 6%). Estes quando apresentam falhas desqualificantes, que comprometem a sua utilização, tornam-se rejeitos sólidos do processo de fabricação.

1.4 ESTRUTURA

Após este capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica sobre revestimentos cerâmicos, processos de fabricação, parâmetros de controle e propriedades dos produtos e também uma revisão bibliográfica sobre o estado atual da arte.

No Capítulo 3 descreve-se, detalhadamente, a metodologia experimental utilizada para analisar o efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de uma massa cerâmica para pavimento.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio de análises e ensaios como: composição química, distribuição de tamanho de partículas, viscosidade, absorção de água, retração linear de queima, resistência à flexão e densidade aparente entre outros, realizados em escala laboratorial.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, colocam-se as Referências Bibliográficas e os Anexos.

2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 PLACAS CERÂMICAS PARA REVESTIMENTO

2.1.1 Definições

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), na norma NBR 13816 (1997), são materiais compostos de argilas e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente usadas para revestir pisos e paredes, sendo geralmente conformadas por extrusão ou prensagem. As placas são então secadas e queimadas à temperatura de sinterização, podem ou não receber uma cobertura vitrificada.

Atualmente, sua produção se caracteriza pela ampla diversidade em suas formas (quadradas, retangulares ou octogonais) e dimensões (compreendidas entre 10x10 e 60x100 cm²), e em suas características técnicas (absorção de água, resistência mecânica, resistência à abrasão do vidrado, etc) e decorativas (cores, desenhos, etc).

As placas de revestimentos cerâmicos para paredes são normalmente porosos, o que favorece sua aderência a parede e sua maior estabilidade dimensional. Ao contrário, as placas de pavimentos cerâmicos apresentam uma baixa porosidade, a qual confere ao produto melhores características técnicas. Portanto, a qualidade dos revestimentos cerâmicos está intimamente ligada a composição das matérias-primas e ao processo de fabricação utilizado (BARBA et al., 1997, p.17-21).

2.1.2 Principais matérias-primas utilizadas

Independente do sistema de produção utilizado, para a fabricação de qualquer produto cerâmico parte-se de uma mistura de materiais, denominada comumente massa cerâmica, a qual passa por diversas transformações físicas e químicas até alcançar as propriedades requeridas ao produto acabado.

As matérias-primas cerâmicas são **minerais** ou acumulações de **rochas** com as quais se podem fabricar produtos cerâmicos, a partir de seu estado natural ou com tratamento prévio, sendo: mineral todo corpo inorgânico, de origem e ocorrência natural na crosta terrestre, homogêneo, podendo conter impurezas em pequenas proporções, amorfo ou cristalino e que tem uma composição química definida e estrutura cristalina característica; e rocha um agregado natural formado por um ou mais minerais de composição e propriedades diversas, que constitui uma parte essencial da crosta terrestre e é nitidamente individualizado.

De acordo com seu comportamento com a água, as matérias-primas cerâmicas dividem-se tradicionalmente em matérias-primas plásticas e não plásticas. Por plasticidade entende-se de modo amplo a propriedade de um material úmido deformar-se (sem romper) pela aplicação de uma tensão de cisalhamento, sendo que a deformação permanece quando a tensão aplicada é retirada. Exemplos comuns de matérias-primas plásticas são as argilas e os caulins, enquanto que o quartzo, o feldspato e o talco são exemplos de matérias-primas não plásticas.

2.1.2.1 Matérias-primas plásticas

O termo argila se emprega para fazer referência a um material com granulometria muito fina ($< 20 \mu\text{m}$), que manifesta um comportamento plástico quando se mistura com uma quantidade limitada de água. A figura 2.1 mostra que quanto maior a superfície específica do material, maior sua plasticidade. Sua fácil extração, trabalhabilidade e relativa abundância são fatores que contribuem para seu amplo emprego na indústria cerâmica. Caulins, bentonitas, ball-clays e argilas refratárias entre outras, são tipos especiais de argila que têm definições particulares, que podem apresentar variações, quer devido ao emprego tecnológico da argila, quer devido a origem geológica ou à composição mineralógica da argila.

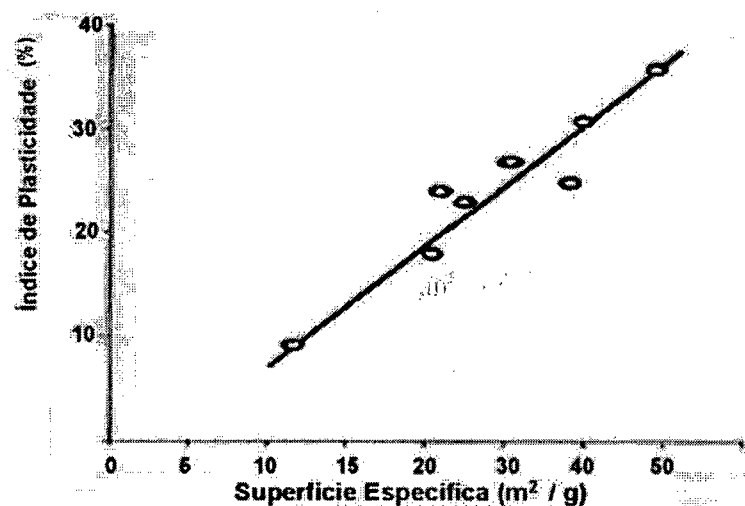
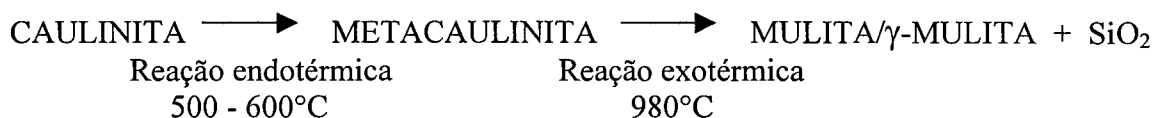


FIGURA 2.1 – GRÁFICO REFERENTE À RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE PLASTICIDADE VS SUPERFÍCIE ESPECÍFICA. (BARBA, et al., 1997, p. 225).

As argilas são materiais que surgem como resultado do intemperismo, da ação hidrotérmica ou que se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos. É uma rocha finamente dividida, constituída essencialmente por argilominerais, podendo conter minerais que não são considerados argilominerais (calcita, dolomita, gibsita, quartzo, aluminita, pirita e outros), matéria orgânica e outras impurezas. Argilominerais são minerais constituintes característicos das argilas, geralmente cristalinos; quimicamente são silicatos de alumínio hidratados, contendo em certos tipos outros elementos, como magnésio, ferro, cálcio, sódio, potássio, lítio entre outros (SANTOS, 1989, p.3-4).

Os argilominerais raramente se apresentam puros; assim, uma argila pode ser formada por um único argilomineral, porém geralmente apresenta-se misturada com vários outros minerais não argilosos tais como feldspatos, quartzo, carbonatos e minerais pesados (BARBA et al., 1997, p.37).

A maior parte dos argilominerais provém da transformação de silicatos primários ou de vidros vulcânicos sob a influência da água e de gases atmosféricos. As argilas caulínicas contém normalmente 80% ou mais de caulinita, minerais argilosos de três camadas tais como a ilita ou a mica, pequenas quantidades de quartzo e diversos óxidos que são, em sua maioria, fundentes. A caulinita, quando aquecida, sofre as seguintes reações:



A mulita é uma fase muito resistente ao ataque químico e que, por apresentar estrutura romboédrica, proporciona grande resistência mecânica às peças sinterizadas. O quartzo, por ser um material não plástico, diminui a plasticidade da massa, sua retração de secagem e a resistência mecânica a seco. Durante a sinterização, intervém quimicamente nas reações dissolvendo-se em pequenas quantidades na fase líquida e reagindo com os demais constituintes da massa. A presença de quartzo nas massas é desejada já que, em consequência das interações entre as fases presentes, propicia a formação de fase líquida de maior viscosidade durante o aquecimento até a temperatura de sinterização, levando a uma variação mais gradual da porosidade aberta e da retração linear, e ainda possibilitando a sinterização dentro de uma faixa de temperatura mais ampla.

O caulim utilizado pela indústria é um material obtido a partir do beneficiamento do caulim bruto ou rocha de caulim recém extraído. O mineral deve apresentar um tamanho de partícula máximo de 20 μm , podendo ocasionalmente ser de até 50 μm ou 60 μm , e ser branco depois de sua queima a 1400°C.

Os minerais habitualmente encontrados no caulim bruto são: caulinita, quartzo, feldspatos e micas. Outros componentes que podem ser encontrados no caulim natural são os óxidos de titânio (anatase, rutilo, etc.), óxidos e hidróxidos de ferro trivalente (hematita, goetita, limonita, etc.), siderita, pirita, magnetita, espinelo, biotita, fluorita, etc. Em alguns caulins são encontrados hidróxidos de alumínio (gibsita, boemita) que aumentam o conteúdo em alumina.

2.1.2.2 Matérias-primas não plásticas

As matérias-primas não plásticas comumente empregadas na preparação de massas para a fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos, podem dividir-se nos seguintes grupos: feldspatos e feldspatóides, sílicas, carbonatos e talcos (BARBA et al., 1997, p.99). Todas estas matérias-primas atuam no sentido de diminuir a plasticidade da composição, facilitando a defloculação. Mas, em função da forma e tamanho das

partículas as quais são geralmente de tamanho maior que as de argila, proporcionam as seguintes propriedades a peça crua:

- melhoram a compactação, devido ao melhor empacotamento;
- aumentam o tamanho do poro e, portanto, a permeabilidade da peça, facilitando a secagem e a degaseificação durante o pré-aquecimento.

Por outro lado, proporcionam à mistura uma série de óxidos que, durante a queima, podem reagir com o resto dos componentes da massa ou permanecer inerte, apresentando diferentes propriedades no produto queimado. Assim, os óxidos originados da decomposição dos carbonatos (geralmente, de cálcio e magnésio) são capazes de reagir com sílica e alumina proveniente da desidroxilação dos minerais argilosos, para formar fases cristalinas estáveis frente a ação da umidade, proporcionando além disso um bom intervalo de queima.

Os feldspatos, que são, normalmente sódicos ou potássicos, começam a fundir em temperaturas superiores a 1000°C, é o grupo mineralógico mais abundante que se encontra na crosta terrestre, constituindo frequentemente mais de 50% de muitas rochas, e aparecem misturados principalmente com o quartzo e mica.

O feldspato desempenha o papel de fundente nas massas para fabricação de revestimentos cerâmicos, promovendo as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima. A adição de feldspato, facilita a fusão e reatividade da mistura, reduzindo deste modo a temperatura de queima necessária para determinar uma certa quantidade de porosidade aberta, estimada como absorção de água (BARBA et al., 1997, p.100-9).

A sílica apresenta-se na natureza em muitas formas mineralógicas entre as quais se destaca o quartzo, que é um dos minerais mais abundantes. O quartzo está presente na maioria das massas empregadas em cerâmica, sendo introduzidas como argilas naturais ou como matéria-prima separada. Os materiais que possuem quartzo desempenham várias funções nas massas e produtos cerâmicos, já que o mesmo é utilizado, fundamentalmente para diminuir a plasticidade da mistura de matérias primas e aumentar a permeabilidade da peça crua e o coeficiente de expansão térmica linear da peça queimada, evitando assim que esta se deforme ou se contraia demasiadamente, tanto a seco como durante a queima.

Em geral, a introdução da sílica livre em misturas de matérias-primas argilosas origina:

- redução da plasticidade;
- diminuição da retração de secagem e de queima;
- aumento da permeabilidade e, normalmente, da compactação;
- diminuição do tempo de secagem;
- diminuição da resistência mecânica a seco e queimado;
- aumento da refratariedade em muitos casos;
- aumento, geralmente, do coeficiente de expansão térmica linear.

A sílica cristalina natural se apresenta em três formas: quartzo, tridimita e cristobalita. As três possuem a mesma fórmula química, SiO_2 , porém diferem na maneira como se ordenam os átomos de silício e oxigênio na estrutura de SiO_2 (alotropia). O quartzo é a forma estável termodinamicamente até os 870°C. Entre 870°C e 1470°C é estável a

tridimita. Da mesma forma, a cristobalita experimenta esse intervalo entre 1470°C. Acima desta temperatura forma-se a sílica vítrea por resfriamento controlado. (BARBA et al., 1997, p.118)

As rochas de carbonatos podem ser utilizadas com muitos fins na indústria cerâmica e de construção civil. A existência de carbonatos em meio às matérias-primas argilosas altera o curso da reação que tem lugar a altas temperaturas, gerando fases cristalinas que não se produzem na ausência destes e que afetam as propriedades da peça queimada. Assim, a adição de carbonatos alcalinos terrosos a uma massa cerâmica exerce uma ação de branqueamento sobre os produtos queimados, diminuindo ao mesmo tempo sua expansão por umidade. São utilizados em massas de produtos porosos, quando não se dispões de argilas calcárias.

O talco é um silicato de magnésio de estrutura laminar (3 camadas por folha), que pode apresentar-se associado a impurezas, tais como Fe_2O_3 , CaO e óxidos alcalinos (CORREIA, 1996, p.7). A proporção das impurezas restringe a aplicação do talco e, portanto, influi notavelmente em sua comercialização. O talco é empregado, em algumas ocasiões, para aumentar a fundência da composição cerâmica empregada na fabricação de pavimentos gresificados de massa cerâmica, em proporção de aproximadamente 8%. Por outro lado, em massas empregadas na fabricação de revestimentos porosos, a adição de talco aumenta, geralmente, o coeficiente de expansão térmica linear, ao mesmo tempo que diminui a expansão por umidade do produto queimado (BARBA et al., 1997, p.124-5).

O talco é um mineral que, dada a sua composição, leva ao aparecimento de fase líquida resultante de eutéticos de baixo ponto de fusão. Contém, além do mineral talco, outros minerais como o quartzo e a clorita, e impurezas óxidas. De acordo com a sua estrutura cristalina, o talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) pertence aos minerais argilosos. A desidratação durante o aquecimento leva ao aparecimento de cristobalita e enstatita. A presença de impurezas óxidas conduz a formação de esteatita (VIEIRA et al., 1993, p.461).

2.1.3 Classificações dos revestimentos cerâmicos

Os revestimentos cerâmicos podem ser classificados de várias formas, dependendo do critério empregado. Entre estas, as principais classificações são: segundo sua utilização, segundo a cor do suporte, segundo seu processo de fabricação e segundo as propriedades do produto acabado.

2.1.3.1 Utilização

Os revestimentos cerâmicos são utilizados principalmente para revestir paredes e pisos. Em linhas gerais as peças utilizadas para fabricar pavimentos e revestimentos cerâmicos apresentam características apropriadas em função das propriedades exigidas para cada uso e, de certo modo, em função de algumas peculiaridades de sua colocação.

a - Pavimento.

Os produtos para pavimento se caracterizam por uma alta resistência mecânica do produto acabado, normalmente devido a redução da porosidade das peças. Para isso, durante a queima deve-se formar uma quantidade suficiente de fase vítrea, a qual pode ser obtida mediante a introdução de matérias-primas que possuam óxidos alcalinos (argilas, feldspatos, etc). A redução da porosidade vem normalmente acompanhada de uma alta contração de queima, que será superior quanto mais baixa for a porosidade requerida no produto final.

b - Revestimento.

Em geral, dos produtos para revestimento são exigidos uma alta estabilidade dimensional, que se obtém mediante o uso de uma massa com baixa retração de queima. Esta baixa contração de queima vem junto com uma alta porosidade, que também pressupõe uma maior facilidade em sua colocação.

2.1.3.2 Cor da massa

Empregando o critério de cor do suporte após a queima, é possível dividir os revestimentos cerâmicos em dois grandes grupos: produtos de queima vermelha e produtos de queima branca.

A cor do suporte queimado depende quase exclusivamente do conteúdo em óxidos corantes presentes na composição, principalmente de óxidos de ferro. Este fato condiciona o tipo de matérias-primas a serem empregadas e, portanto, é responsável pela diferença existente entre as composições que se utilizam na fabricação dos suportes de queima vermelha e branca. Para BARBA (1997, p.22), também é de grande importância a forma com que este elemento se encontra presente nas matérias-primas (integrado a estrutura argilosa, em forma de compostos distintos de ferro, como sais solúveis ou em forma de ferro metálico).

A intensidade da cor, conforme o mesmo autor, também depende da presença de outros óxidos, como o titânio que proporciona uma coloração amarelada, do tipo e quantidade de fase vítrea formada na peça queimada, que pode fazer com que uma maior ou menor proporção de ferro passe a fazer parte desta, e da facilidade de formação de fases cristalinas, que em algumas ocasiões podem incluir o óxido de ferro em sua estrutura clareando a peça. As fases cristalinas que se desenvolvem com mais frequência nestes produtos são: a mulita, a partir dos minerais argilosos caulínicos, e a anortita e pseudowolastonita, a partir dos minerais argilosos e do óxido de cálcio.

Para fabricar suportes de queima vermelha, empregam-se quase que exclusivamente argilas vermelhas (com elevados teores de ferro), enquanto que para os suportes de queima branca emprega-se uma mistura de matérias-primas argilosas, de baixo conteúdo em óxidos de ferro, e rochas, que variam em função das propriedades que se deseja obter no produto acabado.

2.1.3.3 Tecnologia de fabricação

No processamento de revestimentos cerâmicos utilizam-se tecnologias distintas, adequadas ao tipo de produto desejado. Essas diferenças são mais evidentes na etapa de preparação da massa e queima, conforme mostra a figura 2.2.

a - Preparação da massa

Nesta etapa utilizam-se, basicamente, duas tecnologias distintas para a moagem das matérias-primas: moagem via úmido e moagem via seco. Na primeira as matérias-primas são moídas junto com uma quantidade de água suficiente para transformá-las em uma suspensão cerâmica bastante homogênea, a qual será submetida a um secador por spray denominado atomizador, transformando-a em um pó atomizado com índices apropriados de umidade e fluidez. Na moagem à seco as matérias-primas com alto teor de umidade são secas e levadas ao moinho onde são reduzidas a tamanhos de partículas apropriados. A seguir, o pó é umidificado e granulado, estando pronto para a etapa posterior de conformação por prensagem. O pó granulado possui desvantagens em relação ao pó atomizado quanto a homogeneidade das suas propriedades e ao formato das partículas, porém segundo NASSET e PALMONARI (1993, p.15-24), a considerável economia de energia associada ao seu processamento e as vantagens no gerenciamento desse processo produtivo, constituem um estímulo para se continuar os estudos na direção de se obter maiores informações necessárias para uma aplicação mais difundida dessa tecnologia.

b - Queima

Esta etapa utiliza basicamente dois processos distintos: o de biqueima, no qual o substrato é queimado para posteriormente ser esmaltado e queimado novamente (queima do esmalte), e o de monoqueima, onde o substrato é esmaltado cru e submetido a uma única queima. O segundo é um processo mais moderno e amplamente utilizado na fabricação de pavimentos cerâmicos. Em geral, as temperaturas máximas para biqueima ficam em torno de 980°C, enquanto que na monoqueima essas podem ultrapassar os 1200°C, dependendo da porosidade desejada. Quanto ao acabamento do produto cerâmico, pode ser esmaltado (GL – glazed), como no caso anterior, ou não esmaltado (UGL – unglazed), podendo apresentar uma superfície polida, como é o caso dos porcelanatos.

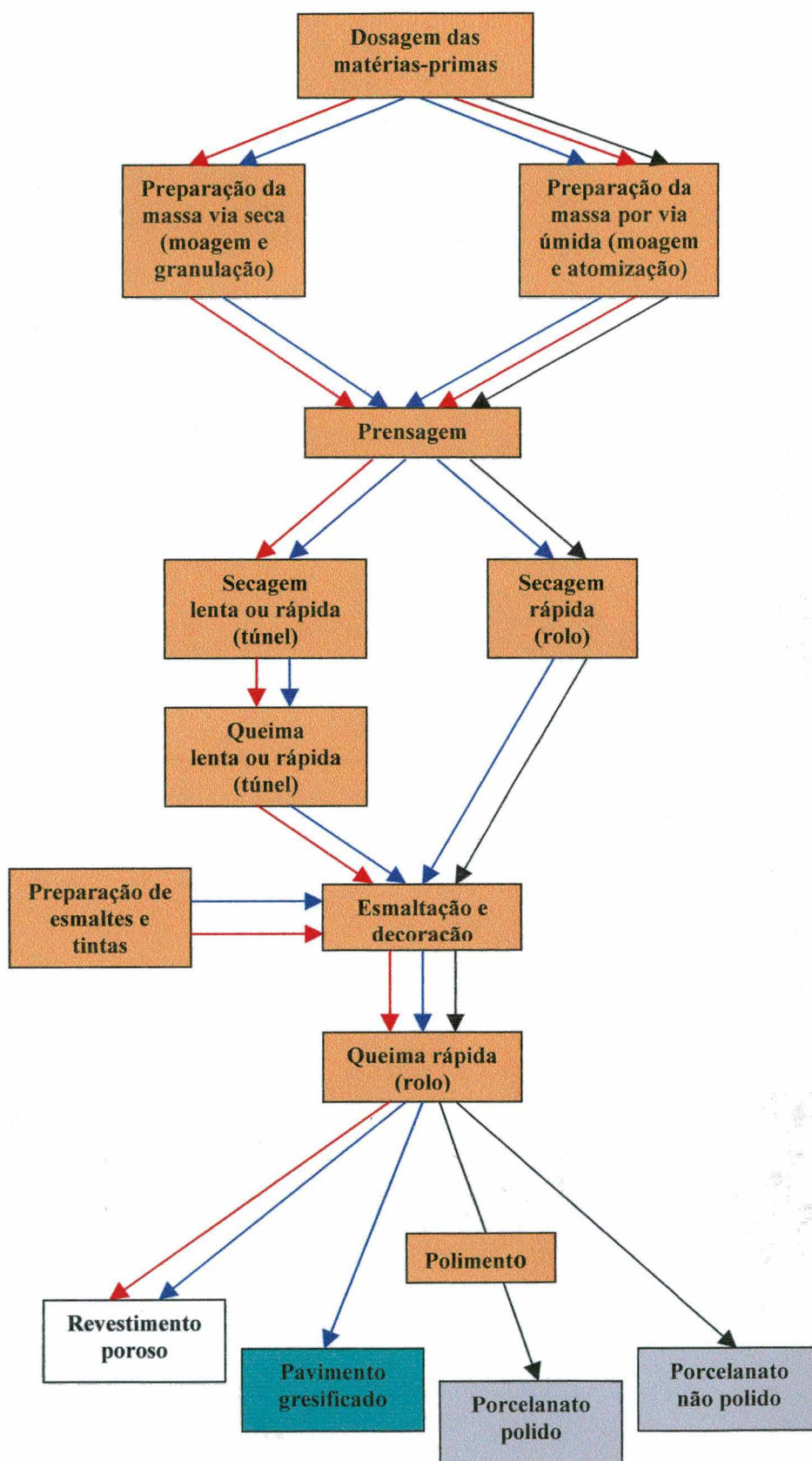


FIGURA 2.2 – ESQUEMA DO PROCESSO USUAL DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

2.1.4.4 Propriedades do produto acabado

Esta classificação é a mesma adotada e exigida pelas normas ISO (International Standard Organization) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) a NBR 13818 (1997), classifica os revestimentos cerâmicos em:

- esmaltados e não esmaltados;
- grupos de absorção de água;
- classe de resistência a abrasão superficial, em número de 5;
- classes de resistência ao manchamento, em número de 5;
- classe de resistência ao ataque de agentes químicos, segundo diferentes níveis de concentração;
- aspectos visuais e dimensionais.

Estas classificações devem ser obrigatoriamente declaradas pelos fabricantes

Dos critérios citados acima, a absorção de água é um ensaio fundamental porque é um método simples de quantificar a porosidade, que é uma propriedade que influencia diretamente em muitas outras. Não foi por acaso que na classificação ISO escolheu-se como primeiro parâmetro discriminatório para a subdivisão em classes a absorção de água. De fato, este é um método simples e aplicável por qualquer um, ao contrário de outros métodos de quantificação de porosidade mais precisos que, por sua vez requerem equipamentos freqüentemente sofisticados.

A tabela 2.1 mostra a classificação de revestimentos cerâmicos segundo a norma ABNT NBR 13817 (1997) e a definição dos mesmos segundo CCB – Centro Cerâmico do Brasil (1998).

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS REVESTIMENTOS CERÂMICOS.

Grupos	Absorção de água – AA (%)	Definição do Produto
Bla	$0 < AA \leq 0,5$	Porcelanato
BIb	$0,5 < AA \leq 3$	Grés
BIIa	$3 < AA \leq 6$	Semi-Grés
BIIb	$6 < AA \leq 10$	Semi-Poroso
BIII	$AA > 10$	Poroso

Os grupos de absorção de água são precedidos pela letra “B”. Isto porque segundo a norma ABNT NBR 13817 (1997), estes são codificados em função dos métodos de fabricação, sendo: A – extrudados, B – prensados e C – outros.

Na tabela 2.2 pode-se verificar uma classificação diversa, embora relacionada também aos valores de absorção de água, segundo as normas da *American Society for Testing and Materials* - ASTM/ANSI A 137.1 (1980).

TABELA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO E DEFINIÇÃO SEGUNDO AS NORMAS ASTM/ANSI A 137.1 (1980).

Absorção de água – AA (%)	Peças Cerâmicas Prensadas	
	Pavimentos	Revestimentos
$AA \leq 0,5$	muito vitrificado	-
$0,5 < AA \leq 3$	vitrificado	-
$3 < AA \leq 7$	semi-vitrificado	semi-vitrificado
$7 < AA \leq 18$	não vitrificado	não vitrificado

Outras características exigidas pelo consumidor, em função do uso declarado nos catálogos do fabricante, segundo LASSALVIA (1995, p.8-15) são:

- expansão por umidade: importante para utilização em fachadas e piscinas;
- expansão térmica linear e resistência ao choque térmico: lareiras e usos semelhantes;
- resistência ao congelamento: terraços e fachadas em lugares frios;
- coeficiente de fricção: locais com necessidade de piso antiderrapante;
- eliminação de chumbo ou cádmio: revestimentos que ficarão em contato com alimentos não podem ser “contaminados” com esses elementos que podem ser eliminados pelas placas cerâmicas;
- resistência à gretagem: está intimamente ligada à expansão por umidade e deve ser requerida quando sua utilização for destinada a banheiros, saunas e lugares sujeitos à umidade.

Estes se distinguem basicamente por meio de sua composição de matérias-primas e do tipo de processamento, conferindo ao produto suas características e propriedades.

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PAVIMENTO SEMI-GRESIFICADO

2.2.1 Formulação da massa

De acordo com BARBA et al. (1997, p.21), em geral uma massa cerâmica pode ser considerada adequada quando cumpre uma série de condições, tais como:

- a relação de materiais plásticos e materiais não plásticos deve ser tal que confira à peça conformada uma suficiente resistência a verde e a seco.
- Se a preparação da massa for realizada por processamento a úmido, deve ser facilmente defloculada.
- Por último, a massa cerâmica deve possuir uma adequada composição química e mineralógica, de maneira que as transformações físico-químicas que ocorrem durante o processo de queima forneçam ao produto acabado as propriedades e características desejadas (coeficiente de dilatação, resistência mecânica, porosidade, etc). Assim, a massa deve ser o mais estável possível e as variações de temperatura de queima devem estar dentro de certos limites.

As matérias-primas utilizadas para a fabricação de revestimentos cerâmicos podem, ou não, sofrer beneficiamento prévio antes de sua utilização, porém raramente irão se tratar de argilominerais puros. A qualidade do produto dependerá muito da composição de matérias-primas empregadas e do processo de fabricação utilizado.

Já para VIEIRA et al. (1993, p.459-60), os fatores a serem considerados quando da formulação de uma massa para cerâmica de revestimentos são:

- a) plasticidade da massa: influi diretamente sobre a facilidade de compactação e a resistência mecânica a verde e a seco do produto, fundamental quando do seu manuseio. É determinada pela relação entre a quantidade de materiais plásticos (minerais argilosos) e não plásticos (quartzo, etc.);
- b) facilidade de defloculação da massa: é indispensável quando a moagem é realizada por via úmida, como normalmente ocorre;
- c) por questões tecnológicas, a massa deve ser insensível a variações na temperatura de sinterização dentro de certos limites; ou seja, deve apresentar uma faixa de temperatura para sinterização;
- d) características tecnológicas específicas (coeficientes de expansão térmica linear, resistência mecânica, porosidade, etc.): a massa deve possuir uma composição químico-mineralógica equilibrada tal que, durante a sinterização, ocorram reações físico-químicas que produzam as quantidades necessárias de fase vítrea com uma viscosidade adequada que evite a deformação das peças e lhes confira as características desejadas.

Por estas razões, uma massa para cerâmica de revestimentos é normalmente constituída pela mistura, em proporções cuidadosamente estudadas, de materiais argilosos e fundentes. Durante a sinterização das massas ocorrem uma série de reações entre seus componentes que serão determinantes sobre as características finais do produto. A dinâmica destas reações é inicialmente determinada pela proporção e características dos diferentes minerais integrantes da matéria-prima. Contudo, embora estas reações (físicas e químicas) tenham equilíbrio, elas não são completas, já que a sinterização se completa quando são obtidas a textura e as fases mineralógicas desejadas no produto. Sendo assim, é muito importante conhecer as diversas transformações mineralógicas que ocorrem durante o aquecimento e a sinterização.

2.2.2 Preparação da massa a úmido

O objetivo da moagem, realizada a úmido em moinhos de bolas, é reduzir o tamanho das matérias-primas e homogeneizá-la até que uma suspensão com distribuição de tamanho de partículas adequada ao processo seja alcançada. Segundo HOTZA (1998, p.6), o resíduo após a moagem para produtos tipo pavimentos semi-gresificados é da ordem de 6-10% em malha 230 mesh (63 μm). Após a moagem, a suspensão é bombeada até o atomizador. Este permite remover, por evaporação, a água contida na mesma, baixando de 35 a 40% para até 6% em massa de água, produzindo assim grânulos com características e propriedades adequadas (tamanho, formato, dureza, etc.) para as operações subseqüentes (transporte, alimentação da prensa, prensagem, etc.). As partículas produzidas nesta etapa apresentam, geralmente, uma distribuição granulométrica com uma considerável concentração na faixa compreendida entre 180 e 424 μm .

A operação de atomização consiste basicamente em três etapas: formação das gotículas, secagem das gotículas em ar quente e transporte e separação do pó seco. A secagem ocorre enquanto a gotícula está suspensa no ar. A névoa criada pela atomização da

barbotina (suspensão cerâmica), dá lugar a uma maior superfície otimizando assim, a transferência de calor e de massa. Portanto, a água das gotículas evapora muito rapidamente e reduz a temperatura do fluxo de ar (NEGRE e SANCHES, 1998, p.22-8).

2.2.3 Prensagem

Dos vários processos industriais utilizados para a conformação de revestimentos cerâmicos, a prensagem uniaxial se tornou o método mais comumente empregado. Isto se deve ao fato da prensagem a seco alcançar uniformidade de todo um leque de características básicas e propriedades mecânicas que podem ser obtidas nos compactados verdes, os quais são responsáveis pela definição das características e propriedades do produto final queimado. Segundo AMORÓS (1987, p.31-7), além de assegurar a qualidade do produto, o processo de prensagem a seco proporciona níveis elevados de produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional. Em geral a pressão de prensagem é da ordem de 28 – 35 MPa (~ 280 a 350 kgf/cm²).

Segundo GARCIA et al. (1999, p.15.), as características da composição que influem em maior medida sobre seu comportamento na etapa de prensagem, bem como sobre as propriedades da peça conformada (porosidade e microestrutura), são as seguintes:

- distribuição do tamanho e forma dos aglomerados;
- tipo de composição (componentes que a constituem);
- distribuição do tamanho das partículas (DTP).

A fase de enchimento da matriz depende, em grande parte, da distribuição do tamanho e da forma dos aglomerados, já que ambas características determinam a fluidez do pó. Os pós atomizados empregados na fabricação dos distintos tipos de peças apresentam tamanhos de aglomerados muito parecidos.

Uma vez finalizada a fase de enchimento da matriz, começa a fase de compactação. A densidade máxima que é possível alcançar durante esta fase depende, por um lado, das variáveis de prensagem utilizadas (umidade do pó e pressão aplicada) e, por outro lado, da DPT da composição, a qual é função das matérias-primas empregadas e do grau de moagem obtido.

2.2.4 Secagem

A secagem, é a etapa do processo que consiste na evaporação da água contida nas peças prensadas, de valores variando de 5 a 8%. Nesta fase, concomitantemente à evaporação da água residual, verifica-se um aumento da resistência mecânica da peça cerâmica, atribuída a uma densificação causada pelo empacotamento e atração de partículas que aumenta as forças de ligação entre as mesmas. Estes valores deverão ser suficientemente altos no caso da monoqueimã.

De fato, para suportar as solicitações mecânicas na fase de impressão serigráfica, os valores de resistência à flexão deverão ser superiores a 2,5 MPa ($\sim 25 \text{ Kgf/cm}^2$) (OLIVEIRA e ALARCON, 1999, p.37). A secagem, com a passagem das peças em secadores monoestratos, é sempre mais acelerada, chegando a ciclos de 8 a 15 minutos com temperaturas de 180 a 200°C.

2.2.5 Preparação de esmaltes e tintas

Esta etapa de produção antecede a aplicação de esmalte sobre os suportes e sua condução é determinante de forma que não ocorram problemas nas etapas seguintes. Necessita de instalações adequadas com canaletas para possibilitar limpezas freqüentes. Os efluentes gerados devem, obrigatoriamente, passar por um tratamento e os resíduos retirados, devem voltar ao processo.

Na preparação de esmaltes a moagem é feita por via úmida. O moinho é revestido com tijolos de alumina de alta densidade e os elementos moedores são esferas de alumina de alta densidade, o que possibilita uma eficiência de moagem alta, com pequeno desgaste e pouca contaminação.

Esmaltes são materiais fundamentalmente vítreos que são aplicados sobre os substratos cerâmicos (massa já prensada e conformada) na forma de uma camada homogênea. São compostos basicamente por fritas, matérias-primas cruas (alumina, quartzo, feldspato), corantes aditivos e água. Os esmaltes são aplicados nas peças cerâmicas com diversas finalidades: impermeabilizar, melhorar o efeito estético, aumentar a resistência ao desgaste (abrasão), aumentar a resistência ao ataque químico (ácidos e bases) e contribuir para o aumento da resistência mecânica.

A tinta serigráfica trata-se de um esmalte, onde o solvente da suspensão é um fluido de origem orgânica ao invés de água (FERNANDES, 2001, p.13-4). A tinta é aplicada sobre a camada de esmalte, com auxílio dos mais variados tipos de serigrafia, conferindo ao produto os efeitos decorativos desejados.

2.2.6 Esmaltação

Nesta etapa do processo são realizadas as aplicações de camadas superficiais de esmaltes e as mais diversas variedades de decorações que, após a queima, fornecem ao produto as suas características e aspectos finais. Estas aplicações são feitas sobre uma linha de esmaltamento, onde estão instalados equipamentos apropriados. Nela, as peças secas, ainda quentes, são transportadas por correias.

No processo de fabricação de revestimento cerâmico de monoqueima, onde a esmaltamento e decoração é feita sobre o material cru, houve substanciais mudanças nas técnicas de aplicação, como por exemplo, a tecnologia das prensas e a aplicação de esmaltes à campana; e nos parâmetros do processo, como por exemplo, o aumento da resistência mecânica a cru e a máxima redução na quantidade de água na barbotina de esmalte (OLIVEIRA e ALARCON, 1999, p.30).

2.2.7 Queima em processo de monoqueima

Etapa na qual o produto, após seco e esmaltado, é submetido ao tratamento térmico em um forno onde desenvolve sua microestrutura e propriedades. Este processo, chamado queima, ocorre em três estágios: 1) reações preliminares à sinterização, que incluem queima da matéria orgânica e eliminação de produtos da decomposição e oxidação; 2) sinterização, que é a consolidação caracterizada pela contração e densificação do produto; e 3) resfriamento (REED, 1995, p.583).

No processo de monoqueima são utilizados fornos contínuos de ciclos rápidos (30 a 45 minutos) que permitem obter uma distribuição homogênea de calor sobre as peças. A temperatura de queima pode chegar a 1200°C.

Após a queima, o produto terá suas propriedades físicas e químicas finais (resistência ao desgaste, resistência à ácidos e álcalis, resistência mecânica, absorção de água, entre outras) definidas em função das matérias-primas utilizadas no processo, que correspondem à aplicação do produto.

2.2.8 Classificação

Nesta etapa, o produto passa primeiramente por uma classificação visual da superfície, realizada *on line* por um operador.

Atualmente o revestimento cerâmico é selecionado em três classes:

- A ou extra – Produto sem defeitos superficiais visíveis a 1 m de distância;
- C ou comercial – Produto sem defeitos superficiais visíveis a 3 m de distância;
- D ou popular - Produto com defeitos superficiais visíveis a 3 m de distância, que não comprometem sua utilização.

É permitido pela norma ABNT NBR 13818 (1997) um índice de mistura de 5% (entre as classes A, C e D). Após esta análise visual, o produto passa por uma análise dimensional, onde é observado o comprimento e largura das peças, a linearidade e a planalidade superficial (as normas ISO e ABNT especificam as medidas e definem as tolerâncias de cada item), e são realizadas, geralmente, de forma automatizada logo após a seleção visual.

As peças quebradas, que após processo de queima apresentam defeitos exagerados ou defeitos que comprometem sua utilização, como por exemplo uma trinca térmica que a fragiliza completamente, são denominadas chamotes. Estas são separadas como resíduo sólido do processo produtivo, que atualmente é depositado em aterros.

2.3 PROPRIEDADES DO MATERIAL

Segundo REED (1995, p.3), as propriedades dos materiais cerâmicos são determinadas pelas características atômicas e microestruturais dos materiais que o compõem; já o controle das matérias-primas, do produto e do processo de fabricação é fundamental para que os defeitos microestruturais sejam minimizados. Neste contexto, são abordadas algumas propriedades consideradas fundamentais para que se possa avaliar o efeito de determinadas alterações, sejam estas na composição do material ou no seu processamento, sobre o comportamento do produto

2.3.1 Composição química

A análise química pode ser útil para o controle das variações que podem ocorrer na composição de uma matéria-prima. Sem dúvida, estas análises raramente servem para caracterizar o material, a não ser que venha acompanhada de alguns dados físicos ou que se conheçam as espécies mineralógicas contidas.

Em geral, as argilas empregadas na fabricação de massas cerâmicas caracterizam-se por apresentar uma alta proporção de mineral argiloso, essencialmente de natureza ílítica-caulinítica, e proporções variadas de quartzo e carbonatos. Assim mesmo, podem conter outros componentes, normalmente minoritários, tais como compostos de ferro, feldspato, etc. Outros minerais que habitualmente se empregam na indústria cerâmica são quartzo, feldspato sódico-potássico, carbonatos e, em menor medida, talco.

O método mais utilizado para determinar a mineralogia das matérias-primas cerâmicas é, sem dúvida, a difração de raios-x. Isto porque não só possibilita a identificação das espécies mineralógicas presentes, como também permite estudar as características cristal químicas destes minerais.

Finalmente se deve indicar que, a partir das análises químicas e da difração de raios-x de uma matéria-prima, é possível calcular, de forma aproximada, sua composição mineralógica.

2.3.2 Viscosidade da suspensão

A viscosidade de um fluido nada mais é do que a resistência que ele oferece ao escoamento. Pode ainda ser considerada como a fricção interna entre as camadas do fluido, sendo esta fricção produzida por forças intermoleculares efetivas na interface das camadas adjacentes.

O comportamento reológico de um material em escoamento pode ser descrito pela relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a resultante taxa de cisalhamento ou gradiente de velocidade. Quando a tensão de cisalhamento é linearmente dependente do gradiente de velocidade (D), pode descrever-se a relação: $\tau = \eta D$, sendo η o coeficiente de proporcionalidade entre a solicitação imposta ao fluido através da tensão de cisalhamento e a resposta dada pelo fluido a esta solicitação através do gradiente de

velocidade exibido. Neste caso, em que a relação é linear, o coeficiente de proporcionalidade é designado por coeficiente de viscosidade ou simplesmente viscosidade. O fluido é então dito fluido Newtoniano. O recíproco da viscosidade, $\phi = 1/\eta$, é chamado de fluidez.

A influência da temperatura na viscosidade é tanta que, para se produzirem resultados precisos, um grande cuidado deve ser tomado com o controle da temperatura na viscosimetria. A viscosidade dos líquidos aumenta exponencialmente com a pressão, mas as mudanças só são significativas para pressões que diferem da pressão atmosférica por cerca de um bar ou mais, portanto para a maior parte dos propósitos práticos, o efeito da pressão pode ser desprezado (CRUZ et al., 1996, p.55-7).

2.3.3 Distribuição de tamanho de partículas

As partículas sólidas constituintes das matérias-primas cerâmicas possuem uma grande variedade de formas e tamanhos, e podem se apresentar em distintos estados de agregação. A distribuição do tamanho de partículas, junto a outras características como a forma e o estado de agregação, determinam as propriedades dos produtos acabados (porosidade, tamanho dos poros, resistência mecânica, textura, etc.) e regulam o comportamento da massa durante o processo de fabricação. É então, fundamental, a determinação da distribuição de tamanho de partículas dos aglomerados para controle e otimização do processo de fabricação e das propriedades do produto acabado.

A figura 2.3 mostra a influência da distribuição de tamanho de partículas no empacotamento do pó.

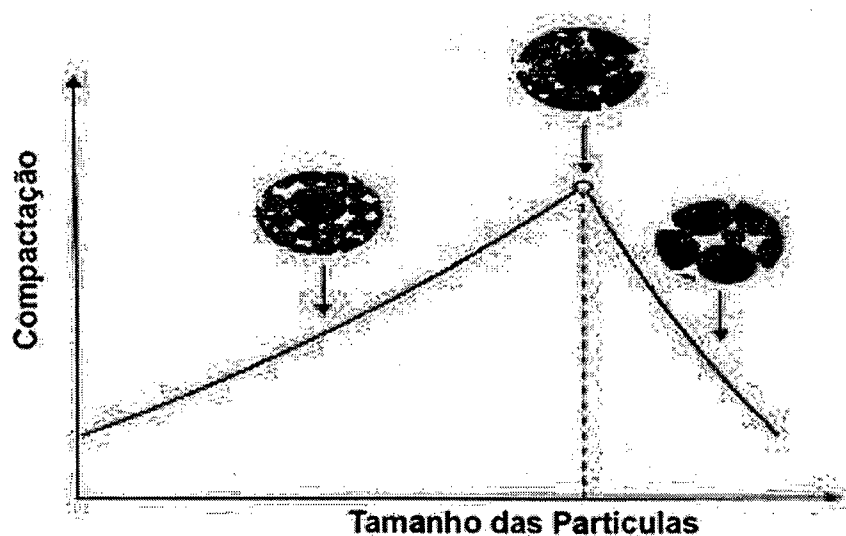


FIGURA 2.3 – VARIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE MISTURA DE PARTÍCULAS DE TAMANHOS DIFERENTES EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE PARTÍCULAS GRANDES (BARBA et al., 1997, p.231).

A mistura de vários tamanhos de partículas, até uma distribuição uniforme de tamanhos, conduz a um empacotamento das mesmas diferente do esperado para partículas do mesmo tamanho.

O tamanho das partículas e a distribuição de tamanhos tem uma influência marcante sobre o comportamento reológico da suspensão. Por um lado, o tamanho das partículas determina a intensidade da força de interação do tipo coloidal (forças Brownianas, de van der Waals, etc.). Assim, em geral, para uma concentração volumétrica determinada, quanto menor o tamanho das partículas maior é a sua viscosidade e o comportamento pseudoplástico da suspensão (BARBA et al., 1997, p.206).

CRUZ (1996, p.46-7), por sua vez, diz que o empacotamento das partículas tem também um efeito pronunciado no comportamento reológico, particularmente no caso de concentrações muito altas. O aumento da viscosidade relativa das suspensões com a redução do tamanho das partículas é um comportamento reconhecido por diversos autores. No caso da moagem via úmida de argilas, a variação da viscosidade com o tempo de moagem dá-se principalmente pelo aumento da fração de finos e pela distribuição dos aglomerados, com o conseqüente aumento da área de contato entre sólido e líquido.

A distribuição do tamanho de partículas influencia, também, a propriedade de secagem, devido ao efeito que exerce sobre a compactação do material. Deste modo, a medida que aumenta a densidade da peça, decresce sua permeabilidade e com ela a velocidade de secagem durante a última etapa (BARBA et al., 1997, p.248).

2.3.4 Densidade aparente

A densidade aparente é defendida por muitos autores como uma das variáveis mais importantes do processamento cerâmico. PAULA et al. (1997, p.28-31), em seu estudo sobre o efeito do teor de umidade e da pressão de prensagem sobre as características de revestimentos cerâmicos, mostram que a densidade aparente do corpo compactado interfere diretamente nos resultados do Módulo de Ruptura à Flexão (MRF) a seco e após queima, na retração linear e absorção de água, conforme mostram as figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7.

Para diferentes pressões de compactação empregadas, a densidade aparente após a secagem aumenta linearmente com o aumento da pressão. Como a densidade aparente do compactado é dada pela razão entre a massa e o volume do mesmo e a massa permanece constante durante a compactação, a única forma de se aumentar a densidade é através da redução do volume.

O volume inicial do compactado é dado pela soma do volume das partículas sólidas e dos espaços vazios entre elas. Esses espaços vazios podem ser de dois tipos:

- espaços vazios entre as partículas sólidas dentro dos grânulos (intragranular);
- espaços vazios entre os grânulos (intergranular).

O aumento da densidade durante a compactação é uma decorrência da deformação plástica dos grânulos que ao se deformarem passam a ocupar os espaços vazios que havia entre eles (porosidade intergranular). Nos casos em que os grânulos são ocos, bastante comum nos pós granulados produzidos por atomização, há também o preenchimento desses ocos. Portanto, a densificação depende da facilidade com que os grânulos se deformam plasticamente, ou seja, da sua plasticidade. Considerando que a umidade atua como um lubrificante ou plastificante da argila, e esta diminui o esforço necessário para que as partículas de argila, dentro dos grânulos, comecem a escorregar umas sobre as outras. Ao aumentar-se a pressão aumenta-se o grau de deformação, mas o efeito plastificante da água continua sendo o mesmo. Entretanto, ao se aumentar a densidade o volume de espaços vazios entre as partículas por unidade de volume da amostra diminui e, com ele, a mobilidade das partículas. Assim sendo, resta um volume cada vez menor para que a água adicionada, além de revestir a superfície das partículas e torná-las plásticas, possa se movimentar sobre elas.

Como mostra a figura 2.4, o módulo de ruptura à flexão (MRF) das amostras secas aumenta linearmente com a densidade após a secagem. A resistência mecânica das peças secas determina a sua resistência ao manuseio. Sob este aspecto, quanto maior for o MRF melhor é o compactado. Entretanto, ao se aumentar excessivamente a densidade dos compactados, pode-se reduzir a sua permeabilidade e conseqüentemente dificultar a oxidação da matéria orgânica presente na massa. A matéria orgânica aprisionada no interior da peça, sem que o oxigênio possa chegar até ela e que os gases provenientes da sua oxidação possam sair da peça, pode dar origem ao defeito conhecido como coração negro (PAULA et al., 1997, p.30)

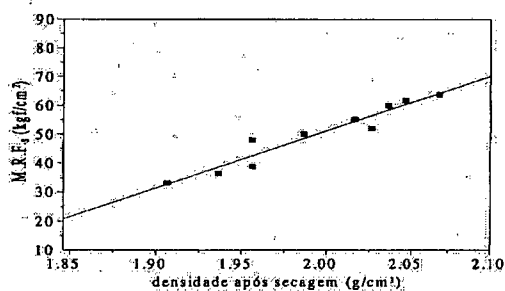


FIGURA 2.4 - VARIÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APÓS SECAGEM (PAULA et al., 1997, p.30).

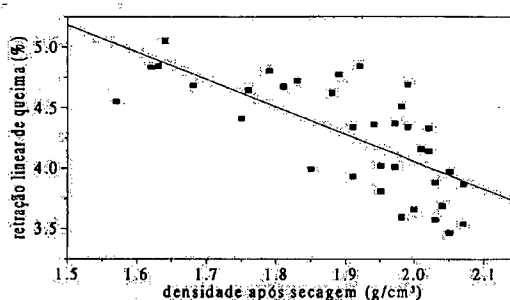


FIGURA 2.5 - VARIÇÃO DA RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DOS COMPACTADOS SECOS INDEPENDENTE DOS TEORES DE UMIDADE PRESSÃO (PAULA et al., 1997, p.31).

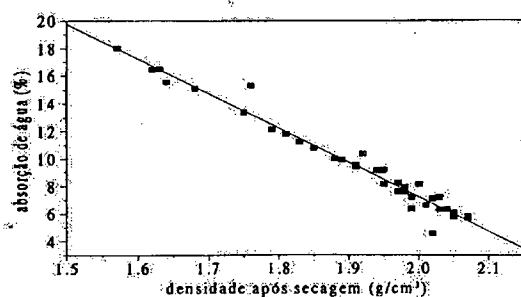


FIGURA 2.6 - VARIÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DOS COMPACTADOS SECOS INDEPENDENTE DOS TEORES DE UMIDADE E PRESSÃO (PAULA et al., 1997, p.31).

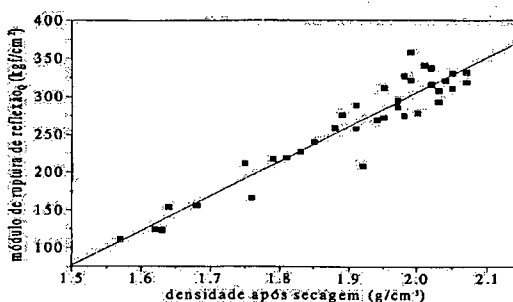


FIGURA 2.7 - VARIÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APÓS SECAGEM INDEPENDENTE DOS TEORES DE UMIDADE E PRESSÃO (PAULA et al., 1997, p.31).

As figuras 2.5, 2.6 e 2.7 mostram a variação da retração linear (RL), absorção de água (AA) e módulo de ruptura à flexão (MRF) de amostras queimadas em função da densidade após a secagem, independentemente das condições de umidade e pressão utilizadas para confeccioná-las. Tanto a absorção de água como a retração linear de queima diminuem com o aumento da densidade da peça seca (D_s) e o módulo de ruptura à flexão aumenta. O mais interessante, entretanto, é o fato de que a dependência dessas três variáveis, AA, RL e MRF, fundamentais para a fabricação de revestimentos cerâmicos, com a densidade das peças secas também é linear e que parecem não depender do teor de umidade da massa nem da pressão de compactação, mas sim da densidade a seco, é resultante da combinação dessas duas variáveis de processamento.

Portanto, para uma determinada formulação de massa, o teor de umidade e a pressão de compactação determinam a densidade aparente da peça seca, que por sua vez influencia linearmente nos valores de resistência à flexão das peças secas e queimadas, absorção de água e retração linear de queima, conforme representada na figura 2.8.

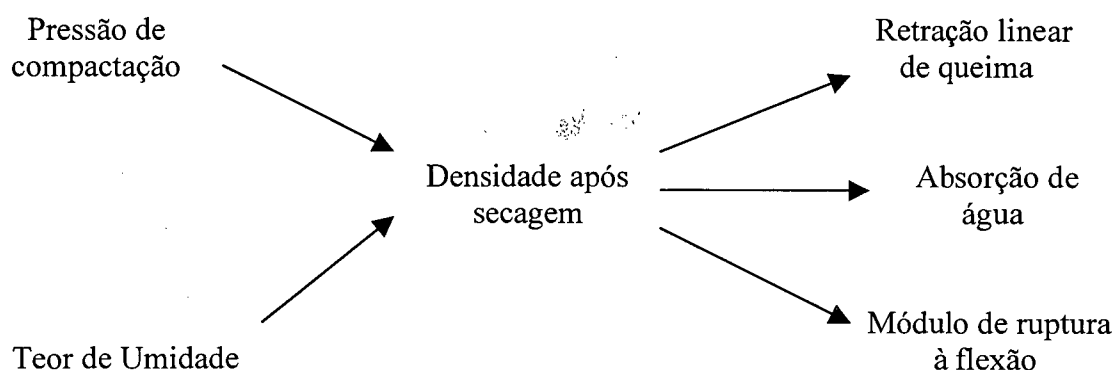


FIGURA 2.8 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA INTER-RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PROCESSO, A DENSIDADE DA PEÇA SECA E AS CARACTERÍSTICAS DA PEÇA QUEIMADA (PAULA et al., 1997, p. 31).

2.3.5 Sinterização

Segundo THÜMMLER e OBERACKER (1993, p.181), a sinterização pode ser entendida como “um transporte de matéria ativado termicamente em um aglomerado de pó ou um compacto poroso, diminuindo a superfície específica pelo crescimento dos contatos das partículas, retração do volume do poro e mudança da geometria do poro”. A sinterização pode ocorrer em presença ou não de fase líquida.

As composições de pavimentos cerâmicos incorporam óxidos alcalinos (fundentes) que conferem aos produtos baixa porosidade a temperaturas moderadas com ausência de deformação pirolástica. As composições utilizadas para elaborar o suporte de pavimento gresificado, apresentam um comportamento diferente durante a queima em função da densidade alcançada nas peças e de sua refratariedade.

Finalmente, na fase de resfriamento, o comportamento dos suportes vidrados está condicionado pela diferença dos coeficientes de expansão térmica linear entre o suporte e o vidrado. No caso dos suportes de queima branca, os coeficientes costumam ser ligeiramente inferiores aos de queima vermelha, o que se faz necessário o emprego de esmaltes que se adaptem adequadamente aos suportes com o objetivo de minimizar a obtenção de peças com uma curvatura excessiva (GARCIA et al., 1999, p.18-19).

Segundo MANFREDINI (2000, p.44),

“Nos materiais avançados a porosidade é quase sempre reduzida ao máximo ou levada a zero. Este é um dos motivos pelo qual as propriedades de utilização dos materiais avançados diferem muito daquela dos materiais tradicionais. Nestes últimos, ao invés, a porosidade controla propriedades como resistência à flexão, dureza, resistência a abrasão, resistência ao congelamento e portanto uma variável condicional”.

2.3.6 Resistência à flexão

O módulo de ruptura é uma característica intrínseca do material da peça cerâmica. A resistência da peça como um todo (em termos de carga de ruptura) não depende somente do módulo, pois também está relacionada à espessura da peça. Portanto, existe um módulo de ruptura do corpo (em MPa) e uma carga de ruptura da peça (em kg). Quanto maior for a absorção de água, menor será o módulo de ruptura do produto (norma ISO 13006-3 – Especificações), conforme mostra a tabela 2.3.

TABELA 2.3 – MÓDULO DE RUPTURA À FLEXÃO (MRF) POR CLASSE DE ABSORÇÃO.

Grupos de absorção	MRF (MPa)	Uso recomendado	Tipo de produto
Ia	35 - 51	Piso e parede	Porcelanato
Ib	30 - 45	Piso e parede	Grés
IIa	22 - 35	Piso e parede	Semi-Grés
IIb	15 - 22	Parede	Poroso
III	menor que 20	Parede	Muito poroso

De uma maneira genérica, os materiais cerâmicos apresentam alto módulo de elasticidade, são frágeis e bastante duros. “A presença de fase vítrea e porosidade nas cerâmicas tradicionais reduz consideravelmente a resistência mecânica. Por exemplo, a resistência mecânica da alumina contendo 25% em volume de poros é cerca de um terço da resistência mecânica da mesma alumina contendo 5% de porosidade” (PADILHA, 1997, p.259-60).

De acordo com FERNANDES (2001, p.7-8), no processo de fabricação por monoqueima gres, a massa e o esmalte são queimados de uma só vez, a temperaturas próximas de 1180°C, proporcionando um produto de boa aderência, entre massa e esmalte, alta resistência mecânica (> 30 MPa), boa estabilidade dimensional e menor custo de produção e baixa absorção d’água (de 0,5% até 3%); no processo de monoqueima semi-gres a única diferenciação faz-se na absorção d’água que fica entre 3

e 6%. Já no processo de monoqueima porosa, também conhecida por monoporosa, o processo também é semelhante aos anteriores, porém, o produto gerado possui uma resistência mecânica comparativamente menor (> 15 MPa) e uma absorção d'água superior a 10%. Ainda sobre este último, OLIVEIRA e ALARCON (1999, p.30) atribuíram às características de máxima estabilidade dimensional durante a queima, com valores de retração praticamente nulos (inferiores a 1%), porosidade compreendida entre 3% e 18% (expressa como absorção de água), e valores do módulo de ruptura do produto queimado entre 20 e 25 MPa.

2.3.7 Absorção de água e retração linear

Na queima de produtos cerâmicos, preparados com matérias-primas argilosas, é importante conhecer o intervalo de queima e decidir a margem de temperatura em que a retração linear e a absorção de água da peça não variam excessivamente. Este intervalo depende das características da massa e deve ser o mais amplo possível. Caso contrário, pequenas variações da temperatura de queima podem produzir deformações da peça ou uma queima insuficiente da mesma e com valores de porosidade e resistência mecânica do produto acabado não desejados.

Assim, os diagramas de *retração linear - absorção de água - temperatura de queima* são utilizados para estudar o comportamento das matérias-primas durante a queima e podem ser de grande ajuda para a formulação de massas destinadas a produção de revestimentos cerâmicos.

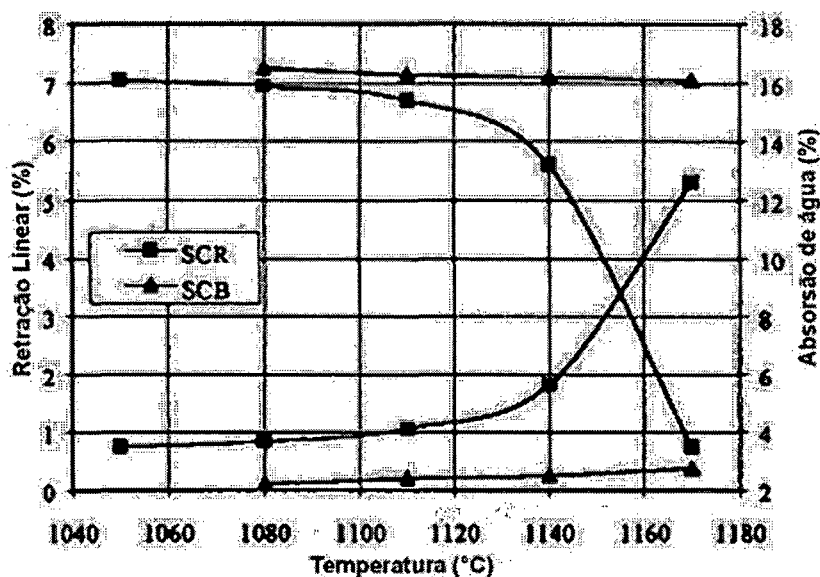


FIGURA 2.9 – DIAGRAMA DE RETRAÇÃO LINEAR E ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA SUPORTES DE QUEIMA VERMELHA (SCR) E QUEIMA BRANCA (SCB) (GARCIA et al., 1999, P.19).

Na figura 2.9 apresenta-se o diagrama de retração linear e absorção de água em função da temperatura de queima para peças conformadas, a partir de uma composição de queima vermelha (SCR), e outra de queima branca (SCB). Pode-se observar que as

variações nessas duas propriedades (retração linear e absorção de água) experimentadas pelas peças de queima branca são inferiores às de queima vermelha, resultando em menores influências do ciclo de queima no tamanho das peças. Isto se deve a maior refratariedade dos minerais argilosos presentes na massa de queima branca (de origem caulínica, principalmente) em relação aos de queima vermelha (ilíticas).

A absorção de água de um material cerâmico queimado é um parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. Se define como o ganho em peso, expresso em porcentagem, que as peças apresentam quando introduzidas em água em ebulição durante um período de tempo determinado. Por outro lado, o comportamento do material durante a queima também é avaliado mediante a variação de sua retração linear com a temperatura.

2.4 REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS INDUSTRIAIS CERÂMICOS

Convém recordar que a fabricação de produtos pela utilização parcial ou total de rejeitos é uma prática comum em países como os Estados Unidos, Itália, Japão e Alemanha entre outros. Na Itália, os rejeitos das indústrias cerâmicas já são totalmente reaproveitados. Dentro desta linha, recentemente nos EUA foi instalada uma usina de processamento para o aproveitamento de rejeito da construção civil, dos quais fazem parte os materiais cerâmicos. Além disso, fabricar produtos a partir de rejeitos é uma vantagem que coloca o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado devido a questão econômica envolvida e a oportunidade de veiculação deste princípio como marketing, principalmente no aspecto ecológico. Portanto, baseado neste panorama, toda pesquisa realizada no sentido de viabilizar a transformação e o reaproveitamento dos resíduos cerâmicos para o Estado de Santa Catarina, pode ser considerada entre as prioridades.

SILVA e BELO (1996, p.335) verificaram o comportamento de um resíduo sólido orgânico adicionado em diferentes proporções em misturas a uma argila plástica. Foram realizados ensaios tecnológicos na argila pura e nas misturas visando prever um possível uso em tijolos e blocos cerâmicos.

Em seu trabalho, RIPOLI (1997, p.133) pesquisou a fabricação de elementos cerâmicos através da utilização de chamote adicionado à argila. Descreveu as principais características físicas e mecânicas, como retração linear de queima, absorção de água, porosidade, densidade aparente e sucção inicial. Verificou que a adição de chamote à argila permite o aproveitamento deste tipo de resíduo na fabricação de produtos de boa qualidade e contribui para reduzir a poluição ambiental.

ALVES e BALDO (1998, p.34) formularam algumas composições onde um resíduo argiloso (subproduto da extração de areia) participava como coadjuvante, substituindo quantidade apreciável da parte argilosa normalmente utilizada em uma composição típica de revestimento cerâmico produzido por monoqueima rápida.

DONDE et al. (1998, p.17) estudaram a incorporação de resíduos de vários tipos nas massas para fabricação de tijolos, já que estas são de natureza altamente heterogênea

obtendo, pelo menos, duas vantagens de tipo ambiental: a reciclagem e a inertização dos resíduos freqüentemente poluentes e de difícil eliminação e a economia de matérias-primas argilosas.

Um estudo do aproveitamento de resíduos oriundos do beneficiamento de granitos em massas para revestimentos cerâmicos foi realizado por SILVA (2000, p.56) e, posteriormente, foram formuladas composições cerâmicas com os resíduos.

ALVES e BALDO (1997, p.692) verificaram o potencial de utilização de um resíduo argiloso proveniente da extração de areia na construção de revestimentos cerâmicos; utilizando cinco diferentes composições na confecção dos corpos de prova. Constataram que o material apresenta um bom potencial para aplicação objetivada.

O trabalho de ORTIZ et al. (1997, p.721) visa a eliminação ou ainda a minimização da produção de resíduos nos diversos processos produtivos. Alguns testes de obtenção de corpos de prova foram feitos adicionando ao resíduo (constituído predominantemente de magnetita) uma mistura argilosa proveniente da mesma região que a unidade siderúrgica. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão.

SANTOS e SILVA (1997, p.825) descreveram as metodologias empregadas para a caracterização do resíduo cerâmico (material sólido separado na estação de tratamento de efluentes por filtro prensagem), os testes industriais, os resultados obtidos e as conclusões quanto à viabilidade do aproveitamento deste material.

GURJÃO et al. (1995, p.160), visando um melhor reconhecimento do uso de plástico como agregado leve, procuraram desenvolver um trabalho partindo-se da premissa de que novas e econômicas técnicas deverão surgir. O trabalho tem como objetivo utilizar rejeitos plásticos na produção de tijolos para se obter uma diminuição do peso e, conseqüentemente, redução de custo nas obras, além de reciclar um dos maiores poluentes do meio ambiente.

O trabalho de VICENZI e BERGMAN (1999) tem como objetivo introduzir um resíduo industrial de uma siderurgia (escória de aciaria), em diferentes quantidades e granulometrias a uma massa para piso cerâmico, visando a melhora na formulação final, quanto às propriedades físicas e mecânicas, e a reciclagem de um subproduto da siderurgia. Os pisos resultantes deste estudo mostram que a utilização deste resíduo em uma massa para piso cerâmico diminuiu a porosidade aparente e a absorção de água, enquanto que aumenta a resistência mecânica e a retração linear, até um limite de temperatura de sinterização, onde então a relação entre as propriedades se inverte.

ROSA et al. (1999), estudaram a viabilidade de utilizar diversas matérias-primas na produção de um material cerâmico de elevada densidade, com base em resíduos industriais. Utilizaram diferentes técnicas para definir a composição química e mineralógica e o comportamento de queima de resíduos de mineração (granito, basalto e argila) e resíduos de esmaltação.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

3.1.1 Chamote

Foram separados 20 kg de chamote de pavimento cerâmico semi-gresificado, suficiente para realizar os testes propostos em escala laboratorial. O chamote foi amostrado do box de armazenamento da empresa.

3.1.2 Matérias-primas cerâmicas

Para a realização do trabalho, foram utilizadas as mesmas matérias-primas empregadas na formulação da massa cerâmica, em uma indústria de revestimentos e pavimentos da região sul do estado de Santa Catarina, que utiliza moagem a úmido e processo de monoqueima. Entre estas matérias-primas estavam três argilas, dois argilitos e um talco, além do biscoito cru. Estas matérias-primas foram amostradas dos boxes de armazenamento da empresa na forma que são usadas nos processos industriais. A quantidade de material coletado seguiu os métodos de quarteamento descritos por SANTOS (1989, p.157-67), sendo obtido aproximadamente 30 kg de amostra para cada matéria-prima.

3.1.3 Massas cerâmicas

Foram obtidas a partir da formulação de uma massa para pavimento cerâmico semi-gresificado (absorção de água entre 3,0 e 6,0%), utilizada industrialmente na Unidade Fabril 6 (Portinari) da empresa Cecrisa Revestimentos Cerâmicos. Esta massa, neste trabalho denominada padrão, foi composta pelas matérias-primas descritas anteriormente. À formulação padrão (STD) foram acrescentados diferentes quantidades de chamote moído do produto semi-gresificado, conforme mostra a tabela 3.1.

TABELA 3.1 – MASSAS CERÂMICAS FÓRMULADAS.

MATERIAS- PRIMAS	FORMULAÇÕES					
	STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
Argilito A	31,6	31,3	30,7	30,0	28,4	22,1
Argilito B	19,2	19,0	18,6	18,2	17,3	13,4
Argila 1	19,2	19,0	18,6	18,2	17,3	13,4
Argila 2	7,6	7,5	7,4	7,2	6,8	5,3
Argila 3	12,6	12,5	12,2	12,0	11,3	8,8
Talco	5,8	5,7	5,6	5,5	5,2	4,1
Biscoito cru	4,0	4,0	3,9	3,8	3,6	2,8
Chamote	0,0	1,0	3,0	5,0	10,0	30,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Onde: STD: formulação padrão;

F1P: formulação padrão com adição de 1% de chamote;

F3P: formulação padrão com adição de 3% de chamote;

F5P: formulação padrão com adição de 5% de chamote;

F10P: formulação padrão com adição de 10% de chamote;

F30P: formulação padrão com adição de 30% de chamote.

3.2 Metodologia

O estudo foi realizado de acordo com a metodologia descrita nas figuras 3.1, 3.3 e 3.4. Primeiramente preparou-se o chamote de pavimento cerâmico semi-gresificado (figura 3.1) e as matérias-primas que compõem a formulação da massa cerâmica padrão (STD), cuja metodologia está mostrada na figura 3.3. Estes componentes, chamote e matérias-primas, foram combinados para obter-se as diversas formulações estudadas, conforme tabela 3.1. As formulações geradas foram processadas conforme fluxograma mostrado na figura 3.4, seguindo os procedimentos descritos no Manual de Sistema da Qualidade – SENAI/CTC (2001, p.17-9), que são orientados pelas normas ISO e NBR.

3.2.1 Chamote

O chamote de pavimento semi-gresificado foi preparado, em escala laboratorial, com auxílio de um britador de martelos que efetuou uma pré-moagem, reduzindo as peças a tamanhos inferiores a 5 mm, possibilitando assim, sua moagem em moinho de bolas. Esta moagem foi realizada, a seco, em moinhos com capacidade de 5 litros. Deste processo, apresentado na figura 3.1, obteve-se um pó passante em malha 35 mesh (425 µm, que foi submetido a análise química e ao ensaio de distribuição de tamanho de partículas (DTP).

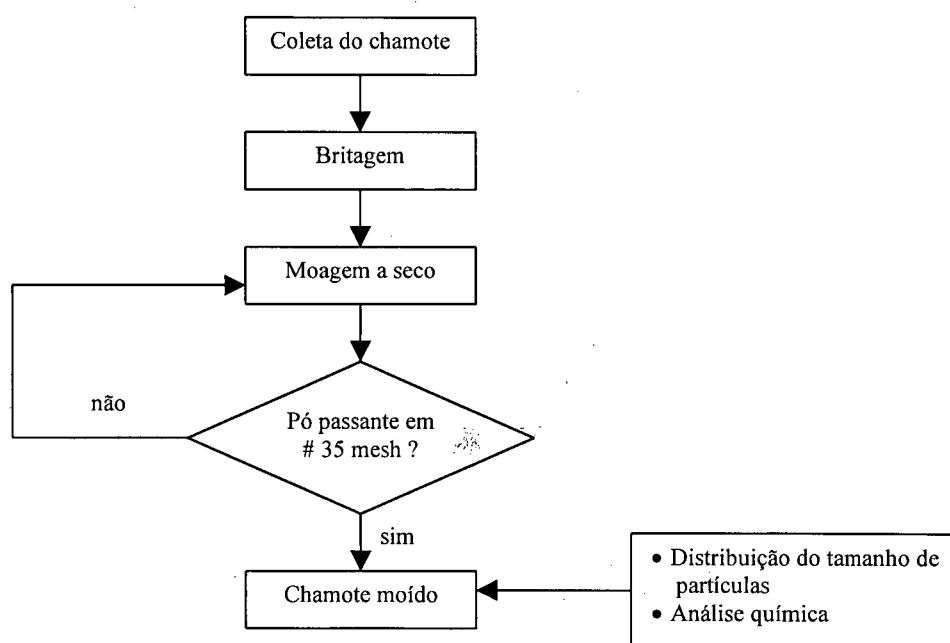


FIGURA 3.1- FLUXOGRAMA DE OBTENÇÃO DE CHAMOTE MOÍDO.

A escolha desta distribuição de tamanho de partículas baseou-se nas especificações dos equipamentos que estão sendo adquiridos para moer este chamote, em escala industrial. São eles: um britador de impacto (Hazemag APS-0604B), e um moinho de martelos (Hazemag Novorotor 650/500 II), ambos pertencentes a uma planta piloto de reciclagem mostrada na figura 3.2.

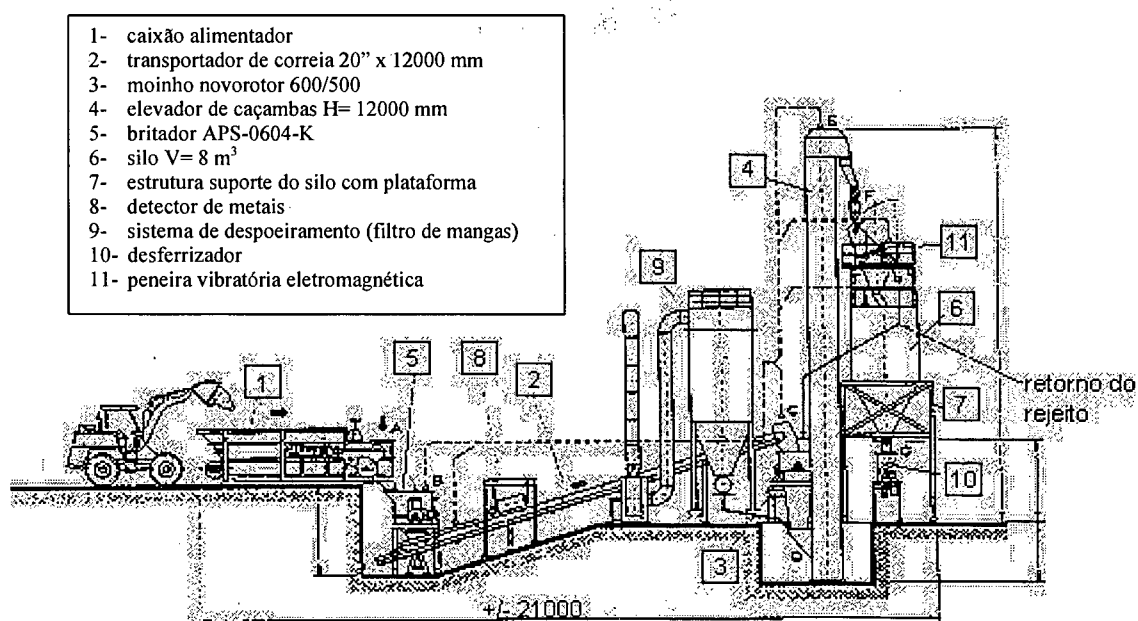


FIGURA 3.2- PLANTA PILOTO DE RECICLAGEM (ICON, 2000).

3.2.2 Preparação das matérias-primas

As matérias-primas que compõem a formulação de massa analisada, foram secas em estufa a 110°C ($\pm 10^\circ\text{C}$) e desagregadas manualmente, com o auxílio de um almofariz, até atingir uma granulometria inferior a 2,8 mm (7 mesh), como mostra a figura 3.3. Este procedimento aumenta a homogeneidade não só da matéria-prima amostrada, como também da suspensão resultante, pois evita a ocorrência de excessivas sobras residuais do material mais duro na etapa de moagem.

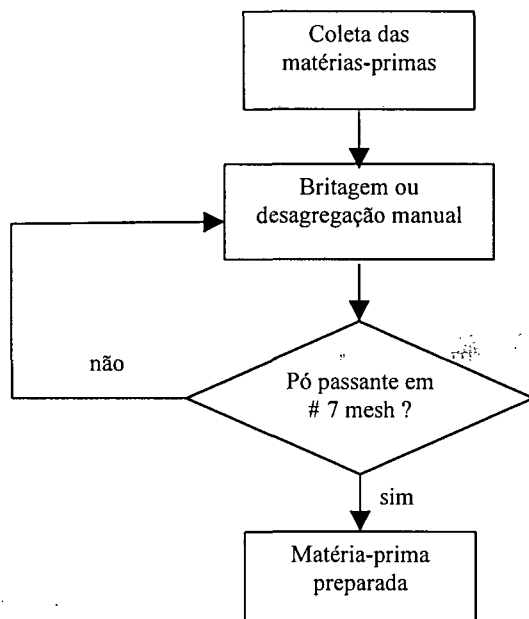


FIGURA 3.3- FLUXOGRAMA DE PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.

3.2.3 Processamento das massas cerâmicas

Não se fez necessário um estudo individualizado das matérias-primas, pois não pretendia-se, neste trabalho, alterar a formulação e, sim, incorporar o chamote na mesma atualmente em uso na indústria.

Para a composição das massas cerâmicas, as matérias-primas foram pesadas de acordo com a formulação padrão, a qual contempla em sua composição três argilas distintas, dois argilitos, um feldspato e um caulim, além do biscoito cru. A formulação padrão é a mesma utilizada em uma empresa de revestimentos cerâmicos e sobre esta foram acrescentadas 1%, 3%, 5%, 10% e 30% de chamote moído, passante em malha 35 mesh (425 μm). As 6 formulações geradas foram codificadas como: STD, F1P, F3P, F5P, F10P e F30P, respectivamente, conforme mostrado anteriormente na figura 3.1. A seguir, as mesmas foram moídas à úmido, separadamente, em moinhos de bolas com volume de 5 litros por um período de 40 minutos, obtendo-se um resíduo de moagem entre 5,8% e 6,8% em malha 325 mesh (45 μm), densidade líquida entre 1,66 g/cm^3 e 1,69 g/cm^3 , e tempo de escoamento entre 25 e 35 segundos no Copo Ford nº 4. Foram realizadas 3 moagens (A, B e C) para cada formulação, contendo 1 kg de massa seca,

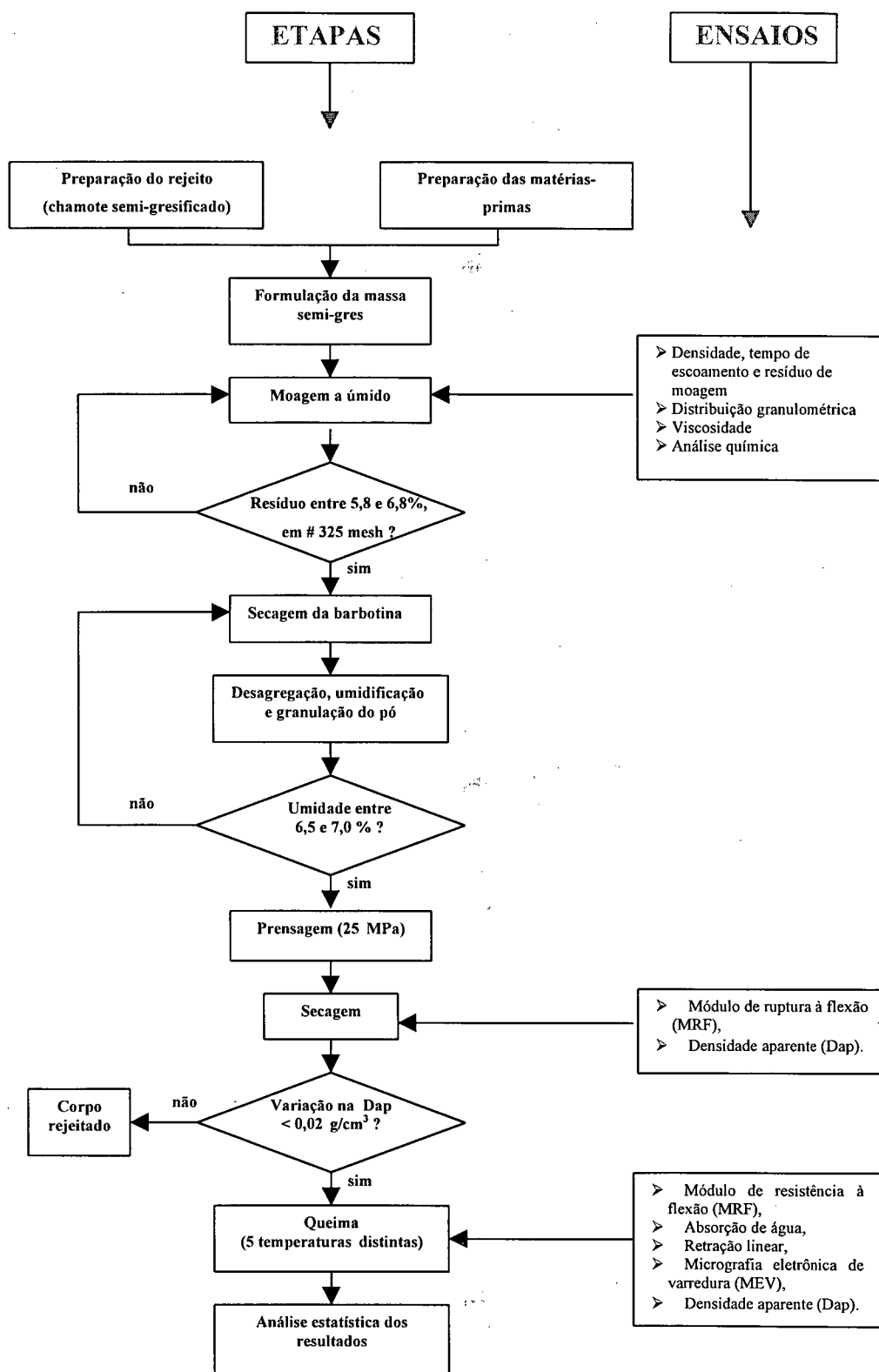


FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO CERÂMICO.

quantidade esta suficiente para gerar 30 corpos de prova. A seguir, a suspensão cerâmica denominada barbotina, resultante da moagem, foi seca em estufa por 24 horas a uma temperatura de 110°C ($\pm 10^\circ\text{C}$), umidificada com 7% ($\pm 0,3\%$) de água em peso e granulada em malha 16 mesh (1 mm) para facilitar a prensagem (ver figura 3.4).

As peças foram compactadas em prensa hidráulica laboratorial (modelo Gabrielli 24/110A), onde foi estabelecida uma pressão de compactação uniforme de 25 MPa ($\pm 0,3$ MPa) para todos os corpos de prova, sendo usado como critério de aceitação uma variação de até 0,02 g/cm³ na densidade aparente (Dap) do corpo prensado, em relação a média da mesma formulação. Os corpos de prova que apresentaram variação maior, foram descartados.

A queima foi realizada em forno mufla de ciclo lento (modelo Schaly LAB 44) em 5 temperaturas distintas (1000, 1050, 1100, 1150 e 1200°C) com taxa de aquecimento de 10°C/minuto até 1000°C e 5°C/minuto acima de 1000°C (10 minutos de patamar na temperatura máxima).

3.2.4 Determinação de propriedades

As propriedades consideradas importantes para medir a influência da adição de chamote na massa cerâmica utilizada neste trabalho são apresentadas na figura 3.4. Para os ensaios de densidade e tempo de escoamento realizados na barbotina cerâmica, utilizou-se um picnômetro de 100 ml e um copo Ford nº 4, respectivamente. O rejeito de moagem foi determinado em peneira malha 325 mesh (45 μm). Também foram coletadas amostras de cada moagem e submetidas ao analisador de tamanhos de partículas a laser (Cilas 1020) para determinação da distribuição de tamanhos de partículas, ao viscosímetro (modelo Bohlin 88 BV) para a determinação da curva de escoamento e ao espectrômetro seqüencial de onda (modelo Phillips PW2400) para determinação da análise química por fluorescência de raios-x. Os corpos de prova secos foram submetidos a ensaios de resistência à flexão (MRF) e densidade aparente por empuxo de mercúrio (Dap), e os corpos de prova queimados a ensaios de resistência à flexão (MRF), absorção de água (AA), retração linear (RL), densidade aparente por empuxo de mercúrio (Dap) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.5 Análise estatística dos resultados

A análise estatística para os métodos de determinação de densidade aparente (seco e queimada), retração linear, absorção de água e resistência à flexão (seco e queimado) tomou como critério determinar a dispersão dos mesmos, de modo que foi realizado uma série de 12 (doze) medidas para cada propriedade física e condição determinada.

Como medida da dispersão foi adotado o desvio padrão (S) e o coeficiente de variação (Cv) dos valores experimentais obtidos. Estes parâmetros podem ser expressos pelas seguintes equações (SPIEGEL, 1993, p.107-9):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X)^2}{n}}$$

Onde: X_i = valor experimental obtido;
 X = média dos valores obtidos;
 n = número de dados experimentais.

$$Cv = (S / X) \cdot 100$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas as propriedades físicas e químicas de uma massa cerâmica para fabricação de pavimentos semi-gresificados. As massas foram obtidas por meio de adições de chamote moído à massa padrão (STD), cuja formulação é idêntica a da massa industrial.

Foram adicionados 1%, 3%, 5%, 10% e 30% em peso de chamote à formulação STD, sendo que as formulações receberam os códigos F1P, F3P, F5P, F10P e F30P, respectivamente. O chamote foi caracterizado com respeito a análise química e distribuição de tamanhos de partículas (DTP). As características físicas e químicas das suspensões cerâmicas, geradas a partir das formulações apresentadas anteriormente, estão representadas pela distribuição do tamanhos de partículas (DTP), viscosidade e composição química. Os corpos compactados obtidos destas suspensões foram caracterizados com respeito a resistência à flexão (MRF) e densidade aparente por empuxo de mercúrio (Dap). Já no produto queimado, além do MRF e da Dap, foram feitos ensaios de absorção de água (AA), retração linear (RL) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.2 Caracterização do chamote

Para verificar a influência da adição do chamote na composição química da massa, foram realizadas análises de duas amostras distintas: a primeira de um pó cerâmico, possuindo a mesma composição de matérias-primas da massa utilizada industrialmente, denominado *STD*; e a segunda do *chamote* homogeneizado e moído que foi utilizado posteriormente nas formulações de massa em estudo.

A tabela 4.1 mostra o resultado da análise química por fluorescência de raios-x da amostra STD e do chamote. Se desconsiderarmos a perda ao fogo, já que uma amostra está sinterizada e a outra não, podemos observar que, por tratar-se de materiais compostos pelas mesmas matérias-primas, os resultados obtidos expressam uma semelhança entre si previsível, podendo suas diferenças serem atribuídas às variações aceitáveis inerentes às matérias-primas e ao processo de fabricação.

TABELA 4.1- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DUAS AMOSTRAS DE PAVIMENTO CERÂMICO SEMI-GRESIFICADO, DESCONSIDERANDO A PERDA AO FOGO.

COMPOSTOS	STD % em massa	CHAMOTE % em massa
SiO ₂	71,6	69,8
Al ₂ O ₃	17,2	17,3
Fe ₂ O ₃	3,5	3,4
CaO	0,6	0,7
Na ₂ O	0,8	1,1
K ₂ O	3,0	3,3
MnO	0,0	0,0
TiO ₂	0,3	0,7
MgO	2,5	2,4
P ₂ O ₅	0,1	0,1
ZnO	0,2	0,5
ZrO ₂	0,1	0,7

Um outro fator que poderia provocar variações de composição química entre as duas amostras é a camada vítrea presente no chamote. Embora esta camada vítrea contenha, basicamente, os mesmos óxidos presentes na massa cerâmica, suas quantidades relativas são significativamente diferentes daquelas contidas nas massas cerâmicas. No entanto, a espessura desta camada vítrea é muito pequena em relação a espessura da massa (na ordem de 20 a 30 vezes menor), não interferindo significativamente na composição desta última. Foi realizado um acompanhamento da composição química nas massas formuladas, com o intuito de se observar a influência da camada vítrea na composição final das formulações, e os resultados mostraram que esta influência não foi significativa, conforme será discutido no item 4.3.

Na figura 4.1, pode ser vista a distribuição de tamanhos de partículas da suspensão STD após moagem a úmido. Já na figura 4.2, mostra-se a DTP do chamote moído antes de ser incorporado a formulação. Ao comparar estas duas figuras, observa-se que o chamote apresenta um tamanho médio de partículas mais elevado, quando comparada com a massa STD. Enquanto na massa STD o tamanho das partículas está abaixo de 93 µm, no chamote moído este tamanho chega a 500 µm. Portanto, este último deve ser adicionado ao processo de fabricação na etapa de moagem, juntamente com as matérias-primas, para que seu tamanho de partículas seja reduzido a dimensões compatíveis com os da massa atual e aumentar o grau de homogeneização dos componentes na mistura.

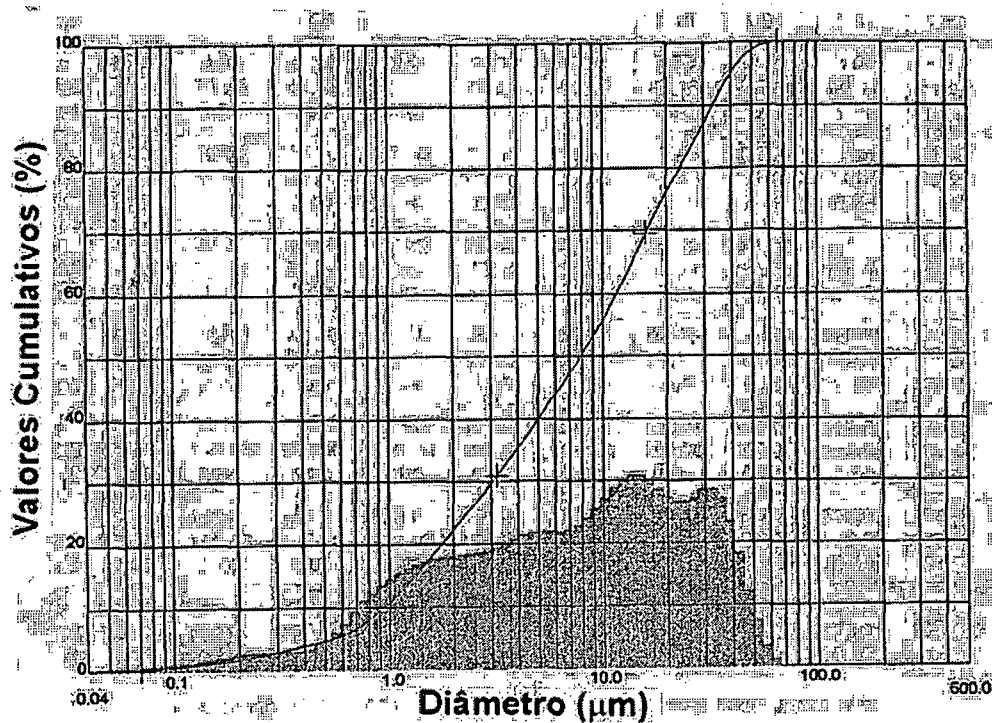


FIGURA 4.1- DTP DA MASSA STD MOÍDA A ÚMIDO EM MOINHO DE BOLAS.

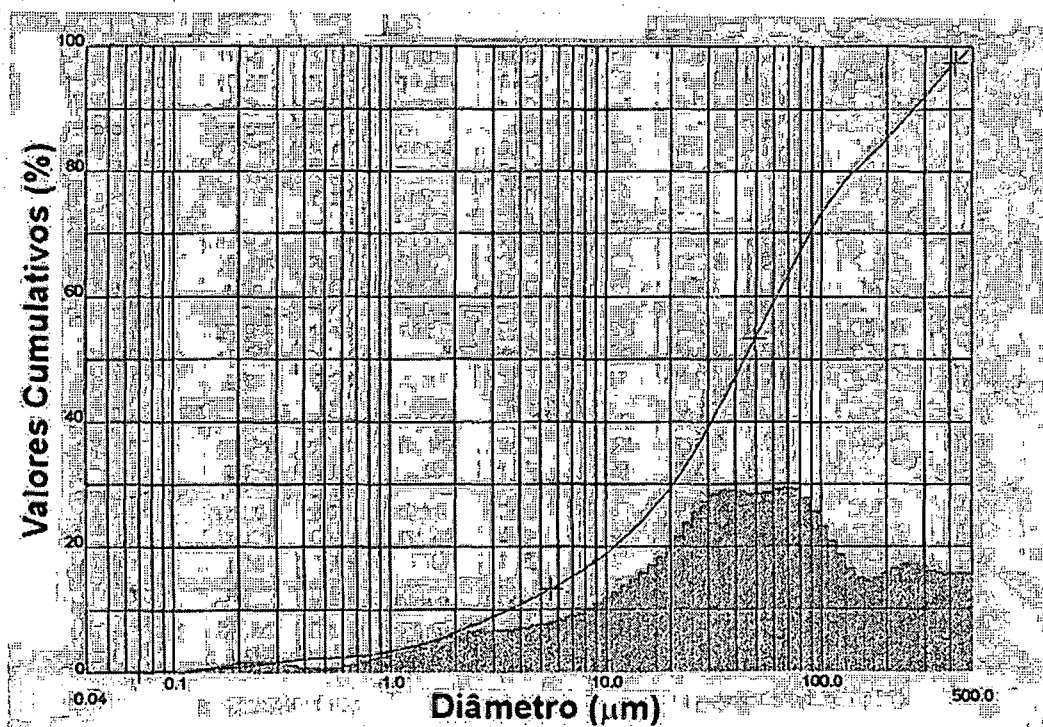


FIGURA 4.2 – DTP DO CHAMOTE ,BRITADO E MOÍDO A SECO EM MOINHO DE BOLAS, UTILIZADO NA ADIÇÃO SOBRE A MASSA STD.

4.3 Caracterização das suspensões cerâmicas

As análises químicas das massas foram realizadas por fluorescência de raios-x (FRX) e são apresentadas na tabela 4.2.

TABELA 4.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS MASSAS CERÂMICAS FORMULADAS.

Compostos	STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P	Chamote
SiO ₂	72,0	72,0	72,0	71,8	71,9	71,8	70,5
Al ₂ O ₃	16,1	16,2	16,1	16,2	16,2	16,4	17,2
Fe ₂ O ₃	3,4	3,3	3,3	3,3	3,4	3,2	3,1
CaO	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	1,0
Na ₂ O	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0	1,2
K ₂ O	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TiO ₂	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
MgO	2,7	2,8	2,8	3,0	2,7	2,6	2,7
P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Perda ao Fogo	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Conforme já indicavam os resultados mostrados na tabela 4.1 e comprovados na tabela 4.2, a composição química da massa cerâmica não passa por alterações sensíveis em face da adição de chamote.

A medida da DTP das formulações estudadas foi realizada em granulômetro a laser e os resultados são apresentados na figura 4.3. Esta figura mostra que a DTP para as formulações STD, F3P, F10P e F30P não apresenta variações significativas entre as mesmas. O mesmo resultado foi observado para as formulações F1P e F5P. Isto foi conseguido em função do controle sobre o resíduo de moagem realizado. Apesar de que a formulação F30P exigiu um tempo de moagem superior às demais, o resíduo da suspensão final ficou dentro da faixa pré determinada (5,8 a 6,8%), e também as demais formulações.

A similaridade na DTP apresentada na figura 4.3 evidencia que o chamote moído foi bem incorporado na composição da massa, demonstrando que o processo de cominuição foi suficiente para tornar adequada a distribuição granulométrica do rejeito adicionado. Isto se deve ao fato dos materiais cerâmicos serem frágeis (VAN VLACK, 1984, p.326-7).

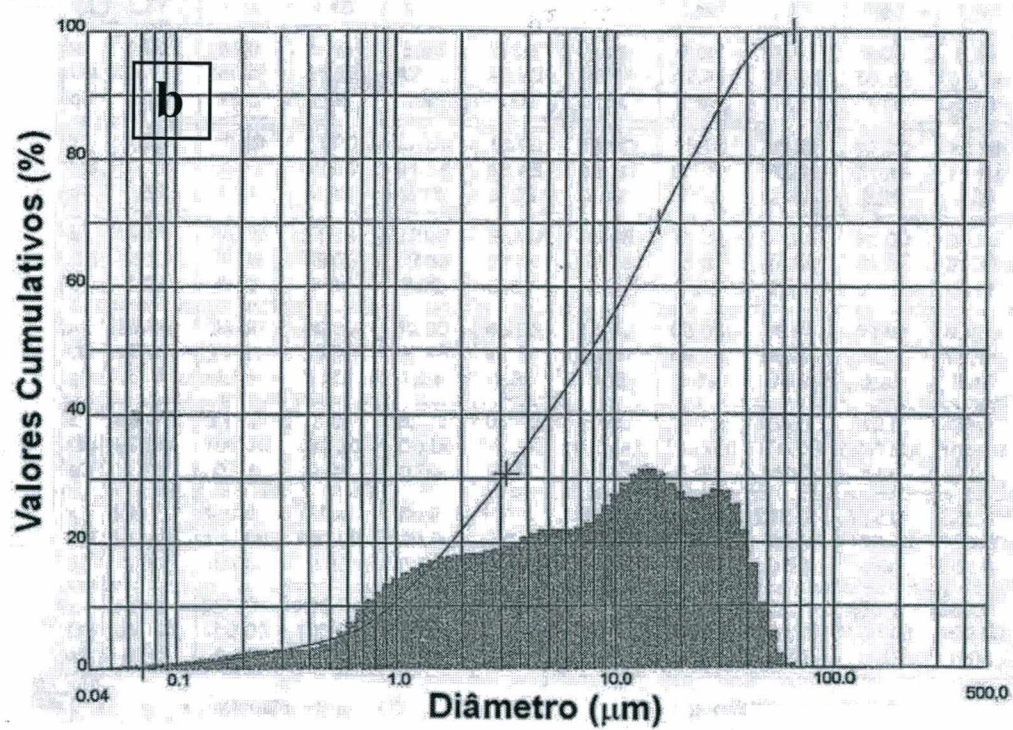
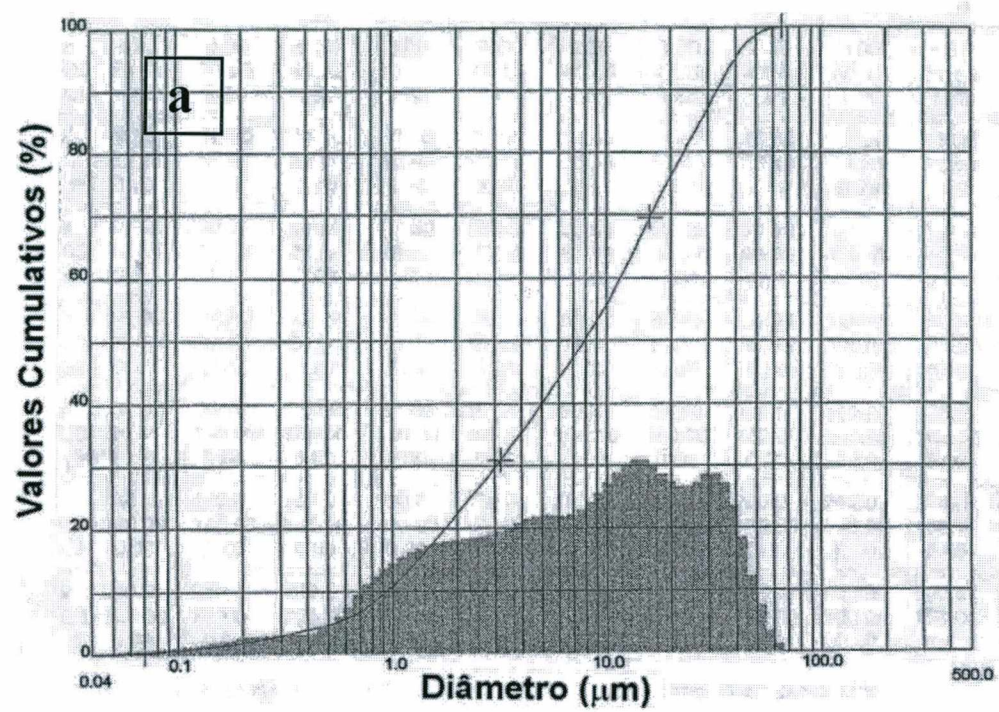


FIGURA 4.3A - DTP DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS: a) STD; b) F3P.

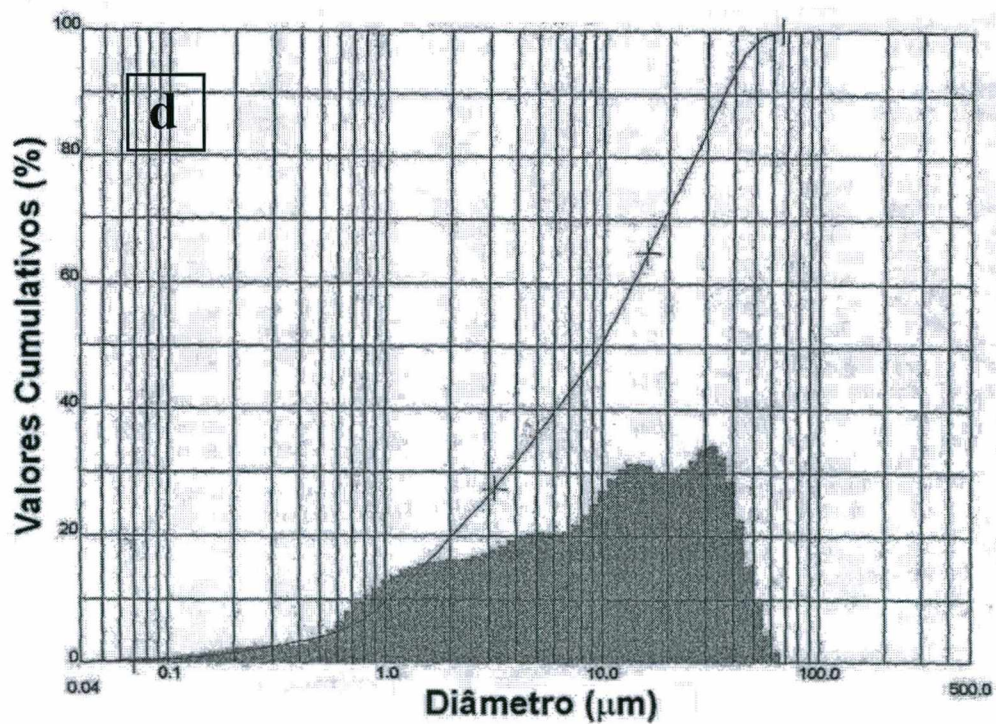
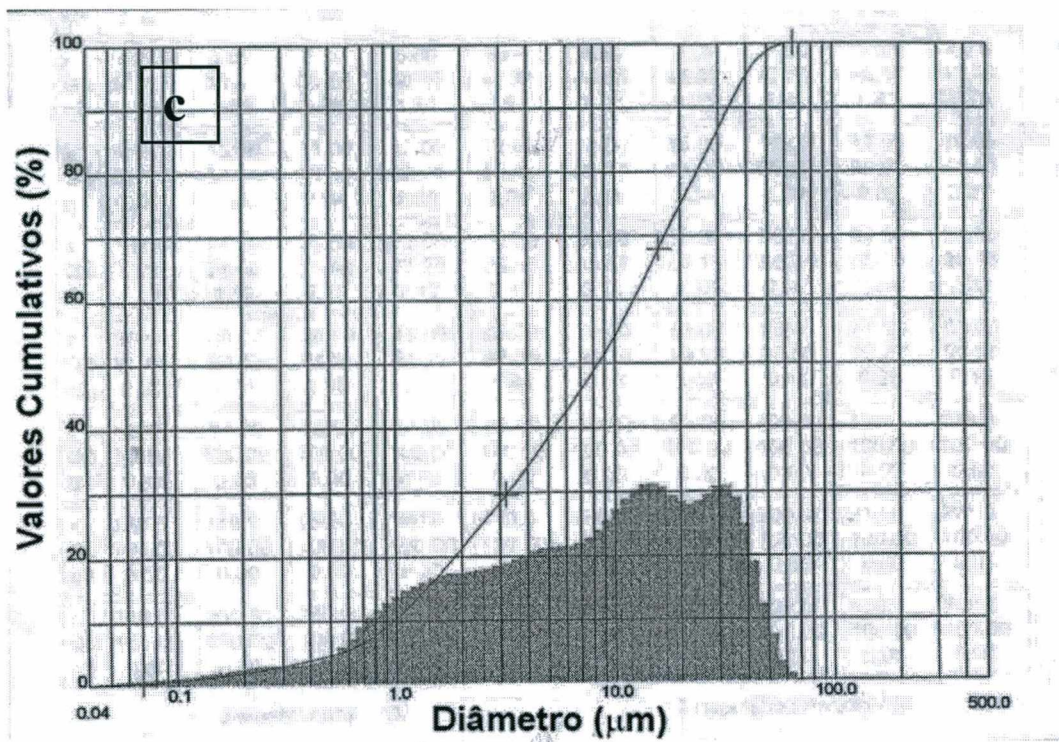


FIGURA 4.3B - DTP DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS: c) F10P; d) F30P.

A Dap, importante parâmetro de controle do processo de compactação, depende principalmente da composição do pó (quantidade relativa de água e material plástico), conforme apresentado no item 2.3.4. De acordo com o que foi apresentado no item 3.2, todas as formulações foram compactadas com a mesma umidade de 7% ($\pm 0,3\%$) e pressão de compactação de 25 MPa ($\pm 0,5$ MPa). Podemos considerar que a forma das partículas é aproximadamente a mesma para todas as formulações, já que o processo de moagem e secagem utilizado foi o mesmo para todas. Portanto, a Dap será função apenas do teor de material plástico, como será demonstrado mais adiante, já que a DTP é aproximadamente a mesma para todas as formulações estudadas, como mostrado na figura 4.3.

A adição de chamote à massa cerâmica de pavimento pode interferir no comportamento reológico da suspensão. Apesar de que não há uma relação direta entre este comportamento reológico e as propriedades finais do produto, a viscosidade, principal parâmetro de controle do comportamento reológico a nível operacional, pode ser alterada significativamente, modificando as características de escoamento da suspensão desde a descarga do moinho até seu bombeamento ao atomizador.

A figura 4.4 mostra o comportamento da viscosidade das suspensões das formulações estudadas. Nela pode ser verificado que os comportamentos são muito semelhantes, apresentando uma pequena queda na viscosidade da suspensão com o aumento do gradiente de velocidade. Este comportamento é denominado pseudoplástico e é característico de suspensões cerâmicas. Embora haja tendência a uma diminuição na viscosidade com o aumento no teor de chamote para um dado gradiente de velocidade, a viscosidade aumentou muito pouco (0,06 a 0,17 Pa.s) na faixa entre 100 e 1200 s^{-1} .

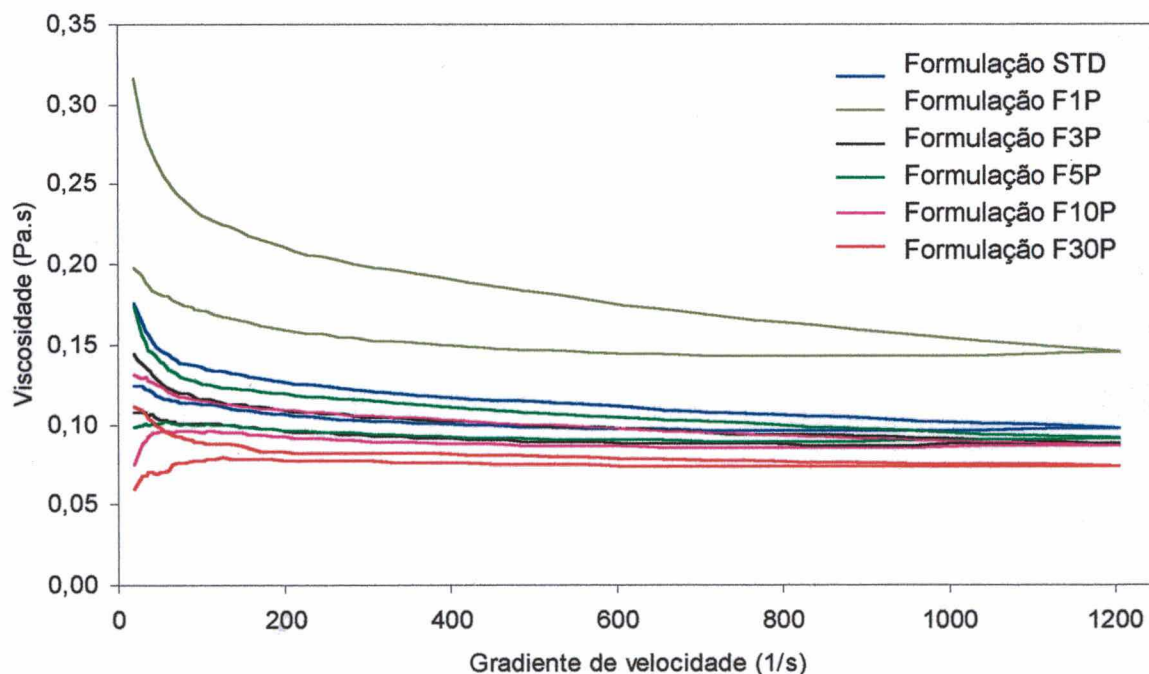


FIGURA 4.4 – COMPORTAMENTO DA VISCOSIDADE DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

A formulação F1P apresentou uma viscosidade superior às demais formulações, para um determinado gradiente de velocidade, porque o ensaio foi realizado com densidade superior, acarretando em um percentual de sólidos superior (65,3%), como pode ser observado na tabela 4.3 (moagem A).

Com isso, pode-se dizer que a adição de chamote não interfere significativamente na viscosidade das suspensões, desde que a densidade destas esteja dentro da faixa padrão de operação.

TABELA 4.3 - % DE SÓLIDOS DAS SUSPENSÕES DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

Dados	Formulações					
	STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
A	62,8	65,3	63,8	63,2	63,1	63,3
B	63,0	65,3	65,0	63,1	63,3	63,3
C	63,5	63,2	63,3	63,4	63,5	64,3
X	63,1	64,6	64,0	63,2	63,3	63,6
S	0,29	0,99	0,71	0,12	0,16	0,47
Cv	0,47	1,53	1,11	0,20	0,26	0,74

4.4 Caracterização do compactado

Na figura 4.5 apresenta-se os resultados dos ensaios de densidade aparente realizados nas distintas formulações estudadas.

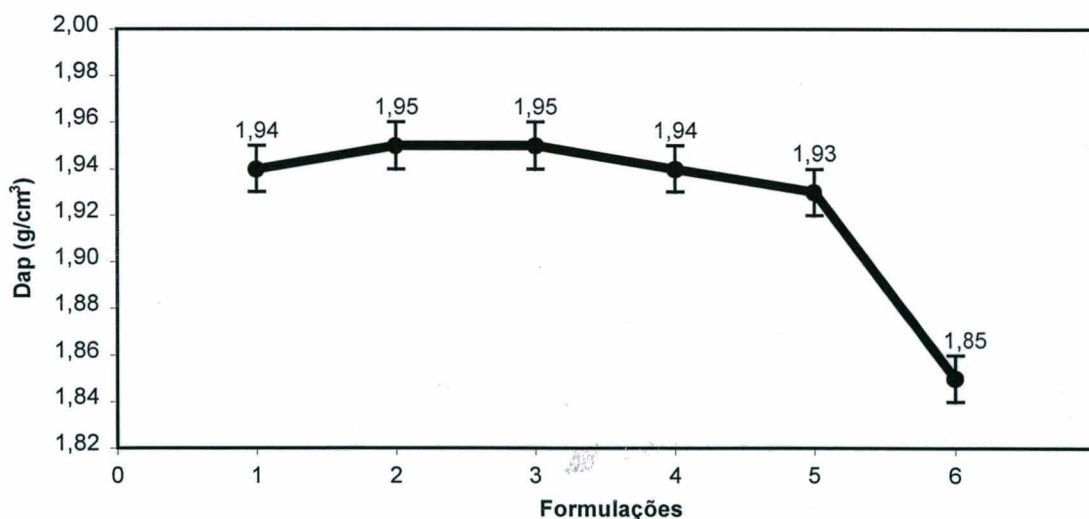


FIGURA 4.5 – DENSIDADE APARENTE DO COMPACTADO NAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

Sendo o chamote um material sinterizado e frágil, logo, isento de plasticidade, seria de se esperar que houvesse uma redução gradativa da Dap com a adição deste à formulação. No entanto, a figura 4.5 mostra que a adição de chamote à massa cerâmica para pavimento não é percebida no resultado de Dap em quantidades de até 10%.

Porém, esta redução fica evidenciada na formulação F30P, que influenciará fortemente as propriedades do produto final, tais como a absorção de água (AA) e o MRF.

Na etapa de compactação, foi fixada a variável pressão de compactação (25 MPa) e umidade 7% ($\pm 0,3\%$). Portanto, a Dap obtida em cada corpo de prova foi resultado direto da quantidade de chamote presente na formulação, conforme discutido no item 4.3, podendo-se afirmar que adições de chamote de até 10% não comprometeriam as propriedades finais do produto acabado.

A dispersão dos dados no ensaio de Dap do compactado, assim como em todos os outros ensaios realizados neste trabalho, não apresentaram tendência crescente com o aumento da quantidade de chamote a massa padrão, como pode ser visto nas tabelas em anexo. Desta forma, podemos dizer que o menor valor na Dap encontrado na formulação F30P em relação as demais, deve-se aos motivos discutidos anteriormente e não a uma possível e significativa dispersão dos dados. Esta constância na dispersão dos dados pode ser observada por meio do desvio padrão, para todos os ensaios realizados, nas distintas formulações estudadas.

O MRF do compactado seco é outra propriedade importante, sobretudo para massas cerâmicas fabricadas em processo de monoqueima, como é o caso das formulações em estudo. Neste tipo de processamento, a peça deve ter uma boa resistência à flexão para suportar os esforços mecânicos decorrentes da etapa de esmaltação.

O MRF do compactado das formulações estudadas foi investigado neste trabalho e os resultados são apresentados na figura 4.6.

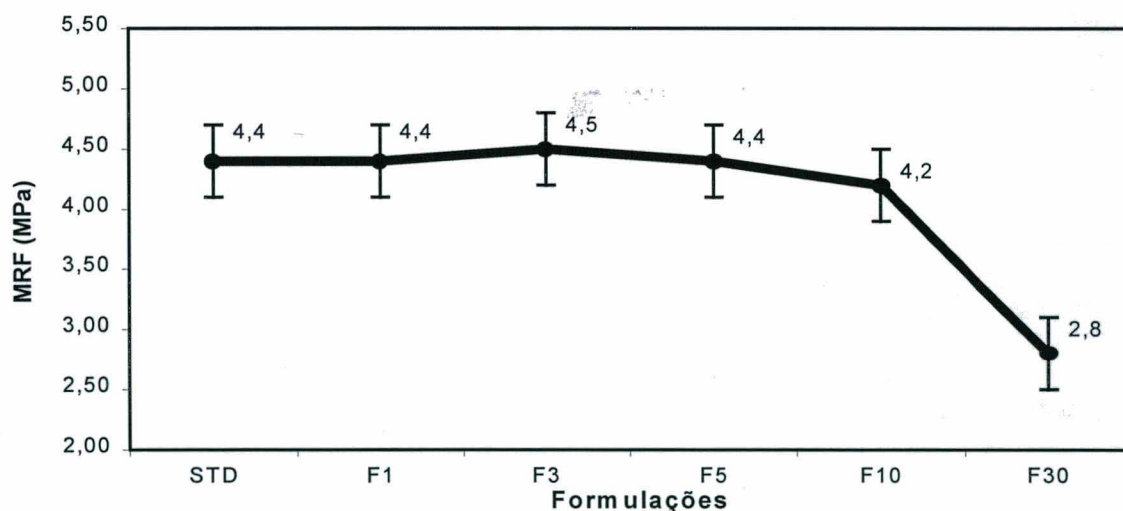


FIGURA 4.6 – MRF DO COMPACTADO NAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

A figura 4.6 mostra que o comportamento do MRF é similar ao da Dap, da qual sofre forte dependência. A adição de chamote em quantidades de até 10%, não interferiu de maneira significativa no MRF. Por outro lado, a adição de 30% de chamote à massa cerâmica de pavimento semi-gresificado provocou uma queda acentuada no MRF, como

um resultado, principalmente, da queda na Dap. As variações observadas no MRF das formulações estudadas com percentual de adição de chamote de até 10% devem-se ao fato de que a Dap dos corpos de prova não foi mantida dentro de uma faixa estreita de controle, como pode ser observado na tabela A.2 em Anexos.

4.5 Caracterização do produto final

O produto final foi caracterizado com respeito à densidade aparente (Dap), retração linear (RL), absorção de água (AA), resistência à flexão (MRF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Dap é um importante parâmetro de processo que influencia as propriedades do produto final sinterizado, porque está relacionada ao grau de sinterabilidade do material. A figura 4.7 apresenta os resultados de Dap das formulações estudadas sinterizadas em função da temperatura.

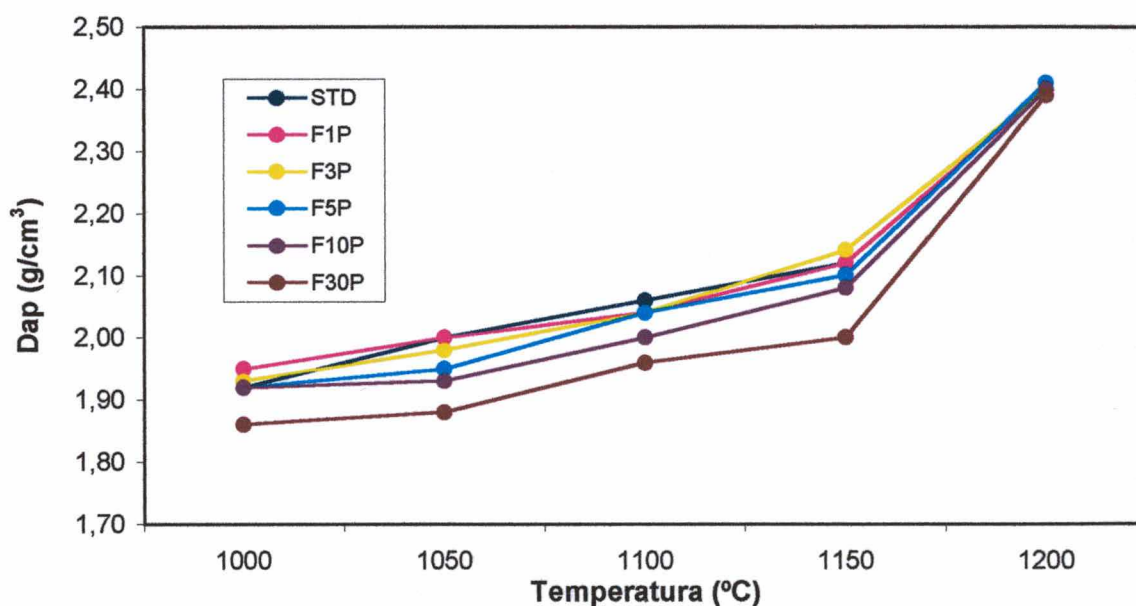


FIGURA 4.7 – Dap DO SINTERIZADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

Para todas as formulações, a Dap aumenta à medida que aumenta a temperatura. Esta densificação do material com o aumento da temperatura é decorrente do fenômeno de sinterização.

A variação na Dap do sinterizado segue a mesma tendência da Dap do compactado, mostrada na figura 4.5, ou seja, diminui a medida que aumenta a adição de chamote a massa padrão.

Todas as formulações estudadas apresentaram um forte aumento na Dap a 1200°C, como resultado do aumento no grau de sinterabilidade do material, evidenciado pela alta RL sofrida pelas formulações estudadas, conforme será apresentado a seguir. A formulação F30P apresentou uma taxa de densificação maior do que as demais formulações entre 1150°C e 1200°C, devido ao fato de apresentar uma menor Dap a 1150°C, mas apresentar o mesmo valor de Dap a 1200°C.

A RL é fundamental para a determinação das dimensões do produto final. A manutenção do valor da RL garante constância na obtenção de um produto classificado dentro de uma faixa estreita de tamanho, o que se reverte em redução no custo de produção. Portanto, é importante avaliar a influência da adição de chamote nesta propriedade.

A figura 4.8 apresenta os resultados da RL em função da temperatura de queima, para as formulações estudadas. Nela pode-se observar que a RL aumenta com o aumento da temperatura, como um resultado do aumento no grau de sinterabilidade da massa cerâmica.

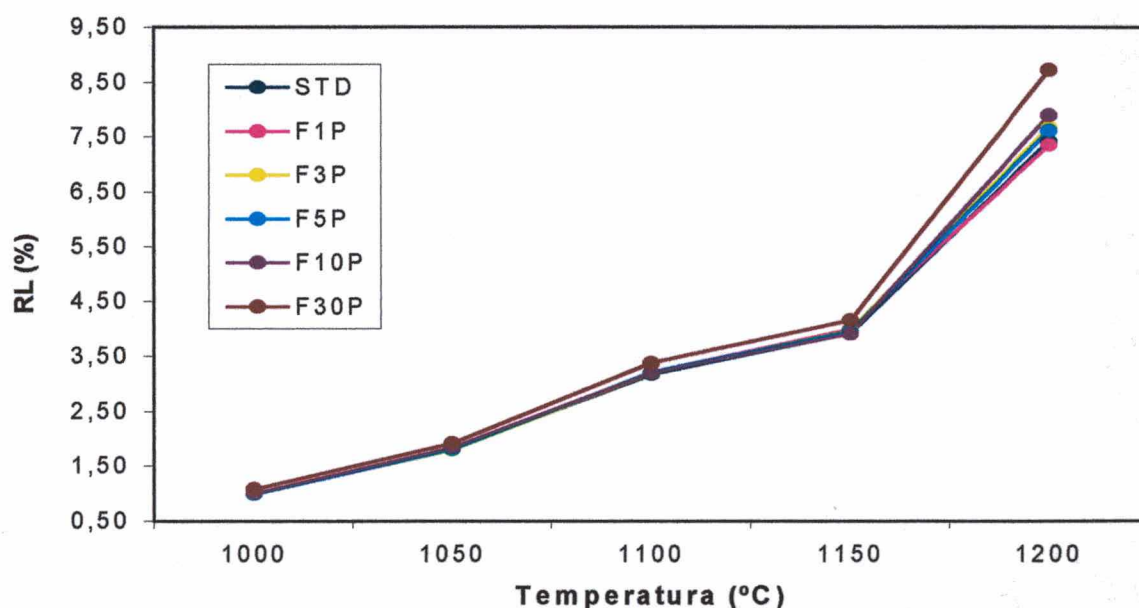


FIGURA 4.8 – RL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

Na figura 4.8 também pode-se observar que há um forte aumento na RL a 1200°C para todas as formulações estudadas. Isto pode ser explicado pelo fato de que nesta temperatura, deve estar ocorrendo a formação de uma grande quantidade de fase líquida, aumentando o grau de sinterabilidade do material. Este aumento expressivo no grau de sinterabilidade a 1200°C influenciará também outras propriedades no produto final, como será visto a seguir.

A absorção de água (AA) foi uma outra propriedade do produto final investigada neste trabalho. Ela está associada ao tipo de microestrutura formado no material sinterizado e seu controle representa uma forma prática de controlar a porosidade, que interferirá diretamente em outras propriedades do produto final. O efeito da AA em função da temperatura para as formulações estudadas é apresentado na figura 4.9.

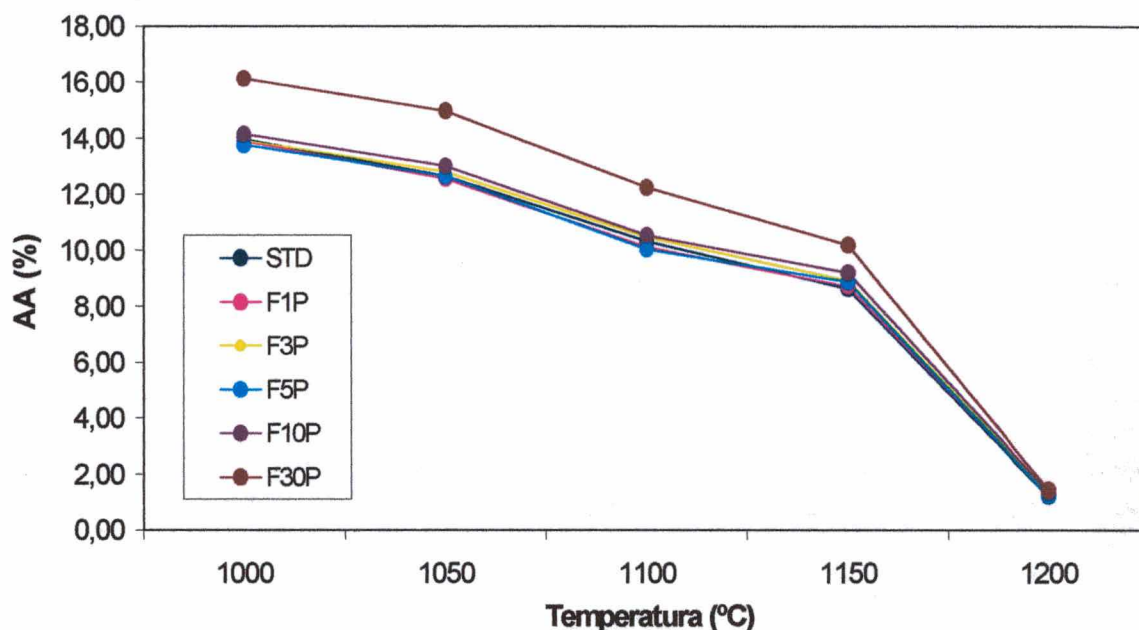


FIGURA 4.9 – AA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

Como era de se esperar, a AA para as formulações estudadas diminuiu com o aumento da temperatura por causa do aumento da RL, conforme apresentado na figura 4.8. O comportamento observado na redução da AA seguiu, aproximadamente, o comportamento observado no aumento na Dap. As formulações STD, F1P, F3P, F5P e F10P apresentaram, aproximadamente, os mesmos valores de AA com o aumento da temperatura, porque a Dap destas formulações durante a sinterização apresentou valores próximos entre si. O mesmo não pôde ser verificado com a formulação F30P. Nesta, o valor de AA encontrado foi maior em relação às demais formulações, explicado pela menor Dap durante a sinterização, representando um aumento na porosidade do material.

No intervalo de temperatura compreendido entre 1150 e 1200°C, no entanto, foi observado uma forte redução na AA para todas as formulações estudadas, como um resultado do aumento na densificação do material. Especificamente no caso da formulação F30P, a redução na AA foi consideravelmente maior, provocada por uma maior taxa de densificação em relação as demais formulações, como visto anteriormente. Esta elevada taxa de densificação a 1200°C compromete a utilização desta temperatura em escala industrial, já que o grau de sinterabilidade alcançado alterará as características finais do produto em relação a especificação do produto semi-

gresificado desejado. Para alcançar a absorção de água especificada deste produto (3 a 6%), é necessário, portanto, que a temperatura de queima esteja entre 1160 e 1180°C, para os ciclos de queima atualmente utilizados (entre 30 e 45 min).

Outra importante propriedade do produto final intimamente associada à AA é o módulo de ruptura à flexão (MRF). Sua importância está relacionada à aplicação do produto. Por exemplo, no caso de um pavimento cerâmico semi-gresificado, o valor aceitável do MRF deve estar compreendido entre 22 e 35 MPa. A figura 4.10 apresenta os resultados de MRF em função da temperatura para as formulações estudadas.

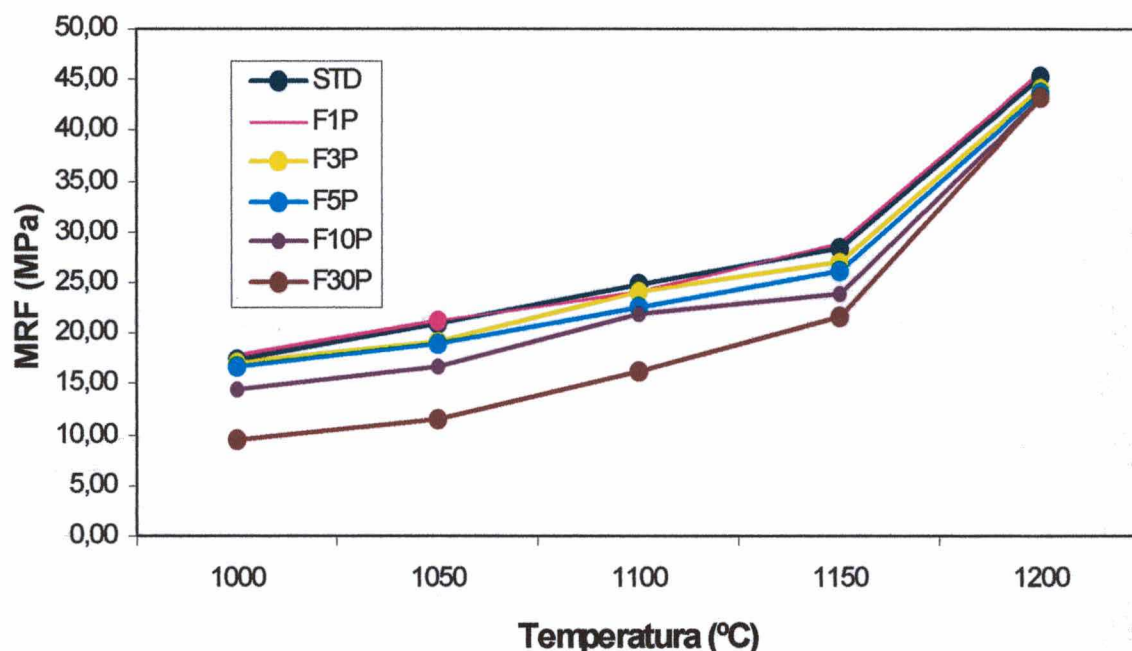


FIGURA 4.10 – MRF EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS FORMULAÇÕES ESTUDADAS.

A figura 4.10 mostra que o MRF aumenta com o aumento da temperatura, como um resultado da redução da porosidade do material devido ao aumento na Dap, como visto anteriormente. A formulação F30P apresentou valores menores de MRF em relação às demais formulações, devido ao menor valor de Dap observado no compactado durante a etapa de sinterização.

Para verificar as características superficiais dos materiais sinterizados, análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das formulações estudadas foram realizadas. A figura 4.11 mostra as micrografias das formulações STD, F3P, F10P e F30P sinterizadas a temperatura de 1150°C.

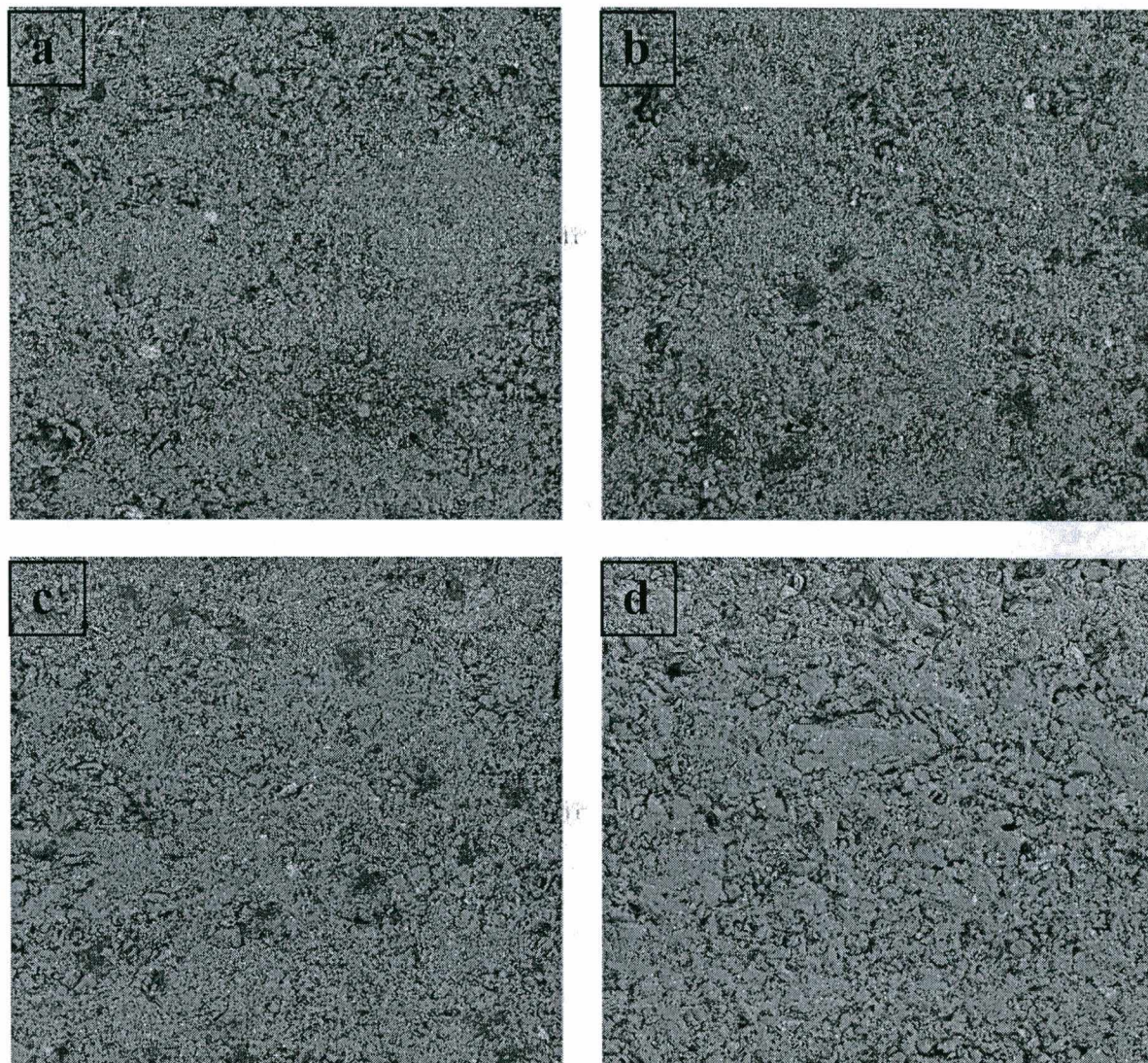


FIGURA 4.11- MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DOS CORPOS DE PROVA, QUEIMADOS A 1150°C, DAS FORMULAÇÕES: a) STD; b) F3P; c) F10P; d) F30P (aumento:100 x).

Estas micrografias mostram que há uma grande similaridade microestrutural entre as formulações STD, F3P e F10P, em particular com relação à quantidade e tamanho de poros observados na superfície de um corte transversal realizado em cada amostra analisada, o que confirma a proximidade nos valores da D_{ap} a 1150°C para estas formulações. Entretanto, aparentemente, a formulação F30P apresentou uma porosidade superior às demais formulações analisadas, que seria explicado por sua menor densidade aparente a 1150°C, conforme figura 4.7. Além disso, a micrografia 4.11d mostra que as partículas são de maior tamanho do que aquelas das demais formulações. A curva de distribuição de tamanho de partícula da amostra F30P (figura 4.3B) mostra que as partículas em torno de 30 μm representam uma participação maior nesta amostra. Podemos dizer que isto deve estar também influenciando a distribuição de porosidade desta amostra.

Seria de se esperar que estas diferenças microestruturais fossem reduzidas a 1200°C, como um resultado dos valores praticamente iguais de Dap obtidos nesta temperatura. Esta semelhança microestrutural entre as amostras STD e F30P a 1200°C pode ser verificada na figura 4.12.

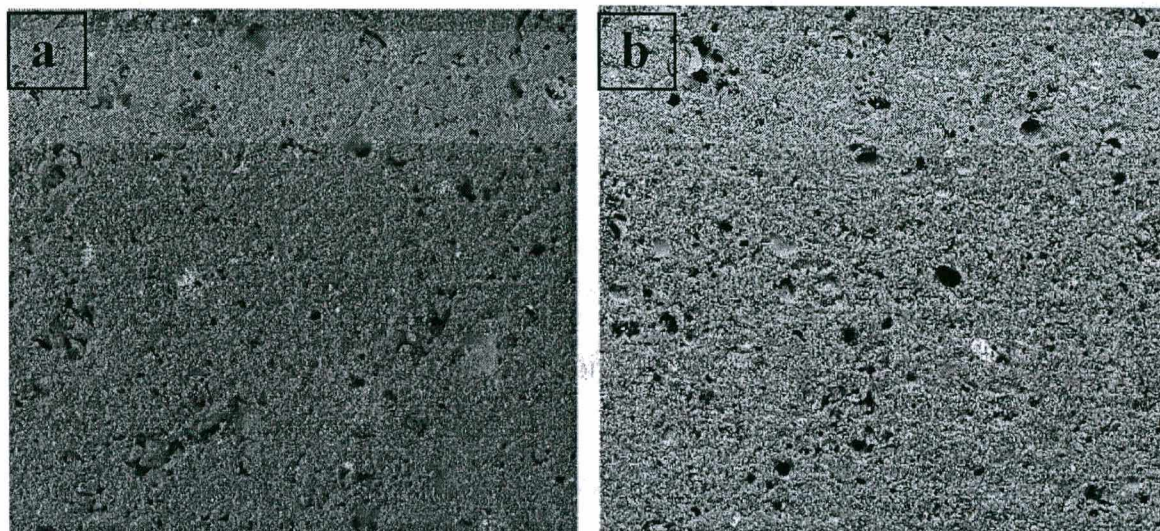


FIGURA 4.12- MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DOS CORPOS DE PROVA, QUEIMADOS A 1200°C, DAS FORMULAÇÕES: a) STD; b) F30P (aumento:100 x).

Conforme discutido anteriormente, a maior taxa de densificação obtida na amostra F30P, no intervalo de temperatura entre 1150 e 1200°C, propiciou a obtenção de uma microestrutura similar, em relação a formulação STD, que levou a valores de AA muito próximos entre as formulações analisadas, a 1200°C.

4.6 Viabilidade econômica

Para demonstrar a viabilidade econômica da tecnologia de aproveitamento de chamote apresentada, consideremos a situação descrita a seguir. Uma indústria de revestimentos cerâmicos com produção mensal de cerca de 1,4 milhões de m², cujo custo das matérias-primas da massa fosse de aproximadamente R\$ 23,50 por ton e que possuísse um índice de geração de chamote da ordem de 3% da produção do forno, requereria uma planta de reciclagem de chamote (figura 3.2) com capacidade de processamento de aproximadamente 700 ton/mês. Considerando os custos de mão-de-obra, energia elétrica, manutenção e depreciação desta planta, o custo mensal do material processado seria de aproximadamente R\$ 6,60 por ton. Nestas condições, a utilização de 3% de chamote à massa reduziria o custo desta para R\$ 23,00 por ton, representando uma diminuição de 2,2% no custo das matérias-primas da massa. Assim, o retorno ao investimento realizado seria de aproximadamente 21 meses, comprovando a viabilidade econômica do processo de reaproveitamento deste rejeito.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Neste trabalho, foi avaliado o efeito da adição de chamote semi-gresificado com tamanho de partícula inferior a 500 μm , em percentuais de 1%, 3%, 5%, 10% e 30%, no comportamento físico e químico de uma massa cerâmica para pavimento. Com respeito aos resultados obtidos, pode-se dizer que:

- não há influência na adição de até 10% de chamote à massa na Dap do compactado. A adição de 30% de chamote diminuiu significativamente a Dap do compactado (de 1,94 para 1,85 g/cm^3). Para a utilização deste percentual no processo produtivo seria necessário aumentar a umidade do pó atomizado ou aumentar a pressão de compactação para obter-se a mesma Dap padrão do compactado (1,94 g/cm^3). Porém, isto provocaria problemas no processo produtivo, tais como: aumento do consumo energético, redução da vida útil da prensa, diminuição da capacidade produtiva, maior probabilidade na geração de defeitos, etc. Outra possibilidade para corrigir a Dap do compactado seria por meio da alteração na composição da massa, aumentando-se a plasticidade desta;
- o MRF do compactado também não é afetado por adições de até 10% de chamote, tendo seu valor reduzido drasticamente quando a adição de chamote atinge o valor de 30%, como um resultado da redução na Dap do compactado;
- as formulações estudadas apresentaram o mesmo comportamento da Dap durante a sinterização até a temperatura de 1200°C. A 1200°C, no entanto, a maior sinterabilidade das formulações provocou uma densificação que alterou este comportamento, resultando em valores de Dap significativamente superiores e de valor similar para todas as formulações. Consequentemente, em função deste aumento na Dap a 1200°C, foi observado um forte aumento na RL, redução na AA e aumento no MRF;
- na formulação F30P, apesar desta ter apresentado o mesmo comportamento na Dap durante a sinterização, o valor observado foi menor devido ao efeito do menor valor na Dap do compactado. Como um resultado desta maior porosidade no compactado, foi obtido um valor mais elevado na RL a 1200°C em relação às demais formulações. Como consequência disto, esta formulação apresentou maior AA e menor MRF a 1200°C que as demais formulações;
- a diferença na porosidade da formulação F30P em relação às demais a 1150°C e a similaridade entre estas formulações a 1200°C puderam ser verificadas visualmente na análise superficial por MEV.

O processo de reaproveitamento estudado mostrou-se técnica e economicamente viável para a realidade das empresas do setor. A tecnologia envolvida, utilizando o chamote como fonte de matéria-prima para retroalimentar o próprio processo de produção na etapa de moagem até um percentual de 10%, é compatível com a demanda da produção atual e com os lay-outs das fábricas cerâmicas. Além do ponto de vista econômico, onde este procedimento poderia permitir ao fabricante de cerâmica atingir uma posição mais competitiva no mercado, haveria uma diminuição do passivo ambiental da empresa, ao mesmo tempo que preservaria o meio ambiente e a saúde da população.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugerem-se os seguintes tópicos para dar sequência no desenvolvimento deste trabalho:

- estudar formulações com adições do mesmo chamote utilizado neste trabalho, em quantidades intermediárias a 10% e 30%, mantendo a Dap do compactado constante;
- estudar adições do mesmo chamote usado neste trabalho em tamanhos de partículas variados, buscando verificar a influência no comportamento do produto acabado;
- estudar a influência da mistura de chamotes de diferentes tecnologias, como monoporosa e porcelanato;
- estudar a utilização do chamote após transformação em pó para outras aplicações específicas, que pudesse agregar maior valor ao produto final;
- o princípio básico do processo poderia ser estendido para o tratamento de resíduos sólidos em outros setores como construção civil, metalúrgico (areia de fundição) e termoelétrico (cinzas de carvão), entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, W. A. ; BALDO, J. B. O potencial de utilização de um resíduo argiloso proveniente da extração de areia na confecção de revestimento cerâmico. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 41. , **Material de revestimento**. São Paulo, 1997. v. 2, p.692-5.

ALVES, W. A. ; BALDO, J. B. O potencial da utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico – parte II. **Cerâmica Industrial**, v. 3, n. 1/2 , p. 34-36, jan./abr. 1998.

AMORÓS, J. L.; BLASCO, A .; ENRIQUE, J. E.; NEGRE, F. **Características de polvos cerâmicos para prensado**. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 26 (1), 1987. p.31-7.

ANFACER – Associação dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. **Indústria brasileira de cerâmica de revestimento: história, estrutura e desempenho recente**. São Paulo: PW Gráficos e Editores Associados, 1995. p.4-8.

ANFACER – Associação dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. **Desempenho da indústria cerâmica**. São Paulo, Catálogo informativo, 2000. www.anfacer.org.br; acessado em 15 out. 2001.

ARNT, R. Tesouro verde. **Revista Exame**. 1696 ed. ano 34, n.15, São Paulo: editora Abril, 18 abr. 2001.

BARBA, A.; BELTRÁN, V.; FELIU, C.; GARCIA, J.; GINÉS, F.; SÁNCHEZ, E.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. 1.ed. Castellón: Instituto de tecnología Cerámica – AICE, 1997. p.17-248.

BARBOSA, B. A natureza contra ataca. **Revista Veja**. A vingança da natureza. Ano 34, n.15. p.92-5. 2001.

CORREIA, S. L. **Efeito das matérias-primas nas propriedades tecnológicas de massas cerâmicas para pavimento gresificado**. Florianópolis, 1996. p.7. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

CRUZ, R. C. D. **Comportamento reológico de suspensões de misturas de pós cerâmicos**. Florianópolis, 1996. p.46-7. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

CRUZ, R. C. D.; LOPES, R. P. A.; HOTZA, D. **Reologia de suspensões cerâmicas**. Santa Catarina: Centro de Tecnologia em Cerâmica - CTC, 1996. p.55-7.

DONDE, M. ; FABBRI, B. ; MARSIGLI, M. Resenha das experiências de reciclagem de resíduos industriais e urbanos na produção de tijolos. **Cerâmica Informação**, n. 1, p.17-29, nov./dez. 1998.

FERNANDES, F. P. **Reaproveitamento do lodo da estação de tratamento de efluentes de indústria de revestimento cerâmico em massa de grês**. Florianópolis, 2001. p.7-14 Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais / UFSC.

GARCIA, J.; SANCHES, E.; AMORÓS, J. L.; GARCIA, M. C. Composições para revestimentos cerâmicos. Influência dos distintos componentes sobre o seu comportamento no processo de fabricação. **Cerâmica Informação**, v. 5/6, n. 4, p. 15-20, mai./jun. 1999.

GURJÃO, C. M. C.; MACHADO, E. C. C.; FERREIRA, H. C. Aproveitamento do rejeito plástico residencial na fabricação de tijolos de solo – cimento – plástico para uso em habitação popular In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 39., **Matérias-primas**. São Paulo, 1995. v. 1, p. 160-5.

HOTZA, D. **Redução e reciclagem da quebra de escolha de revestimento cerâmico fabricado por monoqueima**. Florianópolis: UFSC, 1998, p.6-8 Projeto submetido ao Ministério da Ciência e Tecnologia – PADCT-CDT. Apostila.

ICON – Industrial Conventos S.A. Sistema de britagem/moagem de pisos e revestimentos cerâmicos. **Proposta – VCRP-1106/2000**. Criciúma, s.ed., 2000.

LASSALVIA, C. S. Por que a cerâmica é melhor? Propriedades e características técnicas. Revista Mundo Cerâmico. **Guia geral de cerâmica'95**. 18-A ed. ano III, São Paulo: Menasce, jun. 1995. p.8-15.

MANFREDINI, T. Estrutura dos materiais cerâmicos. Parte – I. **Cerâmica Informação**. n.12, p.42-7. ago/set. 2000.

NASSET, G.; PALMONARI, C. Dry fine grinding and granulation us wet grinding and spray drying in the preparation of a reoware mix fox fast – Fired Vitrified Tile. **Ceram. Eng. Sci. Proc.**, v.14, n.1-2, p.15-24, 1993.

NEGRE, F.; SANCHES, E. Avanços no processamento de pós atomizados para a fabricação de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, n.3, p.22-8, jan/abr, 1998.

OLIVEIRA, A. P. N. e ALARCON, O. E. Revestimentos cerâmicos – Fundamentos tecnológicos. **Cerâmica Informação**. n.5, p.29-39. jul/ago. 1999.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D.; SILVA, A. O.; PEREIRA, F. R.; PIZZETTI, J.; PETERSON, M.; CASAGRANDE, M. **Desenvolvimento de um processo integrado para reaproveitamento de rejeitos do setor cerâmico**. CTC – Centro de Tecnologia Cerâmica. Criciúma: s.ed. 2001. n.p.

ORTIZ, N.; PIRES M. A. F.; CASOLA M. S. Estudo de reaproveitamento de resíduos de siderurgia. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 41. **Matérias-primas**. São Paulo, 1997. v. 2, p. 721-4.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia – Microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 1997. p.259-60.

PASCHOAL, J. O. A.; MENEGAZZO, A. P. M. Panorama de setor de revestimento cerâmico brasileiro. **Cerâmica Informação**, n.2/3, p.81-7, jan/abr. 1999.

PAULA, G. R.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. Efeito do teor de umidade e da pressão de prensagem sobre as características de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica industrial**, v.2, n.3/4, p. 28-31, mai./ago. 1997.

REED, S. J. **Principles of ceramics processing**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. p.3-618.

RIPOLI FILHO, F. A utilização do rejeito industrial cerâmico – chamote - como fator de qualidade na fabricação de elementos cerâmicos: um estudo experimental. **Cerâmica**, v.43, n.281/282, p.133-9, mai./jun./jul./ago. 1997.

ROSA, F. G. ; FOLGUERAS, M. V.; LONGO, A. L.; CECHENEL, A.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D.; ALARCON, O. E. Caracterização de resíduos industriais para uso na composição de massas cerâmicas. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 43. , **Matérias-primas**. Santa Catarina, 1999. , n.p.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. v. 1, p.3-4, 157-67.

SANTOS, R. A. ; DA SILVA, J. E. Reaproveitamento de resíduos industriais torta de efluente de grês cerâmico. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 41. , **Matérias-primas**. São Paulo, 1997. v. 2, p. 825- 827.

SENAI/CTC – Centro de Tecnologia Cerâmica. LDCM – **Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais**. In: Manual do sistema da qualidade – MQ-LDCM, Criciúma, 2001. rev.10, p. 17-9.

SILVA, M. C.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. S. Reciclagem de resíduos industriais provenientes de serragem de granitos para uso em massas para revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Informação**, n. 13, p. 56-62, nov./dez. 2000.

SILVA, N. I. W. ; BELO P. Avaliação de misturas de resíduo sólido com argila plástica para aplicação em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.XLII, n.276, p.335-338, jul./ago.1996.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. Coleção Schaum. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1993. p.104-35.

THÜMMLER, F.; OBERACKER, R. **Introduction to powder metallurgy**. Cambridge: The University Press, 1993. p.181-240.

TOFFLER, Alvin. **A terceira onda**. 19.ed. Rio de Janeiro: Record, 1993. p.25-30.

VAN VLACK, L. H. **Princípios da ciência e tecnologia dos materiais**. 11.ed. Rio de Janeiro: Campos, 1984. p.326-7.

VICENZI, J.; BERGMAN, C. P. Aproveitamento de um resíduo industrial em uma massa cerâmica para pisos. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 43. , **Matérias-primas**. Santa Catarina, 1999. , n. p.

VIEIRA, M.L.H.; KLEIN, .A. N. ; ARROYO, I. K.; ALARCÓN, O. E. Influência da forma de adição dos constituintes sobre as características de massas cerâmicas para revestimento. Anais de 37º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Vol.1. **Material de revestimento**. Curitiba, ABC: 1993. p.458-65.

TRABALHOS PUBLICADOS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram publicados alguns artigos. Os principais estão listados a seguir:

CASAGRANDE, M. C.; OLIVEIRA, A. P. N.; ALEXANDRE, L. R.; HOTZA, D. Reciclagem da quebra de escolha de revestimento cerâmico de monoqueima. In: MERCOCER 2000 – Tecnologia Cerâmica do Mercosul. Florianópolis: nov. 2000.

CASAGRANDE, M. C.; OLIVEIRA, A. P. N.; ALEXANDRE, L. R.; HOTZA, D. Efeito da adição de chamote cerâmico gresificado no comportamento de uma massa de pavimento. In: CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica. 45. Florianópolis: maio. 2001.

CASAGRANDE, M. C. et al. Artigo PÓLO CERÂMICO – Estudo da reciclagem de chamote em pavimentos cerâmicos. Criciúma: out. 2001. www.poloceramico.com.br, acessado em nov. 2001.

CASAGRANDE, M. C.; OLIVEIRA, A. P. N.; ALEXANDRE, L. R.; HOTZA, D. Recycling of the solid wastes in the production of ceramic floor tiles. In: VII World Congress on Ceramic Tile Quality - QUALICER 2002. Castellon: mar. 2002. Trabalho submetido e aceito para apresentação e publicação.

Além disso, recebeu o Prêmio FINEP de Inovação Tecnológica – etapa Regional Sul, com o seguinte trabalho:

CASAGRANDE, M. C.; PETENSON, M.; PIZZETTI, J.; PEREIRA F. R.; SILVA A. O.; HOTZA D.; OLIVEIRA A. P. N. Desenvolvimento de processo integrado para reaproveitamento de rejeito no processo cerâmico. Vencedor do troféu expressão de excelência tecnológica (categoria processo). Florianópolis: ago. 2001.

ANEXOS

Tabela A-1 Densidade aparente (Dap) do compactado seco nas formulações estudadas.

Ensaio	Amostras	Dap (g/cm ³)					
		STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
A	21	1,94	1,94	1,93	1,95	1,92	1,85
	22	1,92	1,97	1,95	1,96	1,94	1,86
	23	1,93	1,94	1,95	1,93	1,93	1,84
	24	1,94	1,97	1,94	1,93	1,93	1,85
B	21	1,93	1,95	1,97	1,92	1,94	1,86
	22	1,96	1,96	1,94	1,94	1,94	1,83
	23	1,95	1,97	1,96	1,93	1,92	1,84
	24	1,93	1,95	1,97	1,95	1,95	1,85
C	21	1,93	1,96	1,94	1,94	1,92	1,87
	22	1,94	1,93	1,96	1,96	1,93	1,84
	23	1,95	1,94	1,93	1,93	1,93	1,85
	24	1,96	1,93	1,95	1,94	1,95	1,85
Média (X)		1,94	1,95	1,95	1,94	1,93	1,85
Desvio Padrão S		0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Coef. de Variação Cv		0,66	0,78	0,70	0,64	0,54	0,57

Tabela A-2 Módulo de Ruptura a Flexão (MRF) do compactado seco nas formulações estudadas.

Ensaio	Amostras	MRF (MPa)					
		STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
A	21	4,56	4,26	4,51	4,35	4,30	3,20
	22	3,92	4,46	3,95	4,42	4,05	2,78
	23	4,38	4,30	4,40	4,41	4,13	2,61
	24	5,12	4,94	4,38	4,21	4,19	3,13
B	21	4,50	3,95	4,16	4,33	4,31	2,55
	22	4,34	4,45	4,30	3,99	5,03	2,74
	23	4,28	4,30	4,50	4,39	4,07	2,90
	24	4,40	4,15	4,31	4,93	4,01	2,72
C	21	4,20	4,93	4,78	5,12	4,18	2,82
	22	4,20	4,26	5,11	4,63	4,20	3,09
	23	4,16	3,90	4,88	4,20	4,8	2,85
	24	4,85	4,87	4,80	3,96	4,27	2,60
X		4,41	4,40	4,51	4,41	4,25	2,83
S		0,32	0,35	0,33	0,34	0,28	0,21
Cv		7,34	8,04	7,34	7,79	6,55	7,55

Tabela A-3 Resultados da densidade aparente (Dap) após queima nas formulações estudadas.

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	Dap (g/cm ³)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1000	A	1	1,89	1,97	1,92	1,93	1,93	1,87
		2	1,92	1,94	1,93	1,93	1,91	1,84
		3	1,91	1,96	1,92	1,90	1,88	1,86
		4	1,92	1,94	1,94	1,95	1,95	1,87
	B	1	1,91	1,95	1,94	1,93	1,92	1,88
		2	1,92	1,94	1,95	1,94	1,95	1,86
		3	1,93	1,96	1,92	1,90	1,91	1,87
		4	1,93	1,96	1,94	1,92	1,92	1,82
	C	1	1,93	1,95	1,93	1,95	1,90	1,88
		2	1,90	1,96	1,92	1,91	1,91	1,86
		3	1,94	1,95	1,94	1,90	1,94	1,85
		4	1,92	1,94	1,94	1,91	1,92	1,86
		X	1,92	1,95	1,93	1,92	1,92	1,86
		S	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	Cv	0,71	0,55	0,56	0,94	1,10	0,93	
1050	A	5	2,00	2,03	1,98	1,94	1,96	1,91
		6	1,99	1,98	1,97	1,94	1,93	1,84
		7	1,99	2,02	2,00	1,99	1,95	1,89
		8	2,01	1,97	1,95	1,93	1,85	1,90
	B	5	2,00	2,02	2,00	1,95	1,96	1,85
		6	2,01	2,03	1,98	1,93	1,93	1,88
		7	2,02	2,00	1,96	1,94	1,93	1,90
		8	1,98	2,01	2,01	1,95	1,92	1,87
	C	5	2,01	1,99	1,98	1,95	1,93	1,86
		6	2,01	1,98	1,99	2,00	1,92	1,88
		7	2,00	2,01	1,96	1,94	1,97	1,89
		8	1,99	1,99	2,00	1,94	1,92	1,89
		X	2,00	2,00	1,98	1,95	1,93	1,88
		S	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
	Cv	0,61	1,07	0,99	1,18	1,55	1,12	
1100	A	9	2,07	2,04	2,03	2,03	1,99	1,94
		10	2,04	2,02	2,04	2,06	1,98	1,97
		11	2,09	2,02	2,06	2,06	2,02	2,02
		12	2,05	2,07	2,03	2,01	2,01	1,94
	B	9	2,05	2,07	2,06	2,04	1,98	2,00
		10	2,04	2,01	2,05	2,03	2,01	1,95
		11	2,08	2,03	2,03	2,01	1,98	1,94
		12	2,06	2,01	2,05	2,06	1,99	1,98
	C	9	2,04	2,05	2,06	2,07	2,02	1,95
		10	2,06	2,06	2,02	2,04	2,01	1,94
		11	2,08	2,03	2,03	2,02	2,04	1,96
		12	2,05	2,09	2,03	2,06	2,00	1,93
		X	2,06	2,04	2,04	2,04	2,00	1,96
		S	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
	Cv	0,83	1,32	0,75	1,01	0,96	1,42	

Tabela A-3 Resultados da densidade aparente (Dap) após queima nas formulações estudadas. (Continuação)

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	Dap (g/cm ³)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1150	A	13	2,09	2,10	2,14	2,05	2,05	1,96
		14	2,12	2,14	2,17	2,13	2,08	2,02
		15	2,12	2,09	2,11	2,10	2,07	2,03
		16	2,15	2,15	2,13	2,14	2,13	2,01
	B	13	2,10	2,10	2,16	2,06	2,10	1,98
		14	2,13	2,14	2,15	2,12	2,06	1,97
		15	2,13	2,12	2,11	2,11	2,10	1,98
		16	2,15	2,13	2,16	2,13	2,12	2,01
	C	13	2,11	2,15	2,15	2,12	2,10	2,02
		14	2,09	2,11	2,11	2,05	2,08	1,99
		15	2,12	2,09	2,17	2,08	2,07	2,04
		16	2,14	2,12	2,11	2,13	2,00	2,01
	X		2,12	2,12	2,14	2,10	2,08	2,00
	S		0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
Cv		0,95	1,07	1,10	1,56	1,67	1,29	
1200	A	17	2,42	2,41	2,40	2,40	2,41	2,39
		18	2,41	2,41	2,40	2,41	2,41	2,38
		19	2,39	2,40	2,40	2,40	2,39	2,40
		20	2,41	2,40	2,40	2,43	2,38	2,39
	B	17	2,40	2,41	2,42	2,40	2,39	2,38
		18	2,40	2,42	2,39	2,41	2,41	2,40
		19	2,39	2,40	2,39	2,39	2,40	2,39
		20	2,42	2,38	2,40	2,41	2,40	2,40
	C	17	2,42	2,40	2,41	2,42	2,39	2,39
		18	2,39	2,41	2,39	2,41	2,42	2,39
		19	2,40	2,40	2,39	2,42	2,40	2,39
		20	2,39	2,39	2,42	2,43	2,40	2,40
	X		2,40	2,40	2,40	2,41	2,40	2,39
	S		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cv		0,51	0,42	0,46	0,53	0,49	0,29	

Tabela A-4 Resultados da Retração Linear (RL) após queima nas formulações estudadas.

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	RL (%)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1000	A	1	0,95	0,92	0,89	0,96	1,00	1,05
		2	0,90	1,10	0,95	0,93	0,98	1,03
		3	1,02	1,05	1,06	1,03	1,15	1,12
		4	1,04	1,06	1,08	1,08	1,03	1,12
	B	1	0,96	0,93	0,89	0,92	0,85	0,92
		2	1,03	0,93	1,08	0,88	1,02	1,16
		3	1,02	1,02	1,10	0,93	1,13	1,12
		4	0,93	0,95	1,02	1,05	1,02	1,16
	C	1	0,96	0,99	1,02	0,95	0,90	1,16
		2	0,98	0,93	1,10	1,09	0,93	1,10
		3	1,03	1,05	0,90	0,99	0,93	1,13
		4	1,08	0,98	0,92	1,09	1,06	0,92
		X	0,99	0,99	1,00	0,99	1,00	1,08
		S	0,05	0,06	0,09	0,07	0,09	0,09
	Cv	5,33	6,26	8,54	7,45	8,91	7,95	
1050	A	5	2,03	1,79	1,69	1,98	1,96	2,05
		6	1,76	1,66	1,73	1,63	1,65	1,92
		7	1,89	2,08	1,96	1,96	1,73	1,78
		8	1,73	1,85	1,72	1,72	1,91	1,87
	B	5	1,76	2,01	1,80	2,01	2,04	2,16
		6	1,73	1,67	1,78	1,72	1,83	1,80
		7	1,80	1,66	1,88	1,72	1,83	1,83
		8	1,75	1,92	1,82	1,65	1,81	2,08
	C	5	1,79	1,64	1,76	1,80	1,99	2,05
		6	1,83	1,73	1,90	1,92	1,65	1,87
		7	2,01	1,89	1,83	1,92	1,83	1,78
		8	1,70	1,73	1,73	1,63	1,90	1,90
		X	1,82	1,80	1,80	1,81	1,84	1,92
		S	0,11	0,15	0,08	0,14	0,12	0,13
	Cv	5,96	8,18	4,54	8,01	6,75	6,72	
1100	A	9	3,32	3,52	2,96	3,16	3,17	3,61
		10	2,78	2,98	2,87	2,99	2,89	3,52
		11	3,29	3,26	3,48	3,42	3,33	3,63
		12	3,05	3,21	2,98	2,88	3,29	3,45
	B	9	3,23	3,07	3,21	3,19	3,08	3,49
		10	3,69	2,85	2,77	3,33	2,98	-
		11	3,32	3,17	3,53	3,45	3,47	3,34
		12	2,97	3,62	3,21	3,29	3,16	2,94
	C	9	3,20	3,51	3,52	3,16	3,18	2,98
		10	3,16	3,32	2,99	2,96	3,47	3,45
		11	2,92	2,88	3,44	3,36	3,24	3,52
		12	3,12	3,16	3,37	3,29	3,08	3,30
		X	3,17	3,21	3,19	3,21	3,20	3,38
		S	0,23	0,25	0,27	0,18	0,18	0,23
	Cv	7,40	7,76	8,55	5,77	5,57	6,85	

Tabela A-4 Resultados da Retração Linear (RL) após queima nas formulações estudadas. (Continuação)

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	RL (%)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1150	A	13	3,69	4,09	3,68	3,99	3,77	4,31
		14	4,46	4,60	4,03	4,33	4,55	4,14
		15	3,69	3,71	3,91	3,86	3,79	3,92
		16	4,15	4,13	4,22	3,68	4,11	4,15
	B	13	3,75	3,78	3,59	3,90	3,89	4,38
		14	3,95	4,56	4,25	4,44	4,23	3,91
		15	3,86	3,83	3,90	3,43	3,70	3,98
		16	4,09	3,86	4,29	4,05	3,91	4,36
	C	13	4,12	4,03	3,86	3,93	4,01	4,21
		14	3,76	3,78	3,91	3,98	3,90	4,29
		15	3,72	3,91	4,03	4,35	3,65	4,51
		16	3,91	3,71	4,10	3,61	3,57	3,98
		X	3,93	4,00	3,98	3,96	3,92	4,18
		S	0,24	0,30	0,22	0,31	0,27	0,20
	Cv	6,03	7,62	5,45	7,70	6,97	4,75	
1200	A	17	7,39	7,59	7,33	7,36	8,05	8,44
		18	7,15	7,88	8,29	7,27	7,68	8,64
		19	7,98	7,24	7,01	7,57	8,48	9,08
		20	7,23	7,29	7,48	7,69	7,93	8,24
	B	17	7,29	7,72	7,57	7,82	7,72	9,00
		18	7,19	7,65	7,95	7,81	8,03	8,93
		19	8,05	6,90	7,74	7,65	8,01	8,35
		20	7,22	7,42	7,76	7,33	7,52	8,52
	C	17	6,94	7,21	7,74	7,29	8,22	9,19
		18	7,21	6,98	7,91	7,80	8,06	8,62
		19	8,02	6,90	8,08	7,73	7,62	8,50
		20	7,38	7,55	7,19	7,96	7,38	9,14
		X	7,42	7,36	7,67	7,61	7,89	8,72
		S	0,38	0,33	0,37	0,24	0,31	0,33
	Cv	5,08	4,46	4,87	3,13	3,99	4,01	

Tabela A-5 Resultados da Absorção de Água (AA) após queima nas formulações estudadas.

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	AA (%)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1000	A	1	14,57	13,66	14,38	13,27	13,62	17,25
		2	14,10	14,01	14,39	13,81	14,24	15,53
		3	13,37	14,10	14,69	13,68	15,14	15,65
		4	14,47	12,92	13,54	13,42	13,58	15,63
	B	1	13,71	13,56	14,40	12,93	15,11	17,70
		2	14,38	14,46	13,78	13,66	13,81	16,19
		3	14,23	13,81	13,70	14,96	13,52	16,01
		4	14,66	14,40	13,57	13,42	14,83	15,95
	C	1	13,25	13,72	13,02	14,15	13,81	15,82
		2	13,46	13,81	13,59	14,31	14,02	15,77
		3	14,13	14,39	13,98	13,78	14,35	16,16
		4	13,30	14,03	14,01	13,89	13,80	15,86
		X	13,97	13,91	13,92	13,77	14,15	16,13
		S	0,52	0,43	0,48	0,53	0,59	0,67
	Cv	3,75	3,11	3,44	3,85	4,15	4,14	
1050	A	5	11,58	11,84	12,55	12,32	12,67	14,25
		6	13,02	13,54	14,35	12,53	13,98	16,81
		7	13,29	11,89	12,27	11,65	13,50	14,04
		8	11,83	12,27	13,30	13,15	12,94	14,78
	B	5	12,20	12,73	12,32	11,83	12,24	14,31
		6	12,41	13,08	13,96	13,74	12,36	16,43
		7	12,81	12,21	12,60	12,13	13,15	14,69
		8	12,93	12,75	12,23	13,31	13,45	15,23
	C	5	12,86	12,35	12,46	13,42	13,34	14,53
		6	13,53	13,24	12,23	12,58	13,02	14,21
		7	12,02	11,99	12,12	11,86	12,86	15,06
		8	13,21	12,67	13,31	13,21	12,61	15,42
		X	12,64	12,55	12,81	12,64	13,01	14,98
		S	0,62	0,55	0,74	0,71	0,51	0,88
	Cv	4,92	4,37	5,81	5,58	3,89	5,87	
1100	A	9	9,88	10,03	11,37	10,59	9,86	13,21
		10	11,43	10,44	10,89	9,73	10,03	12,11
		11	9,87	10,22	9,66	8,93	10,00	11,15
		12	9,75	10,85	10,91	11,17	10,29	12,16
	B	9	9,90	10,45	10,67	9,69	9,76	13,72
		10	11,40	10,34	11,48	9,82	10,33	13,43
		11	10,02	8,91	9,86	9,23	10,12	11,19
		12	10,28	9,56	9,90	10,56	11,17	11,72
	C	9	10,24	10,12	10,29	10,23	10,81	11,82
		10	10,13	10,88	10,23	10,01	11,79	12,53
		11	11,28	10,06	9,88	10,88	10,89	11,77
		12	9,65	9,68	10,61	9,81	11,46	12,09
		X	10,32	10,13	10,48	10,05	10,54	12,24
		S	0,66	0,55	0,61	0,66	0,67	0,83
	Cv	6,40	5,46	5,79	6,57	6,34	6,81	

Tabela A-5 Resultados da Absorção de Água (AA) após queima nas formulações estudadas. (Continuação)

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	AA (%)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1150	A	13	9,24	8,51	9,69	10,02	10,15	11,26
		14	8,35	9,15	8,30	8,79	8,96	9,29
		15	9,53	10,07	10,12	8,45	9,04	9,94
		16	7,85	8,75	8,39	8,72	10,10	10,66
	B	13	9,57	9,35	8,81	9,63	10,15	9,77
		14	8,62	8,21	8,63	8,36	8,75	9,95
		15	8,95	8,47	9,04	8,61	8,99	10,18
		16	9,01	8,22	8,63	8,46	9,13	9,36
	C	13	7,68	9,02	8,44	9,20	9,02	11,30
		14	8,62	8,37	8,40	9,15	8,66	10,10
		15	7,90	8,35	10,03	8,55	8,37	9,89
		16	8,35	8,09	8,63	8,61	9,12	10,55
		X	8,64	8,71	8,93	8,88	9,20	10,19
		S	0,64	0,59	0,65	0,52	0,60	0,65
		Cv	7,41	6,72	7,33	5,84	6,53	6,36
	1200	A	17	1,24	1,36	1,18	1,45	1,40
18			0,98	0,98	1,26	1,22	1,44	1,49
19			1,28	1,29	1,46	1,17	1,37	1,59
20			1,32	1,40	1,36	1,16	1,34	1,34
B		17	1,21	1,26	1,35	1,19	1,49	1,37
		18	1,16	1,20	1,12	1,34	1,19	1,53
		19	1,26	1,36	1,53	1,23	1,14	1,31
		20	1,13	1,21	1,48	1,20	1,32	1,38
C		17	1,35	1,31	1,24	1,25	1,42	1,47
		18	1,30	1,16	1,29	1,17	1,39	1,42
		19	1,23	1,37	1,42	1,22	1,23	1,48
		20	1,15	1,31	1,32	-	1,45	1,29
		X	1,22	1,27	1,33	1,24	1,35	1,43
		S	0,10	0,12	0,12	0,09	0,11	0,09
		Cv	8,33	9,26	9,31	7,04	8,13	6,94

Tabela A-6 Resultados do ensaio de Módulo de ruptura a flexão (MRF) nas formulações estudadas.

Temperatura °C	Ensaio	Amostras	MRF (MPa)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1000	A	1	15,83	17,93	15,75	15,88	14,53	8,96
		2	16,34	19,29	15,91	15,81	13,98	9,41
		3	18,15	16,82	17,50	16,36	12,97	9,55
		4	18,15	18,61	17,61	18,24	15,71	10,07
	B	1	18,64	17,08	16,57	16,79	15,20	8,30
		2	17,86	16,58	15,88	15,74	14,12	9,19
		3	17,72	16,20	15,61	16,38	17,03	9,72
		4	14,98	19,99	18,21	19,23	13,49	10,48
	C	1	17,02	18,02	18,12	16,38	13,54	10,29
		2	17,21	17,61	19,15	17,77	13,66	10,09
		3	18,52	18,61	15,96	16,06	14,29	7,85
		4	17,20	16,33	17,92	15,11	13,81	8,51
	X		17,30	17,76	17,02	16,65	14,36	9,37
	S		1,12	1,21	1,21	1,19	1,13	0,83
Cv		6,47	6,82	7,09	7,13	7,86	8,89	
1050	A	5	22,47	21,66	18,91	19,09	16,80	11,97
		6	20,28	19,42	19,61	17,91	14,86	10,78
		7	20,02	22,71	20,72	21,50	15,74	13,19
		8	21,11	21,49	18,19	18,80	16,71	10,91
	B	5	20,90	21,64	19,07	20,10	16,92	12,87
		6	20,00	20,71	18,93	17,95	18,48	10,31
		7	20,06	22,35	21,54	20,04	16,92	12,38
		8	20,22	19,85	19,24	18,46	16,65	10,53
	C	5	21,55	22,03	19,02	18,23	15,85	10,90
		6	22,35	21,88	18,65	18,28	16,61	12,02
		7	22,09	19,96	18,23	17,89	17,89	11,12
		8	20,05	21,68	18,76	19,45	17,65	10,27
	X		20,93	21,28	19,24	18,97	16,76	11,44
	S		0,97	1,05	0,98	1,12	0,98	1,01
Cv		4,62	4,94	5,10	5,88	5,86	8,82	
1100	A	9	24,87	25,67	24,91	21,70	22,37	16,13
		10	24,04	23,94	22,92	22,75	19,69	15,59
		11	26,99	24,02	24,10	23,52	21,00	19,23
		12	22,93	24,17	23,68	21,44	22,44	15,67
	B	9	24,06	25,51	23,83	23,16	22,05	16,54
		10	24,95	23,50	21,81	23,94	22,91	-
		11	25,05	22,08	26,55	24,42	23,81	17,38
		12	25,89	24,24	27,02	21,06	20,50	15,71
	C	9	22,39	23,78	22,47	20,90	19,91	15,28
		10	26,29	26,56	22,86	23,53	21,53	15,33
		11	23,08	24,09	25,09	22,59	22,46	14,96
		12	25,93	22,33	23,32	22,28	23,12	16,21
	X		24,71	24,16	24,05	22,61	21,82	16,18
	S		1,44	1,29	1,59	1,15	1,30	1,32
Cv		5,83	5,33	6,62	5,11	5,97	8,16	

Tabela A-6 Resultados do ensaio de Módulo de ruptura a flexão (MRF) nas formulações estudadas. (Continuação)

Temperatura °C	Peças	Amostras	MRF (MPa)					
			STD	F1P	F3P	F5P	F10P	F30P
1150	A	13	26,91	28,27	25,75	24,23	21,07	19,56
		14	30,45	30,84	27,57	28,88	26,23	23,10
		15	26,50	25,94	25,11	24,12	25,91	20,41
		16	30,37	29,80	25,55	26,47	21,31	18,71
	B	13	24,47	27,91	28,32	23,18	22,10	23,87
		14	30,64	30,22	30,18	28,29	25,04	20,09
		15	31,16	29,24	25,92	23,69	24,08	20,87
		16	27,63	28,95	29,14	26,98	21,39	22,17
	C	13	27,25	28,54	28,84	28,87	22,29	23,58
		14	28,09	26,86	25,64	25,32	25,37	22,05
		15	26,95	29,61	25,29	26,54	25,51	23,93
		16	29,23	28,66	27,06	27,29	26,08	21,77
		X	28,30	28,74	27,03	26,15	23,87	21,68
		S	2,06	1,38	1,74	2,02	2,07	1,76
		Cv	7,28	4,82	6,44	7,74	8,67	8,11
	1200	A	17	44,45	46,08	45,71	45,03	40,70
18			43,23	44,10	41,59	43,40	45,23	46,77
19			47,18	43,36	44,54	44,23	45,82	45,68
20			48,38	46,50	43,04	44,72	43,76	42,89
B		17	47,08	45,09	46,19	42,39	43,57	39,39
		18	43,82	43,13	42,16	39,81	40,63	42,72
		19	42,42	47,38	44,36	43,08	45,44	44,68
		20	44,41	48,28	43,65	45,63	42,42	45,84
C		17	46,26	48,12	42,59	43,68	40,21	45,26
		18	45,21	47,77	44,95	45,42	42,21	40,73
		19	45,86	44,86	46,25	42,88	44,56	43,53
		20	43,98	45,26	45,63	44,90	43,45	41,28
		X	45,19	45,83	44,22	43,76	43,17	43,19
		S	1,79	1,81	1,61	1,63	1,95	2,54
		Cv	3,97	3,95	3,63	3,72	4,51	5,91