

Ensaio de Laboratório e Medições em Campo Visando a Estimativa da Vida Útil de Placas Cerâmicas Esmaltadas Solicitadas por Abrasão

Ana Luiza Raabe Abitante^{a*}, Carlos Pérez Bergmann^a, José Luis Duarte Ribeiro^b

^aPrograma de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

^bLaboratório de Otimização de Produtos e de Processos, LOPP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

*e-mail: aabitante@cpgec.ufrgs.br

Resumo: Este trabalho analisa o comportamento em campo de placas cerâmicas esmaltadas, desgastadas em condições reais de utilização, sob o tráfego de pessoas, e o comportamento em laboratório, após desgaste em equipamento de abrasão. A partir de variáveis de resposta relacionadas à aparência do material, é selecionada a avaliação visual como aquela que oferece melhor resposta para a estimativa de vida útil, permitindo a definição de um coeficiente de aceleração.

Palavras-chave: abrasão, vida útil, placas cerâmicas

1. Introdução

Considerando-se que o desempenho de um material em condições reais de utilização pode ser estimado através do desempenho em laboratório, o presente trabalho busca definir um fator de aceleração que permita relacionar os resultados que expressam o comportamento de placas cerâmicas esmaltadas do ponto de vista da abrasão em campo e em laboratório. Como premissa básica, deve haver correspondência entre o mecanismo de desgaste sob o tráfego de pessoas e o provocado em condições de laboratório. Esta correspondência é avaliada a partir dos parâmetros estatísticos associados aos resultados de campo e de laboratório.

2. Estudo de Campo

O estudo de campo foi desenvolvido em uma lanchonete inaugurada em julho de 1993, cujas placas de revestimentos do piso vieram a apresentar indícios de desgaste após poucos anos de utilização.

2.1. Caracterização do ambiente

As placas cerâmicas visualmente desgastadas encontravam-se dispostas no acesso externo 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 1 e 2. As placas apresentam dimensões 295 × 295 mm² e são declaradas pelo fabricante como PEI V na cor areia.

A região imediatamente anterior às portas apresenta condições de elevada agressividade por dois motivos básicos:

- as portas não são dotadas de abertura automática, portanto, as pessoas interrompem seu movimento de trânsito livre para entrar no ambiente, o que implica em um efeito de frenagem. Cabe observar que, ao efeito de frenagem, é acrescido o giro dos pés quando o tráfego dos acessos A e C mudam de direção;
- as pessoas provenientes de diferentes direções acabam por concentrarem-se na região imediatamente anterior às portas para entrar no ambiente. Quando no seu interior, se dispersam, o que implica em uma diluição do efeito da carga e da quantidade de material abrasivo associado, ou seja, redução das solicitações.

Ambas as situações parecem gerar sobre o piso um esforço acentuado, de tal ordem que permita explicar porquê o desgaste foi observado nestas regiões e não em outras do mesmo ambiente. Assim, o trabalho está estruturado de forma a contemplar os seguintes efeitos:

- relacionado à frenagem, cuja ação de desgaste é considerada através das placas identificadas na Figura 1 pelas coordenadas 11, 12, 21 e 22 para a porta principal e, na Figura 2, pelas coordenadas 31 e 32 para a porta secundária;
- relacionado ao trânsito livre, cujo desgaste é avaliado através das placas identificadas na Figura 1 pelas coordenadas - 33, - 23, 33 e 43 para a porta principal e, na Figura 2, pelas coordenadas 24 e 15 para a porta secundária.

2.2. Identificação das trajetórias

Para cada uma das direções que compõem os acessos que as pessoas podem assumir para entrar na lanchonete, procurou-se identificar o número de trajetórias e quais as porções das placas que acabam por formar estes caminhos preferenciais. Esta identificação foi feita por observação local.

Efetivamente, os passos das pessoas não ocupam exatamente a totalidade de cada placa, mas porções bem definidas das mesmas. Para a porta principal, como mostra a Figura 3, as pessoas vindas do acesso A tendem a assumir 3 rotas diferentes, denominadas 1, 2 e 3. O acesso frontal tende a caracterizar duas trajetórias, denominadas b' e b". Interessante observar que o acesso C configura uma situação bastante regular. Praticamente a totalidade das pessoas vindas desta direção descreve a mesma trajetória.

A Figura 4 mostra as configurações assumidas pelas pessoas provenientes dos acessos D e E relativas à porta secundária.

2.3. Identificação dos segmentos associados às trajetórias

No presente estudo, optou-se por subdividir cada placa cerâmica em 25 janelas de medição, sendo as medições realizadas no centro das áreas resultantes, conforme a Figura 5. A definição desta amostragem baseou-se nos critérios da ASTM D 523, na qual uma

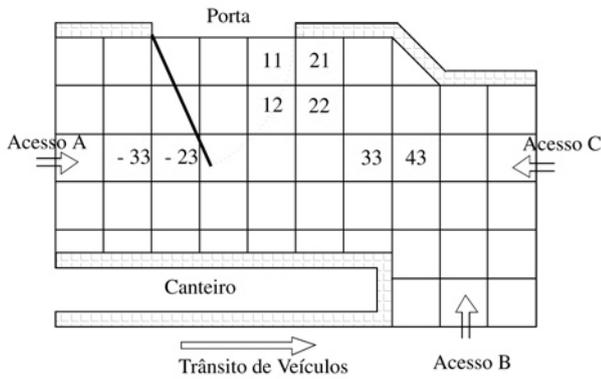


Figura 1. Situação das placas cerâmicas junto à porta principal, no acesso externo da lançonete objeto do estudo de campo.

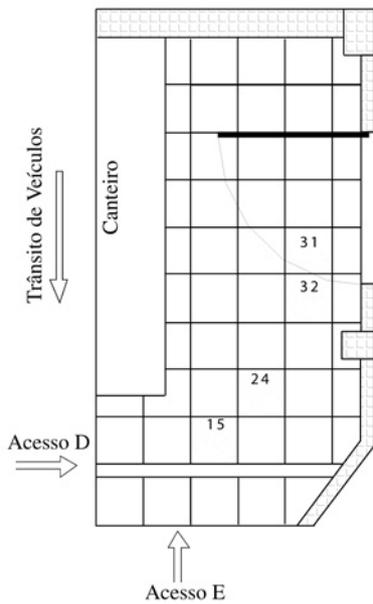


Figura 2. Situação das placas cerâmicas junto à porta secundária, no acesso externo da lançonete objeto do estudo de campo.

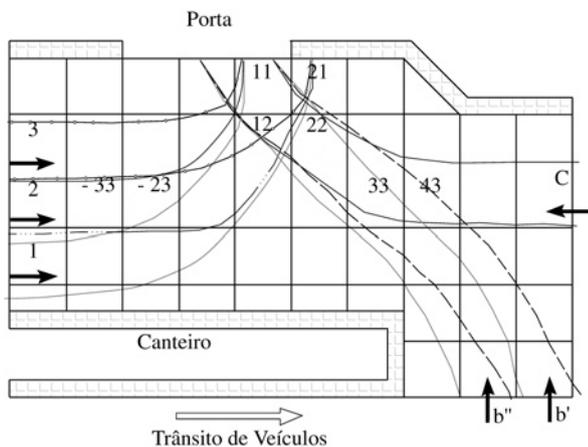


Figura 3. Trajetórias preferenciais que levam à porta principal da lançonete.

placa $30 \times 30 \text{ cm}^2$ deve ter suas propriedades quantificadas em, no mínimo, 8 regiões, cada uma das quais com três leituras. Dessa forma, bastariam 24 medidas.

A seguir, associou-se graficamente as trajetórias aos 25 segmen-

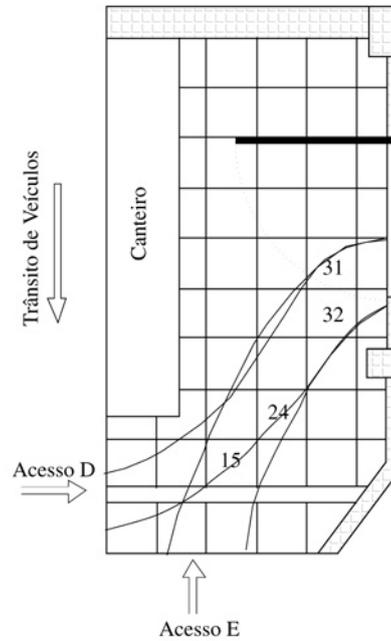


Figura 4. Trajetórias preferenciais que levam à porta secundária da lançonete.

A1	B1	C1	D1	E1
A2	B2	C2	D2	E2
A3	B3	C3	D3	E3
A4	B4	C4	D4	E4
A5	B5	C5	D5	E5

Figura 5. Subdivisão das placas cerâmicas em 25 regiões para avaliação em campo.

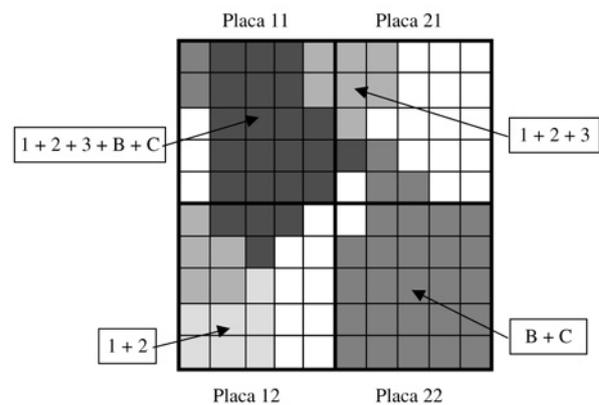


Figura 6. Segmentos das placas cerâmicas sujeitos à frenagem associados às trajetórias de acesso à porta principal da lançonete.

tos que formam cada placa em estudo. Como resultado, se obtêm as configurações representadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente, para as situações de frenagem e livre movimento, relativas à porta principal. Quando há sobreposição dos tráfegos de b' e b'' , este é denominado B.

Os segmentos isentos de cor não foram incluídos no estudo, pois recebem individualmente diferentes trajetórias, de forma que o conjunto destes pontos não configura o mesmo somatório de tráfego. Em outras situações, os pontos brancos não constituem um caminho preferencial.

A Figura 8 mostra os segmentos associados a cada trajetória relativos à porta secundária para as situações de livre movimento (à esquerda) e frenagem (à direita).

2.4. Cálculo do tráfego

Normalmente, a definição de vida útil induz a consideração da variável tempo. Ao tratar-se de revestimentos de piso, todavia, o tempo não é tão representativo quanto o número de pessoas que circulam sobre o mesmo.

O cálculo do tráfego baseia-se no número de *tickets* emitidos pelo estabelecimento em estudo, o qual foi arquivado pela empresa que administra a lanchonete para todo o período de funcionamento, à exceção de agosto de 1993 a dezembro de 1994. Para este período, os dados foram estimados a partir dos valores extremos, que correspondem a julho de 1993, mês de inauguração da loja, e janeiro de 1995. Concebeu-se a distribuição de forma não linear, respeitando as variações inerentes a cada mês, conforme características dos anos seguintes.

A transformação do número de *tickets* em tráfego baseia-se em índices estatísticos calculados periodicamente pela empresa, dentre os quais destaca-se o número de pessoas que entra na lanchonete para cada pedido feito, o perfil dos clientes em termos de sexo e faixa etária, o consumo por hora e por dia da semana, a relação entre os pedidos realizados em balcão e no *drive-thru*, o percentual de pessoas que entra pela porta principal em relação às portas secundárias.

O consumo através do *drive-thru* representa 40% do total de *tickets* e, em balcão, 60%. Esta última proporção compreende as pessoas que efetivamente transitam sobre o revestimento, as quais têm disponíveis três portas de acesso. Conforme dados da empresa, 97% destes 60% corresponde a pessoas que entram pela porta principal e os demais 3%, pelas outras duas portas. A partir dos dados disponíveis, o número de clientes que passou pela porta principal até dezembro de 2000 corresponde a 16.388.148 pessoas, e até novembro de 2002, a 21.957.070 pessoas.

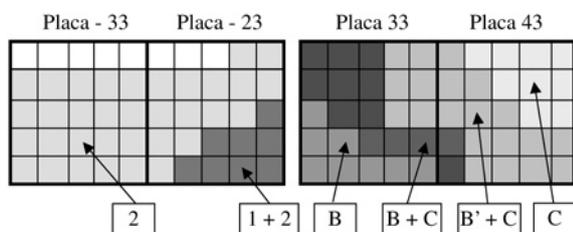


Figura 7. Segmentos das placas cerâmicas sujeitas ao livre movimento junto à porta principal, associados às trajetórias do acesso A (à esquerda) e acessos B e C (à direita).

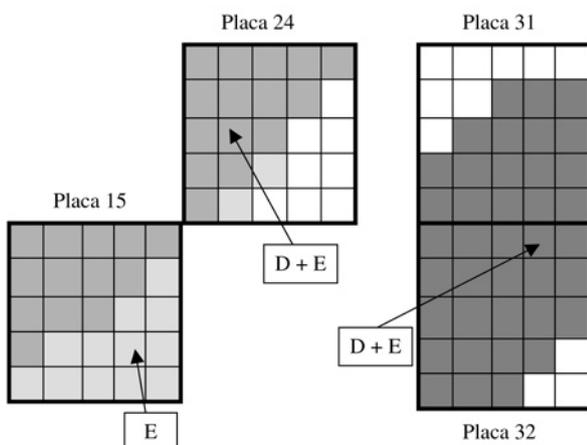


Figura 8. Segmentos das placas cerâmicas sujeitas ao livre movimento (à esquerda) e à frenagem (à direita) da porta secundária, associados às trajetórias dos acessos D e E.

A contagem de tráfego precisou ser realizada dadas as seguintes necessidades:

- separação dos percentuais correspondentes às 2 portas secundárias em relação aos 3%;
- identificação do tráfego associado aos funcionários, a ser acrescido ao tráfego de clientes;
- identificação da proporção de tráfego que corresponde aos acessos A, B e C da porta principal.

Realizou-se a contagem de tráfego em dias da semana de movimento médio, quartas e quintas-feiras, e em horários de movimento médio, das 16 horas às 20 horas.

A seguir, relacionam-se as premissas consideradas na contagem de tráfego:

- todas as pessoas que entram por uma porta saem pela mesma, de forma que na contagem de tráfego apenas as pessoas que entravam eram computadas;
- a circulação de funcionários de limpeza e segurança está associada ao movimento interno do estabelecimento, portanto, são acrescidos ao tráfego de clientes através de um índice percentual, determinado na contagem de tráfego;
- o tráfego consiste em duas vezes a quantidade de pessoas, pois considera a entrada e a saída das mesmas.

A partir dos percentuais identificados na contagem de tráfego para as diferentes trajetórias e do número de clientes que passou pela porta principal até os anos de 2000 e 2002, calculou-se os dados mostrados na Tabela 1. A necessidade de quantificar o tráfego para diferentes períodos deve-se às medições em campo, que foram realizadas em dois momentos: dezembro de 2000 para as placas 11, 12, 21 e 22 e, novembro de 2002 para as demais.

O tráfego associado aos segmentos é obtido agrupando-se os dados apresentados na Tabela 1, conforme mostram as Tabelas 2 e 3 para a porta principal, respectivamente para as condições de frenagem e livre movimento. Para a condição de frenagem, observou-se que aproximadamente 50% dos funcionários passam de um lado para o outro do passeio e não entram no estabelecimento, portanto, apenas os demais 50% se sobrepõem ao tráfego de clientes.

A porta secundária, além de contar com parte do trânsito de clientes, caracteriza-se como porta de serviço: de utilização dos funcionários para troca de turnos, treinamentos e descanso. Esta porta recebe também o tráfego associado à entrega de lanches nos carros, por parte dos funcionários. Esta situação ocorre quando não há lanche para pronta-entrega no *drive-thru* ou, quando há demasiada fila nos horários de pico, o que ocasiona sobrecarga de pedidos. Conforme apropriado pela empresa, tais situações representam aproximadamente 30% dos pedidos realizados no sistema *drive-thru*. Observou-se com frequência, no entanto, a entrega de dois ou três pedidos simultaneamente, na mesma saída do funcionário. Dessa forma, considerou-se que o tráfego relativo à entrega de lanches consiste em 2/3 dos referidos 30%. Este tráfego é ainda multiplicado por dois a fim de computar a entrada e saída do funcionário. A Tabela 4 contém o tráfego para a porta secundária, já associado às trajetórias.

3. Estudo de Laboratório

O estudo em laboratório consiste em submeter a um ensaio abrasivo amostras extraídas de uma placa cerâmica idêntica às que compõem o revestimento da lanchonete, pertencente ao mesmo lote, no entanto, sem uso. Os testemunhos apresentam largura de $40,5 \pm 0,5$ mm e altura de $55,0 \pm 0,5$ mm, desprezando-se, no corte, os 20 mm mais externos de cada lado da placa original.

3.1. O equipamento

O equipamento de abrasão foi desenvolvido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Escola de Engenharia da UFRGS (LACER) a partir das seguintes condicionantes:

Tabela 2. Tráfego estimado correspondente às trajetórias de frenagem relativas à porta principal de acesso à lanchonete.

Dados	Trajetórias de frenagem			
	1 + 2	1 + 2 + 3	B + C	1 + 2 + 3 + B + C
Pessoas até 2000	7.957.662	9.088.237	9.531.028	18.619.264

Tabela 3. Tráfego estimado correspondente às trajetórias de livre movimento relativas à porta principal de acesso à lanchonete.

Dados	Trajetórias de movimento livre					
	2	1 + 2	B	C	B + C	B' + C
Pessoas até 2002	6.636.239	11.934.922	9.717.293	4.689.371	14.406.664	6.632.829

Tabela 4. Tráfego estimado correspondente às trajetórias da porta secundária de acesso à lanchonete.

Dados	Trajetórias frenagem e livre movimentação	
	E	D + E
Pessoas até 2002	3.213.579	3.746.317

A amostra entra em contato com o material abrasivo através do próprio giro do disco, onde a borracha conduz por arraste um filme contínuo de barbotina que se encontra em uma bacia de contenção.

O desgaste da borracha que reveste o disco em contato com a cerâmica foi avaliado através de uma série de ensaios, utilizando-se a carga máxima, com três repetições. Não foram verificadas variações significativas entre os resultados até o prazo de 4 horas e 30 minutos. Após este período não foram prosseguidos os experimentos, adotando-se como prazo máximo para a troca da borracha o período de 4 horas de ensaio.

3.2. O material abrasivo

A seleção de um material para atuar como agente abrasivo, baseou-se nas seguintes premissas básicas:

- facilidade de obtenção, de forma a permitir a reprodução do ensaio em outras localidades;
- distribuir-se homogêneo sobre a superfície cerâmica, verificável através da uniformidade da região desgastada;
- manter-se constante em termos de concentração em contato com a amostra na medida em que se desenvolve o ensaio;
- não atuar quimicamente sobre o esmalte cerâmico, de modo a afetar de alguma forma os resultados de desgaste;
- incidir em desgaste moderado da borracha que reveste o disco em contato com a amostra quando se trabalha com a carga máxima de ensaio.

Na medida em que se procurou atender as premissas estabelecidas, a seleção de um agente abrasivo eficiente tornou-se um processo iterativo. Este estudo conduziu a mudanças importantes na concepção do ensaio, a tal ponto que o material abrasivo concebido inicialmente na forma de pó acabou por ser utilizado na forma de barbotina. Como vantagem, a barbotina permite variar amplamente a concentração do agente abrasivo, avaliando-se a influência deste aspecto no processo de desgaste, e assim, representar diferentes ambientes, com condições variáveis de agressividade.

Após o estudo de cinco materiais alternativos, optou-se pela utilização de farinha de quartzo. A distribuição granulométrica desse material foi determinada com o granulômetro Cilas 1180, onde o diâmetro médio e diâmetro máximo para alguns percentuais são apresentados na Tabela 5.

Tendo em vista a manutenção da concentração dos sólidos que atuam como abrasivo entre a placa e o disco, estudou-se a dispersão

Tabela 5. Parâmetros da distribuição granulométrica da farinha de quartzo utilizada como abrasivo nos ensaios de desgaste.

Parâmetros	Diâmetro (µm)
máximo para 10% das partículas	0,74
máximo para 50% das partículas	2,43
máximo para 90% das partículas	6,95
médio	3,28

do quartzo na mistura. Este estudo iniciou pela consideração de diferentes alternativas, adotando-se ao final, o silicato de sódio na proporção de 2%. Simultaneamente, conta-se com a agitação da barbotina através de uma hélice presa a um agitador posicionado lateralmente à caixa metálica que compõem a bacia de contenção, conforme pode ser visto à esquerda da Figura 9, a qual permanece acionada durante todo o período de ensaio.

3.3. As variáveis de estudo

A seleção das variáveis a serem contempladas no estudo de laboratório baseou-se na técnica conhecida como pesquisa a especialistas, que considera a opinião de profissionais para a seleção de variáveis ou formulação de hipóteses. Estes utilizam seus conhecimentos pré-existentes e estabelecem uma hierarquia, dentre as variáveis apresentadas, de acordo com a influência que exercem sobre determinado fenômeno.

Esta pesquisa foi realizada tendo em vista um estudo mais abrangente do fenômeno, não apresentado neste trabalho. Das variáveis que definem o sistema tribológico relacionado ao tráfego de pessoas, inferiu-se a respeito de quais seriam as mais influentes sobre a percepção da abrasão. Como resultado, selecionou-se as variáveis: brilho, cor e limpabilidade, relativas ao material cerâmico; carga, relativa ao corpo em movimento e concentração do abrasivo, referente ao material intermediário.

No presente estudo, como a placa cerâmica não se constitui em uma variável, pois corresponde àquela definida no estudo de campo, as variáveis de laboratório consistem na carga e concentração de abrasivo a serem utilizados no ensaio. Para a definição destas, procedeu-se à caracterização do perfil da população de clientes e funcionários que frequenta o estabelecimento e à caracterização do material particulado presente sobre o revestimento. Para este último, determinou-se a composição granulométrica e mineralógica a partir de amostras coletadas em três situações independentes.

Conforme projeto de experimentos realizado segundo (RIBEIRO e ten CATEN, 2001), as condições de agressividade correspondentes ao estudo de campo foram associadas a níveis alto e intermediário, respectivamente, para a condição de laboratório, à carga de 25 N e à concentração do abrasivo de 15%. Os tempos de ensaio foram

arbitrados em 4, 14, 45, 90, 145 e 356 minutos. Cabe observar que o equipamento permite contemplar diversos ambientes, cujas condições de agressividade diferem destas definidas para o estudo de campo.

4. Variáveis de Resposta

As variáveis de resposta, através das quais se busca quantificar o fenômeno da abrasão, seja provocado pelo tráfego de pessoas, seja pelo equipamento em laboratório, estão associadas às características e propriedades do material cerâmico que intervêm na percepção do desgaste. O enfoque, portanto, refere-se à preservação da aparência do material.

Considerando-se a aparência definida pela cor, brilho e textura, procedeu-se a medições instrumentais da reflexão difusa, reflexão especular e rugosidade média Ra. Analisou-se a cor através da curva de reflexão e também do Delta E. As variações de cor e brilho são também avaliadas visualmente a partir das condições de observação definidas pelas respectivas normas ASTM D 1729 e ASTM D 4449.

4.1. Limpeza das amostras

Buscou-se definir um procedimento de limpeza padrão para a superfície das amostras submetidas ao ensaio em laboratório com vista a eliminar qualquer vestígio de impregnação da borracha que reveste o disco do equipamento. Para a realização do estudo, provocou-se a degradação acentuada da borracha utilizando-se areia normal do rio Tietê de granulometria passante na malha 0,3 mm e retida na malha 0,15 mm, por 750 ciclos, com carga de 15 N, o que corresponde a um período de 5 minutos de ensaio sobre cada amostra. Três métodos de limpeza foram avaliados: exposição ao ultra-som por 10 minutos, estando a amostra imersa em acetona; calcinação a 300 °C por 2 horas e limpeza manual com algodão embebido em hexano. A eficiência dos procedimentos foi analisada por observação das superfícies com uma lupa Olympus SZ 40. Desses métodos, o hexano mostrou-se plenamente eficiente e de grande simplicidade, sendo adotado como agente de limpeza após ensaio de abrasão.

Para as medições em campo, as placas foram limpas com escova e agente abrasivo comercial, e ainda, com o produto de limpeza normalmente utilizado no estabelecimento. As medições foram feitas após secagem completa das placas, em dias secos, e precedidas por, pelo menos, três dias sem chuva.

4.2. Medição das reflexões especular e difusa

A reflexão foi apropriada através de um espectrofotômetro Minolta CM 508D, o qual fornece o espectro de reflectância para comprimentos de onda entre 400 e 700 nm, com medições a cada 10 nm. Este equipamento disponibiliza dois sistemas de medição: com componente especular incluso, associado à reflexão total e componente especular excluído, associado à reflexão difusa. A reflexão especular resulta das diferenças associadas a estas curvas. Como iluminante, adotou-se o CWF (fluorescente F2). Justifica-se esta decisão na medida em que se deseja contemplar principalmente os ambientes comerciais e de serviços, os quais contam basicamente com iluminação do tipo fluorescente.

4.3. Medição da rugosidade

A rugosidade média Ra das placas foi determinada através de um rugosímetro Mitutoyo SurfTest 211, utilizando-se a configuração da norma DIN. O *cut-off* de trabalho foi selecionado conforme instruções do fabricante adotando-se o valor de 2,5 mm. Em cada amostra foram realizadas 12 medidas, distribuídas 3 em cada uma das 4 direções mostradas na Figura 11.

4.4. Análise visual

A observação visual das variações de brilho e cor foi realizada em uma câmara de observação construída de forma a respeitar as

condições geométricas e de iluminação propostas nas normas ASTM D 4449 (1995) e ASTM D 1729 (1996), respectivamente.

A iluminação no interior da câmara foi medida utilizando-se de um luxímetro ISO-TECH ILM 350 posicionado sobre a face da amostra. Na configuração de percepção da reflexão especular a 20°, registrou-se 980 lux, e a 60°, registrou-se 1070 lux. Na configuração de percepção da cor, com a amostra posicionada a 45° em relação ao iluminante, registrou-se 925 lux. Todas as medições estão sujeitas a um erro de $\pm 10\%$ conforme indicação do fabricante do equipamento.

A análise visual consiste em comparar a região abrasionada com a original da mesma placa uma vez que o equipamento não trabalha sobre a totalidade da superfície.

As classes visuais foram distribuídas de 0 a 1, onde 0 corresponde ao estado original e 1, à deterioração total da superfície. Aos níveis intermediários, procurou-se atribuir alguns valores que pudessem balizar a classificação das amostras, de forma que 0,1 representa o início da percepção; 0,3, o início da consideração do problema como preocupante e 0,5, o início da consideração do problema como esteticamente intolerável. Cabe observar que esta escala está associada ao equipamento desenvolvido e pode ser utilizada para qualquer tipologia de placa cerâmica. A definição da classe visual de determinada amostra abrasionada resulta da comparação visual desta com as amostras-padrão que compõem a escala, as quais correspondem a valores numéricos.

5. Resultados

Para cada uma das variáveis de resposta, os valores correspondentes ao estado original resultam da média das 25 medições realizadas sobre as janelas mostradas na Figura 5 a partir de uma placa sem uso.

Para a condição em campo, para cada variável de resposta, pode-se relacionar o número de pessoas que corresponde a um mesmo tráfego, com os valores obtidos da média entre as medições feitas nas correspondentes janelas. Por exemplo, para a placa 15, na Figura 8, o tráfego E, de 3.213.579 pessoas, corresponde à média entre as medições realizadas no centro das 12 janelas inferiores.

Para todas as propriedades trabalhou-se com as diferenças entre os estados desgastado e original, tanto na situação de campo quanto em laboratório.

6. Modelagem

A modelagem dos resultados obtidos em laboratório e medidos em campo contou com o apoio do *software* SPSS. Quando em laboratório, os modelos descrevem o comportamento do material em função do tempo (t) e, quando em campo, em função do tráfego (tr), tanto para a situação de frenagem quanto de livre movimento.

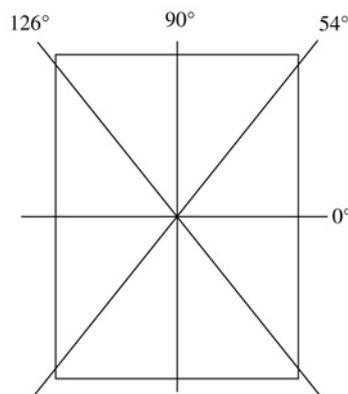


Figura 11. Configurações de medição da rugosidade das placas cerâmicas.

Nas Tabelas 6 a 10, apresenta-se os modelos numéricos que descrevem o comportamento dos resultados experimentais, respectivamente, da reflexão difusa, Delta E, classificação visual, reflexão especular e rugosidade média Ra. Os modelos representam as situações de laboratório e campo sob frenagem e movimento livre. Os parâmetros estatísticos compreendem o coeficiente de determinação (R^2), o erro absoluto médio (MAE), o erro relativo (ER) e a significância (SIGN) do modelo para cada grupo. O erro relativo é calculado dividindo-se o erro de previsão pela estimativa de desgaste obtida na condição média de tempo e de tráfego, respectivamente, 60 minutos e 6 milhões de pessoas.

Cabe observar que os resultados referentes à classificação visual são relativos à observação do brilho na câmara de observação. A observação da cor, por outro lado, foi descartada, não permitindo estabelecer sequer uma classificação visual significativa.

7. Definição do Modelo

A definição do modelo que melhor representa o comportamento do material cerâmico quando submetido à condição de abrasão baseia-se nos expoentes relacionados ao tempo de ensaio e tráfego de pessoas pertencentes às variáveis que mostraram resultados coerentes na modelagem. Para a reflexão especular e também para a rugosidade média Ra, os expoentes relacionados ao tempo não mostram semelhança

com qualquer dos expoentes relacionados ao tráfego. Isso significa que o comportamento em campo não é reproduzido adequadamente em laboratório e, portanto, ambas as propriedades não se constituem em bons indicadores do comportamento das placas cerâmicas quando submetidas a um processo abrasivo. Ainda, as curvas de frenagem e livre movimento, obtidas a partir destes modelos, para ambas as propriedades mostram inversão de comportamento a partir de determinado tráfego, o que não deve ocorrer em condições reais.

A Tabela 11 mostra os valores dos expoentes de tempo e tráfego para as variáveis reflexão difusa, Delta E e classificação visual. Nesta, pode-se observar que os valores relativos à frenagem são bastante próximos e resultam no valor médio de 0,31. Para a situação de livre movimento, também se verifica situação semelhante, onde o expoente médio resulta em 0,52. Os expoentes do tempo, associados ao comportamento em laboratório, mostram maior variabilidade, todavia, resultam, em média, no valor de 0,47.

Os expoentes médios revelam que o comportamento em laboratório tem afinidade com o desgaste gerado em campo pela condição de livre movimento. Ajustando-se ambas as condições para um expoente igual a 0,5, equivale a considerar que o desgaste evolui proporcionalmente à raiz quadrada do uso (tempo ou tráfego). A Tabela 12 mostra os modelos ajustados juntamente com os parâmetros estatísticos resultantes.

Tabela 6. Modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão difusa das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo.

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta R_d = 0,6051.t^{0,478}$	$R^2 = 0,652$
		$MAE = 2,06$
		$ER = 39,7\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta R_d = 6,26.tr^{0,296}$	$R^2 = 0,580$
		$MAE = 1,48$
		$ER = 13,9\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta R_d = 2,76.tr^{0,523}$	$R^2 = 0,787$
		$MAE = 0,89$
		$ER = 12,7\%$
		$SIGN = 0,000$

Tabela 7. Modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do delta E das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo.

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta E = 1,62.t^{0,249}$	$R^2 = 0,729$
		$MAE = 0,86$
		$ER = 19,12\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta E = 4,96.tr^{0,287}$	$R^2 = 0,526$
		$MAE = 1,24$
		$ER = 14,9\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta E = 1,88.tr^{0,567}$	$R^2 = 0,757$
		$MAE = 0,83$
		$ER = 16,0\%$
		$SIGN = 0,000$

Tabela 8. Modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo.

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta_{vis} = 0,0102.t^{0,6705}$	$R^2 = 0,953$
		$MAE = 0,04$
		$ER = 23,6\%$
Campo: frenagem	$\Delta_{vis} = 0,381.tr^{0,348}$	$SIGN = 0,000$
		$R^2 = 0,795$
		$MAE = 0,07$
Campo: movimento livre	$\Delta_{vis} = 0,234.tr^{0,468}$	$ER = 9,8\%$
		$SIGN = 0,000$
		$R^2 = 0,754$
		$MAE = 0,08$
		$ER = 14\%$
		$SIGN = 0,000$

Tabela 9. Região de contato do disco com a amostra sem o efeito de translação (à direita) e com o efeito de translação (à esquerda).

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta_{Re} = - 0,0878.t^{0,7058}$	$R^2 = 0,872$
		$MAE = 0,27$
		$ER = 17,2\%$
Campo: frenagem	$\Delta_{Re} = - 0,8209.tr^{0,1099}$	$SIGN = 0,000$
		$R^2 = 0,695$
		$MAE = 0,03$
Campo: movimento livre	$\Delta_{Re} = - 0,433.tr^{0,390}$	$ER = 2,8\%$
		$SIGN = 0,000$
		$R^2 = 0,941$
		$MAE = 0,04$
		$ER = 4,6\%$

Tabela 10. Configurações de medição da rugosidade das placas cerâmicas.

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta_{Ra} = - 0,0648.t^{0,823}$	$R^2 = 0,839$
		$MAE = 0,96$
		$ER = 50,6\%$
Campo: frenagem	$\Delta_{Ra} = - 12,4.tr^{0,0146}$	$SIGN = 0,000$
		$R^2 = 0,0231$
		$MAE = 0,38$
Campo: movimento livre	$\Delta_{Ra} = - 8,274.tr^{0,21}$	$ER = 3,0\%$
		$SIGN = 0,000$
		$R^2 = 0,527$
		$MAE = 1,0$
		$ER = 8,3\%$
		$SIGN = 0,000$

Como pode ser visto na Tabela 12, os parâmetros estatísticos relacionados ao processo desenvolvido em laboratório, tanto para o Delta E quanto para a reflexão difusa, envolvem coeficiente de determinação $< 0,5$ e/ou erro relativo $> 25\%$. A classificação visual, por outro lado, mantém altos coeficientes de determinação e erros relativos aceitáveis para ambas as condições. Dessa forma, do ponto de vista estatístico, a classificação visual consiste na propriedade com menor margem de erros de previsão, portanto, considerada a mais adequada para estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas à abrasão.

Resulta que a variação de aspecto decorrente do ensaio de abrasão e a variação do aspecto decorrente do trânsito de pessoas em movimento livre são proporcionais, respectivamente, à raiz quadrada do tempo, dado em minutos, e à raiz quadrada do tráfego, dado em milhões de pessoas. A Figura 12 contém a representação gráfica da evolução do fenômeno.

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. Observa-se que um minuto em laboratório corresponde ao tráfego em movimento livre de 0,0132 milhões de pessoas, como expressa a Equação 1. Alternativamente, utilizando como unidade de tráfego pessoas, o fator de aceleração é 13.200 (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 do método de ensaio proposto neste trabalho.

$$tr = 0,0132.t \quad (1)$$

onde, tr é expresso em milhões de pessoas e t em minutos.

O movimento de frenagem, por sua vez, representado pelo expoente médio de 0,31, como indica a Tabela 11, mostra que a relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas não é linear e, portanto, o equipamento desenvolvido neste trabalho não reproduz adequadamente o mecanismo de desgaste provocado pela frenagem do tráfego e, sendo assim, não é recomendado para inferir sobre o efeito deste movimento.

8. Conclusões

Das cinco variáveis de resposta utilizadas para avaliar o desgaste em condições reais de utilização, a reflexão especular e a rugosidade média Ra não mostraram relação satisfatória entre o fenômeno real e o simulado em laboratório. No primeiro caso, possivelmente este comportamento esteja associado a dificuldades do espectrofotômetro em interpretar o brilho quando ocorrem variações superficiais.

Dentre as demais propriedades, propõem-se adotar a classificação visual para estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas sob livre movimento, a qual revela os melhores parâmetros estatísticos. A análise visual deve ser realizada sob condições padronizadas de observação, relativas à luminosidade e geometria, de forma a permitir a visualização do brilho. Esta condição mostrou-se eficiente, permitindo identificar pequenas variações entre as situações original e desgastada.

Resulta que a variação de aspecto decorrente do ensaio de abrasão e a variação do aspecto decorrente do trânsito de pessoas em movimento livre são proporcionais, respectivamente, à raiz quadrada do tempo, dado em minutos, e à raiz quadrada do tráfego, dado em milhões de pessoas. Portanto, é possível estabelecer um fator de aceleração que permite estimar o comportamento futuro do material cerâmico, em condições reais de utilização.

Tabela 11. Expoentes originais de tempo de ensaio e tráfego de pessoas.

	Delta E	Reflexão difusa	Classif. visual	Média
Laboratório	0,249	0,478	0,671	0,47
Frenagem	0,287	0,296	0,348	0,31
Mov. livre	0,567	0,523	0,468	0,52
Média	0,368	0,43	0,50	0,43

Tabela 12. Modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento das variáveis: Delta E, reflexão difusa e classificação visual, em laboratório e em livre movimento.

Resultados	Variável	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	Delta E	$\Delta E_l = 0,441.t^{0,5}$	$R^2 = 0,3054$
			$MAE = 1,47$
			$ER = 43,2\%$
	Reflexão difusa	$\Delta Rd_l = 0,531.t^{0,5}$	$R^2 = 0,651$
			$MAE = 2,09$
			$ER = 41,4\%$
	Classificação visual	$\Delta vis_l = 0,025.t^{0,5}$	$R^2 = 0,912$
			$MAE = 0,05$
			$ER = 23,7\%$
Campo: movimento livre	Delta E	$\Delta E_{cl} = 2,17.tr^{0,5}$	$R^2 = 0,747$
			$MAE = 0,83$
			$ER = 15,6\%$
	Reflexão difusa	$\Delta Rd_{cl} = 2,88.tr^{0,5}$	$R^2 = 0,786$
			$MAE = 0,91$
			$ER = 12,9\%$
	Classificação visual	$\Delta vis_{cl} = 0,218.tr^{0,5}$	$R^2 = 0,750$
			$MAE = 0,08$
			$ER = 14,5\%$

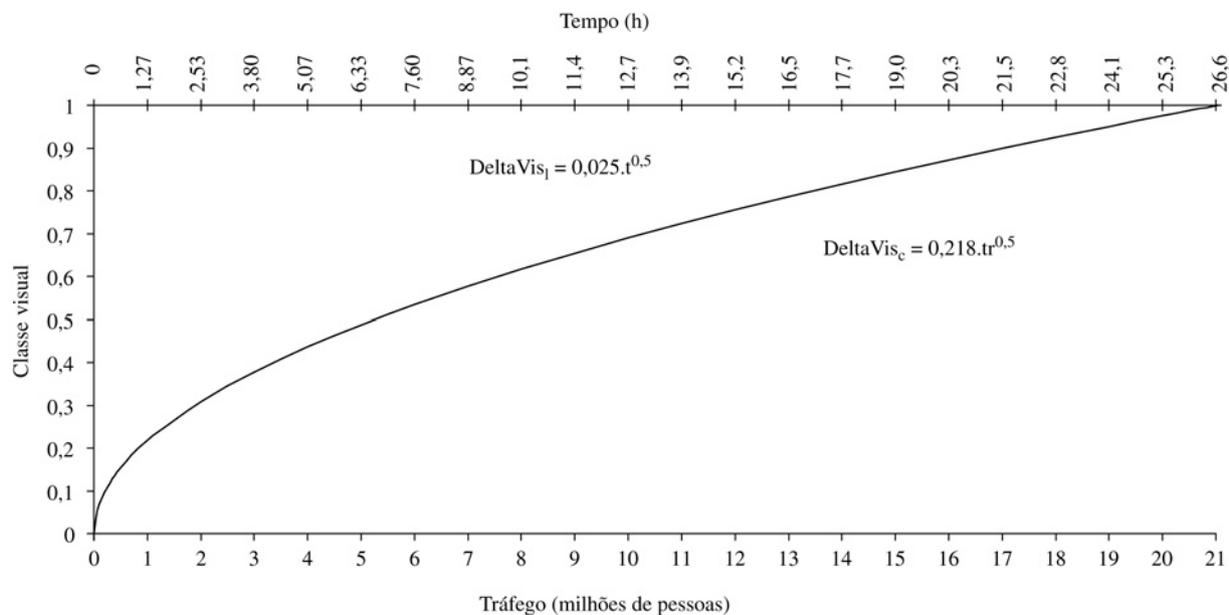


Figura 12. Representação gráfica dos modelos que descrevem a variação do aspecto em função do tempo de ensaio e do tráfego.

Referências

1. Abitante ALR. *Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados*. [Doutorado em Engenharia]. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2004.
2. American Society for Testing and Materials. ASTM D 523-89: Standard test method for specular gloss (Reapproved 1994). In: *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia; 1998. p. 32-36.
3. _____. ASTM D 1729-96: Standard practice for visual appraisal of colors differences of diffusely-illuminated opaque materials. In: *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia; 1998. p. 191-193.
4. _____. ASTM D 4449-90: Standard test method for visual evaluation of gloss differences between surfaces of similar appearance (Reapproved 1995). In: *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia; 1998. p. 506-510.
5. Ribeiro JLD, ten Caten CS. *Projeto de experimentos*. Porto Alegre: FEENG/UFRGS; 2001. p. 130.