

Antonio Pedro Novaes de Oliveira

Dachamir Hotza

TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

2ª edição revista



editora ufsc

**TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO
DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Reitora

Roselane Neckel

Vice-Reitora

Lúcia Helena Martins Pacheco

EDITORA DA UFSC

Diretor Executivo

Fábio Lopes da Silva

Conselho Editorial

Fábio Lopes da Silva (Presidente)

Ana Lice Brancher

Andreia Guerini

Clélia Maria Lima de Mello e Campigotto

Fernando Jacques Althoff

Ida Mara Freire

João Luiz Dornelles Bastos

Luis Alberto Gómez

Marilda Aparecida de Oliveira Effting

Editora da UFSC

Campus Universitário – Trindade

Caixa Postal 476

88010-970 – Florianópolis-SC

Fones: (48) 3721-9408, 3721-9605 e 3721-9686

editora@editora.ufsc.br

www.editora.ufsc.br

Antonio Pedro Novaes de Oliveira
Dachamir Hotza

**TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO
DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

2ª edição revista

ebook

© 2011 dos autores

Direção editorial:

Paulo Roberto da Silva

Capa:

Leonardo Gomes da Silva

Editoração:

Cristiano Tarouco

Revisão:

Maria Geralda Soprana Dias

Ficha Catalográfica

(Catalogação na publicação pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina)

O48t Oliveira, Antonio Pedro Novaes de
 Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos /
 Antonio Pedro Novaes de Oliveira, Dachamir Hotza.
 2. ed. rev. – Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.
 118 p. : il., grafs. tabs
 Inclui bibliografia.
 1. Revestimento cerâmico. 2. Cerâmica (Tecnologia)
 3. Processos de fabricação. I. Hotza, Dachamir. II. Título

CDU: 174

ISBN 978-85-328-0710-6



Este livro está sob a licença Creative Commons, que segue o princípio do acesso público à informação. O livro pode ser compartilhado desde que atribuídos os devidos créditos de autoria. Não é permitida nenhuma forma de alteração ou a sua utilização para fins comerciais.

br.creativecommons.org

SUMÁRIO

Prefácio	9
CAPÍTULO 1	
Introdução	11
1.1 Definições: da cerâmica ao revestimento	12
1.2 Evolução da tecnologia aplicada a revestimentos cerâmicos	15
1.3 Cerâmica no Brasil: de Marajó para o mundo	22
CAPÍTULO 2	
Fabricação de revestimentos cerâmicos: aspectos genéricos	27
2.1 Produtos	28
2.2 Matérias-primas e aditivos	30
2.2.1 Matérias-primas e aditivos para massas	30
2.2.1.1 Matérias-primas plásticas	30
2.2.1.2 Matérias-primas fundentes	31
2.2.1.3 Matérias-primas refratárias	31
2.2.1.4 Aditivos	32
2.2.1.5 Composição das massas	32
2.2.2 Matérias-primas e aditivos para esmaltes	32
2.2.2.1 Fritas	33
2.2.2.2 Matérias-primas não fritadas	35
2.2.2.3 Aditivos	35
2.3 Processo	36
2.3.1 Dosagem	38
2.3.2 Moagem	39
2.3.2.1 Moagem a úmido descontínua	41
2.3.2.2 Moagem a úmido contínua	41

2.3.3	Atomização	42
2.3.4	Prensagem.....	43
2.3.5	Secagem.....	44
2.3.6	Esmaltação	44
2.3.7	Queima.....	46

CAPÍTULO 3

Fabricação de revestimentos cerâmicos porosos

	por via úmida.....	49
3.1	Produtos	50
3.1.1	Classificação dos produtos	50
3.1.2	Características técnicas	52
3.1.3	Características estéticas	53
3.1.3.1	Formatos	53
3.1.3.2	Peças especiais.....	53
3.1.3.3	Aspecto superficial.....	54
3.2	Matérias-primas e aditivos para massas.....	54
3.2.1	Matérias-primas plásticas	56
3.2.2	Matérias-primas não plásticas	56
3.2.3	Aditivos	58
3.2.4	Composição das massas	58
3.3	Matérias-primas e aditivos para esmaltes e engobes.....	59
3.3.1	Biqueima tradicional	60
3.3.2	Biqueima rápida.....	60
3.3.3	Monoporosa.....	60
3.3.4	Engobes.....	61
3.3.5	Aditivos	62
3.4	Processo.....	62
3.4.1	Dosagem	64
3.4.2	Moagem	64
3.4.3	Atomização	66
3.4.4	Prensagem.....	66
3.4.5	Secagem.....	68
3.4.6	Queima do suporte (primeira queima).....	68
3.4.7	Esmaltação.....	70

3.4.8 Queima do esmalte (biqueima rápida)	71
3.4.9 Monoqueima.....	73

CAPÍTULO 4

Fabricação de revestimentos cerâmicos gresificados

por via úmida	75
4.1 Produtos	75
4.1.1 Classificação dos produtos	75
4.1.2 Características técnicas	76
4.1.3 Características estéticas	78
4.1.3.1 Formatos	78
4.1.3.2 Aspecto superficial.....	79
4.2 Matérias-primas e aditivos para massas.....	79
4.2.1 Matérias-primas argilosas	81
4.2.2 Matérias-primas não argilosas	81
4.2.3 Composição das massas.....	82
4.3 Matérias-primas e aditivos para esmaltes	83
4.4 Processo.....	84
4.4.1 Dosagem	84
4.4.2 Moagem	86
4.4.3 Atomização	87
4.4.4 Prensagem.....	87
4.4.5 Secagem.....	88
4.4.6 Esmaltação.....	88
4.4.7 Queima.....	91

CAPÍTULO 5

Fabricação de porcelanatos.....

5.1 Produtos	95
5.1.1 Características técnicas	96
5.1.2 Características mercadológicas	99
5.1.2.1 Formatos	99
5.1.2.2 Tipologias.....	100
5.2 Matérias-primas e aditivos.....	101
5.2.1 Composições.....	103

5.2.2	Matérias-primas semipreparadas	104
5.2.2.1	Atomizados	104
5.2.2.2	Regranulados.....	105
5.2.2.3	Micronizados.....	105
5.2.3	Materiais auxiliares para decoração.....	106
5.3	Processo	106
5.3.1	Dosagem.....	107
5.3.2	Moagem	108
5.3.3	Coloração das massas	109
5.3.4	Prensagem.....	109
5.3.5	Secagem.....	109
5.3.6	Queima.....	110
	Considerações finais.....	113
	Referências	117

PREFÁCIO

Para alguém que dedicou tantos anos de sua vida profissional lutando por iniciativas que contribuíssem para o aprimoramento e atualização dos recursos humanos que atuam em nossa indústria cerâmica, é um prazer muito especial prefaciá-lo este que é o primeiro livro sobre os fundamentos da fabricação de revestimentos cerâmicos, originalmente publicado no Brasil.

No primeiro capítulo, após uma contextualização histórica da cerâmica em geral e dos revestimentos cerâmicos em particular, o livro apresenta as características técnicas utilizadas para a classificação, a avaliação da qualidade e a especificação das tipologias mais apropriadas para os diversos locais onde eles podem ser utilizados.

O segundo capítulo dá uma visão geral do processo de fabricação, comentando cada uma das etapas, assim como as diversas alternativas para cada uma delas.

Os capítulos seguintes, 3, 4 e 5, apresentam detalhadamente todas as etapas do processo de fabricação de revestimentos porosos, produtos gresificados e porcelanatos, produzidos por via úmida.

O último capítulo apresenta alguns dos principais desafios atuais do setor, assim como possíveis desdobramentos futuros.

Como um todo, o livro representa uma importante contribuição para o aprimoramento e atualização dos que atuam na área e um ótimo incentivo para que outros profissionais possam se interessar por este setor tão carente de recursos humanos especializados.

Considerável parte do prazer de prefaciá-lo este livro advém do fato de os autores serem colegas e amigos de longa data, que também dedicaram muitos anos de suas vidas aprofundando seus conhecimentos sobre os revestimentos cerâmicos e que, através deste livro, compartilham um pouco do que aprenderam.

Muito embora esta obra represente uma importante e sólida contribuição para o setor, os autores não tiveram a pretensão de abordar todos os aspectos relacionados à fabricação de revestimentos cerâmicos, o que seria impossível, dadas a complexidade e a abrangência dessa área do conhecimento. Assim sendo, alguns temas de grande relevância para o setor como um todo e a indústria brasileira em particular não puderam ser devidamente abordados. Dentre esses, podemos destacar a decoração, uma das etapas que mais rapidamente tem evoluído nos últimos anos, e a via seca, responsável hoje por considerável parte da produção da indústria nacional. Entretanto, para que possamos ter em um futuro próximo livros nacionais que abordem esses temas com a profundidade que eles merecem, e que levem em consideração as peculiaridades da nossa indústria e o mercado dos nossos produtos, é preciso que mais pesquisadores se dediquem a essa área e que sigam o exemplo dos autores deste livro e compartilhem seus conhecimentos para que a indústria brasileira de revestimentos cerâmicos possa se beneficiar, através do aprimoramento dos seus recursos humanos, e continue crescendo de forma sustentável por muitos e muitos anos.

Anselmo Ortega Boschi

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Editor-chefe da revista *Cerâmica Industrial*

INTRODUÇÃO

Este livro trata de apresentar princípios científicos e tecnológicos envolvidos na fabricação de produtos cerâmicos. A ênfase será dada aos produtos que têm como aplicação principal o revestimento de paredes ou pisos, internos ou externos. Apesar de limitados por essa abordagem, os fundamentos aqui discutidos são comuns a vários processos cerâmicos. Os próprios revestimentos cerâmicos, por outro lado, são muito diversos em termos de composição química, tamanho, forma, acabamento superficial, propriedades mecânicas e funcionais e, naturalmente, custo.

As propriedades dos revestimentos cerâmicos são dependentes de sua composição química e microestrutura desenvolvida principalmente durante o tratamento térmico a que são submetidos. Atualmente, técnicas de caracterização comuns à área de Ciência e Engenharia de Materiais têm sido empregadas para identificar, quali e quantitativamente, matérias-primas e produtos intermediários ou finais ao longo do processamento cerâmico. Nos últimos anos, além disso, vários métodos com base em estatística e/ou diagramas de fase vêm sendo aplicados à formulação ou reformulação de misturas cerâmicas com vistas à obtenção de propriedades específicas. Técnicas de modelagem e controle, no sentido mais amplo dos termos, vêm sendo crescentemente aplicadas à otimização de etapas do processamento cerâmico, visando ao aumento da produtividade e manutenção ou melhoramento da qualidade dos produtos. Por fim, mas não menos importante, a consciência ecológica, refletida por leis ambientais cada vez mais rigorosas, tem despertado para o uso mais eficiente de recursos minerais e energéticos. Assim, muitas indústrias do setor de revestimento cerâmico têm revisado seus processos de modo a produzir menos emissões e resíduos. Complementarmente, as próprias

indústrias têm empregado subprodutos ou resíduos de outros processos em suas composições de massa cerâmica.

O Brasil é um dos maiores produtores, exportadores e consumidores de revestimentos cerâmicos do mundo. Como diferencial em relação aos concorrentes mais diretos pelo mercado internacional – Itália, Espanha e China –, temos que passar de importadores de tecnologia e equipamentos a desenvolvedores de inovações que se baseiem em nosso imenso arsenal de recursos minerais e em nossa criatividade para se adaptar a situações novas e desafiadoras.

O objetivo deste livro é, portanto, apresentar um painel atualizado da tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. A ideia central é fazer um retrato do presente, com base nas experiências do passado, mas apresentando também algumas perspectivas futuras de desenvolvimento dos revestimentos.

Revestimentos cerâmicos estão constantemente evoluindo em termos de *design*, tecnologia e aplicações. Qualquer obra sobre o tema tende a ser incompleta ou desatualizada em um período curto de tempo. Apesar desse desafio inglório, nós nos propomos através deste livro a dar uma pequena contribuição para a área de cerâmica de revestimento no Brasil.

1.1 DEFINIÇÕES: DA CERÂMICA AO REVESTIMENTO

14

O termo “cerâmica” vem do grego *keramos*, que se referia originalmente a vasilhames de argila queimada. Num sentido mais amplo, entende-se por cerâmica tanto um produto quanto um processamento ou uma indústria.¹ Assim, um tijolo ou um isolador elétrico é cerâmica, bem como uma olaria ou uma oficina onde se produzem artefatos cerâmicos.

Segundo a definição clássica de Kingery,² cerâmica é “a arte e ciência de fazer e usar artigos sólidos que têm como seu componente essencial materiais inorgânicos e não metálicos”. De um modo mais simples, pode-se definir materiais cerâmicos, não pelo que são, mas pelo que não são. Assim, são cerâmicos a maioria dos materiais sólidos que não são metais, polímeros ou derivados de plantas ou animais.

Do ponto de vista químico, segundo Barsoum,³ “materiais cerâmicos são compostos sólidos formados pela aplicação de calor, algumas vezes calor e pressão, constituídos por ao menos um elemento metálico e um não metálico, ou dois não metais”. Exemplos

dessas possíveis combinações são: Na_2O , MgO , Al_2O_3 , TiC , TaC , WC ; SiC , B_4C , SiO_2 , Si_3N_4 , como também materiais mais complexos, como BaTiO_3 , $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ (albita), $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ (ortoclásio), $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (caulinita), ou $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ (mulita). As ligações presentes entre os átomos de materiais cerâmicos são iônicas e covalentes (de fato, uma combinação dessas), o que depende basicamente da diferença de eletronegatividade de seus átomos constituintes. As propriedades dos materiais cerâmicos são em função de sua natureza química, seu caráter cristalino ou amorfo, e das inúmeras transformações a que são submetidos durante as várias etapas de seu processamento.⁴

A cerâmica pode, por sua vez, ser dividida em “tradicional” e “avançada”. A cerâmica tradicional parte de matérias-primas naturais ou pouco beneficiadas, de pureza variável, em especial argilas. Os processos de conformação tradicionais incluem prensagem, extrusão, torneamento e colagem. O material conformado é exposto a um tratamento térmico ou queima, cujo controle não é tão rígido quanto no processamento avançado, objetivando a densificação e aumento de resistência dos produtos finais. Produtos tradicionais típicos são os de aplicação doméstica ou na construção civil, como louça de mesa ou sanitária, tijolos, telhas, tubos, pisos e azulejos. As propriedades mais importantes nesses produtos são as mecânicas e as estéticas.

Já a cerâmica avançada (também conhecida como cerâmica de alto desempenho ou de engenharia) parte de matérias-primas sintéticas ou beneficiadas industrialmente até atingir um alto grau de pureza (tipicamente > 98%). Além dos processos tradicionais de conformação, processos especiais foram desenvolvidos, ou adaptados de outras áreas, para obtenção de formas e acabamentos superficiais particulares, tais como moldagem por injeção, prensagem isostática a quente ou colagem de fitas (*tape casting*). Assim como as etapas anteriores, o tratamento térmico ou sinterização deve ser muito bem controlado (tempo, temperatura, pressão, atmosfera) para a obtenção de produtos de alto valor agregado, isentos de defeitos. Produtos avançados típicos são caracterizados por suas funções ou propriedades específicas, tais como elétricas, magnéticas, nucleares, ópticas, mecânicas, térmicas, químicas, e/ou biológicas.

De acordo com a sequência de processamento e, por conseguinte, das características dos produtos finais obtidos, os materiais cerâmicos podem ainda ser agrupados em três classes:

- MATERIAIS CERÂMICOS “USUAIS”, os quais são produzidos por uma sucessão de operações de moagem/mistura de pós, conformação e sinterização ou queima (pó → forma → calor).
- VIDROS, obtidos a partir de uma mistura de pós, que sofrem fusão sob a ação do calor, e posteriormente são moldados em sua forma final (pó → calor → forma).
- ARGAMASSAS (cimento, gesso, cal), obtidas geralmente através de um processo térmico, seguido de uma cominuição em partículas de tamanho desejado, as quais são submetidas a uma reação ou pega hidráulica e adquirem assim sua forma final (calor → pó → forma).

Na cerâmica empregada como revestimento, os três tipos de materiais têm sua importância. As argamassas são usadas para assentamento das placas cerâmicas a paredes ou pisos e para separar as placas entre si (rejuntamentos). Os materiais vítreos estão presentes nos esmaltes ou vidrados usados para impermeabilizar os substratos cerâmicos. Os próprios revestimentos podem ser de natureza vítrea, sob a forma de pastilhas, ou até mesmo usados como elementos de construção, como os tijolos de vidro. Uma classe de materiais que se mostra promissora em aplicações como revestimento é a dos vitrocerâmicos, obtidos através da cristalização controlada de vidros. Materiais vitrocerâmicos podem ser incorporados a esmaltes vítreos, para melhorar a resistência ao desgaste abrasivo, por exemplo, ou mesmo ser usados como placas inteiras de vitrocerâmica, com características diferenciadas.

A ênfase deste trabalho será a tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos a partir de matérias-primas sob a forma de pós, passando por etapas de moagem e/ou mistura, conformação (em especial, prensagem), acabamento superficial (em especial, esmaltação) e tratamentos térmicos (secagem e queima). Os produtos obtidos por esta via podem ser classificados de vários modos e segundo várias normas, como definidos nos capítulos a seguir.

Os termos “cerâmica de revestimento” e “revestimentos cerâmicos” serão empregados ao longo do texto como sinônimos, referindo-se a placas cerâmicas usadas para revestir a parede (também conhecidas como azulejos) e/ou o chão (também conhecidas como pisos ou pavimentos).

1.2 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA APLICADA A REVESTIMENTOS CERÂMICOS

A cerâmica como produto tecnológico nasceu no período mesolítico, há cerca de cinco a dez mil anos. Nessa época, o homem primitivo usava suas mãos para misturar, conformar e decorar artigos feitos a partir de matérias-primas argilosas. O primeiro instrumento de conformação foi provavelmente o torno, para fabricação de vasos de argila, desenvolvido na Mesopotâmia entre 4000 e 3000 a.C.⁵

Os primeiros tijolos queimados datam de cerca de 3000 a.C. Provavelmente, os tijolos não eram queimados a mais que 500 °C e, portanto, apresentavam propriedades mecânicas não muito adequadas, mas ainda assim em um estado físico que possibilitava aos tijolos resistirem às chuvas, não se dissolvendo como acontece com peças no estado seco. Em 800 a.C., os etruscos recobriam os tetos de suas habitações com telhas. Entre 2200 e 2000 a.C, na Babilônia, foi registrada uma grande variedade das produções de artigos em argila queimada: ânforas, garrafas, vasilhames para armazenamento de azeite e incenso, tijolos, painéis decorativos para paredes. Antes de 2500 a.C., o uso do torno para a confecção de vasos de argila era comum na Índia, China e Egito. A civilização egípcia teve um papel importante no desenvolvimento da cerâmica e do vidro no mundo mediterrâneo antigo. De fato, em torno de 1300 a.C., os ceramistas daquele império conheciam a técnica de colagem de suspensões cerâmicas. Todavia, foram provavelmente os gregos que introduziram as técnicas de purificação de argilas, dispersando-as em água e separando a fração grosseira retida no fundo do reservatório utilizado, das substâncias orgânicas flutuantes, da barbotina útil, que era transferida para um segundo reservatório e depois secada. Os mesmos gregos, em torno do século XIII a.C., utilizavam fornos fechados de formato circular para as suas queimas. Entre os séculos VI e VII a.C., foram desenvolvidos belíssimos vasos que recebiam engobes com suspensões de argilas, de queima vermelha. Eram decorados ao avesso com esmalte preto tal que as figuras parecessem vermelhas, pois não tinham esmalte sobre o fundo preto, que era na realidade o verdadeiro esmalte. Frequentemente, as invenções dos ceramistas gregos foram aperfeiçoadas pelos romanos que os sucederam.⁵

A origem da cerâmica de revestimento pode ser localizada nos países mediterrâneos do Oriente Médio. Em 3000 a.C., os egípcios fabricaram placas cerâmicas esmaltadas de composição quartzosa, com os seus típicos esmaltes de coloração azul, obtidos a partir da extração de cobre. Trata-se do mesmo esmalte com o qual recobriam os seus objetos simbólicos e os elementos decorativos utilizados pelos joalheiros da época.⁵ Entre os séculos IX e VI a.C., os assírios e babilônios fabricavam placas cerâmicas para revestimento de paredes e também telhas esmaltadas com esmaltes policromáticos e decoradas com motivos mitológicos (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Detalhe do Portão de Ishtar, Babilônia (construído em 575 a.C. por ordem do rei Nabucodonosor II).



Durante a supremacia grega e romana, essas tradições caíram em desuso, ainda se conservadas, sob algumas formas, na Pérsia. No Extremo Oriente, principalmente na China, em 500 a.C., produziam-se placas cerâmicas de revestimento recobertas com esmaltes à base de chumbo, opacificadas com estanho. A civilização que mais contribuiu com a introdução da utilização da cerâmica de revestimento na área mediterrânea e na Europa foi a árabe. Na Espanha árabe, o emprego de revestimentos cerâmicos esmaltados alcançou a mais ampla difusão e, talvez, os melhores resultados artísticos. Na Alhambra, em Granada, (Figura 1.2), percebe-se a habilidade dos ceramistas da época, em especial o esplêndido esmalte preto sem defeitos. Observa-se grande

emprego de esmaltes de coloração turquesa e sucessivamente de esmaltes à base de estanho e chumbo, verdes ou marrons. Em todo o mundo muçulmano, pode-se admirar mesquitas majestosamente decoradas. Nessas regiões, a proibição religiosa de reproduzir imagens de seres vivos possibilitou o desenvolvimento da imaginação dos artistas cerâmicos, o que levou à realização de fantásticas paredes policromáticas. A arte dos antigos ceramistas muçulmanos alcançou elevados níveis técnicos e estéticos.⁵

No início do século 14, surgem as primeiras placas cerâmicas decoradas sob o esmalte e se intensificam as sugestões decorativas provenientes da porcelana chinesa. Por volta do século XV, artistas egípcios realizaram um compêndio de desenhos da idade clássica faraônica e motivos chineses. No início do século XVII, os turcos construíram a famosa mesquita azul de Istambul (Figura 1.3), na qual a tinta que lhe dá o nome deriva da coloração do engobe que se torna brilhante mediante a aplicação de uma acurada esmaltação.

Figura 1.2 – Revestimentos cerâmicos na Alhambra, em Granada, Espanha.



Na Europa cristã, as primeiras placas cerâmicas para pavimentação surgiram somente na segunda metade do século XII. Nesse período, começa-se a abandonar o sistema romano e bizantino do mosaico para pavimentação (constituído da associação de pedras coloridas, Figura 1.4a) e passa-se à produção de pavimentos em “argila queimada” (*terra cotta*, Figura 1.4b), com geometrias quadradas e hexagonais. De

grande emprego, eram os engobes e esmaltes transparentes à base de chumbo, de tonalidade amarela. Exemplos dessas primeiras técnicas da Europa cristã podem ser observados em várias igrejas francesas e inglesas (realização de artistas italianos), ainda que a baixa resistência à abrasão dos pavimentos produzidos tenha resultado em degradação e, mais recentemente, em substituição desses materiais.⁵

Figura 1.3 – Revestimentos cerâmicos na Mesquita Azul, em Istambul, Turquia (século XVII).



(a) detalhe interno



(b) vista externa

Figura 1.4 – Detalhes de pavimentação.



(a) mosaico em
Pompeia, Itália



(b) *terra cotta*

O próximo grande desenvolvimento foram os pavimentos em maiólica (Figura 1.5), cujo termo deriva do nome da ilha de Mallorca, parada obrigatória dos veleiros, que, provenientes da Espanha, transportavam para a Itália cargas de placas cerâmicas. A maiólica foi desenvolvida por artistas italianos que pintavam a decoração sobre um esmalte branco opacificado com óxido de estanho.⁵ Este produto foi difundido em todo o Mediterrâneo e hoje é encontrado no Oriente Médio (Terra Santa) bem como na Espanha (Valência) ou na Grécia

(Corinto). Inicialmente, as realizações apresentavam cores verdes (óxidos de cobre e manganês).

Figura 1.5 – Pavimentos em maiólica.



(a) colorido



(b) monocromático

Na península ibérica, especialmente em Portugal (Figura 1.6) a partir do século XV, desenvolveu-se o emprego de revestimentos, principalmente de paredes, mas também em tetos e pisos, que vêm a ser chamados de “azulejos”. Um azulejo designa uma peça cerâmica de pouca espessura, geralmente quadrada, em que uma das faces é vidrada, resultado da queima de um esmalte que se torna impermeável e brilhante. O termo azulejo vem do árabe *al zulaycha*, “pedra polida”, e não de “azul”, etimologia que parece evidente, pois a cor azul era a mais frequentemente utilizada.

Figura 1.6 – Azulejos na Estação Ferroviária de Aveiro, Portugal.



Na Andaluzia, a utilização de cerâmica de revestimento, além de atender a um requisito estético, atuava como isolamento dos ambientes, certamente apreciado, quando se considera que se trata da região europeia que no verão atinge as temperaturas mais elevadas. Na Espanha, consolida-se então a tradição de revestir com cerâmica os tetos, as escadas das casas, os bancos e os muros dos jardins geralmente adotando-se a técnica do corte de placas de grandes dimensões. As principais escolas espanholas localizavam-se em Sevilha, Valência, Toledo e Castellón de la Plana, que hoje é a sede de um grande polo de revestimento cerâmico.

A tradição espanhola é então exportada para as províncias dos Países Baixos e se perpetuou mesmo depois da sua independência. Os contínuos contatos da frota comercial holandesa com o Extremo Oriente resultaram em uma forte influência chinesa. As placas cerâmicas eram geralmente para revestimento de paredes e eram inseridas nas fachadas externas das casas ou utilizadas para revestir chaminés e contornar portas e janelas.

No século XVII, a produção holandesa ocupou um lugar de destaque no mercado europeu. Nesta mesma onda, nasceram importantes centros de produção na Inglaterra, França e Alemanha. O revestimento cerâmico encontra no banheiro o seu primeiro ambiente de grande emprego na Europa, favorecido pela introdução de normas de higiene, que obrigavam os estabelecimentos públicos a revestirem as paredes internas.⁵

Inicialmente, as placas cerâmicas produzidas apresentavam cores monocromáticas e os motivos decorativos eram realizados a mão e constituíam um grande obstáculo para alcance de elevados níveis de produção. A aplicação da serigrafia ao setor cerâmico de revestimento foi uma grande inovação. Esta técnica foi patenteada em 1907 pelo inglês Samuel Simon, mas é muito mais antiga e de origem oriental, e era empregada na impressão de papel.

Uma fase de grande desenvolvimento da indústria de cerâmica de revestimento corresponde ao início dos anos 1950 com o advento do *cottoforte*, produto obtido com as técnicas tradicionais de biqueima, cujas características permitiam sua utilização como pavimento.

Ainda nos anos 1950, duas importantes inovações tecnológicas foram introduzidas no processo produtivo: a prensa automática e o forno-túnel. Nos anos 1960, surgem as primeiras instalações que utilizavam o conceito da queima rápida que deu origem à tecnologia de monoqueima. Assim, foi possível a utilização de sistemas alta-

mente automatizados sem linhas contínuas de produção. O termo “monoqueima” pressupõe um sistema produtivo baseado na queima simultânea do suporte (substrato argiloso) e do esmalte (camada vítrea) em um único ciclo térmico. A afirmação definitiva do processo de monoqueima ocorreu em meados dos anos 1970.

Os anos 1970 e 1980 foram caracterizados por três eventos importantes para o setor cerâmico: a automação, a queima rápida e a crise energética. Certamente, a introdução da tecnologia de monoqueima, com a utilização dos ciclos rápidos de queima, originou, naquele período, profundas transformações com relação à tecnologia e às máquinas térmicas (fornos). Importantes soluções inovadoras foram introduzidas em todo o ciclo produtivo e especialmente na movimentação das placas cerâmicas.

Dos fornos-túnel, que previam o transporte das placas cerâmicas empilhadas sobre vagonetes, passou-se para os fornos a rolos com as placas cerâmicas apoiadas sobre placas de cerâmica refratária. A seguir, foram desenvolvidos os fornos cerâmicos atuais, nos quais as placas cerâmicas são movimentadas por rolos de cerâmica refratária que atuam também como apoio. Os fornos neste período passaram ainda por substanciais modificações: tornaram-se estruturalmente mais modernos, mais confiáveis, do ponto de vista do processo de queima e do controle de parâmetros termodinâmicos.

Além da economia energética, diversas foram as condições que contribuíram para a difusão da monoqueima: simplificação dos sistemas de esmaltação através do desenvolvimento de produtos gresificados, possibilidade de produção de placas de grandes formatos, e a adoção, nas instalações industriais, de sistemas avançados de automação.

A mais recente evolução em termos de produto e, por consequência, também de processamento de revestimentos, é o chamado grés porcelanato, desenvolvido inicialmente na Itália, em meados dos anos 1970. Como o nome pressupõe, esse produto apresenta características intermediárias entre o grés e a porcelana. Tal surgimento está associado por um lado a uma evolução conceitual e tecnológica de todas as fases do processo produtivo, a partir da reformulação das massas até a redefinição dos ciclos de queima; e por outro lado ao desenvolvimento das técnicas de coloração e decoração.

Atualmente, os produtos cerâmicos de revestimento estão presentes em residências privadas, estabelecimentos públicos, comerciais e industriais, bem como servem de elemento de construção para obras arquitetônicas que são ícones culturais e históricos. Por

sua versatilidade e apelo estético, os revestimentos cerâmicos podem ser encontrados, por exemplo, na Opera House de Sydney, Austrália, inaugurada em 1973 (Figura 1.7).

Figura 1.7 – Revestimentos cerâmicos na Opera House, em Sydney, Austrália.



(a) detalhe

(b) conjunto

Por sua praticidade, beleza e relação custo/benefício, os materiais cerâmicos são amplamente usados como revestimento, dentre outros locais, em:

- 24
- residências (cozinhas, banheiros, salas, fachadas, jardins, piscinas);
 - hospitais e indústrias (instalações assépticas ou fáceis de limpar);
 - áreas de alto tráfego (aeroportos, estações rodoviárias e ferroviárias, *shopping centers*).

Inúmeras outras aplicações podem ser imaginadas, acompanhando a evolução da tecnologia e do *design* aplicados à cerâmica de revestimento.

1.3 CERÂMICA NO BRASIL: DE MARAJÓ PARA O MUNDO

Antes mesmo da chegada dos europeus no ano de 1500, o Brasil já possuía uma tradição de produção cerâmica representada pela arte indígena, verificada em descobertas sobre civilizações antigas que habitavam no território nacional. Um exemplo é a cerâmica marajoara, no Pará (Figura 1.8).

Figura 1.8 – Cerâmica marajoara.



Durante o processo de colonização, notável foi a influência da arquitetura portuguesa. A produção de cerâmica se concretizou, em particular, nas belas fachadas revestidas de cerâmica (Figura 1.9), produzidas sob encomenda para as residências da aristocracia da nova colônia nos séculos XVII e XVIII. Nos ambientes internos, utilizava-se o azulejo, que revestia a meia altura as paredes dos banheiros, cozinhas e salas de jantar. Nos pavimentos, os produtos cerâmicos utilizados eram os ladrilhos hidráulicos com estilo decorativo simples, mas harmoniosos com os revestimentos das paredes.⁶

Figura 1.9 – Revestimentos cerâmicos no Brasil.



Nos séculos XIX e XX, os produtos cerâmicos passaram a ser valorizados através da realização de painéis como aqueles que podem ser vistos nos monumentos comemorativos do centenário

da independência do Brasil de 1922, de Victor Dubugras, em São Paulo (Figura 1.10a), painéis do pintor Candido Portinari no antigo Ministério da Educação e da Saúde no Rio de Janeiro e na igreja de São Francisco de Assis, em Belo Horizonte (Figura 1.10b) que fazem parte dos projetos dos arquitetos Lúcio Costa e Oscar Niemeyer.

A indústria brasileira de revestimentos cerâmicos surgiu a partir das antigas fábricas de tijolos, blocos e telhas de cerâmica, que no início do século XX começaram a produzir ladrilhos hidráulicos e, mais tarde, azulejos, placas cerâmicas e de vidro.

A partir da segunda metade da década de 1960, com a criação do Sistema Financeiro da Habitação, as indústrias nacionais de materiais e componentes para a construção civil passaram por um estágio de crescimento em consequência do grande aumento da construção de habitações. Todavia, foi somente no início dos anos 1970 que a produção de revestimentos cerâmicos alcançou uma demanda contínua, em modo tal que a indústria ampliou significativamente a sua produção, determinando o surgimento de um grande número de empresas.

A tecnologia construtiva brasileira, baseada no projeto e na construção com sistemas estruturais em concreto armado e sistemas de vedação predominantemente em alvenaria de blocos, assim como as características climáticas do país, assegura um elevado potencial de utilização da cerâmica de revestimento. Além disso, com o desenvolvimento de outros sistemas e materiais de construção, a indústria de cerâmica de revestimento tem continuado a crescer, refletindo a preferência do consumidor brasileiro e a expansão da sua utilização nos diversos ambientes das edificações.

Figura 1.10 – Revestimentos cerâmicos em painéis.



(a) monumento em comemoração ao centenário da Independência do Brasil, São Paulo, SP



(b) detalhe da Igreja da Pampulha, Belo Horizonte, MG

Figura 1.11 – Fachadas em mosaico da obra de Rodrigo de Haro (prédio da Reitoria da UFSC, Florianópolis, SC).



Fotos do arquivo da Agecom/UFSC cedidas por Jonas João Bastos.

Na arquitetura contemporânea brasileira, a cerâmica é utilizada como um material nobre, que não tem somente um papel funcional, mas que faz parte também da linguagem arquitetônica desenvolvida pelos projetistas. A obra de Rodrigo de Haro intitulada “Leitura Catarinense do Livro da Criação Latino-Americana”, realizada entre 1995 e 2000 e estampada em forma de mosaicos (Figura 1.11) na fachada da Reitoria da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), é um belo exemplo de expressão artística com o uso de revestimentos cerâmicos.

Exemplos do uso moderno de revestimentos cerâmicos em construções no Brasil são ilustrados na Figura 1.12.

A região de Santa Gertrudes, em São Paulo, e as regiões de Criciúma e Tijucas, Santa Catarina, concentram a maior parte do setor produtivo de cerâmica de revestimento no Brasil. O polo paulista apresenta atualmente o maior volume de produção, enquanto o polo catarinense, o maior volume de exportação. A proximidade de maiores centros consumidores, instalados na região sudeste, e a localização privilegiada no Mercosul são fatores determinantes para a concentração destas empresas, uma vez que a disponibilidade de matérias-primas naturais está presente na maioria das regiões do país.

Figura 1.12 – Revestimentos cerâmicos em obras contemporâneas no Brasil.



(a) pavimento interno em porcelanato polido



(b) piscina revestida com pastilhas cerâmicas



(c) fachada de prédio revestida com placas cerâmicas



(d) cozinha com revestimentos cerâmicos nas paredes e pavimentos

FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS: ASPECTOS GENÉRICOS

Os revestimentos cerâmicos podem ser classificados em função de seu acabamento superficial em esmaltados ou não esmaltados; pelo modo de conformação, em prensados, extrudados ou fabricados por outras técnicas; e ainda pelo grupo de absorção de água (AA), conforme mostra a Tabela 2.1, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da Norma Brasileira NBR 13817.⁷

Tabela 2.1 – Codificação dos grupos de absorção de água em função dos métodos de fabricação de acordo com a NBR 13817.⁷

Absorção de água AA (%)	Métodos de fabricação		
	Extrudado (A)	Prensado (B)	Outros (C)
AA ≤ 0,5	AIa	BIa	CI
0,5 < AA ≤ 3		BIb	
3 < AA ≤ 6	AIIa	BIIa	CIIa
6 < AA ≤ 10	AIIb	BIIb	CIIb
AA > 10	AIII	BIII	CIII

Como o nome sugere, os revestimentos são usados para recobrimento de chão, paredes ou mesmo tetos, tanto em ambientes internos como externos. Quando usados como revestimento de chão, são chamados normalmente de pisos; quando usados como revestimento de paredes, são conhecidos popularmente como azulejos.

Neste capítulo, classificam-se os revestimentos cerâmicos em função de suas características técnicas e estéticas. Em seguida, são apresentadas as matérias-primas empregadas, comuns a todos os processos ou produtos. Por fim, são introduzidos conceitos gerais acerca das etapas de produção e os fatores fundamentais que influenciam no processamento e nas propriedades finais dos revestimentos.

2.1 PRODUTOS

Os revestimentos cerâmicos podem ser classificados segundo especificações normativas, ou regras de mercado, de acordo com suas características estéticas e/ou técnicas.

A Tabela 2.2 apresenta um quadro resumido das principais características dos revestimentos pertencentes aos diversos grupos de absorção de água, a partir de especificações da norma NBR 13818⁷ para placas prensadas.

Tabela 2.2 – Classificação dos revestimentos cerâmicos (placas prensadas), segundo absorção de água e resistência à ruptura por flexão.⁷

Produto	Grupo de absorção de água	Absorção de água AA (%)	Módulo de resistência à flexão (MPa)	Carga de ruptura (N) para espessura $\geq 7,5$ mm
Porcelanato	BIa	0 a 0,5	≥ 35	≥ 1.300
Grés	BIb	0,5 a 3	≥ 30	≥ 1.100
Semigrés	BIIa	3 a 6	≥ 22	≥ 1.000
Semiporoso	BIIb	6 a 10	≥ 18	≥ 800
Poroso	BIII	> 10	≥ 15	≥ 600

A Tabela 2.3 apresenta as mesmas características da Tabela 2.2 a partir de especificações da norma NBR 13818⁷ para placas cerâmicas obtidas por extrusão.

Tabela 2.3 – Classificação dos revestimentos cerâmicos (placas extrudadas), segundo absorção de água e resistência à ruptura por flexão.⁷

Produto	Grupo de absorção de água	Absorção de água AA (%)	Módulo de resistência à flexão (MPa)	Carga de ruptura (N)
Placa extrudada	AIa	≤ 3	23	1.100
Placa extrudada	AIb	3 a 6	20	950
Placa extrudada	AIIb	6 a 10	17,5	900
Placa extrudada	AIII	> 10	8	600

A partir da análise das tabelas, é possível comparar os valores mínimos prescritos pelas normas com os valores reais dos produtos do mercado e pode-se especificar o tipo de placa cerâmica (neste caso, placas prensadas, já que são mais utilizadas) para diferentes aplicações, conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Aplicações de placas cerâmicas prensadas.

Ambiente	Absorção de água (%)	Resistência à abrasão PEI	Resistência a ataques químicos	Remoção de manchas (facilidade de limpeza)	Outras características
Paredes externas	– Regiões sujeitas a neve: 0 a 3% – Outras regiões: 0 a 10%	Não é necessário especificar	Elevada ou média	4 ou 5	—
Paredes internas	0 a 20%	Não é necessário especificar	Elevada ou média	4 ou 5	—
Pisos residenciais	0 a 10%	Banheiros: $\geq 1^*$ Quartos: $\geq 2^*$ Salas: $\geq 3^*$ Cozinhas: $\geq 3^*$ Quintais/Terraços: $\geq 4^*$	Elevada ou média	4 ou 5	Para quintais deve-se exigir coeficiente de atrito $\geq 0,4$
Escadas e rampas	0 a 10%	5	Elevada ou média	4 ou 5	– Exigir coeficiente de atrito $\geq 0,4$ – Carga ≥ 800 N
Pisos para garagens e calçadas	0 a 10%	≥ 4	Elevada ou média	4 ou 5	– Exigir coeficiente de atrito $\geq 0,4$ – Carga ≥ 800 N
Piscinas	– Regiões sujeitas a neve: 0 a 3% – Outras regiões: 0 a 20%	Não é necessário especificar	Elevada ou média	4 ou 5	– Em áreas que circundam a piscina exigir coeficiente de atrito $\geq 0,4$ – Carga ≥ 400 N
Pisos industriais	0 a 6%	5	Elevada ou média	4 ou 5	– Exigir coeficiente de atrito $\geq 0,4$ – Carga ≥ 1000 N
Pisos de cozinhas industriais e supermercados	0 a 6%	5	Elevada ou média	4 ou 5	– Exigir coeficiente de atrito $\geq 0,4$ – Carga ≥ 1000 N

*Valores mínimos requeridos.

2.2 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS

2.2.1 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS PARA MASSAS

As massas cerâmicas para revestimentos, e em geral para outras aplicações tradicionais, como sanitária e de mesa, são referidas como triaxiais, em função de serem constituídas, de um modo simplificado, por três grupos distintos de matérias-primas com características intrínsecas diferentes: plásticas, fundentes e refratárias. Essa divisão nem sempre é óbvia e eventualmente uma mesma matéria-prima pode assumir uma ou outra função, dependendo de combinações com outros componentes ou mesmo em função da temperatura de tratamento térmico. De qualquer modo, mantém-se aqui essa divisão, para efeito didático. Eventuais discrepâncias serão esclarecidas nos capítulos seguintes, acerca da fabricação de revestimentos cerâmicos específicos. Em particular, considera-se nesta obra apenas o processamento por via úmida.

Além das matérias-primas cerâmicas, por definição inorgânicas e não metálicas, podem ser usados ao longo do processo inúmeros aditivos, em geral em quantidades relativamente pequenas, mas exercendo funções muitas vezes imprescindíveis. Tais aditivos podem ser inorgânicos ou orgânicos, sintéticos ou naturais.

2.2.1.1 Matérias-primas plásticas

As matérias-primas plásticas, neste caso, são basicamente constituídas por argilas, tais como as pertencentes aos grupos das caulinitas, montmorilonitas e ilitas. A plasticidade está relacionada à natureza estrutural das argilas. As argilas são definidas como aluminossilicatos hidratados, arrançados estruturalmente em camadas, as quais, permitindo inclusão de certa quantidade de água, tornam-se plásticas, podendo dessa forma ser trabalhadas, moldadas ou deformadas quando submetidas a um esforço. A plasticidade pode ser definida como a capacidade de um material ser deformado sem ruptura pela ação de uma força e, posteriormente, reter a deformação resultante quando a força aplicada for removida.⁸

A plasticidade assume um papel importante na fabricação de cerâmicas de revestimento já que é um parâmetro que está relacionado intrinsecamente à própria argila, ao seu teor de umidade e à sua quantidade na preparação de massas cerâmicas. O sucesso na obtenção de placas cerâmicas isentas de defeitos após a etapa de prensagem

está diretamente relacionado, entre outros fatores, a uma adequada plasticidade dos pós utilizados.

2.2.1.2 Matérias-primas fundentes

Matérias-primas fundentes podem ser naturais ou sintéticas ou mesmo obtidas a partir de resíduos sólidos industriais de caráter inorgânico e que têm a finalidade de diminuir a temperatura de queima das massas cerâmicas por meio da formação de fase vítrea viscosa de baixa temperatura. O tipo de fase vítrea e a sua quantidade têm influência marcante na definição da densidade e, portanto, da porosidade dos produtos obtidos, auxiliando inclusive no controle da estabilidade dimensional das placas cerâmicas. Tradicionalmente, na fabricação de cerâmica de revestimento são utilizados como fundentes feldspatos e/ou feldspatoides sódicos ou potássicos. Convém salientar que as próprias argilas, além da sua função plastificante, dependendo da sua natureza mineralógica, como no caso das argilas ílíticas e/ou carbonáticas, podem exercer uma forte ação fundente. Outros minerais, como carbonatos de cálcio (calcitas) e/ou magnésio (dolomitas) e até subprodutos de mineração, são, com certa frequência, utilizados como fundentes. Nesse caso, as nefelinas beneficiadas ou resultantes do beneficiamento de outros minerais têm sido utilizadas. Além desses materiais naturais, podem ser utilizados argilas e esmaltes resultantes do processo de lavagem dos moinhos entre outros resíduos com caráter fortemente vítreo. De fato, trabalhos de pesquisa realizados recentemente⁹⁻¹¹ mostram esta possibilidade que já se tornou uma realidade em algumas empresas.

2.2.1.3 Matérias-primas refratárias

As principais matérias-primas refratárias e tradicionalmente utilizadas na fabricação de cerâmicas de revestimento são os quartzos e os quartzitos, todos com relativamente elevados teores de sílica (85 a 96% em média). Todavia, na fabricação de porcelanatos são utilizados também, muitas vezes, silicato de zircônio (média de 10%) para melhorar o índice de alvura e a resistência química e/ou ajustar o coeficiente de expansão térmica das massas. Esses materiais, portanto, reduzem a plasticidade da massa cerâmica, reduzindo, conseqüentemente, a sua retração de secagem e assim o tempo de secagem já que aumentam a sua permeabilidade. Reduzem, porém, normalmente, a resistência mecânica das placas cerâmicas no estado a verde e queimado.

Nesse caso, também é possível utilizar, entre outros materiais, resíduos sólidos industriais, como, por exemplo, a alumina resultante do tratamento da lama proveniente do processo de anodização do alumínio. De fato, esse resíduo pode ser uma matéria-prima utilizada na preparação de engobes e esmaltes e também na preparação de massas de porcelanato em substituição total ou parcial da alumina industrial, conforme, principalmente, os requisitos colorimétricos associados aos produtos.¹¹

2.2.1.4 Aditivos

Os aditivos, exceto os corantes que têm como objetivo conferir certa coloração às massas, quando é o caso, têm a finalidade básica de alterar as condições de moagem e influenciar, portanto, a reologia das suspensões cerâmicas, melhorando o rendimento dos atomizadores e assim do pó granulado ou atomizado obtido. Esses aditivos atuam, de maneira geral, como agentes de suspensão, como é o caso do caulim e da bentonita. Além desses, são normalmente adicionados agentes defloculantes, como silicato de sódio, tripoli-fosfato de sódio e poliacrilato de sódio.

2.2.1.5 Composição das massas

As massas são compostas por matérias-primas plásticas, não plásticas (fundentes e refratárias) e aditivos. Como poderá ser mais bem compreendido posteriormente através de exemplos específicos, cada grupo de matérias-primas tem funções específicas. As matérias-primas devem ser misturadas em proporções adequadas para atender a requisitos técnicos básicos de processo e também a requisitos estéticos relacionados sobretudo aos fatores decorativos que podem ser atribuídos a dado tipo de produto dependendo da aplicação e demanda de mercado. Convém enfatizar que a fração argilosa de uma massa cerâmica é decisiva no processamento e na obtenção de placas de cerâmica de revestimento de elevada qualidade.

2.2.2 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS PARA ESMALTES

As matérias-primas para a preparação de esmaltes cerâmicos intervêm em dois níveis: na fusão das fritas e na adição, às mesmas, de outras matérias-primas e aditivos para a preparação de um esmalte dosado (no estado sólido sob a forma de pó). Nesse caso, é necessário

utilizar matérias-primas insolúveis já que a moagem dos esmaltes é efetuada preferencialmente com água como veículo de aplicação. Por outro lado, na fusão, a insolubilidade é garantida pela operação de fritagem (resfriamento do vidro fundido em água). As matérias-primas utilizadas são quase sempre naturais.

Atualmente, existe uma variedade muito grande de tipologias de produtos fabricados pelas indústrias em operação no mercado cerâmico, mas que em linhas gerais podem ser classificadas em três grupos: brilhantes, mates e rústicos. Esses, por sua vez, estão relacionados diretamente com as fritas da composição dos esmaltes utilizados.¹²

2.2.2.1 Fritas

As fritas constituem o componente mais importante dos esmaltes cerâmicos atualmente. De fato, a utilização de fritas na formulação e preparação de esmaltes permite a obtenção de composições muito homogêneas e que podem variar dentro de amplos intervalos. É possível a inclusão de óxidos a partir de matérias-primas solúveis em água. Essa possibilidade não existe para os esmaltes crus formulados sem fritas, já que solubilizam em água durante a preparação. Isso resulta em esmaltes muito estáveis que podem ser aplicados a úmido (suspensão ou barbotina) consumindo menos energia durante a etapa de moagem e de consolidação (queima).

Os fornos utilizados para a fusão de fritas podem ser de tipo rotativo intermitente, para fritas que contêm óxidos de elementos químicos mais pesados, como é o caso da zircônia, ou de tipo soleira, contínuos, com maiores dimensões e com capacidade média de produção de 15 ton/dia. Nesse caso, os fornos são caracterizados por um sistema de alimentação e descarga contínuas, mas possuem menor flexibilidade de produção, sendo, portanto, mais adequados para produções em grande escala.

Com base no brilho e no grau de opacidade requeridos para os produtos ou placas de revestimentos cerâmicos, e considerando que as fritas correspondem, em média, 55 a 95% da composição dos esmaltes formulados, as fritas são comumente e industrialmente classificadas como:

- Fritas Brilhantes Transparentes ou “Cristalinas”

São fritas de baixa fusibilidade, compostas por um elevado

percentual de sílica e uma moderada quantidade de óxidos de metais alcalinos e alcalino-terrosos. O óxido de boro é adicionado em quantidades relativamente baixas. O aspecto dessas fritas é brilhante e transparente e são utilizadas para a preparação de esmaltes com essas características e para o recobrimento de diversas tipologias de produtos, sobretudo revestimentos para paredes, porcelanatos esmaltados e nos casos em que a decoração seja aplicada sob o esmalte. As fritas desta categoria, mais adequadas para queima rápida, são aquelas constituídas por pequenas quantidades de álcalis e de boro e maiores quantidades de zinco, cálcio e magnésio. Assim, o início de fusão é retardado, permitindo a passagem dos gases oriundos do suporte cerâmico até temperaturas relativamente elevadas (próximas da temperatura de maturação ou temperatura máxima de queima da placa cerâmica), fundindo-se rapidamente, já que os tempos disponíveis para escoamento dos esmaltes nas tecnologias de queima rápida são muito breves.

- **FRITAS BRILHANTES OPACAS**

Estas fritas se diferenciam das anteriores porque são opacificadas apenas com a utilização de silicato de zircônio. Têm características e aplicações idênticas às cristalinas, porém são brancas.

- **FRITAS BRILHANTES TRANSPARENTES DE MÉDIA FUSIBILIDADE**

Estas fritas se diferenciam das primeiras pela sua maior fusibilidade. Contêm menores quantidades de sílica e maiores quantidades de óxidos de elementos fundentes (Na, K, Ba, Li). São caracterizadas pelo brilho e transparência e encontram emprego na preparação de esmaltes para todas as tecnologias, incluindo aquelas utilizadas para queima (monoqueima) de pavimentos (1.160 °C por 45 min).

- **FRITAS FUNDENTES**

Essas fritas apresentam grande fusibilidade. Apresentam, após solidificação, uma superfície brilhante e, em certos casos, uma certa reatividade química com relação ao suporte cerâmico, apresentando ainda um coeficiente de expansão térmica normalmente elevado. Essas fritas podem ser a base de silicato de chumbo ou conter boro e alcalinos co-

mo elementos fundentes. São empregadas atualmente em tecnologias produtivas para esmaltes de monoqueima para pavimentos e nas tecnologias de baixa temperatura (terceira queima, 750 a 900 °C por 30 min).

- FRITAS MATES

Pertencem a esta categoria as fritas cujo elemento modificador (Ca, Ba, Zn, Ti, Mg) tende a devitrificá-las. Em alguns casos, verifica-se a cristalização sucessiva de novas fases imersas em uma fase vítrea residual. A variação de aspecto mais evidente consiste na matização da superfície acompanhada de uma melhora das características mecânicas (como a resistência ao desgaste por abrasão) do esmalte obtido. Todavia, é necessária certa atenção com relação à resistência ao ataque químico desses esmaltes, a qual é intensificada pela presença de zinco. Essas fritas podem ser subdivididas como contendo chumbo (plúmbicas) ou sem chumbo (aplúmbicas). Encontram emprego na composição de esmaltes mates nas tecnologias produtivas.

A Tabela 2.5 apresenta, a título de exemplo, a composição química de fritas industriais utilizadas na preparação de esmaltes para revestimentos cerâmicos obtidos por processo de monoqueima.

2.2.2.2 Matérias-primas não fritadas

Esmaltes ou vidrados são constituídos basicamente por elementos fundentes como os compostos de chumbo, boro, sódio e potássio, que normalmente estão presentes nas fritas com outros elementos refratários ou insolúveis. Esses elementos, não fritados, podem ser quartzo, alumina, silicato de zircônio e aditivos de moagem. São adicionados para conferir dureza ao risco e resistência ao desgaste por abrasão, índice de alvura, opacidade, e para ajustar o coeficiente de expansão térmica.

2.2.2.3 Aditivos

Os aditivos são normalmente adicionados na etapa de moagem do esmalte e atuam como agentes de suspensão e de adesão, como o caulim ou a bentonita e CMC (carboximetilcelulose), respectivamente. Além desses, são normalmente adicionados agentes defloculantes, comumente silicato de sódio, e ainda pigmentos.

Tabela 2.5 – Composição química de fritas industriais utilizadas na preparação de esmaltes cerâmicos para processos de monoqueima.¹²

Óxidos constituintes	Tipos de fritas/Composição química (% massa)				
	Transparente brilhante	Brilhante opaca	Fundente ao Pb	Mate ao Ca	Mate ao Zn
SiO ₂	56,9	53,6	35,9	45,6	38,5
B ₂ O ₃	4,5	4,3	5,0	20,5	8,5
Al ₂ O ₃	7,8	7,8	5,0	2,2	3,1
ZrO ₂	-	10,8	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-
CaO	9,0	9,2	-	26,6	4,5
BaO	5,2	-	-	-	-
ZnO	12,3	9,8	7,6	-	28,5
Na ₂ O	3,3	1,7	2,7	3,5	4,5
K ₂ O	1,0	2,8	2,4	1,6	1,1
PbO	-	-	43,5	-	11,3

2.3 PROCESSO

Além da natureza química e mineralógica das matérias-primas, as características finais de um produto dependem fortemente dos parâmetros tecnológicos adotados ao longo do processo de fabricação (Figura 2.1). Na definição das condições de operação de um determinado processo é fundamental avaliar as relações entre os aspectos tecnológicos, de natureza física e química, e os parâmetros de trabalho nas várias etapas do processo a seguir consideradas.

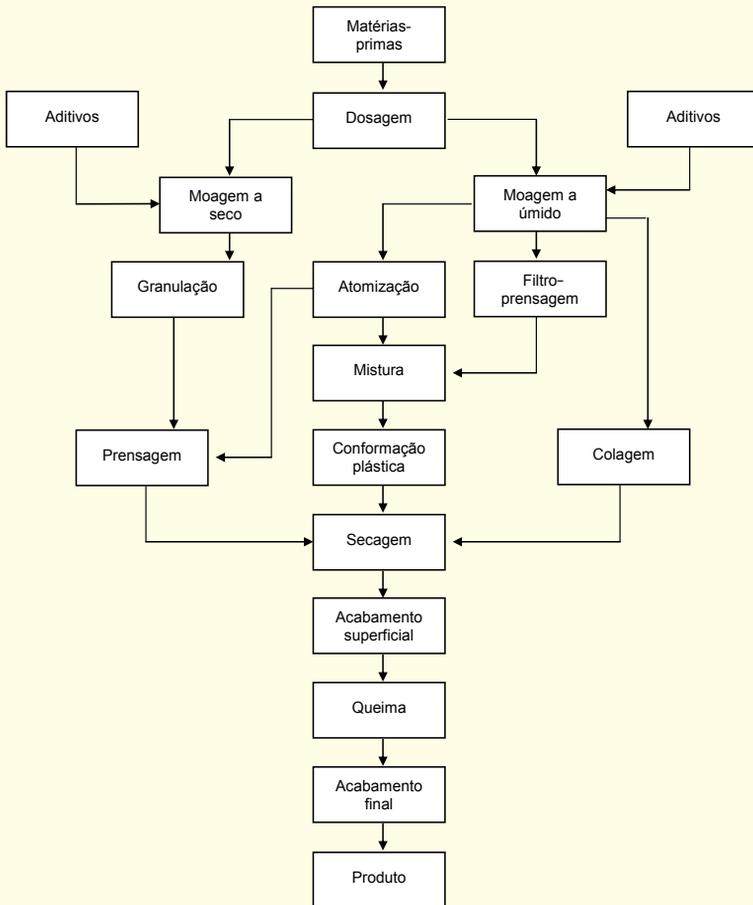
Assim, podem ser definidos caminhos alternativos para diversas etapas do processamento a partir do fluxograma genérico da Figura 2.1, como, por exemplo:

- moagem a seco → granulação → prensagem → queima;
- moagem a úmido → atomização → prensagem → queima;
- moagem a úmido → filtro-prensagem → conformação plástica → queima.

Por conformação plástica, entendem-se os processos nos quais a consistência do sistema cerâmico é um corpo plástico ou pasta, segundo a definição de Reed.⁴ Nesse caso, trata-se mais comumente de extrusão, embora a laminação (*roll pressing*) também possa ser aplicada.

A rigor, somente a conformação por colagem não é comumente usada para se fabricar industrialmente placas cerâmicas de revestimento.

Figura 2.1 – Fluxograma genérico do processo de fabricação de revestimentos.



Via de regra, para um mesmo produto, fixadas as demais condições de processamento, quanto menor a quantidade empregada de líquido (neste caso, água) menores os custos associados à produção. A eliminação de água, principalmente por processos térmicos, como em atomizadores ou em secadores, é uma etapa das mais dispendiosas ao longo da fabricação cerâmica.

Na Tabela 2.6, são apresentados de maneira não exaustiva algumas alternativas de processamento em geral associadas à fabricação de

revestimentos cerâmicos. As diferenças, vantagens e desvantagens de cada alternativa serão oportunamente discutidas ao longo deste livro. De acordo, portanto, com a Figura 2.1 e a Tabela 2.6, incontáveis combinações são possíveis. Em particular, neste trabalho, serão aprofundados os seguintes produtos processados a partir de moagem via úmida:

- revestimentos porosos obtidos por monoqueima (processo usualmente referido como “monoporosa”);
- revestimentos porosos obtidos por biqueima (incluindo ciclos lentos e rápidos);
- revestimentos gresificados (ou simplesmente, “grés”);
- porcelanatos (esmaltados ou não; polidos ou não).

Tabela 2.6 – Alternativas de processamento de revestimentos cerâmicos.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Moagem/mistura	Via seca	Via úmida	
Conformação	Prensagem	Extrusão	Laminação
Número de etapas de queima	Monoqueima	Biqueima	Terceira queima
Duração da queima/ tipo de forno	Ciclo lento (várias horas)/forno-túnel	Ciclo rápido (< 1 h)/forno a rolos	
Porosidade aparente das peças queimadas	Revestimentos porosos	Revestimentos gresificados	Porcelanatos
Esmaltação	Esmaltados	Não esmaltados	
Polimento	Polidos	Não polidos	

A escolha final de um produto/processo é uma questão tanto técnica quanto econômica e depende de vários fatores, como:

- escala de produção;
- capacidade de investimento inicial;
- equipamentos/processos já existentes;
- *know-how* adquirido;
- características das matérias-primas disponíveis;
- propriedades desejadas dos produtos.

2.3.1 DOSAGEM

A dosagem é uma operação que determina as quantidades relativas das matérias-primas que farão parte da composição de uma massa

formulada. Os sistemas de dosagem adotados envolvem máquinas e instalações que apresentam níveis de automação diferentes. No caso do processo de moagem intermitente para a dosagem das matérias-primas, podem ser utilizados sistemas com acionamentos mecânicos tradicionais ou sistemas mais sofisticados que empregam caixas de pesagem dotadas de células de carga deformáveis.

Nos processos de moagem contínua, geralmente é previsto um sistema de pesagem contínua sobre uma esteira controlada por um sensor. A mistura dosada é estocada temporariamente em um silo de pré-carga e, em uma etapa posterior, inserida no moinho contínuo. Em alguns casos, quando as características das argilas permitem, pode-se dissolver anteriormente uma parte dos materiais argilosos. Nesse caso, a suspensão argilosa, que contém parte ou a totalidade de dispersante especificado, pode ser dirigida ao moinho após a dosagem, ou mesmo ser depositada em vascas de estocagem para então ser misturada com a barbotina produzida pelo próprio moinho.

2.3.2 MOAGEM

Como observado nas seções anteriores, para qualquer tipo de placa cerâmica produzida, o ciclo de produção se inicia com a preparação da massa cerâmica e prossegue com a conformação (prensagem), secagem, preparação e aplicação de esmaltes e queima. Apesar de as soluções e tecnologias utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos assumirem configurações particulares, conforme cada caso, importantes diferenças de processo podem ser verificadas na fase de preparação da massa cerâmica que compreende as operações as quais são submetidas as matérias-primas destinadas ao suporte (substrato).

A moagem de matérias-primas cerâmicas para revestimento pode ser feita a seco ou a úmido. O processo a seco consiste na moagem das matérias-primas sem adição de água. O ajuste adequado da umidade para a posterior prensagem do pó é feito em uma etapa sucessiva, por meio de equipamentos de umidificação. O processo a úmido consiste na moagem das matérias-primas em presença de água e a subsequente atomização (secagem por *spray*) da suspensão ou barbotina obtida.

O critério fundamental de escolha entre essas duas tecnologias baseia-se principalmente nos tipos de matéria-prima:¹³ o processo a úmido é praticamente obrigatório quando se tem à disposição matérias-primas com características físicas muito diferentes, as quais devem ser,

além de moídas, homogeneamente misturadas. Esse é o caso de massas de queima branca para produção de grés porcelanato. Todavia, as massas preparadas pelo processo a úmido e, portanto, atomizadas, permitem na etapa de prensagem, por efeito das excelentes características granulométricas do pó obtido, um melhor preenchimento das matrizes ou estampos. Isso resulta em maiores densidades do produto a verde e seco e, portanto, melhores propriedades mecânicas da placa, tanto antes como depois da queima. Essas vantagens são muito importantes, sobretudo na tecnologia de monoqueima, de maneira particular quando são utilizados ciclos rápidos de queima.

O processo a seco, por outro lado, é muito menos dispendioso do ponto de vista energético, o que constitui sua principal vantagem. De fato, de maneira geral, o consumo específico de energia elétrica dos moinhos utilizados no processo a seco corresponde, em média, a ~12 kWh/t. Nos moinhos utilizados para a preparação de massas via úmida de grés e porcelanato, o consumo médio de energia corresponde, respectivamente, a ~19 e ~40 kWh/t. Mais importante ainda, do ponto de vista energético, é a quantidade de água evaporada no processo a úmido. Assumindo que as matérias-primas apresentem um teor de umidade de aproximadamente 6%, o processo a seco apresenta um consumo energético específico global 2,5 vezes menor do que o processo a úmido. Os grânulos obtidos apresentam uma morfologia similar àquela dos atomizados, porém com densidades aparentes maiores.¹⁴

No Brasil, a escolha do processo de moagem tem conotações históricas regionais. A moagem a úmido é predominante em Santa Catarina. Nesse estado, as plantas foram adquiridas com as tecnologias (principalmente italianas) mais recentes, disponíveis à época. Já os processos de moagem a seco são a regra no interior de São Paulo. A região de Santa Gertrudes, tradicionalmente um polo de cerâmica vermelha, paulatinamente passou da fabricação de tijolos e telhas, tipicamente um processo de moagem a seco, para a produção de revestimentos cerâmicos.

A moagem a úmido da massa pode ser realizada de maneira contínua ou descontínua. A escolha do tipo de processo de moagem pode depender de diversos critérios, como dimensão das instalações da fábrica, qualificação do pessoal envolvido e características das matérias-primas.

No Brasil, predominam, em ampla maioria, os processos descontínuos. Por razões econômicas, o uso de moinhos contínuos só se justifica em instalações novas com grande produtividade.

2.3.2.1 Moagem a úmido descontínua

Os moinhos descontínuos são cilíndricos, construídos em aço, dotados de orifícios de alimentação e descarga de materiais e revestidos internamente com materiais, tais como sílica, alumina, borracha. Os corpos de moagem podem ser de sílica ou de alumina. O acionamento pode ser realizado por meio de conversores estáticos de frequência com microprocessador. Esses dispositivos permitem a variação da velocidade de rotação do moinho, otimizando o consumo energético e a produtividade.

Na moagem intermitente, a carga, adequadamente dosada, é introduzida no moinho juntamente com as quantidades de água e dispersantes especificados. Finalizada a moagem, após o controle de resíduo, a barbotina é peneirada e descarregada nas vascas de estocagem.

2.3.2.2 Moagem a úmido contínua

O processo de moagem contínua pode ser uma alternativa vantajosa em termos técnicos e econômicos. Do ponto de vista tecnológico, as vantagens mais imediatas resultantes são maior estabilidade das características da barbotina e aumento da densidade. Com relação ao aspecto econômico, a moagem contínua representa uma economia direta no pessoal empregado e indireta na energia necessária para a evaporação da água. Nesse caso, é possível operar com barbotinas com maiores quantidades de sólidos em comparação com a moagem intermitente.

Os moinhos contínuos também são cilindros construídos em chapa de aço. O interior do moinho pode ser subdividido em duas ou três câmaras de moagem, separadas por um ou dois diafragmas. São disponíveis, externamente, sistemas desmontáveis para manutenção e inspeção. O revestimento interno de borracha resistente ao desgaste apresenta um perfil e espessuras particularmente elaboradas para fornecer a máxima eficiência durante a moagem. Também nesse caso são usados corpos de moagem de sílica ou alumina.

Na moagem contínua, a mistura de matérias-primas ou carga é introduzida no moinho por meio de diversos sistemas de alimentação, mas sem soluções de continuidade. No entanto, é prevista uma pré-mistura das matérias-primas e do defloculante com a suspensão aquosa contendo os resíduos do peneiramento. Na descarga do moinho, efetua-se um controle da barbotina inicialmente com uma peneira de maior

abertura de malha e então com uma bateria de peneiras com aberturas de malhas menores. O resíduo de peneiramento é arrastado pela água pré-dosada destinada ao moinho, enquanto a barbotina filtrada é conduzida para uma vasca de coleta provida de agitadores, da qual pode ser diretamente bombeada para o atomizador. Se as matérias-primas apresentarem baixos valores de resíduo, pode-se efetuar a dispersão de uma parte das argilas e eventualmente de resíduos de massa em um agitador, operando paralelamente ao moinho. Alternativamente, pode-se também prever uma dispersão preliminar das matérias-primas argilosas que serão sucessivamente conduzidas para o moinho, com outros componentes da massa. Esta opção revela-se particularmente interessante nos casos em que as massas são constituídas por uma fração relevante de argilas fortemente plásticas e com umidade natural superior aos 15-20%.

2.3.3 ATOMIZAÇÃO

A atomização é um processo no qual a água contida em uma barbotina é removida por evaporação de maneira controlada. A remoção não é total já que uma certa quantidade de água residual deve permanecer nos grânulos formados para lhes conferir uma plasticidade adequada para a etapa de compactação por prensagem. Tal quantidade de água residual que permanece varia normalmente, de acordo com as características das matérias-primas, entre 4 e 8%. A operação de atomização é realizada por injeção da barbotina, geralmente de baixo para cima mediante bombas de elevada pressão (25 a 30 bar). No interior da câmara cilíndrica de secagem, ocorre a nebulização, através de bicos injetores de várias dimensões, dispostos em um anel localizado ao centro da câmara principal do atomizador. Os bicos injetores são normalmente confeccionados em metal duro e distribuídos no anel em vários diâmetros (2 a 4 mm) dependendo da distribuição granulométrica desejada.

O vapor gerado por queimadores auxiliares a gás é injetado na parte superior do atomizador e distribuído tangencialmente a temperaturas que podem variar entre 650 e 750 °C, dependendo da produtividade e características finais desejadas dos pós atomizados. A troca térmica ocorre normalmente em direção contrária à injeção da barbotina (contracorrente). O atomizador é considerado também um digestor das águas residuais de lavagem, das lamelas de diversas origens (massas, esmaltes, tintas) e de todos os pós gerados no processo

produtivo. O atomizador pode ser fornecido com filtros a seco e a úmido para diminuir as emissões de particulados finos, dentro dos limites requeridos pelas normas vigentes nos diversos países. Caso contrário, os pós finos se dispersariam junto ao vapor na saída da chaminé. Eventualmente, o atomizador pode ser alimentado com sistemas de cogeração para diminuir os custos energéticos de operação. Após o processo de atomização, os grânulos formados, com granulometria e umidade controladas, são transportados através de esteiras para os silos de estocagem. Lá, permanecem em repouso por ao menos 48 h para a homogeneização e estabilização da umidade.

2.3.4 PRENSAGEM

O objetivo da conformação por prensagem de pós é obter, no estado verde ou cru, a maior densificação possível dos compactos obtidos, de modo compatível com os problemas que podem se manifestar durante a queima. Pressões de compactação diferentes exercidas sobre os pós resultam em valores distintos de densidade a verde e pós-queima.

As prensas hidráulicas atualmente disponíveis são particularmente adequadas à compactação desses materiais e indicadas para o caso de grandes formatos, considerando a magnitude da potência atingida. Além disso, essas prensas garantem elevada confiabilidade mecânica com mínima absorção de energia. É necessário, ainda, considerar alguns acessórios que são parte integrante da prensa, tais como: as matrizes (estampos) e os carros de alimentação. As matrizes geralmente utilizadas para a conformação dos pisos gresificados são do tipo punção móvel. Normalmente, são revestidos com borracha para diminuir os tempos de limpeza. A utilização da borracha é também ideal para a obtenção de efeitos superficiais de tipo estruturado. O punção pode ser do tipo rígido ou isostático. Esse último permite uniformizar a densidade ao longo da placa cerâmica.

Além dos aspectos referentes à pressão de compactação, é fundamental que os grânulos ou pós atomizados preencham uniformemente as cavidades da matriz. Carregamentos inadequados normalmente geram problemas de geometria nas placas cerâmicas obtidas, como falhas de ortogonalidade e/ou dimensões. Esses problemas podem ser resolvidos mediante a utilização de dispositivos específicos pré-posicionados junto ao sistema de alimentação dos pós na matriz com o emprego de punções isostáticas.

2.3.5 SECAGEM

A secagem é a etapa do processo produtivo onde ocorre a eliminação da umidade residual dos produtos provenientes da etapa de prensagem. Essa operação pode ser realizada por meio de secadores verticais ou horizontais. As placas cerâmicas logo depois de prensadas são transportadas através de rolos móveis para o secador.

Os secadores verticais são constituídos por uma estrutura móvel, construída em perfis de aço e revestida com painéis isolantes. No interior do canal de secagem, as placas cerâmicas são movimentadas através de sistemas basculantes acionados mecanicamente. Canalizações internas distribuem ar quente para a zona de secagem e ar frio para a zona de resfriamento. O aquecimento do ar ocorre por meio de queimadores que podem operar com combustíveis líquidos e/ou gasosos.

Os secadores horizontais são constituídos por estruturas metálicas modulares revestidas com painéis isolantes com tubulações externas para a circulação de ar. As placas cerâmicas percorrem toda a extensão do secador sobre um ou dois planos de rolos com velocidades ajustáveis. O secador como um todo é constituído por módulos iguais e independentes do ponto de vista das condições térmicas, higrométricas e do fluxo de ar de ventilação. Cada módulo ou zona de secagem é dotado de geradores próprios de ar quente. Normalmente, o módulo final do secador é projetado de modo que a temperatura das placas cerâmicas na saída do secador seja sempre constante.

No caso de secadores verticais, os ciclos de secagem variam de 35 a 70 min. Por serem mais curtos, esses secadores operam a temperaturas que variam normalmente de 150 a 180 °C. Os secadores horizontais, por outro lado, operam com ciclos de secagem mais rápidos (6 a 20 min), já que fisicamente são mais longos, a temperaturas que podem variar de 200 a 250 °C. Em ambos os casos, no entanto, a duração do ciclo depende das características da massa, da dimensão e espessura das placas cerâmicas.

2.3.6 ESMALTAÇÃO

Produtos esmaltados são obtidos através do processo de esmaltação, por aplicação de técnicas a seco e a úmido. Nesse último caso, são utilizados dispositivos, tais como discos, aerógrafos e máquinas serigráficas. Por outro lado, no caso de aplicação de esmaltes por via seca (granilhas e aglomerados), são utilizados granilhadores.

A utilização de diferentes esmaltes com características intrínsecas muito particulares requer uma notável flexibilidade nos ambientes de trabalho, especialmente nas linhas de esmaltação. Além disso, as etapas de aplicação de diferentes tipos de esmaltes em um mesmo produto apresentam características muito diferentes, requerendo conhecimentos específicos para cada produto. Existem revestimentos que requerem aplicações simples, como algumas aplicações a disco que demandam deposições mínimas de até 500 g/m^2 e outras que requerem aplicações complexas (até 20 diferentes aplicações) com deposição de esmaltes de até 3 kg/m^2 . Tais esmaltes podem ser aplicados tanto a úmido (com densidade de $1,2$ a $2,0 \text{ g/cm}^3$) como a seco (com granulometrias diversas). Frequentemente, são necessárias aplicações de colas e ligantes orgânicos.

São notáveis as solicitações às quais são submetidos os suportes cerâmicos no estado verde. Os suportes crus devem ser capazes de absorver quantidades substanciais de água e simultaneamente não devem apresentar deformações ou variações significativas de planaridade, pois as operações de decoração por serigrafia podem ser prejudicadas.

Para se obter um bom nível de flexibilidade das linhas de esmaltação é necessário prover numerosos sistemas de aplicação ao longo destas, com possibilidades de trocas rápidas quando da esmaltação de um novo produto. Isso requer o desenvolvimento de linhas de esmaltação muito longas. Para se obter efeitos estéticos dos tipos envelhecido ou rústico são necessárias ações como nebulização de esmaltes, escovação, aplicações a seco. Para se obter superfícies brilhantes, os dispositivos mais adequados para aplicação de engobes e de esmaltes são as baterias de campanas. Além disso, são muito utilizados os sistemas de nebulização que permitem uma distribuição uniforme da água, dos fixadores e dos engobes.

Com relação à impressão serigráfica, considerando as tipologias e os motivos decorativos requeridos, atualmente são utilizadas máquinas planas ou rotativas. Essas últimas estão rapidamente se difundindo, pois, além da presteza na execução da operação de decoração, necessitam poucos ajustes e manutenção. Existem diversos tipos de máquinas serigráficas rotativas. No entanto, a distinção é baseada essencialmente no princípio da impressão.

Atualmente se assiste a uma rápida evolução das linhas de esmaltação, cada vez mais automatizadas, com sistemas dinâmicos

de pesagem do esmalte em linha, sistemas de controle de velocidade por meio de inversores eletrônicos. Em virtude da energia despendida para remoção de umidade, além das perdas de materiais e problemas de limpeza, existe uma forte tendência a uma adoção cada vez maior de sistemas de aplicação de esmaltes e decoração a seco. De fato, já existem sistemas que permitem a esmaltação e a decoração a seco na prensa ou em sistemas compactos.

2.3.7 QUEIMA

A utilização de curvas de queima otimizadas permite que as reações de fusão e cristalização dos vários componentes da massa e do esmalte que constituem o produto se realizem de maneira adequada. Tais reações contribuem para a obtenção de suportes cerâmicos com absorção de água e retração dentro de especificações predeterminadas, resultando em produtos com características técnicas melhoradas com valorização estética da superfície esmaltada.

As condições de gresificação de uma massa cerâmica dependem não só da natureza física e química da massa considerada, mas também do grau de moagem, da densidade aparente do compacto e da temperatura máxima de queima.

A partir da década de 1970, passou-se do processo de queima lenta para o de queima rápida. Todas as etapas do processo produtivo foram revistas com base nessa inovação, que determinou perspectivas tecnológicas antes inexistentes.

Atualmente, o conhecimento das matérias-primas, da natureza das massas, da composição dos engobes e esmaltes simplificou e padronizou também essa etapa. Fornos e equipamentos cada vez mais complexos permitiram que se alcançassem ajustes e controles de temperatura não praticados alguns anos atrás. As dimensões das seções dos fornos foram ampliadas e paralelamente foram melhorados os sistemas de combustão.

Os queimadores e as respectivas câmaras de combustão são normalmente dimensionados para operar a elevadas vazões de produtos da combustão e com baixa potência térmica específica. Além disso, existem atualmente queimadores capazes de distribuir a chama de maneira flutuante na seção transversal do forno, com possibilidade de regulagem de sua potência, frequência de fluxo e tempo de chama. Tal solução permite uma otimização da distribuição de calor, em particular na zona crítica das curvas de queima.

O bloco queimador que constitui em geral a câmara de combustão pode ser construído mediante a utilização de diversos materiais cerâmicos refratários. Em particular, pelo seu maior rendimento e vida útil, utiliza-se carbetto de silício. O uso de carbetto de silício resulta em uma maior resistência térmica do bloco queimador nas temperaturas máximas de trabalho, e em uma maior resistência ao choque térmico.

Outra parte integrante dos fornos são os rolos de transporte das placas cerâmicas. Esses podem ser confeccionados a partir de materiais cerâmicos ou metálicos, e, dependendo das suas características, são intercalados nas diversas zonas de queima. A adoção da monoqueima rápida facilitou a movimentação das placas cerâmicas, favorecendo a fabricação de grandes formatos e a flexibilidade produtiva.

Os ciclos e as temperaturas de queima adotadas, em geral, variam, respectivamente, entre 30 e 60 min e 1.100 e 1.200 °C, dependendo da natureza das massas cerâmicas e das dimensões das placas cerâmicas a serem queimadas.

FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS POROSOS POR VIA ÚMIDA

Nos últimos anos, em consequência do crescente interesse demonstrado pelo mercado e fabricantes por novas soluções estéticas, propostas em função do desenvolvimento de novas tipologias de esmaltes, os revestimentos porosos ou de parede assumiram grande importância.^{15,16} Pertencem a este grupo todos os produtos cerâmicos de revestimento que, após queima, apresentam entre outras características comuns absorção de água superior a 10%. Tais produtos cerâmicos encontram emprego geralmente nos interiores residenciais e são comumente chamados de azulejos.

As cerâmicas de revestimento porosas são classificadas no Brasil pelas normas NBR 13818.⁷ Pertencem mais especificamente ao grupo BIII conforme indicado nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 da seção anterior. Do ponto de vista comercial, existem algumas famílias de produtos cujas características típicas de produção e emprego serão apresentadas nos próximos tópicos. Do ponto de vista tecnológico, os revestimentos cerâmicos são obtidos por processos de biqueima tradicional (muito raramente hoje em dia), biqueima rápida e monoqueima porosa (monoporosa).

A biqueima rápida é uma técnica de queima similar à biqueima tradicional, já que as peças cerâmicas são submetidas a duas queimas distintas. Entretanto, a diferença básica, como será visto mais detalhadamente nos tópicos subseqüentes, está na velocidade de queima, nas fritas e esmaltes empregados e no processamento deles. Uma evolução posterior à biqueima rápida é a monoporosa (embora ambas as técnicas sejam concorrentes). A técnica monoporosa pode ser definida como o procedimento de fabricação de revestimentos cerâmicos porosos através de prensagem a seco e ciclo de monoqueima rápida. A experiência adquirida ao longo dos anos demonstrou que o processo

de monoqueima rápida, além de ter coberto um mesmo segmento de mercado, com custos relativamente moderados e com elevado potencial de difusão, permitiu a obtenção de produtos com características químicas, físicas e mecânicas melhores que os tradicionais produtos porosos obtidos com as antigas técnicas de biqueima.

Nesse contexto, este capítulo apresenta, de modo sintético e objetivo, um quadro geral relativo à classificação dos produtos porosos e suas principais características técnicas e estéticas. Na sequência, considerando as matérias-primas comumente empregadas, são apresentadas as tecnologias produtivas e os fatores fundamentais que influenciam no processamento e nas propriedades finais dos produtos de revestimento. Nesse caso, a abordagem se limita ao processamento por via úmida, dada a sua predominância em termos mundiais.

3.1 PRODUTOS

Os produtos cerâmicos porosos de revestimento podem ser classificados de acordo com especificações normativas, bem como segundo regras de aceitação de mercado, de acordo com suas características estéticas e/ou técnicas.

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PRODUTOS

De acordo com a classificação geral das cerâmicas de revestimento, estão incluídos os produtos obtidos por biqueima e por monoqueima. Conforme a norma NBR 13818,⁷ as cerâmicas em geral são classificadas em vários grupos, os quais por sua vez dependem do método de fabricação e do valor de absorção de água do produto acabado. No caso de revestimentos para paredes (azulejos), a norma os classifica, conforme a absorção de água, no grupo BIII e prescreve os requisitos a serem atendidos pelo produto acabado, como mostra a Tabela 3.1.

Como se pode verificar, os materiais de revestimento porosos pertencem ao grupo BIII, isto é, apresentam valores de absorção de água superiores a 10%. Por outro lado, pode-se verificar uma classificação diversa (Tabela 3.2), embora relacionada também aos valores de absorção de água, segundo as normas ASTM/ANSI A 137-1.¹⁷ Nesse caso, os materiais de revestimento porosos são considerados não vitrificados, apresentando valores de absorção de água entre 7 e 18%.

Tabela 3.1 – Classificação e requisitos técnicos para produto acabado conforme NBR 13818.⁷

Características		Valores prescritos BIII (prensado)
Absorção de água	Média	≥ 0%
	Individual (máx.)	9%
Resistência à flexão ⁽¹⁾	Média	≥ 15 MPa
	Individual (mín.)	12 MPa
Carga de ruptura	Espessura < 7,5 mm	≥ 600 N
	Espessura ≥ 7,5 mm	≥ 200 N
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)		-
Expansão por umidade ⁽²⁾		Por acordo
Dilatação térmica linear ⁽²⁾		Por acordo
Resistência ao choque térmico ⁽²⁾		Por acordo
Resistência ao gretamento ⁽²⁾		Não gretar
Coeficiente de atrito		A declarar
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ⁽³⁾		A declarar
Dureza Mohs ⁽³⁾		Por acordo
Resistência ao congelamento ⁽²⁾		Por acordo
Resistência ao impacto ⁽²⁾		Por acordo
Resistência ao manchamento		≥ classe 3 (E); a declarar (NE)
Cádmio e chumbo solúveis ⁽²⁾		Por acordo
Usos domésticos e para tratamento em piscinas ⁽⁴⁾		≥ classe GB (E); ≥ classe UB (NE)
Ácidos e álcalis de baixa concentração ^(3,4)		A declarar (E/NE)
Ácidos e álcalis de alta concentração ^(2,4)		A declarar (E/NE)

(E) esmaltado; (NE) não esmaltado; (1) Não aplicável em placas cerâmicas com carga de ruptura ≥ 3000 N. Revestimentos com carga de ruptura < 400N devem ser utilizados somente para uso em paredes e devem ser indicados pelo fabricante. (2) Os valores em função de aplicações específicas podem ser verificados pelos métodos de ensaios disponíveis e os limites acordados entre as partes. (3) A classe, conforme o anexo D da norma NBR 13818, declarada pelo fabricante, deve ser verificada. (4) Ligeira mudança de tonalidade não é considerada ataque químico.

Tabela 3.2 – Classificação dos revestimentos cerâmicos segundo a norma ASTM-ANSI A 137-1.¹⁷

Placas cerâmicas prensadas	Absorção de água – AA (%)			
	AA ≤ 0,5	0,5 < AA ≤ 3	3 < AA ≤ 7	7 < AA ≤ 18
Pavimentos	muito vitrificado	vitrificado	semivitrificado	não vitrificado
Revestimentos	-	-	semivitrificado	não vitrificado

3.1.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Em geral, podem ser atribuídas as seguintes características aos revestimentos de parede:

- máxima estabilidade dimensional durante a queima, com valores de retração praticamente nulos (inferiores a 1%);
- porosidade compreendida entre 3 e 18% (expressa como absorção de água);
- valores de módulo de ruptura do produto queimado entre 200 e 250 kgf/cm² (~20 a 25 MPa).

Tabela 3.3 – Características técnicas de revestimentos porosos pela NBR 13818⁷ para o grupo BIII.

Características	Valores prescritos por norma	Valores reais dos produtos
Absorção de água	> 10 %	13-18 %
Resistência à flexão média	≥ 12 MPa	> 20 MPa
Resistência à abrasão*	Por acordo	Especificada pelo fabricante
Resistência ao gretamento	Não gretar	Não gretar
Expansão térmica linear	Por acordo	70 a 75 x 10 ⁻⁷ °C ⁻¹
Resistência a produtos químicos domésticos	A declarar	A declarar
Resistência ao choque térmico	Não gretar	Não gretar
Dureza Mohs	Por acordo	4 (parede); 5 (piso)
Resistência a ácidos e bases	A declarar	A declarar
Resistência a manchas	Por acordo	2

*Em se tratando de pavimentos.

As características citadas anteriormente devem ser consideradas indicativas e como parâmetros de enquadramento do produto sob o perfil mercadológico, para uma dada aplicação. As especificações complementadas pela NBR 13818⁷ para o grupo BIII, conforme Tabela 3.3, são referentes às características dimensionais, físicas e químicas dos produtos. Na tabela, também estão relacionadas, além de alguns valores prescritos pela norma, as características dos materiais comercializados para um confronto mais próximo da realidade.

3.1.3 CARACTERÍSTICAS ESTÉTICAS

3.1.3.1 Formatos

Entre 1960 e 1970, os formatos produzidos através do processo de queima tradicional eram 15x15 e 20x20 cm. Com o emprego da biqueima rápida e também da monoqueima porosa (monoporosa), as dimensões foram adaptadas a formatos maiores, como 25x33, 33x45 cm e em alguns casos 40x60 cm. Os formatos mais difundidos, de qualquer modo, são 20x20, 20x25 e 25x33 cm. A produção de grandes formatos, considerados geralmente produtos exclusivos, é bem mais modesta. A possibilidade de produzir grandes formatos está fundamentalmente relacionada à utilização de fornos “monoestrato” e aos sistemas de automação adotados nas novas indústrias cerâmicas de queima rápida.

3.1.3.2 Peças especiais

Um fato importante e de crescente difusão é a utilização de peças especiais consideradas como elementos de complemento à produção de cerâmicas de revestimento padrão. Essas apresentam relevos obtidos por prensagem e normalmente são vendidas a terceiros que as finalizam através de processo de esmaltação e subsequente decoração e queima (terceira queima). Além das peças especiais, é continuamente crescente, particularmente nos países americanos e asiáticos, a procura por peças especiais (conhecidas como *trim*) com funções de ordem técnica, e utilizadas na oclusão de ângulos externos e internos e para o acabamento do perímetro de superfícies recobertas com peças cerâmicas. Geralmente, essas peças são obtidas com prensas de potência limitada e estampos especiais. O processo de queima normalmente

empregado é o de biqueima. As peças queimadas, na maioria dos casos, são revestidas com esmaltes padronizados e normalmente não passam por processo decorativo.

3.1.3.3 Aspecto superficial

A característica superficial base das cerâmicas de revestimento, na maioria dos casos, tem sido o brilho. O aspecto dos esmaltes é geralmente transparente (frita “cristalina”) ou mesmo opaco (fundamentalmente brancos), raramente mate. Nas décadas de 1960 e 1970, no caso da queima tradicional, foram utilizadas fritas com alto teor de chumbo, boro e cério para obter efeitos decorativos. O efeito dessas superfícies sob o perfil cerâmico era muito particular e interessante, enquanto a resistência à abrasão e aos agentes químicos era baixíssima. Adotando-se novas formulações químicas e substituindo-se parcialmente o chumbo por outros fundentes, foram obtidas fritas transparentes e esmaltes equivalentes aos precedentes e adequados às novas tecnologias. Nos últimos anos, diversas soluções arquitetônicas têm requerido novas tipologias, caracterizadas por apresentarem um aspecto rústico ou envelhecido. Esses efeitos, em alguns casos, são realçados por características particulares inseridas na própria peça cerâmica. O percentual mais elevado da produção, todavia, tem sido o de esmaltes com efeitos brilhantes, enriquecidos com decorações similares àquelas das pedras naturais, como o mármore.

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS PARA MASSAS

Conforme uma classificação comercial, as massas cerâmicas adequadas para a produção de cerâmica de revestimento por via úmida podem ser distinguidas em vermelhas e brancas (tal aspecto é evidenciado principalmente após a etapa de queima). Em ambos os casos, as matérias-primas utilizadas são constituídas por duas tipologias fundamentais:

- matérias-primas argilosas;
- matérias-primas complementares (feldspatos, areias feldspáticas, quartzo e calcitas).

As Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam, a título indicativo, um quadro típico das características químicas e físicas das matérias-primas frequentemente utilizadas na formulação de massas de biqueima rápida ou de monoporosa.

Tabela 3.4 – Composição química indicativa de matérias-primas empregadas na fabricação de revestimentos cerâmicos (monoporosas).^{15,16}

Matérias-primas	Composição química (% massa)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.F.*
Argilas carbonáticas	55	12	1	0,5	0,1	1	8	1	12
Argilas gresificáveis	60	15	2	1	0,1	3	1	0,5	6
Argilas plásticas	55	22	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	6
Argilas caulínicas	50	25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	7
Areias feldspáticas	80	9	2	1	1	1	1	0,5	2
Quartzo	92	2	0,1	0,1	0,5	1	0,5	0,5	1
Calcita	2	1	0,5	0,5	0,5	0,5	46	2	40

*Perda ao fogo.

A Tabela 3.4 refere-se a composições químicas de matérias-primas utilizadas especificamente na fabricação de revestimentos cerâmicos tipo monoporosa, dada sua importância como produto de alta qualidade, sobretudo de elevada estabilidade dimensional para o revestimento de paredes.

Tabela 3.5 – Características físicas típicas (valores médios) de matérias-primas argilosas.^{15,16}

Características físicas	Argilas			
	Carbonáticas	Gresificáveis	Plásticas	Caulínicas
Resistência à flexão a verde (MPa)	1,1	1,5	2,0	0,8
Resistência à flexão a seco (MPa)	2,2	2,3	2,9	1,7
Queima a 1.100 °C				
Porosidade (%)	10	4	7	17
Retração linear (%)	3	5	4	3
Resistência à flexão (MPa)	20,6	24,5	21,1	9,8

A Tabela 3.5 apresenta algumas características físicas referentes a matérias-primas (as mesmas indicadas na Tabela 3.4) utilizadas na fabricação de revestimentos cerâmicos as quais, por sua vez, indicam a

magnitude e a sua relação com o processo e a fabricação de produtos de qualidade. Nas seções seguintes, serão reportados alguns detalhes específicos sobre as características gerais e mineralógicas das referidas matérias-primas.

3.2.1 MATÉRIAS-PRIMAS PLÁSTICAS

Nas argilas carbonáticas, as fases mineralógicas presentes podem ser íltico-cloríticas e eventualmente íltico-cauliníticas. A quantidade de calcita presente na matriz argilosa pode ser variável e alcançar valores muito elevados. Essas argilas contribuem também para conferir plasticidade à massa. Geralmente, após a queima, apresentam uma coloração bege-laranja pela presença de minerais ferrosos.

Argilas plásticas não carbonáticas (tipo *ball clay*) são caracterizadas pela ausência quase total de carbonatos. Os argilominerais podem ser do tipo íltico-clorítico. Têm a função de conferir plasticidade ao sistema e permitem a obtenção de valores adequados de módulo de ruptura a verde (úmido e seco), e também após a queima, já que geralmente dão origem a materiais gresificados.

Argilas plásticas brancas (tipo *china clay*) dão origem a materiais ou produtos de coloração branca. A matriz argilosa é de tipo caulínica, com pouca ilita. A granulometria é geralmente fina. Consequentemente, tais argilas apresentam um comportamento plástico destacado. Após a queima, esses materiais evidenciam características de resistência mecânica e porosidade de grande interesse cerâmico.

Em argilas caulínicas, o comportamento pirométrico é geralmente refratário. A baixa plasticidade depende essencialmente da granulometria intrínseca do material. O emprego de argilas carbonáticas e/ou gresificáveis é limitado à obtenção de um suporte cerâmico de coloração bege-laranja, enquanto a utilização de argilas de tipo *ball clay* e *china clay* a suportes brancos.

3.2.2 MATÉRIAS-PRIMAS NÃO PLÁSTICAS

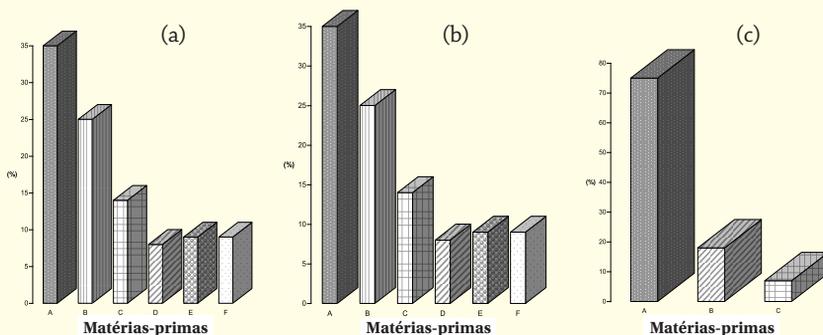
São introduzidas na composição como materiais inertes ou refratários para facilitar a eliminação de compostos voláteis que se desenvolvem durante o processo de queima.

No caso da utilização de feldspatos, é preferível o tipo potássico, porque é menos reativo que o sódico. A utilização de feldspatos con-

tribui também para a redução do coeficiente de expansão térmica global da massa cerâmica.

O quartzo é também uma matéria-prima que fundamentalmente tem a função de ajustar o coeficiente de expansão térmica, o qual aumenta proporcionalmente a quantidade presente de SiO_2 . A reatividade do quartzo livre com relação aos óxidos presentes na massa é considerada baixa já que sua granulometria geralmente é grosseira e os ciclos de queima são também rápidos.

Figura 3.1 – Indicação de possíveis composições (% massa) de matérias-primas para massas de monoqueima (branca e vermelha) e biqueima rápida (vermelha).



(a) A – argilas brancas, B – argilas cauliniticas, C – areias feldspáticas, D – feldspato, E – quartzo, F – calcita (monoporosa – queima branca); (b) A – argilas carbonáticas, B – argilas gresificáveis, C – areias feldspáticas, D – feldspato (monoporosa – queima vermelha); (c) A – argilas carbonáticas, B – argilas gresificáveis, C – chamote (biqueima rápida – queima vermelha).^{15,16}

Calcitas e dolomitas são matérias-primas fundamentais nas massas de revestimentos porosos. Os percentuais presentes podem variar de 8 a 15%. Particularmente importante é a granulometria natural ou pós-moagem dessas matérias-primas. Partículas muito finas favorecem as reações de síntese com os fragmentos dos materiais argilosos residuais, especialmente a sílica amorfa, tornando possível a formação de novos compostos cristalinos, a temperaturas superiores a 900 °C. Relevante é a cinética de decomposição de carbonatos e, portanto, a completa eliminação de CO_2 gasoso, antes do amolecimento da fase vítrea da superfície esmaltada. A evolução e a finalização das reações de síntese entre sílica, alcalino-terrosos e alumina têm um papel importante na definição das características físico-mecânicas das peças cerâmicas após queima (resistência mecânica, coeficiente de expansão térmica).

As proporções quantitativas entre matérias-primas argilosas, calcita, feldspatos e quartzo são dependentes da natureza mineralógica e granulometria intrínseca das argilas. A título de exemplo,^{15,16} a Figura 3.1 apresenta três composições de matérias-primas para massas de monoporosa (queima branca e vermelha) e de biqueima rápida (queima vermelha), respectivamente.

Como pode ser visto pela análise da Figura 3.1, as composições (a) e (b), em termos de matérias-primas, são referentes a massas de monoporosa de queima branca e vermelha, respectivamente. De fato, de acordo com a composição química de massas (1 e 2) desta natureza (Tabela 3.6), pode-se perceber um maior teor de cálcio caracterizado pela presença de calcita na composição (a), e argilas carbonáticas na composição (b), típicas do processo de monoporosa, associado a um elevado teor de ferro, oriundo das argilas, o qual caracteriza a composição (b) de queima vermelha. Na composição (c) referente a uma massa de biqueima rápida de queima vermelha, são utilizados um menor número de matérias-primas, porém com uma ação fundente maior (composição 4 da Tabela 3.6) que se caracteriza pelas argilas carbonáticas e gresificáveis presentes que apresentam um elevado teor de ferro, sobretudo a argila gresificável e além disso contém maiores teores de sódio e potássio. A ação fundente e a retração de secagem são equilibradas pela presença de chamote.

3.2.3 ADITIVOS

Os aditivos alteram as condições de moagem e influenciam a reologia das suspensões cerâmicas, melhorando o rendimento do processo de atomização. Esses aditivos podem atuar como agentes de suspensão, como o caulim e a bentonita. Além desses, são normalmente adicionados defloculantes, como silicato de sódio.

3.2.4 COMPOSIÇÃO DAS MASSAS

As composições químicas das massas podem ser formuladas para a fabricação de produtos que adquirem a coloração branca ou vermelha após queima. As massas que dão origem a produtos de coloração vermelha são compostas predominantemente por argilas carbonáticas com alto teor de ferro. As outras matérias-primas componentes da massa podem ser constituídas por areias feldspáticas, feldspatos e quartzitos e, quando necessário, calcitas e/ou dolomitas.

A diferença mais relevante entre as composições brancas e vermelhas consiste na quantidade e tipologia da argila utilizada, enquanto a diferença mais significativa entre as massas biqueimadas e monoqueimadas é que as primeiras podem apresentar teores de calcita e/ou dolomita da ordem de 15 a 18%, e as últimas podem se valer de matérias-primas de pureza levemente inferior.

A Tabela 3.6 apresenta algumas composições químicas típicas de massas para monoqueima e biqueima rápida, de queima vermelha e branca.^{15,16}

Tabela 3.6 – Composições (% massa) típicas de massas para monoqueima e biqueima rápida.^{15,16}

Óxidos	Massas			
	1	2	3	4
SiO ₂	65,4	54,8	60,3	59,4
Al ₂ O ₃	12,9	16,0	13,4	11,6
K ₂ O	0,72	2,40	1,20	2,50
Na ₂ O	0,19	1,00	0,25	2,00
CaO	7,00	8,10	9,40	5,80
Fe ₂ O ₃	0,53	4,90	1,90	4,60
TiO ₂	0,29	0,90	0,57	0,63
MgO	1,30	0,80	0,31	3,10
Perda ao fogo	11,7	11,3	12,8	10,4

As composições 1 (queima branca) e 2 (queima vermelha) referem-se a massas de monoporosa, e as composições 3 (queima branca) e 4 (queima vermelha) a massas de biqueima rápida.

3.3 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS PARA ESMALTES E ENGOBES

Os esmaltes mais frequentemente utilizados para cerâmica de revestimento são os brilhantes, que podem ser transparentes ou opacos (nesse caso, fundamentalmente brancos). Esses esmaltes são formulados a partir de fritas dos mais variados tipos, dependendo da técnica de queima a ser empregada, isto é, biqueima tradicional, biqueima rápida ou monoporosa. Além das fritas, cujos percentuais utilizados são da ordem de 90 a 95%, são introduzidas na mistura também pequenas quantidades (5 a 10%) de matérias-primas plastificantes, como caulins, argilas plásticas, como também aditivos orgânicos (CMC, PVA) para ajustar a viscosidade das suspensões (barbotinas) na fase de aplicação e ancoramento ao suporte.

3.3.1 BIQUEIMA TRADICIONAL

Entre as décadas de 1960 e 1970, os esmaltes para biqueima tradicional eram formulados com fritas que continham altos teores de chumbo e boro. Gradativamente, esses fundentes foram substituídos por outros de tipo alcalino e à base de boro. Os esmaltes opacos tinham a mesma matriz vítrea das transparentes, com adição (8 a 12%) de silicato de zircônio ($ZrSiO_4$). O ponto de amolecimento das fritas empregadas é, nesse caso, muito baixo (750 a 850 °C), enquanto a temperatura de queima é da ordem de 950 °C.

3.3.2 BIQUEIMA RÁPIDA

Os esmaltes adequados à biqueima rápida, cujo ciclo de queima varia entre 30 e 50 min, apresentam tempos muito curtos (2 a 4 min) para maturação da fase vítrea. Em consequência, as fritas apresentam pontos de amolecimento a temperaturas moderadas e uma baixa viscosidade durante a fusão a máxima temperatura de queima (aproximadamente 1.050 a 1.100 °C). Para alcançar esses objetivos, são utilizados, na maioria dos casos, fundentes alcalinos a base de boro. Com a finalidade de compatibilizar a viscosidade à temperatura máxima de queima, as fritas atuais apresentam na formulação elevados teores de óxido de cálcio (CaO) e zinco (ZnO), com teores menores de óxido de sódio (Na_2O). O acordo dilatométrico com o suporte e/ou engobe é um fator indispensável no controle da planaridade das peças cerâmicas.

3.3.3 MONOPOROSA

A necessidade de utilizar nas composições de massas para revestimentos minerais carbonáticos úteis, como portadores de óxidos de cálcio e magnésio, implicou em drásticos problemas tecnológicos no estudo de esmaltes para monoqueima porosa. As emissões de gases (CO_2) atribuídas à utilização de calcita e/ou dolomita, em intervalos de temperaturas entre 750 e 950 °C (correspondentes à zona de maturação dos esmaltes tradicionais) foi um dos problemas maiores para o estudo e resolução desse processo. A exigência de se alcançar, para os esmaltes, temperaturas de amolecimento superiores a 950 °C levou a novas formulações conhecidas como “autofundentes”, baseadas em composições eutéticas. Isso foi possível através da diminuição de óxidos

como B_2O_3 e Na_2O e pela introdução de CaO , MgO , ZnO e K_2O como elementos ativos e capazes de formarem eutéticos a altas temperaturas. Além da temperatura de amolecimento, outros fatores também importantes, úteis na definição do perfil térmico de uma frita para monoporosa são, por exemplo, a tensão superficial e a viscosidade a uma dada temperatura. Uma baixa tensão superficial favorece a eliminação de eventuais bolhas de gás, presentes na fase vítrea que forma o esmalte durante a queima. Baixos valores de viscosidade a uma dada temperatura favorecem, ao contrário, uma melhor extensão do esmalte, melhorando também a sua molhabilidade quando em contato com o engobe e/ou suporte cerâmico. Um outro fator também importante e que influencia as características de um esmalte, além da reatividade com o engobe e/ou suporte, é o valor do seu coeficiente de expansão térmica. A compatibilidade dilatométrica com o suporte e/ou engobe é um fator indispensável no controle da planaridade das peças cerâmicas.

3.3.4 ENGOBES

Os engobes apresentam uma composição química intermediária entre o esmalte e o suporte cerâmico. Do ponto de vista físico, são camadas finas, análogas às dos esmaltes e localizadas entre o esmalte e o suporte cerâmicos. A aplicação de engobe é praticamente indispensável na monoporosa e aconselhável na biqueima. Entre as funções principais do engobe, podem-se mencionar:

- ajuste do acordo dilatométrico entre suporte e esmalte;
- inibição de eventuais reações entre o esmalte e impurezas cromóforas provenientes da massa;
- diminuição do custo do esmalte aplicado, já que a aplicação de engobe implica em menores quantidades de esmalte depositado;
- redução do defeito da “mancha d’água”.

Os engobes normalmente utilizados para monoporosa e biqueima rápida são constituídos por fritas (30-40%), argilas tipo *ball clay*, silicato de zircônio, e eventualmente feldspato e quartzo. As funções específicas dos constituintes individuais podem ser resumidas da seguinte forma:

- as fritas formam a matriz vítrea;
- as argilas contribuem com as características plásticas necessárias do sistema;

- o silicato de zircônio realça a cor branca;
- o quartzo e o feldspato permitem o controle da fusibilidade da mistura e do coeficiente de expansão térmica.

As características finais de um engobe para monoporosa consistem tipicamente em:

- ausência de desenvolvimento de uma fase vítrea apreciável até 1.000 °C e, portanto, inércia química até esta temperatura;
- nível elevado de coloração branca;
- impermeabilidade a soluções contendo corantes que possam entrar em contato com o suporte queimado (não manchamento);
- adesão ao suporte queimado e formação de uma camada intermediária entre suporte e esmalte, fortemente desenvolvida.

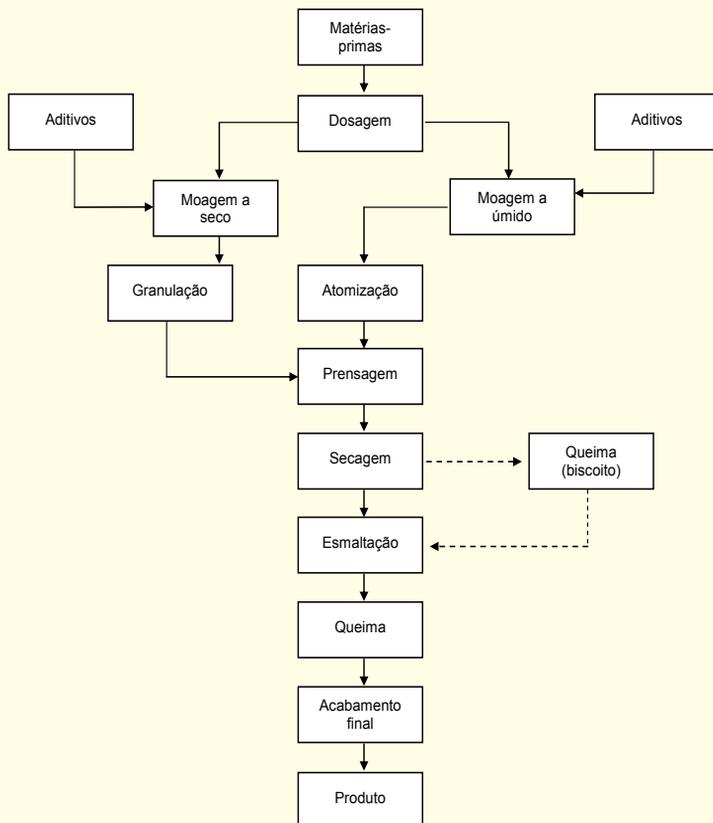
3.3.5 ADITIVOS

Os aditivos, como acontece em quase todos os tipos de cerâmicas de revestimento esmaltadas, são normalmente adicionados na etapa de moagem do esmalte, com finalidade sobretudo reológica, e atuam como agentes de suspensão e de adesão, como o caulim ou a bentonita e o CMC (carboximetilcelulose), respectivamente. Além desses, são normalmente adicionados agentes defloculantes como silicato de sódio e pigmentos que têm a finalidade de conferir determinada coloração ao esmalte conforme o tipo de óxido cromóforo que o constitui.

3.4 PROCESSO

Além da natureza química e das fases mineralógicas das matérias-primas, as características finais de um produto dependem dos parâmetros tecnológicos adotados durante o processo produtivo, como mostra o fluxograma da Figura 3.2 referente ao processo de fabricação de revestimentos cerâmicos de monoporosa e de biqueima rápida. Ao se definirem, portanto, as condições de trabalho de um determinado processo, é importante avaliar as interações entre os aspectos tecnológicos de natureza física e química e os parâmetros de processo nas várias etapas da produção.

Figura 3.2 – Fluxograma do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos porosos de monoporosa (linha contínua) e de biqueima rápida (linha tracejada).



Como pode ser observado no fluxograma da Figura 3.2, tudo começa, a rigor, com a dosagem, já que a escolha das matérias-primas, com base em critérios técnicos e mercadológicos, é uma etapa que antecede o processo propriamente dito; todavia, independente do processo utilizado para a fabricação de revestimentos para aplicação em parede ou pavimento, exceto para o porcelanato, que tem suas particularidades nas etapas de dosagem e será, portanto, considerado em seção oportuna. A etapa de dosagem, em linhas gerais adota equipamentos de uso comum e que se diferenciam de acordo com o fluxo produtivo, isto é, se o processo de moagem é contínuo ou intermitente

conforme descrito na seção anterior referente aos aspectos genéricos dos revestimentos cerâmicos. Assim sendo, o processo se estabelece claramente a partir da etapa de moagem, já que ela define o processo de fabricação, isto é, por via úmida ou por via seca; por monoqueima ou por biqueima rápida. Considerando nesse caso o processo por via úmida, os processos de monoqueima (linhas contínuas no fluxograma) e biqueima rápida (linhas tracejadas no fluxograma) diferenciam-se basicamente, como indicado na Figura 3.2, a partir da etapa de secagem, já que nesse caso as placas de monoqueima são esmaltadas e queimadas, e classificadas e encaminhadas para o setor de expedição. Já as placas cerâmicas obtidas pelo processo de biqueima rápida são queimadas, ainda que de maneira contínua (linha única), em duas etapas consecutivas que estão relacionadas respectivamente às queimas do suporte e do esmalte.

3.4.1 DOSAGEM

A dosagem é uma operação que determina as quantidades relativas das matérias-primas que farão parte da composição de uma massa formulada. Os sistemas de dosagem adotados envolvem máquinas e instalações que apresentam níveis de automação diferentes. No caso do processo de moagem intermitente, para a dosagem das matérias-primas podem ser utilizados sistemas com acionamentos mecânicos tradicionais ou sistemas mais sofisticados que empregam caixas de pesagem dotadas de células de carga deformáveis.

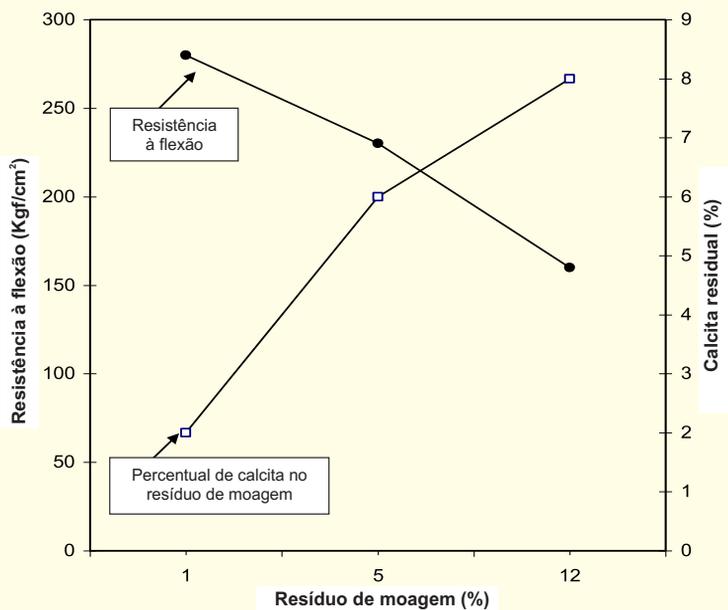
Nos processos de moagem contínua, geralmente há um sistema de pesagem contínua sobre uma esteira controlada por um sensor. A mistura dosada é estocada temporariamente em um silo de pré-carga e, em uma etapa posterior, inserida no moinho contínuo. Em alguns casos, pode haver uma mistura prévia dos materiais argilosos. Nesse caso, a suspensão argilosa pode ser dirigida ao moinho ou ser armazenada em vascas e misturada com a barbotina produzida pelo próprio moinho.

3.4.2 MOAGEM

A moagem tem por objetivo a cominuição e a homogeneização das matérias-primas. No caso de massas para monoqueima porosa, o grau de moagem das matérias-primas, além de outros fatores de ordem física e química, pode influenciar a velocidade de decomposição dos

carbonatos durante a queima. Assim, a moagem pode condicionar sensivelmente a temperatura em que não se verificam mais emissões de gás CO_2 proveniente do suporte cerâmico. Além disso, o grau de moagem pode controlar a reatividade entre os vários componentes durante a queima e favorecer a formação de novos compostos de modo mais ou menos intenso. Uma alta reatividade favorece a cristalização e contribui para melhorar as características mecânicas do material queimado.⁶

Figura 3.3 – Variação da resistência à flexão após queima e do percentual de calcita para diferentes resíduos de moagem.^{15,16}

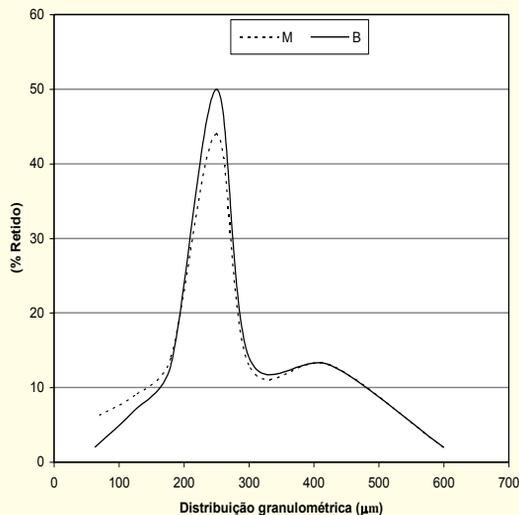


A Figura 3.3 evidencia as variações de resistência à flexão que podem ser verificadas em revestimentos porosos queimados, obtidos a partir de composições que apresentam valores de resíduo de moagem diferentes. No mesmo gráfico, também é possível verificar o percentual de CaCO_3 presente no resíduo. Em linhas gerais, após a moagem, o resíduo é da ordem de 4 a 6% na peneira de 230 mesh (63 μm) tanto para massas de monoporosa como de biqueima. No caso de massas de queima vermelha, constituídas principalmente por matérias-primas argilosas, tais valores podem diminuir para 3 ou 4%.¹

3.4.3 ATOMIZAÇÃO

Tal processo corresponde à evaporação parcial da água contida na barbotina simultaneamente com a formação de aglomerados esféricos. A distribuição granulométrica de uma massa para revestimento não é particularmente diferente das massas atomizadas empregadas na produção de pisos de monoqueima ou porcelanato. A Figura 3.4 apresenta distribuições granulométricas representativas de massas de monoporosa (M) e biqueima (B). Como se vê, não são observadas diferenças substanciais entre os dois pós atomizados. Nota-se, em ambos os casos, uma forte concentração de partículas, aproximadamente 70 a 80%, na faixa entre 425 e 180 μm .

3.4 – Distribuições granulométricas típicas de massas de monoporosa (M) e biqueima (B).^{15,16}

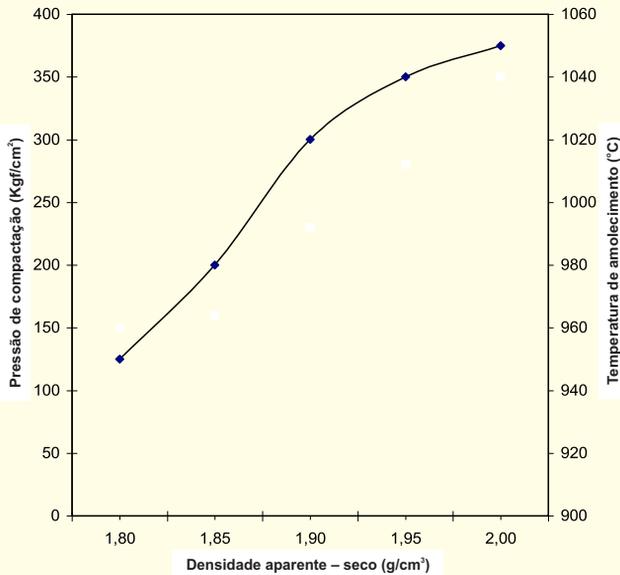


3.4.4 PRENSAGEM

O objetivo da conformação por prensagem é obter elevada densidade a verde, porém compatível com os problemas de “coração negro” ou desgaseificação, que podem se manifestar durante o processo de queima. Naturalmente, pressões de compactação diferentes exercidas sobre os pós geram gradientes de densidade aparente nas peças prensadas e, por consequência, levam a retração e porosidade diferenciadas após a queima.

No caso de produtos porosos, a retração apresenta valores muito baixos (inferiores a 1%). Valores de densidade aparente elevados (superiores a $2,1 \text{ g/cm}^3$) podem dificultar a expulsão dos gases do suporte durante a queima e causar problemas de porosidade no esmalte, com conseqüente formação de bolhas. Nesse caso, tais gases são expulsos tardiamente, quando o esmalte já se encontra fundido e estendido. Por outro lado, diferenças de densidade aparente na mesma peça cerâmica prensada, em conseqüência de problemas de preenchimento da matriz de compactação, podem levar à retenção de ar. Por sua vez, isso pode dar origem a gradientes de porosidade que causam problemas de extensão e absorção dos esmaltes aplicados.

Figura 3.5 – Pressão, densidade a seco e temperatura de queima para fritas de revestimentos porosos.^{15,16}



A Figura 3.5 apresenta os valores ótimos dos parâmetros (pressão, densidade a verde, temperatura) para os quais as fritas com pontos de amolecimento diferentes não devem apresentar problemas decorrentes da decarbonatação. Geralmente, a pressão de compactação para massas de revestimento é da ordem de 200 a 250 kgf/cm^2 (~ 20 a 25 MPa). Para as massas vermelhas, tipicamente mais plásticas, a pressão pode ser inferior, da ordem de 150 kgf/cm^2 (~ 15 MPa).

3.4.5 SECAGEM

Na secagem, ocorre a evaporação de umidade residual da massa, da ordem de 4 a 7%. Simultaneamente, verifica-se um aumento de resistência mecânica da peça cerâmica, atribuída a uma densificação causada pelo empacotamento e atração de partículas que aumenta as forças de ligação entre elas. Esses valores devem ser suficientemente altos no caso da monoqueima. De fato, para suportar as solicitações mecânicas na fase de impressão serigráfica, os valores de resistência à flexão devem ser superiores a 25 kgf/cm^2 ($\sim 2,5 \text{ MPa}$). Com os ciclos de secagem atualmente utilizados, para evitar problemas de trincas e pequenas fissuras localizadas nas bordas das peças cerâmicas, é conveniente manter as variações dimensionais (retração) na fase de secagem entre 0 e 0,3%.

Os secadores industriais são de tipo vertical ou horizontal. No caso de secadores verticais, os ciclos de secagem variam de 35 a 70 minutos e por esta razão, isto é, por serem mais curtos (secadores), operam a temperaturas que variam normalmente de 150 a 180 °C. Os secadores horizontais, por outro lado, operam com ciclos de secagem mais rápidos (6-20 min), já que fisicamente são mais longos, a temperaturas que podem variar de 200 a 250 °C. Em ambos os casos, no entanto, a duração do ciclo depende das características da massa, da dimensão e espessura das placas cerâmicas.

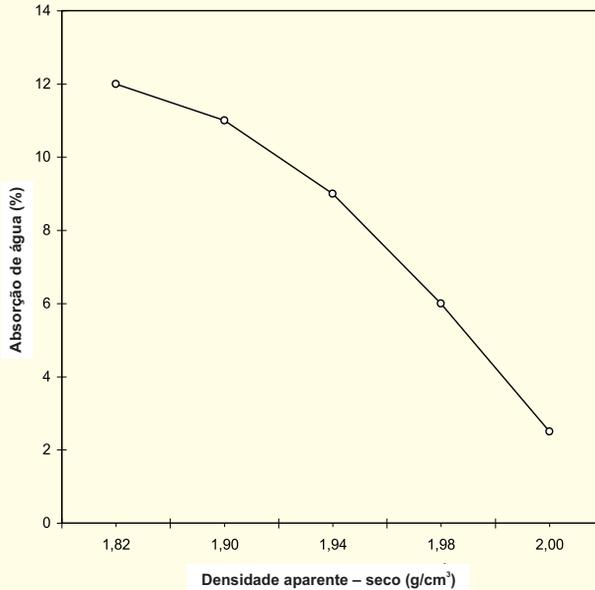
3.4.6 QUEIMA DO SUPORTE (PRIMEIRA QUEIMA)

Neste caso, as curvas de queima e a temperatura dos fornos devem permitir a evolução das reações entre os diversos componentes, de modo que sejam obtidas as características finais do suporte. As reações de sinterização de uma massa cerâmica não dependem apenas da natureza física e química de uma dada massa, mas também do grau de moagem, da densidade aparente e da temperatura de queima. Na Figura 3.6, verifica-se a influência da densidade a verde sobre a porosidade, expressa como absorção de água após secagem (antes da queima). A Figura 2.7, por outro lado, evidencia a variação dos valores do coeficiente de expansão térmica de amostras queimadas a diferentes temperaturas. Em ambos os gráficos, os dados se referem a massas de queima vermelha.

Pode-se ver que durante secagem industrial ocorre uma diminuição da absorção de água (perda de umidade) caracterizada por um

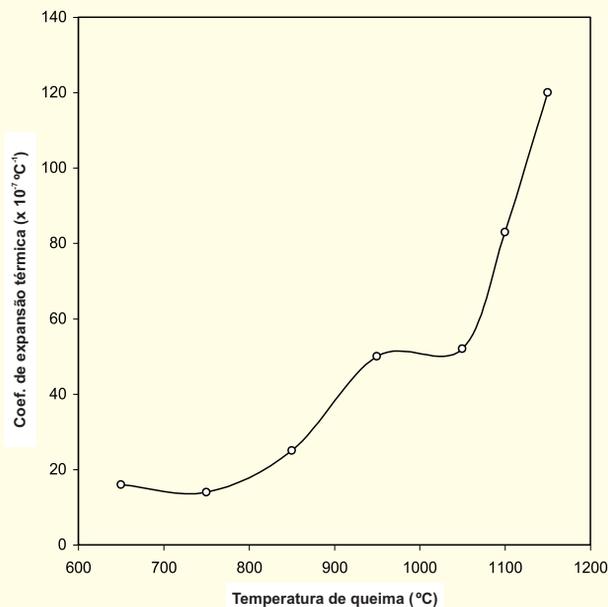
aumento da densidade aparente e da retração (não apresentada aqui) da placa cerâmica. Tal comportamento indica a variação dimensional que ocorre nos produtos após a secagem e serve como parâmetro de controle já que fora de certos limites tal variação dimensional pode causar defeitos como empenamentos ou fissuras das placas cerâmicas que muitas vezes são percebidos somente após o processo de queima.

Figura 3.6 – Absorção de água em função da densidade aparente a seco.^{15,16}



O coeficiente de expansão térmica linear das massas aumenta, em linhas gerais, à medida que a temperatura de queima aumenta, como mostra a Figura 3.7. Nesse caso, o aumento do coeficiente de expansão térmica até pelo menos 1.000 °C pode ser associado à decomposição de substâncias orgânicas e sobretudo de carbonatos de cálcio com a formação de fases amorfas e cristalinas de maior coeficiente de expansão térmica. A expansão que se segue, a temperaturas mais elevadas e com maior intensidade, está relacionada à formação de fase líquida viscosa rica em sílica e que resulta, no resfriamento subsequente, na formação de fase(s) cristalina(s) alotrópicas da sílica de elevado coeficiente de expansão térmica.

Figura 3.7 – Coeficiente de expansão térmica de amostras queimadas a diferentes temperaturas.^{15,16}



3.4.7 ESMALTAÇÃO

No caso de materiais de revestimento, as tipologias de produtos mais comercializadas são fritas brilhantes transparentes ou brancas opacificadas. Atualmente, estão sendo comercializados produtos com superfícies diversas, com efeitos rústicos ou envelhecidos. Essa tendência, bastante usual no setor de pisos, está interessando também ao mercado de revestimentos de parede, ainda que de maneira limitada.

Os dispositivos mais frequentemente utilizados para a aplicação de esmaltes de revestimento são os do tipo campana. Esses dispositivos permitem a obtenção de superfícies lisas e especulares, através da aplicação de um véu contínuo de esmalte com espessura e velocidade de queda constantes sobre o suporte a verde ou queimado.

Atualmente, para inibir problemas relativos à esmaltação dos suportes de monoporosa, tenta-se reduzir ao máximo a quantidade de água na barbotina de esmalte. Tais suspensões apresentam tipicamente características pseudoplásticas e tixotrópicas. As características reológicas ótimas de um esmalte padrão tradicional, no caso de aplicação a campana, são: densidade elevada, limite de escoamento mínimo, visco-

sidade constante e valores muito baixos de tixotropia. Na Tabela 3.7 são apresentadas algumas das características anteriormente mencionadas relativas a diferentes suspensões utilizadas industrialmente.^{15,16}

Tabela 3.7 – Características típicas de suspensões de esmalte utilizadas industrialmente.^{15,16}

Suspensões	Viscosidade (mPa·s)	Limite de Escoamento (Pa)	Tixotropia (Pa/s·cm ³)
Engobe	185	3,5	125
Esmalte branco	365	2,5	110
Esmalte transparente	325	2,5	45

Durante a esmaltação de suportes biscoitados, ocorre a difusão de água do esmalte para o suporte, dependendo da capilaridade do mesmo. Essa migração de água permite a absorção pelo biscoito, facilita a aderência ao suporte e condiciona a extensão do esmalte, assim como o seu tempo de secagem. Isso implica na necessidade de controle da velocidade de absorção do biscoito, que depende da composição de base do suporte, do grau de densificação do biscoito, e da densidade e viscosidade do próprio esmalte. No caso da esmaltação de monoporosa, as variáveis de processo a serem controladas são numerosas e se tornam restritas em consequência das tolerâncias com relação a:

- características reológicas do esmalte;
- funcionamento correto dos dispositivos de aplicação;
- características das peças após secagem (resistência mecânica, umidade residual e temperatura das peças cerâmicas).

Um outro aspecto particularmente importante é o peneiramento dos esmaltes e a eliminação de partículas ferrosas. Para o peneiramento, podem ser empregadas peneiras vibratórias circulares de elevada eficiência. A separação magnética de impurezas cromóforas ferrosas é realizada através de dispositivos magnéticos, tais como barras magnéticas cilíndricas, rolos ou colmeias. A eficiência dos dispositivos está relacionada com a quantidade e a densidade dos esmaltes.

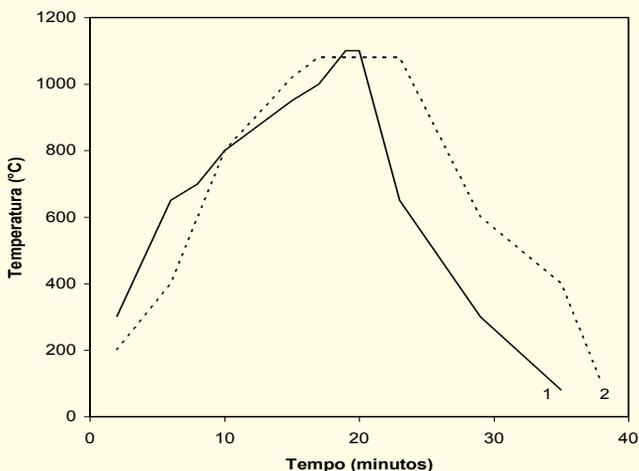
3.4.8 QUEIMA DO ESMALTE (BIQUEIMA RÁPIDA)

No processo de biqueima, geralmente são utilizados dois tipos de fritas que genericamente podem ser classificadas em “tradicionais” ou de “composição eutética”. A temperatura de queima das primeiras é da ordem de 1.020 a 1.050 °C, enquanto, para as fritas eutéticas,

é de 1.080 a 1.120 °C. Em ambos os casos, todavia, a queima do material requer ajustes e curvas diferentes daquelas utilizadas no caso da monoporosa. Nesse caso, as curvas de queima devem permitir a completa fusão dos esmaltes e serem adequadas às temperaturas de fusão das respectivas fritas. O suporte esmaltado é mantido por alguns minutos à máxima temperatura para favorecer a extensão e o brilho do esmalte. Após a queima, independentemente do tipo de frita utilizada, procede-se a uma fase de resfriamento rápido até aproximadamente 600 °C. Alcançada tal temperatura, o resfriamento prossegue muito lentamente até 500 °C, para se evitar tensões atribuídas à transformação do quartzo. Os ciclos de queima adotados oscilam entre 30 e 50 min, conforme o formato da peça.

Na Figura 3.8 são apresentadas as curvas de queima correspondentes ao biscoito (a) e ao esmalte (b). A temperatura de queima é a de 1.000 a 1.050 °C para as fritas tradicionais e 1.080 a 1.100 °C para as eutécticas. Os ciclos adotados oscilam entre 30 e 50 min dependendo do formato das peças cerâmicas.

Figura 3.8 – Curvas de queima típicas correspondentes ao (1) biscoito e ao (2) esmalte em processo de biqueima rápida.^{15,16}



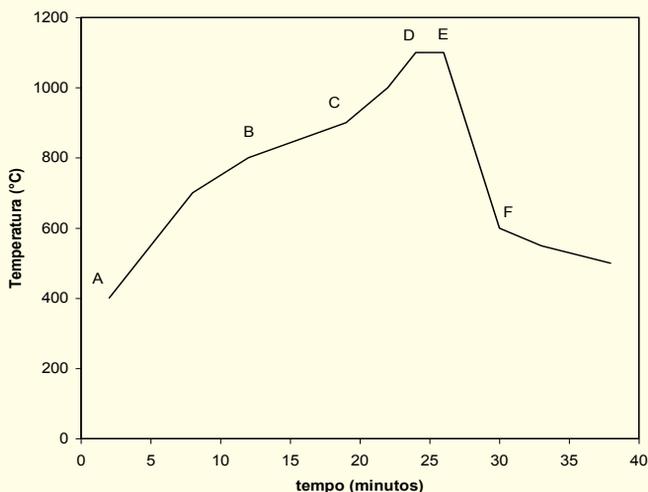
Seguramente, a monoqueima porosa e a biqueima rápida alcançaram níveis de qualidade técnica e estética superiores àqueles da biqueima tradicional. A monoporosa e a biqueima rápida podem ser atualmente consideradas duas tecnologias complementares. Somente uma profunda avaliação dos fatores técnicos, econômicos, culturais

e ambientais em jogo poderá permitir a definição da planta cerâmica ideal para cada exigência.

3.4.9 MONOQUEIMA

Na monoqueima, desenvolvem-se todas as reações que determinam as características do produto final. A dinâmica do processo de monoqueima de revestimentos porosos merece sempre muita atenção já que o suporte contém materiais carbonáticos e, portanto, deve ser compatível com as características do esmalte. De fato, o esmalte deve conter uma frita de composição eutética, apresentar uma certa refratariedade e uma baixa permeabilidade aos gases entre 950 e 1.030 °C, para então se fundir bruscamente.

Figura 3.9 – Curva típica de queima de monoporosa.



(A-B) decomposição dos materiais argilosos; (B-C) expulsão total dos gases (CO_2); (C-D) início de formação de novos compostos; (D-E) estabilização dos novos compostos cristalinos formados e fusão total do esmalte; (E-F) resfriamento rápido das peças cerâmicas.^{15,16}

Uma curva de queima típica de monoqueima porosa é mostrada na Figura 3.9. O primeiro trecho (A-B) da curva, até 800 °C, corresponde à fase de pré-aquecimento do material e à dissociação dos materiais argilosos. No intervalo da curva correspondente à zona (B-C), entre 800 e 900 °C, desenvolve-se a decomposição dos carbonatos com a emissão de CO_2 . É importante que nesse intervalo térmico o

esmalte mantenha uma certa porosidade para favorecer a expulsão dos gases. No intervalo (C-D) da curva, entre 900 e 1.100 °C, desenvolvem-se reações dos óxidos alcalino-terrosos (CaO, MgO), provenientes da decomposição de carbonatos, com as fases amorfas residuais. A formação desses novos compostos é de fundamental importância para o ajuste e a definição das características físico-mecânicas do produto. Na zona de máxima temperatura (D-E), completa-se o processo de sinterização do suporte. Ao mesmo tempo, o esmalte se funde e escoia completamente. O intervalo (E-F) corresponde à fase de resfriamento rápido do esmalte, que se estende até 600 °C. Em seguida, o resfriamento prossegue lentamente para amenizar as tensões atribuídas à transformação do quartzo livre ainda presente no suporte queimado.

FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS GRESIFICADOS POR VIA ÚMIDA

Revestimentos cerâmicos gresificados ou para pisos podem ser classificados, dependendo de sua superfície, em esmaltados ou não esmaltados, apresentando uma absorção de água inferior a 10% após a queima. Dentro dessa divisão, os revestimentos podem ser conformados por prensagem ou extrusão. Tais placas cerâmicas encontram geralmente emprego como pavimento para recobrimento de ambientes internos e externos.^{15,16}

Neste capítulo, apresenta-se, inicialmente, a classificação dos revestimentos cerâmicos gresificados e suas principais características técnicas e estéticas. Em seguida, são discutidas as matérias-primas comumente empregadas, as tecnologias de produção e os fatores fundamentais que influenciam no processamento e nas propriedades finais dos revestimentos. Aqui se faz referência somente à fabricação por via úmida, em razão de sua predominância em termos mundiais.

4.1 PRODUTOS

De modo análogo aos demais tipos de placas cerâmicas, os revestimentos gresificados podem ser classificados segundo especificações normativas, ou regras de mercado, de acordo com suas características estéticas e/ou técnicas.

4.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PRODUTOS

A definição de um produto como gresificado e obtido por mono-queima é por si mesma explicativa com relação a suas características. Assim, “grés”, no jargão cerâmico, indica que a massa ou o suporte

que constitui a placa cerâmica é compacta ou densa. Por outro lado, a norma NBR 13818⁷ classifica as placas cerâmicas de acordo com diferentes níveis de porosidade, expressos em termos de absorção de água e com indicação do campo de aplicação, como mostrado nas Tabelas 2.2 e 2.4, respectivamente.

4.1.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

A Tabela 4.1 apresenta um quadro resumo das principais características dos revestimentos pertencentes aos diversos grupos de absorção de água especificados pela norma NBR 13818. A partir da análise da tabela, é possível confrontar, para a classe de materiais pertencentes ao grupo de absorção de água, os valores mínimos prescritos pelas normas com os valores reais dos produtos do mercado.

O conjunto de todas as características apresentadas na tabela indica que esses materiais, capazes de suportar desgastes e solicitações mecânicas muito fortes, são particularmente adequados para serem utilizados como pavimentos.

Tabela 4.1 – Classificação (grupo de absorção de água) e requisitos técnicos para produto acabado tipo pavimento, conforme NBR 13818.⁷

Características		Valores prescritos pela norma			
		B (prensado)			
		Ia	Ib	IIa	IIb
Absorção de água (AA)	Média	≤ 0,5%	0,5% < AA ≤ 3%	3% < AA ≤ 6%	6% < AA ≤ 10%
	Individual (máx.)	0,6%	3,3%	6,5%	11%
Módulo de resistência à flexão ⁽¹⁾	Média	≥ 35 MPa	≥ 30 MPa	≥ 22 MPa	≥ 18 MPa
	Individual (mín.)	32 MPa	27 MPa	20 MPa	16 MPa
Carga de ruptura	Espessura < 7,5 mm	≥ 1300 N	≥ 1100 N	≥ 1000 N	≥ 800 N
	Espessura ≥ 7,5 mm	≥ 700 N	≥ 700 N	≥ 600 N	≥ 500 N
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)		≤ 175 mm ³	≤ 175 mm ³	≤ 345 mm ³	≤ 540 mm ³

Expansão por umidade ⁽²⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Dilatação térmica linear ⁽²⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Resistência ao choque térmico ⁽²⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Resistência ao gretamento ⁽²⁾	Não gretar	Não gretar	Não gretar	Não gretar
Coefficiente de atrito	A declarar	A declarar	A declarar	A declarar
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ⁽³⁾	A declarar	A declarar	A declarar	A declarar
Dureza Mohs ⁽³⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Resistência ao congelamento ⁽²⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Resistência ao impacto ⁽²⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Resistência ao manchamento	≥ classe 3 (E); a declarar (NE)			
Cádmio e chumbo solúveis ⁽²⁾	Por acordo	Por acordo	Por acordo	Por acordo
Usos domésticos e para tratamento em piscinas ⁽⁴⁾	≥ classe GB (E); ≥ classe UB (NE)	≥ classe GB (E); ≥ classe UB (NE)	≥ classe GB (E); ≥ classe UB (NE)	≥ classe GB (E); ≥ classe UB (NE)
Ácidos e álcalis de baixa/alta concentração ^(2,3,4)	A declarar (E); a declarar (NE)			

(E) esmaltado; (NE) não esmaltado; (1) Não aplicável em placas cerâmicas com carga de ruptura ≥ 3000 N. Revestimentos com carga de ruptura < 400 N devem ser utilizados somente para uso em paredes e devem ser indicados pelo fabricante. (2) Os valores em função de aplicações específicas podem ser verificados pelos métodos de ensaios disponíveis e os limites acordados entre as partes. (3) A classe, conforme o anexo D da norma NBR 13818, declarada pelo fabricante, deve ser verificada. (4) Ligeira mudança de tonalidade não é considerada ataque químico.

Na maioria dos casos, os valores de resistência à abrasão de placas cerâmicas gresificadas correspondem à classificação como classe 4, e algumas tipologias como classe 5, de acordo com a norma NBR 13818. Com relação às características do suporte, evidencia-se uma tendência, ainda que não generalizada, de desenvolvimento de placas cerâmicas com valores de absorção de água muito próximos àqueles do porcelanato (~1%).

4.1.3 CARACTERÍSTICAS ESTÉTICAS

4.1.3.1 Formatos

A produção, nos últimos anos, apresentou uma propensão a formatos quadrados de média dimensão (ex: 33x33 e 45x45 cm) e a formatos retangulares de grandes dimensões (ex: 30x90, 45x90 e 60x120 cm), sobretudo do tipo porcelanato, como ilustra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Tamanhos típicos de revestimentos gresificados (pisos).



(a) 33x33 cm



(b) 30x90 cm

A Figura 4.1(a) refere-se a um piso com dimensões de 33x33 cm, o qual é classificado no grupo de absorção de água IIa. Por outro lado, a Figura 4.1(b) mostra um porcelanato cuja absorção de água é menor que 0,1%.

4.1.3.2 Aspecto superficial

Os primeiros esmaltes para grés se adaptaram às características dos produtos obtidos pela queima tradicional. No entanto, em um segundo momento, a partir do início dos anos 1990, seguindo as características técnicas aperfeiçoadas do suporte, foram desenvolvidos esmaltes, buscando-se um aumento de dureza e de resistência à abrasão da superfície. Assim, foram introduzidos esmaltes com granilhas, sinterizados ou parcialmente cristalinos. Esses esmaltes geralmente são aplicados com técnicas mistas, a seco e a úmido. O aspecto dos produtos obtidos era bastante simples, baseado na compatibilidade de cores e formatos, sendo privilegiada a qualidade técnica do produto com relação à estética. Atualmente, seguindo uma tendência já consolidada, os efeitos e os motivos reproduzidos sobre as superfícies dos esmaltes referem-se às pedras naturais, particularmente com aspecto envelhecido. A evolução das características técnicas permitiu a obtenção de melhores resultados estéticos.

As linhas de esmaltação para obtenção desses efeitos são bastante complexas, constituídas por diversos acessórios e sistemas de aplicação, como discos, aerógrafos, máquinas serigráficas, escovas, entre outros. No entanto, em termos mundiais, o percentual mais elevado de produção é atribuído aos esmaltes que originam superfícies regulares ou lisas, com certo brilho, adornadas eventualmente com serigrafias mates, aplicadas com relevos de maneira heterogênea, com função de proteção contra o desgaste por abrasão.

4.2 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS PARA MASSAS

Conforme uma classificação comercial, as massas cerâmicas adequadas para a produção de cerâmica de revestimento, tipo pavimento, podem ser distinguidas em vermelhas e brancas (tal aspecto é evidenciado principalmente após a etapa de queima). Em ambos os casos, as matérias-primas utilizadas são constituídas por duas tipologias fundamentais:

- matérias-primas argilosas;
- matérias-primas complementares (feldspatos, quartzos, pegmatitas, etc.).

No caso das massas vermelhas, à primeira família podem ser associados minerais argilosos de natureza ílítico-clorítica e ílítico-

caulinítica. Para as massas brancas, a natureza das argilas pode ser associada aos tipos *ball clay* ou *china clay*, respectivamente de natureza ílítico-caulinítica ou caulinítica.

A segunda tipologia de minerais, de caráter fundente e/ou inerte, compreende rochas tais como feldspatoides, feldspatos, areias feldspáticas e quartzo. É evidente que as relações quantitativas entre os argilominerais fundentes e quartzo são dependentes da natureza mineralógica intrínseca das argilas, da granulometria das partículas e das características dos fundentes utilizados.

As massas brancas, por sua vez, são subdivididas em dois tipos, potássicas e sódicas, de acordo com a necessidade relativa dos respectivos óxidos na formulação.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3, são reportadas as características químicas e físicas de diversas matérias-primas (massas brancas e vermelhas) adequadas para a produção de pavimentos cerâmicos via processo de monoqueima.

Tabela 4.2 – Composição química indicativa de matérias-primas empregadas na fabricação de revestimentos cerâmicos por monoqueima gresificada (pavimentos).

Matérias-primas	Composição química (% massa)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.F.*
Argilas plásticas	60,0	25,5	1,5	1,0	0,75	0,75	0,75	0,30	7,0
Argilas cauliníticas	55,0	27,5	0,75	0,75	0,5	0,75	0,30	0,30	9,5
Argilas gresificáveis	62,5	17,5	2,5	1,25	0,30	4,0	1,5	0,75	7,0
Feldspatoides	70,0	15,0	7,0	1,5	0,3	0,75	0,75	0,75	2,0
Feldspatos	70,0	19,0	1,25	6,5	0,35	0,75	0,50	0,30	0,75
Areias feldespáticas	81,0	10,0	2,5	1,50	1,25	2,0	1,5	0,75	3,0
Quartzo	94,0	2,5	0,30	0,30	0,75	1,5	0,75	0,75	2,0

* Perda ao fogo.

As argilas plásticas do tipo *ball clay* e gresificáveis, utilizadas, respectivamente, para massas brancas e vermelhas têm a finalidade de conferir aos produtos semiacabados as características a verde, como plasticidade, e resistência mecânica a verde e a seco.

As argilas cauliníticas tipo *china clay* são consideradas secundárias com relação às características a verde, sendo fundamentais, por outro lado, já que portam uma elevada quantidade de alumina para controlar a densificação durante a queima.

Tabela 4.3 – Características físicas (valores médios) de matérias-primas argilosas.

Características físicas	Argilas		
	Plásticas	Cauliníticas	Gresificáveis
Resistência à flexão a verde (MPa)	1,5	0,8	1,5
Resistência à flexão a seco (MPa)	2,9	1,8	2,9
Queima a 1.100 °C			
Porosidade (%)	8	17	4
Retração linear (%)	4	3	5
Resistência à flexão (MPa)	21,1	9,8	24,5

Os feldspatos, feldspatoides e as areias feldspáticas são os elementos fundentes que melhoram a densificação dos materiais durante a queima, mediante a formação de fases vítreas (fluxo viscoso). O quartzo é a matéria-prima que equilibra tais fluxos já que regula a viscosidade e condiciona a retração dos materiais durante a queima.

4.2 1 MATÉRIAS-PRIMAS ARGILOSAS

No caso das massas vermelhas, podem ser associados minerais argilosos de natureza ílítico-clorítica e ílítico-caulinítica.

Para as massas brancas, a natureza das argilas pode ser associada aos tipos *ball clay* ou *china clay*, respectivamente de natureza ílítico-caulinítica ou caulinítica.

As argilas tipo *ball clay* e vermelhas gresificáveis, utilizadas, respectivamente, para massas brancas e vermelhas, têm a finalidade de conferir aos produtos semiacabados as características a verde, como plasticidade e resistência mecânica a verde e a seco.

As argilas tipo *china clay* são consideradas secundárias com relação às características a verde, sendo fundamentais, por outro lado, para controlar a densificação durante a queima já que portam uma elevada quantidade de alumina.

4.2.2 MATÉRIAS-PRIMAS NÃO ARGILOSAS

Essa tipologia compreende minerais de caráter inerte, como quartzo ou fundentes, tais como feldspatos, feldspatoides, areias feldspáticas.

As massas brancas são subdivididas em dois tipos, potássicas e sódicas, de acordo com a necessidade relativa dos respectivos óxidos na formulação.

Os feldspatos, feldspatoides e as areias feldspáticas são os elementos fundentes que melhoram a densificação dos materiais durante a queima por fluxo viscoso, mediante formação de fases vítreas.

O quartzo é a matéria-prima que equilibra tal fluxo, já que regula a viscosidade e a retração dos materiais durante a queima.

4.2.3 COMPOSIÇÃO DAS MASSAS

Como mencionado anteriormente, as massas formuladas para a produção de placas cerâmicas tipo grés podem ser distinguidas em brancas e vermelhas. As massas vermelhas são compostas majoritariamente por argilas que contêm elevados teores de ferro e modestas quantidades de matérias-primas complementares, como feldspatos e quartzitos. As massas de queima branca são, por outro lado, misturas de matérias-primas compostas por argilas com baixíssimos teores de ferro, feldspatos, feldspatoides e quartzo.

Tabela 4.4 – Composições típicas de massas de queima branca e queima vermelha para processo de monoqueima.

Matérias-primas	Composição (% massa)	
	Massa branca	Massa vermelha
Argilas plásticas	14	-
Argilas caulínicas	15	-
Argilas semiplásticas	20	-
Argilas vermelhas gresificáveis	-	75
Feldspatoides	30	15
Feldspatos	8	-
Quartzo	12	10
Talco	1	-

A Tabela 4.4 apresenta duas composições típicas, em termos de matérias-primas, para massas de queima branca e vermelha, respectivamente. As massas brancas, pela natureza intrínseca das matérias-primas utilizadas, em geral apresentam valores de estabilidade dimensional e de porosidade dentro de intervalos mais amplos, em comparação com as massas vermelhas, que apresentam teores de alumina mais elevados. O comportamento térmico das duas massas é substancialmente diferente. O aumento da retração linear e a diminuição da absorção de água ocorrem de uma maneira gradual e a temperaturas inferiores (~1.120 °C) no grés de queima vermelha, comparando com o

grés de queima branca (~1.180 °C). No primeiro caso, ocorre uma forte formação de fase líquida viscosa, gerada principalmente por minerais de natureza ílítica que conferem baixa viscosidade ao sistema. Este comportamento é típico de massas constituídas principalmente por argilominerais (75-80%). No caso de massas compostas, nas quais as argilas vermelhas são misturadas com feldspatos e quartzo, as variações de retração e porosidade durante a queima podem ser consideradas mais próximas àquelas das massas claras.

Os aditivos, de um modo geral, são análogos aos utilizados no processamento de massas para a fabricação de revestimentos porosos.

A Tabela 4.5 apresenta como exemplos algumas composições de massas de queima branca com caráter potássico (MBP) ou sódico (MBS) e massas de queima vermelha (MV) todas para revestimento tipo grés obtidos por monoqueima.

Tabela 4.5 – Composições de massas de queima branca com caráter potássico (MBP) ou sódico (MBS) e massas de queima vermelha (MV) para revestimento tipo grés obtidas por monoqueima.

Tipo de massa	Composição química (% massa)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.F.
MBP	68,0	19,0	1,2	3,5	1,2	1,5	1,4	0,4	4,5
MBS	67,0	20,0	5,0	1,8	0,5	1,8	0,6	0,5	3,5
MV	67,0	16,0	3,0	1,5	1,0	4,8	0,9	0,9	5,7

4.3 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS PARA ESMALTES

As características físicas dos esmaltes como resistência ao desgaste por abrasão, resistência a ácidos e bases, determinam as aplicações de um produto para um dado ambiente. Consequentemente, é contínuo o desenvolvimento de fritas com diferentes propriedades físicas e químicas.

As características de um esmalte dependem essencialmente das matérias-primas com as quais ele é formulado, e também da temperatura de queima. A formulação de um esmalte é baseada na utilização de fritas com características distintas de viscosidade e com quantidades variáveis de óxidos de cálcio e zinco.

Além das fritas, são introduzidos nos esmaltes outros materiais naturais e sintéticos com características específicas, dependendo das

propriedades das fritas que se deseja obter. Alguns desses componentes não fritados, como os feldspatos, a nefelina e o óxido de zinco, contribuem para a formação da matriz vítrea do esmalte. Outros, como o silicato de zircônio e o coríndon, dissolvendo-se parcialmente na frita, contribuem para melhorar a resistência à abrasão, ou agem como opacificantes (silicato de zircônio) ou matizantes (coríndon).

Outros componentes utilizados nas formulações dos esmaltes são:

- anatásio (dióxido de titânio), que, além de ser um matizante, exerce um efeito positivo nas propriedades mecânicas e químicas dos vidros;
- wollastonita, carbonato de cálcio e magnésio, minerais à base de alcalino-terrosos que agem como matizantes e podem contribuir na formação da matriz vítrea.

Entre as características de um esmalte, é determinante controlar o coeficiente de dilatação térmica, que deve ser compatível com aquele do suporte, objetivando evitar problemas de empenamentos e trincas capilares após a queima. Além desses materiais de adição, são introduzidos, como no caso dos esmaltes para revestimentos porosos, elementos floculantes ou defloculantes, de acordo com o comportamento reológico da suspensão, e também corantes.

4.4 PROCESSO

Além da natureza química e mineralógica das matérias-primas, as características finais de um produto dependem dos parâmetros tecnológicos adotados ao longo do processo de fabricação (Figura 4.2). Na definição das condições de trabalho de um determinado processo, é muito importante avaliar as relações entre os aspectos tecnológicos, de natureza física e química, e os parâmetros de trabalho nas várias etapas do processo a seguir consideradas.

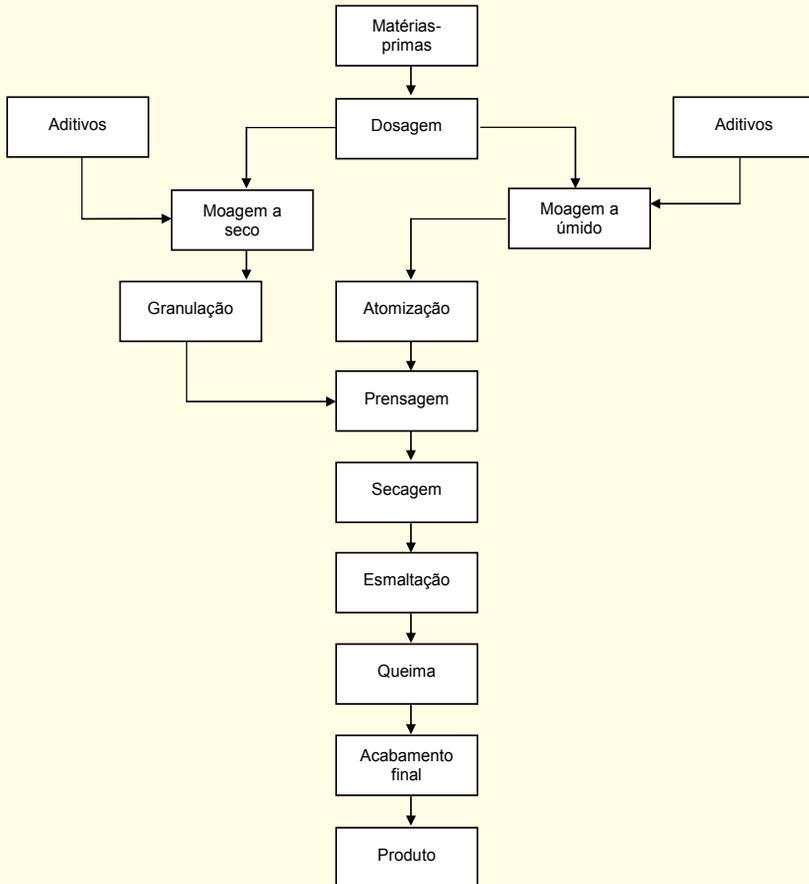
4.4.1 DOSAGEM

A dosagem é uma operação que determina as quantidades relativas das matérias-primas que farão parte da composição de uma massa formulada. Os sistemas de dosagem adotados envolvem máquinas e instalações que apresentam níveis de automação diferentes.

No caso do processo de moagem intermitente para a dosagem das matérias-primas, podem ser utilizados sistemas com acionamentos mecânicos tradicionais ou sistemas com caixas de pesagem.

Nos processos de moagem/pesagem contínua, a mistura dosada é estocada temporariamente em um silo de pré-carga e inserida no moinho contínuo. Em alguns casos, pode-se dissolver previamente materiais argilosos. A suspensão pode ser dirigida ao moinho ou ser depositada em reservatórios de estocagem.

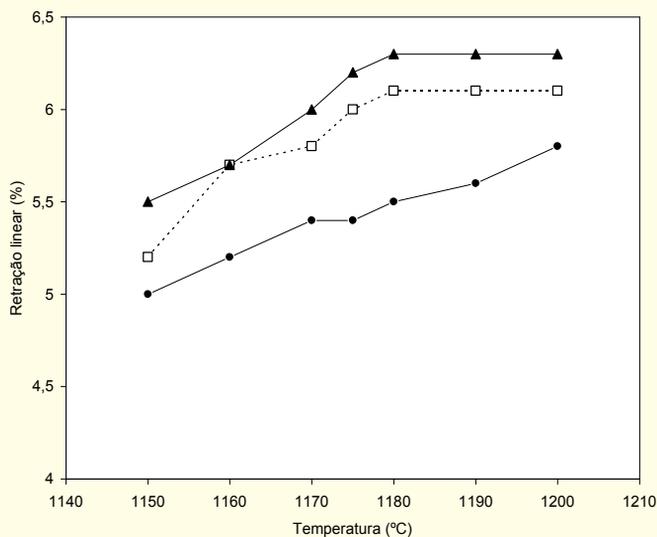
Figura 4.2 – Fluxograma do processo de fabricação de revestimentos gresificados.



4.4.2 MOAGEM

No caso de massas gresificáveis, o grau de moagem das matérias-primas, além de outros fatores de natureza física e química, pode influenciar a densificação do material e, portanto, determinar os valores de retração e porosidade. A Figura 4.3 mostra as variações de retração medidas em compactos obtidos a partir de barbotinas de mesma composição química, mas com resíduos de moagem diferentes. O gráfico evidencia a intensidade dessas variações no caso de queima a diferentes temperaturas. Em linhas gerais, o resíduo após a moagem para massas de grés é da ordem de 7 a 10% na malha 230 mesh (63 μm). No caso de massas vermelhas constituídas principalmente de materiais argilosos, tais valores situam-se entre 4 e 6%.

Figura 4.3 – Retração de queima de revestimentos gresificados (massa vermelha) em função de diferentes resíduos de moagem.



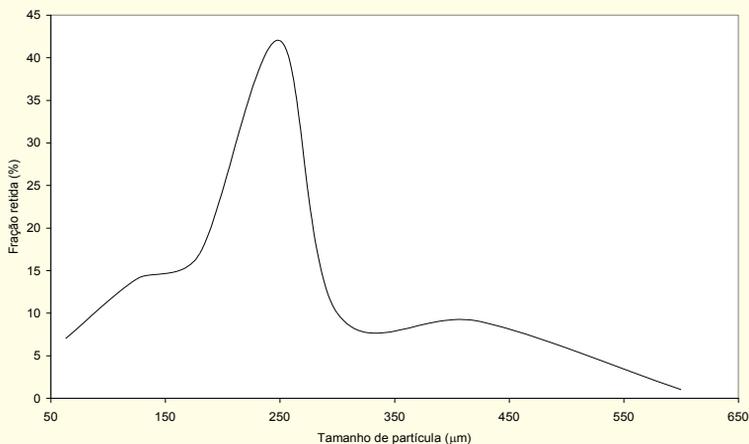
Resíduos de moagem em malha 230 mesh (63 μm): ● – 6,5%; □ – 3,5%; ▲ – 2,5%.

Como pode ser observado, a retração de queima aumenta com o aumento da temperatura de queima, como normalmente acontece. À medida que a quantidade de resíduo de moagem diminui, caracterizando um pó com partículas de pequenas dimensões e uniformemente distribuídas, resultam produtos mais densos e portanto com menores absorções de água e maior resistência mecânica.

4.4.3 ATOMIZAÇÃO

Tal processo objetiva evaporar parcialmente a água contida na barbotina dando origem a grânulos esféricos. A distribuição granulométrica para monoqueima de massas tipo grés não é particularmente diferente de outros atomizados utilizados na fabricação de grés porcelanato e revestimentos. A Figura 4.4 apresenta como exemplo um gráfico de distribuição granulométrica típico de uma massa de grés. Como se pode observar, há uma forte concentração de partículas, na faixa compreendida entre 70 e 80%, com diâmetros médios que variam entre 425 e 180 μm .

Figura 4.4 – Distribuição granulométrica típica de massas de grés.

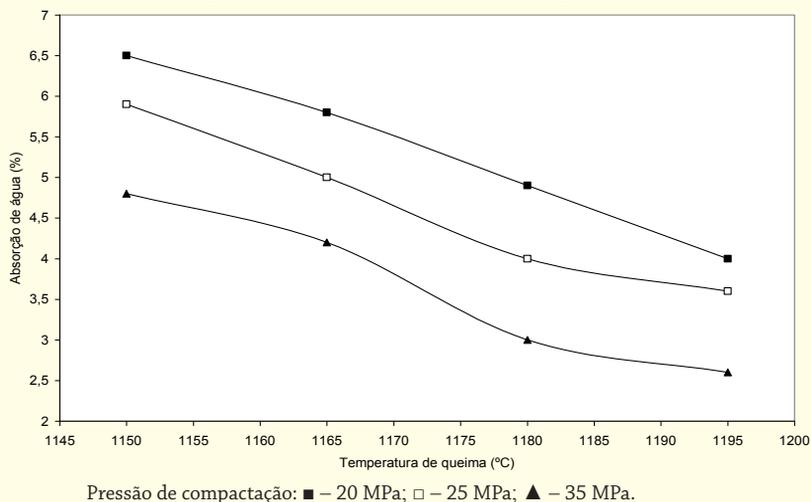


4.4.4 PRENSAGEM

A Figura 4.5 mostra a influência da pressão de compactação e da temperatura na absorção de água, após queima, de uma massa de queima branca. A absorção de água, para a massa em questão, diminui com a temperatura de queima e a pressão de compactação crescentes. A temperatura de queima, mais que a pressão de compactação, exerce uma forte influência sobre a absorção de água no sentido de reduzi-la à medida que aumenta.

Geralmente, a pressão de compactação é da ordem de 250 a 300 kgf/cm^2 (~ 25 a 30 MPa) para massas brancas e de 200 kgf/cm^2 (~ 20 MPa) para as massas vermelhas, já que são normalmente mais plásticas.

Figura 4.5 – Efeito da temperatura e da pressão de compactação na absorção de água, após queima, de revestimentos gresificados.



Essa etapa do processo é muito importante na tecnologia de produção dos materiais cerâmicos. Normalmente, tende-se à obtenção da máxima densificação a verde, mas a níveis compatíveis com os problemas de desgaseificação e de “coração negro”.

4.4.5 SECAGEM

Nessa operação, ocorre a evaporação da umidade residual da massa em torno de 4 a 8%. É importante considerar que massas com altos teores de caulinita tendem a apresentar expansão após secagem, o que leva a baixos valores de resistência mecânica do produto seco. Consequentemente, ocorre a formação de trincas nas peças obtidas, em particular quando as velocidades de secagem são muito elevadas. Com os ciclos atualmente empregados, recomenda-se que as variações dimensionais após a secagem sejam próximas de 0% ou até mesmo negativas, até um máximo de 0,2%, com resistência mecânica maiores que 25 kgf/cm² (~2,5 MPa).

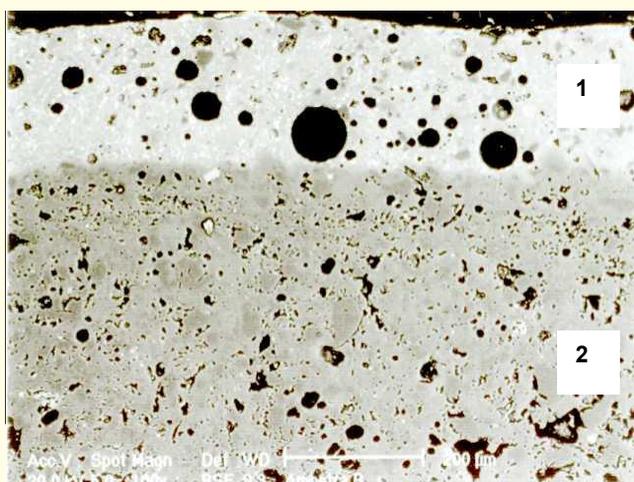
4.4.6 ESMALTAÇÃO

Esmaltação é uma operação que consiste em depositar e recobrir, portanto, a superfície superior de uma placa cerâmica no estado verde,

nos processos de monoqueima, ou no estado queimado, nos processos de biqueima, com um esmalte cerâmico (vidrado) adequadamente preparado para uma dada finalidade. Tal deposição de esmalte resulta na formação de uma camada vítrea com espessura que pode variar de 75 a 500 μm após processo de queima.¹⁷

A Figura 4.6 mostra, como exemplo, uma micrografia da seção transversal de uma placa cerâmica de pavimento evidenciando a camada de esmalte e a massa cerâmica.

Figura 4.6 – Micrografia da seção transversal de uma placa cerâmica de pavimento evidenciando: a camada de esmalte (1) e o substrato, massa cerâmica (2). Sem ataque.



O número e os tipos de esmaltes aplicados dependerão de requisitos técnicos e estéticos de um produto para uma dada aplicação com características otimizadas de desempenho e qualidade.

Os esmaltes são aplicados por meio de técnicas de aplicação a seco e a úmido. Nesse último caso, são utilizados dispositivos, tais como discos, aerógrafos e máquinas serigráficas. Por outro lado, no caso de aplicação de esmaltes por via seca (granilhas e aglomerados) são utilizados granilhadores. A utilização de diferentes esmaltes com características intrínsecas muito particulares requer uma notável flexibilidade nos ambientes de trabalho e especialmente nas linhas de esmaltação. Além disso, as etapas de aplicação de diferentes tipos de esmaltes em um mesmo produto apresentam características muito

diferentes, requerendo conhecimentos específicos e experiência para cada produto. Existem tipologias de pavimentos que requerem aplicações simples como algumas aplicações a disco que demandam deposições mínimas de até 500 g/m^2 e outras que requerem aplicações complexas (até 20 diferentes aplicações) com deposição de esmaltes de até 3 kg/m^2 . Tais esmaltes podem ser aplicados tanto a úmido (com densidade de $1,2$ a 2 g/cm^3) como a seco (com granulometrias diversas). Frequentemente, são necessárias aplicações de colas e ligantes orgânicos. No entanto, notáveis são as solicitações, às quais são submetidos os suportes cerâmicos no estado verde. De fato, devem ser capazes de absorver quantidades substanciais de água e simultaneamente não devem apresentar deformações ou variações significativas de planaridade (dentro de certos limites) já que as operações de decoração por serigrafia podem ser prejudicadas.

Para se obter um bom nível de flexibilidade das linhas de esmaltação é necessário prover numerosos sistemas de aplicação ao longo de sua extensão com possibilidades de trocas rápidas quando da esmaltação de um novo produto. Isso requer o desenvolvimento de linhas de esmaltação muito extensas que estruturalmente e funcionalmente não modificaram as suas características fundamentais. Para se obter efeitos estéticos dos tipos envelhecidos ou rústicos, é necessário nebulização de esmaltes, escovação, aplicações a seco. Para se obter superfícies brilhantes, os dispositivos mais adequados para aplicação de engobes e de esmaltes são as baterias de campanas. Adicionalmente, sistemas de nebulização são muito usados pois permitem uma distribuição uniforme da água, dos fixadores e dos engobes.

Com relação à impressão serigráfica, considerando-se as tipologias e os motivos decorativos requeridos, atualmente são utilizadas máquinas serigráficas planas ou rotativas. Essas últimas estão rapidamente se difundindo, já que, além da presteza na execução da operação de decoração, necessitam de poucas operações de ajuste e manutenção. Existem diversos tipos de máquinas serigráficas rotativas. No entanto, a distinção é baseada essencialmente no princípio da impressão. Atualmente se assiste a uma rápida evolução das linhas de esmaltação, cada vez mais automatizadas, com sistemas dinâmicos de pesagem do esmalte em linha, sistemas de controle de velocidade por meio de inversores eletrônicos. Em virtude da energia despendida para remoção de umidade e da própria umidade perdida, além das perdas de materiais e problemas de limpeza, existe uma forte tendência a uma

adoção cada vez maior de sistemas de aplicação de esmaltes e decoração a seco. De fato, já existem no mercado e em operação nas indústrias fabricantes de cerâmica, sistemas que permitem a esmaltação e a decoração a seco na prensa ou no material prensado.

4.4.7 QUEIMA

A utilização de curvas de queima otimizadas permite que as reações de fusão e cristalização dos vários componentes da massa e do esmalte que constituem o produto se realizem de maneira adequada. Tais reações contribuem para a obtenção de suportes cerâmicos com absorção de água e retração dentro de especificações predeterminadas, resultando em produtos com características técnicas melhoradas com valorização estética da superfície esmaltada.

As condições de gresificação de uma massa cerâmica dependem não só da natureza física e química da massa considerada, mas também do grau de moagem, da densidade aparente do compacto e da temperatura máxima de queima, como mostrado na Figura 4.7. Na avaliação das características de uma massa é importante definir a estabilidade dimensional e as eventuais oscilações de porosidade, em termos de absorção de água, no caso de queimas realizadas com diferentes ciclos e gradientes de temperatura.

A partir da década de 1970, passou-se do processo de queima lenta para o de queima rápida. Todas as etapas do processo produtivo foram revistas com base nesta inovação, que determinou perspectivas tecnológicas antes inexistentes.

Atualmente, o conhecimento das matérias-primas, a natureza das massas, a composição dos engobes e esmaltes simplificaram e padronizaram também esta etapa. Fornos e equipamentos cada vez mais complexos permitiram que se alcançassem ajustes e controles de temperatura não praticados alguns anos atrás. As dimensões das seções dos fornos foram ampliadas e paralelamente foram melhorados os sistemas de combustão.

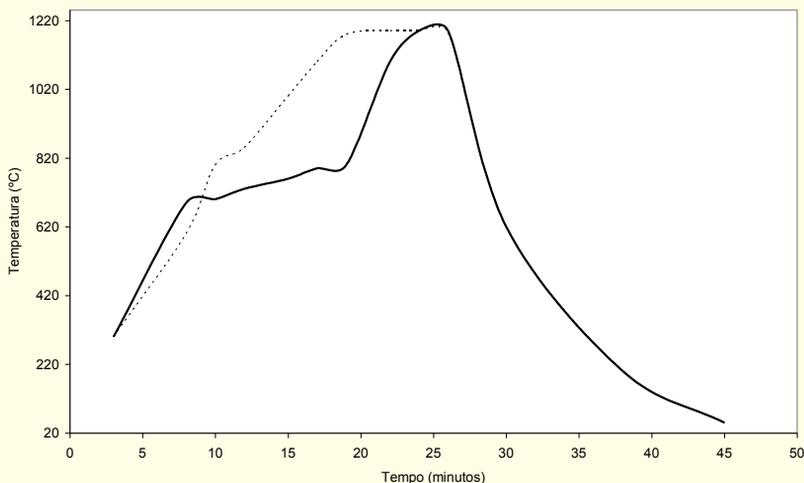
Os queimadores e as respectivas câmaras de combustão são normalmente dimensionados para operar a elevadas vazões de produtos da combustão e com baixa potência térmica específica. Além disso, existem atualmente queimadores capazes de distribuir a chama de maneira flutuante na seção transversal do forno, com possibilidade de regulagem de sua potência, frequência de fluxo e tempo de chama. Tal

solução permite uma otimização da distribuição de calor em particular na zona crítica das curvas de queima.

O bloco queimador que constitui em geral a câmara de combustão pode ser construído mediante a utilização de diversos materiais cerâmicos refratários. Em particular, pelo seu maior rendimento e vida útil, utilizam-se carbetos de silício. O uso de carbetos de silício resulta em uma maior resistência térmica do bloco queimador, nas temperaturas máximas de trabalho, e numa maior resistência ao choque térmico.

Outra parte integrante dos fornos são os rolos de transporte das placas cerâmicas. Estes podem ser confeccionados a partir de materiais cerâmicos ou metálicos e, dependendo das suas características, são intercalados nas diversas zonas de queima. A adoção da monoqueima rápida facilitou a movimentação das placas cerâmicas, favorecendo a fabricação de grandes formatos e a flexibilidade produtiva.

Figura 4.7 – Curvas de queima típicas de revestimentos gresificados.

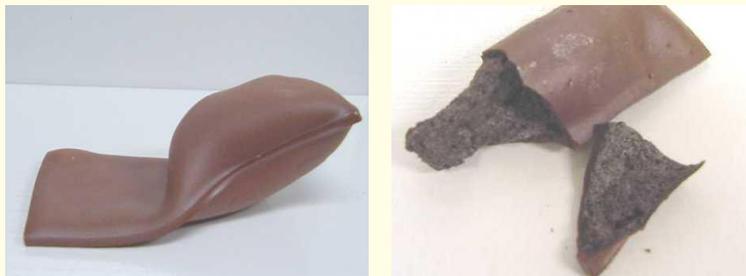


Linha tracejada: massas de monoqueima; linha contínua: massas susceptíveis à formação de "coração negro".

Os ciclos e as temperaturas de queima adotadas, em geral, variam, respectivamente, entre 30 e 60 min e 1.100 e 1.200 °C, dependendo da natureza das massas cerâmicas e das dimensões das placas cerâmicas a serem queimadas. A Figura 4.7 apresenta dois exemplos típicos de curvas de queimas adotadas industrialmente na fabricação de pavimentos cerâmicos.

A curva, em linha tracejada e em parte sob a curva de linha contínua na fase de resfriamento é normalmente empregada para massas brancas, enquanto a curva de linha contínua é empregada para massas (queima vermelha) susceptíveis à formação de “coração negro”, defeito causado pela presença de quantidades grandes de matéria orgânica (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Fotografias ilustrando peças cerâmicas com presença de coração negro.



Fonte: Rosaura Piccoli/CTCmat.

A elevada flexibilidade na determinação das curvas de queima é garantida por meio de sistemas de controle eletrônico, que ajustam a temperatura prestabelecida dentro de limites muito restritos. Um microcomputador pode executar a supervisão e armazenamento dos dados de processo e fornecer as informações necessárias para a otimização da gestão do forno.

FABRICAÇÃO DE PORCELANATOS

O grés porcelanato, ou simplesmente porcelanato,¹⁸ é um revestimento cerâmico, em geral não esmaltado, muito denso, obtido por sinterização convencional e tendo porosidade expressa, como absorção de água, geralmente inferior a 0,3%.

O porcelanato é um produto de qualidade superior com relação ao tradicional grés, em consequência da utilização de matérias-primas cuidadosamente selecionadas e procedimentos de processamento acuradamente controlados.

5.1 PRODUTOS

O produto de base (proposto em vários formatos, preferencialmente grandes e quadrados) apresenta elevadas propriedades mecânicas, tais como resistência à abrasão superficial, dureza, resistência a choques, etc. Além disso, a mistura de determinados componentes (óxidos) à massa base, como pós e grânulos coloridos, levou à obtenção de produtos acabados de notável aspecto estético. Isso permitiu que o porcelanato conquistasse um espaço de mercado em alternativa aos materiais naturais, oferecendo conjuntamente as características já evidenciadas bem como aspectos de praticidade no assentamento.

Entre as características técnicas do porcelanato, a mais importante é a resistência ao desgaste. Adicionalmente, merecem destaque os baixos valores de absorção de água, alta resistência mecânica, resistência ao ataque químico, dureza superficial, resistência ao congelamento, resistência à compressão, isolamento a descargas elétricas estáticas (com adição de óxidos semicondutores) e o ótimo grau de limpabilidade dos pavimentos.

Por outro lado, o porcelanato apresenta também importantes características estéticas e, portanto, ocupa espaço de emprego, por exemplo, no setor comercial de tráfego intenso, sem perder as já citadas características técnicas.

O porcelanato pode ainda ser sujeito a um processo de polimento superficial (remoção de alguns décimos de milímetros de material da superfície da peça cerâmica) que realça notavelmente o aspecto estético, sem modificar de modo considerável as características mecânicas e aumentando suas possibilidades de utilização.

Com base nos aspectos expostos e em particular pelo grande interesse que o porcelanato tem despertado, o objetivo desta seção é apresentar, de maneira resumida, suas principais características tecnológicas e de mercado, destacando as variáveis de processamento que decisivamente influenciam nas suas propriedades finais.

5.1.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

A denominação grés porcelanato é suficiente para definir as origens e as características do produto. De fato, grés, na terminologia cerâmica, indica um material muito compacto, constituído por várias fases cristalinas dispersas em uma matriz vítrea, enquanto o adjetivo porcelanato tem uma raiz etimológica no termo porcelana, o material cerâmico mais nobre em evidência e apreciado há séculos. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam a classificação do produto segundo as normas vigentes europeias (EN 14411)¹⁹ e americanas (ASTM/ANSI A 137-1).¹⁷

Tabela 5.1 – Classificação do porcelanato de acordo com a norma EN 14411.¹⁹

Absorção de água – E (%). Peças cerâmicas prensadas.				
I E ≤ 3		IIa 3 < E ≤ 6	IIb 6 < E ≤ 10	III E > 10
BI		BIIa	BIIb	BII
Não esmaltados	< 1,5			
Não esmaltados e muito vitrificados	< 0,5			

Na norma europeia (Tabela 5.1), o porcelanato é classificado no grupo BI, que compreende os materiais gresificados, porosidade menor que 3%, expressos em termos de absorção de água.

Tabela 5.2 – Classificação do grés porcelanato de acordo com a norma ASTM/ANSI A 137-1.¹⁷

Placas cerâmicas prensadas	Absorção de água – E (%)			
	E ≤ 0,5	0,5 < E ≤ 3	3 < E ≤ 7	7 < E ≤ 18
Pavimentos	muito vitrificado	vitrificado	semivitrificado	não vitrificado
Revestimentos	-	-	semivitrificado	não vitrificado

Uma nota da norma europeia, entretanto, especifica que os produtos que apresentam absorção de água inferior a 0,5% devem ser considerados completamente vitrificados, enquanto a norma americana (Tabela 5.2) os considera muito vitrificados.

As normas ISO (International Standards Organization) descrevem uma subdivisão mais detalhada, que individualiza especificamente os materiais com absorção de água inferior a 0,5%, assinalando-os à classe BIIa.

Em realidade, os produtos industriais brasileiros apresentam uma porosidade inferior àquela prevista pelas normas, geralmente não superior a 0,1%. Considerando as propriedades das placas de grés porcelanato, o que tem se refletido em crescimento da produção e na qualidade dos porcelanatos brasileiros, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) publicou a norma NBR 15463,²⁰ a qual se constitui em uma norma específica para o porcelanato e que visa a elevar a qualidade dos produtos disponíveis e proteger o consumidor do uso indevido do termo “porcelanato” em produtos cujas características não estejam de acordo com esta nova norma brasileira (Tabela 5.3). Destaca-se nesta norma a definição do produto “porcelanato” a partir do parâmetro absorção de água:

- porcelanato técnico (absorção de água ≤ 0,10%);
- porcelanato esmaltado (absorção de água ≤ 0,50%).

O porcelanato é, entre os materiais cerâmicos para pavimentação, aquele que melhor se presta a solicitações de desgaste, em consequência da sua elevada dureza superficial.

O porcelanato possui ainda ótimas propriedades de anticongelamento, de resistência mecânica à flexão e compressão, de resistência ao ataque químico e a manchas. A Tabela 5.4 apresenta um quadro explicativo das principais características do porcelanato, colocando em confronto os valores mínimos prescritos pelas normas e os valores reais obtidos de produtos encontrados no comércio.

Tabela 5.3 – Classificação e requisitos técnicos para porcelanato prescritos pela norma NBR 15463.²⁰

Características		Valores prescritos			
		Área do produto ≤ 50 cm ²		Área do produto > 50 cm ²	
		Técnico	Esmaltado	Técnico	Esmaltado
Absorção de água	Média	≤ 0,1%	≤ 0,5%	≤ 0,1%	≤ 0,5%
	Individual (máx.)	0,2%	0,6%	0,2%	0,6%
Módulo de resistência à flexão ⁽¹⁾	Média	≥ 45 MPa		≥ 45 MPa	≥ 37 MPa
	Individual (mín.)	42 MPa		42	35
Carga de ruptura	Espessura < 7,5 mm	≥ 1000 N		≥ 900 N	≥ 900 N
	Espessura ≥ 7,5 mm	Não se aplica		≥ 1800 N	≥ 1500 N
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)		≤ 140 mm ³	Não se aplica	≥ 140 mm ³	Não se aplica
Dilatação térmica linear ⁽¹⁾		Por acordo		Por acordo	Por acordo
Resistência ao choque térmico ⁽¹⁾		Por acordo		Por acordo	Por acordo
Resistência ao gretamento ⁽²⁾		Não se aplica	Não gretar	Não se aplica	Não gretar
Coeficiente de atrito		A declarar		A declarar	A declarar
Resistência à abrasão superficial ^(1,3)		Não se aplica	Por acordo	Não se aplica	Por acordo
Resistência ao congelamento ⁽¹⁾		Por acordo		Por acordo	Por acordo
Resistência ao impacto ⁽¹⁾		Por acordo		Por acordo	Por acordo
Resistência ao manchamento		≥ classe 3			
Cádmio e chumbo solúveis ⁽¹⁾		Por acordo			
Resistência aos agentes químicos		Técnico ou esmaltado			
Usos domésticos e para tratamento em piscinas		A declarar			
Ácidos e álcalis de baixa concentração		A declarar			
Ácidos e álcalis de alta concentração		Por acordo			

(1) Os valores em função de aplicações específicas podem ser verificados pelos métodos de ensaios disponíveis e os limites acordados entre as partes. (2) Certos efeitos decorativos podem apresentar efeito craquelê proposital; nestes casos, devem ser identificados como gretamento pelo fabricante e o ensaio não será aplicável. (3) A classe de abrasão, conforme anexo D da ABNT NBR 13818, deve ser acordada entre as partes.

Tabela 5.4 – Características técnicas do grés porcelanato: confronto entre os valores requeridos ou prescritos pelas normas europeias e aqueles reais dos produtos comerciais.

Características	Norma	Valores prescritos	Valores reais dos produtos
Absorção de água	EN 99	≤ 0,5 %	< 0,1 %
Resistência à flexão	EN 100	≥ 27 MPa	> 50 MPa
Resistência à abrasão	EN 102	< 205 mm ³	< 130 mm ³
Resistência ao congelamento	EN 202	Sem defeitos visíveis	Sem defeitos visíveis
Expansão térmica linear	EN 103	≤ 9 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	~7 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Resistência ao ataque químico	EN 106	Nenhuma variação visível	Nenhuma variação visível
Choque térmico	EN 104	Nenhuma alteração	Nenhuma alteração
Dureza Mohs	EN 101	> 5	7 a 8
Resistência a manchas	EN 122*	Nenhuma variação visível	Nenhuma variação visível

* Esmaltado.

Outros aspectos a serem considerados em eventuais aplicações especiais são a possibilidade de obtenção de um produto antiestático eletricamente e com alta qualidade em aspectos de higiene. Essas propriedades permitem o emprego deste produto em locais envolvidos com serviços de informática, em estruturas sanitárias e salas de cirurgia hospitalares.

5.1.2 CARACTERÍSTICAS MERCADOLÓGICAS

5.1.2.1 Formatos

A produção de porcelanato dos últimos 15 anos estabeleceu-se principalmente na produção de formatos quadrados de média dimensão, em particular os formatos 30x30 cm e 33x33 cm, os quais correspondem a 60%, e o 40x40 cm que contribui com 10%. A produção dos formatos retangulares é modesta. Além dos formatos mais produzidos, há ainda uma série de produtos que vão desde os de grandes dimensões (ex. 60x120 cm) até os formatos pequenos e os especiais.

5.1.2.2 Tipologias

A combinação dos aspectos técnicos e estéticos determina a aplicação de uma peça cerâmica, isto é, residencial, comercial ou industrial. O porcelanato que originalmente era utilizado somente em aplicações industriais atualmente tem encontrado uma ampla colocação no setor comercial de tráfego leve.

A pesquisa aplicada tem permitido, sem comprometer as características de desempenho dos produtos, individualizar novas tipologias muito interessantes, induzindo a diversificações de produtos no mercado e permitindo a sua difusão em setores tradicionalmente orientados a produtos de elevado valor estético.

Para melhor enquadrar os novos produtos desenvolvidos nos últimos anos, cita-se abaixo uma classificação resumida das tipologias comerciais existentes atualmente.

- *TINTE UNITE*: São os produtos mais simples, sobre os quais predominam os tons pastel. São frequentemente polidos e empregados em centros comerciais polivalentes. São obtidos a partir de pós atomizados e uniformemente coloridos.
- *GRANITI*: São obtidos da mistura de pós atomizados de várias cores, que dão origem ao efeito comumente chamado de “sal e pimenta”. Frequentemente, a tinta predominante de fundo é branca, refletindo a cor natural da massa cerâmica de base não sujeita à coloração.
- *VARIEGATI*: São produtos feitos com mistura de pós coloridos (atomizados e em alguns casos micronizados, obtidos por desagregação dos atomizados) que, através de sistemas adequados de alimentação das prensas, são distribuídos com um certo grau de aleatoriedade, dando origem a efeitos superficiais de esfumatura e relevo.
- *MACROGRANITI*: São obtidos pela mistura de pós atomizados com percentuais de 10 a 50% de grânulos de grandes dimensões (1-8 mm), obtidos por regranulação a seco ou a úmido de pós atomizados ou micronizados, os quais podem ser monocromáticos ou apresentar uma seção contendo diversas tonalidades. A superfície das peças cerâmicas que apresentam um fundo cromático similar ao dos *graniti* ou *variegati*, sobre a qual ressalta a presença dos grânulos, oferece um agradável efeito que reproduz o aspecto de algumas pedras naturais.

- **PRODUTOS OBTIDOS PELA DECORAÇÃO COM SAIS SOLÚVEIS E ESMALTES:** São obtidos por aplicação serigráfica ou por gotejamento (a disco, véu, aerógrafo) de esmaltes ou de solução contendo sais cromóforos de Fe, Cr, Co, Mn, normalmente sobre massas brancas, cruas ou queimadas (biscoitadas). O efeito produzido é de notável aspecto estético e pode apresentar características de grande originalidade.
- **RÚSTICOS ESTRUTURADOS ESMALTADOS:** Produtos obtidos da massa base ou de recuperação, prensados com estampos estruturados e valorizados com detalhes (relevos), sujeitos às aplicações tipo *spray* ou serigráfica de base, gramatura de esmaltes e/ou sais solúveis, e eventualmente escovados. O efeito de envelhecimento geralmente é muito eficaz, similar ao natural produzido pelo tempo e uso.

5.2 MATÉRIAS-PRIMAS E ADITIVOS

As matérias-primas usadas na formulação de massas de porcelanato apresentam composições mineralógicas distintas, exercendo funções próprias e específicas. As matérias-primas argilosas conferem plasticidade à massa, enquanto as complementares, não plásticas, são caracterizadas por minerais fundentes, responsáveis em linhas gerais pela densificação e resistência mecânica do material. As matérias-primas refratárias por sua vez garantem a estabilidade dimensional das peças durante a queima.

À primeira família pertencem os argilominerais de natureza ilítico-caulinítica ou montmorilonítica, os quais apresentam características plásticas em razão da própria estrutura mineralógica e da granulometria das partículas. Os minerais fundentes são representados por feldspatos e feldspatoides, talco e outros. Aqueles mais refratários com função estrutural são os quartzos e os quartzitos em geral.

De todos os componentes, é requerida uma baixa concentração de óxidos corantes como Fe_2O_3 e TiO_2 , para evitar contaminações cromáticas da cor natural da massa. As relações quantitativas entre os componentes dependem da natureza mineralógica das argilas, da granulometria das partículas argilosas e, em última análise, da reatividade destas com relação aos minerais fundentes.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam um quadro típico das características químicas e físicas das matérias-primas utilizadas na formulação de massas de porcelanato.

Tabela 5.5 – Composição química de matérias-primas empregadas na fabricação de porcelanato.¹⁸

Matérias-primas	Composição química (% massa)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P.F.*
Caulim	49	36	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	12
Argila plástica	64	25	1,5	0,6	0,3	0,4	0,6	0,5	7
Feldspato	70	19	1,2	7	0,3	0,3	0,2	0,2	0,5
Quartzo	98	0,8	-	0,2	-	0,3	0,1	0,2	0,2
Talco	51	8	0,2	-	0,3	0,6	0,3	30	7

* Perda ao fogo.

A argila plástica tem a função de fornecer as características plásticas a verde, portanto melhores propriedades durante a fase de compactação e resistência mecânica após secagem. O caulim (*china clay*) é complementar à argila já que também confere plasticidade e é fundamental, do ponto de vista de sua composição química, para aumentar o teor de alumina.

Tabela 5.6 – Características físicas típicas de matérias-primas: caulim e argila plástica.¹⁸

Características físicas	Matérias-primas	
	Caulim	Argila plástica
Resistência à flexão a verde (MPa)	0,6-1,0	1,2-2,0
Resistência à flexão a seco (MPa)	1,2-1,8	2,0-2,9
Queima a 1.100 °C		
Porosidade (%)	10-12	3-6
Retração linear (%)	7-8	4-6
Resistência à flexão (MPa)	11,8-14,7	24,5-34,3

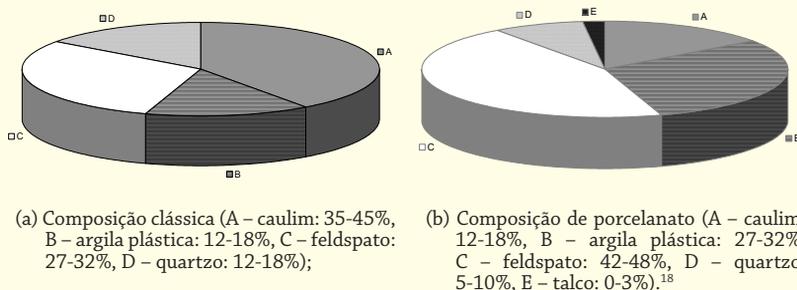
O feldspato (ou eventualmente o talco em pequenas quantidades) é um material fundente nos usuais níveis técnicos de temperatura de queima (1.200-1.230 °C). O quartzo, por outro lado, quando participa da fusão com os feldspatos, é um componente que equilibra a viscosidade e o fluxo vítreo. Entretanto, quando não participa das reações, constitui a matriz base das fases cristalinas presentes no material e, conseqüentemente, no produto acabado, junto a uma baixa quantidade de mulita, resultante da decomposição da caulinita.

5.2.1 COMPOSIÇÕES

O porcelanato constitui a evolução do material conhecido com o nome de “grés químico”, tradicionalmente vinculado aos pequenos formatos (5x5 cm, 10x10 cm) ligados a tecnologias hoje não mais utilizadas.

As novas composições adotadas e o emprego dos fornos a rolos, associados às modernas prensas hidráulicas de alta pressão e precisão de conformação, permitiram que o produto aumentasse o seu valor agregado, valendo-se da confiabilidade alcançada pela queima rápida. As Figuras 5.1(a) e (b) apresentam uma comparação entre uma composição tradicional de “grés químico” usada antigamente. Na Figura 5.1(a), a temperatura de queima é de aproximadamente 1.200 a 1.220 °C, num ciclo de 40 a 50 h. A Figura 5.1(b) apresenta uma composição atual adequada aos ciclos rápidos de queima (temperatura de queima entre 1.200 e 1.230 °C e ciclo de 50 a 70 min).

Figura 5.1 – Composições (% massa) de grés.



A estrutura dos materiais após queima é similar nos dois casos. Todavia, no primeiro caso (ciclo lento), verifica-se a presença de mulita em altos percentuais e a ausência de microporosidade (poros abertos e fechados), propriedade que confere ao material uma alta resistência a manchas.

A quase absoluta ausência de porosidade e a formação dos cristais de mulita podem ser atribuídas principalmente ao prolongado tempo de queima, que permite a completa densificação do material.

A composição química de porcelanato indicada na Figura 5.1(b) é típica de uma massa de base normalmente utilizada em produção. No entanto, na produção de cerâmicas decoradas com sais solúveis,

é preferível dispor de suportes muito brancos, para realçar a intensidade e a tonalidade cromática. Assim, além das matérias-primas mencionadas, é necessário, para incrementar o índice de alvura da massa base, adição de matérias-primas, tais como: silicato de zircônio, alumina, óxido de zinco. Tais matérias-primas, que apresentam características de refratariedade, são geralmente introduzidas na formulação como substitutos parciais do quartzo. Como exemplo prático dos conceitos expressos, a Tabela 5.7 apresenta as análises químicas de diversas massas básicas e brancas, bem como da massa de “grés químico” utilizada no passado e queimada em forno-túnel.

5.2.2 MATÉRIAS-PRIMAS SEMIPREPARADAS

5.2.2.1 Atomizados

A granulometria ótima dos pós atomizados é análoga àquela aconselhada para a produção das outras categorias de cerâmicas de revestimento. A título exemplificativo, a Tabela 5.8 apresenta a distribuição granulométrica de uma massa comumente empregada na produção de porcelanato. Os valores indicados devem ser interpretados com uma certa flexibilidade, já que, para cada valor, há uma certa tolerância, cuja amplitude deve ser fixada em relação ao valor considerado.

106 Tabela 5.7 – Composição química típica de massas utilizadas industrialmente. (1): grés químico (queima em forno-túnel); (2-3): grés porcelanato (massa base); (4-5): grés porcelanato (massa superbranca).¹⁸

Óxidos constituintes	Massas cerâmicas (% massa)				
	1	2	3	4	5
SiO ₂	65	67	71	68	64
Al ₂ O ₃	24	21	18	18	21
K ₂ O	1,5	1,7	1,8	1,4	2,9
Na ₂ O	3,0	4,5	4,0	3,5	3,9
CaO + MgO	0,1	0,8	0,9	0,7	0,7
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	0,3	0,8	0,9	0,6	1,0
ZrO ₂	-	-	-	4,4	3,1
Perda ao fogo	6,1	4,2	3,4	3,4	3,4

Tabela 5.8 – Distribuição granulométrica típica de uma massa de porcelanato usada em produção.¹⁸

Distribuição granulométrica (μm)	Fração retida (% massa)
> 600	1
600-425	9
425-300	10
300-250	42
250-180	17
180-125	14
< 125	7

5.2.2.2 Regranulados

A regranulação consiste no aumento das dimensões dos grânulos ou atomizados originais dos pós empregados (0,1 a 0,8 mm para o atomizado) de 2 até 8 mm, os quais dependem do tipo de técnica de processamento:

- SISTEMA DE REGRANULAÇÃO A SECO: Os grânulos são muito compactos, têm umidade similar àquela dos pós atomizados de partida e são constituídos por lamelas afiladas, com dimensões de 2 a 6 mm e densidade de 1,2 a 1,4 g/cm³.
- SISTEMA DE REGRANULAÇÃO A ÚMIDO: Os grânulos têm formas arredondadas e dimensões entre 1 e 8 mm.

Em certas condições, os grânulos produzidos têm um teor de umidade > 12%. Assim, é aconselhável a secagem antes do peneiramento de controle e da prensagem (compactação). A umidade ótima dos grânulos para a prensagem é de 8 a 11%. A densidade dos grânulos é, normalmente, superior a do atomizado (1,15 a 1,30 g/cm³).

Tanto para os grânulos obtidos por regranulação a seco quanto para aqueles formados a úmido, o percentual de mistura com o atomizado de base não deve superar, em geral, os 25% para não incorrer em problemas complexos na fase de prensagem.

5.2.2.3 Micronizados

Para o desenvolvimento de algumas tipologias particulares de produtos, por exemplo os *variegati*, pode ser conveniente usar pós superfinos, denominados micronizados, que são obtidos pela moagem ou desagregação de atomizados por meio de dispositivos apropriados.

Tais pós apresentam, considerando a sua distribuição granulométrica, partículas com dimensões normalmente inferiores a 63 μm .

Embora o transporte e a estocagem apresentem alguma dificuldade, devida à tendência ao empacotamento, os micronizados, prensados com misturas de pós atomizados, produzem acabamentos superficiais de agradável efeito estético.

5.2.3 MATERIAIS AUXILIARES PARA DECORAÇÃO

As técnicas de decoração baseadas no emprego de sais solúvel, permitem obter efeitos cromáticos e gráficos originais mediante a utilização de soluções cromóforas que se difundem para o interior do suporte cerâmico e que se fixam durante o processo de queima. As soluções ou as pastas serigráficas podem ser aplicadas tanto sobre suportes crus e secos como queimados. O primeiro caso, que é muito mais difundido em relação ao segundo, prevê uma primeira queima do suporte a temperaturas de aproximadamente 1.000 °C.

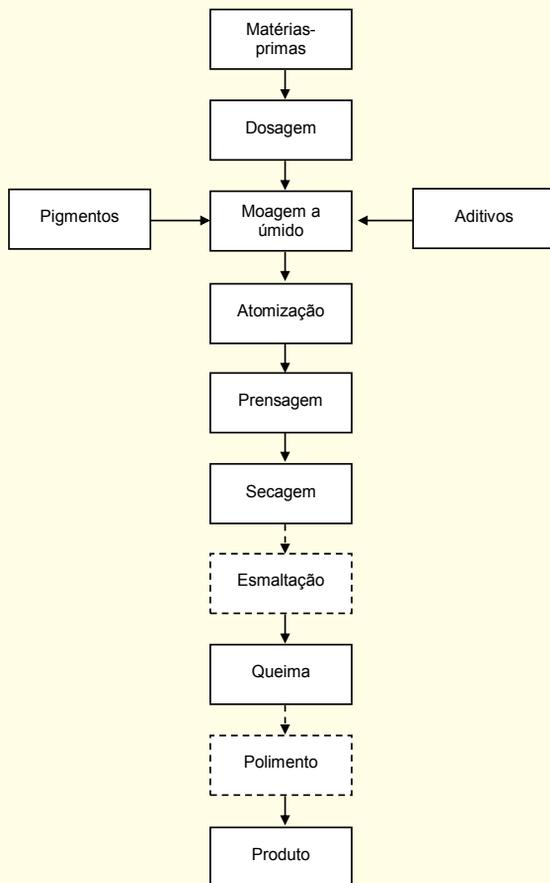
Nos últimos anos, um grande impulso foi dado à pesquisa e à utilização de novas formulações de sais cromóforos, o que permitiu o estabelecimento de rotinas de processamento muito bem definidas, e, em consequência, a obtenção de produtos personalizados e com elevada qualidade estética. Os sais empregados não são sais inorgânicos simples, mas complexos organometálicos de natureza química diversa (por exemplo, oxalatos). De acordo com o metal considerado, são assegurados efeitos cromáticos e de brilho comparáveis aos dos óxidos ou pigmentos comumente empregados na formulação de esmaltes.

A aplicação dos sais ocorre por meio de máquinas serigráficas, cabine a disco ou, raramente, com aerógrafos. Pode-se também prever uma aplicação mista de sais solúveis em forma de pasta, densificada com aditivos apropriados, seguida de uma aplicação a disco com soluções líquidas. O material decorado com os sais é, em seguida, parcialmente ou totalmente removido através do processo de polimento. No segundo caso, é possível obter uma superfície brilhante e espelhada.

5.3 PROCESSO

Paralelamente à natureza química e mineralógica das massas cerâmicas, os parâmetros de processo exercem um papel fundamental nas etapas do processo produtivo (Figura 5.2), a serem detalhados a seguir.

Figura 5.2 – Fluxograma do processo de fabricação de porcelanato.



5.3.1 DOSAGEM

Com relação ao grau de sofisticação da instalação produtiva e, em particular, do tipo de processo de moagem adotado (descontínuo ou contínuo), a operação de dosagem pode apresentar diferentes níveis de automação. Nos processos descontínuos, pode-se operar com dispositivos mecânicos tradicionais ou com sistemas mais sofisticados, como os que utilizam células de carga em lugar das caixas de contenção. Nos processos contínuos, é geralmente empregado um sistema de pesagem e dosagem contínuas, as quais são gerenciadas por um microprocessador, com estocagem intermediária da massa

dosada em um silo que alimenta continuamente o moinho. Nesse caso, as matérias-primas e o defloculante são misturados com a suspensão aquosa contendo os resíduos de peneiramento, normalmente submetidos a recirculação. Em alguns casos, pode-se ter uma dissolução prévia de uma parte da argila (geralmente a fração mais fina e com maior plasticidade) e, eventualmente, do rejeito não queimado da massa base, com a produção de uma suspensão argilosa que pode ser conduzida ao moinho ou misturada com a barbotina produzida pelo próprio moinho.

Um aspecto característico na produção de algumas tipologias de porcelanato é a dosagem dos pós e dos grânulos a qual é realizada por meio de esteiras dosadoras localizadas nos pontos de descarga dos respectivos silos de estocagem. Esses dispositivos, como no caso da dosagem das matérias-primas, são dotados de células de carga e sensores para a leitura da velocidade das esteiras. O sistema é controlado por meio de um microprocessador para o controle e gestão das operações de dosagem (aquisição e armazenamento da carga selecionada e pesada; controle e regulagem da carga requerida). Os grânulos e pós dosados e misturados são conduzidos aos silos de produtos misturados ou enviados diretamente aos sistemas de alimentação das prensas.

5.3.2 MOAGEM

Para favorecer as reações de vitrificação e densificação durante a queima, o valor do resíduo em malha 230 mesh, da barbotina após moagem, deve estar entre 0,5 e 1%. A esses valores de resíduo correspondem normalmente diâmetros médios de partículas entre 15 e 20 μm . Esse nível de granulometria contribui para aumentar a superfície específica das partículas que compõem a massa cerâmica e, portanto, a reatividade durante a queima. Nesse sentido, e visando também a aumentar a produtividade, a moagem contínua tem progressivamente ocupado espaço na produção de porcelanato. Geralmente, esse tipo de moinho é utilizado para produzir a barbotina base (massa branca). Na descarga do moinho são posicionadas diversas peneiras, sendo que a primeira delas, na sequência, tem a função de reter eventuais corpos sólidos de maior dimensão, enquanto as peneiras sucessivas têm a função específica de selecionar a barbotina a ser atomizada. O resíduo retido nas peneiras é conduzido novamente ao moinho.

5.3.3 COLORAÇÃO DAS MASSAS

A coloração da massa base pode ser realizada por adição descontinua de concentrados (barbonitas contendo altas concentrações de pigmentos). São preparados em moinhos específicos, mediante adição nos reservatórios de barbotina base ou por dosagem e mistura contínua dos concentrados por meio de dispositivos de medida e ajuste da quantidade requerida. Esse último sistema, que prevê a dosagem de concentrados provenientes de reservatórios, dedicados a cores específicas, permite realizar o ajuste da quantidade requerida em diferentes níveis de concentração.

5.3.4 PRENSAGEM

O objetivo é alcançar, na fase de prensagem, o máximo grau de densificação e a níveis compatíveis com os problemas que se manifestam durante a queima. A pressão de compactação normalmente utilizada, 350 a 450 kgf/cm² (~35 a 45 MPa), permite a obtenção de valores de densidade a verde de 1,95 a 2,00 g/cm³. No caso dos *macrograniti*, é necessário empregar pressões de compactação da ordem de 600 kgf/cm² (~60 MPa) para uniformizar as inevitáveis variações de densidade aparente dos diversos grânulos que compõem o corpo cerâmico em questão. Além do controle da pressão de compactação, é de fundamental importância que a alimentação dos pós atomizados para as cavidades da matriz ocorra de maneira homogênea. A heterogeneidade de algumas misturas constituídas de pós atomizados e grânulos pode tornar difícil a prensagem. Para se obter uma alimentação ou carregamento otimizado das misturas, os carros da prensa podem ser dotados de grelhas flutuantes contendo cavidades. Tais dispositivos permitem conter as variações na alimentação da matriz, levando a uma redução de defeitos de superfície, como diferenças marcantes de tonalidade e defeitos geométricos nas placas cerâmicas, como variações dimensionais dos lados (calibre) e de ortogonalidade.

5.3.5 SECAGEM

A secagem de placas de porcelanato não apresenta dificuldades particulares nem substanciais diferenças de ciclo e condições de trabalho do secador em comparação com os utilizados normalmente

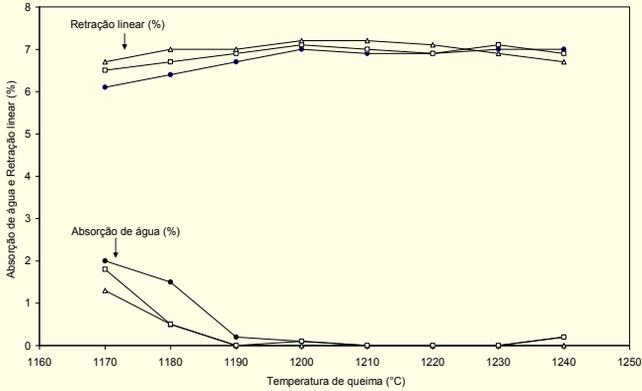
na produção das tipologias convencionais de placas cerâmicas. No caso de materiais destinados a serem decorados com sais solúveis, é importante que as placas cerâmicas apresentem módulo de resistência à flexão suficientes (25 a 30 kgf/cm^2) para suportarem aplicações serigráficas. Os secadores adotados podem ser do tipo vertical ou horizontal, sem distinções particulares referentes a aspectos tecnológicos. Os ciclos comuns de secagem, praticados em secadores verticais, variam de 45 a 65 min (150 - 180 °C), em função do formato e da espessura da placa cerâmica (formatos mais espessos requerem tempos de secagem maiores). Nos secadores horizontais, sempre considerando as dimensões das placas cerâmicas, os ciclos de secagem variam de 15 a 30 min (200 a 250 °C). Para as aplicações de sais solúveis em linhas de esmaltação, é fundamental que a temperatura na saída do secador permaneça constante para que haja uma difusão uniforme dos sais para o interior das placas cerâmicas. Caso contrário, os problemas relacionados à tonalidade se acentuam, em particular, após o polimento de acabamento das placas cerâmicas.

5.3.6 QUEIMA

A queima é a fase final do processo e na qual se manifestam os resultados dos processos de moagem e de compactação. Temperatura e tempo são os parâmetros fundamentais que devem ser avaliados atentamente para se alcançarem os objetivos pré-fixados, ou seja, a obtenção de um material vitrificado com baixa porosidade, mediante a aplicação de um ciclo de queima rápida, usualmente 50 a 70 min, a temperaturas da ordem de 1.200 a 1.230 °C. É importante observar que os parâmetros indicados não podem ser avaliados separadamente, mas sim globalmente, considerando as interações entre eles e os efeitos induzidos por variações de outros parâmetros, isolada ou simultaneamente.

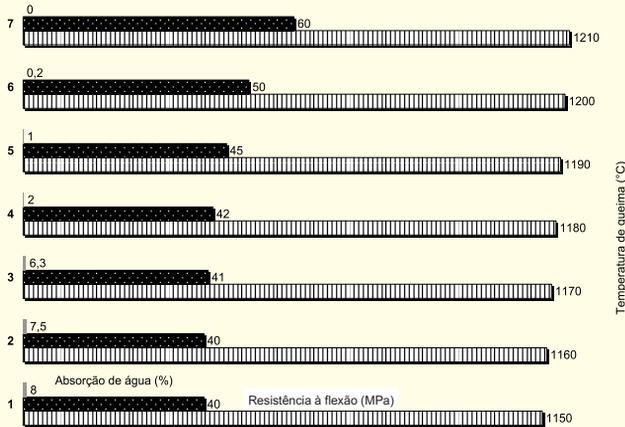
No caso de massas contendo corantes ou pigmentos é muito importante considerar as variações observadas na curva de gresificação (Figura 5.3), entre as várias composições consideradas (com e sem adição de pigmentos). De fato, adições de pigmentos à massa base podem modificar o comportamento desta com relação à capacidade de vitrificação e deslocar o ponto ótimo de queima, exigindo conseqüentemente, um ajuste posterior de composição. Não é o caso do exemplo da Figura 5.3, que apresenta condições de equilíbrio muito satisfatórias.

Figura 5.3 – Curva de gresificação típica de massas industriais de porcelanato contendo pigmentos.¹⁸



A Figura 5.4 apresenta as variações de resistência à flexão e de absorção de água em função da temperatura de queima. Os requisitos do produto acabado, isto é, após queima, são: absorção de água quase nula, valores muito elevados de resistência à flexão e à abrasão profunda e resistência a manchas.

Figura 5.4 – Variação da resistência à flexão e absorção de água em função da temperatura de queima de massas industriais típicas de porcelanato.¹⁸



Tais requisitos são influenciados tanto pela escolha das matérias-primas, como pelas condições de processamento nas fases fundamentais de dosagem, moagem, compactação ou prensagem, secagem e queima.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O nível tecnológico da indústria de revestimentos cerâmicos tem melhorado substancialmente nas últimas décadas, que pode ser mensurado através da evolução do consumo específico de energia por kg de material produzido. Nos anos 1970, os fornos de biqueima tradicionais consumiam entre 600 e 700 kcal/kg, ao passo que os atuais fornos a rolos de monoqueima rápida consomem entre 500 e 600 kcal/kg de material produzido.²¹ A forte competição em um mercado globalizado, onde a tecnologia é adquirida pronta e os padrões de qualidade são alcançados com relativa facilidade, pelo menos na fabricação de produtos básicos, resultou no estabelecimento de um objetivo prioritário para a indústria, relacionado à redução do consumo energético. O setor cerâmico europeu, por exemplo, tem como meta reduzir esse consumo, até 2010, para níveis compreendidos entre 350 e 400 kcal/kg de material produzido. Pretende-se alcançar esta drástica redução por meio de duas ações:

- o aumento da eficiência energética dos fornos, melhorando o isolamento térmico pela introdução de novos tipos de fibras, melhorando a estrutura e o projeto dos recuperadores de calor e, sobretudo, generalizando e intensificando a utilização da cogeração;
- a redução das temperaturas e tempos de queima, o que implica em modificações importantes nas composições dos esmaltes e sua perfeita adequação ao substrato (suporte cerâmico) bem como nas etapas de seu processamento e aplicação.

O objetivo é conseguir a máxima eficiência com o mínimo custo, minimizando o uso de matérias-primas não renováveis, incluindo-se aqui a água e a energia, e controlando de forma rigorosa os ciclos de queima. Nesse caso, os resíduos sólidos industriais, implicitamente,

assumem um papel importante para o desenvolvimento de materiais e produtos com propriedades otimizadas para uma aplicação específica. Isso coloca o fabricante de cerâmica em uma posição fortemente competitiva no mercado por meio de exemplos de casos bem-sucedidos de pesquisa e desenvolvimento com aplicação na indústria.²²

Entre os produtos de cerâmica de revestimento, o porcelanato, sem dúvida, é atualmente a cerâmica para pavimentação que apresenta as melhores características técnicas e estéticas, em confronto com as demais categorias de cerâmicas tradicionais encontradas no mercado. Tal sucesso se deve a um longo processo de desenvolvimento tecnológico que permitiu a elaboração de um material constituído por fases cristalinas de elevada dureza e densidade. Do ponto de vista técnico, o porcelanato é um material polifásico, contendo cerca de 40% de fase vítrea e porosidade residual. Tal porosidade, se não controlada ou mantida a baixos níveis, seguramente afetará as propriedades mecânicas do material e conseqüentemente do produto final, podendo dar origem também a fenômenos marcantes de manchamentos causados pela intrusão de resíduos sólidos. Geralmente, os valores de porosidade aberta são muito baixos (0,1% em termos de absorção de água e 0,5% segundo porosimetria de mercúrio) e, portanto, a superfície das peças cerâmicas não manifesta problemas particulares de manchamentos.

Por outro lado, a porosidade fechada (interna ao suporte cerâmico ou abaixo da superfície) é de aproximadamente 6-7%, com poros de dimensões, em média, entre 1 e 10 μm . Todavia, tal porosidade, durante processo de polimento, o qual remove aproximadamente de 0,5 a 1 mm da camada superficial da placa cerâmica, torna-se aberta. Existem diversas possibilidades de intervenção, algumas das quais já amplamente adotadas, para reduzir os efeitos ou a incidência de microporosidade residual sobre o desempenho do produto em condições de serviço. Com esse propósito, foi demonstrado que a penetração e a remoção de agentes que produzem manchas ou perda de aspecto visual estão relacionadas com a forma e o diâmetro dos poros. Poros abertos de dimensões relativamente grandes ($> 60 \mu\text{m}$) facilitam a limpeza do produto, mas determinam uma perda de aspecto estético da superfície, já que esses poros podem ser visualizados a olho nu. Ao contrário, poros menores resolvem em grande parte o problema, já que dificultam a intrusão de substâncias estranhas, sendo, portanto, a situação desejada para a otimização do produto. Mesmo assim, poros menores, quando sujos, conduzem a um obscurecimento uniforme e

gradual, o qual é menos perceptível à degradação causada pela abrasão. Além da porosidade, a microrrugosidade da superfície desgastada também retém detritos. Em consequência, superfícies sem porosidade aberta apreciável podem apresentar perdas de aspecto importantes se muito rugosas.

A solução total ou parcial dos problemas de perda de aspecto estético relacionados com a porosidade é a adoção de ajustes apropriados dos parâmetros de processamento visando a aumentar o grau de densificação do material mediante:

- aumento da superfície específica das partículas de alguns componentes da massa, em particular quartzo e feldspatos, através de modificações e controle dos parâmetros de moagem;
- aumento da densidade a verde dos compactos através do emprego de maiores pressões de compactação;
- utilização de fundentes mais reativos porém compatíveis com a estabilidade físico-química e a tendência à deformação pirolástica das massas.

A adoção dessas e de outras possíveis soluções certamente contribuirá para a garantia de um elevado padrão de qualidade do porcelanato produzido.

A evolução estética do porcelanato, considerando-se as atuais tendências de produção, vem se caracterizando, inevitavelmente, por uma diversificação das gamas de efeitos decorativos, o que tem contribuído muito para a difusão desse produto. Os novos produtos protagonistas dessa diversificação estética são os já citados *macrograniti* e *variegati*, os produtos rústicos estruturais obtidos por dispersão de sais solúveis e tratamentos particulares (escovamento), os produtos obtidos com técnicas de aplicação mista (aplicações serigráficas, esmaltes peletizados e eventualmente sais solúveis sobre superfícies esmaltadas ou não). Para algumas tipologias de produtos, a operação de polimento produz superfícies similares aos mármore e aos granitos naturais. Essa evolução estética já praticada aumenta o valor agregado do produto, favorecendo a sua difusão em seguimentos do mercado sempre mais voltados à aplicação residencial.

Por meio da seleção e preparação adequada de matérias-primas e utilizando técnicas de aplicação serigráfica, é possível também a obtenção de placas cerâmicas recobertas com esmaltes vitrocerâmicos

sinterizados em forno de biqueima rápida, com propriedades otimizadas para uma dada especificação de uso.²³ De fato, quando se deseja associar um certo brilho ao produto, sem perda significativa das resistências ao risco e à abrasão, é possível, por serigrafia, a aplicação localizada de porções de esmalte vitrocerâmico, com geometrias definidas e com tamanhos e quantidades variáveis de acordo com o efeito final desejado.

Outra tendência é a produção de grandes formatos (1,80x1,20 m ou 3,00x2,00 m) que podem ser entendidos como produtos pré-formados ou semiacabados para a fabricação de revestimentos cerâmicos, painéis, cubas e balcões de cozinhas entre outras aplicações que se pode vislumbrar e/ou que já existem.

O futuro da cerâmica de revestimento reserva, sem dúvida, profundas modificações, as quais estão associadas, invariavelmente, à redução de energia na sua produção; ao reaproveitamento dos rejeitos de produção; e à utilização de resíduos provenientes de setores não necessariamente relacionados à cerâmica. A escassez e o valor crescente da água é outro problema que remete, passo a passo, à utilização de técnicas de processamento a seco. Algumas dessas modificações já estão ocorrendo atualmente. No entanto, seguramente, o futuro reserva surpresas ainda maiores e soluções técnicas criativas, que são típicas do ser humano, especialmente naqueles momentos difíceis.

REFERÊNCIAS

- ¹ HOTZA, D. Etimologia e uso em diferentes línguas de alguns termos técnicos empregados na fabricação cerâmica tradicional. *Cerâmica Industrial*, v. 12, n. 4, p. 17-21, 2007.
- ² KINGERY, W. D.; BOWEN, K.; UHLMANN, D. R. *Introduction to ceramics*. 2. ed. New York: Wiley, 1976.
- ³ BARSOUM, M. W. *Fundamentals of ceramics*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- ⁴ REED, J. S. *Principles of ceramics processing*. 2. ed. New York: Wiley, 1995.
- ⁵ VENTURI, V. *Tecnologia cerâmica: le piastrelle*. 2. ed. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.
- ⁶ OLIVEIRA, A. P. N. de; ALARCON, O. E. L'industria brasiliana di piastrelle ceramiche. *Ceramica Informazione*, v. 376, n. 1/2, p. 29-32, 1998.
- ⁷ NBR 13817. *Placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1997.
- ⁸ BARBA, A. et al. *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerâmicas*. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1997.
- ⁹ OLIVEIRA, A. P. N. de et al. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 4, p. 14-18, 2003.
- ¹⁰ FERNANDES, P. F.; OLIVEIRA, A. P. N. de; HOTZA, D. Reciclagem do lodo da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 4, p. 26-32, 2003.
- ¹¹ SARTOR; M. N et al. Aluminum anodizing sludge used to fabricate engobes, glazes and frits. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 87, p. 9201-9208, 2008.
- ¹² DURÁN, A. (Ed.). *Introducción a los esmaltes cerâmicos*. Castellón: Faenza Editrice Ibérica, 2002.
- ¹³ MARONCELLI, M.; TIMELLINI, G.; EVANGELISTI, R. *I consumi energetici nella produzione delle piastrelle ceramiche*. Bologna: Centro Ceramico Di Bologna, 1985.

- ¹⁴ NASSETTI, G. et al. *Piastrelle ceramiche e energia, banca dati dei consumi energetici nell'industria delle piastrelle di cerâmica*. Bologna: Centro Ceramico Di Bologna, 1998.
- ¹⁵ OLIVEIRA, A. P. N. de; ALARCON, O. E. Revestimentos cerâmicos: fundamentos tecnológicos. *Cerâmica Informação*, v. 1, n. 5, p. 29-39, 1999.
- ¹⁶ OLIVEIRA, A. P. N. de. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 6, p. 37-47, 2000.
- ¹⁷ ASTM/ANSI A 137-1. American national standard specification for ceramic tile. American Society for Testing and Materials/American National Standards Institute, 1988.
- ¹⁸ OLIVEIRA, A. P. N. de. Grés porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos. *Cerâmica Industrial*, v. 3, n. 3, p. 34-41, 1998.
- ¹⁹ EN 14411. Ceramic tiles. Definitions, classification, characteristics and marking. European Norm, 2006.
- ²⁰ NBR 15463. *Placas cerâmicas para revestimento: porcelanato*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2007.
- ²¹ DURÁN, A. Límites físicos, químico y tecnológicos en el diseño y producción de esmaltes cerâmicos. In: DURÁN, A. (Ed.). *Introducción a los esmaltes cerâmicos*. Castellón: Faenza Editrice Ibérica, 2002. p. 207-224.
- ²² CASAGRANDE, M. C. Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v. 13, n. 1, 2, p. 34-42, 2008.
- ²³ OLIVEIRA, A. P. N. de; MONTEDO, O. R. K. Esmaltes vitrocerâmicos: características e soluções técnicas. *Cerâmica Industrial*, v. 12, p. 11-14, 2007.



Este livro foi editorado com as fontes Utopia Std e Chaparral Pro. Miolo em papel pólen *soft* 80 g. Capa em cartão supremo 250 g. Impresso na Gráfica e Editora Copiart em sistema de impressão *offset*.

Este livro apresenta princípios científicos e tecnológicos da fabricação de revestimentos cerâmicos, com ênfase no processamento por via úmida. Representa uma contribuição para o aprimoramento e atualização dos que atuam na área e um incentivo para que outros profissionais possam se interessar por esse setor, carente de livros técnicos especializados em língua portuguesa.

