

Estudos dos Fatores Intervenientes na Redução de Defeitos de Fissura em Superfícies Esmaltadas

Cleiton Corrêa da Rosa^{a*}, Agenor De Noni Júnior^{a,b*}

^aDepartamento de Engenharia Química, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Av. Universitária, 1105, Bairro Universitário, CEP 88806-000, Criciúma, SC, Brasil

^bPrograma de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Av. Universitária, 1105,

Bairro Universitário, CEP 88806-000, Criciúma, SC, Brasil

*e-mail: agenordenoni@unesc.net; cleitoncr22@gmail.com

Resumo: A produção de revestimentos cerâmicos é passível de defeitos, e a minimização ou eliminação destes, gera redução de custo de produção e aumento do indicador de qualidade do processo. O defeito de fissura é um dos principais causadores da perda de qualidade em revestimentos cerâmicos esmaltados brilhantes, entre 2 e 3% da produção. Este tipo de defeito é ocasionado em sua maioria, por impactos que a peça sofre na etapa de esmaltação e decoração. Neste sentido buscou-se estudar alguns fatores que podem contribuir de forma negativa ou positiva no surgimento de fissuras, e encontrar uma condição de processo que as minimizem de forma eficaz. Para avaliação da evolução das condições testadas, foi utilizado um método de simulação de impacto, aferindo o aparecimento das fissuras nas superfícies das peças. O aumento de camada de vidro sobre os revestimentos cerâmicos, tal como o incremento de plasticidade dos vidrados em suspensão, são fatores que contribuem com aumento da energia mínima de impacto necessária, para o surgimento de fissuras nas superfícies dos revestimentos, em condições onde é possível reduzir mais de 90% de sua incidência.

Palavras-chave: defeitos, fissuras, plasticidade, vidro.

1. Introdução

Os revestimentos cerâmicos são produtos destinados à construção civil para o acabamento de superfícies internas e externas, pisos e paredes. São placas em formato quadrado ou retangular de várias dimensões, formadas por três camadas: biscoito, engobe e esmalte. Na sua produção se empregam matérias-primas tais como: argila, feldspato, talco, quartzo, carbonatos e outros.

O processo de fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos está em constante evolução no sentido de maior automatização, melhoria da qualidade do produto e aumento da produtividade. As composições empregadas têm seguido esta evolução, adaptando-se aos ciclos de queima mais rápidos e a outros parâmetros de processo, o que significa maiores exigências quanto ao desempenho.

O defeito em questão, estudado por alguns autores, e industrialmente conhecido como “estrias no esmalte”, “retração”, “gretas”, trata-se de “trincas” na superfície esmaltada, que possuem extensões variadas. Estas fissuras possuem aspecto de “estrias” e ocorrem devido a impactos sofridos pelo material cerâmico, antes da etapa de queima. Comumente ocorrem com mais constância nas regiões centrais das peças, muito embora também sejam encontrados nas regiões mais próximas às bordas¹. Sendo a origem do defeito choques e vibrações ocorridos na linha de esmaltação, a solução passaria por eliminar estas fontes. Resulta que muitas vezes atuar da origem do defeito é difícil, demorado ou inviável. Dessa forma se buscou alternativas para tornar o material mais robusto ao aparecimento do defeito.

2. Procedimento Experimental

2.1. Classificação do defeito

A primeira etapa do trabalho esteve relacionada com o levantamento de informações históricas sobre o defeito. Esta etapa foi realizada com base em metodologia indicada na literatura². Coletou-se

informações quanto ao aspecto do defeito, local de observação, frequência, amplitude, dimensão e intensidade

2.2. Simulação do defeito

Para verificação do defeito de fissura e eficácia dos procedimentos, foi necessário simular a ocorrência em laboratório. O ensaio consiste em aplicar um impacto mecânico no revestimento cerâmico ao lado oposto do vidro, conforme Figura 1.

A energia do impacto se propaga pelo revestimento, podendo gerar fissura nas diversas camadas do revestimento (suporte, engobe e esmalte), gerando fissuras na superfície, simulando o que os esforços sofridos pelo material ao longo do processo produtivo. Estes defeitos não são visualizados antes da queima. A energia do impacto foi determinada mediante a energia potencial da esfera, conforme Equação 1.

$$E = m.g.h \quad (1)$$

onde E é a energia potencial (J), m é a massa da esfera (kg), g a aceleração da gravidade (m/s^2), e h a altura da esfera em relação à peça (m).

Empregou-se uma esfera de alta alumina, com massa de 32,2 g. O ensaio era realizado em oito diferentes alturas iniciando em 0,010 m até 0,080 m em intervalos de 0,010 m. As peças eram submetidas a queima em forno industrial e as trincas eram caracterizadas através da medida de seu comprimento total com auxílio de uma régua graduada de resolução 0,001 m.

2.3. Planejamento fatorial dos experimentos

Identificou-se um total de 6 parâmetros ou fatores relacionados a eventual solução do problema. Um planejamento fatorial completo resultaria na execução de 64 corridas experimentais. Este número é muito grande e optou-se executar o procedimento em duas etapas de modo a restringir o número de fatores sob análise.

- Primeira etapa

Análise de todos os fatores isoladamente, buscando os melhores resultados em relação ao defeito.

- Segunda etapa

Para a realização planejamento fatorial, foi identificado os três fatores que tiveram melhores resultados na resistência ao aparecimento de fissuras, e optou-se, então, por um projeto fatorial do tipo 2^k, ou seja, três fatores analisados variados em dois níveis cada, formando um bloco de análises com oito experimentos³.

Os parâmetros identificados para aumentar a robustez do material frente ao aparecimento de fissuras foram:

a) Densidade aparente do biscoito seco;

Este parâmetro será variado através da pressão de compactação, do material, sabendo que o aumento da pressão, reflete no aumento da densidade aparente do material que por sua vez aumenta a rigidez mecânica do suporte. Dentro dos limites aceitáveis pode-se aumentar em 4 MPa a pressão de compactação.

b) Camada de engobe e esmalte;

Será alterada a camada do engobe e posteriormente a camada de esmalte. Efetuando essas variações esperasse aumentar a força necessária para provocar deformação e fissura nestas camadas. Aumentou-se em 60% a quantidade de engobe e esmalte depositado.

c) Plasticidade do engobe e do esmalte em suspensão;

Para aumentar a plasticidade do esmalte e do engobe em suspensão, será variado o percentual de carboximetilcelulose (CMC) que é um polímero aniônico derivado da celulose, e atua como agente ligante no esmalte ou engobe. Aumentando a plasticidade, aumenta-se a resistência mecânica dos vidrados a cru, portanto uma maior resistência ao impacto, evitando que pequenos choques propagem a fratura no vidrado. Acrescentou-se 0,2% de CMC sobre massa seca de engobe e esmalte além da quantidade usualmente empregada.

d) Viscosidade do estado em fusão.

Para alterar este parâmetro serão utilizados óxidos que atuam nessas propriedades, alterando a sua concentração na composição,

a fim de se obter um vidrado com diferentes propriedades em fusão. Neste caso, busca-se menor tensão superficial e um maior escorrimento do esmalte, de forma que, tenha na etapa de queima o esmalte espalhe, corrigindo o as fissuras existentes. Acrescentou-se 5% de óxido de zinco á composição do esmalte.

Os corpos-de-prova eram as próprias peças da produção que eram amostradas na linha e engobadas e esmaltadas utilizando uma linha piloto, normalmente empregada em procedimentos de liberação de lotes de engome e esmalte.

3. Resultados e Discussões

3.1. Análise e quantificação do defeito

Aspecto: o defeito em questão são trincas no esmalte, mais conhecido como fissura. Causando desclassificação do material cerâmico. A Figura 2 apresenta imagens do defeito, a trinca pode também afetar o suporte cerâmico.

Local de observação: apenas após a etapa queima do produto. Porém a origem é decorrente da etapa de esmaltação, onde o material sofre impactos e vibrações que geram as trincas.

Frequência: aleatória, manifesta-se somente em produtos de aspecto superficial brilhante, ou seja, nos produtos que utilizam esmalte brilhante. O mesmo defeito não é observado em produtos que utilizam outras tipologias de esmaltes, o esmalte mate por exemplo.

Amplitude: entre 2 e 3% da perda de qualidade na produção, sendo que o índice de qualidade médio é de 90%. Dentre os defeitos apresentados pelos produtos, esta classe representa aproximadamente 20% da totalidade.

Dimensão: em média 2 cm de comprimento, podendo variar de tamanho, conforme o impacto sofrido. A Figura 3 ilustra a distribuição de frequência da dimensão do defeito.

Intensidade: Cada peça com defeito pode possuir uma ou mais fissuras, dependendo das vibrações sofridas no decorrer da linha de

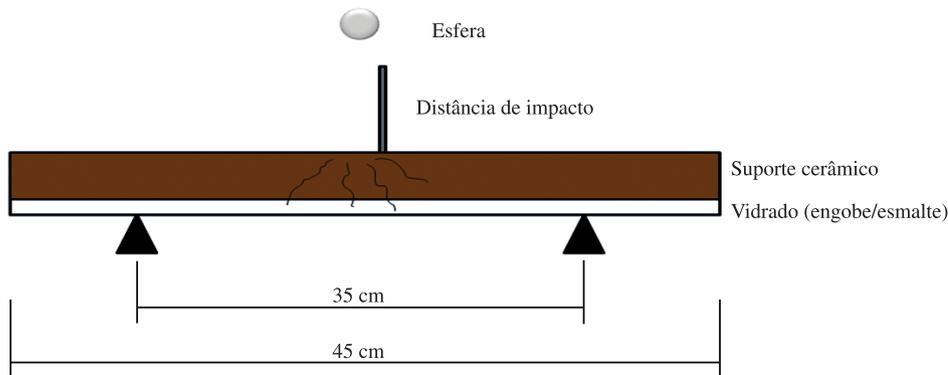


Figura 1. Esquema do ensaio de simulação do defeito.

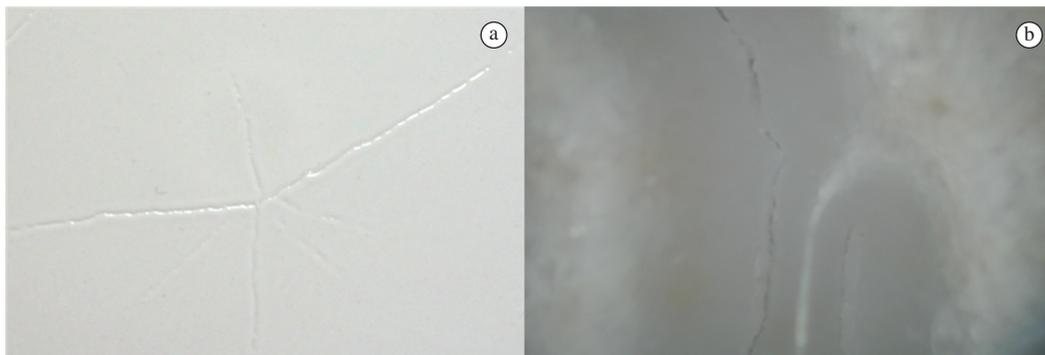


Figura 2. a) Ilustração do defeito de fissura simulado em laboratório; b) Microscopia óptica frontal do defeito de fissura, ampliação 100x.

esmaltação. De acordo com parâmetros experimentais, a energia de impacto sofrida, há uma determinada dimensão do defeito de fissura.

Gravidade: Basta a existência de um fissura, para que o material seja desclassificado. Resultando no aumento de custos de produção para a empresa. Considerando que há uma média mensal de defeitos de fissura de 2,17% nas referências brilhantes.

3.2. Validação do método de simulação do defeito

Para a validação do método as peças do processo foram coletadas e submetidas ao procedimento descrito anteriormente. O resultado de dimensão do defeito em função da energia de impacto está mostrado na Figura 4.

Relacionando os dados de frequência de dimensão de defeitos da Figura 3, e a equação da curva de energia de impacto por dimensão de defeito na Figura 4, resultam na frequência de energia de impacto sofrida pelas peças na linha de decoração, ilustrado na Figura 5. A partir dessa informação, pode-se avaliar que aproximadamente 95% das peças que apresentam trincas no processo sofrem impactos equivalentes inferiores a 2×10^{-2} J. Dessa forma, uma solução que pudesse suportar esta magnitude de sollicitação mecânica provavelmente acarretaria em redução de 95% na incidência de trincas.

3.3. Fatores críticos na incidência do defeito

Foram testados alguns fatores do processo, como hipóteses de relação com a incidência do defeito de fissura no esmalte. Inicialmente foi realizado o ensaio de simulação de defeito na condição padrão de processo, com altura de lançamento da esfera de 0,085 m ($4,76 \times 10^{-2}$ J).

A Tabela 1 mostra o resultado de comprimento da fissura para os diferentes fatores testados individualmente. A condição padrão resultou em comprimento de fissura de 0,097 m. Camada e plasticidade do engobe e plasticidade do esmalte foram os fatores com maior impacto sobre a redução no comprimento da fissura.

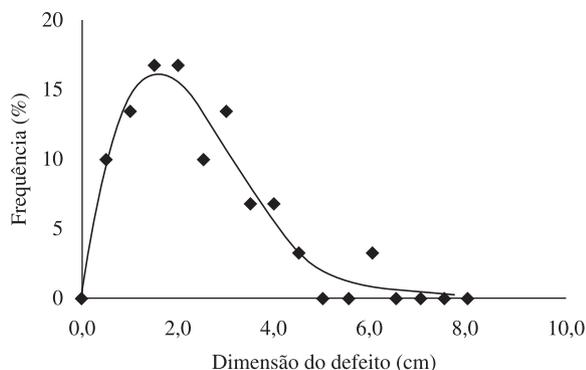


Figura 3. Frequência de defeitos na produção.

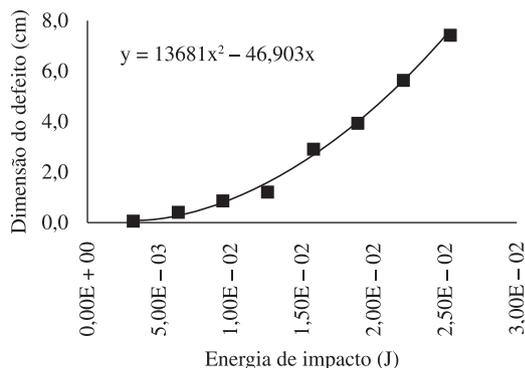


Figura 4. Relação de energia de impacto com dimensão do defeito.

Dessa forma, suas eventuais interações foram avaliadas a partir de planejamento experimental do tipo fatorial.

3.4. Análises das correlações de hipóteses

A partir das três condições que apresentaram melhores resultados, mediante ao surgimento de fissuras, foi realizado um delineamento fatorial. Este tipo de abordagem permite identificar a influência de cada variável isolada e combinada. As variáveis trabalhadas e suas respectivas condições estão ilustradas na Tabelas 2 e 3.

A Tabela 4 mostra os resultados de energia mínima para o surgimento de fissura e o tamanho do defeito na condição de impacto de $2,5 \times 10^{-2}$ J. Quanto maior a energia mínima e menor o tamanho do defeito mais resistente é o material e quanto menor. A Figura 6 mostra o resultado gráfico obtido nos ensaios de simulação de impacto, a título ilustrativo.

De maneira geral, observou-se que as variações em condições combinadas são mais efetivas que a variação de uma condição isolada. Conforme Tabela 4, os resultados de maior impacto na redução do defeito de fissura foram: o aumento da camada de engobe combinado com o aumento da plasticidade do esmalte, o aumento da plasticidade do engobe e do esmalte concomitantemente, e o aumento da camada de engobe combinado com o aumento da plasticidade de esmalte e engobe. Ainda é possível verificar que aumentar o teor de CMC é praticamente equivalente a aumentar a camada do engobe em 60%. A

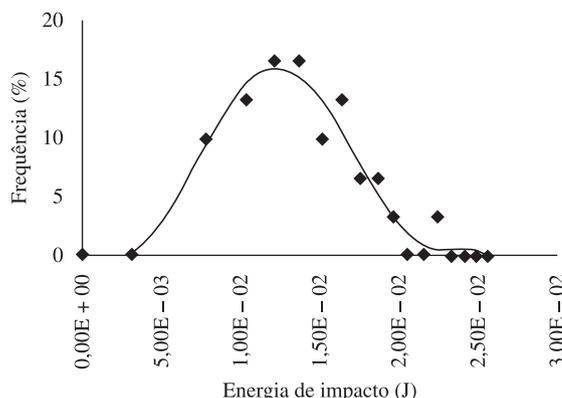


Figura 5. Frequência de defeitos na produção mediante a energia de impacto.

Tabela 1. Dimensão do defeito para impacto a 0,085 m de altura ($4,76 \times 10^{-2}$ J) em função de alterações provocadas no sistema.

Condições modificadas	Dimensão do defeito (cm)
Padrão	9,7
Aumento de pressão	9,9
Aumento camada engobe	3,5
Aumento camada esmalte	4,6
Aumento plasticidade engobe	3,5
Aumento plasticidade esmalte	3,8
Esmalte maior escorrimento	6,0

Tabela 2. Variáveis e condições da análise fatorial.

Variáveis	Condições
A Camada de engobe	0 - Padrão 1 - Aumentando 60% da camada
B Plasticidade do engobe	0 - Padrão 1 - Adicionando 0,2% de CMC
C Plasticidade do esmalte	0 - Padrão 1 - Adicionando 0,2% de CMC

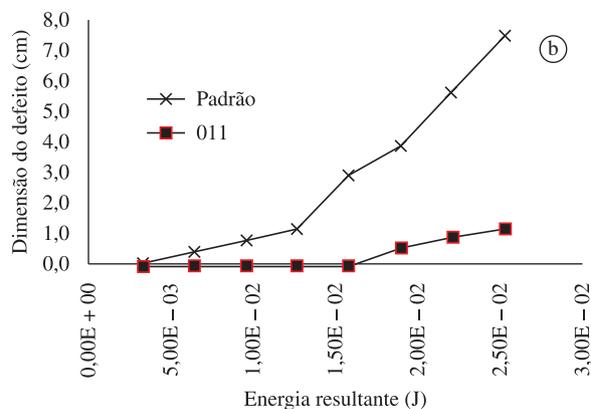
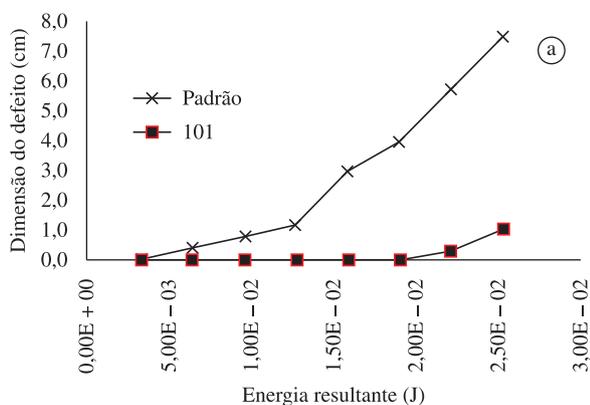


Figura 6. Resultados gráficos das condições experimentais (101 e 011).

Tabela 3. Condições do planejamento experimental do tipo fatorial.

Experimento	Descrição
000	Condição padrão
100	Aumento da camada de engobe
010	Aumento da plasticidade do engobe
001	Aumento da plasticidade do esmalte
110	Aumento da camada de engobe e aumento da plasticidade do engobe
101	Aumento da camada de engobe e aumento da plasticidade do esmalte
011	Aumento da plasticidade do engobe e aumento da plasticidade do esmalte
111	Aumento da camada de engobe e aumento da plasticidade do engobe e esmalte

Tabela 4. Resultados de energia de fissura e tamanho do defeito.

Condições	Energia mínima de fratura (J)	Dimensão do defeito com a maior energia de impacto (cm)	Redução provável da incidência do defeito (%)
000	0,6E-02	7,5	0
100	1,6E-02	4,0	67
010	1,3E-02	3,9	40
001	1,3E-02	5,7	40
110	1,6E-02	4,6	67
101	2,2E-02	1,1	97
011	1,9E-02	1,2	93
111	2,2E-02	1,0	97

Tabela 4 relaciona o percentual de redução de defeito, com base em estimativas estatísticas determinadas a partir da Figura 4.

Uma prova industrial foi realizada com base na condição 011, porém com metade da adição de CMC no esmalte e no engobe (+0,1%). A prova foi realizada na tipologia de monoqueima, bitola $45 \times 45 \text{ cm}^2$, com produção de 4000 m^2 . Para análise do efeito da prova industrial foi realizada o ensaio de simulação. Observou-se um aumento de 150% na energia mínima de impacto para o surgimento da fissura. O resultado esperado com base dos experimentos de

laboratório era uma redução de aproximadamente 70%. Na prática observou-se redução de 100% na incidência do defeito. Resultado é considerado muito bom e compatível com esperado, uma vez que 4000 m^2 correspondem a aproximadamente a apenas 8 horas de produção.

4. Conclusão

O método de simulação de defeitos empregado para avaliação do surgimento de fissura em revestimentos cerâmicos esmaltados foi conclusivo para avaliação das condições testadas, visto que foi possível ter um efeito comparativo e uma análise quantitativa da evolução do defeito. A variação da distância de impacto permitiu obter diferentes valores de energia aplicada ao revestimento, relacionando com os impactos sofridos pelo revestimento no processo.

Os ensaios iniciais, os parâmetros base para verificar os fatores que tem melhor resultado frente ao defeito de fissura, mostram que o aumento de pressão de compactação, não proporcionou uma melhoria em relação ao defeito. E que ações no engobe, como o aumento de camada e aumento de plasticidade, são altamente intervenientes na mitigação de fissuras no esmalte. Alterações no esmalte também são relevantes, algumas em menor proporção que as alterações no engobe, mas também auxiliam na redução do defeito de fissura.

Entre as condições que proporcionaram maior resultado perante o defeito de fissura no primeiro momento, analisadas em condições combinadas, conclui-se que são mais eficazes que a variação de uma condição isolada. Os resultados de maior intervenção na redução do defeito de fissura e que tem menor alteração no produto e no custo foi o aumento da plasticidade do engobe e do esmalte simultaneamente.

A prova industrial, não apresentou qualquer tipo de problema no processo. E embora realizada com uma quantidade menor de aditivos, teve resultados significativos, comprovando a eficácia da condição aplicada, melhorando a característica do produto, quanto ao defeito de fissuras em revestimentos cerâmicos esmaltados.

Referências

- HASHIMOTO, A. Y. Estudo do defeito denominado “estrias no esmalte” em revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 1, 2003.
- DE NONI JUNIOR, A.; HOTZA, D.; GARCIA, D. E. Metodologia de resolução de problemas de defeitos em revestimento cerâmico: um estudo de caso. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 5, 2000.
- MONTGOMERY, D. C. et al. *Estatística aplicada à engenharia*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.