

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

LORENÇO NECKEL JUNIOR

**PROCESSAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS POR
COMPACTAÇÃO DE PÓS E QUEIMA EM FORNO A ROLO**

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

LORENÇO NECKEL JUNIOR

**PROCESSAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS POR
COMPACTAÇÃO DE PÓS E QUEIMA EM FORNO A ROLO**

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 mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Orestes Estevam Alarcom
Co-Orientador: Prof. Dr. -Ing. Márcio Celso Fredel

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2008.

LORENÇO NECKEL JUNIOR

PROCESSAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS POR COMPACTAÇÃO DE PÓS E QUEIMA EM FORNO A ROLO

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

Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon
Orientador
EMC/UFSC

Prof^a. Dr^a. Ana Maria Maliska
Coordenadora – PGMAT
EMC/UFSC

Prof. Dr. -Ing. Márcio Celso Fredel
Co-Orientador
EMC/UFSC

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Pedro Novaes de Oliveira
EMC/UFSC

Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
EMC/UFSC

Prof. Dr. João Batista Rodrigues Neto
IST/SOCIESC

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2008.

Ficha Catalográfica

NECKEL, Lorenço Jr.

PROCESSAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS POR COMPACTAÇÃO DE PÓS
E QUEIMA EM FORNO A ROLO, Florianópolis, UFSC, Curso de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais, 2008.

xiv, 74 p.

Dissertação de Mestrado: Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Orestes Estevam Alarcon

Co-Orientador: Prof. Dr. -Ing. Márcio Celso Fredel

1. Cerâmica Estrutural 2. Processamento Cerâmico

I. Universidade Federal de Santa Catarina.

II. Título

“Grandes realizações não são feitas por impulso,
Mas por uma soma de pequenas realizações.”
(Vincent van Gogh, pintor holandês, 1853-1890)

SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	18
2.1 HISTÓRICO CERÂMICO.....	18
2.2 TIPOLOGIA DA CERÂMICA ESTRUTURAL.....	19
2.3 REQUISITOS COMERCIAIS.....	21
2.4 MASSAS CERÂMICAS.....	23
2.5 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO CERÂMICO.....	24
2.5.1 Prensagem.....	26
2.5.2 Extrusão.....	30
2.5.3 Secagem.....	31
2.5.4 Queima.....	32
2.6 COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TELHAS.....	32
2.6.1 Extrusão e Forno-Túnel.....	32
2.6.2 Compactação e Forno a Rolo.....	33
2.7 DEFORMAÇÃO PIROPLÁSTICA.....	35
2.8 ENSAIO DE CONGELAMENTO.....	38
3 METODOLOGIA.....	40
3.1 PROJETO DO PRODUTO E DOS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO.....	40
3.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO E SELEÇÃO DA MASSA.....	41
3.3 PROCESSO PILOTO DE FABRICAÇÃO.....	42
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO ACABADO.....	43

3.5 TESTES DE ESMALTAÇÃO.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1 PROJETO DO PRODUTO E DOS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO.....	46
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES.....	54
4.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO PILOTO.....	61
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO ACABADO.....	64
4.5 TESTES DE ESMALTAÇÃO.....	66
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
6 CONCLUSÕES.....	70
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Telha em contato com os rolos do forno.....	16
Figura 02 – Tipos mais conhecidos de telhas [06].....	20
Figura 03 – Coberturas de telhas tipo holandesa e colonial [06].....	21
Figura 04 – Esquema geral de processamento cerâmico [03].....	25
Figura 05 – Carregamento e nivelamento da matriz [11].....	26
Figura 06 – Deformação e empacotamento dos grânulos [11].....	29
Figura 07 – Extrusora [11].....	31
Figura 08 – Esquema do ensaio de piroplasticidade [02].....	35
Figura 09 – Ensaio de piroplasticidade [09], [10].....	36
Figura 10 – Índice de piroplasticidade em função da temperatura de sinterização [05].....	37
Figura 11 – Índice de piroplasticidade em função da absorção de água [05].....	38
Figura 12 – a) Câmara de resfriamento para ensaios de congelamento; b) disposição das amostras úmidas dentro da câmara de congelamento.	39
Figura 13 – Telha com uma capa e encaixe duplo.....	50
Figura 14 – Perfil do modelo com eixo de instalação e queima diferenciados: a) posição de montagem da telha no telhado, b) posição de passagem da telha no forno.....	51
Figura 15 – Vistas superior e inferior (detalhe dos encaixes).....	51
Figura 16 – Perspectivas da montagem de um telhado com a alternativa selecionada.....	51
Figura 17 – Prototipagem e testes da alternativa selecionada em gesso.....	52
Figura 18 – Processo de fabricação dos equipamentos de compactação, pela empresa Icon S.A.. a) carro alimentador; b) nivelador e extrator; c) punção inferior; d) punção inferior; e) caixa da matriz; f) conjunto matriz montado.....	53

Figura 19 – Corpos de Prova de massa B, após ensaio de piroplasticidade. Vista frontal e lateral. Temperaturas de queima: 1000, 1050, 1100 e 1150 °C.....	59
Figura 20 – a) Prensa SACMI 550 ton. b) Punção Superior. c) Conjunto Estampo - Matriz.....	62
Figura 21 – a) Matriz carregada. b) Telha compactada.....	63
Figura 22 – a) Telhas na entrada do forno. b) Telhas na zona de queima.	64
Figura 23 – Vistas superior e inferior da telha fabricada com a massa B após a queima.....	64
Figura 24 – Testes de aplicação de esmalte em corpos de prova.....	67
Figura 25 – Testes de aplicação de esmalte em telhas.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Dados de sinterização e índice de piroplasticidade da Massa A, para diferentes pressões de compactação.....	56
Gráfico 02 – Dados de sinterização e índice de piroplasticidade da Massa B, para diferentes pressões de compactação.....	57
Gráfico 03 – Dados de sinterização e índice de piroplasticidade da Massa B, para diferentes adições de refratário.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Análise química por fluorescência de Raios X.....	54
Tabela 02 – Distribuição do tamanho de partículas por granulometria a laser.....	54
Tabela 03 – Caracterização da Massa A para diferentes pressões de compactação.....	56
Tabela 04 – Caracterização da Massa B para diferentes pressões de compactação.....	57
Tabela 05 – Comparação entre as massas A e B para as mesmas condições de compactação e queima.....	59
Tabela 06 – Caracterização da Massa B para diferentes adições de refratário.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Parâmetros laboratoriais de compactação e queima para as massas A e B.....	41
Quadro 02 – Parâmetros laboratoriais de compactação e queima para as massa B modificada.....	41
Quadro 03 – Necessidades dos Clientes.....	49
Quadro 04 – Requisitos da Qualidade segundo o QFD.....	49
Quadro 05 – Critérios mais relevantes.....	50
Quadro 06 – Ciclos de queima.....	63
Quadro 07 – Caracterização do produto acabado.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
a.C.	antes de Cristo
IP	Índice de Piroplasticidade
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
T	Temperatura
RQ	Retração Linear de Queima
AA	Absorção de Água
MRF	Módulo de Resistência à Flexão

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar e acima de tudo;

Aos professores Orestes E. Alarcon e Márcio C. Fredel, pela orientação, incentivo e paciência no desenvolvimento do trabalho, aos demais professores do curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, e aos membros da banca de defesa.

Ao SENAI-SC/CTCmat – Centro de Tecnologia em Materiais, na pessoa do Sr. Sílvio Bittencourt, que abriu suas portas para a realização desse trabalho; ao Dr. Oscar R. K. Montedo e todo corpo de colaboradores, pela disponibilização de recursos, colaboração nos trabalhos, auxílio, dedicação e amizade sempre que necessários; à Petrobrás, que financiou o projeto; às empresas A2D - Agência de Design Cerâmico; Colorminas Colorifício e Mineração, Icon S/A., e Casagrande Revestimentos Cerâmicos S/A., que forneceram insumos quando necessário e acompanharam o desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas de laboratório, pessoal do CERMAT - UFSC, pessoal do LabCet - UFSC, pessoal do SENAI-SC/Tijucas, pelo auxílio e compreensão.

À minha família, pelo apoio de sempre, sempre aconchegante e fundamental; aos meus amigos e companheiros, pela motivação e pelos bons momentos; ao meu amor, por ser, mais do que nunca, o que ela é...

E a todos aqueles que colaboraram de uma forma ou outra com o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do processamento de telhas cerâmicas por compactação de pós e queima em forno a rolos. O trabalho está dividido em etapas: o estudo laboratorial de duas argilas – já previamente utilizadas em indústrias cerâmicas – buscando selecionar a argila e as condições otimizadas de processamento, onde foi investigado o comportamento dessas argilas durante o processo de compactação e queima, e em relação a sua piroplasticidade, que é a deformação sofrida em alta temperatura, pela ação do próprio peso, devido à formação de fases vítreas. Trabalhou-se com variações nos parâmetros de compactação e queima do material, além da intervenção na formulação química (adição de material refratário). Assim, foi possível definir as condições ideais de compactação e queima das telhas. Além disso, em paralelo, foi realizado o projeto da telha, e o projeto e fabricação dos equipamentos de compactação. Os resultados obtidos foram colocados em prática, em testes de produção semi-industrial, com posterior caracterização do produto acabado. O processo desenvolvido traz vantagens em relação ao processo tradicional (extrusão e queima em forno túnel), tanto no processamento, quanto no produto final. O processo é mais eficiente do ponto de vista energético, pois não perde energia com a mobília do forno. Além disso, possibilita um menor consumo de material (resistência à flexão acima de 40 MPa, com 12 mm de espessura), e melhor qualidade do produto no que diz respeito ao tamanho e precisão dimensional (retração linear de queima menor que 1,5%), porosidade (absorção de água menor que 10%), variação de cor, e resistência ao congelamento.

Palavras-Chave: telhas; piroplasticidade; forno a rolo; processamento.

ABSTRACT

This work presents the development of roof tiles fabrication process by powder pressing and firing in roller kilns. It started with two different clays commonly used in industry. First step, the laboratorial characterization of the clays, searching for the ideal conditions of process, investigating the clays behavior during pressing and firing (variation of process parameters), and their pyroplasticity (to permit the production of roof tiles in roller kiln), besides the formulation intervention (addiction of refractory materials). So, it was possible to define the ideal conditions of pressing and firing of the roof tiles. The results (selected clay, and process parameters) were used in the semi-industrial pilot tests, and the obtained final products were characterized. The developed process has advantages, in the process and the final product, related with the standard process (extrusion and firing in tunnel kiln). The process is energetically more efficient, first because there are no movable in the kiln. It was measured a flexural strength above 40 MPa with 12mm thickness, using less raw material. Also, the product has a higher quality in size, shape and dimensional precision (linear thermal shrinkage lower than 1,5%); color control, porosity (water absorption lower than 10%), and frost resistance.

Key-Words: roof tiles; pyroplasticity; roller kiln; processing.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

No estado de Santa Catarina existem cerca de 700 olarias, com uma produção média mensal estimada em 100 milhões de unidades, das quais aproximadamente 20% são telhas. Essa produção corresponde a cerca de 15% da produção brasileira. O setor é responsável por 11.000 empregos diretos e 30.000 indiretos (segundo o Anuário ABC 2003). O consumo energético global gira em torno de 460 mil m³/mês de serragem e lenha, o que equivale a um consumo potencial médio de 600 mil m³/dia de gás natural (consumo equivalente ao realizado pela indústria cerâmica de revestimento). O faturamento bruto do setor gira em torno de 250 milhões de reais.

O desenvolvimento do presente projeto tem com base a hipótese de que a transformação da matriz energética das indústrias de cerâmica vermelha de biomassa para gás natural deve passar por uma mudança tecnológica no processo de fabricação. Dos tradicionais fornos túneis para os fornos a rolos, mais eficientes do ponto de vista energético e de elevada produtividade.

A fabricação tradicional de telhas cerâmicas, natural e/ou esmaltada, é baseada nos processos de extrusão, prensagem, secagem e queima em forno túnel. Em particular, o forno túnel é composto de 60% em peso de mobília (carros transportadores das telhas) e 40% de telhas. Assim, se utiliza cerca de 60% da energia térmica para aquecer material inerte. A nova tecnologia proposta de queima em forno a rolos elimina este problema tornando o processo térmico de queima mais eficiente que a queima nos fornos tradicionais. Além disto, a introdução das novas tecnologias para produção de telhas tem como vantagens teóricas: menor consumo de matérias-primas (a compactação permite espessuras mais finas mantendo a resistência flexural); melhor utilização da mina (utilizando a parte não plástica da jazida de argila); melhor qualidade do produto (tamanho, tonalidade, precisão dimensional, resistência mecânica, menor permeabilidade, baixa porosidade, baixa absorção de água e conseqüente resistência ao congelamento, necessária para exportação para países de clima frio); menor índice de perda no processo (de 20% em média para menos de 5%); novo design de produto com agregação de valor; maior produtividade na secagem e na

queima; e racionalização do consumo energético; além da melhor qualidade ambiental (tecnologia mais limpa com uso de gás natural).

Para tanto se faz necessário contornar problemas, como por exemplo, a deformação piropoplástica, pois na queima de alguns modelos em fornos a rolo não há apoio em todo o corpo (a parte da peça responsável pelo encaixe fica suspensa, como visto na Figura 01), ficando suscetível à deformação piropoplástica. Em altas temperaturas, fases de baixo ponto de fusão atingem estado viscopoplástico, e o material acaba se deformando, pelo próprio peso do corpo.



Figura 01 – Telha em contato com os rolos do forno.

O presente trabalho está inserido em um projeto que envolve várias empresas, além da Universidade Federal de Santa Catarina e órgãos financiadores. O projeto contempla as etapas de: design otimizado do produto (telha) a ser fabricado; projeto e fabricação dos equipamentos necessários (por exemplo, o conjunto estampo-matriz da prensa de compactação); desenvolvimento de composição cerâmica a ser utilizada na fabricação, a partir de matérias-primas já utilizadas por empresas do setor; desenvolvimento de condições otimizadas de processo (compactação e queima), por meio de ensaios de laboratório e testes pilotos; caracterização final do produto acabado, para verificação das propriedades necessárias; e por fim uma análise térmica detalhada do processo.

O trabalho tem seu foco no estudo e desenvolvimento da massa cerâmica e das condições otimizadas de processo, seguido pela caracterização do produto acabado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e viabilizar a fabricação de telhas cerâmicas baseando-se no processo de compactação a seco, secagem e queima em fornos a rolos, com conseqüente aumento na qualidade do produto acabado e redução no consumo energético específico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Compreender o fenômeno da deformação pirolástica, que dificulta a queima de telhas em forno a rolo, por meio de revisão bibliográfica e ensaios laboratoriais, envolvendo variáveis de processo e composição;

- Selecionar uma composição cerâmica que cumpra os requisitos de processo e de qualidade para fabricação de telhas por compactação, a partir de matérias-primas já utilizadas em empresas do setor;

- Desenvolver condições otimizadas de processo (compactação e queima) a serem utilizadas na fabricação das telhas, utilizando ensaios de laboratório e testes pilotos;

- Caracterizar o produto acabado, para verificação da otimização das propriedades finais.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 HISTÓRICO CERÂMICO

Pelas pesquisas arqueológicas até hoje efetuadas, os primeiros tijolos de construção foram empregados na Mesopotâmia, na grande zona compreendida entre os rios Tigre e Eufrates, que presenciaram o surgimento e afirmação das primeiras civilizações. Datam de 4000 a.C. as grandiosas construções em relevo, sobre plataformas enormes de terra batida. Por cerca de um milênio, os tijolos foram utilizados somente no estado seco, sem sofrer o processo de queima. Os primeiros tijolos queimados começam a aparecer em 3000 a.C. e se encontram empregados como revestimento externo das grandes construções monumentais, como proteção mais frequentemente de paredes internas de tijolos secos, embora a arte de queimar a louça de barro já fosse conhecida muitos séculos antes.

No Egito, as construções em tijolos aparecem posteriormente àquelas da Mesopotâmia; se imagina então que a arte tenha partido daí para estender-se para o Mediterrâneo e para a Índia e a China. As maiores construções egípcias antigas foram edificadas em pedra (calcário, arenito, granito), materiais que sempre foram encontrados em grande quantidade. Entre as mais velhas pirâmides foram encontradas paredes internas construídas com tijolos secos e revestidas externamente de pedra. Na Roma antiga, os materiais de construção mais usados eram o tufo vulcânico como elemento de parede, e a pozolana como ligante.

É importante sublinhar como as construções em cerâmica vermelha têm acompanhado o desenvolvimento das várias civilizações, dando formas diversas e sugestivas às particulares impositões arquitetônicas. Os sistemas de produção da cerâmica vermelha não foram muito aperfeiçoados até o século XIX: a produção permaneceu manual, com secagem ao sol, somente nos períodos favoráveis, e a queima era executada em fornos de campanha, com tijolos amontoados. Na Europa, por um longo período, a tecnologia de produção de cerâmica vermelha seguiu aquela adotada pelos Romanos durante os séculos de suas grandes conquistas, nas modalidades de escavação, de elaboração, de secagem e de queima. A mudança teve início há cerca de duas centenas de

anos, após a introdução das primeiras máquinas motrizes a vapor (revolução tecnológica, final do século XVIII), com as quais foi possível mecanizar as operações de elaboração e conformação, e aumentar a capacidade de produção e o rendimento mecânico das instalações.

O salto de qualidade e de quantidade da produção industrial de cerâmica vermelha, que não poderia ter se firmado sem as máquinas motrizes, foi favorecido com a construção dos primeiros fornos modernos, racionalizando a produção, obtendo ao mesmo tempo uma drástica redução dos consumos térmicos. Em nenhum dos fornos precedentes se conseguia controlar e regular a alimentação do combustível e tão pouco o ar necessário à combustão. Frequentemente se verificavam temperaturas localizadas acima e abaixo do desejado, ou atmosferas muito oxidantes ou redutoras nos vários pontos do mesmo monte. É sem dúvida interessante a comparação entre um período de mais de 50 séculos de produção de cerâmica vermelha, praticamente sem inovações importantes, e os últimos 100 anos, ao longo dos quais se desenvolveu, neste campo, um enorme progresso tecnológico. [06]

2.2 TIPOLOGIA DA CERÂMICA ESTRUTURAL

Entre as produções industriais de grande série, a da cerâmica vermelha apresenta uma tipologia de elementos modulares extremamente extensa. Uma primeira grande subdivisão de tais elementos se pode estabelecer com base em sua função específica. É observado que a cerâmica vermelha nas construções geralmente é empregada nas seguintes formas:

- Tijolos e blocos para paredes;
- Telhas e cumeeiras para cobertura;
- Blocos leves para pisos.

Neste primeiro enquadramento pode-se dizer que, nos termos acima indicados, estão compreendidos muitos tipos, tendo cada um suas características particulares de forma, aptas a satisfazer não somente requisitos estéticos, mas também de resistência mecânica a vários tipos de esforços imprimidos, de proteção contra os agentes atmosféricos, de proteção térmica, etc.

Na prática industrial, uma unidade elementar, bem definida no seu emprego, recebe frequentemente na fase produtiva, acabamentos particulares que podem derivar do desejo de diferenciação do produto, de exigências locais dos construtores, ou também de necessidades particulares ou possibilidades de melhoramentos da matéria-prima.

As coberturas das construções civis são na maior parte construídas de elementos modulares de cerâmica vermelha. A Figura 02 mostra os tipos mais conhecidos de telhas produzidos em todo o mundo: a) telha colonial; b) telha francesa; c) telha holandesa; e d) telha portuguesa.

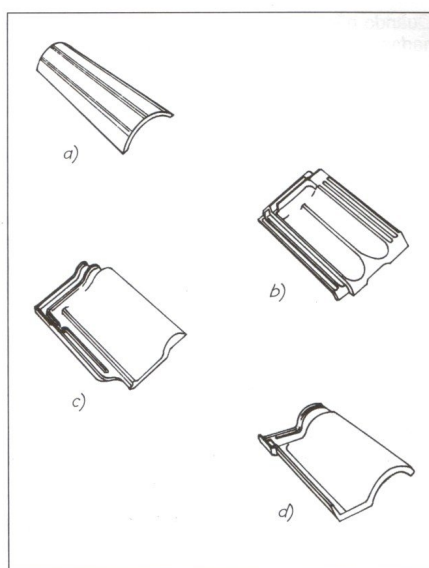


Figura 02 – Tipos mais conhecidos de telhas [06].

Diferenças fundamentais quanto a sua função primária de proteção da água da chuva, são as diversas formas construtivas que constituem composições de cobertura (águas), que podem ser variadamente apreciadas. A Figura 03 ilustra as coberturas de telhas do tipo holandesa e colonial.

Na Europa centro-setentrional, além das telhas já citadas, são produzidas telhas planas, as quais se dá o nome de "cauda de castor", muito simples como forma, empregadas para cobertura de grandes inclinações. Outros tipos característicos de algumas regiões italianas são as telhas romanas e as telhas planas toscanas.

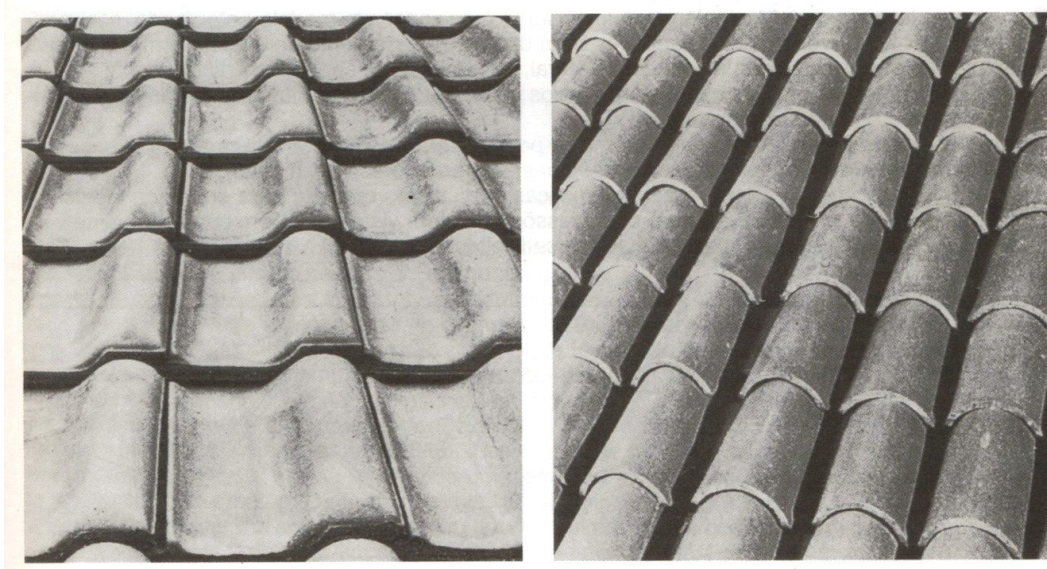


Figura 03 – Coberturas de telhas tipo holandesa e colonial [06].

As telhas são produzidas na sua coloração natural, que hoje, pode ser obtida artificialmente somente na superfície (engobe e esmaltação), na massa (aditivos corantes), ou então mediante tratamentos especiais de queima em atmosfera redutora. A esmaltação ainda pode ter função de recobrimento de proteção contra intempéries.

A gama dos tipos fundamentais das cerâmicas para cobertura se completa com peças especiais para a formação das cumeeiras a duas e três abas, dos aeradores, etc. São necessárias matérias-primas de características particulares também para o material de cobertura. [06]

2.3 REQUISITOS COMERCIAIS

Pode-se definir a qualidade da produção como a possibilidade de resposta aos requisitos expressos pelas normas de aceitação e como garantia de manutenção de tais requisitos no tempo. Consideradas as grandes produções dos modernos estabelecimentos e a diversidade de tipos, é, sobretudo, a continuidade na qualidade que requer um inteligente e assíduo empenho.

Normas particulares foram estabelecidas em muitos países para a definição dos requisitos comerciais dos produtos de cerâmica vermelha, e para codificar os métodos de verificação. Seja para os limites de aceitabilidade como para os métodos de verificação, existem notáveis diferenças entre as normas dos

vários países. No Brasil, a agência regulamentadora é a ABNT (Associação brasileira de Normas Técnicas) e traz diversas normas para cerâmica estrutural, como por exemplo, a série NBR 9598 a NBR 9602, que trata das telhas tipo capa-canal, e regulamenta sua carga de ruptura em flexão em no mínimo 100 kgf; e a norma NBR 8947, que coloca como limite máximo aceitável 20% de absorção de água.

Os requisitos comerciais da cerâmica vermelha podem ser listados como segue:

1) Aspecto.

Sob este item genérico compreende-se severas limitações para:

- Número e tipo das fissuras (superficiais, profundas, capilares);
- Número, dimensões e posições das quebras dos cantos e arestas das peças;
- Natureza e dimensões por unidade de superfície, dos furos devidos aos grânulos de óxido de cálcio;
- Conteúdo de substâncias que provocam eflorescências.

2) Resistência mecânica.

É definida por valores de limite mínimo de solicitação a ruptura por compressão e por flexão de peças inteiras ou partes de cerâmica vermelha, variando para cada espécie de produto. Para a resistência mecânica deve-se obter um conjunto de valores que dificilmente resultam iguais, de modo a determinar-se um valor médio. A redução do campo de variabilidade (dispersão) dos valores de resistência se obtém com uma boa homogeneização da matéria-prima e processamento controlado.

3) Tolerância dimensional.

A precisão absoluta nas dimensões das peças de cerâmica vermelha é impossível. São fixadas, contudo, tolerâncias sobre as dimensões lineares dos vários produtos, a fim de permitir um adequado acoplamento na obra. Sob este aspecto, são consideradas também as tolerâncias de planaridade das faces, em particular para telhas e travessões.

4) Comportamento sob a ação dos agentes atmosféricos.

Sob este aspecto se observam duas características particulares: não gelividade e impermeabilidade. A primeira é entendida como a resistência ao gelo (manutenção da integridade e resistência mecânica após repetidos ciclos de gelo e degelo, sob condições bem precisas de temperatura e tempo de permanência). A segunda define os limites da passagem de água da face superior àquela inferior de uma peça, em condições bem definidas de tempo e de espessura do batente.

5) Porosidade e peso específico

A porosidade é uma das propriedades mais importantes da cerâmica vermelha, como meio de reequilíbrio dos pontos de umidade no interior dos ambientes. Para responder aos requisitos de aceitação existem limites mínimos e máximos fixados para a porosidade, seja em relação à absorção de água seja a melhor relação cerâmica-argamassa. Por outro lado, a porosidade é um elemento importante para a determinação do peso específico do produto. [06]

2.4 MASSAS CERÂMICAS

Independentemente do sistema utilizado na produção, para a fabricação de qualquer produto cerâmico se parte de uma mistura de matérias-primas, denominada “massa”, que sofre diversas transformações físico-químicas até alcançar as propriedades necessárias ao produto acabado.

As matérias-primas são minerais ou acumulações de rochas com os quais se podem fabricar produtos cerâmicos, em seu estado natural ou com tratamento

prévio. De acordo com seu comportamento quando misturadas com água, se dividem tradicionalmente em matérias-primas plásticas (como os caulins e as argilas) e não-plásticas (quartzo e feldspato).

A composição da massa deve ser escolhida em função das características da peça cerâmica que se deseja obter, e do processo de fabricação a empregar. Portanto, a qualidade do produto dependerá totalmente da composição química da massa e do processamento da mesma. Em geral, uma massa é ideal para a fabricação de um produto cerâmico quando cumpre uma série de condições:

- A relação entre materiais plásticos (argilas principalmente) e materiais não-plásticos deve ser tal que confira à massa cerâmica a plasticidade necessária para realizar uma moldagem adequada, e a peça conformada tenha resistência mecânica suficiente, a verde e a seco;
- Se a preparação se der via úmido, deve ser facilmente defloculável;
- A massa cerâmica deve possuir uma composição química e mineralógica adequada, de maneira que as transformações físico-químicas que ocorrem no processo de queima confirmam ao produto acabado as características desejadas (coeficiente de dilatação, resistência mecânica, porosidade, etc.). Assim mesmo, a massa deve ser o mais insensível possível a variações de temperatura de queima, dentro de certos limites [03].

2.5 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO CERÂMICO

O processo de fabricação de produtos cerâmicos envolve as seguintes fases:

- Preparação da massa, a qual pode ser via seco ou via úmido;
-
-

- Conformação da peça, sendo que os processos mais utilizados são: compactação, extrusão e colagem;
- Secagem;
- Esmaltação (quando for o caso);
- Queima;
- Controle de Qualidade.

A Figura 04 mostra o esquema do processo de fabricação dos produtos cerâmicos tradicionais.

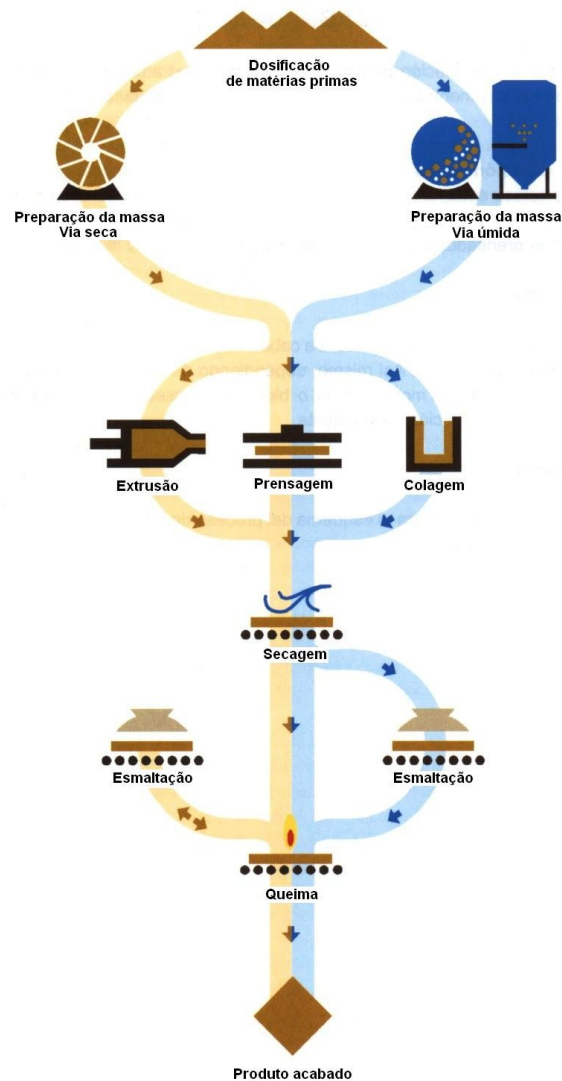


Figura 04 – Esquema geral de processamento cerâmico [03].

2.5.1 Prensagem

Prensagem é a compactação e conformação simultânea de um material granulado ou em pó, confinado em uma matriz rígida ou molde flexível. Em operações industriais de prensagem, o pó é alimentado em forma de grânulos de tamanho e deformabilidade controlados. Os grânulos contêm aditivos de processo e são comumente preparados por atomização (*spray drying*). A prensagem é o processo de conformação mais utilizado por sua produtividade e sua habilidade de produzir peças de vários tamanhos e formas, com baixa variação dimensional, praticamente sem retração de secagem. Materiais produzidos por prensagem incluem uma grande variedade de cerâmicas magnéticas e dielétricas, cerâmicas técnicas, materiais de engenharia (como ferramentas de corte e sensores refratários), revestimentos cerâmicos, porcelanas, além de produtos estruturais.

A prensagem por punção e matriz de metal duro, comumente chamada de compactação a seco, é comumente utilizada na compactação de peças maiores que 0,5mm, e peças com relevo superficial na direção de compactação. A prensagem isostática, em moldes flexíveis, é usada para peças com relevo em duas ou três dimensões, formas com uma dimensão alongada (como bastões), e produtos massivos com sessão larga.

Os estágios de prensagem a seco incluem (1) a alimentação da matriz, (2) compactação e conformação, e (3) ejeção, como mostrado na Figura 05. Note que o fluxo de grânulos chega à matriz através de um alimentador deslizante, que o nivela volumetricamente.

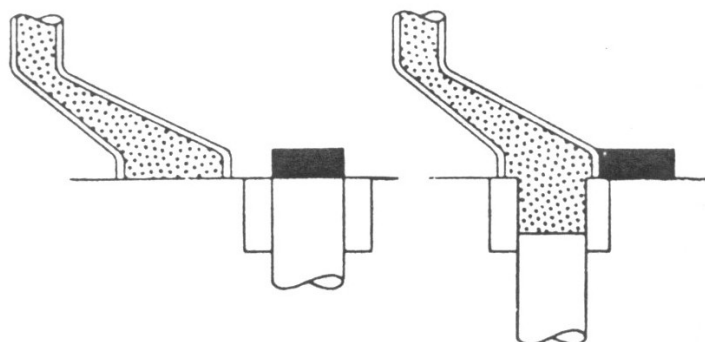


Figura 05 – Carregamento e nivelamento da matriz [11].

Os principais modos de prensagem são o de ação simples (punção inferior fixo) e o de ação dupla (ambos punções moveis). O movimento do punção e da matriz são sincronizados. O ferramental dos punções e matrizes é fabricado geralmente em metal duro, mas aços especiais e carbeto podem ser utilizados. A folga entre o punção e a matriz é de cerca de 10 a 25 μ m para pós micronizados, e 100 μ m para partículas granulares. As paredes da matriz são construídas de maneira a facilitar a extração. Peças grandes geralmente são levantadas e empurradas mecanicamente, até um coletor (esteira).

A taxa de prensagem varia de frações de segundo, para peças pequenas, a vários minutos, para peças grandes em prensas de ação simples. Em prensas múltiplas rotatórias, pode-se atingir até 5000 peças por minuto. A capacidade das prensas varia em centenas de toneladas. A máxima pressão utilizada na prensagem a seco comumente fica entre 20 e 100MPa. São utilizadas pressões maiores para cerâmicas técnicas que para argilas.

Sistemas utilizados no preparo de pós granulados por atomização geralmente contém aditivos como defloculantes, ligantes, plastificantes, ou um agente lubrificante, ou anti-espumante. O defloculante é utilizado para auxiliar na dispersão do pó e reduzir a necessidade de líquido para formar grânulos. Ligantes são adicionados em pequenas quantidades. O plastificante aumenta a deformabilidade do ligante, e reduz sua sensibilidade a umidade. Umidade geralmente atua como um plastificante secundário, e sua quantidade deve ser controlada. Um lubrificante pode ser introduzido para diminuir o desgaste do punção e da matriz, e facilitar a extração, além de facilitar uma densidade uniforme na peça prensada. O pó para prensagem deve ter fluxo livre, densidade relativa alta, composto de grânulos deformáveis, e estável em condições ambientes. As peças compactadas não devem aderir ao punção e devem ser suficientemente resistentes para resistir à extração e processos posteriores. A quantidade de ligante (umidade) deve ser a mínima possível, para facilitar sua retirada em processos posteriores.

Na prensagem a seco, a pressão produzida pelo movimento dos punções compacta o pó granulado até este formar uma peça coesa, com forma e microestrutura particulares. A taxa de densificação é alta inicialmente, mas cai rapidamente para pressões entre 5 e 10MPa. A pressão inicial é transmitida por

meio dos contatos entre grânulos. A deformação dos grânulos ocorre por escorregamento e rearranjo das partículas. Essa deformação reduz a porosidade intergranular e aumenta em número e área os contatos entre os grânulos. O ar contido nos poros migra e é parcialmente expulso entre o punção e a matriz. Uma densificação relativamente pequena ocorre acima dos 50MPa, mas ocorre desgaste do punção, ao se trabalhar com partículas cerâmicas mais duras. Pressões de compactação industriais geralmente são menores que 100MPa para cerâmicas técnicas de alta performance, e menores que 40MPa para cerâmica branca e revestimentos.

Podem ser identificadas três etapas na compactação:

Etapa 1 – fluxo e rearranjo dos grânulos;

Etapa 2 – predomina a deformação dos grânulos;

Etapa 3 – predomina a densificação dos grânulos.

Na etapa 1, ocorre o rearranjo e escorregamento dos grânulos sob uma baixa pressão, quando se inicia o contato do punção com o pó.

Na etapa 2, se inicia a deformação nas fronteiras intersticiais, quando a pressão excede a resistência do grânulo. Com isso, ocorre uma diminuição no volume vazio, principalmente nos grandes interstícios, como visto na Figura 06. É nesta etapa que ocorre a maior densificação do material.

A etapa 3 se inicia em altas pressões, quando a densificação ocorre por escorregamento e rearranjo de partículas para uma configuração mais empacotada. Idealmente, os maiores poros entre os grânulos deformados somem, e não há interfaces entre os grânulos. A alta e concentrada pressão nos contatos causa fratura de agregados e/ou partículas anisométricas que impediam uma maior densificação.

Nas etapas 2 e 3 da compactação, ocorre também compressão elástica. A energia elástica armazenada na peça compactada produz um aumento nas suas dimensões na extração, fenômeno chamado de *springback*. São necessários *springbacks* diferentes entre a peça compactada e a matriz, para possibilitar a extração. Além disso, um excessivo *springback* pode gerar problemas na

extração. O *springback* é maior para maiores pressões de compactação, mas a presença de plastificante ou umidade pode diminuí-lo.

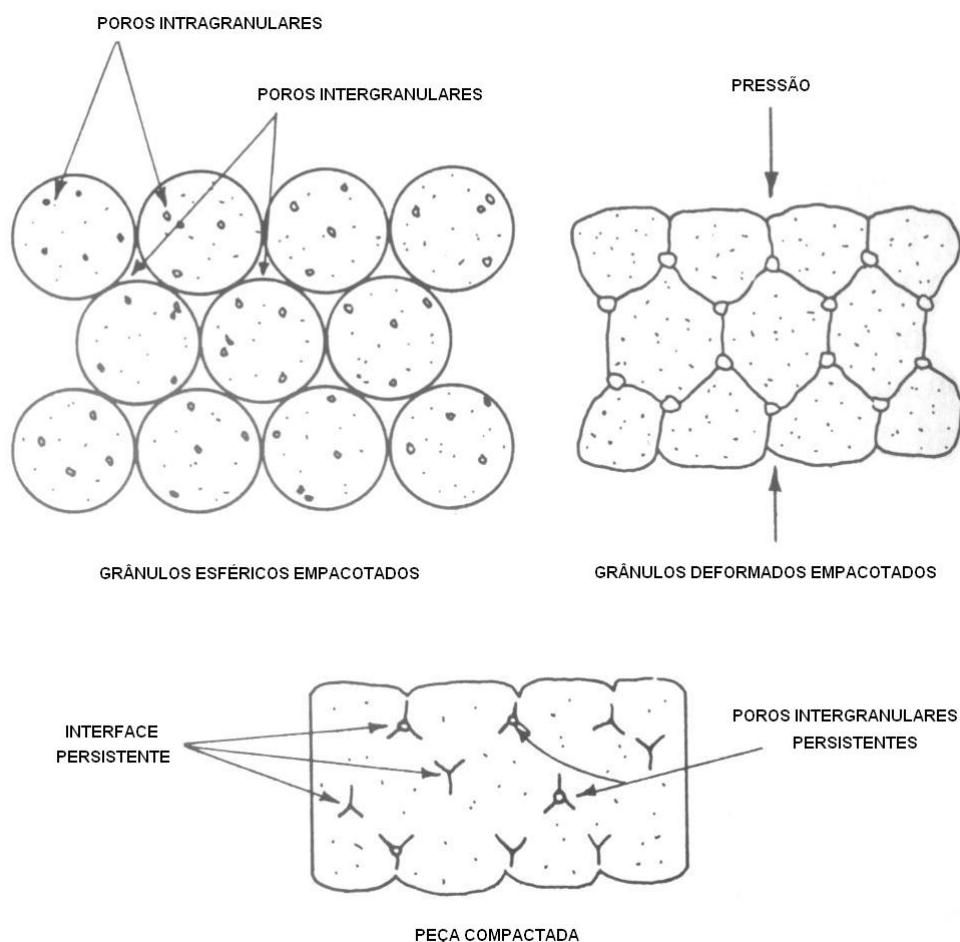


Figura 06 – Deformação e empacotamento dos grânulos [11].

A força de extração depende das condições superficiais da matriz, da deformação elástica da peça compactada, da lubrificação das paredes da matriz, e da velocidade de extração. A lubrificação diminui em 80-90% a pressão de extração, além de diminuir o desgaste das paredes da matriz. A peça compactada deve ter resistência suficiente para suportar a extração e sua transferência (normalmente empurrada pelo mesmo sistema de alimentação, até uma esteira coletora) [11].

2.5.2 Extrusão

Extrusão é a conformação pelo forçamento da passagem de uma massa plástica coesa através de um orifício em uma matriz rígida. Um extrudado linear, com uma seção central controlada, é formado, e então cortado para dar forma ao produto. A consistência plástica é obtida utilizando-se um plastificante orgânico ou inorgânico, ou ainda uma mistura dos dois. É um processo de alta produtividade, utilizado para produção em massa de produtos de tamanhos variados, desde pequenas peças, até produtos com mais de 1Ton. São produzidos por extrusão produtos de construção civil, como tijolos e telhas, refratários (tubos de proteção de termopares, tubos para trocadores de calor), peças para fornos, isoladores elétricos de porcelana, substratos magnéticos e eletrônicos, suportes de catalise celulares tipo “*honeycombs*”, entre outros. Substratos podem ser extrudados em espessuras menores que 1mm. Corpos extrudados podem ser reconformados em processo posterior, por moldagem ou prensagem plástica.

O material plástico de alimentação da extrusão é normalmente preparado por mistura das matérias-primas e aditivos em um misturador de cisalhamento. Um ligante em pó é normalmente misturado aos materiais cerâmicos, e então o líquido é adicionado, até atingir uma mistura viscosa plástica. A homogeneização final do material pode se dar durante o processo de extrusão, na seção de alimentação, no caso de extrusoras de rosca dupla.

Feita a alimentação, o material é extrudado por um pistão, uma rosca simples ou um sistema de rosca dupla, através da matriz (boquilha). O produto extrudado, após o corte, pode ser utilizado como material de alimentação em um novo processo de conformação, seja uma nova conformação plástica (prensagem, por exemplo), ou conformação a seco (secagem e posterior usinagem), para atingir sua forma final.

Os estágios da extrusão, como vistos na Figura 07, são (1) alimentação, (2) consolidação e fluxo de alimentação do material, (3) fluxo através de uma matriz com orifícios, (4) fluxo através de uma matriz de seção constante, utilizando vácuo, e (5) ejeção.

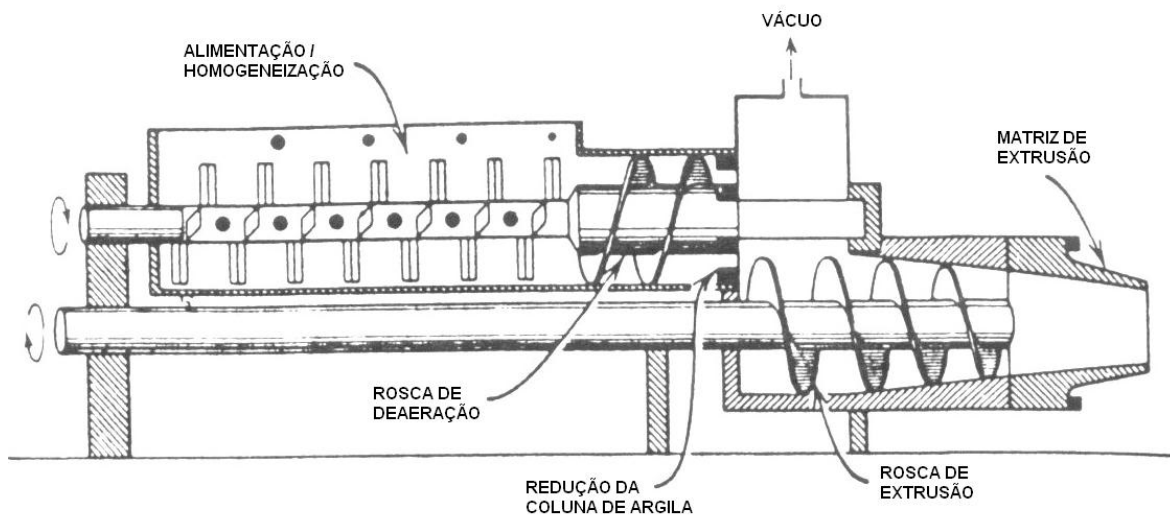


Figura 07 – Extrusora [11].

Nas extrusões industriais, a pressão pode variar de 4MPa, para porcelanas, a 15MPa, para alguns materiais plásticos. A capacidade de produção varia, dependendo do tamanho do produto, mas pode atingir até 100Ton/h, para produtos grandes. Uma velocidade de extrusão de 1m/min é comum para muitos produtos [11].

2.5.3 Secagem

Secagem é a remoção de líquido de um material poroso por meio de transporte e evaporação em um gás insaturado no ambiente ou, em alguns casos, em líquido dissecante. É uma importante operação anterior à queima, em materiais que contenham umidade, como os conformados por prensagem ou extrusão. A evaporação dos líquidos de processo é relativamente intensa energeticamente, e a eficiência de secagem é sempre uma consideração importante. A secagem deve ser controlada cuidadosamente, pois tensões produzidas por diferentes retrações ou pressões de gás podem causar defeitos no produto.

O custo de secagem é fator significativo no preço de venda de minerais industriais, e a secagem natural, ao sol e ao vento, é utilizada na extração e estoque de matérias-primas. Materiais processados a úmido são secos normalmente em secadores rotativos, tipo torre ou túnel. Quanto maior a

quantidade de fase líquida presente em um corpo conformado, durante a secagem, maior o gasto energético na sua retirada, maior a retração na secagem, e maior o cuidado necessário para que não ocorram defeitos e falhas de tamanho e forma [11].

2.5.4 Queima

Produtos que foram conformados, geralmente chamados de “produtos verdes”, após a secagem, passam por um tratamento térmico em fornos, para sua sinterização e desenvolvimento de microestrutura e propriedades desejadas. Esse processo, chamado de queima, procede em três estágios: 1) reações preliminares, que incluem a queima de material orgânico e a eliminação de produtos gasosos de decomposição e oxidação; 2) sinterização; e 3), resfriamento.

“Sinterização” é o termo utilizado para descrever a consolidação do produto durante a queima. A consolidação implica na junção das partículas em agregados resistentes. O termo sinterização também é interpretado como a retração e densificação que ocorrem nesta etapa [11].

2.6 COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TELHAS

2.6.1 Extrusão e Forno-Túnel

A massa devidamente fragmentada, homogeneizada e hidratada segue para a etapa de conformação por extrusão, onde a massa é forçada através de uma matriz (boquilha) para formar uma lâmina contínua de seção constante que pode ser recortada em tamanhos definidos originando as peças definitivas. A extrusora ou maromba, a máquina responsável por este processo, é composta basicamente por uma estrutura em ferro fundido e aço, um motor para o acionamento e uma bomba de vácuo situada na câmara de extrusão, esta por sua vez retira o ar presente na massa o que possibilita uma boa compactação da mesma.

Antes de seguir para a etapa de queima o produto deve passar pela secagem. Na cerâmica vermelha, como o material possui entre 18 a 25% de umidade ao sair da maromba, deve antes passar pela secagem natural, onde fica exposto ao ambiente para retirada da umidade superficial. Posteriormente o material segue para a secagem forçada (em secador). A secagem deve ocorrer de forma gradual e controlada, evitado o aparecimento de trincas provocado pela difusão incorreta da umidade no interior das peças.

A queima dos materiais cerâmicos, não implica simplesmente em elevar a uma determinada temperatura, mas também monitorar e controlar a velocidade de aquecimento, de resfriamento e o tempo de permanência na temperatura máxima (patamar de queima). Na fabricação dos produtos em cerâmica vermelha a queima comumente ocorre em fornos intermitentes ou fornos contínuos.

Os fornos intermitentes são classificados desta maneira devido à característica particular de sua produção ser por bateladas. Estes fornos possuem um ciclo composto das seguintes etapas: carregamento; aquecimento; queima; resfriamento; e descarregamento. Por ser necessário seu carregamento e descarregamento, sua produtividade é baixa.

Os fornos contínuos, chamados túneis, possuem três seções: preaquecimento, queima e resfriamento. O transporte da carga de peças cerâmicas a serem queimadas é realizado por meio de vagonetas especiais ou esteiras móveis, acionados através de sistema hidráulico. O combustível geralmente utilizado é serragem. Os ciclos de queima que normalmente se adotam em fornos túneis podem variar de 16 a 48 horas, de acordo com o tipo de forno e as características das peças a produzir [04], [07-08].

2.6.2 Compactação e Forno a Rolo

No processo de compactação a seco, a massa, em pó, com umidade em torno de 6%, é compactada em uma prensa hidráulica, o que lhe dá certa resistência mecânica, mesmo antes da secagem. O processo de compactação a seco permite maior precisão no formato do produto, além de facilitar o trabalho com reentrâncias, como é o caso das telhas.

Por apresentar uma baixa umidade, comparado ao processo de extrusão, a etapa de secagem torna-se mais simples e rápida, ou seja, maior produtividade com menor custo. A secagem se dá em um secador a rolo, com queimadores de gás natural, ou mesmo utilizando a temperatura do ar retirado da queima. Geralmente um ciclo de 60 min a 150°C é suficiente para deixar o biscoito com umidade abaixo de 0,5%.

A seguir, a queima se dá em fornos a rolos, onde o biscoito é transportado por rolos cerâmicos ligados a um motor, com queimadores acima e abaixo, alimentados com gás natural. O forno é dividido em setores de aquecimento, queima e resfriamento. Como, diferentemente do forno a túnel, não apresenta partes móveis para carregar o material a ser queimado, sua produtividade é maior, com conseqüente consumo energético menor. Em geral, o ciclo de queima utilizado não passa de 1,5 horas.

Em comparação com o processo tradicional, como resultado do processo, tem-se um produto com menor espessura, mantendo a resistência mecânica, permitida pela compactação de pós. O produto com menor espessura tem peso menor, estabilidade dimensional maior (melhor compactação e queima mais homogênea e constante), e menor porosidade (ou seja, menor absorção de água, e maior resistência ao congelamento). O consumo de gás natural necessário para secar e queimar a mesma quantidade de massa é menor.

2.7 DEFORMAÇÃO PIROPLÁSTICA

Segundo Del Roveri et al, a deformação piropoplástica pode ser definida como a descaracterização da forma do produto ocorrida durante a queima. Sua origem está relacionada com o excesso de fases líquidas que se formam no produto durante a queima, ou mesmo com a viscosidade reduzida das mesmas.

Durante a condução das peças no forno, através de rolos refratários, é possível que a peça venha a curvar-se para acompanhar a rotação dos rolos, visto que a mesma encontra-se submetida ao esforço vertical aplicado pelo seu próprio peso. Em conseqüência, começam a surgir problemas de empeno no produto acabado. A deformação piropoplástica ocorre mais frequentemente em

massas altamente vitrificadas, tais como as massas de grês e grês porcelanato [05].

A magnitude da deformação piropoplástica é determinada pelo índice de piropoplástico (IP), e indica a tendência à deformação de um corpo de prova de dimensões determinadas submetido à ação da força de gravidade durante a queima sob condições específicas. O procedimento usado para determinar o índice de piropoplástico consiste na medida da flecha de curvatura de um corpo de prova queimado sobre dois suportes refratários, separados por uma distância determinada, conforme mostra a Figura 08.

$$IP = \frac{4 \times h^2 \times S}{3 \times L^4} \quad [1]$$

A equação 1 é utilizada para a determinação do IP, onde IP é o índice de piropoplástico (cm^{-1}), h é a espessura do corpo (cm), S é a flecha de deformação medida pela deflexão do corpo de prova (cm) e L é a distância entre os apoios refratários (cm) [02].

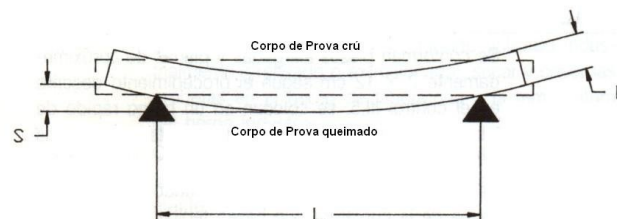


Figura 08 – Esquema do ensaio de piropoplástico [02].

Na Figura 09 (a, b e c), pode-se observar corpos de prova após o ensaio de piropoplástico. O índice de piropoplástico calculado para os três ensaios é respectivamente: 0, $1,0 \times 10^{-5}$ e $3,0 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$.

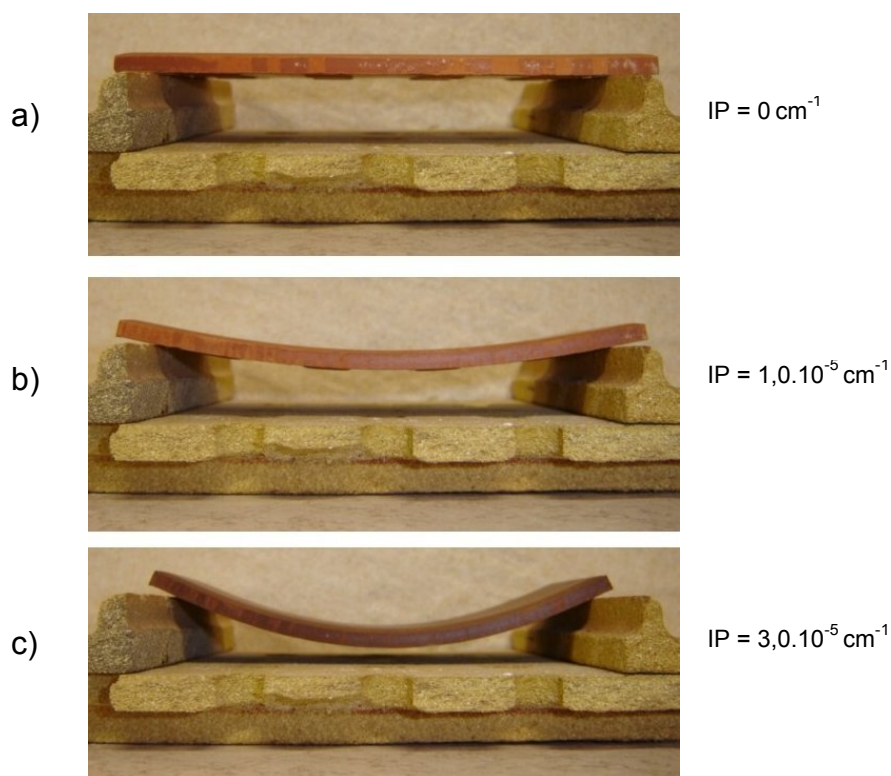


Figura 09 – Ensaio de piroplasticidade [09], [10].

Ainda segundo Del Roveri et al, a deformação piropoplástica se desenvolve em função da vitrificação do corpo cerâmico durante a queima. Conforme se aumenta a temperatura das peças no interior do forno, há um aumento gradual da quantidade de fases líquidas formadas. Estas fases se desenvolvem em razão da fusão parcial dos componentes mais fundentes da massa. À medida que a temperatura aumenta, os componentes mais refratários vão sendo progressivamente dissolvidos pelas fases líquidas, fazendo com que o volume das mesmas aumente consideravelmente. A Figura 10 ilustra o efeito da temperatura de queima sobre o índice de piroplasticidade de uma massa industrial utilizada para a fabricação de revestimentos semi-gresificados. Observa-se que ocorre o aumento da deformação piropoplástica em função da temperatura de queima em todo o intervalo de temperaturas utilizado. Além da temperatura na zona de queima, a velocidade de aquecimento e o tempo de permanência das peças na temperatura máxima são variáveis que também podem exercer influência sobre a deformação piropoplástica, pois esta depende do trabalho térmico a que a peça é submetida.

Considerando o processo de vitrificação que ocorre durante a queima, observa-se que a deformação pirolástica só começa a se manifestar de maneira pronunciada quando se atinge elevados graus de vitrificação. A Figura 11 exemplifica este efeito, através da avaliação da deformação pirolástica em função da absorção de água de uma massa de semi-grês. Enquanto a absorção de água do produto é superior a 2,0%, ocorre um aumento lento e gradual da deformação pirolástica à medida que se reduz a absorção de água do produto. No entanto, quando o grau de vitrificação torna-se elevado (absorção de água inferior a 2,0%) ocorre um aumento drástico da deformação pirolástica. Produtos que apresentam este grau de vitrificação requerem um cuidado especial na fabricação para se evitar a distorção do formato das peças. Em produtos de absorção de água mais elevada, a preocupação é menor, visto que a deformação pirolástica se manifesta de maneira mais branda, entretanto também pode ocorrer. Na fabricação de produtos de baixa porosidade (grês porcelanato, semi-grês), o aumento da compactação da massa é uma alternativa interessante para a minimização da deformação pirolástica.

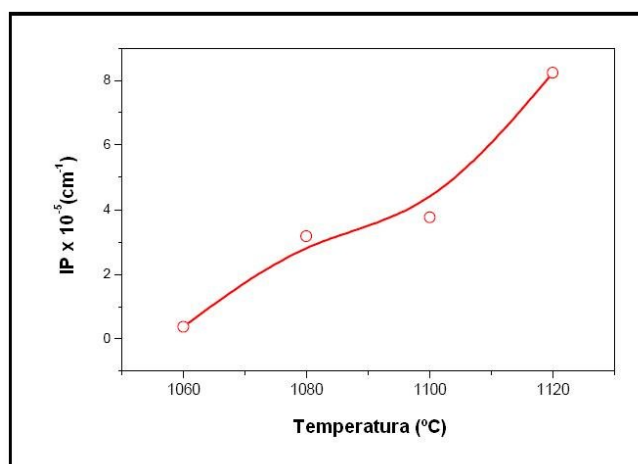


Figura 10 – Índice de pirolasticidade em função da temperatura de sinterização [05].

Conforme se verifica através da Figura 11, as peças que apresentam densidade mais elevada antes da queima favorecem a obtenção de um produto de mesma absorção de água, porém com uma deformação pirolástica inferior. As peças de maior densidade aparente possuem um menor volume de poros antes da queima e, portanto, necessitam de uma quantidade menor de fases líquidas para atingir a absorção de água desejada. Neste sentido, em produtos

gresificados, deve-se objetivar a obtenção da densidade aparente mais elevada possível durante a conformação e estabelecer um controle rigoroso do processo para se evitar variações da compactação da massa, visto que o formato do produto pode ser altamente comprometido.

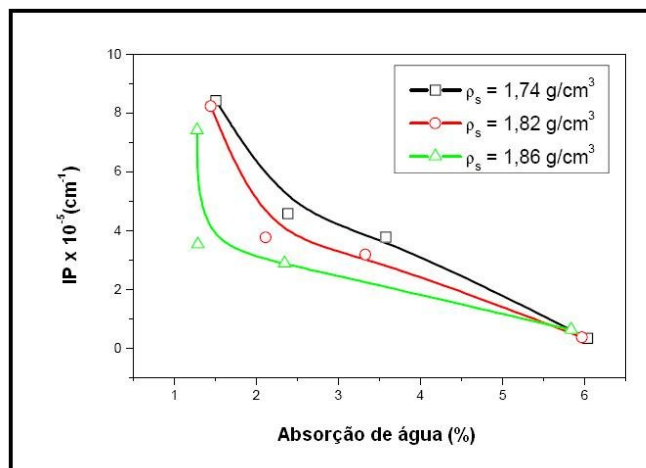


Figura 11 – Índice de piroplasticidade em função da absorção de água [05].

De maneira análoga, a distribuição de tamanho de partículas da massa também influencia o desenvolvimento da deformação piroplástica. Seus efeitos afetam a velocidade de vitrificação do produto e podem influenciar também a viscosidade das fases líquidas formadas. Assim, as conseqüências da variação da granulometria da massa sobre a deformação piroplástica estão diretamente ligadas às particularidades de cada composição. De qualquer forma, o controle do teor de resíduo da massa assume particular relevância na fabricação de produtos gresificados para impedir a descaracterização de seu formato [05].

2.8 ENSAIO DE CONGELAMENTO

A porosidade aberta (intercomunicante) do material após a queima causa absorção de água. Sabe-se que a água, de 4 a 0°C, sofre uma dilatação volumétrica, da ordem de até 9%. Portanto, quando exposta às baixas

temperaturas, existe o risco da abertura de trincas causadas por essa expansão volumétrica da água absorvida na porosidade do material. As condições de conformação e queima são fatores que influenciam na característica de resistência ao congelamento, pois alteram a porosidade (e a absorção de água) e a resistência mecânica do material.

O ensaio de congelamento tem por objetivo avaliar a resistência do corpo cerâmico nesse aspecto. O material, com seus poros devidamente preenchidos com água (amostras saturadas de umidade), é exposto a ciclos de temperatura, variando entre a temperatura ambiente e temperaturas relativamente baixas, permanecendo por um certo tempo em cada uma delas. Normalmente, a parte fria do ciclo se dá a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 6,5 horas; e temperatura ambiente pelo mesmo tempo. Para telhas, o ideal é que resista no mínimo a 50 ciclos, o que caracterizaria uma boa resistência ao congelamento, adequando-se aos padrões internacionais.

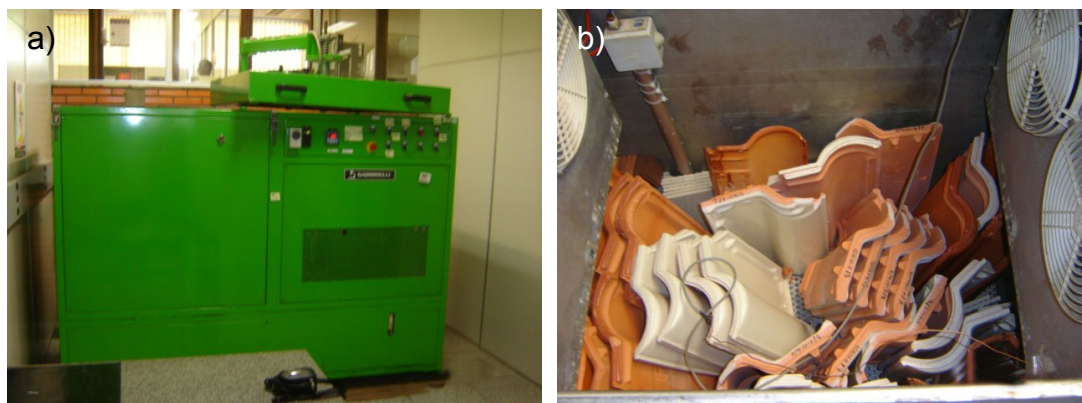


Figura 12 – a) Câmara de resfriamento para ensaios de congelamento; b) disposição das amostras úmidas dentro da câmara de congelamento.

3 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido envolveu duas etapas principais: a etapa de seleção e caracterização da composição a ser utilizada na fabricação das telhas, etapa laboratorial; e a etapa do processo piloto de fabricação das telhas, em escala semi-industrial, seguida da caracterização do produto final. A etapa de seleção e caracterização da composição envolveu a definição dos parâmetros e a caracterização das matérias-primas, enquanto a etapa de processo industrial piloto utilizou os dados obtidos em laboratório para definir os parâmetros de fabricação das telhas, bem como caracterizar as telhas obtidas, visando a verificação da sua qualidade. Envolveu ainda, de forma paralela, o desenvolvimento do desenho otimizado da telha, e o projeto e fabricação dos equipamentos de compactação, que foram etapas paralelas ao projeto, que serão citados aqui para melhor compreensão do trabalho como um todo.

Todas as argilas, matérias-primas e esmaltes utilizadas nos trabalhos foram fornecidas por indústrias do setor cerâmico do estado de Santa Catarina, onde são utilizados na fabricação de revestimento cerâmico e cerâmica estrutural.

3.1 PROJETO DO PRODUTO E DOS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO

A etapa de projeto das telhas e de projeto e fabricação dos equipamentos de compactação (conjunto estampo / matriz) foi realizada com o auxílio da agência de design cerâmico A2D (projeto e design da telha) e da empresa Icon S.A. (projeto e fabricação dos equipamentos).

O projeto das telhas teve início com a contextualização do problema, seguida pela construção de um referencial teórico (pesquisa de produtos similares, restrições de projeto, levantamento das necessidades, utilizando a ferramenta QFD para determinar as especificações de projeto), e o desenvolvimento do projeto em si, finalizando com a construção de protótipos.

Após essa etapa, e utilizando as informações geradas pelo projeto da telha, foi projetado e fabricado o conjunto estampo / matriz, estando pronto para iniciar os testes industriais.

3.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO E SELEÇÃO DA MASSA

Na etapa de seleção, foram utilizadas duas diferentes argilas: Massa A e Massa B, de diferentes fornecedores, ambas provenientes de moagem a seco, e recebidas com umidade em torno de 8%. A definição dos parâmetros utilizados nos ensaios de caracterização laboratorial para seleção da argila a ser utilizada na compactação de telhas foi feita buscando a aproximação das condições utilizadas em fábrica para cada uma delas, priorizando economia energética e produtividade. A diferença das condições para as diferentes argilas é justificada pelo conhecimento prévio do processamento de cada uma delas, e pelas informações recebidas das empresas que as forneceram.

Quadro 01 – Parâmetros laboratoriais de compactação e queima para as massas A e B.

	Pressões de Compactação	Temperaturas de Queima
Massa A	20, 30, 40 MPa	900, 950, 1000, 1050, 1100°C
Massa B	25, 30 MPa	1000, 1050, 1100, 1150°C

Além disso, em um segundo momento, buscando-se mais uma alternativa para sanar o problema da deformação piropoplástica, o objetivo foi a correção do fenômeno de piropoplaticidade com a mudança na composição, inserindo um material refratário à matéria-prima. A massa B recebeu diferentes cargas de material refratário: 10 e 20% em peso. O material refratário escolhido foi um caulim, dado o ponto de fusão teórico deste material, o que diminuiria a retração e, conseqüentemente, a viscosidade da fase líquida formada durante a queima, evitando a deformação piropoplástica.

Quadro 02 – Parâmetros laboratoriais de compactação e queima para as massa B modificada.

	Pressão de Compactação	Temperaturas de Queima
Massa B modificada	30 MPa	1000, 1050, 1100, 1150°C

A etapa de caracterização das massas envolveu características da matéria-prima, sinterização, resistência mecânica e ao congelamento, e piropoplaticidade. Foram realizados, na matéria-prima como recebida, ensaios de granulometria (Distribuição de Tamanho de Partículas via Laser, utilizando o equipamento

CILAS 1064) e análise química (utilizando espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de onda Philips PW2400 com tubo de raios X de 3 kW e alvo de ródio).

Foram compactados corpos de prova nas condições de compactação determinadas, com a umidade como recebido (8%), buscando reproduzir as condições industriais de utilização da mesma. Na compactação foi utilizada uma prensa de laboratório Gabrielli L4/110A. Após a secagem dos corpos de prova, o material foi levado a ciclos de queima, nas temperaturas definidas, mantendo 10 minutos de patamar, em forno a rolo elétrico laboratorial Nanneti ER-15. O comportamento de sinterização do material foi avaliado através de ensaios de retração térmica linear de queima, perda ao fogo, absorção de água e módulo de resistência à flexão (três pontos), utilizando a máquina de testes Emic DL2000 com célula de carga de 50kgf. Além disso, o material foi avaliado quanto a sua resistência ao congelamento, em uma câmara de congelamento Gabrielli.

Nas mesmas temperaturas em que foram realizadas as sinterizações, foram realizados ensaios de piroplasticidade, utilizando um forno-mufla Servitech, de ciclo rápido, com patamar de 5 minutos (procedimento normalizado).

3.3 PROCESSO PILOTO DE FABRICAÇÃO

Os testes de produção industrial piloto foram realizados nas dependências do Senai-SC / CTCmat – Centro de Tecnologia em Materiais, em Criciúma-SC. A empresa mantém uma planta piloto industrial cerâmica, provida dos seguintes equipamentos, utilizados nos testes de produção:

- Prensa SACMI 550 ton, equipada com conjunto alimentador e conjunto estampo - matriz Icon S.A. desenvolvidos exclusivamente para o projeto. A operação da prensa foi feita de maneira semi-manual.

- Secador a rolos Icon S.A. de 5 metros, alimentado com gás natural, composto de dois queimadores com controles separados. A abertura do secador permite a passagem de quatro telhas em paralelo, e sua carga total é de 52 telhas.

- Forno a rolo Icon S.A. de 17 metros, alimentado com gás natural, composto de oito pares de queimadores (quatro superiores e quatro inferiores) com controles independentes. A abertura do forno permite a passagem de duas telhas em paralelo, e sua carga total é de 60 telhas.

A partir dos ensaios de caracterização laboratorial realizados, foi selecionada a massa a ser utilizada nos testes de produção piloto. Além disso, através dos dados obtidos na caracterização e das características dos equipamentos utilizados no processo piloto de fabricação, foram selecionados os parâmetros de produção das telhas.

A compactação foi realizada com umidade de 8%, e pressão de compactação de 30MPa. A prensa foi configurada para que as telhas apresentassem espessura de 12mm e massa de 3,5kg.

Após o processo de compactação, as telhas passavam pela etapa de secagem, de onde saíam com umidade máxima de 0,5%. O ciclo de secagem utilizado foi de 165°C por 60 minutos, baseando-se no ciclo de secagem utilizado industrialmente e nas características do secador utilizado.

Do secador, as telhas seguem para o forno. As curvas de queima utilizadas foram selecionadas através das curvas de sinterização encontradas na caracterização da argila, e ajustadas às capacidades de aquecimento e resfriamento do forno a rolo, com setores de aquecimento, sinterização e resfriamento. Para a massa B, foram realizadas queimas utilizando duas diferentes curvas de queima, visando avaliar a qualidade do produto final em relação às diferentes condições de queima. As temperaturas de patamar utilizadas foram 1020°C e 1050°C. O ciclo total de queima utilizado foi de 65 minutos.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO ACABADO

Após o teste de produção piloto, as telhas produzidas foram encaminhadas para caracterização, para verificação da qualidade.

Comparando as telhas antes e após a queima, foram avaliados a retração térmica linear de queima e a deformação piropástica sofrida durante a queima. A

resistência mecânica à flexão das telhas foi medida por ensaio de flexão em 3 pontos, utilizando a máquina de testes Emic DL2000. Porém, como a telha apresenta um perfil complexo, se faz necessária a preparação do corpo de prova, utilizando apoios feitos em cimento, para cada telha. Além disso, o material foi avaliado quanto a sua absorção de água, e a sua resistência ao congelamento, em uma câmara de congelamento Gabrielli.

Nesse caso, dada a complexidade da forma do produto acabado, foi tomada como medida aproximada da deformação pirolástica a diferença percentual na altura do ponto mais alto da elevação da telha, antes e depois da queima, para uma mesma peça.

Para os ensaios de resistência mecânica (carga de ruptura por flexão em três pontos) e absorção de água, a norma brasileira ABNT NBR 15310 especifica as condições mínimas de qualidade para as telhas. Para a absorção de água, o limite máximo admissível é de 20%. Para a carga de ruptura por flexão a três pontos, o limite mínimo admissível é de 1000N, ou 100kgf.

3.5 TESTES DE ESMALTAÇÃO

Após o desenvolvimento do processo de fabricação de telhas por compactação de pós e queima em forno a rolo, foram realizados alguns ensaios de esmaltação, primeiro em laboratório, depois em escala piloto de produção. O esmalte utilizado, fornecido por empresa parceira, é utilizado industrialmente.

Em um primeiro momento, foram realizados ensaios de aplicação de esmaltes em corpos de prova da massa B. Foram aplicados: a) engobe e esmalte brilhante branco; b) engobe e esmalte mate branco; e c) engobe e esmalte mate verde. A aplicação foi feita por spray, utilizando cabine equipada com pistola de ar comprimido. A queima foi realizada na temperatura de 1020°C, temperatura para qual foram desenvolvidos os esmaltes, em forno a rolo elétrico laboratorial Nanneti ER-15.

Após verificações visuais de qualidade, foram definidos os melhores resultados, e aplicados em telhas, para ensaio piloto. Foram realizados testes e telhas com aplicações de a) engobe e esmalte mate branco; e b) engobe e

esmalte mate verde. A aplicação foi feita por spray, utilizando cabine equipada com pistola de ar comprimido. A queima foi realizada na temperatura de 1020°C, em forno a rolo semi-industrial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROJETO DO PRODUTO E DOS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO

A etapa de projeto das telhas e de projeto e fabricação dos equipamentos de compactação (conjunto estampo / matriz) foi realizada com o auxílio da agência de design cerâmico A2D (projeto e design da telha) e da empresa Icon S.A. (projeto e fabricação dos equipamentos). As etapas deste trabalho serão mostradas aqui de forma sucinta.

a) Projeto Informacional - Caracterização do problema e contextualização

No segmento de cerâmica estrutural destaca-se a produção de tijolos, telhas e pisos por extrusão, entre outros. Com exceção das telhas, os demais produtos deste segmento pouco se diferenciam. A qualidade é muito semelhante e suficiente para a exigência do mercado. Entretanto, na maioria das vezes, são dezenas de empresas em uma mesma região, produzindo os mesmos produtos e disputando o mesmo mercado. Além da falta de padronização, não existe um diferencial por qualidade ou adequação do produto a um segmento de mercado específico. Este segmento é responsável por um valor de produção que ultrapassa a cerâmica de revestimento. No entanto, pouco deste valor provém de exportação, que só ocorre próximo às fronteiras. A logística inviabiliza este tipo de operação por se tratar de um produto de baixo valor agregado, baixo custo e com grandes exigências para o transporte. O alcance destes produtos é de um raio médio de 250km. Acima disto, apenas as telhas que, no entanto, não superam a marca dos 700km.

Para proporcionar um aumento nas vendas e nos lucros do setor, é necessário investir não só em melhores condições de produção, mas também, posicionar-se no mercado, propondo inovações e estudando melhor o mercado para melhor atender suas necessidades. Com isso, é necessário agora, para o desenvolvimento de novas telhas cerâmicas, levantar as suas condicionantes de produção e também de aceitação de mercado, estudando os produtos concorrentes e avaliando os critérios de escolha do produto nos pontos de venda.

Essas informações permitiram estabelecer requisitos e critérios de qualidades que orientarão o desenvolvimento das telhas.

b) Construção do referencial teórico - Pesquisa de produtos similares

Nesta etapa do projeto, foi desenvolvida uma extensa pesquisa de produtos concorrentes, não só de cerâmica, mas de todos os produtos que se destinam ao mesmo fim. Foram estudados produtos em cerâmica, vidro, acrílico, concreto, entre outros, avaliando seu desempenho, rendimento, fatores de uso e instalação e também fatores estéticos e de aceitação no mercado.

A grande maioria dos produtos em cerâmica, segundo a pesquisa desenvolvida, era dos modelos romana e portuguesa, com desenhos bastante similares. Inicialmente, constatou-se, na região, a maior aceitação por parte dos consumidores por estes dois modelos. Alguns fatores que contribuíram para isso são referentes às condições de instalação, exigindo uma única peça para executar todo o telhado; seu rendimento que varia de 16 a 17 telhas/m²; e melhor resposta às preferências estéticas.

As telhas cerâmicas, em lugares mais frios ou com ocorrências de neve não são muito utilizadas. Este fato dificultou a análise de produtos similares para estas regiões.

Com isso, definiu-se que a telha a ser desenvolvida deveria apresentar suas soluções em única peça (capa e canal juntas), acompanhando a proposta estética das telhas Romana e Portuguesa, tendo rendimento superior a 15 telhas/m².

c) Restrições do processo

Com a adoção da tecnologia de compactação de pós e queima em forno a rolo para cerâmica estrutural, são necessárias algumas adaptações nos produtos para que sejam factíveis. Desta forma, as limitações técnicas foram levantadas a fim de estabelecer requisitos para a etapa de desenvolvimento.

O forno a rolos, usado normalmente para queima de peças planas, possui uma zona de aquecimento, outra de queima e outra de resfriamento. Em geral, a

altura da entrada de material não ultrapassa 4,5 cm e sua largura é variável. Com isso, um dos principais requisitos é a altura máxima da peça não queimada de 4,5 cm. Além disso, a peça não poderá possuir grandes saliências ou reentrâncias na parte inferior que terá contato com os rolos do forno. Isso para evitar que as peças fiquem presas enquanto percorrem o interior do forno. Outro ponto importante é considerar as distâncias e diâmetro dos rolos para projetar os encaixes das telhas. E, por último, o item mais crítico, a telha não poderá apresentar nenhuma parte suspensa, isto é, sem apoio nos rolos do forno, porque durante a queima a cerâmica sofre deformação pirolástica e isso resultará em deformação na peça acabada.

Ainda quanto ao processo de produção, espera-se esmaltar estas telhas para monoqueima, assim, a parte esmaltada não deve ter contato com os rolos do forno. Além disso, é conveniente que o desenho dispense o uso de moldes ou suportes refratários, minimizando as operações durante a produção.

Quanto à embalagem e transporte, para alcançar o melhor desempenho é necessário que o desenho das telhas permita que sejam empilhadas sem causar o efeito sanfona, o que aumenta o espaço necessário para transportar a mesma quantidade de peças.

Por outro lado, o processo de conformação permite maior qualidade das peças, possibilitando encaixes mais precisos, reduzindo as tolerâncias dimensionais. Isso proporcionará maior capacidade de vedação das peças e uma altura menos dos labirintos (partes do encaixe) da telha.

d) Levantamento das necessidades

Para levantar as necessidades de todos os clientes considerados no processo: internos (referente à linha de produção); intermediários (embalagem, transporte e vendas); e externo (consumidores finais e instaladores); foram feitas entrevistas com especificadores, produtores e projetistas. Com isso, as necessidades levantadas estão no Quadro 03, a seguir:

Com esses dados levantados, aplicou-se a técnica de QFD (Desdobramento da Função Qualidade), visto no Quadro 04, onde se procura indicar requisitos da qualidade que orientem a solução ou respondam a cada uma das necessidades levantadas. Esses requisitos são verificados quanto ao atendimento das necessidades e é estabelecido um valor de relação que permite priorizar os requisitos. Isso oferece ao projetista uma indicação de prioridades de requisitos de qualidade do projeto.

e) Especificações do projeto

Como resultado do QFD, foram selecionados os seis critérios considerados mais relevantes:

Quadro 05 – Critérios mais relevantes

Telhas compostas	Paredes de mesma espessura
Não possuir pinos ou reentrâncias que possam travar as peças nos rolos	Evitar a necessidade de pregos ou parafusos
Respeitar altura máxima de 4cm	Evitar saliências de mais de 1cm

Estas recomendações foram seguidas, gerando as alternativas propostas conforme é apresentado na próxima etapa.

f) Projeto Conceitual, Projeto detalhado e Prototipagem

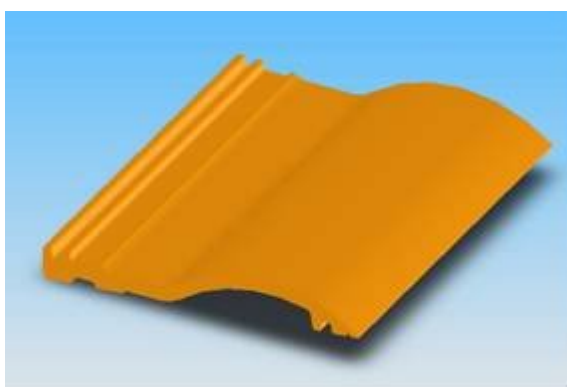


Figura 13 – Telha com uma capa e encaixe duplo.

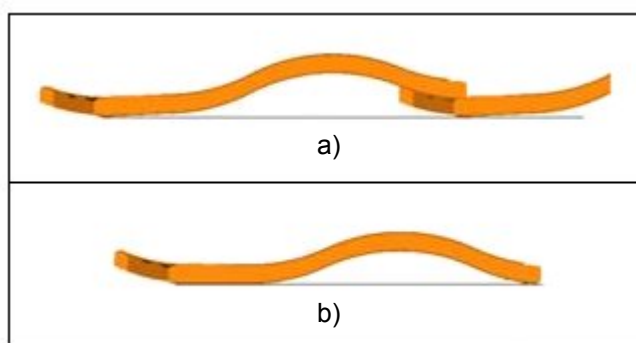


Figura 14 – Perfil do modelo com eixo de instalação e queima diferenciados: a) posição de montagem da telha no telhado, b) posição de passagem da telha no forno.

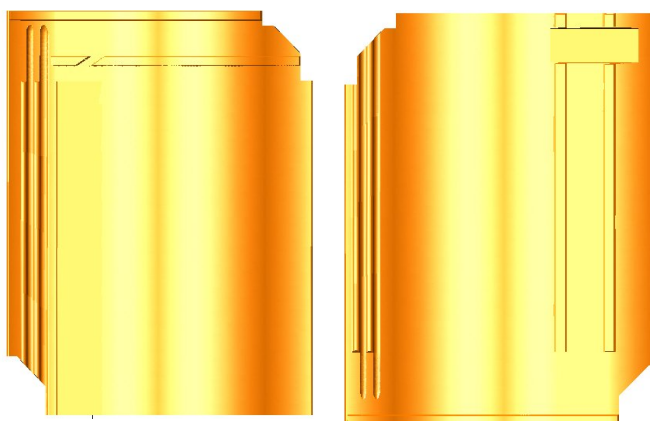


Figura 15 – Vistas superior e inferior (detalhe dos encaixes).

A alternativa selecionada foi considerada a mais adequada para atender as necessidades identificadas no projeto. O desenho da alternativa selecionada foi encaminhado para a prototipagem em gesso e depois a produção em cerâmica.

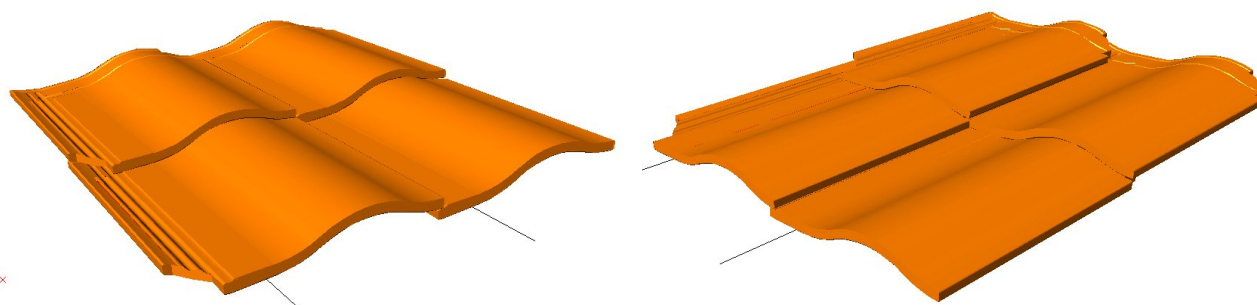


Figura 16 – Perspectivas da montagem de um telhado com a alternativa selecionada

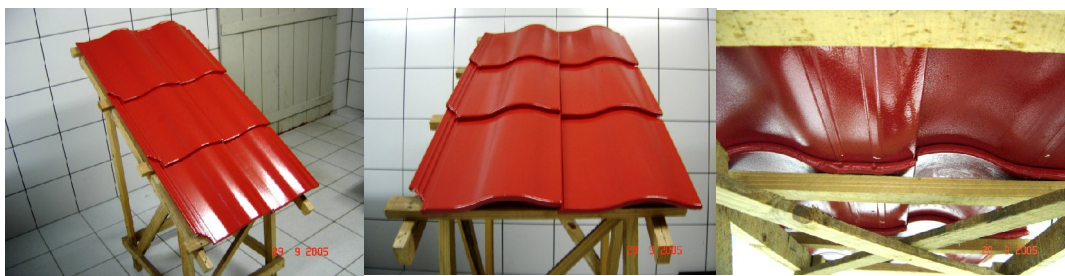


Figura 17 – Prototipagem e testes da alternativa selecionada em gesso.

Os protótipos foram montados simulando um telhado para o teste de infiltração. Os protótipos obtiveram excelentes resultados. Este modelo propõe a instalação do telhado com uma única peça, facilitando a montagem, e possui um rendimento de 12 telhas/m², superando o resultado das concorrentes em cerâmica. Possui altura de menos de 4cm, permitindo a entrada no forno e o mínimo de pontos de balanço, dispensando o uso de suportes refratários. O processo por via seca dá ao produto excelente controle dimensional, o que favorece a criação de labirintos com pouca altura, favorecendo a passagem pelo forno. A curva e os encaixes permitem um empilhamento perfeito, evitando o efeito sanfona. O efeito visual também foi considerado positivo.

g) Projeto e Fabricação dos equipamentos de compactação

O conjunto estampo / matriz utilizado na compactação das telhas foi desenvolvido, projetado e fabricado pela empresa Icon S.A., parceira do projeto, a partir das características da prensa e dos dados gerados na etapa de design do produto. A Figura 18 ilustra os equipamentos fabricados e sua montagem.

O processo de projeto e fabricação dos equipamentos tem como etapas: definição da forma geométrica do produto (telha) a ser fabricado; definição da forma de prensagem; captura de informações sobre as características do produto e da composição cerâmica, da prensa que irá receber as ferramentas; definição do tipo de punção (polido ou revestido), desenvolvimento do projeto, em software 3D, utilizando os dados anteriores, fabricação em máquinas de corte CNC (Comando Numérico Computadorizado); montagem e instalação.

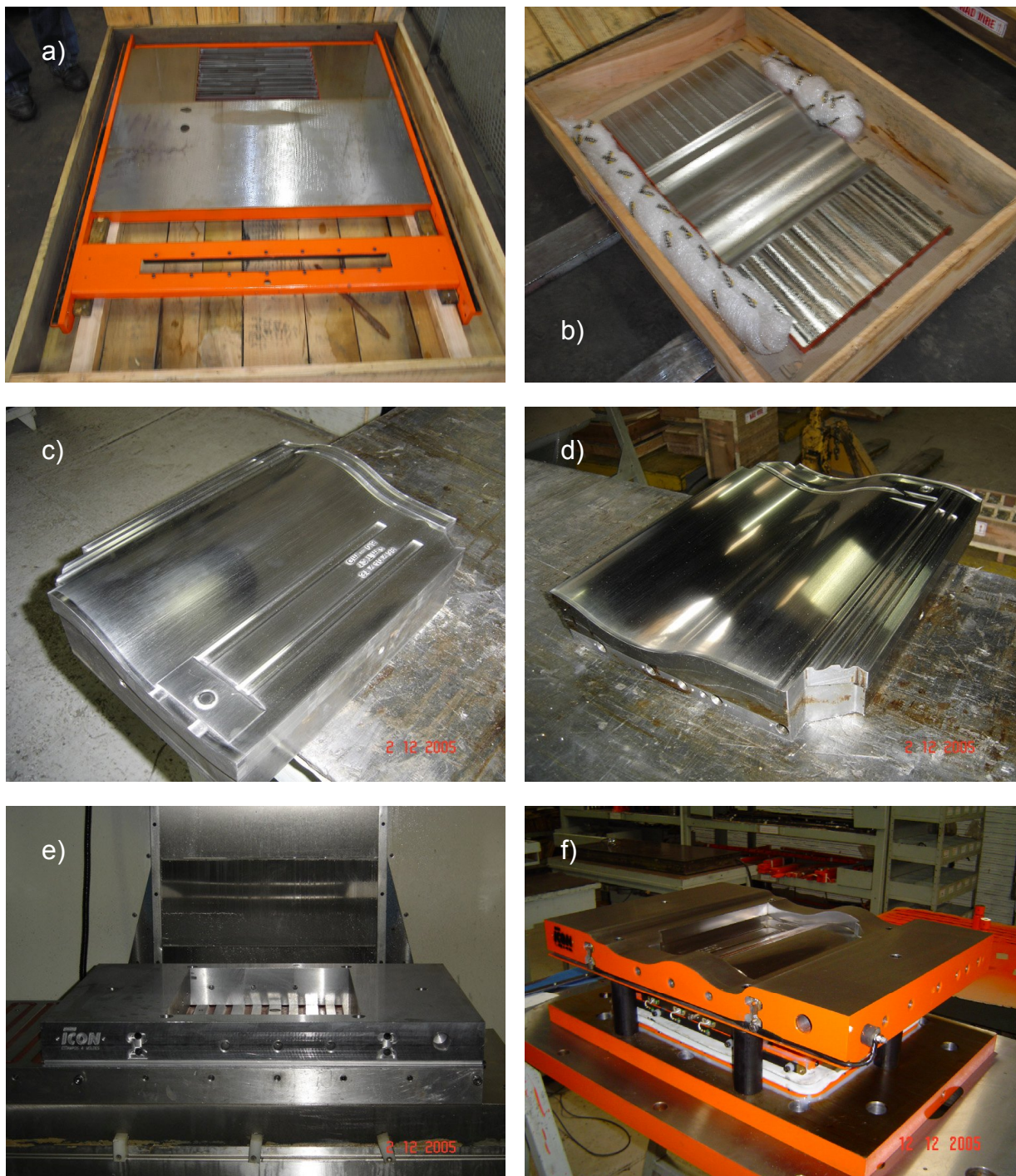


Figura 18 – Processo de fabricação dos equipamentos de compactação, pela empresa Icon S.A..
a) carro alimentador; b) nivelador e extrator; c) punção inferior; d) punção inferior; e) caixa da matriz; f) conjunto matriz montado.

O conjunto estampo / matriz têm como características e diferenciais:

- Fabricados em aço carbono e aço ferramenta.
- Forma geométrica diferenciada do estampo, possibilitando conformar peças de forma irregular, como é o caso das telhas;

- Aquecimento das superfícies inferior e superior de contato com o pó, evitando que o mesmo acabe aderindo no estampo, causando defeitos de compactação;

- Resulta em produtos com espessura homogênea, equilibrando a densidade aparente do produto; além de bom acabamento, com encaixes precisos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

As Tabelas de 01 a 05, e os Gráficos 01 e 02, a seguir, mostram os resultados da caracterização das composições cerâmicas utilizadas. Os ensaios realizados foram: análise química, granulometria, curva de sinterização (retração térmica linear de queima, absorção de água e módulo de resistência à flexão), índice de piroplasticidade e resistência ao congelamento, para diferentes pressões de compactação.

Tabela 01 – Análise química por fluorescência de Raios X.

Compostos	% em massa		
	Massa A	Massa B	Caulim
SiO ₂	59,48	66,15	54,39
Al ₂ O ₃	18,66	14,70	31,97
Fe ₂ O ₃	8,01	4,96	0,26
CaO	0,11	1,31	0,07
Na ₂ O	0,46	1,73	0,11
K ₂ O	3,90	4,60	2,26
MnO	0,08	0,05	0,01
TiO ₂	0,90	0,62	0,01
MgO	1,89	1,97	0,01
P ₂ O ₅	0,18	0,15	0,01
Perda ao Fogo	6,34	3,79	10,91

Tabela 02. Distribuição do tamanho de partículas por granulometria a laser.

Quantidade	Tamanho (µm)		
	Massa A	Massa B	Caulim
10% das partículas abaixo de	0,87	0,86	1,23
50% das partículas abaixo de	4,70	5,01	5,62
90% das partículas abaixo de	19,37	17,25	25,32
100% das partículas abaixo de	45,00	36,00	49,00

Pela análise química, podemos observar alguns aspectos importantes. A massa B apresenta um teor de sílica maior que a massa A, o que pode indicar uma maior refratariedade, porém, os índices dos óxidos de cálcio, sódio e potássio, óxidos fundentes, também são maiores. A quantidade de Fe_2O_3 , que também atua como elemento de interação fundente, é maior na massa A que na massa B.

A quantidade de material orgânico presente em cada massa, verificado pelo teor de perda de material ao fogo, aponta que a massa A apresenta material orgânico em maior quantidade. Isso pode indicar uma maior dificuldade de liberação desse material orgânico durante a etapa de queima do produto, podendo vir a provocar trincas com mais facilidade do que a massa B. Além disso, pode-se verificar que a massa A possui um maior teor de ferro (apontado pelo percentual em peso de Fe_2O_3 encontrado na análise química), que sugere que essa massa terá uma coloração pós-queima mais avermelhada que a massa B. Para uma telha de coloração natural isso não seria um problema, mas para produtos esmaltados, quanto mais escura a base, maior a quantidade de opacificantes e corantes no engobe e esmalte utilizados. Essa coloração avermelhada se torna mais acentuada com o aumento da temperatura de queima.

Pela distribuição granulometria de partículas (Tabela 02), obtida a partir de análise de granulometria a laser, pode-se observar que as duas massas são relativamente finas. A massa B é, em geral, mais fina que a massa A, o que pode indicar que a massa B desenvolva, para os mesmos níveis de umidade, uma maior plasticidade. Essa maior plasticidade pode implicar, no momento da compactação, em uma maior densificação da massa B para uma mesma pressão de compactação.

Tabela 03. Caracterização da Massa A para diferentes pressões de compactação.

	Compactação (MPa)	T (°C)	RQ (%)	AA (%)	MRF (N/mm ²)	IP (10 ⁻⁵ cm ⁻¹)	Congelamento
A2	20	900	0,16	15,02	9,8	0,34	Falha
		950	0,86	14,17	9,1	0,35	Falha
		1000	1,73	12,29	9,4	0,46	Falha
		1050	2,95	9,82	17,6	0,71	Falha
		1100	4,41	7,44	20,1	1,19	OK
A3	30	900	0,22	13,63	11,6	0,31	Falha
		950	0,90	12,73	13,6	0,35	Falha
		1000	1,69	10,94	19,2	0,42	Falha
		1050	2,63	8,79	23,6	0,75	OK
		1100	4,33	6,19	25,2	1,51	OK
A4	40	900	0,14	13,46	11,8	0,33	Falha
		950	0,82	12,06	16,2	0,32	Falha
		1000	1,56	10,30	20,7	0,51	Falha
		1050	2,82	8,06	24,7	0,81	OK
		1100	4,24	6,15	25,2	1,14	OK

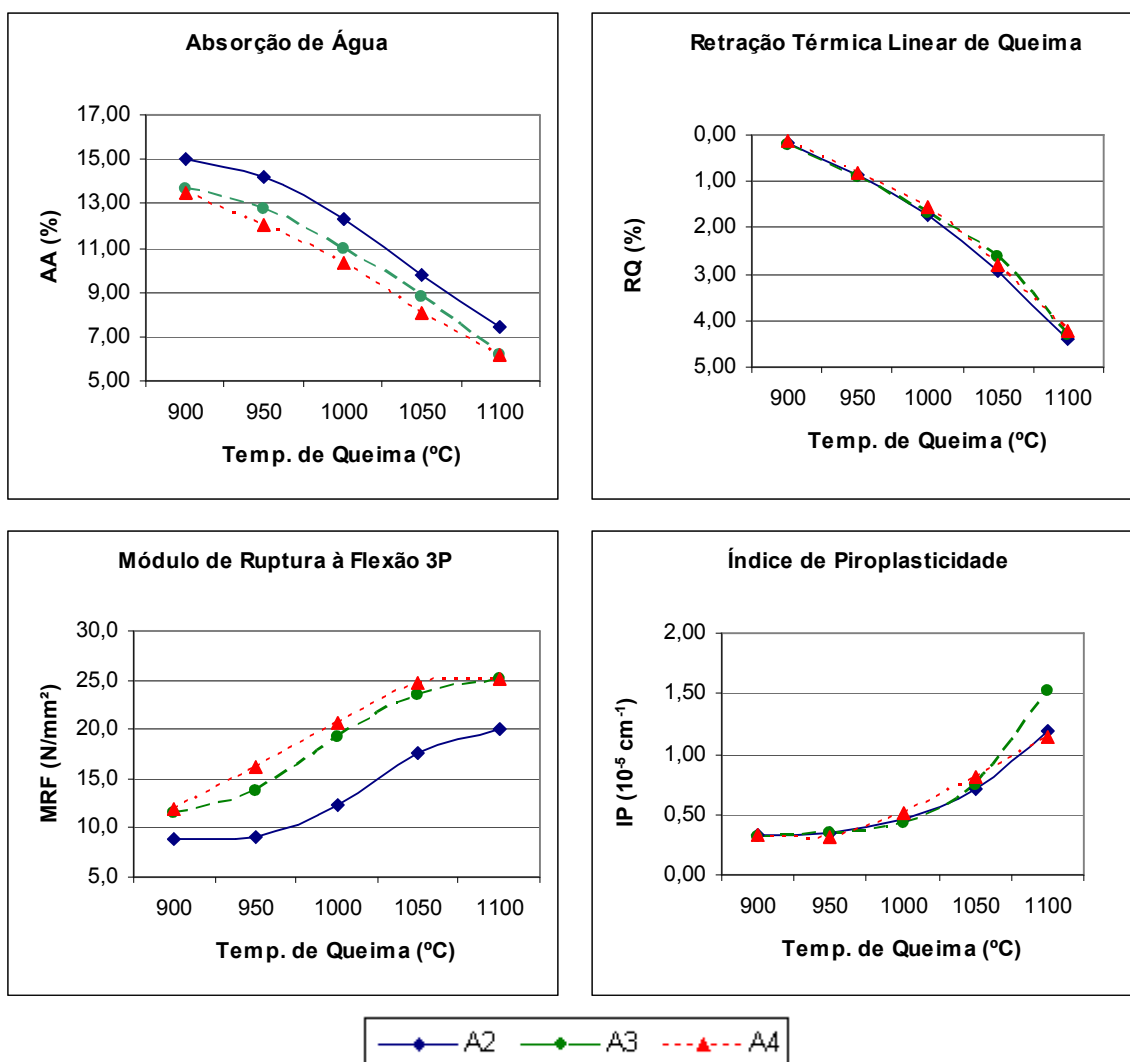
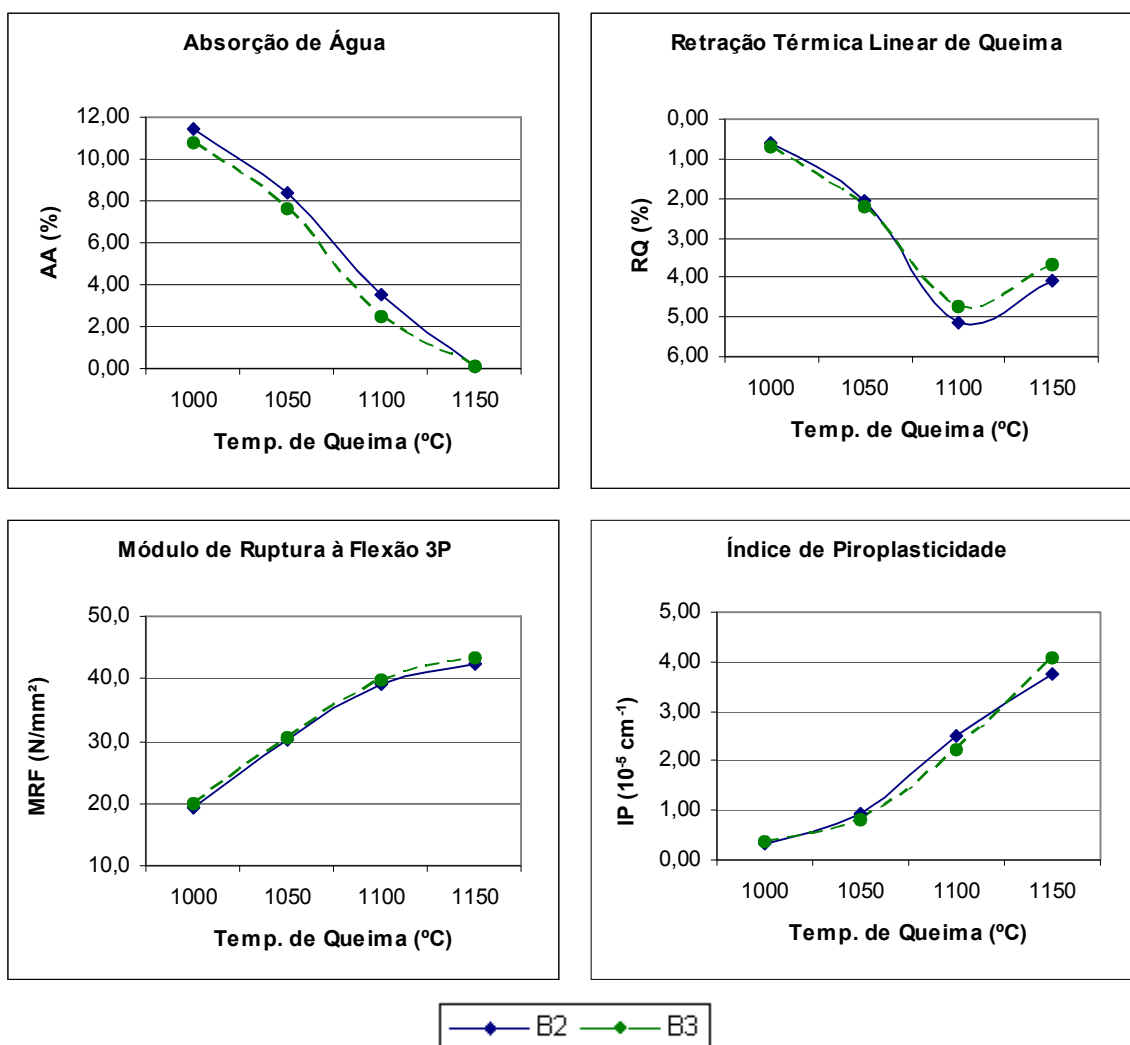
**Gráfico 01** – Dados de sinterização e índice de piroplasticidade da Massa A, para diferentes pressões de compactação.

Tabela 04. Caracterização da Massa B para diferentes pressões de compactação.

	Compactação (MPa)	T (°C)	RQ (%)	AA (%)	MRF (N/mm ²)	IP (10 ⁻⁵ cm ⁻¹)	Congelamento
B2	25	1000	0,59	11,39	19,2	0,32	OK
		1050	2,07	8,36	30,2	0,94	OK
		1100	5,12	3,52	39,1	2,49	OK
		1150	4,09	0,06	42,3	3,75	OK
B3	30	1000	0,69	10,73	19,9	0,37	OK
		1050	2,22	7,58	30,4	0,80	OK
		1100	4,73	2,47	39,8	2,20	OK
		1150	3,66	0,07	43,4	4,08	OK

**Gráfico 02** – Dados de sinterização e índice de piroplasticidade da Massa B, para diferentes pressões de compactação.

Tanto para a massa A quanto para a massa B, pode-se observar que, como esperado, a temperatura de queima exerceu grande influência nas características físicas. O aumento da temperatura de patamar nos dá uma maior sinterização, ou seja, uma maior densificação do material, justificando os aumentos de retração térmica linear de queima e resistência mecânica flexural, e a diminuição da absorção de água, pois há menor número de poros na estrutura mais densa. O índice de piroplasticidade aumenta (ou seja, o material se torna mais susceptível à deformação em altas temperaturas) com o acréscimo da temperatura, pois se formam mais fases fundentes, originando um material menos viscoso em altas temperaturas e, com isso, com menor resistência ao escoamento.

Também se pode perceber a influência da pressão de compactação aplicada ao material. Quanto maior a pressão de compactação utilizada na prensagem, maior a densificação do material no momento da sinterização, favorecendo o aumento da resistência mecânica, e diminuindo sua absorção. Aparentemente, a diferença de pressão de compactação utilizada não foi suficiente para surtir efeito na resistência a piroplasticidade.

Com relação ao ensaio de congelamento, pode-se observar que a massa B apresenta uma resistência maior, tendo resistido aos 50 ciclos de gelo-degelo em todas as temperaturas de queima e pressões de compactação. Para a massa A, apenas corpos de prova mais densificados (com temperaturas de queima e pressões de compactação maiores) resistiram aos 50 ciclos.

A Tabela 05 traz uma comparação pontual entre os resultados das massas A e B, em duas diferentes condições, de mesma temperatura e pressão de compactação. Para essas condições, consideradas boas condições de processo, as duas massas apresentam absorção de água e índice de piroplasticidade semelhantes. A massa B apresenta uma retração térmica linear de queima ligeiramente menor, o que acarreta uma maior precisão dimensional no material após a queima. A massa B apresenta também, principalmente em 1050°C, uma maior resistência flexural mecânica. Além disso, a massa B traz uma maior segurança quanto à resistência ao congelamento, necessária para produtos que visam a exportação para países de clima frio.

Tabela 05. Comparação entre as massas A e B para as mesmas condições de compactação e queima.

	Compactação (MPa)	T (°C)	RQ (%)	AA (%)	MRF (N/mm ²)	IP (10 ⁻⁵ cm ⁻¹)	Congelamento
A	30	1000	1,69	10,94	19,2	0,42	Falha
B		1000	0,69	10,73	19,9	0,37	OK
A		1050	2,63	8,79	23,6	0,75	OK
B		1050	2,22	7,58	30,4	0,80	OK

Na figura 19, pode-se observar os corpos de prova de massa B após o ensaio de piroplasticidade. Pode-se observar também a variação da coloração dos corpos de prova de massa B após a queima. Quando a queima é realizada em 1000°C, o material apresenta uma coloração rósea clara. Com o aumento da temperatura, a tendência da coloração é escurecer, devido à presença de Fe₂O₃.



Figura 19 – Corpos de Prova de massa B, após ensaio de piroplasticidade. Vista frontal e lateral. Temperaturas de queima: 1000, 1050, 1100 e 1150 °C.

A Tabela 06 e o Gráfico 03 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização da adição de material refratário na massa B. As quantidades utilizadas foram: BM1 = 10%, e BM2 = 20% em peso de material refratário.

Tabela 06. Caracterização da Massa B para diferentes adições de refratário.

	T (°C)	RQ (%)	AA (%)	MRF (MPa)	IP (10^{-5} cm^{-1})
BM1	1000	0,90	11,24	18,25	0,35
	1050	1,54	8,90	26,32	1,27
	1100	4,26	6,90	29,63	2,32
	1150	3,96	0,03	44,36	4,37
BM2	1000	0,79	11,55	16,29	0,23
	1050	1,17	10,29	19,27	0,82
	1100	2,47	8,22	28,36	1,54
	1150	4,04	0,09	41,15	3,19

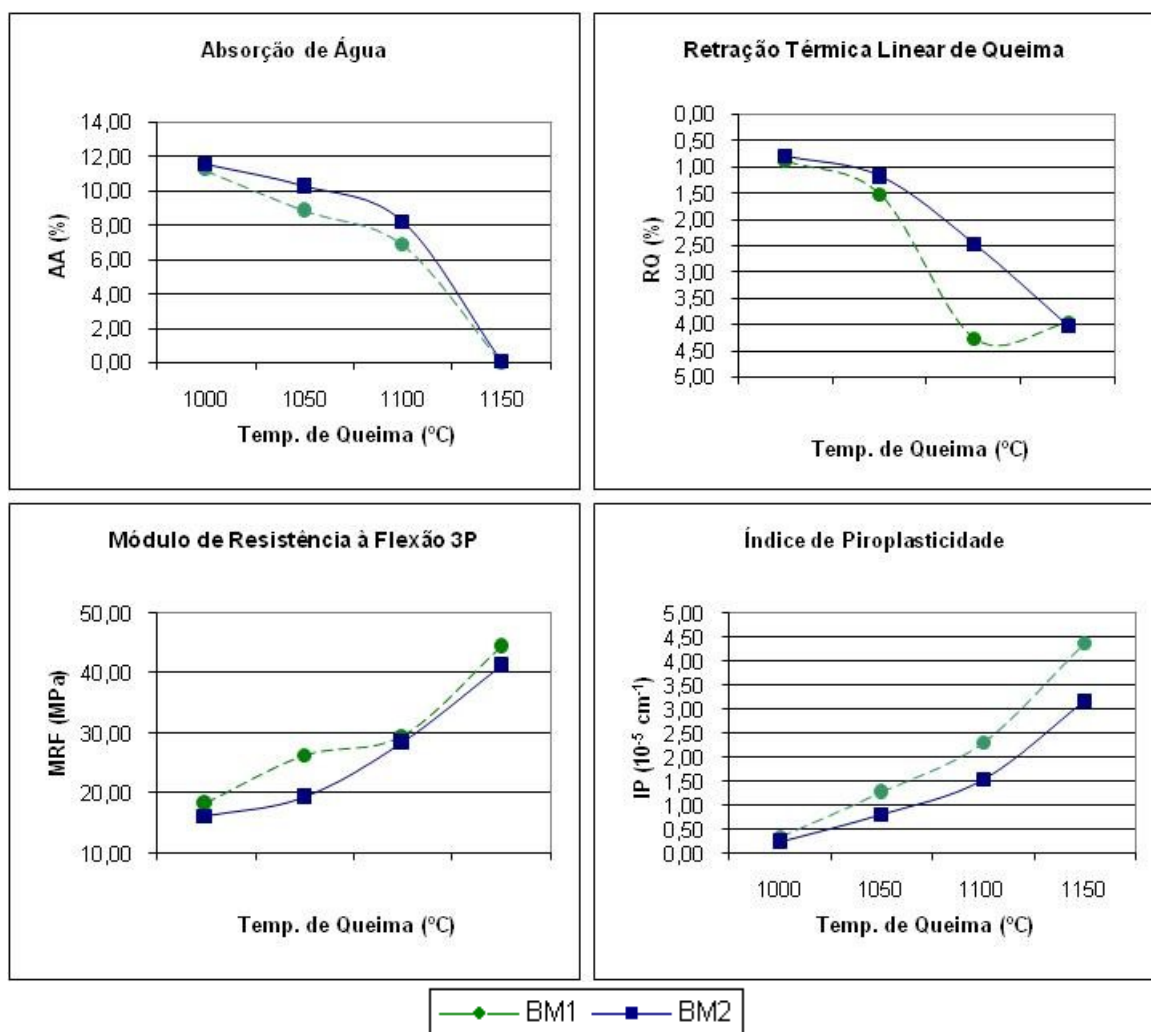


Gráfico 03 – Dados de sinterização e índice de piroplasticidade da Massa B, para diferentes adições de refratário.

O ensaio de congelamento referente à segunda etapa do trabalho também não apresentou, após os 50 ciclos previstos, em qualquer um dos corpos de prova, sinais de falhas, trincas ou esfoleamentos. Portanto, a adição de um material refratário, mesmo diminuindo a fundência do material, não prejudicou sensivelmente seu comportamento a baixas temperaturas.

Pode-se observar que, como esperado, a adição de um material mais refratário que a massa em questão tornou-a menos fundente. O comportamento de sinterização do material, retratado pelas curvas de retração térmica linear de queima, absorção de água e módulo de resistência à flexão, exemplifica bem esse fato, pois à medida que aumenta a quantidade de material refratário na massa (para uma mesma temperatura), a retração térmica linear de queima diminui, o que significa uma menor densificação do material, contribuindo para uma maior absorção de água e menor resistência mecânica. Porém, uma menor densificação do material também significa que, na temperatura em questão, não foram alcançadas as fases fundentes, e sua resistência à deformação piropelástica é maior.

Nos ensaios de piropelastividade, como se pode observar na Tabela 06 e no Gráfico 03, como esperado, a adição de material refratário tornou a argila menos susceptível à deformação piropelástica. Para uma sinterização a 1000 °C, a adição de 10% de caulim diminuiu cerca de 5% a deformação piropelástica, e 20% de caulim diminuiu quase 40%. Porém, como visto, a adição de material refratário, ao mesmo tempo em que contribuiu para melhorar a resistência à piropelastividade, diminuiu a sinterabilidade do material, ou seja, o produto final apresentará maior absorção de água e menor resistência mecânica.

À partir dos dados obtidos nos ensaios de caracterização, ficou definido que a massa B, sem adição de material refratário, seria escolhida para dar seqüência aos testes de produção industrial piloto.

4.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO PILOTO

A partir dos dados obtidos nas etapas de caracterização, foram selecionados os materiais e definidos os parâmetros de compactação e queima

utilizados no processo de produção piloto. Os parâmetros selecionados buscaram obter características otimizadas do produto acabado, levando em consideração as características da matéria-prima e o comportamento de cada um dos elementos da planta piloto.

Para a etapa de compactação, foi selecionado como padrão a pressão de compactação de 30MPa, com umidade de massa em 8%. A prensa foi configurada para que as telhas apresentassem espessura de 12mm e massa de 3,5kg. As telhas compactadas apresentaram qualidade superficial excelente nestas condições, sem problemas de ruptura de labirintos (relevos que possibilitam o acoplamento de uma telha em outra e o escoamento de água). As figuras 20 e 21 ilustram o processo de compactação e os equipamentos utilizados.



Figura 20 – a) Prensa SACMI 550 ton. b) Punção Superior. b) Conjunto Estampo - Matriz.

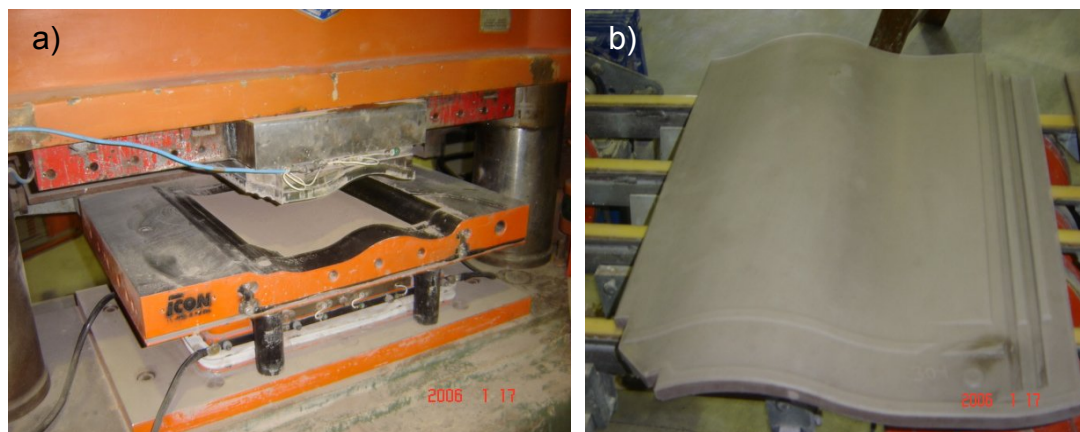


Figura 21 – a) Matriz Carregada. b) Telha compactada.

A etapa de secagem foi realizada utilizando ciclo de 165°C por 60 minutos, baseando-se no ciclo de secagem utilizado pelo fornecedor, a e nas características do secador utilizado. Com isso, a telha sai do secador com no máximo 0,5% de umidade, valor suficientemente baixo para não acarretar problemas durante a queima.

Do secador, as telhas seguem para o forno. Para a etapa de queima, foram selecionadas duas diferentes condições de queima para a massa B, baseadas nos resultados obtidos na etapa laboratorial de caracterização e nas capacidades de aquecimento e resfriamento do forno a rolo. Em ambos os casos, foi utilizada uma temperatura de patamar nos queimadores inferiores levemente superior à temperatura dos queimadores superiores, com o objetivo de evitar o empeno das telhas. Os diferentes ciclos selecionados estão dispostos no Quadro 06, já com sua pequena variação entre queimadores inferiores e superiores. A figura 22 ilustra o processo de queima das telhas.

Quadro 06 – Ciclos de queima.

Ciclo	B1	B2
Tempo Total de Queima	65min	65min
Temperatura Nominal	1020°C	1050°C
Patamar Superior de Queima	1025°C	1055°C
Patamar Inferior de Queima	1015°C	1045°C

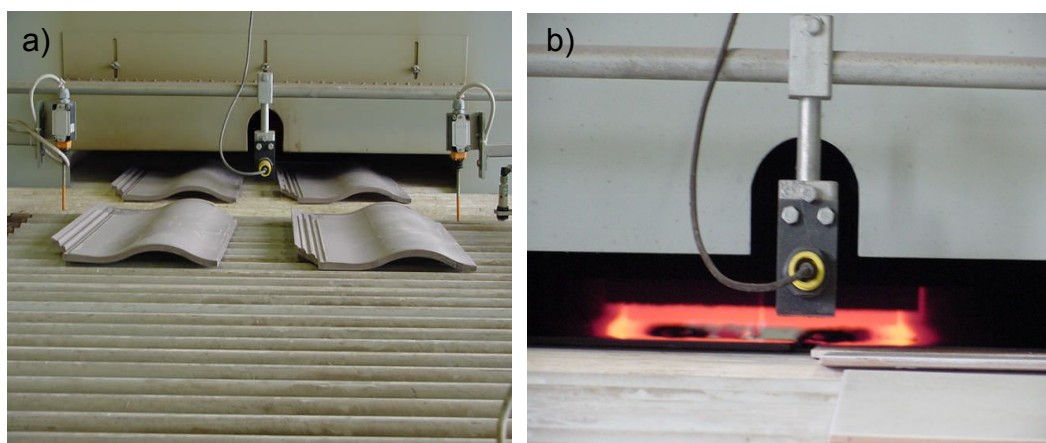


Figura 22 – a)Telhas na entrada do forno. b)Telhas na zona de queima.

Como resultado do processo piloto, obteve-se a quantidade necessária de telhas para a etapa de caracterização. As telhas obtidas apresentaram boa qualidade superficial, sem lascas ou quebras no relevo.



Figura 23 – Vistas superior e inferior da telha fabricada com a massa B após a queima.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO ACABADO

O Quadro 07 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do produto acabado. Foram coletados dados para verificação da retração de queima e da deformação pirolástica. Além disso, foram realizados ensaios de retração térmica linear de queima, resistência mecânica flexural e resistência ao congelamento. Os resultados são comparados a resultados característicos encontrados em telhas fabricadas com outras massas, de indústrias do setor, utilizados aqui para fins de comparação.

Quadro 07 – Caracterização do produto acabado.

Massa e Ciclo	B1	B2	Outras Massas
Umidade de Compactação (%)	8	8	
Pressão de Compactação (kgf/cm ²)	300	300	
Temperatura Nominal (°C)	1020	1050	
Retração (%)	1,4	2,4	1 - 2
Absorção de Água (%)	10,7	8,4	10 - 15
Carga de Ruptura por Flexão 3P (kgf)	395,2	410,7	200 - 300
Módulo de Resist. à Flexão (N/mm ²)	43,5	45,8	20 - 30
Deformação Piroplástica (%)	5,8	13,9	10 - 25
Resistência ao Congelamento	ok	ok	falha

Pode-se observar que, para a massa B, os valores de retração linear de queima e absorção de água acompanharam a tendência dos valores encontrados em laboratório. A retração linear de queima apresenta valores baixos, convenientes a um controle dimensional com maior precisão. Com o aumento da temperatura de queima, a retração linear aumenta, juntamente com a resistência mecânica, enquanto a absorção de água diminui. Isso se deve à maior densificação do corpo quando sinterizado em maiores temperaturas.

A absorção de água, para ambos os ciclos, se mantém dentro dos padrões estabelecidos em norma (20%). Mais importante que isso, o ensaio de congelamento, que imita condições críticas de utilização, mostra que as telhas fabricadas resistem ao clima frio.

A carga de ruptura à flexão em três pontos, característica de resistência mecânica adequada à caracterização das telhas, para a massa B, atingiu valores quatro vezes superiores aos exigidos em norma. As telhas queimadas em temperatura superior apresentaram resistência mecânica um pouco superior, como era esperado.

A deformação piropilástica, medida pela diferença percentual da altura máxima da elevação, mostra que quanto maior a temperatura de queima, maior a deformação na forma inicial da telha. A Massa B apresentou valores compatíveis com o processo, visto que pequenas variações, desde que uniformes, podem ser compensadas na etapa de projeto da telha, levando a um produto final de qualidade, sem variações de tamanho e forma.

Relacionado os resultados obtidos pelas telhas fabricadas com a Massa B, em ambos os ciclos, com resultados obtidos em telhas fabricadas com outras massas, pode-se ressaltar a qualidade do produto obtido, frente a possíveis concorrentes de mercado. Com relação às normas brasileiras, pode-se observar que as telhas fabricadas utilizando a Massa B obtiveram bons resultados de absorção de água (metade do limite máximo) e de resistência mecânica à flexão (quatro vezes maior que o mínimo exigido). Esses resultados, somados aos bons resultados alcançados nos ensaios de congelamento, demonstram a qualidade alcançada pela telha fabricada pelo processo de compactação de pó e queima em forno a rolo.

A partir da correlação entre estes resultados e as normas técnicas hoje vigentes no país, pode-se chegar a uma discussão sobre a necessidade de atualização das normas brasileiras relacionadas ao tema. Pode-se observar uma grande diferença entre os valores encontrados, tanto para absorção quanto para resistência mecânica, o que mostra que a tecnologia do processamento já alcançou níveis de qualidade excedentes aos exigidos por norma. Uma atualização das normas pode fazer com que se busque ainda mais qualidade no processamento.

4.5 TESTES DE ESMALTAÇÃO

Após o desenvolvimento do processo de fabricação de telhas por compactação de pós e queima em forno a rolo, foram realizados alguns ensaios de esmaltação, primeiro em laboratório, depois em escala piloto de produção. O esmalte utilizado, fornecido por empresa parceira, é utilizado industrialmente.

Em um primeiro momento, foram realizados ensaios de aplicação de esmaltes em corpos-de-prova da massa B, com dimensões de 50 x 125mm. Foram aplicados: a) engobe e esmalte brilhante branco; b) engobe e esmalte mate branco; e c) engobe e esmalte mate verde. A figura 24 ilustra o resultado obtido.



Figura 24 – Testes de aplicação de esmalte em corpos de prova

Após verificações visuais de qualidade, foram definidos os melhores resultados. Percebeu-se que o esmalte brilhante não era o mais indicado para o aspecto esperado para o produto final. Assim sendo, foram realizadas aplicações em telhas. Foram realizados testes em telhas com aplicações de a) engobe e esmalte mate branco; e b) engobe e esmalte mate verde. A queima foi realizada na temperatura de 1020°C, em forno a rolo.



Figura 25 – Testes de aplicação de esmalte em telhas

A produção de telhas com massa B esmaltadas foi realizada com sucesso, mostrando que o produto desenvolvido pode, nas mesmas condições de processamento, receber esmaltação e agregar ainda mais valor às telhas fabricadas por esse processo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo trata brevemente da eficiência energética e da viabilidade técnica e econômica do processamento de telhas cerâmicas por compactação de pós e queima em fornos a rolo, comparado ao processamento por extrusão a úmido e queima em fornos do tipo túnel, hoje utilizado largamente nas empresas do setor.

Como visto anteriormente, já a primeira vista se ressaltam pontos do processo onde a eficiência energética é maior, no caso do processo de compactação/forno a rolo: a) como o processo de conformação é praticamente a seco (cerca de 8% de umidade na argila, contra mais de 20% da extrusão), a etapa de secagem pode ser realizada muito mais rapidamente, e com gasto energético menor; b) na etapa de queima, o forno a rolo não utiliza a parte móvel (vagonetas) características do forno túnel, portanto o calor gerado pelos queimadores é menos desperdiçado; c) o processo de compactação/forno a rolo possibilita ciclos mais curtos de secagem e queima (de cerca de uma hora, contra ciclos entre 24 e 48 horas do processo em secador e forno túnel), o que traz uma maior produtividade.

De acordo com os estudos de eficiência energética e de viabilidade técnica e econômica realizados, ao se estabelecer o processo contínuo de produção das telhas, considerando os ciclos de secagem (165°C, 60 min) e de queima (1050°C, 60 min), se atingiria uma produção de quase 75.000 telhas por dia, com consumo específico estimado em 640kcal/kg (sendo 140kcal/kg para secagem e 500kcal/kg para a queima). Isso levaria a um consumo de aproximadamente 18.000 m³/dia de gás natural, o que daria um custo de combustível de cerca de R\$ 0,27 por telha.

O preço previsto para a venda da telha foi de R\$ 1,90 por unidade. Além disso, para a implantação de uma planta fabril completa, com capacidade de produção de 2.000.000 de telhas (cerca de 6.000 toneladas de material) mensais, seria necessário um investimento da ordem de R\$ 25.000.000,00; dos quais cerca de 85% são financiáveis, tendo seu pagamento dividido entre os primeiros dez anos de produção. Os outros 15% retornam já nos primeiros anos de produção, com lucro líquido da ordem de R\$ 3.500.000,00 no primeiro ano, dobrando no

segundo ano, pelo aumento da produtividade, e subindo ano a ano, devido à diminuição dos custos fixos e pagamento dos financiamentos realizados, chegando à casa dos R\$ 17.000.000,00 no décimo ano. Portanto, pode-se concluir que o projeto é lucrativo e paga seus investimentos financiados dentro de um prazo estipulado em dez anos, trazendo retorno dos investimentos e gerando lucro.

6 CONCLUSÕES

À partir dos resultados obtidos na caracterização do produto acabado, ou seja, das telhas produzidas pelo processo de compactação de pós e queima em forno a rolo, pode-se concluir que o objetivo do projeto foi alcançado: a produção de telhas nesse tipo de forno, consumindo não mais serragem e lenha, mas gás natural (como já é padrão nas indústrias de cerâmica de revestimento), obtendo um produto de design e qualidade diferenciada, buscando tanto o mercado interno quanto externo.

Quanto ao problema da piroplasticidade, como se pode observar a partir da revisão bibliográfica apresentada e dos ensaios realizados, a deformação piropástica de composições cerâmicas, voltadas para a fabricação de telhas, pode ser diminuída e até sanada, trabalhando-se com variáveis de processo e com a composição da mesma. No tocante às variações de processo, conclui-se que, quando se trabalha com temperaturas mais baixas de sinterização, o produto final apresenta menor deformação, pois durante a sinterização a quente, não foram atingidas fases menos viscosas, que fariam a viscosidade do material diminuir e o deixariam mais susceptível à deformação. Conclui-se também que a adição de um material mais refratário à argila em questão também reduziu visivelmente a deformação durante a queima. Isto se deu pelo mesmo motivo do caso anterior, ou seja, a presença do material refratário tornou a massa menos fundente, e a sinterização não atingiu o seu ponto máximo. Contudo, essa modificação não prejudicou o comportamento do material sob condições de congelamento. Porém, em ambos os casos, a diminuição da tendência à deformação piropástica trouxe consigo um aumento da absorção de água e diminuição da resistência mecânica do material. Isso ocorre devido ao fato de que, com uma menor sinterização do material, ocorre uma menor densificação, ou seja, o produto final apresenta maior porosidade, que justifica a absorção maior e a resistência à flexão menor.

Os dados obtidos na etapa de caracterização laboratorial permitiram, além da seleção da massa que mais se adequava ao processo de fabricação e às características desejadas do produto acabado, a seleção das variáveis de compactação e queima que viriam a ser utilizadas no teste de produção industrial

piloto. Utilizando esses dados obtidos, foi produzido um lote inicial de telhas, permitindo que fosse avaliada a qualidade do produto final.

O sucesso da realização da etapa piloto de fabricação, utilizando os equipamentos desenvolvidos anteriormente, mostrou que é possível fabricar telhas por compactação de pós com umidade em torno de 8%, e queima-las em forno a rolo, utilizando gás natural como combustível.

Através dos ensaios de qualidade realizados no produto acabado, concluiu-se que a produção piloto resultou em telhas de ótima qualidade. As telhas produzidas com a massa selecionada obtiveram resultados melhores que as produzidas com outras massas utilizadas em indústrias cerâmicas. A retração linear de queima apresenta valores baixos, convenientes a um controle dimensional de maior precisão, permitindo maior liberdade no projeto de novos formatos de telhas. Os valores de resistência mecânica encontrados, para telhas com 12mm de espessura, permitem uma economia de material na fabricação e, conseqüentemente, uma diminuição da massa total da telha. As telhas fabricadas apresentam absorção de água dentro do requerido em norma e, melhor que isso, apresentam resistência ao congelamento, o que permite que as mesmas sejam exportadas para países de clima frio, aumentando o valor agregado do produto. A deformação pirolástica pode ser melhorada otimizando a temperatura de queima, e, com valores baixos, pode-se corrigir na etapa de projeto da telha.

Sintetizando, o processo desenvolvido traz vantagens em relação ao processo tradicional (extrusão e queima em forno túnel), tanto no processo, quanto no produto final. O processo é mais eficiente do ponto de vista energético, pois não desperdiça energia com a mobília do forno. Além disso, possibilita um menor consumo de material (resistência flexural acima de 40 MPa, com 10 mm de espessura), e melhor qualidade do produto no que diz respeito ao tamanho e precisão dimensional (retração linear de queima menor que 1,5%), porosidade (absorção de água menor que 10%), e resistência ao congelamento.

Enfim, conclui-se que a produção de telhas por compactação de pós e queima em forno a rolo é possível, e traz vantagens na qualidade do produto final e na produtividade, pois se trabalha com ciclos mais curtos de secagem e queima.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprofundar a compreensão do fenômeno da piroplasticidade em massas para cerâmica de revestimento e cerâmica estrutural, sua mecânica, suas causas e conseqüências.
 - Desenvolver uma metodologia de medição da deformação piropástica eficaz para diferentes tipos de produtos e formas (revestimentos planos e telhas, por exemplo).
 - Aprofundar a compreensão do fenômeno das trincas causadas pelo congelamento de água absorvida nos poros. Estabelecer relações entre a porosidade (quantidade, tipo, forma), a resistência mecânica e a resistência ao congelamento.
 - Realizar estudo de eficiência térmico-energética, comparando fornos a rolo com fornos tipo túnel, e seus diferentes tipos de combustíveis normalmente utilizados na indústria cerâmica.
 - Avaliar a necessidade de atualização das normas técnicas relacionadas ao setor de fabricação de telhas cerâmicas.
-
-

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[01] ABC. **Anuário Brasileiro de Cerâmica**. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 2003.

[02] Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas. **Controles de fabricación – pavimentos y revestimientos ceramicos**. Castellón: AICE, 1997.

[03] BARBA, A., BELTRÁN, V., FELÍU, C., GARCÍA, J., GINÉS, F., SÁNCHEZ, E. SANZ, V.. **Materias primas para la fabricación de baldosas cerâmicas**. Castellón: Instituto de Tecnologia Cerámica, 2002.

[04] DADAM, A. P.. **Análise Térmica de um Forno Túnel Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica: UFSC, 2005.

[05] DEL ROVERI, C., MELCHIADES, F. G., BOSCHI, A. O.. **Estudo da deformação piropiástica em revestimentos cerâmicos gresificados**. Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Pedro: CBC, 2000.

[06] FACINCANI, E., **Tecnologia ceramica – I laterizi**. 2ª Ed. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.

[07] JAHN, T.G., DADAM, A. P., NICOLAU, V. P.; **Estudo da Eficiência Energética de Forno a Rolos**; Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Blumenau: CBC, 2006.

[08] LEHMKUHL, W. A.. **Análise Numérica e Experimental de um Secador Contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica: UFSC, 2004.

[09] NECKEL Jr, L.. **Investigação da Piroplasticidade em Massa Para Uso em Cerâmica Vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso em Eng. de Materiais: UFSC, 2006.

[10] NECKEL Jr, L., FREDEL, M. C., ALARCON, O. E.. **Investigação e Controle da Piroplasticidade de Massa Para Cerâmica Vermelha**. Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Blumenau: CBC, 2006.

[11] REED, J.S., **Principles Of Ceramics Processing**. 2^a Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
