

Aplicação do modelo NORIE-LACER-LOPP para a estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão

Application of the NORIE-LACER-LOPP model for estimating the life cycle of glazed ceramic tiles under abrasion

Ana Luiza Raabe Abitante
Carlos Pérez Bergmann
José Luis Duarte Ribeiro

Resumo

Este trabalho discute a aplicação do modelo denominado NORIE-LACER-LOPP, proposto para a estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas submetidas à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas em livre movimento. O modelo indica que a variação do aspecto decorrente do trânsito de pessoas é proporcional, respectivamente, à raiz quadrada do tempo, dado em minutos, e à raiz quadrada do tráfego, dado em milhões de pessoas. Com vistas à sua aplicação em quaisquer condições de agressividade, realizou-se um estudo que define a influência da carga e da concentração do abrasivo sobre o fator de aceleração. Em seqüência, apresenta-se a previsão de comportamento para quatro grupos de placas cerâmicas considerando-se diferentes condições de agressividade. Por fim, ilustra-se a aplicação do modelo a qualquer tipologia de placas cerâmicas, tanto no ambiente padrão como quando expostas a outros níveis de severidade.

Palavras-chave: Placas cerâmicas. Vida útil. Abrasão. Modelagem.

Abstract

The aim of this paper is to discuss the application of the NORIE-LACER-LOPP model, which estimates the life cycle of glazed ceramic tiles submitted to abrasion caused by people's traffic in free movement. The model indicates that the variation of aspect due to people's traffic is proportional, respectively, to the square root of the time, which is given in minutes, and the square root of the traffic, which is given in millions of people. Considering the need to apply the model to any severity level, a study that defines the influence of the load and the concentration of abrasive on the acceleration factor was undertaken. Then, the prediction of the behaviour of four groups of ceramic tiles at different severity conditions was carried out. Finally, this paper presents the application of the model to any kind of ceramic tiles, considering the standard environment and also other severity levels.

Keywords: Ceramic tiles. Life cycle. Abrasion. Modelling

Ana Luiza Raabe Abitante
Núcleo Orientado para Inovação
da Edificação
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar,
Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Tel.: (51) 3316-3321
E-mail: aabitante@cpgec.ufrgs.br

Carlos Pérez Bergmann
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica
e dos Materiais
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 - Sala 705B
Tel.: (51) 3316-3405
E-mail: bergmann@ufrgs.br

José Luis Duarte Ribeiro
Laboratório de Otimização de
Produtos e Processos Universidade
Federal do Rio Grande do Sul
Praça Argentina, 9, 2º andar,
Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90040-020
Tel.: (51) 3316-4005
E-mail: ribeiro@producao.ufrgs.br

Recebido em 18/07/05
Aceito em 26/09/06

Introdução

A partir da década de 1990 foram implementadas importantes mudanças na estratégia competitiva das indústrias de revestimento cerâmico esmaltado, passando esta a buscar diferenciação através da melhoria técnica dos produtos, das variações tipológicas, da conformidade com as normas técnicas e do fortalecimento da marca. Nesse período, a concepção de que o material cerâmico constitui-se em um revestimento exclusivo para as áreas molháveis da edificação foi substituída pelo uso disseminado em todos os ambientes, conseqüentemente, com funções diferenciadas. Enrique et al. (1996) colocam que o progresso da tecnologia de fabricação vem permitindo essas novas abordagens e destacam especialmente a extrapolação para os ambientes públicos, comerciais e de serviços.

O desconhecimento quanto às condições de agressividade efetivamente presentes nesses novos ambientes, associado à utilização de novas matérias-primas, novos equipamentos e processos produtivos, deu início a uma série de dificuldades relativas ao desempenho dos produtos. Nesse sentido, Enrique et al. (1996) registram a ausência de conhecimento quanto à durabilidade das placas cerâmicas quando expostas a reais condições de utilização e que os fabricantes, em geral, não dispõem de dados seguros para desenvolver seus produtos e disponibilizar informações relativas à durabilidade.

Com efeito, percebe-se, nesse período, a publicação de trabalhos que passam a manifestar importante preocupação com a necessidade de adequar os materiais cerâmicos às suas reais condições de uso, de forma a garantir um comportamento satisfatório ao longo do tempo (BARBERA et al., 1996; ENRIQUE et al., 1996; FELÍU et al., 1990; NAVARRO, 1997).

Entre as diferentes possibilidades de deterioração dos materiais, o desgaste normalmente é referido na bibliografia como o principal responsável pela deterioração de cerâmicas esmaltadas para revestimento de piso; e entre os mecanismos de desgaste, o processo abrasivo (DIAS et al., 2000; FEIJÃO et al., 1996; IBÁÑEZ, 1998).

Para Simioli (1992), a abrasão manifesta-se de duas formas diferentes: como mudança no aspecto e como remoção de material superficial. Naturalmente, a mudança de aspecto é decorrência de uma alteração na superfície, atribuída à perda de matéria. Apesar de serem manifestações dependentes, a relação entre ambas é difícil de ser estabelecida.

Para os materiais cuja conotação estética é importante, considera-se, entretanto, que os critérios de avaliação devam ser estabelecidos com base em parâmetros relacionados à aparência. Por esse ponto de vista, atingir determinado nível de deterioração não significa término da vida útil, mas a percepção da deterioração sim. Justamente, a relação entre vida útil e aspecto superficial é mencionada por Walters e Harrison (1986) ao comentarem que a mudança na aparência normalmente define a vida da placa cerâmica. Da mesma forma, Lorici e Bresciani (1990) colocam que algumas cerâmicas podem desgastar-se mais e demonstrá-lo menos, porém o que importa é justamente a evidência desse desgaste.

Na medida em que o desgaste dos materiais consiste em um processo de deterioração ao longo do tempo, denota claramente sua relação com a vida útil.

A estimativa de vida útil constitui-se em um estudo complexo, que deve incluir os diferentes fatores de deterioração presentes nas situações reais de uso.

Uma forma de conduzir o problema consiste em utilizar ensaios de envelhecimento acelerado. Busca-se, com esses ensaios, obter informações a respeito da durabilidade de um material em período significativamente inferior do que se fora avaliado em condições reais de utilização. A norma ASTM E 632-82 (1998b) estabelece um procedimento para o desenvolvimento de ensaios acelerados com a finalidade de nortear a estimativa da vida útil de materiais e componentes para a construção.

Considerando-se o estágio atual de conhecimento, dificilmente se consegue estimar a vida útil sem que ela esteja focada em determinado fenômeno ou grupo limitado de fenômenos, e também em determinado fator de deterioração ou grupo de fatores de deterioração. Dessa forma, a estimativa de vida útil mediante ensaios acelerados sempre será parcial, considerando os principais, porém não a totalidade de fenômenos que podem conduzir ao envelhecimento de um material ou componente. Por outro lado, Clifton (1990) menciona que esse tipo de abordagem é especialmente pertinente quando existe uma causa fundamental para a deterioração.

A relação entre as mudanças obtidas através de ensaios acelerados e as mudanças sofridas em condições de serviço é representada por um fator de aceleração. Dessa forma, os resultados obtidos em laboratório são calibrados a partir do acompanhamento do envelhecimento em campo. Cabe ressaltar que as condições de exposição em campo são variadas. Portanto, quando da

especificação de um material para determinado ambiente em particular, sempre cabe avaliar quão próximas estão as condições de agressividade desse ambiente em relação às condições do ensaio de envelhecimento natural, cujos resultados foram utilizados para obter as relações de calibração.

Até o presente estágio de conhecimento não se dispunha de um método que disponibilizasse informações quantitativas a respeito da durabilidade de placas cerâmicas sujeitas ao trânsito de pessoas. Com esse objetivo desenvolveu-se o modelo NORIE-LACER-LOPP.

O trabalho experimental em que se baseia a proposta do referido modelo compreende um estudo de caso e testes realizados em laboratório. Com vistas a otimizar o planejamento, a execução e a análise dos experimentos, permitindo definir os ensaios a serem realizados e estabelecer uma seqüência para o seu desenvolvimento, adotou-se um projeto de experimentos (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Com o objetivo de extrapolar a aplicação do modelo proposto, cujo fator de aceleração estabelece a relação entre as medições realizadas no estudo de campo e os respectivos resultados obtidos em laboratório, para qualquer ambiente, desenvolveram-se as análises apresentadas neste trabalho.

O modelo NORIE-LACER-LOPP

O modelo NORIE-LACER-LOPP tem como objetivo estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados. O modelo proposto refere-se à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas em livre movimento, o qual corresponde ao caminhar sem o efeito de frenagem que costuma estar associado às situações de parada.

Tendo em vista o enfoque de que o término da vida útil é condicionado à percepção de variação no aspecto do revestimento em relação ao seu estado original, o modelo expressa o desgaste a partir de parâmetros relacionados à aparência. Quando da formulação do modelo, estudaram-se as seguintes propriedades: reflexão difusa, através do parâmetro delta E, da curva de reflexão e da observação das variações de cor; reflexão especular, através da curva de reflexão e da observação das variações do brilho; rugosidade média Ra; e rugosidade média Rz. Entre esses parâmetros, a observação visual do brilho mostrou-se a mais sensível em apropriar as variações sofridas pela superfície em decorrência da abrasão (ABITANTE, 2004). Cabe ressaltar que a análise visual deve ser feita em uma câmara-padrão de observação segundo as condições de geometria e luminosidade definidas na norma

ASTM D 4449-90 (Reapproved 1995) (ASTM, 1998a).

Para o desenvolvimento do modelo, monitorou-se o desgaste sofrido por placas cerâmicas em um ambiente real, caracterizando-se as condições de agressividade que conduziram ao dano e, paralelamente, provocou-se o desgaste em laboratório, submetendo-se a um ensaio acelerado amostras extraídas de uma placa idêntica às que compõem o revestimento, pertencente ao mesmo lote, no entanto sem uso. A comparação entre o comportamento em campo e o comportamento em laboratório é expressa através do fator de aceleração.

Com vistas a contemplar em laboratório as principais variáveis que incidem sobre o processo abrasivo, buscou-se selecionar as fundamentais entre as que constituem o sistema tribológico, através da técnica conhecida como pesquisa a especialistas. Esta considera a opinião de profissionais para a seleção de variáveis ou formulação de hipóteses, os quais utilizam seus conhecimentos preexistentes para a tomada de decisão (ABITANTE, 2004). Como resultado, foram selecionadas as seguintes variáveis:

- (a) brilho, cor e limpabilidade, relativas à placa cerâmica;
- (b) carga, relativa ao corpo em movimento sobre a placa; e
- (c) concentração do abrasivo, referente ao material entre a placa e o corpo em movimento.

Com o objetivo de contemplar as variáveis selecionadas, desenvolveu-se um equipamento de abrasão, como mostra a Figura 1, que permite variação da carga e da concentração do abrasivo em contato com as amostras. Dessa forma, pode-se estimar a vida útil em diferentes situações de agressividade, tal qual a diversidade dos ambientes existentes. Na medida em que a severidade do desgaste decorre das condições de agressividade do ambiente, o fator de aceleração é condicionado à definição de índices relativos a essas variáveis, que bem representem, em laboratório, as condições de campo. As condições de agressividade foram desdobradas nos níveis relacionados a seguir. Cabe observar que o material abrasivo constitui-se de farinha de quartzo na forma de barbotina, e sua concentração representa o conteúdo de sólidos. O tempo de ensaio é variável conforme a sensibilidade das amostras em apresentar desgaste perceptível.

- (a) carga: 5N, 10N, 15N, 20N e 25N
- (b) concentração do abrasivo, em massa: 5%, 10%, 15%, 20% e 25%

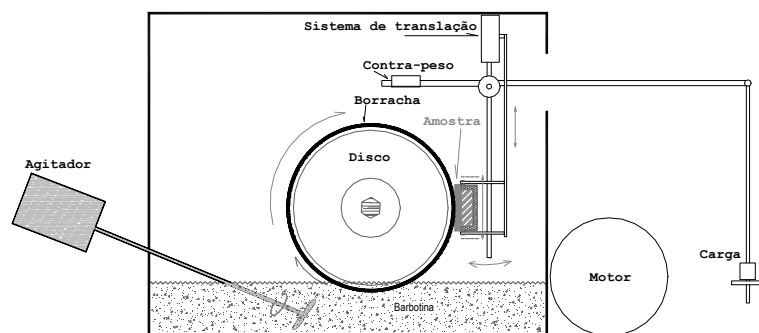


Figura 1 - Representação do equipamento de desgaste utilizado no trabalho

Variável	Nível de agressividade				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ca (N)	5	10	15	20	25
co (%)	5	10	15	20	25

ca: carga

co: concentração de sólidos na barbotina

Tabela 1 - Níveis de agressividade relacionados às variáveis

Aos níveis de carga e concentração do abrasivo são associados valores numéricos que variam de 0,2 a 1,0, como mostra a Tabela 1, os quais foram utilizados na formulação do modelo. O tempo é considerado diretamente em minutos.

O ambiente real em que se baseou o estudo de campo constitui-se em uma lanchonete cujas placas cerâmicas de piso apresentaram evidências de desgaste após poucos anos de utilização (ABITANTE, 2004). As placas cerâmicas visualmente desgastadas encontravam-se dispostas no passeio externo que dá acesso à lanchonete, em duas das três portas destinadas à entrada de clientes: na porta principal e em uma das portas laterais, conforme representado nas Figuras 2 e 3. Para esse ambiente, atribuíram-se os valores de carga e concentração do abrasivo de 25N e 15%, respectivamente, o que corresponde aos índices $ca = 1$ e $co = 0,6$. As placas estudadas correspondem às hachureadas nas referidas figuras.

A definição do índice associado à carga é relativamente simples na medida em que se pode estimar o perfil da população que virá a transitar sobre o piso. A Tabela 1 pode ainda ser expandida para cargas superiores à associada ao estudo de caso. Por exemplo, em um ambiente constituído exclusivamente de adultos, com carga equivalente de 73 kg, o coeficiente associado à carga é 1,2, pois é relativo à carga equivalente do estudo de caso, que corresponde a 61 kg. Esta carga foi obtida analisando-se o perfil da população que frequenta o estabelecimento em termos de sexo e idade, de forma que corresponde ao percentil 50.

No caso da concentração do abrasivo, pode haver maior dificuldade em apropriar seu potencial de

agressividade, dado que, além do conteúdo existente sobre o piso, também é relevante sua composição mineralógica, de forma que a essa decisão poderá estar associada certa subjetividade. O local que constitui o estudo de caso apresenta condições favoráveis à preservação do revestimento, pois tem como padrão a freqüente limpeza do piso com vassoura de tecido, onde pessoas especialmente designadas para tal atividade estão disponíveis. Dessa forma, a sujeira sobre o revestimento é sistematicamente removida. Essa atitude justifica o pequeno conteúdo apropriado nas diferentes ocasiões em que se coletou o material presente sobre o piso. Apesar disso, como a área desgastada localiza-se na parte externa da lanchonete e em região de intensa movimentação urbana, crê-se que a presença de quartzo tenha sido o principal responsável pelo desgaste.

Após a realização dos ensaios em laboratório e medições em campo, procedeu-se à modelagem dos dados com o apoio do software SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*, versão 8.0). Após ajuste dos coeficientes, confirmou-se que a observação do brilho em condições padronizadas constitui-se na variável que melhor representa o desenvolvimento do fenômeno ao longo do tempo (ABITANTE, 2004). Por fim, resultam os modelos descritos nas equações 1 e 2. Estes indicam que a variação do aspecto decorrente do trânsito de pessoas em movimento livre é proporcional, respectivamente, à raiz quadrada do tempo, dado em minutos, e à raiz quadrada do tráfego, dado em milhões de pessoas, conforme indicam as fórmulas abaixo:

$$\Delta Vis = 0,025 \sqrt{t} \quad (1)$$

$$\Delta Vis = 0,218 \sqrt{tr} \quad (2)$$

Onde:

ΔVis : variação do brilho segundo observação visual conforme a ASTM D 4449 (ASTM, 1998b);

tr: tráfego, expresso em milhões de pessoas; e

t: tempo, expresso em minutos.

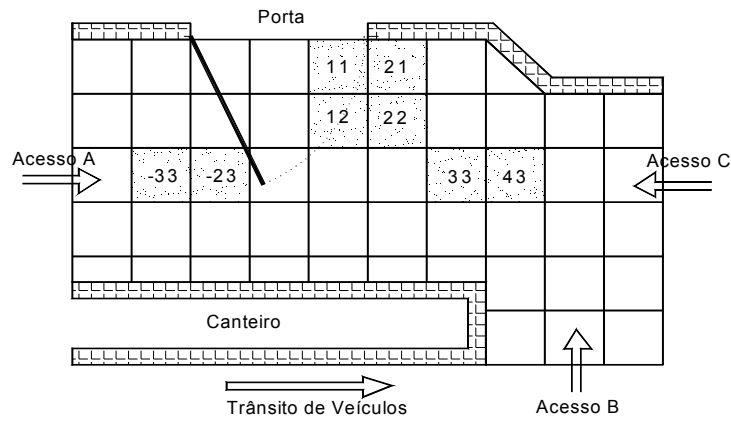


Figura 2 - Situação das placas cerâmicas junto à porta principal, no acesso externo da lançonete objeto do estudo de campo

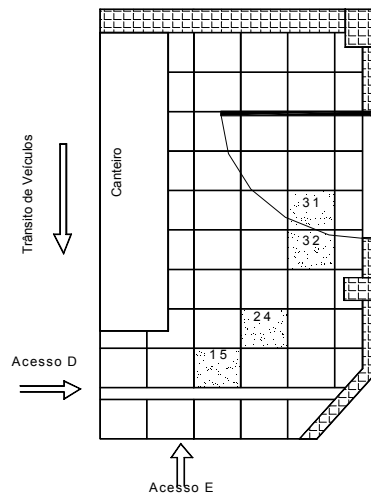


Figura 3 - Situação das placas cerâmicas junto à porta secundária, no acesso externo da lançonete objeto do estudo de campo

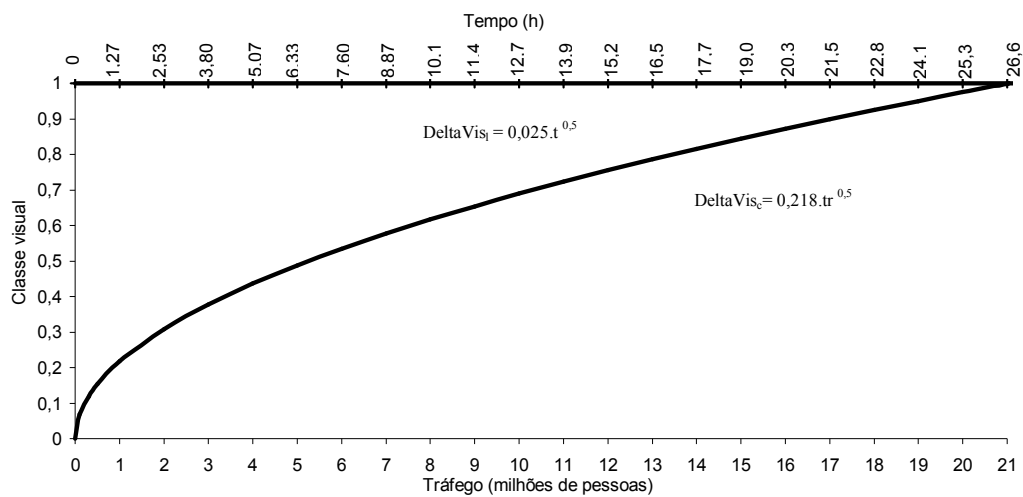


Figura 4 - Representação gráfica dos modelos que descrevem a variação do aspecto em função do tempo de ensaio e do tráfego de pessoas

A Figura 4 contém a representação gráfica da evolução do fenômeno para as placas correspondentes ao estudo de campo.

O fator de aceleração pode ser estimado a partir da igualdade entre as equações que descrevem o comportamento do material em campo e em laboratório, como expressa a equação 3:

$$tr = 0,0132.t \quad (3)$$

Onde:

tr: é o tráfego expresso em milhões de pessoas; e

t: é o tempo em minutos.

Segundo esta equação, um minuto em laboratório corresponde ao tráfego em movimento livre de 0,0132 milhão de pessoas. Alternativamente, utilizando como unidade de tráfego *pessoas*, o fator de aceleração é 13.200, ou seja, um minuto em laboratório corresponde ao tráfego de treze mil e duzentas pessoas. O fator de aceleração permite estimar o comportamento futuro do material cerâmico, em condições reais de utilização, a partir dos resultados obtidos em laboratório, com o equipamento de abrasão desenvolvido.

A relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas, dada pelo fator de aceleração, pode ser extrapolada para outros materiais e ambientes desde que consideradas as condições de agressividade a partir das quais os fatores de aceleração são gerados. Como o valor numérico correspondente ao fator de aceleração engloba ambas as condições de agressividade – carga e concentração do abrasivo –, faz-se necessário um estudo que permita discernir a contribuição de um e outro separadamente e, assim, permitir melhor caracterizar os ambientes reais com relação à sua severidade. Tal estudo é apresentado no capítulo que se segue.

Definição dos expoentes associados à carga e à concentração do abrasivo

O estudo da influência da carga e da concentração do abrasivo sobre a variação de aparência baseou-se em experimentos que contemplam diferentes tipologias de placas cerâmicas. Conforme selecionado pela técnica conhecida como pesquisa a especialistas, referida anteriormente, trabalhou-se com diferentes níveis de cor e brilho. Quanto à cor, procuraram-se os extremos claro e escuro, adotando-se amostras bege e marrom; quanto ao brilho, com os níveis com brilho e sem brilho. Cabe observar que as denominações com brilho e sem brilho são qualitativas e estão associadas a dois dos três níveis propostos pela norma ASTM D 4449, alto brilho e fosco, respectivamente.

O trabalho experimental foi planejado através de um projeto de experimentos (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001) e em uma matriz composta de 72 combinações. Estas se referem ao desdobramento das variáveis: cor em 2 níveis, brilho em 2 níveis, carga em 5 níveis e concentração do abrasivo em 5 níveis, além da presença e ausência de agente manchante. Para a obtenção do número de combinações, adotou-se o Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO). Esse se baseou em dois fatores controláveis: carga e concentração do material abrasivo. Cada combinação envolve três ensaios, realizados em tempos diferentes, uma vez que a evidência da abrasão ocorre após diferentes períodos, conforme a cor e o brilho iniciais da amostra. A ordem de execução dos ensaios foi definida de forma que eles fossem realizados de modo aleatório. Assim, a influência de fatores não controláveis, que acabam por gerar erro sobre os experimentos, distribuiu-se aleatoriamente em todos os resultados.

A Tabela 2 apresenta a representação numérica dos modelos, o coeficiente de determinação (R^2), o erro absoluto médio (*MAE*), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo estudado. O grupo BS corresponde às amostras bege sem brilho; BC, bege com brilho; MS, marrom sem brilho; e MC, marrom com brilho.

Os modelos relativos à participação de agente manchante não são apresentados neste trabalho.

Os quatro grupos estudados apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo para representar a análise visual ante o fenômeno da abrasão. Os modelos resultam em coeficientes de determinação superiores a 0,5 e erros de previsão na faixa de 6% a 17%. Tendo em vista as dificuldades associadas à análise visual de peças cerâmicas, os autores do trabalho consideram esses valores aceitáveis, concluindo que os modelos apresentam um ajuste satisfatório. Os grupos marrom sem brilho e bege com brilho se destacam, pois mostram coeficientes de determinação especialmente bons, de 0,919 e 0,745, respectivamente. Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

A seguir, os modelos apresentados na Tabela 2 foram ajustados no programa estatístico *SPSS*, considerando-se o comportamento identificado através do estudo de caso, no qual a abrasão evolui segundo a raiz quadrada do tempo, conforme mostram as equações 1 e 2, para a condição de movimento livre. Posteriormente, adotaram-se como expoentes para a carga e a concentração do abrasivo os respectivos valores médios obtidos para esses modelos ajustados, quais sejam, 0,6 e 0,5. Por fim, calcularam-se os parâmetros estatísticos associados a esses novos modelos, os quais são apresentados na Tabela 3.

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = 0,122. ca^{0,444}.co^{0,263}.t^{0,38}$	$R^2 = 0,631$
		$MAE = 0,09$
		ER = 14,1%
		SIGN = sim
MS	$f(t) = 0,142. ca^{0,3108}.co^{0,453}.t^{0,449}$	$R^2 = 0,919$
		$MAE = 0,04$
		ER = 6,0%
		SIGN = sim
BC	$f(t) = 0,108 ca^{0,846}.co^{0,568}.t^{0,461}$	$R^2 = 0,745$
		$MAE = 0,08$
		ER = 16,5%
		SIGN = sim
MC	$f(t) = 0,173. ca^{0,495}.co^{0,394}.t^{0,395}$	$R^2 = 0,599$
		$MAE = 0,10$
		ER = 17,5%
		SIGN = sim

Tabela 2 - Modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da análise visual segundo o brilho em função das variáveis carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$\Delta Vis_1 = 0,06017.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,543$
		$MAE = 0,10$
		ER = 23,3%
		SIGN. = sim
BC	$\Delta Vis_1 = 0,0951.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,697$
		$MAE = 0,08$
		ER = 18,0%
		SIGN. = sim
MS	$\Delta Vis_1 = 0,0766.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,847$
		$MAE = 0,07$
		ER = 15,2%
		SIGN. = sim
MC	$\Delta Vis_1 = 0,132.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,563$
		$MAE = 0,10$
		ER = 16,8%
		SIGN. = sim

Tabela 3 - Modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual para os grupos BC, BS, MC e MS

Após o ajuste dos expoentes, todos os modelos permanecem com parâmetros estatísticos considerados aceitáveis pelos autores do trabalho, ou seja, coeficiente de determinação $> 0,5$ e erros $< 25\%$.

Aplicação do modelo aos grupos BS, BC, MS E MC

Substituindo-se, nos modelos apresentados na Tabela 3, as variáveis *ca* e *co*, que representam a carga e a concentração do abrasivo, respectivamente, pelos valores correspondentes

às diferentes condições de agressividade, resultam as matrizes apresentadas no lado esquerdo das Tabelas 4 a 7. Esses valores constituem os coeficientes b_0' , que multiplicados pela raiz quadrada do tempo (medido em minutos) permitem estimar a variação de aspecto decorrente do desgaste em laboratório para cada grupo, como mostra a equação 4.

$$\Delta Vis_l = b_0' \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

Nas Tabelas 4 a 7, à direita, constam os coeficientes relacionados ao tráfego, b_0'' , os quais foram obtidos substituindo-se t por $tr/0,0132$ na equação 4. Resulta que a variação de aspecto decorrente do tráfego de pessoas para cada grupo pode ser estimada pela equação 5. A previsão do comportamento em campo, portanto, para o tráfego em movimento livre, medido em milhões de pessoas, baseia-se no fator de aceleração definido pelo estudo de caso.

$$\Delta Vis_{cl} = b_0'' \cdot \sqrt{tr} \quad (5)$$

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0102	0,0155	0,0198	0,0235	0,0269
0,4	0,0145	0,0220	0,0280	0,0333	0,0381
0,6	0,0177	0,0269	0,0343	0,0408	0,0466
0,8	0,0205	0,0311	0,0396	0,0471	0,0538
1,0	0,0229	0,0347	0,0443	0,0526	0,0602

(a) relacionados ao tempo (b_0')

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,089	0,135	0,173	0,205	0,235
0,4	0,126	0,191	0,244	0,290	0,332
0,6	0,155	0,234	0,299	0,355	0,406
0,8	0,179	0,271	0,345	0,410	0,469
1,0	0,200	0,303	0,386	0,459	0,525

(b) relacionados ao tráfego (b_0'')

Tabela 4 - Coeficientes para o grupo BS

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0162	0,0245	0,0313	0,0372	0,0425
0,4	0,0229	0,0347	0,0443	0,0526	0,0601
0,6	0,0280	0,0425	0,0542	0,0644	0,0737
0,8	0,0324	0,0491	0,0626	0,0744	0,0851
1,0	0,0362	0,0549	0,0700	0,0832	0,0951

(a) relacionados ao tempo (b_0')

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,141	0,214	0,273	0,324	0,371
0,4	0,200	0,303	0,386	0,459	0,524
0,6	0,245	0,371	0,473	0,562	0,642
0,8	0,282	0,428	0,546	0,649	0,742
1,0	0,316	0,478	0,610	0,7252	0,829

(b) relacionados ao tráfego (b_0'')

Tabela 5 - Coeficientes para o grupo BC

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0130	0,0198	0,0252	0,0300	0,0343
0,4	0,0184	0,0280	0,0357	0,0424	0,0484
0,6	0,0226	0,0342	0,0437	0,0519	0,0593
0,8	0,0261	0,0395	0,0504	0,0599	0,0685
1,0	0,0292	0,0442	0,0564	0,0670	0,0766

(a) relacionados ao tempo (b_0')

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,114	0,172	0,220	0,261	0,299
0,4	0,161	0,244	0,311	0,369	0,422
0,6	0,197	0,299	0,381	0,452	0,517
0,8	0,227	0,345	0,440	0,522	0,597
1,0	0,254	0,385	0,492	0,584	0,668

(b) relacionados ao tráfego (b_0'')

Tabela 6 - Coeficientes para o grupo MS

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0225	0,0341	0,0434	0,0516	0,0590
0,4	0,0318	0,0482	0,0614	0,0730	0,0835
0,6	0,0389	0,0590	0,0753	0,0894	0,1022
0,8	0,0450	0,0681	0,0869	0,1033	0,1181
1,0	0,0503	0,0762	0,0972	0,1155	0,1320

(a) relacionados ao tempo (b_0')

Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,196	0,297	0,379	0,450	0,515
0,4	0,277	0,420	0,536	0,637	0,728
0,6	0,339	0,514	0,656	0,780	0,891
0,8	0,392	0,594	0,758	0,900	1,029
1,0	0,438	0,664	0,847	1,007	1,15

(b) relacionados ao tráfego (b_0'')

Tabela 7 - Coeficientes para o grupo MC

Comparando-se o comportamento das placas correspondentes ao estudo de caso e das placas pertencentes aos grupos estudados, percebe-se significativa diferença entre os materiais. A Figura 5 ilustra a evolução do desgaste para a condição de agressividade representada pela carga de 25 N ($ca = 1$) e concentração do abrasivo de 15% ($co = 0,6$). Por exemplo, após 60 min de ensaio ou a passagem de 792.000 pessoas, espera-se que as placas pertencentes ao estudo de caso atinjam a classe visual 0,19, enquanto as placas pertencentes aos grupos BS, MS, BC e MC sofrem maior desgaste, alcançando, respectivamente, as classes visuais 0,36, 0,46, 0,57 e 0,79.

Aplicação do modelo a outras tipologias

A estimativa de vida útil de qualquer tipologia de placa cerâmica esmaltada pode ser feita utilizando-se do equipamento desenvolvido neste trabalho em conjunto com um painel de referência que estabelece as classes visuais.

Para ambientes cujas condições de agressividade são idênticas às que caracterizam o estudo de caso, representadas por $ca = 1$ e $co = 0,6$, pode-se estimar o tráfego associado a qualquer tempo de ensaio, para qualquer placa cerâmica, pela equação $tr = 0,0132 \cdot t$, onde tr é dado em milhões de pessoas e t em minutos de ensaio em laboratório.

Para exemplificar, um material que, ao término de 15 min de ensaio, resulte na classe visual 0,5 deverá apresentar essa mesma classificação visual, ou seja, mesma aparência, após o tráfego de 198.000 pessoas em livre movimento sob condições reais de utilização. Para encontrar o valor de tráfego, basta substituir t por 15 na equação 3.

Também se pode utilizar a Figura 6 para obter a mesma informação. Basta plotar a classe visual e o tempo de ensaio e ler o tráfego correspondente. O comportamento do material ao longo do tempo pode ser extraído substituindo-se ΔVis_i por 0,5 e t por 15, o que resulta em $b_0' = 0,129$. Assim, o comportamento

desse material pode ser representado numericamente conforme a equação 6 e, graficamente, pelo traçado da respectiva curva. Na Figura 6, esta se posicionaria acima da curva correspondente ao grupo MC, mostrando ser, entre os materiais em questão, o mais sensível ao desgaste.

$$\Delta Vis_i = 0,129 \cdot \sqrt{t} \quad (6)$$

Quando os materiais são submetidos a outros níveis de severidade, ou seja, a condições de agressividade que diferem daquelas definidas para o estudo de caso, faz-se necessário o ajuste dos coeficientes de aceleração. Para tanto, há de se analisar o potencial de agressividade do novo ambiente comparativamente, tomando-se como referência o estudo de caso, e atribuir à carga e à concentração do abrasivo índices que bem representem os novos níveis de agressão.

A equação 7 mostra o coeficiente b_0^* , que considera o nível de agressividade de um ambiente qualquer em relação à condição de referência. Substituindo-se os valores de referência, correspondentes a $ca = 1$ e $co = 0,6$, resulta a equação 8.

$$b_0^* = ca^{0,6} \cdot co^{0,5} / (ca^{0,6} \cdot co^{0,5})_{ref.} \quad (7)$$

$$b_0' = 1,29 \cdot ca^{0,6} \cdot co^{0,5} \quad (8)$$

Os coeficientes b_0^* , resultantes do produto das diversas combinações entre ca e co , calculados a partir da equação 8, são mostrados na Tabela 8.

A estimativa do tráfego associado a qualquer tempo de ensaio pode ser feita através da equação 9. Nesta, o fator de aceleração para a condição de referência, que corresponde a 0,0132, é ajustado para outros ambientes através do coeficiente b_0' , de forma que $fa' = 0,0132 \cdot b_0'$.

$$tr = fa' \cdot t \quad (9)$$

Onde :

fa' : fator de aceleração ajustado;

t : tempo de ensaio, em minutos; e

tr : estimativa de tráfego, em milhões de pessoas.

A Tabela 9 mostra os valores de fa' correspondentes aos níveis de carga e concentração do abrasivo considerados neste trabalho.

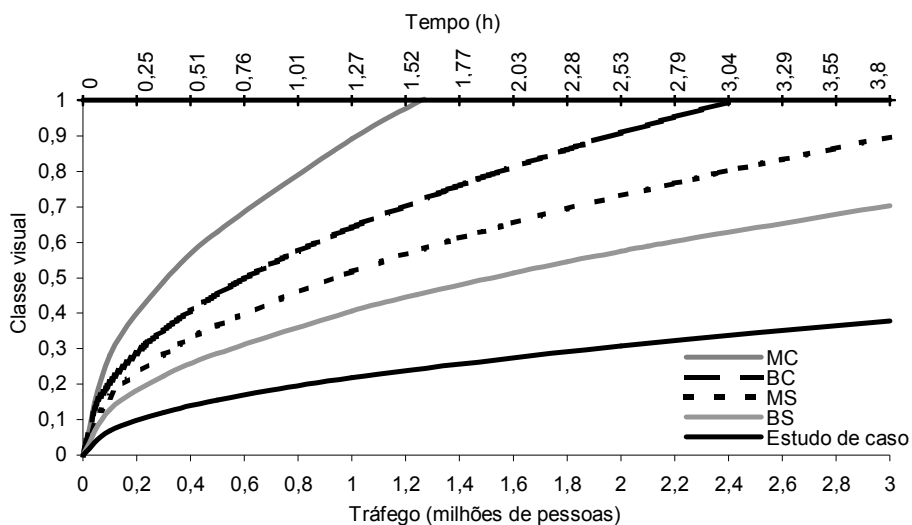


Figura 5 - Representação gráfica do comportamento das placas que compõem o estudo de caso e os grupos BS, MS, BC e MC quando submetidas ao desgaste em laboratório ou sob o tráfego de pessoas em livre movimento

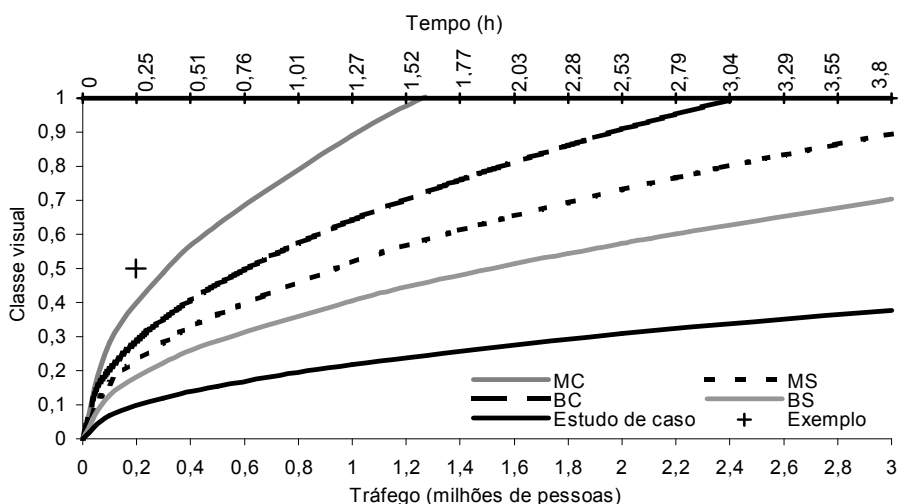


Figura 6 - Representação gráfica do comportamento das placas que compõem o estudo de caso dos grupos BS, MS, BC e MC e de um material hipotético quando submetidos ao desgaste em laboratório ou sob o tráfego de pessoas em livre movimento

co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,22	0,333	0,425	0,5047	0,577
0,4	0,3107	0,471	0,6006	0,714	0,816
0,6	0,3805	0,577	0,736	0,874	1
0,8	0,439	0,666	0,849	1,0095	1,15
1,0	0,491	0,745	0,95	1,13	1,29

Tabela 8 - Coeficientes b_0^* , indicando as condições relativas de agressividade associadas à carga e à concentração do abrasivo

co	ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0029	0,0044	0,0056	0,0067	0,0076
0,4	0,0041	0,0062	0,0079	0,0094	0,0108
0,6	0,0050	0,0076	0,0097	0,0115	0,0132
0,8	0,0058	0,0088	0,0112	0,0133	0,0152
1,0	0,0065	0,0098	0,0125	0,0149	0,0170

Tabela 9 - Fator de aceleração ajustado (fa')

Para ilustrar, considerado-se um ambiente cujas condições de agressividade são representadas por $ca = 0,8$ e $co = 0,6$. Supondo que, em laboratório, um material cerâmico denominado X resulte, após 45 min de ensaio, na classe visual 0,3, estima-se que, quando submetido ao tráfego, esse material alcançará essa mesma classe visual, ou seja, mesma variação de aparência, após a passagem de 517.500 pessoas, pois $tr = 0,0115 \times 45 = 0,5175$ milhões de pessoas.

A representação gráfica que descreve o comportamento desse material pode ser obtida atribuindo-se valores para t na equação 10. Esta equação resulta da substituição de t por 15 e ΔVis_t por 0,3, o que permite encontrar o valor de b_0' correspondente a essa placa na situação de agressividade indicada.

$$\Delta Vis_t = 0,0447 \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

Para encontrar o comportamento desse material em qualquer outra condição de agressividade, denominada y , basta desmembrar o coeficiente que corresponde à situação de agressividade $ca = 0,8$ e $co = 0,6$, vinculando-o à condição padrão, conforme expressa a equação 11.

$$b_0'_{placa X na cond. agres. y} = b_0'_{placa X na cond. padrão} \cdot b_0^*_{ref. cond. agres. y} \quad (11)$$

Para o exemplo proposto, resulta:

$$0,0447 = b_0'_{placa X na cond. padrão} \cdot 0,874$$

$$b_0'_{placa X na cond. padrão} = 0,0511$$

O comportamento desse material X na condição padrão é descrito pela equação 12.

$$\Delta Vis_t = 0,0511 \cdot \sqrt{t} \quad (12)$$

Para qualquer outra condição de agressividade, basta multiplicar pelo coeficiente b_0^* , como mostra a equação 13.

$$\Delta Vis_t = 0,0511 \cdot b_0^* \cdot \sqrt{t} \quad (13)$$

Considerações finais

Neste trabalho, procurou-se mostrar a viabilidade de estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas submetidas à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas através de um modelo matemático. Este foi desenvolvido a partir da caracterização das condições de agressividade e das respectivas análises visuais encontradas em um ambiente real, cujas placas sofreram desgaste, comparativamente aos resultados obtidos em laboratório, a partir de ensaios acelerados.

Para ambientes cujas condições de agressividade são similares às que caracterizam o estudo de caso, representadas por $ca = 1$ e $co = 0,6$, pode-se estimar o tráfego associado a qualquer tempo de ensaio, para qualquer placa cerâmica, através da equação $tr = 0,0132 \cdot t$. Para essas condições, as placas pertencentes aos grupos bege sem brilho, marrom sem brilho, bege com brilho e marrom com brilho tendem a revelar desgaste gradativamente maior em comparação ao material que compõe o estudo de caso.

Em ambientes cujas condições de agressividade diferem daquelas relativas ao estudo de caso, é necessário ajustar o fator de aceleração de referência, que corresponde a 0,0132, adequando-o aos níveis de severidade do novo ambiente. Para tanto, consideram-se os coeficientes de carga (ca) e concentração do abrasivo (co) relativos, tomando-se como padrão os coeficientes associados ao estudo de caso.

Cabe ressaltar que, para atribuir determinada classe visual às amostras desgastadas, deve-se considerar os padrões visuais associados ao desgaste definidos neste trabalho. Para tanto, há de se utilizar a câmara de observação relativa às diferenças de brilho proposta na norma ASTM 4449 e um painel de referência que estabelece a relação entre a aparência e os respectivos valores numéricos, na escala de 0 a 1.

Espera-se que os resultados apresentados neste trabalho possam contribuir no desenvolvimento tecnológico do setor cerâmico na medida em que permitem inferir sobre o comportamento futuro dos materiais. Dessa maneira, a indústria e institutos de pesquisa poderão utilizar as informações relativas à vida útil tanto ao nível de desenvolvimento de produto quanto disponibilizá-las para o mercado.

Referências

ABITANTE, A. L. R. **Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados**. 2004. 257 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2004.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. In: Annual book of ASTM standards. **ASTM D 4449-90**: standard test method for visual evaluation of gloss differences between surfaces of similar appearance (Reapproved 1995). Philadelphia, 1998a. p. 506-510.

_____. In: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. **ASTM E 632-82**: standard practice for developing accelerated teste to aid prediction of the service life of building components and materials (Reapproved 1996). Philadelphia, 1998b. p. 298-303.

BARBERA, J. et al. Durability prediction of ceramic tile subject abrasion processes from pedestrian traffic. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, 4. **Proceedings...** Qualicer 96, Castellón (Espanha), 1996. p. 453-468.

CLIFTON, J. R. Methods for predicting the service life of concrete. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS INTERNATIONAL CONFERENCE, 5. **Proceedings...** Building Research Establishment. Brighton, 1990. p. 361-374.

DIAS, L. L.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. Efecto de la presencia de cristales sobre la resistència al desgaste de vidriados. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, 6. **Proceedings...** Qualicer 2000, Castellón (Espanha), 2000. p. 17-25.

ENRIQUE, J. E.; FELÍU, C.; SILVA, G. Relación producto-uso. **Técnica Cerámica**, n. 241, p. 147-154, 1996.

FEIJÃO, J. F. M. et al. Estudo do mecanismo a abrasão de pavimentos cerâmicos utilizando a técnica esclerométrica. **Cerâmica**, v. 42, n. 275, p. 205-208, 1996.

FELÍU, C.; IBÁÑEZ, M. J.; MORENO, A.; CARCELLER, J. V. Analisis de algunos factores relacionados con la degradación por abrasión de baldosas cerámicas esmaltadas. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, 1. **Proceedings...** Qualicer 1990, Castellón (Espanha), 1990. p. 345-356.

IBÁÑEZ, M. J. G. **Estudio de las propiedades mecánicas y superficiales de recubrimientos vidriados de piezas cerámicas**: puesta a punto de nuevas técnicas de medida. 1998. 243 f. Tese (Doutorado) – Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales, Universitat Jaume I, Castellón, Espanha, 1998.

LORICI, L.; BRESCIANI, A. Analisis practica de la influencia de la resistencia al desgaste de los materiales cerámicos en relación a su destinación de uso. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, 1. **Proceedings...** Qualicer 90, Castellón (Espanha), 1990.

NAVARRO, J. E. Requisitos técnicos de baldosas cerámicas para usos concretos. **Cerámica Información**, n. 232, p. 3-13, jul./ago. 1997.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. S. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001.

SIMIOLI, M. L. Il metodo PEI si allarga. **Ceramic World Review**, n. 3, p. 46-51, 1992.

WALTERS, P. A.; HARRISON, R. The PEI abrasion test and the classification of glazed floor tiles. **Ceram Research**, RP 741, 1986.