

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Minas, Metalúrgica e de Materiais

ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PLACAS CERÂMICAS
ESMALTADAS SOLICITADAS POR ABRASÃO ATRAVÉS DE
ENSAIOS ACELERADOS

Ana Luiza Raabe Abitante
Engenheira Civil

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2004

ANA LUIZA RAABE ABITANTE

**ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PLACAS CERÂMICAS
ESMALTADAS SOLICITADAS POR ABRASÃO ATRAVÉS DE
ENSAIOS ACELERADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2004

ABITANTE, Ana Luiza Raabe

Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados / Ana Luiza Raabe Abitante. – Porto Alegre: PPGEM/UFRGS, 2004.

n p.

Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Doutor em engenharia. Orientador: Bergmann, C.P. e Ribeiro, J.L.D.

1. Assunto I. Título

CCAA2

ANA LUIZA RAABE ABITANTE

**ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PLACAS CERÂMICAS
ESMALTADAS SOLICITADAS POR ABRASÃO ATRAVÉS DE
ENSAIOS ACELERADOS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de janeiro de 2004

Prof. Carlos Pérez Bergmann
Orientador

Prof. José Luis Duarte Ribeiro
Orientador

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do PPGEM/UFRGS

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Fernando Henrique Sabbatini (USP)

Eng. José Octávio A. Paschoal (CCB)

Eng. Roberto Gliese (UFRGS)

Ao Edgar, presente em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Carlos Pérez Bergmann pela orientação deste trabalho, permanente entusiasmo, objetividade das suas colocações e aporte material.

Igualmente agradeço ao Prof. José Luis Duarte Ribeiro pela inestimável orientação, a partir da qual foi possível alcançar os objetivos propostos neste trabalho, permanente disponibilidade e otimismo no transcorrer da tese.

Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (Lacer), principalmente ao Eng. Márcio Dias Lima, pelo projeto e construção do equipamento de abrasão.

Ao Laboratório de Processamento Mineral (Laprom), em especial ao Prof. Carlos Petter e ao Eng. Roberto Gliese, pela utilização de equipamentos e discussões técnicas.

À Decorite, em especial ao Geol. Jaime Pedrassani, pelo fornecimento das placas cerâmicas necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Mc Donalds Silva Só, especialmente ao Sr. Antônio Maria Rocha, por permitir a realização do estudo de caso e disponibilizar todas as informações solicitadas. Agradeço também ao técnico de manutenção, Leandro André de Almeida, pela cuidadosa extração das amostras.

Ao Instituto de Tecnología Cerámica (ITC), em Castellón, Espanha, em especial ao Prof. Carlos Felú Mingarro, por disponibilizar o acervo do Centro de Documentação, a partir do qual desenvolveu-se o referencial teórico.

Ao auxiliar de pesquisa Fernando Beuren Araujo, que colaborou imensamente na execução dos ensaios de abrasão, medições de rugosidade e no estudo de limpabilidade das amostras.

Ao SENAI – CETEMP/RS, em especial ao Eng. Ricardo Mombrú, pela utilização do rugosímetro que fornece os dados relativos à curva de Abbott-Firestone.

Agradeço ainda, a todos que de alguma forma contribuíram para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados.

RESUMO

ABITANTE, A.L.R. Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre.

O desempenho de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas ao tráfego de pessoas tem sido alvo de inúmeras críticas, tanto por parte dos especificadores, em vista da carência de informações técnicas seguras, quanto por parte dos usuários, devido ao comportamento insatisfatório, muitas vezes registrado, em condições reais de utilização. Com o intuito de contribuir com o estudo desse assunto, procurou-se modelar o comportamento de placas cerâmicas esmaltadas submetidas a um processo abrasivo. Para tanto, desenvolveu-se um equipamento de abrasão que permitiu a aplicação variável de carga e a inserção de diferentes concentrações de abrasivo. Como variáveis de resposta, foram analisadas seis propriedades que podem estar relacionadas à percepção do fenômeno: reflexão especular, reflexão difusa, delta E, rugosidade média Ra, rugosidade média Rz e aspecto visual. Após desgaste, avaliou-se também a limpabilidade das superfícies, as quais revelaram tendência à maior impregnação de sujeira. A relação entre o comportamento obtido em laboratório com o desempenho em campo foi obtida através de um estudo de caso cujas placas revelaram significativo desgaste após poucos anos de utilização. A partir da modelagem dos dados de campo foi possível constatar que a classificação visual mostrou os melhores parâmetros estatísticos, comportamento este também observado nos ensaios de laboratório. Dessa forma, a classificação visual constitui-se na propriedade selecionada para estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas. Os modelos resultantes mostraram 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 e à raiz quadrada do tráfego. Portanto, existe uma relação constante entre tempo e tráfego que permite estimar o comportamento futuro do material. Para frenagem, resulta que a variação de aspecto é aproximadamente proporcional à raiz cúbica do tráfego. Utilizando a modelagem proposta, foi possível estimar a vida útil de quatro tipologias de placas cerâmicas, designadas: bege sem brilho, bege com brilho, marrom sem brilho e marrom com brilho.

Palavras-chave: vida útil; abrasão; modelagem..

ABSTRACT

ABITANTE, A.L.R. Estimativa de vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre.

The performance of glazed ceramic tiles subject to pedestrian traffic has been often criticized, both from specifiers, due to the lack of reliable technical information, as well as end users, on account of poor behavior, many times on records, in actual application. In order to contribute to the science of the subject, the behavior of glazed ceramic tiles under abrasion was modeled. With that purpose, an abrasion equipment was developed, allowing an adjustable load application and the insertion of different quantities of abrasive. A total of six properties are analyzed as response variables, that may be related to the perception of the phenomenon: specular reflection, diffuse reflection, delta E, average roughness Ra, average roughness Rz and visual aspect. After wearing off, the cleanness of the surface is evaluated, revealing any tendency to accumulate dirt. The relation between the behavior achieved during laboratory tests and the field performance is accomplished by a case study which tiles revealed a significant wearing after few years. The site in this study is divided in thirteen individual paths that are associated to specific kinds of traffics. The field data revealed that the visual classification yields the best statistical parameters, which was also observed from the laboratory studies. Hence, the visual classification is the property chosen to estimate the life cycle of glazed ceramic tiles subject to abrasion under pedestrian traffic. The results show that the aspect variation, as a result of the abrasion experiment, and the aspect variation, as a result of free traffic of people, are proportional, respectively, to the square root of time and to the square root of traffic. Therefore, there is a constant association between time and traffic that allows us to estimate future behavior of ceramic material. When the material is subject to traction, the aspect variation is approximately proportional to the cubic root of the traffic. Using the proposed model, it is possible to estimate the life cycle of four varieties of ceramic tiles, classified as matte beige, glossy beige, matte brown and glossy brown.

Key words: life cycle; abrasion; modeling

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	p.24
1.1 JUSTIFICATIVA	p.24
1.2 OBJETIVOS	p.26
1.3 HIPÓTESE	p.27
1.4 PRESSUPOSTOS	p.27
1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	p.28
2 REFERENCIAL TEÓRICO	p.29
2.1 DURABILIDADE	p.29
2.1.1 Vida útil	p.32
2.1.2 Modelagem da vida útil	p.34
2.1.3 Os ensaios acelerados	p.36
2.2 O DESGASTE DE MATERIAIS	p.39
2.2.1 O fenômeno do desgaste	p.39
2.2.2 Mecanismos de desgaste	p.40
2.2.3 Fratura	p.43
2.2.4 Modelos de desgaste	p.50
2.3 ABRASÃO	p.53
2.3.1 Definições	p.53
2.3.2 Mecanismos envolvidos no processo de abrasão	p.54
2.3.3 Efeitos da abrasão	p.55
2.3.4 Características e propriedades que intervêm no desenvolvimento do fenômeno	p.58
2.3.4.1 Aspectos relacionados ao material cerâmico	p.58

2.3.4.1.1 Resistência à abrasão	p.59
2.3.4.1.2 Dureza	p.63
2.3.4.1.3 Tenacidade	p.65
2.3.4.2 Aspectos relacionados ao material intermediário	p.67
2.3.4.3 Aspectos relacionados ao trânsito de pessoas	p.68
2.3.4.4 Aspectos relacionados ao ambiente	p.71
2.3.5 Características e propriedades que intervêm na percepção do fenômeno	p.71
2.3.5.1 Propriedades ópticas	p.72
2.3.5.1.1 Brilho	p.74
2.3.5.1.2 Cor	p.84
2.3.5.2 Número de cores e grau de disseminação das cores	p.96
2.3.5.3 Rugosidade superficial	p.96
2.3.5.4 Limpabilidade	p.101
3 MÉTODO DE PESQUISA	p.107
3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO	p.108
3.2 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	p.112
3.3 O EQUIPAMENTO	p.114
3.4 O MATERIAL ABRASIVO	p.117
3.4.1 Areia	p.118
3.4.2 Pó atomizado	p.119
3.4.3 Barbotina de farinha de quartzo	p.122
3.5 MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA	p.125
3.5.1 Procedimento de limpeza das amostras após ensaio	p.125
3.5.2 Medição da reflexão especular	p.127
3.5.3 Medição da reflexão difusa	p.128
3.5.4 Medição da rugosidade	p.128
3.5.5 Limpabilidade	p.129
3.5.6 Análise visual	p.130

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	p.132
4.1 REFLEXÃO ESPECULAR	p.134
4.2 REFLEXÃO DIFUSA	p.140
4.3 DELTA E	p.146
4.4 RUGOSIDADE MÉDIA Ra	p.149
4.5 RUGOSIDADE MÉDIA Rz	p.155
4.6 ANÁLISE VISUAL	p.160
4.7 LIMPABILIDADE	p.164
4.7.1 Impregnação com carvão ativado e óleo mineral	p.164
4.7.2 Impregnação com azul de metileno	p.169
4.7.3 Análise conjunta	p.170
4.8 SELEÇÃO DOS MODELOS	p.173
4.9 CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS	p.174
4.9.1 Reflexão especular e Classificação visual	p.176
4.9.2 Rugosidade média e Reflexão especular	p.176
4.9.3 Rugosidade média e Classificação visual	p.178
4.9.4 Limpabilidade e Rugosidade média Ra	p.180
5 ESTUDO DE CASO	p.182
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	p.182
5.2 METODOLOGIA	p.185
5.3 IDENTIFICAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS	p.186
5.4 CÁLCULO DO TRÁFEGO	p.191
5.5 CÁLCULO DAS CARGAS	p.195
5.6 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL INTERMEDIÁRIO	p.197
5.6.1 Distribuição granulométrica	p.199

5.6.2 Composição mineralógica	p.199
5.7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	p.201
5.7.1 Reflexão difusa	p.201
5.7.2 Reflexão especular	p.205
5.7.3 Rugosidade média Ra	p.210
5.7.4 Classificação visual	p.213
5.8 MODELAGEM	p.215
5.8.1 Reflexão difusa	p.215
5.8.2 Delta E	p.218
5.8.3 Classificação visual	p.220
5.8.4 Reflexão especular	p.223
5.8.5 Rugosidade média Ra	p.224
5.9 DEFINIÇÃO DO MODELO	p.226
6 APLICAÇÃO DO MODELO	p.231
6.1 GRUPOS BC, BS, MC e MS	p.231
6.2 APLICAÇÃO DO MODELO	p.234
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	p.238
7.1 GRUPOS BC, BS, MC e MS	p.238
7.2 ESTUDO DE CASO	p.240
7.3 APLICAÇÃO DO MODELO	p.242
7.4 SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS	p.243
REFERÊNCIAS	p.244
APÊNDICE A – Difractogramas de Raios-X	p.252

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: posicionamento da trinca no centro e na superfície de um corpo sujeito à tensão uniformemente distribuída	p.45
Figura 2.2: modelos de carregamento relacionados à propagação das trincas	p.46
Figura 2.3: seqüência da reação da molécula de água com a sílica, associada ao crescimento sub-crítico da trinca	p.48
Figura 2.4: representação esquemática da resistência ao desgaste abrasivo em função da dureza e da tenacidade à fratura	p.66
Figura 2.5: reflexão especular relativa à superfície média e reflexão difusa relativa às superfícies não paralelas	p.74
Figura 2.6: representação esquemática da reflexão com o aumento das irregularidades superficiais	p.76
Figura 2.7: configurações geométricas de análise visual do brilho	p.82
Figura 2.8: evolução do brilho para placas cerâmicas lisas e brilhantes	p.84
Figura 2.9: espectro visível da radiação solar	p.85
Figura 2.10: espectro de radiação da lâmpada incandescente	p.85
Figura 2.11: espectro de radiação da lâmpada fluorescente branca	p.86
Figura 2.12: sensibilidade à luz visível	p.86
Figura 2.13: geometrias de observação da cor (esquerda) e do brilho (direita) em superfícies não metálicas	p.90
Figura 2.14: diagrama $L^*a^*b^*$ do sistema CIE $L^*a^*b^*$	p.92
Figura 2.15: curvas de reflexão antes e depois da abrasão	p.93
Figura 2.16: comprimentos de amostragem	p.97
Figura 2.17: rugosidade média R_a	p.98
Figura 2.18: perfis de rugosidade com mesmo R_a , porém com diferente altura dos picos (R_{pk}), profundidade da rugosidade central (R_k) e profundidade dos vales (R_{vk})	p.100

Figura 2.19: curva de fração de contato (Abbott-Firestone) função do perfil de rugosidade	p.103
Figura 2.20: variação da porosidade em função dos cortes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> e <i>d</i> ao longo da espessura da camada do vidrado	p.105
Figura 3.1: equipamento de desgaste utilizado no trabalho	p.115
Figura 3.2: região de contato do disco com a amostra sem o efeito de translação (à esquerda) e com o efeito de translação (à direita)	p.116
Figura 3.3: bacia de armazenagem da barbotina no equipamento de desgaste	p.117
Figura 3.4: pó atomizado PAD (40X)	p.120
Figura 3.5: pó atomizado PAE (40X)	p.120
Figura 3.6: distribuição granulométrica da farinha de quartzo utilizada como abrasivo nos ensaios de desgaste	p.123
Figura 3.7: amostra de placa cerâmica após desgaste submetida à limpeza com ultra-som por 10min (40X)	p.126
Figura 3.8: amostra de placa cerâmica após desgaste submetida à limpeza por calcinação à temperatura de 300°C por 2 horas (40X).....	p.126
Figura 3.9: amostra de placa cerâmica após desgaste submetida à limpeza manual com hexano (40X)	p.127
Figura 3.10: configurações de medição da rugosidade das placas cerâmicas .	p.129
Figura 4.1: pontos de comparação para análise ilustrativa da carga aplicada pelo disco sobre a superfície da placa cerâmica, da concentração de sólidos (farinha de quartzo) na barbotina e do tempo de ensaio	p.133
Figura 4.2: reflexão especular média original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS	p.134
Figura 4.3: distribuição ordenada da reflexão especular original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS	p.135
Figura 4.4: representação gráfica da variação da reflexão especular das placas cerâmicas em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio	p.136

Figura 4.5: reflexão difusa média original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS	p.140
Figura 4.6: distribuição ordenada da reflexão difusa original de placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS	p.141
Figura 4.7: representação gráfica da variação da reflexão difusa das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio	p.142
Figura 4.8: representação gráfica do ΔE das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio	p.147
Figura 4.9: distribuição ordenada da rugosidade média Ra original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS	p.150
Figura 4.10: representação gráfica da variação da rugosidade média Ra das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio	p.152
Figura 4.11: distribuição ordenada da rugosidade média Rz original das placas cerâmicas dos grupos MC, BC, MS e BS	p.155
Figura 4.12: representação gráfica da variação da rugosidade média Rz das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.157
Figura 4.13: representação gráfica da classificação visual das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.161
Figura 4.14: representação gráfica da variação do volume de retenção de óleo das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.165
Figura 4.15: correlação entre a classificação visual e o volume de retenção de óleo das placas cerâmicas desgastadas dos grupos: bege sem brilho e bege com brilho	p.167
Figura 4.16: amostras do grupo bege sem brilho: original (à esquerda) e desgastada (à direita) após impregnação de óleo mineral e carvão ativado e imersão em HCl a 3% por 24h	p.169

Figura 4.17: correlação entre classificação visual e reflexão especular para o grupo marrom sem brilho após desgaste das amostras	p.176
Figura 4.18: correlação entre classificação visual e Ra e classificação visual e Rz para as placas cerâmicas dos grupos bege sem brilho e marrom sem brilho	p.179
Figura 4.19: correlação entre classificação visual relativa às manchas e rugosidade média Ra para as placas do grupo bege sem brilho após submetidas ao ensaio de desgaste	p.180
Figura 5.1: situação das placas cerâmicas junto à porta principal, no acesso externo da lanchonete objeto do estudo de caso	p.183
Figura 5.2: situação das placas cerâmicas junto à porta secundária, no acesso externo da lanchonete objeto do estudo de caso	p.183
Figura 5.3: subdivisão das placas cerâmicas em 25 regiões para avaliação do desgaste em campo.....	p.186
Figura 5.4: trajetórias preferenciais que levam à porta principal da lanchonete, cujas placas cerâmicas são objeto deste estudo de caso	p.187
Figura 5.5: segmentos das placas cerâmicas sujeitas à frenagem associados às trajetórias de acesso à porta principal da lanchonete	p.188
Figura 5.6: 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) da lanchonete	p.189
Figura 5.7: trajetórias preferenciais que levam à porta secundária da lanchonete	p.190
Figura 5.8: 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 da lanchonete	p.190
Figura 5.9: distribuição de frequências dos clientes da lanchonete em relação às idades	p.196
Figura 5.10: reflexão difusa média das placas cerâmicas originais	p.202
Figura 5.11: reflexão especular média da placa cerâmica original (sem desgaste)	p.206

Figura 5.12: distribuição dos valores ordenados da reflexão especular da placa cerâmica original para $\lambda = 550\text{nm}$	p.206
Figura 5.13: distribuição dos valores ordenados de Ra das placas cerâmicas originais (sem desgaste)	p.211
Figura 5.14: classificação visual correspondente às regiões sujeitas à frenagem junto à porta principal da lanchonete	p.213
Figura 5.15: classificação visual correspondente às regiões sujeitas ao livre movimento junto à porta principal da lanchonete	p.214
Figura 5.16: classificação visual correspondente às regiões sujeitas ao livre movimento (à esquerda) e à frenagem (à direita) junto à porta secundária da lanchonete	p.214
Figura 5.17: representação gráfica dos modelos e dos dados experimentais relativos à variação da reflexão difusa com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas	p.217
Figura 5.18: representação gráfica do tempo de ensaio em função do tráfego para as situações de frenagem (à esquerda) e movimento livre (à direita)	p.218
Figura 5.19: representação gráfica dos modelos ajustados e dos dados experimentais relativos à variação do Delta E com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas	p.219
Figura 5.20: representação gráfica do tempo de ensaio em função do tráfego de pessoas para as situações de frenagem (à esquerda) e movimento livre (à direita)	p.220
Figura 5.21: representação gráfica dos modelos ajustados e dos resultados experimentais relativos à variação da classificação visual com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas	p.222
Figura 5.22: representação gráfica do tempo de ensaio em função do tráfego de pessoas para as situações de frenagem (à esquerda) e movimento livre (à direita)	p.223
Figura 5.23: representação gráfica dos modelos e dos resultados experimentais relativos à variação da reflexão especular com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas	p.224

- Figura 5.24: representação gráfica dos modelos e dos resultados experimentais relativos à variação da rugosidade média R_a com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas p.225
- Figura 5.25: representação gráfica dos modelos que descrevem a variação do aspecto em função do tempo de ensaio, em minutos, e do tráfego, em milhões de pessoas p.228
- Figura 5.26: representação gráfica dos modelos que descrevem a relação entre tempo de ensaio e tráfego para as situações de movimento livre e frenagem p.229
- Figura 6.1: 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 p.234
- Figura 6.2: 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 p.235

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: fatores de deterioração que afetam a vida útil dos componentes e materiais de construção	p.37
Tabela 2.2: parâmetros freqüentemente considerados nas equações de desgaste	p.51
Tabela 2.3: sistema tribológico relativo aos pisos cerâmicos esmaltados sujeitos ao tráfego de pessoas	p.58
Tabela 2.4: significado das diferenças de cor	p.95
Tabela 3.1: variáveis consideradas na pesquisa a especialistas realizada no escopo deste trabalho	p.108
Tabela 3.2: resultados da pesquisa a especialistas	p.110
Tabela 3.3: matriz de combinações experimentais	p.113
Tabela 3.4: parâmetros das distribuições granulométricas dos pós atomizados PAE e PAD, nas situações como recebido, em análise a seco e a úmido, e após ensaio de desgaste	p.121
Tabela 3.5: parâmetros da distribuição granulométrica da farinha de quartzo utilizada como abrasivo nos ensaios de desgaste	23p.1
Tabela 3.6: estudo da dispersão do quartzo na barbotina utilizada como abrasivo nos ensaios de desgaste	p.241
Tabela 4.1: níveis de agressividade relacionados às variáveis: carga (ca) e concentração de sólidos na barbotina (co)	p.132
Tabela 4.2: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão especular em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.137
Tabela 4.3: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão difusa em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.143
Tabela 4.4: indicativo do comportamento da luminosidade (L*), saturação (C*) e reflectância das placas cerâmicas desgastadas pertencentes aos grupos em análise	p.145

Tabela 4.5: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do ΔE em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.146
Tabela 4.6: variabilidade entre as 12 medições de Ra realizadas em cada amostra de placa cerâmica	p.150
Tabela 4.7: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da rugosidade média Ra em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.153
Tabela 4.8: variabilidade entre as 12 medições de Rz para as placas dos grupos MC, BC, MS e BS	p.155
Tabela 4.9: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da rugosidade média Rz em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.158
Tabela 4.10: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da análise visual em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.163
Tabela 4.11: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da variação do volume de retenção de óleo em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio	p.164
Tabela 4.12: percentuais das placas cerâmicas desgastadas que permaneceram com resíduos de agente manchante após tentativa de remoção da impregnação	p.170
Tabela 4.13: possibilidade de remoção total das manchas nas amostras originais através dos diferentes procedimentos de limpeza previstos na NBR 13818/97	p.171
Tabela 4.14: modelos que descrevem o comportamento das placas cerâmicas ao desgaste e que apresentam $R^2 > 0,5$ e $ER < 25\%$	p.173
Tabela 4.15: matriz de correlação referente ao grupo bege sem brilho	p.175
Tabela 4.16: matriz de correlação referente ao grupo marrom sem brilho	p.175
Tabela 4.17: matriz de correlação referente ao grupo bege com brilho	p.175
Tabela 4.18: matriz de correlação referente ao grupo marrom com brilho ...	p.175

Tabela 4.19: valores médios da rugosidade média Ra e Rz das placas cerâmicas originais	p.177
Tabela 5.1: número de segmentos que compõem as trajetórias junto aos acessos à lanchonete para movimento livre (à esquerda) e frenagem (à direita)	p.191
Tabela 5.2: tráfego correspondente à porta principal de acesso à lanchonete	p.193
Tabela 5.3: tráfego correspondente às trajetórias de frenagem relativas à porta principal de acesso à lanchonete	p.193
Tabela 5.4: tráfego correspondente às trajetórias de livre movimento relativas à porta principal de acesso à lanchonete	p.194
Tabela 5.5: tráfego correspondente à porta secundária de acesso à lanchonete	p.194
Tabela 5.6: tráfego correspondente às trajetórias da portas secundária de acesso à lanchonete	p.194
Tabela 5.7: distribuição de clientes da lanchonete em relação à idade	p.195
Tabela 5.8: peso ponderado da população que frequenta o estabelecimento (Kg)	p.196
Tabela 5.9: distribuição granulométrica do material coletado sobre o piso externo da lanchonete	p.199
Tabela 5.10: classificação dos solos segundo a NBR 6502/95	p.199
Tabela 5.11: reflexão difusa média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de frenagem para $\lambda = 550\text{nm}$	p.202
Tabela 5.12: reflexão difusa média das regiões desgastadas sob efeito de livre movimento para $\lambda = 550\text{nm}$	p.203
Tabela 5.13: variações de reflectância das placas sujeitas ao movimento livre (à esquerda) e à frenagem (à direita) em relação ao estado original para $\lambda = 550\text{nm}$	p.203
Tabela 5.14: reflexão difusa das placas desgastadas em laboratório e variação da reflectância em relação ao estado original para $\lambda = 550\text{nm}$.	p.204

Tabela 5.15: parâmetros estatísticos relativos às coordenadas do espaço de cor para a condição original das placas cerâmicas objeto do estudo de caso	p.204
Tabela 5.16: ΔE médio das placas objeto do estudo de caso para as regiões sob efeito de frenagem e $\lambda = 550\text{nm}$	p.204
Tabela 5.17: ΔE médio das placas objeto do estudo de caso para as regiões sob efeito de livre movimento e $\lambda = 550\text{nm}$	p.205
Tabela 5.18: ΔE das placas cerâmicas desgastadas em laboratório para $\lambda = 550\text{nm}$	p.205
Tabela 5.19: reflexão especular média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de frenagem para $\lambda = 550\text{nm}$	p.207
Tabela 5.20: reflexão especular média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de livre movimento para $\lambda = 550\text{nm}$	p.207
Tabela 5.21: variações da reflexão especular das placas cerâmicas desgastadas em relação ao estado original para o tráfego em movimento livre (à esquerda) e frenagem (à direita) para $\lambda = 550\text{nm}$	p.209
Tabela 5.22: reflexão especular das placas cerâmicas desgastadas em laboratório para $\lambda = 550\text{nm}$	p.210
Tabela 5.23: rugosidade R_a média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de frenagem	p.211
Tabela 5.24: rugosidade R_a média das placas cerâmicas das regiões desgastadas sob efeito de livre movimento	p.211
Tabela 5.25: variações da rugosidade média R_a das placas cerâmicas desgastadas em relação ao estado original para as condições de livre movimento (à esquerda) e frenagem (à direita)	p.212
Tabela 5.26: rugosidade média R_a das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e variação em relação ao estado original	p.213
Tabela 5.27: classificação visual correspondente às placas cerâmicas desgastadas em laboratório	p.215

Tabela 5.28: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão difusa das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo fusa	p.216
Tabela 5.29: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão difusa das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.216
Tabela 5.30: relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas após ajuste dos expoentes	p.217
Tabela 5.31: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do delta E das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.218
Tabela 5.32: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do delta E das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.219
Tabela 5.33: relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas após ajuste dos expoentes	p.220
Tabela 5.34: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.221
Tabela 5.35: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.221
Tabela 5.36: relações entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas após ajuste dos expoentes	p.222
Tabela 5.37: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão especular das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.223
Tabela 5.38: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da rugosidade média Ra das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo	p.225
Tabela 5.39: expoentes originais de tempo de ensaio e tráfego de pessoas ..	p.226

Tabela 5.40: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento das variáveis: delta E, reflexão difusa e classificação visual, em laboratório e em livre movimento	p.227
Tabela 5.41: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento das variáveis: delta E, reflexão difusa e classificação visual sob efeito de frenagem	p.229
Tabela 5.42: tráfegos associados aos períodos de ensaio de 10min, 1h e 10h para frenagem e movimento livre	p.230
Tabela 6.1: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual para os grupos BC, BS, MC e MS	p.232
Tabela 6.2: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo BS	p.233
Tabela 6.3: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo BC	p.233
Tabela 6.4: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo MS	p.233
Tabela 6.5: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo MC	p.233
Tabela 6.6: coeficientes b_0^* que indicam as condições relativas de agressividade associadas à carga e concentração do abrasivo	p.236
Tabela 6.7: fator de aceleração ajustado (fa')	p.236

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Os materiais cerâmicos para revestimento inserem-se num mercado bastante significativo para a economia brasileira na medida em que compõem, juntamente com os demais segmentos da indústria cerâmica, aproximadamente 1% do PIB – Produto Interno Bruto (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000). O crescimento desta indústria é uma tendência mundial. No caso brasileiro, a produção cresceu em média 11% ao ano ao longo da década de 90, atingindo 428,5 milhões de m² em 1999 (MOTTA et al., 2001). O Brasil, antecedido pela China, Itália e Espanha constituem-se nos maiores produtores mundiais (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000).

A partir da década de 90 foram implementadas importantes mudanças na estratégia competitiva das indústrias de revestimento esmaltado, passando a buscar diferenciação através da melhoria técnica dos produtos, das variações tipológicas, da conformidade com as normas técnicas e do fortalecimento da marca. Neste 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 a todos os ambientes, conseqüentemente com funções diferenciadas. Enrique et al. (1996) colocam que o progresso da tecnologia de fabricação vem permitindo estas novas abordagens e destacam especialmente a extrapolação para os ambientes públicos, comerciais e de serviços.

As variações de tipologia abrangem os aspectos relativos ao formato, à textura, aos desenhos e às cores, além da diversidade de peças de acabamento. O objetivo consiste em estimular o desejo do consumidor e não permitir que o mesmo adquira o material cerâmico somente em função de suas características tradicionais, relativas à limpeza e higiene (VIVONA, 2000). Dessa forma, a indústria propicia a utilização da cerâmica como elemento de decoração, oferecendo ao mercado soluções diferenciadas e particulares, que permitem ao usuário compor ambientes personalizados.

Por outro lado, a busca de novos nichos de mercado precisa ser acompanhada de informações quanto ao comportamento dos materiais em uso. O comportamento de um material em utilização é dado por seu desempenho. Conforme o Centro de Tecnologia de Edificações (1994), a correta identificação das necessidades dos clientes em termos de desempenho consiste num dos aspectos que definem a qualidade de um projeto. Tais necessidades estabelecem as funções a que o material deverá responder ao longo da sua vida útil.

A definição de um período mínimo de tempo no qual os materiais e as construções devem mostrar-se satisfatórios não é explicitada na maioria dos códigos e normas. Desta forma, vigoram os prazos estabelecidos pelo Código de Defesa do Consumidor e Código Civil. Isso não impede, todavia, que problemas aconteçam, pois os fabricantes, em geral, não dispõem de dados seguros para desenvolver seus produtos e disponibilizar informações relativas à durabilidade. Neste sentido, Enrique et al. (1996) registram a ausência de conhecimento quanto à durabilidade das placas cerâmicas quando expostas a reais condições de utilização. Permanece válida, portanto a colocação de Frohnsdorff e Masters (1980), de que a falta de métodos confiáveis, que permitam avaliar o desempenho em uso dos produtos utilizados na construção, consiste em uma forte barreira ao desenvolvimento de inovações tecnológicas. Os autores observam, por outro lado, que a crescente pressão da indústria da construção em utilizar novos produtos aumenta a necessidade de desenvolver uma sistemática de avaliação de desempenho.

Paralelamente a isso, o período de 5 anos mostra-se insuficiente para uma parcela significativa de usuários, especialmente aqueles cujas obras são de maior responsabilidade. A situação se agrava por tratar-se de revestimentos cuja forma de fixação envolve aderência mecânica, onde a substituição, em caso de manifestações patológicas, gera transtornos significativos em termos de sujeira e paralisação de atividades. De forma a oferecer maior segurança aos especificadores, alguns fabricantes têm oferecido garantia por períodos de 20 ou 25 anos. No entanto, esta baseia-se em decisões comerciais, sem apoio técnico.

Com efeito, Clifton (1990) coloca que estimativas baseadas na experiência passam a ser insuficientes quando se espera uma vida útil superior à de costume, quando se apresentam novos ambientes ou ainda, quando se altera a constituição do material.

Do ponto de vista do usuário, a durabilidade de uma cerâmica para piso está essencialmente relacionada à alteração do seu aspecto visual original, pois este se constitui em um material de revestimento. A especificação inadequada pode conduzir a um comportamento deficiente na medida em que diversas propriedades manifestam-se como efeitos de superfície. Este é o caso da resistência química, resistência a manchas, risco, resistência à abrasão. Cabe ressaltar que a insuficiência de alguma das propriedades pode tornar o material mais susceptível a ações de deterioração, reduzindo-lhe a vida útil de forma acelerada. Este é o caso, por exemplo, da limpabilidade, que pode ser profundamente afetada pela ação abrasiva.

A estimativa de vida útil constitui-se em um estudo complexo, que deve incluir os diferentes fatores de deterioração presentes nas situações reais de utilização. No caso de placas cerâmicas esmaltadas para revestimento de piso, parece consenso na bibliografia que o principal problema de deterioração consiste no desgaste decorrente de um processo abrasivo.

No atual estágio de conhecimento não se dispõe de um método que disponibilize informações quantitativas a respeito da durabilidade de placas cerâmicas sujeitas ao trânsito de pessoas. Os modelos de desgaste apresentados na revisão bibliográfica recebem diversas críticas por não representarem adequadamente as situações reais às quais os materiais são submetidos, de forma que as respostas representem satisfatoriamente seu comportamento. De qualquer forma, estes métodos não visam apropriar a vida útil do material, mas otimizá-lo a partir de análises comparativas. Excetua-se o equipamento denominado Tribopodo (BARBERA et al., 1996), cujo estudo todavia não foi concluído.

1.2 OBJETIVOS

A tese tem como objetivo de estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas, quando expostas à condição reais de utilização sob o tráfego de pessoas, através da modelagem do seu comportamento quando submetidas a um processo abrasivo.

Como objetivos secundários, pode-se citar os seguintes:

- a) propor um método de ensaio que permita aplicação variável de carga e a inserção de diferentes concentrações de agente abrasivo;

- b) definir um material abrasivo capaz de produzir efeitos adequados em termos de severidade do desgaste e tempo;
- c) propor indicadores de desempenho que interpretem o fenômeno da abrasão do ponto de vista da variação da aparência;
- d) selecionar dentre os indicadores de desempenho aqueles que melhor representam o comportamento de placas cerâmicas quando submetidas a um processo abrasivo;
- e) definir um fator de aceleração que estabeleça a relação entre os efeitos do desgaste real, considerados através de um estudo de caso, e os resultados obtidos através de ensaios em laboratório.

1.3 HIPÓTESE

A presente pesquisa baseia-se na hipótese de que a estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas pode ser feita através de ensaios desenvolvidos em laboratório, que representem de forma acelerada o fenômeno que ocorre em condições reais de utilização.

1.4 PRESSUPOSTOS

O desenvolvimento da pesquisa baseia-se em dois pressupostos:

- a) a abrasão representa o modo de falha decorrente do tráfego de pessoas em pisos cerâmicos esmaltados, dentre os mecanismos citados na revisão bibliográfica associados ao desgaste. Outros fenômenos poderão estar atuando conjuntamente para intensificar a deterioração do material como, por exemplo, a ação de produtos químicos, porém serão desconsiderados;
- b) a vida útil dos revestimentos cerâmicos esmaltados é definida como o período de tempo em que o revestimento mantém sua aparência original. No presente trabalho, esta definição é restrita à abrasão. Outras manifestações também

reveladas visualmente, como manchamento, ruptura por flexão, lascamento por impacto, se prevenidas através de adequada especificação, não devem ocorrer em nenhum momento da vida do revestimento, portanto serão desconsideradas.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Relacionam-se, a seguir, as limitações relativas ao estudo proposto:

- a) não buscou definir como aumentar ou alcançar determinada vida útil, mas sim fornecer parâmetros que permitissem estimá-la;
- b) restringiu-se ao desgaste provocado pelo tráfego de pessoas;
- c) baseou-se em um único estudo de caso para definir a relação entre os efeitos do desgaste produzidos em condições reais de utilização e os resultados dos ensaios em laboratório;
- d) não contemplou os efeitos provocados na aparência do material resultantes da ação de produtos químicos ou manchantes, conjunta à ação abrasiva;
- e) considerou placas cerâmicas monocromáticas e sem disseminação de cores.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DURABILIDADE

Os materiais tendem a sofrer algum tipo de alteração na medida em que são expostos à ação do meio no qual se encontram, seja de origem química, física ou biológica. Os aspectos particulares de cada ambiente estabelecem diferentes níveis de agressividade, os quais, associados à resistência do material às diversas ações, determinarão a durabilidade deste. Assim, a durabilidade não corresponde a uma propriedade intrínseca dos materiais, mas dependente do ambiente em que se encontram, variável conforme o seu grau de agressividade.

Na medida em que pouco se dispõe de dados quantitativos, a durabilidade dos materiais e componentes utilizados nas obras de construção civil costuma ser contemplada nos projetos a partir do bom-senso, considerando-se o comportamento dos mesmos em experiências anteriores, e analisando-se comparativamente a severidade das condições de exposição (ADDLESON e RICE, 1994). Dessa forma, um material é dito durável se mantém seu desempenho por um período de tempo considerado adequado, estando submetido às condições de agressividade previstas. Se exposto a um maior nível de agressividade, espera-se uma redução no período de tempo em que mantém seu desempenho, ou seja, apresentará menor durabilidade.

Este enfoque está de acordo com a definição apresentada pela ASTM E 632-82 (1996) na qual a durabilidade consiste na capacidade de um produto, componente ou construção em manter o desempenho das funções para as quais foi projetado acima de determinado período de tempo. Interessante observar a menção explícita que relaciona o comportamento em uso com o cumprimento de funções. Quando da especificação de placas cerâmicas para revestimentos, o entendimento de que a cerâmica deve satisfazer a determinadas funções e a definição de quais seriam estas funções é essencial, pois permite selecionar dentre as diferentes propriedades, aquelas importantes para determinada situação.

Conforme Sabbatini (198-), as funções dos revestimentos são as seguintes:

- proteger os elementos de vedação dos edifícios;
- auxiliar as vedações no cumprimento de suas funções, tais como isolamentos térmico e acústico, estanqueidade à água e aos gases, segurança ao fogo, entre outras;
- regularizar a superfície dos elementos de vedação e;
- constituir o acabamento final cumprindo funções relacionadas à estética, à valorização econômica e com o uso da edificação (sanidade, higiene, segurança, entre outras).

Sob este enfoque, um revestimento cerâmico mantém-se durável enquanto satisfaz ao grupo de funções estabelecidas. Cabe observar que as placas cerâmicas compõem o revestimento juntamente com as juntas e as camadas argamassadas sobrepostas à alvenaria e, as três funções iniciais, denotam claramente a participação conjunta de todos os componentes. A última função, todavia, evidencia a maior participação das placas cerâmicas, como material propriamente dito, na durabilidade do revestimento.

No caso de pisos cerâmicos submetidos ao trânsito de pessoas, pode-se dizer que a durabilidade está relacionada a aspectos estéticos e de uso. Dessa forma, das funções citadas, sobressai-se a questão da segurança de utilização, relacionada ao escorregamento, e o aspecto visual. Com efeito, os revestimentos constituem, juntamente com outros itens, o acabamento das construções. Portanto, têm grande importância na definição do padrão do edifício, na valorização econômica do bem e nas características estéticas do conjunto. Os aspectos estéticos formam a imagem da edificação, constituem aquilo que os clientes vêem. Os revestimentos, juntamente com o tamanho dos ambientes, a localização do imóvel, a presença de elevador, o número de vagas na garagem entre outros, são usados pelos clientes subjetivamente para apropriar o valor do imóvel. Os mesmos tendem a estabelecer uma relação de aceitação ou rejeição quanto à compra a partir do equilíbrio entre o valor atribuído por ele e o valor cobrado.

Os problemas de durabilidade relacionados aos revestimentos cerâmicos, em sua maioria, decorrem de situações de especificação inadequada, situações cujas propriedades do material, em tipo e/ou magnitude são insuficientes ao nível de agressividade real. Neste caso, é de se esperar o comprometimento de uma ou várias das funções do revestimento ao longo do tempo. Há de se destacar que, em certas situações, a má especificação pode ser conseqüência da insuficiência de dados precisos, que representem de forma segura as condições de

exposição ou ainda, que representem adequadamente as propriedades do material. Também, alterações no uso dos ambientes podem determinar mudanças significativas na severidade das agressões.

Com frequência, a especificação do material cerâmico para revestimentos reduz-se a decisões relativas à tipologia como padronagem, formato e dimensões. A durabilidade é considerada de forma implícita, como se fosse a cerâmica um material intrinsecamente durável. Normalmente, o único parâmetro utilizado para a especificação do material, no sentido de adequá-lo às condições de utilização, consiste na resistência à abrasão, sendo, em geral, esta conduta adotada tanto por especificadores quanto por proprietários. Em verdade, a própria indústria cerâmica trata o processo de especificação dessa maneira na medida em que difunde amplamente a resistência à abrasão e pouco divulga outras propriedades. A relação entre as classes PEI e os ambientes de utilização constam na maioria dos informativos técnicos e, inclusive, faz parte da norma ISO 10545-7. Estes exemplificam diversas situações de uso, onde os ambientes domésticos correspondem, basicamente, às classes I, II e III e os ambientes comerciais e de serviços, às classes IV e V. Naturalmente, a classificação dos ambientes comerciais e de serviços permite um detalhamento bem superior comparativamente às duas classes disponíveis de resistência à abrasão. Os ambientes podem ser relacionados a diversas intensidades de tráfegos e associados aos mais variados tipos e níveis de agentes agressivos. Dessa forma, ilustra-se o quão pobre é o processo de especificação na prática. Complementarmente, os informativos técnicos de diversos fabricantes apresentam recomendações quanto a medidas de proteção à ação abrasiva, por exemplo, através do uso de capachos em portas de acesso.

De qualquer maneira, parece sempre estar implícito que, respeitando-se as recomendações, o material vai manter-se durável por um período de tempo considerado satisfatório. Os insucessos, no entanto são muitos e, de certa forma recentes, pois em sua maioria decorrentes da já mencionada ampliação dos ambientes em que se utilizam revestimentos cerâmicos, o que traz à tona a clara dissociação entre o uso e as especificações, conforme cita Navarro (1997). Este autor alerta para a complexidade da situação na medida em que a durabilidade das placas depende da sua correta especificação, todavia, a ausência de dados adequados impede a sua viabilidade.

Percebe-se que a partir da década de 90 alguns trabalhos (FELÍU et al., 1990; NAVARRO, 1997; ENRIQUE et al., 1996; BARBERA et al., 1996) 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. Conforme Addleson e Rice (1994), razões econômicas exigem que os materiais sejam classificados com respeito à sua durabilidade, o que gera a necessidade de definir-se a vida útil.

2.1.1 Vida útil

Os conceitos de vida útil e durabilidade se distinguem, fundamentalmente, na maneira de considerar o tempo. De acordo com a ASTM E 632-82 (1996), a vida útil de um material ou componente consiste no período de tempo após a instalação durante o qual todas as propriedades excedem valores mínimos aceitáveis quando mantidos de maneira rotineira. Portanto, pode-se dizer que vida útil consiste na quantificação da durabilidade.

O Comitê *Euro-Internacional du Beton* (1997) é mais específico em definir vida útil ao enfatizar o cumprimento de funções: entende-se por vida útil de um material ou componente, o período de tempo em que é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetado. O conceito da ASTM E 632-82 (1996) poderia ser entendido da mesma forma se fossem atribuídos valores mínimos, ou mesmo zero, às propriedades não relacionadas à funcionalidade.

Aplicando-se aos revestimentos cerâmicos e considerando-se as funções mencionadas anteriormente, o problema da estimativa da vida útil consiste em determinar o tempo que se dispõe até que os fatores de segurança e aspectos visuais sofram alteração em relação ao estado original. A relação da vida útil com o 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 deste desgaste.

Em obras de construção civil, naturalmente o nível de exigência em termos de vida útil é diferenciado ao tratar-se de um material ou componente com ou sem função estrutural. Esta

distinção baseia-se fundamentalmente na possibilidade destes últimos serem removidos sem afetar a integridade estrutural da construção. Carruthers (1980) lembra que prazos diferenciados não estão associados a aspectos de segurança, pois alguns componentes não estruturais assumem importância considerável, como painéis de fechamento, janelas, balustradas. No caso de materiais ou componentes não estruturais, a importância em definir-se vida útil também é variável. Normalmente, aqueles de maior custo ou que implicam em maiores transtornos para substituição ou manutenção, ou ainda de maior valor agregado, são os mais exigidos.

Apesar destas considerações, constata-se que estimar a vida útil permanece como forte tema de debate também na área de estruturas de concreto armado. O Comitê *Euro-Internacional du Beton* (1997) enfatiza a importância da durabilidade ao indicar que a mesma deve ser tratada de forma explícita quando da elaboração de projetos. No caso das normas brasileiras, não há especificação da vida útil, mas conforme Helene (1997), parece estar subentendido 50 anos. De qualquer maneira, este autor comenta que em obras de caráter permanente poderão ser adotados períodos de 50, 75 ou até mais de 100 anos, conforme recomendado por algumas normas internacionais. O *British Code*, em particular, indica 120 anos para pontes e 10 anos para construções rurais, entre outras indicações (CEB, 1992).

Outro exemplo, é o caso dos tijolos e blocos para construção. A norma ASTM C 902-95 (1995) cita que a resistência dos mesmos ao intemperismo não pode ser estabelecida com segurança no atual estágio de conhecimento e que o melhor indicador da durabilidade neste caso são os registros de utilização, ou seja, a experiência.

Em se tratando de obras particulares, o Centro de Tecnologia de Edificações (1994) coloca que quem deve definir a vida útil é o proprietário da edificação, orientado pelo profissional responsável pela especificação. Sem dúvida, períodos mínimos devem ser respeitados.

Para Ford (1996), no caso de revestimentos cerâmicos, a expectativa dos clientes reflete tendências culturais. Regiões menos consumistas tendem a esperar produtos mais duráveis. Observa-se que a vida útil esperada varia também em função do tipo de construção. Conforme Carruthers (1980), para os materiais em geral, a aceitação da deterioração é significativamente superior em construções industriais e rurais. Provavelmente, esta maior ou menor tolerância reflita o conceito da edificação, a imagem associada ao prestígio da obra.

Ainda, a vida útil deve ser coerente com o tipo de atividade realizada no ambiente e adequada ao caráter mais ou menos provisório do empreendimento.

Interessante observar que a possibilidade de intervenções periódicas, a título de manutenção durante o ciclo de vida da construção, são normalmente previstas ao se tratar de estruturas de concreto armado. No caso dos revestimentos cerâmicos, o conceito de manutenção não parece adequado uma vez que não existem intervenções periódicas que restabeleçam a condição inicial, sendo a única alternativa sua substituição.

2.1.2 Modelagem da vida útil

Entende-se que o estudo da estimativa de vida útil de materiais ou componentes pressupõe o estudo da durabilidade na medida em que há necessidade de conhecer o processo natural de envelhecimento antes de tentar mensurá-lo. Como a durabilidade sempre está inserida num contexto, pois não se constitui em uma propriedade intrínseca dos materiais, mas relativa, conhecer o processo de envelhecimento consiste em conhecer os seguintes elementos:

- os mecanismos de envelhecimento, ou seja, os fenômenos que geram mudanças nas características e propriedades dos materiais ao longo do tempo;
- o material, quanto a sua resistência aos diferentes agentes agressivos;
- os ambientes, quanto ao seu grau de agressividade, envolvendo agentes físicos, químicos ou biológicos.

A vida útil resulta do equacionamento entre o grau de agressividade do ambiente e a resistência do material, onde ambos devem ser conhecidos, avaliados e classificados (HELENE, 1997). A classificação dos ambientes, quanto ao seu grau de agressividade, e dos materiais, quanto a sua resistência, permite estabelecer relações de adequação, fazendo com que a especificação se dê com base em critérios definidos.

Ambas as classificações, todavia, se estabelecidas a partir de condições reais objetivas, não são simples e exigem conhecimento sobre os mecanismos de envelhecimento. Estes

mecanismos permitem distinguir, dos agentes presentes nas situações reais, aqueles que podem ser classificados como agressivos e ainda, o grau de agressividade relativa entre eles. Da mesma forma, possibilitam conhecer as diferentes resistências do material, classificando-o como mais ou menos durável sob determinadas condições de exposição. Cabe salientar que não somente aspectos negativos estão associados ao processo de envelhecimento, no entanto, quando o objetivo consiste em estimar vida útil, busca-se estudar os aspectos relacionados à degradação ou deterioração de um material ou componente.

Conforme Clifton (1990), a previsão da vida útil pode ocorrer através dos seguintes métodos:

- com base em experiências anteriores;
- através de métodos deterministas;
- através de métodos estocásticos ou probabilistas;
- com base em ensaios acelerados.

O primeiro método consiste numa avaliação subjetiva, com base em experiências passadas. Normalmente, o material é referido como **durável** ou **não durável**, porém também se pode apropriar o tempo de forma comparativa. O enfoque proposto é de que o material deverá responder de forma satisfatória por um tempo considerado adequado.

Os métodos deterministas consistem em prever a evolução da deterioração ao longo do tempo através de um ou vários modelos de comportamento, obtidos através de processos químicos e físicos de deterioração. Já os métodos estocásticos são considerados por Helene (1997) como os mais avançados e realísticos. Estes trabalham com distribuições de probabilidade, teoria das falhas e o conceito de risco associados aos modelos de comportamento. Outra forma de conduzir o problema consiste em utilizar ensaios de envelhecimento acelerado. Busca-se, através destes ensaios, obter informações a respeito da durabilidade de um material em período de tempo significativamente inferior do que se fora avaliado em condições reais de uso.

A escolha de um método em muito está relacionada ao estágio de conhecimento de cada área. A intenção sempre é a de obter dados que representem, da forma mais fiel possível, o

processo de envelhecimento real, porém justamente esta é a maior dificuldade ao se trabalhar com vida útil. Dessa forma, cada método implica que sejam analisados e estimados os erros resultantes das simplificações adotadas, comparando-se às situações reais.

Com este enfoque, Frohnsdorff e Masters (1980) colocam que a estimativa de vida útil é complexa e apresenta muitas fontes de erro. Estes erros são provavelmente minimizados quando a natureza do material ou componente está bem definida, quando as condições de uso estão bem caracterizadas e quando há um bom conhecimento quanto aos mecanismos de deterioração. Conforme Helene (1997), definir um método para estimativa de vida útil consiste em uma das etapas de gerir o problema da durabilidade.

2.1.3 Os ensaios acelerados

A norma ASTM E 632-82 (1996), introduzida em 1978, 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.

Na medida em que um dos objetivos de um ensaio acelerado é disponibilizar dados relativos à durabilidade de um material ou componente em período de tempo significativamente menor do que se fora avaliado em condições normais de serviço, este não pode incorrer na deformação dos fenômenos reais de envelhecimento. Farhi (1980) e Frohnsdorff e Masters (1980) são enfáticos neste aspecto quando colocam que a intenção é sempre encurtar o ensaio tanto quanto possível, todavia, os resultados sempre devem ser validados frente ao fenômeno original. Com o mesmo propósito, relativamente aos fatores de deterioração, todos aqueles que são importantes devem ser incluídos nas condições de exposição. Deve-se garantir, todavia, que os níveis extremos adotados para estes fatores não resultem em mecanismos de deterioração que não foram observados em condições reais (ASTM E 632-82, 1996).

Com efeito, Martin e McKnight (1985) colocam que a dificuldade está na seleção dos fatores de deterioração e no regime de tensão a partir do qual se obtém resultados satisfatórios. Um exemplo disso é a elevação da temperatura acima dos níveis de serviço. Neste caso, a aceleração deriva da intensidade e não da frequência, cujas implicações sobre o fenômeno devem ser avaliadas.

Um fator de deterioração consiste em um agente externo que afeta desfavoravelmente o desempenho dos materiais e componentes, incluindo o intemperismo, fatores biológicos, cargas, incompatibilidades e fatores de uso, conforme a tabela 2.1. Cabe lembrar que o efeito da sobreposição de fatores de deterioração pode ser mais significativo do que o somatório dos efeitos individuais.

Tabela 2.1: fatores de deterioração que afetam a vida útil dos componentes e materiais de construção (ASTM E 632-82, 1996)

Fatores de Deterioração	Detalhamento dos Fatores de Deterioração
Intemperismo	Radiação solar, térmica, nuclear
	Temperatura elevada, cíclica
	Água no estado sólido, líquido ou gasoso
	Constituintes do ar
	Contaminantes (gases, particulados)
	Vento
Biológicos	Microorganismos
	Fungos
	Bactérias
Tensão	Carregamentos, ação cíclica da água, ação cíclica dos ventos, movimento de veículos, etc.
Incompatibilidades	Químicas, físicas
Uso	Abuso do usuário, desgaste normal

A ASTM E 632-82 (1996) indica a realização de um pré-teste para avaliar se rápidas mudanças no comportamento do material podem efetivamente ser produzidas através dos níveis de exposição considerados no ensaio. Como informação adicional, permite a demonstração de que os fatores de deterioração identificados são efetivamente aqueles que causam o comprometimento do material; ainda, o estabelecimento de níveis hierárquicos para os fatores de deterioração e a definição dos mecanismos através dos quais as propriedades mudam. De qualquer forma, a estimativa do comportamento de um material em serviço por longo período de tempo está sujeita a inúmeras dificuldades pelas seguintes razões (ASTM E 632-82, 1996):

- os mecanismos de deterioração são complexos e raramente bem compreendidos;

- os fatores externos que afetam o desempenho são numerosos e difíceis de quantificar, por isso os muitos métodos acelerados existentes não incluem todos os fatores importantes e aqueles incluídos raramente são referidos quantitativamente;
- os materiais são freqüentemente testados em configurações diferentes daquelas existentes quando em serviço.

Considerando-se o estágio atual de conhecimento, dificilmente consegue-se estimar vida útil sem que a mesma esteja focada em determinado fenômeno ou grupo limitado de fenômenos, e também em determinado fator de deterioração ou grupo de fatores de deterioração. Desta forma, a estimativa de vida útil através de ensaios acelerados, sempre será parcial, considerando os principais, porém não a totalidade de fenômenos que podem conduzir ao envelhecimento de um material ou componente.

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. Em geral, a relação não é linear e pode ser extraída a partir de modelos matemáticos (ASTM E 632-82, 1996). 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 deste ambiente em relação às condições do ensaio de envelhecimento natural, cujos resultados são utilizados para obter as relações de calibração.

Os resultados provenientes de um ensaio acelerado também poderão ser analisados por comparação, sem compromisso com a quantificação da durabilidade. A própria ASTM E 632-82 (1996) coloca que análises comparativas entre resultados, quando os materiais são expostos a condições idênticas de ensaio, consistem em uma alternativa. Com efeito, observa-se a existência de muitos ensaios cuja interpretação dos resultados ocorre dessa forma e a durabilidade é estimada subjetivamente.

2.2 O DESGASTE DE MATERIAIS

O desgaste dos materiais consiste em um processo de deterioração ao longo do tempo. A variável tempo denota claramente a relação com a vida útil, onde o seu término pode ser balizado pelo início ou a partir de determinado nível de desgaste. Dessa forma, o desgaste consiste em um dos aspectos da durabilidade dos materiais.

A ação do tempo poderá ser extremamente variável na medida em que os materiais estão expostos a condições distintas de agressividade, mais ou menos severas. Aparentemente, quando a deterioração do material passa a manifestar-se após o mesmo ter cumprido adequadamente suas funções por um período de tempo considerado satisfatório, sob condições de exposição previstas como normais, recebe a denominação envelhecimento. De qualquer maneira, a deterioração parece estar relacionada a mudanças não desejáveis.

2.2.1 O fenômeno do desgaste

A partir da classificação de Schackelford (1999), verifica-se que o desgaste configura um dos quatro mecanismos de deterioração dos materiais, em paralelo ao químico, eletroquímico e provocado por radiação.

O desgaste consiste na perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a uma ação mecânica proveniente do contato e movimento relativo contra um agente sólido, líquido ou gasoso (DIN 50320 apud IBÁÑEZ, 1998). A definição proposta pela DIN 50320 abrange alguns aspectos, listados a seguir, muitas vezes mencionados independentemente por diferentes autores (SCHACKELFORD, 1999; IBÁÑEZ, 1998; GROOVER, 1996).

- envolve a remoção de material;
- consiste em um processo mecânico;
- apresenta caráter progressivo;
- exige movimento relativo entre materiais ou superfícies.

Com base nestas premissas, fica claro que o processo de desgaste em revestimentos de piso tem início assim que o mesmo é concluído e não somente quando exposto ao uso, considerado como o trânsito de pessoas no sentido estrito de sua função. A ação ambiental, através do movimento de partículas devido ao vento e à água, eventualmente presente sobre o revestimento, inicia o processo. Normalmente, as ações ambientais configuram situações de menor importância comparativamente à presença de pessoas em movimento, que provocam a penetração e o arraste de partículas.

O caráter progressivo do desgaste evidencia a importância do tempo no processo de deterioração e permite compreender que, além de tratar-se de uma propriedade dependente das condições de agressividade do meio, sofre alterações sucessivas não necessariamente lineares.

2.2.2 Mecanismos de desgaste

Diversos são os mecanismos identificados na literatura através dos quais o desgaste se manifesta. Estes procuram descrever as condições através das quais ocorre a perda de material. Ibáñez (1998), com base na DIN 50320, coloca que o desgaste pode decorrer de quatro mecanismos básicos, atuando isolada ou conjuntamente, denominados desgaste adesivo, abrasão, fadiga e reação triboquímica.

Khrushov, em 1974, citou os mesmos mecanismos apresentados por Ibáñez em 1998, chamando o último de mecânico-corrosivo. Groover (1996) menciona também quatro mecanismos principais, no entanto ao invés de fadiga inclui difusão. Difusão caracteriza-se como transferência de massa em metais sob altas temperaturas. A seguir, apresenta-se uma breve descrição dos principais mecanismos citados:

- **adesão:** decorre da proximidade entre duas superfícies, sendo estabelecida entre asperezas adjacentes através de forças interatômicas de curto alcance. Estas asperezas, ao deslizarem umas em relação às outras, provocam a remoção de fragmentos. O desprendimento de partículas é explicado em vista de que normalmente, o contato entre os dois materiais gera ligações mais fortes do que as presentes no material de base (SCHACKELFORD, 1999; GROOVER, 1996; TIER, 1998);

- **fadiga**: decorre da ação de cargas cíclicas, as quais provocam a formação de trincas superficiais ou sub-superficiais e a conseqüente remoção de material (IBÁÑEZ, 1998; SCHACKELFORD, 1999);
- **químico**: Schackelford (1999) denomina desgaste corrosivo quando o deslizamento entre superfícies se dá em meio corrosivo e a deterioração química se soma aos efeitos físicos do desgaste. Ibáñez (1998) denomina reação triboquímica quando há formação de produtos como resultado de reações químicas entre os elementos de um sistema abrasivo;
- **abrasão**: no item 2.3 aborda-se especificamente a abrasão, onde se verifica que o conceito de movimento relativo entre um material mais duro e outro mais macio está presente na maioria das definições. Os autores fazem referência à participação de irregularidades presentes na superfície dos materiais.

Schackelford (1999) inclui ainda mais dois mecanismos de desgaste: **erosão**, onde um fluxo de partículas pontiagudas conduz a um desgaste semelhante à abrasão; e **cavitação**, onde há presença de bolhas superficiais. Estes, erosão e cavitação, também são mencionados por Noble, conforme Tier (1998), totalizando seis mecanismos.

Para Bergmann et al. (1994a), erosão refere-se ao efeito gerado pelo choque sucessivo de partículas presentes em um fluido em movimento contra uma superfície. Estes pesquisadores mencionam ainda o desgaste por **impacto**, onde choques sucessivos ao longo do tempo conduzem à fratura do material. Para materiais frágeis, a situação mais desfavorável consiste em ângulos próximos a 90°. Para baixos ângulos de incidência, o mecanismo aproxima-se da abrasão.

A incidência dos diferentes mecanismos de desgaste depende das condições mecânicas presentes, ou seja, do tipo de contato que se estabelece entre os corpos (GROOVER, 1996). Meng e Ludema (1995) detectaram na bibliografia significativa variação quanto ao significado dos termos relativos ao desgaste. Este fato é considerado como uma das causas de lentidão no estudo deste assunto, pois dificulta e, muitas vezes impede, a utilização de conhecimentos preexistentes devido à falta de unidade quanto à definição de conceitos. Possivelmente, o fato de que o desgaste pode ocorrer simultaneamente através de vários mecanismos aumenta a complexidade e gera certa confusão entre os trabalhos desenvolvidos.

Para Bergmann et al. (1994b), um único tipo de mecanismo de desgaste raramente ocorre na prática, havendo mais comumente a sobreposição de mecanismos.

Na opinião de Amin (1991), a dificuldade quanto à abordagem do desgaste tem como uma das razões o fato de que não se constitui em uma propriedade do material, mas resulta de um sistema, conhecido como sistema tribológico. Nesse sentido, Weinstein (1991) menciona que o processo de desgaste vai sempre estar condicionado à combinação de três aspectos independentes, os quais configuram o sistema tribológico, quais sejam:

- as características e propriedades do material solicitado ao desgaste;
- as características e propriedades do material em contato com o material que sofre o desgaste;
- a natureza e severidade da interação entre ambos.

Cabe distinguir, no sistema a três corpos, os aspectos relativos ao corpo em movimento sobre o piso e os aspectos relacionados com o material intermediário. O primeiro envolve o tipo de material que realiza o contato (solados dos calçados), o carregamento (peso da pessoa), a dinâmica do movimento (velocidade, forma de andar, ângulo de arraste) e o tráfego (número de pessoas). O segundo envolve os diferentes tipos de materiais e as suas respectivas concentrações, por exemplo, areia, materiais argilosos, água.

Enrique et al. (1995) compõem o sistema tribológico especificamente para situações de abrasão em que o material cerâmico é exposto ao tráfego humano, através das seguintes variáveis:

- um corpo sólido, caracterizado pela placa cerâmica;
- um corpo que realiza o movimento, caracterizado como a sola do sapato;
- um elemento interfacial que, em geral, decorre da sujeira presente sobre o piso;
- o ambiente, normalmente ar e/ou água;
- a interação entre os elementos em função de aspectos particulares, como o peso da pessoa, tipo de movimento, tipo de sola do sapato, tipo de sujeira.

Considera-se fundamental que o sistema tribológico seja considerado da forma mais completa possível quando o objetivo consiste em estimar a vida útil de um revestimento cerâmico. Justamente, este sistema estabelece as condições de utilização do material, relacionadas tanto ao agente abrasivo quanto ao ambiente em que o material se encontra. Em verdade, a discrepância entre as condições reais e as condições teóricas previstas em um ensaio ou em um modelo, constituem a grande dificuldade em se obter resultados realísticos.

2.2.3 Fratura

Tendo em vista que o desgaste representa perda de matéria, com frequência utiliza-se a fratura para a interpretação do fenômeno. Kanninen e Popelar (1985) citam a Mecânica da Fratura como um processo evolutivo da Teoria da Elasticidade e da Teoria de Griffith para modelar este comportamento. A fratura, ou seja, a separação de um material em duas ou mais partes, normalmente é caracterizada como frágil ou dúctil.

As cerâmicas esmaltadas apresentam em sua superfície um material de natureza vítrea constituído essencialmente de fritas. Estas se caracterizam como materiais amorfos e completamente frágeis devido à presença das fortes ligações covalentes e à insuficiência de sistemas de escorregamento independentes, de forma a possibilitar certa plasticidade (QUINN, 1991). Normalmente, a espessura da face esmaltada varia entre 150 μm e 500 μm (MANFREDINI e PELLACANI, 1991). Sánches (1997), por outro lado, cita limites mais estreitos, de 200 μm a 300 μm .

A Teoria da Elasticidade fornece bases sólidas ao encaminhamento de um projeto estrutural, porém não permite explicar a diferença entre a resistência teórica e a resistência real de um material. Griffith foi o primeiro a propor uma explicação para este comportamento ao considerar a existência de trincas na superfície de materiais totalmente frágeis (HAYDEN et al., 1964). Quinn (1991) coloca que a fratura frágil de materiais linearmente elásticos pode ser modelada tanto através da Teoria de Griffith quanto pela Mecânica da Fratura. No entanto, os cientistas de materiais tendem a adotar a energia criada por unidade de área, baseada na Teoria de Griffith; enquanto os projetistas e engenheiros preferem a tenacidade, enfocada através da Mecânica da Fratura, dada sua versatilidade matemática em analisar tensões.

Griffith parte do princípio de que nos materiais existem inúmeras trincas microscópicas de forma elíptica e que na ponta de cada uma delas há elevada concentração de tensões. A fratura tem início quando a energia livre excede a energia requerida para o crescimento da trinca (RITTER, 1991). Ao iniciar a propagação da trinca, energia elástica é liberada, porém energia superficial é ganha devido à nova superfície criada. Hove e Riley (1965) comentam que, uma vez ultrapassado o tamanho crítico, o sistema passa a dispor de energia mais do que suficiente para manter o crescimento da trinca até a completa fratura do material. A existência de defeitos reduz a resistência do material à fratura sendo que a tensão necessária para a ocorrência da fratura é inversamente proporcional à extensão das trincas existentes. Desta forma, a resistência à tração de um material completamente frágil é determinada pelo comprimento da maior trinca existente antes do carregamento.

A base conceitual da Mecânica da Fratura também prevê a existência de defeitos no material. Um defeito principal, sob carregamento externo, concentra tensões as quais conduzem à propagação de uma trinca e a conseqüente ruptura do material (KANNINEN e POPELAR, 1985). A Mecânica da Fratura permite determinar a tensão que dá início à trinca, as condições de crescimento da mesma e as condições de propagação estática (RITTER, 1991).

Os chamados defeitos podem ser intrínsecos ou extrínsecos. Os primeiros dizem respeito à microestrutura dos materiais e apresentam-se na forma de poros, inclusões, grãos de grandes dimensões, contornos de grão. Os segundos, são resultantes de manuseio inadequado ou de algum tipo de acabamento superficial, apresentando-se na forma de trincas ou riscos (RITTER, 1991). Do ponto de vista da Mecânica da Fratura, não importa a origem dos defeitos, todos representam situações de acúmulo de tensões (KANNINEN e POPELAR, 1985). Os defeitos críticos nos materiais cerâmicos são da ordem de $10\mu\text{m}$ a $20\mu\text{m}$ (RITTER, 1991). Isso se deve à baixa tenacidade destes materiais, resultante da pequena deformação plástica antes da ruptura (IBÁÑEZ, 1998).

O enfoque da Mecânica da Fratura para explicar a ruptura de materiais frágeis parece ser de consenso na bibliografia. Com efeito, Yamamoto et al. (1994) colocam que a maior parte dos modelos de desgaste propostos baseiam-se em mecanismos de fratura, ou seja, que ocorre remoção de material na medida em que trincas interconectam-se umas às outras e se propagam pela superfície. Justamente, Bar-On (1991) menciona a união progressiva de vários pequenos defeitos.

O principal parâmetro considerado nesta Teoria consiste no fator de intensidade de tensão, K . Este expressa o efeito da geometria e do comprimento da trinca sobre a distribuição de tensões, conforme a equação 2.1.

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{a} \quad (\text{equação 2.1})$$

onde, a corresponde ao tamanho da trinca; σ à tensão aplicada e Y é o fator de forma, que busca descrever o efeito das diferentes geometrias de trinca, função do seu comprimento, a , pela largura do corpo-de-prova, W , conforme a figura 2.1.

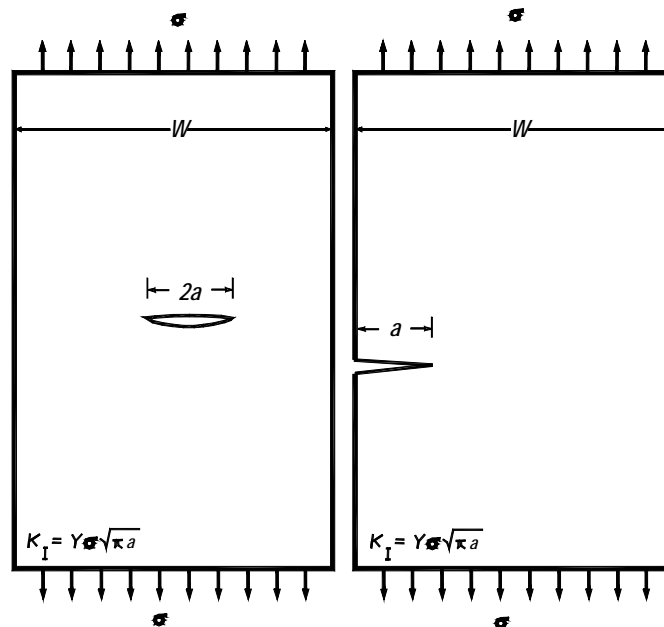


Figura 2.1: posicionamento da trinca no centro e na superfície de um corpo sujeito à tensão uniformemente distribuída (BAR-ON, 1991)

De acordo com Quinn (1991), Y descreve a severidade do defeito, portanto está relacionado à proximidade deste à superfície e à posição relativa à distribuição de tensões. Ritter (1991), todavia, faz algumas considerações a respeito das dificuldades associadas à utilização da equação 2.1, como segue:

- o modelo proposto considera que a tensão de tração posiciona-se perpendicular ao pior defeito; no entanto, nem sempre se verifica esta situação e, embora várias teorias tenham sido propostas quanto à combinação de carregamentos, nenhuma é amplamente aceita;
- os defeitos apresentam normalmente configurações complexas, além de espaciais, enquanto o modelo proposto baseia-se em um conceito bidimensional;
- existe uma tensão residual em torno do defeito, resultante de outros fatores, que se soma ao esforço aplicado e deveria ser considerada.

Freiman (1988) e Michalske (1991) mencionam as mesmas dificuldades. Este último pesquisador complementa que, quando o defeito principal consiste num poro ou inclusão, normalmente não é possível avaliar a magnitude da tensão de ruptura a partir da medida do tamanho do defeito, pois em uma configuração esférica, a concentração de tensões independe do tamanho. Percebe-se que a grande dificuldade em determinar-se a resistência à fratura de um material consiste na concepção de modelos que representem-no adequadamente quando dotado de imperfeições.

O sub-índice “I” freqüentemente associado ao fator de intensidade de tensão, resultando K_I , indica que o modelo de propagação da trinca está baseado no modo I do ensaio de abertura de trinca, conforme a mostra figura 2.2 (IBÁÑEZ, 1998). Com efeito, Varner (1991) coloca que os materiais isotrópicos são regidos pela Lei da Tensão Normal e, portanto, a propagação da trinca ocorre normal à direção da tensão principal, de acordo com o modo I.

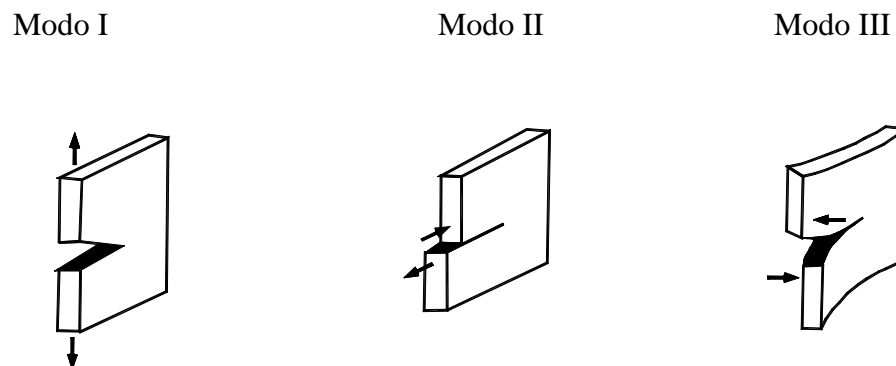


Figura 2.2: modelos de carregamento relacionados à propagação das trincas (BAR-ON, 1991)

Na figura 2.2, o modo I representa uma situação de tração em que o deslocamento da superfície de ruptura é perpendicular ao plano da trinca. O modo II representa uma situação de cisalhamento, onde a propagação da trinca ocorre no seu próprio plano, perpendicular à direção da sua borda. O modo III representa uma situação de cisalhamento transversal, onde o deslocamento da trinca também ocorre no plano de ruptura, porém paralelamente à direção da sua borda.

A fratura de um material ocorre quando a intensidade de tensão aplicada, K , alcança o nível crítico K_C , que é uma propriedade do material conhecida como tenacidade à fratura (QUINN, 1991). A tenacidade está relacionada à capacidade do material absorver e armazenar energia (SCHLENKER, 1972) e, conforme Amin (1991), é amplamente usada para caracterizar a resistência à fratura de materiais frágeis.

Segundo Michalske (1991), para o modo I de abertura de trinca, K_C pode ser representado pela equação 2.2 como segue:

$$K_{IC} = \sigma_f \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad (\text{equação 2.2})$$

onde, σ_f corresponde à tensão de ruptura referente ao modo I no ensaio de flexão.

Da equação 2.2, verifica-se que quanto maior o comprimento da trinca, a , menor a tensão necessária para provocar a ruptura do material, σ_f , de forma não-linear.

O crescimento da trinca pode ocorrer para níveis de tensão inferiores à K_C por influência das condições de entorno. Este fenômeno é denominado crescimento sub-crítico de trinca ou fadiga estática (RITTER, 1991). Com efeito, Amin (1991) cita K_{IC} como função das condições do ambiente, além da taxa de carregamento e da geometria da trinca. Ritter (1991) destaca a presença de água como o principal responsável pelo crescimento sub-crítico. Casellas et al. (1999) também atribuem à ação da água a redução da resistência à fratura com o tempo de um material submetido a cargas constantes, a qual facilita a propagação de trincas pré-existentes.

Um dos mecanismos propostos para explicar a influência da água na propagação da trinca consiste na interação desta com a fase vítrea (CASELLAS et al., 1999). A teoria baseia-se em

que as moléculas de água orientam-se de tal forma que o hidrogênio desta se combina com o oxigênio do tetraedro SiO_4 , conforme representado na figura 2.3. Simultaneamente, o oxigênio da molécula de água transfere um elétron para a sílica e o oxigênio desta combina-se com o hidrogênio da água. Como resultado, a ligação anterior é rompida e, na ponta da trinca, surgem dois grupos Si-OH (RITTER, 1991).

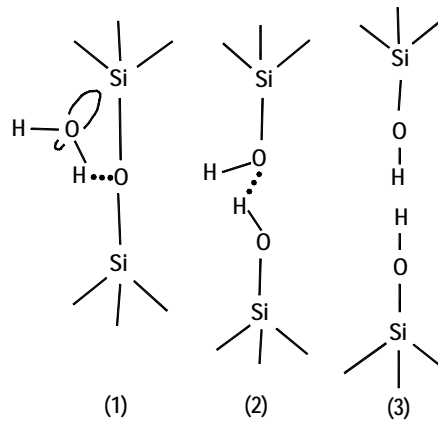


Figura 2.3: seqüência da reação da molécula de água com a sílica, associada ao crescimento sub-crítico da trinca (RITTER, 1991)

Michalske e Buntès (1997) demonstram a mesma teoria e colocam que a reação com a água reduz em vinte vezes a energia de ruptura de uma ligação SiO_4 .

O mecanismo apresentado é criticado por Ritter (1991) e Casellas et al. (1999) ao colocarem que dificilmente as moléculas de água conseguem penetrar na ponta de uma trinca devido ao comprovado formato pontiagudo das mesmas. Chartier (1997), ao contrário, comenta que uma molécula de água alcança facilmente a ponta da trinca, mas certamente, comparando-se substâncias diferentes, aquela cuja molécula for menor, terá maior facilidade para atingir a ponta da trinca e lá atuar para sua propagação.

Ritter (1991) acredita que o enfoque mais adequado baseia-se no fato de que o ambiente afeta a energia superficial do material. As moléculas de água são adsorvidas quimicamente na ponta da trinca, distorcendo-lhes as faces e causando uma força de compensação elástica que tende a afastá-las. O avanço da trinca toma lugar quando a condição de energia de Griffith é satisfeita e, conforme Taylor (1991), a presença de água reduz a energia requerida para formar novas superfícies. Casellas et al. (1999) citam o mesmo modelo, denominando-o de cunha química.

Moreno et al. (199-) avaliam a influência das condições ambientais sobre as propriedades cerâmicas a partir de um estudo em que expõem amostras de vidro ao ar, à água, à imersão em azeite e à imersão em água seguida de exposição ao ar. Os resultados obtidos mostram que o contato com a água, seguido ou não de exposição ao ar, reduz o valor de K_{IC} e que a imersão em azeite eleva esta propriedade. A diferença entre o maior e o menor resultado é de aproximadamente 15%.

A consideração do tempo e a conseqüente previsão de vida útil, do ponto de vista da Mecânica da Fratura, pode ser feita através da velocidade de propagação da trinca. Quanto maior a velocidade, mais rapidamente o material alcança o colapso. Neste sentido, o envolvimento da umidade é fundamental, pois exerce significativa influência sobre o fator de intensidade de tensão (KERKHOF, 1983).

A relação entre K_I e a velocidade de propagação da trinca é dada pela equação 2.3 (QUINN, 1991).

$$V = A \cdot K_I^n \quad (\text{equação 2.3})$$

onde, A = constante

n = expoente de crescimento lento da trinca.

A equação 2.3 pode conduzir à previsão de falha do material através de uma série de considerações matemáticas. Quinn (1991) ressalta que parece existir um valor limite de tensão abaixo do qual não há crescimento sub-crítico de trinca, porém difícil de ser quantificado porque as velocidades associadas às intensidades de tensão próximas ao mesmo são muito baixas, da ordem de 10^{-10} m/s.

A análise da superfície de fratura, ou seja, a fractografia, apresenta-se como um método alternativo ou, por vezes, complementar à determinação experimental do comprimento da trinca. Através da fractografia pode-se apropriar a magnitude das tensões no momento da fratura através da análise das impressões deixadas na superfície.

A tensão de falha, σ_f , pode ser relacionada com a distância do defeito original à fronteira de qualquer das regiões demarcadas através processo de fratura, dispensando a determinação do tamanho do defeito que deu início ao processo. Este encaminhamento resulta na equação 2.4, adotando-se os índices A_i e R_i , respectivamente, para uma constante empírica correspondente à região de espelho, válida para determinada faixa de tensão, e para o raio da região considerada (KANNINEN e POPELAR, 1985). A região de espelho consiste em uma superfície polida que circunda a fratura original, a qual termina ao iniciar uma região de textura fibrosa (WASYLYK, 1991).

$$\sigma_f = A_i / \sqrt{R_i} \quad (\text{equação 2.4})$$

Quanto menor o raio da região de espelho, maior a tensão capaz de provocar a falha do material. Os autores comentam que esta técnica não tem as desvantagens associadas à necessidade de alinhamento da tensão e à complexidade de forma dos defeitos, os quais induzem à distorção nos resultados da tenacidade à fratura.

2.2.4 Modelos de desgaste

A interpretação e descrição do desgaste ocorrem através de modelos. Quando as variáveis previstas nos modelos assumem forma matemática, dispõem-se de equações de desgaste. Estas equações envolvem um número limitado de parâmetros, onde o comportamento de cada um em relação ao fenômeno é descrito através de leis físicas ou químicas matematicamente definidas. O objetivo consiste na quantificação do fenômeno.

Os parâmetros freqüentemente considerados nas equações de desgaste, relativos aos materiais, ambiente e aspectos operacionais, são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: parâmetros frequentemente considerados nas equações de desgaste (SHIGLEY e MISCHKE, 1989)

Parâmetros	Detalhamento
Operacionais	Topografia da superfície
	Geometria de contato
	Carga aplicada
	Velocidade
	Coeficiente de atrito
Materiais	Dureza
	Ductilidade
	Tenacidade à fratura
	Resistência mecânica
	Módulo de elasticidade
	Morfologia do material
	Tipo e espessura do filme superficial
Propriedades térmicas	
Ambiente	Tipo e quantidade de lubrificante
	Tipo e quantidade de sujeira
	Temperatura
	Rigidez da estrutura de suporte
	Tipo de contato

Uma interessante análise a respeito dos modelos de desgaste é feita por Meng apud Meng e Ludema (1995), em sua tese de doutorado. Este pesquisou 5.466 artigos técnicos publicados no periódico *Wear* entre 1957 e 1992 e nos anais do *Wear of Materials* entre 1977 e 1991. O autor identifica três estágios de modelagem do desgaste. O primeiro, até 1970, envolve equações empíricas estabelecidas a partir de dados obtidos através de ensaios, sendo que poucas foram as variações nas condições de ensaio entre diferentes pesquisadores. O segundo período, de 1970 a 1980, caracteriza-se por equações baseadas em mecanismos de contato. Algumas consideram a topografia das superfícies e que o módulo de elasticidade ou a dureza são importantes no processo de desgaste. No terceiro período, que envolve os anos de 1980 a 1995, equações baseadas em mecanismos de fratura têm sido a tendência da maior parte dos trabalhos. A substancial mudança citada pelo autor para este período consiste no enfoque de que a resistência ao desgaste não é uma propriedade intrínseca dos materiais, portanto, a adoção de propriedades mecânicas não pode ser aplicada diretamente. Informações relacionadas ao escoamento, à tenacidade, à deformação na fratura, entre outras, são incorporadas neste período.

Yamamoto et al. (1994) também fazem referência à existência de diversos modelos de desgaste e que a maior parte deles baseia-se na Mecânica da Fratura. Provavelmente, os autores se referem a trabalhos publicados no último período identificado por Meng apud Meng e Ludema (1995).

Apesar de a maioria das pesquisas serem de natureza descritiva, Meng apud Meng e Ludema (1995) encontrou, em sua análise, mais de 300 equações para desgaste com ênfase na abrasão. Posteriormente, Meng e Ludema (1995) analisaram 182 destas equações e comentam existir pouca convergência entre os diferentes autores quanto à concepção dos modelos. Uma evidência disso consiste no grande número de variáveis utilizadas para descrever um mesmo sistema. Ainda, os autores criticam as formulações disponíveis ao colocarem que são tão confusas que poucos projetistas podem usá-las para estimar a vida de um material com confiança.

Na expectativa de harmonizar algumas equações relativas à abrasão, Meng e Ludema (1995) selecionaram 28 das 182 citadas anteriormente a partir de critérios pré-estabelecidos. Os autores baseiam-se no fato de que cada uma deve conter preceitos verdadeiros quanto ao fenômeno do desgaste. No entanto, a deficiente descrição dos processos de modelagem envolvidos nas diferentes equações e, a já citada falta de unidade quanto à definição dos termos adotados, não permitiram que o objetivo fosse alcançado, entre outras causas.

Com efeito, percebe-se que as pesquisas, em geral, não explicitam as limitações inerentes aos modelos propostos, o que dificulta a avaliação dos mesmos ou ainda, a busca de modelos mais adequados às diferentes situações de aplicação. Realmente, percebe-se que as equações propostas envolvem diversas propriedades e que a relação entre elas altera-se significativamente de pesquisador para pesquisador, por exemplo, em termos dos expoentes encontrados para um mesmo parâmetro.

Outra forma de abordar o problema do desgaste consiste em estudar alternativas em termos de composição do material ou de modificações nos processos de fabricação, que melhorem o comportamento. Estes trabalhos utilizam-se de um ou vários critérios para quantificação do desgaste e parecem não questioná-los quanto a sua relação com o comportamento do material em condições reais.

Como encaminhamento do problema, Meng e Ludema (1995) sugerem abandonar os mecanismos de desgaste correntemente estabelecidos, pois estes não permitem conceber o processo real. Este parece ser o enfoque de outros trabalhos (YAMAMOTO et al., 1994; ESPOSITO e TUCCI, 2000; FELÍU et al., 1990; COSTA et al., 1994; IBÁÑEZ, 1998) ao partirem do princípio que as propriedades mecânicas não são suficientes para descrever o comportamento dos materiais ao desgaste e que o fenômeno como um todo deve ser considerado, ou seja, o sistema tribológico. Com efeito, Feijão et al. (1996) concluem que, dada a carência de leis cientificamente estabelecidas relativas ao processo de desgaste, a análise experimental do fenômeno consiste na principal ferramenta de estudo.

2.3 ABRASÃO

A abrasão consiste em um dos mecanismos através dos quais ocorre o desgaste de materiais, conforme descrito no item 2.2.2. A ênfase sobre este mecanismo em relação aos demais se deve ao aparente consenso na bibliografia (DIAS et al., 2000; FEIJÃO et al., 1996; IBÁÑEZ, 1998) de que, no caso de cerâmicas esmaltadas para revestimento de piso, normalmente a perda de material decorre de desgaste por abrasão.

2.3.1 Definições

Groover (1996) descreve a abrasão como a ação causada por numerosas asperezas duras pertencentes a uma superfície ao chocar-se contra outra. As asperezas podem ser resultantes da rugosidade superficial do material mais duro ou consistir das próprias partículas já extraídas.

Para Ibáñez (1998), a abrasão consiste na remoção de material causado pela ação de partículas duras sobre o mesmo, ou entre duas superfícies que estejam em movimento relativo, ou ainda, pela presença de saliências em uma ou em ambas as superfícies. Larsen-Basse (1990) também relata a presença de partículas duras, as quais cortam uma superfície ao movimentarem-se em relação a ela.

Observa-se que o conceito de movimento relativo entre um material mais duro e outro mais macio está presente também em outras definições (SCHACKELFORD, 1999; BRISCOE e ADAMS, 198-). Estes autores fazem considerações a respeito das irregularidades existentes na superfície dos materiais e que, a nível microscópico, as superfícies não são lisas e as asperezas constituem o contato mais externo.

Os pesquisadores citados têm diferentes abordagens ao referirem-se aos corpos que compõem o sistema tribológico. Alguns consideram uma superfície com partículas sobrepostas, outros caracterizam o fenômeno através de duas superfícies com a presença de um material intermediário e outros, sem a sua presença. No primeiro caso, as partículas abrasivas se movimentam livremente sobre a superfície. No segundo caso, as partículas atuam como material interfacial entre dois materiais (IBÁÑEZ, 1998).

Certamente, a magnitude do efeito abrasivo para cada um dos modelos difere bastante. No caso de pisos cerâmicos em geral, sujeitos ao trânsito de pessoas, verifica-se que o principal modelo abrasivo responsável pelo processo de desgaste envolve três corpos. Esta situação poderá diferir, por exemplo, no caso de revestimentos à beira-mar onde o vento, conforme sua intensidade e quantidade de particulados, poderá ser o principal responsável pelo desgaste.

2.3.2 Mecanismos envolvidos no processo de abrasão

A fundamentação teórica para o encaminhamento do problema de desgaste tem como definição inicial o mecanismo de falha, ou seja, a forma como o material rompe sob tensão. Para a maioria dos pesquisadores consultados, a abrasão manifesta-se através de riscos e cortes (ESPOSITO e TUCCI, 2000; IBÁÑEZ, 1998; SCHACKELFORD, 1999; GROOVER, 1996), os quais provocam concentração de tensões sobre a superfície do material desencadeando trincas (DIAS et al., 2000).

Feijão et al. (1996) citam três mecanismos envolvidos na movimentação e/ou remoção de material, decorrentes de um contato abrasivo: microlascamento, microcorte e microsulcamento.

Microlascamento corresponde ao arrancamento de material superficial devido à formação e coalescência de trincas na medida em que estas atingem a superfície. Estas trincas são o

resultado da ação de tensões cuja magnitude supera a tensão de ruptura do material. Microcorte decorre de tensões de cisalhamento localizadas à frente da partícula abrasiva, as quais provocam a extração de material pela formação de microcavacos. Microsulcamento não implica em perda significativa de material, pois representa situações de deslocamento do mesmo.

O mecanismo preferencial depende das características do próprio material, relacionadas à tenacidade, módulo de elasticidade e dureza, e também do nível de tensões a que o corpo está submetido, o qual é estabelecido pela força normal e velocidade de translação das partículas abrasivas (FEIJÃO et al., 1996). Ao tratar de um sistema de abrasão a três corpos, como é o caso das placas cerâmicas sob tráfego humano, a tensão aplicada influi sobremaneira na profundidade de penetração das partículas abrasivas e no campo de tensões criado em torno da trinca. De qualquer forma, o microlascamento é destacado como o principal mecanismo de deterioração para materiais frágeis, onde a tensão mínima necessária para a nucleação de trincas corresponde à tenacidade do material (DIAS et al., 2000 e FEIJÃO et al., 1996). Este enfoque permite que a abrasão em materiais frágeis seja interpretada através da Mecânica da Fratura.

Dessa forma, parece consenso na bibliografia que o processo de desgaste de materiais cerâmicos decorre da iniciação, crescimento e propagação de trincas na superfície do material, como resultado de ações mecânicas, e tem como consequência a remoção do mesmo.

Quanto maior a facilidade com que as trincas presentes em um material cerâmico se propagam, maior é a rapidez com que ocorre o desgaste (IBÁÑEZ, 1998).

2.3.3 Efeitos da abrasão

A abrasão representa uma forma de deterioração do material e acarreta um comprometimento da sua superfície. Para Simioli (1992), 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.

Justamente, verifica-se na bibliografia diferenças na forma de apropriação da abrasão. Alguns trabalhos estabelecem sua quantificação relacionando-a à perda de material, o que evidencia preocupação sob um ponto de vista tradicional na Engenharia. Outros, buscam analisar o material a partir da visualização ou não do desgaste, ou seja, preocupados com a estética do revestimento, o que denota a apropriação da falha do ponto de vista do usuário.

Ao considerar-se o fenômeno da abrasão presente em várias áreas do conhecimento, percebe-se que os seus efeitos envolvem, muitas vezes, questões de segurança e grandes investimentos como, por exemplo, ao tratar de aeronaves, componentes de motores, concreto para barragens, moinhos. Sob esse ponto de vista, pode-se dizer que o enfoque tradicional é o mais adequado. Efetivamente, ao representar a deterioração do material, o desgaste diminui sua resistência aos esforços atuantes, portanto lhe aproxima de uma possibilidade de falha.

Para os materiais cuja conotação estética é importante, considera-se entretanto que os critérios de avaliação devam ser estabelecidos com base em parâmetros visuais, o que não significa subjetividade. Em verdade, poder-se-ia considerar a avaliação em termos de perda de matéria caso fosse demonstrada sua relação com os aspectos visuais. Por esse ponto de vista, atingir determinado nível de deterioração não significa término da vida útil, mas a percepção da deterioração sim. Por exemplo, quando existe remoção de material por abrasão, pode-se considerar que existe desgaste, mas não necessariamente ocorre o término da vida útil, ou ainda, pode-se dizer a partir de parâmetros visuais, que não houve desgaste. Neste caso, o estabelecimento de algum valor máximo de perda de material não é o mais adequado para estimar a vida útil.

Os enfoques apresentados quanto aos efeitos da abrasão envolvem o estudo de propriedades diferentes e conduzem a maneiras distintas de trabalhar. Percebe-se nos trabalhos que enfocam a perda de matéria uma forte ênfase para o projeto e desenvolvimento de materiais mais resistentes. Os estudos de matérias-primas e do processo de sinterização resultam na modificação da microestrutura do material e assim, das suas propriedades. Por outro lado, nos trabalhos em que a abrasão é interpretada através da variação do aspecto, há forte preocupação com a avaliação do fenômeno, sem obrigatoriamente buscar materiais de melhor desempenho. Certamente ambas as abordagens são complementares.

Costa et al. (1994) colocam que existem duas alternativas quanto à escolha de um material cerâmico para uso em Engenharia. A primeira consiste em selecionar um material cuja

resistência à determinada ação nunca seja ultrapassada e a segunda, em desenvolver um material cujas propriedades proporcionem resistência suficiente. Os enfoques apresentados estão relacionados essencialmente ao grau de desenvolvimento tecnológico quanto ao comportamento do material, onde o primeiro pode ter uma conotação fortemente empírica. De qualquer maneira, ambos necessitam de métodos de avaliação dos resultados.

Interessante observar que algumas das propriedades das placas cerâmicas podem ser alteradas ao longo do processo de desgaste, fazendo com que o material se comporte de maneira diferente daquela que foi concebido originalmente. A resistência química e a resistência a manchas são exemplos desta situação. Estas são definidas a partir de parâmetros visuais, ou seja, se houve ou não variação do aspecto após seguir os procedimentos estabelecidos nas respectivas normas. Esta variação de aspecto, todavia, poderá não ser identificada com a superfície em seu estado original, mas revelar-se quando desgastada.

Do ponto de vista da alteração da aparência, verifica-se na bibliografia consultada, citações quanto às propriedades ópticas, à resistência à abrasão e à porosidade. Do ponto de vista da perda de material, as propriedades mais citadas são a tenacidade, a dureza e a resistência mecânica. Percebe-se que os pesquisadores priorizam estas três últimas ao estudarem o desgaste do ponto de vista da perda de material, independentemente do envolvimento de outras, os resultados obtidos entretanto conduzem a opiniões variadas sobre a participação das mesmas na interpretação do fenômeno.

Considerando-se a percepção, além das características e propriedades relacionadas à percepção do fenômeno, pode-se conduzir o estudo da abrasão também a partir das características e propriedades que conduzem ao seu desenvolvimento. A tabela 2.3 procura estruturar os aspectos relacionados a cada um deles. Cabe lembrar que o conjunto compõe o sistema tribológico.

Tabela 2.3: sistema tribológico relativo às placas cerâmicas esmaltadas sujeitas ao tráfego de pessoas

Aspectos relacionados ao	Características e propriedades que intervêm	
	no desenvolvimento do fenômeno	na percepção do fenômeno
		Cor (Feliú et al., 1990); Brilho (Feliú et al., 1990) ;

Material cerâmico	Microestrutura (Yamamoto et al., 1994); Tenacidade (Weinstein, 1991); Dureza (Weinstein, 1991); Resistência à abrasão.		Número de cores (Felú et al., 1990); Grau dissemin. das cores (Felú et al., 1990); Espessura do esmalte (Felú et al., 1990); Geometria (Amin, 1991); topografia (Yamamoto et al., 1994); textura (Felú et al., 1990); Porosidade (Weinstein, 1991).
Agente intermediário	Natureza	tipo de material (Enrique et al, 1995); forma das partículas (Larsen-Basse, 1990); tamanho partíc.. (Yamamoto et al., 1994); densidade (Weinstein, 1991); dureza (Weinstein, 1991).	
	Concentração (Weinstein, 1991).		
	Contato	velocidade partíc. (Yamamoto et al., 1994); ângulo de incidência (Larsen-Basse, 1990).	
Trânsito de pessoas	Tipo de solado dos calçados (Enrique et al, 1995); Carga transmitida (Amin, 1991); Dinâmica do movimento (Amin, 1991).		
Ambiente	Ar (Enrique et al, 1995); Água (Enrique et al, 1995).		

2.3.4 Características e propriedades que intervêm no desenvolvimento do fenômeno

A interação entre os diferentes aspectos relacionados ao material cerâmico, agente intermediário, trânsito das pessoas e ambiente caracterizam o processo de abrasão. Estes, da mesma forma que devem ser considerados por ocasião da especificação de um material, adequando-o a determinado ambiente, são considerados no estudo do seu comportamento.

2.3.4.1 Aspectos relacionados ao material cerâmico

O desempenho de um material frente a determinadas condições de agressividade decorre da qualidade das respostas associadas às propriedades solicitadas. Neste sentido, pode-se mencionar a resistência à abrasão, dureza, tenacidade e porosidade.

2.3.4.1.1 Resistência à abrasão

A resistência de um material à abrasão pode representar o comportamento do material sob dois pontos de vista. Por um lado, pesquisadores como Simioli (1992) consideram-na como a

resistência que uma superfície impõe à ação de desgaste causada pelo movimento de corpos que estejam em contato. Por outro lado, Lorici e Bresciani (1990) definem resistência à abrasão como a capacidade de um material sofrer desgaste sob ações mecânicas sem que implique em variações apreciáveis no seu aspecto visual. Nesta mesma linha, Felú et al. (1990) colocam que a resistência à abrasão consiste na resistência que o material oferece a uma mudança de aspecto não desejada devido a uma perda de massa provocada por esforços mecânicos.

A norma ASTM D 16-96 (1998) parece enfatizar ambas as exigências ao referir-se a películas de caráter protetor ou decorativo. Coloca que a resistência à abrasão consiste na habilidade do material em manter sua estrutura e aparência originais sob ação do desgaste.

Possivelmente, conforme a função do material em análise, pode-se optar por enfatizar um ou outro aspecto. Com efeito, Shigley e Mischke (1989), ao abordarem peças mecânicas, comentam que a apropriação da perda de material muitas vezes não é tão importante quanto as variações no acabamento das superfícies e que estas sim podem representar o colapso do sistema.

É importante ter clareza neste aspecto, pois conforme Felú et al. (1990), é de amplo conhecimento que esmaltes de características técnicas muito parecidas, e em particular de semelhante resistência à abrasão e porosidade, apresentam comportamento radicalmente diferente durante sua utilização. Neste caso, deixam clara a precariedade dos parâmetros de análise atualmente utilizados para especificar o material quando comparados com o que ocorre ao longo do tempo, em situações reais.

Normalmente, os métodos de ensaio para determinar a resistência à abrasão consistem em provocar o desgaste de um material através da ação mecânica de determinada carga abrasiva e utilizar os resultados de forma comparativa. Pode-se citar o PEI, abrasão Los Angeles, abrasão Taber, *pin-on-disk* e outros. Cabe lembrar que os métodos de ensaio não são suficientes para estimar vida útil. Em condições reais, estão presentes condições agressivas que os conduzem a comportamentos diferenciados. Qualquer que seja o ensaio adotado para a resistência à abrasão, avalia uma capacidade ou habilidade do material.

O método PEI (*Porcelain Enamel Institute*) foi adotado pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) para a estimativa da resistência à abrasão de placas cerâmicas

esmaltadas na década de 50. Em 1995, foi aprovado sob a forma da ISO 10545-7 e, em 1997, como NBR 13818, amplamente utilizada pela indústria cerâmica.

Este método consiste em submeter a superfície esmaltada à ação de uma carga abrasiva composta de bolas de aço de diferentes diâmetros, óxido de alumínio e água destilada em um abrasímetro normalizado. As etapas de abrasão correspondem a determinado número de giros. As amostras, após a abrasão e limpeza, são inseridas em uma caixa-padrão e observadas sob iluminação de 300lux, a uma distância de 2m e altura de 1,65m.

O método diferencia os produtos em classes de 1 a 5 conforme a avaliação visual do desgaste, sendo que para a 5ª classe, a norma sofreu alterações relativas à exigência de avaliação da limpabilidade após o ensaio.

Especificar um material com base na classificação PEI consiste em estimar que a classe selecionada suporta a quantidade de pessoas prevista para transitar sobre o revestimento, associada à agressividade do local, por um período de tempo satisfatório. Não significa que uma placa PEI III, apta para o uso em cozinhas residenciais, não sofra desgaste nestas condições, mas sim que o trânsito neste ambiente ao longo de uma vida considerada adequada não vai ser suficiente para provocar um desgaste visível. Esta é a expectativa do especificador na medida em que o mesmo não dispõe de dados quanto ao volume de tráfego que determinada placa cerâmica suporta em determinado período de tempo sem apresentar sinais de desgaste.

O método PEI, todavia, tem sido alvo de inúmeras críticas, relacionadas tanto ao processo de desgaste, ou seja, ao equipamento, quanto ao sistema de avaliação dos resultados.

Com relação ao equipamento, Navarro (1997) inclui a ISO 10545-7 em um grupo de normas ISO cujos métodos, em sua opinião, mostram-se bastante insatisfatórios. O autor refere-se tanto à ação de desgaste quanto à observação das variações que sofre a cerâmica. Em 1990, Felú et al. (1990) citaram que o Comitê Europeu de Normalização (CEN) escolheu o método PEI, dentre outros métodos, em função da melhor simulação do desgaste que ocorre em uma superfície esmaltada durante sua utilização real. Neste trabalho, os autores concordam com o ponto de vista do CEN na medida em que fotos de microscopia eletrônica de ambas as situações mostram desgaste bastante similar. Apesar disso, comentam que a determinação visual da perda de aspecto constitui-se num problema.

Ibáñez, em 1998, reitera a afirmação anterior de que o método PEI simula adequadamente o processo de desgaste real e que o problema consiste na subjetividade da avaliação visual. Ressalta-se, todavia, que as fotografias de microscopia eletrônica, mostradas em seu trabalho para justificar este ponto de vista, são as mesmas apresentadas em 1990 por Felú et al., grupo do qual fazia parte.

Paralelamente, parte destes pesquisadores publica em 1996 (BARBERA et al., 1996), que a área de ensaio abrasionada através do método PEI não apresenta desgaste uniforme. Mostram que existe uma graduação que aumenta radialmente do centro da amostra para fora, no próprio movimento circular da carga abrasiva ao longo da superfície. Este aspecto já era citado em 1992 por Escardino et al. (1992), ocasião em que coloca que a área mais abrasionada vai alargando-se na medida em que aumenta a duração do ensaio. O autor alerta que a falta de uniformidade da região abrasionada pode induzir a erros. De fato, se a propriedade é medida em termos visuais, ainda que se estabeleça um local definido para a análise, este acaba por sofrer interferência do entorno. Zaro et al. (1994), ao medirem a variação da reflexão também encontraram próximo às bordas do círculo produzido pelo método PEI uma região mais abrasionada em relação ao seu interior.

A deficiente correlação entre os resultados obtidos através do método PEI e o desgaste em condições reais levou ao desenvolvimento do equipamento *Tribopodo* (BARBERA et al., 1996), o qual busca simular o caminhar humano. Alternativamente, Walters e Harrison (1998) sugerem trocar a carga abrasiva adotada no método PEI quanto ao tamanho das esferas e tipo de material, obtendo resultados satisfatórios com a introdução de bolas de vidro.

À parte o equipamento, a condição de observação proposta no método PEI não se mostra eficiente para reproduzir a observação do fenômeno em condições reais, por parte dos usuários. Estas condições de observação geram críticas tanto por basearem-se na identificação de alteração de aspecto de forma qualitativa, dependente da capacidade visual do observador (INSTITUTO DE TECNOLOGIA CERAMICA, 199-), quanto por focar a cor do material e não os aspectos geométricos associados à avaliação do brilho.

No método PEI, a câmara-padrão de observação conta com iluminação difusa e o observador, posicionado conforme recomenda a norma, forma um ângulo de visão de $39,5^\circ$ com a horizontal. Esta condição de observação não permite a avaliação do brilho, pois não propicia a reflexão especular. Para a observação do brilho, o observador deve posicionar-se em sentido

contrário à luz incidente, formando ângulos iguais com a vertical. Além disso, os ângulos de observação e incidência devem variar conforme o brilho do objeto: quando baixo, a melhor configuração consiste em grandes ângulos a partir da vertical; quando alto, a partir de baixos ângulos, mais próximo da condição perpendicular (HUNTER e HAROLD, 1987). Como decorrência, as placas cerâmicas esmaltadas poderão exigir dois sistemas diferentes e complementares para avaliação da aparência: de observação do brilho e da cor.

As condições geométricas estabelecidas no método PEI permitem que placas identificadas como sem variação decorrente da abrasão, se observadas em condições que permitam a identificação do brilho, efetivamente demonstrem diferenças.

Com efeito, Walters e Harrison (1986) consideram que a observação da cor é insuficiente para identificar a abrasão. Salientam que o brilho deveria ser considerado, pois se mostra sensível à rugosidade produzida pelo desgaste. Felú et al. (1990) concordam com este ponto de vista e reiteram que o PEI não identifica perda de aspecto relacionada à perda de brilho, porém esta é observada em condições reais de abrasão.

De fato, a indústria cerâmica parece ciente da insuficiente resposta que os métodos de ensaio oferecem, inclusive do difundido método PEI, e dispõe de conhecimentos empíricos que lhes permitem contornar, em alguns casos, o problema do desgaste prematuro. Neste sentido, Felú et al. (1990) comentam que os fabricantes costumam adotar duas condutas para aumentar a resistência à perda de aspecto. Uma delas consiste no estudo de configurações adequadas para disfarçar a perda de brilho, a mudança de cor e a retenção de sujeira que decorrem do desgaste. A outra se baseia na diminuição da porosidade e no aumento da resistência à abrasão. Neste último caso, uma das formas consiste em submeter o material a um número de rotações superior ao máximo indicado na respectiva norma para determinada classe PEI.

Com respeito ao estudo de configurações mais adequadas, as tonalidades claras disfarçam melhor o efeito da abrasão e, vice-e-versa, superfícies escuras tendem a ser mais sensíveis. Isto se deve ao fato de que o aumento das micro-rugosidades, provocadas pela abrasão, faz com que a tonalidade percebida pelo olho humano seja mais clara comparativamente à tonalidade original (FELÍU et al., 1990). Esta situação é constatada por outros autores ao indicarem que placas de cores claras normalmente são classificadas com PEI mais elevado do que peças escuras (FORD, 1996; SIMIOLI, 1992).

Por outro lado, Felú et al. (1990) chamam atenção que as placas claras tendem a evidenciar mais facilmente o problema da retenção de sujeira, que normalmente está associado à abrasão. A porosidade da superfície do vidro, originalmente fechada, converte-se progressivamente em aberta a medida em que avança o processo de desgaste. Nestes poros, a sujeira permanece irreversivelmente retida, não sendo possível sua eliminação por limpeza. Também, a própria rugosidade dificulta esta operação. Interessante observar que as placas escuras são favorecidas pela retenção de sujeira, pois permitem disfarçar o desgaste dentro de certos limites (ESCARDINO et al., 1992).

Estas observações demonstram o nível de incerteza associado ao processo de especificação de placas cerâmicas para utilização em pisos. Deve-se deixar claro, todavia, que o enfoque do método PEI, ao apropriar a abrasão a partir de parâmetros visuais, parece adequado. O problema consiste na definição das condições de observação: dever-se-ia contemplar tanto o brilho como a cor do material, e ainda, ser variável conforme o brilho original da placa. Outras formas de avaliação, previstas em alguns métodos de ensaio, baseiam-se em medidas de perda de massa ou de volume, o que não é satisfatório para o caso de revestimentos.

2.3.4.1.2 Dureza

A dureza é entendida como a resistência que um corpo oferece à deformação, risco e erosão, ou seja, a resistência de um corpo à penetração de outro (AMIN, 1991). Trata-se de uma propriedade intrínseca dos materiais, pois depende das ligações que se estabelecem a nível atômico (BERGMANN et al., 1994a). Os métodos de determinação da dureza baseiam-se na indentação de amostras através de um indentedor de formato esférico, cônico ou piramidal (AMIN, 1991). O método para avaliar a dureza de materiais cerâmicos mais frequentemente citado na bibliografia consiste no indentedor Vickers, piramidal.

A norma ASTM E 384-89 (re-aprovada em 1997) define como número de dureza Vickers (HV) o resultado da divisão da carga aplicada pela área superficial da indentação, obtido através da média das medidas das diagonais, as quais podem diferir no máximo 0,25µm ou 0,4%, o maior dos dois.

Carani et al. (1994) consideram este método adequado para cerâmicas esmaltadas e que permite diferenciar materiais considerados semelhantes se avaliados através da escala de

Mohs. A classificação da dureza através da escala de Mohs baseia-se no riscamento da superfície em análise com minerais de dureza definida, que variam de 1 a 10. Carani et al. (1994) chamam a atenção para o cumprimento da condição de que a profundidade de indentação deve ser menor que 1/10 da espessura do vidro a fim de que o corpo cerâmico, menos duro, não exerça influência sobre os resultados, invalidando-os. De qualquer maneira, Amin (1991) alerta que a dispersão dos resultados entre indentações e entre observadores dificulta o uso da dureza como forma de avaliar o comportamento dos materiais cerâmicos.

Com efeito, Ibáñez (1998) observou em alguns casos, grande dificuldade em apropriar as impressões deixadas pelo indentador Vickers, gerando dispersões consideráveis nos resultados. A autora atribui este efeito principalmente à rugosidade, já que o problema apresenta-se principalmente em vidrados heterogêneos, e à falta de planaridade das superfícies. Como solução, executa um polimento prévio nas mesmas. Ressalta, no entanto, que o valor médio da microdureza antes e depois do polimento não sofre alterações importantes.

Para Esposito e Tucci (2000), a dureza apresenta um valor máximo próximo à superfície o qual reduz gradualmente até um valor mínimo na interface com o corpo cerâmico, repercutindo inclusive em mecanismos de fratura diferentes. A explicação destes pesquisadores baseia-se na porosidade e nos defeitos internos. Para Bergmann et al. (1994a), a influência da porosidade sobre a dureza é óbvia, pois os poros não apresentam resistência à penetração.

Ainda assim, Ibáñez (1998) conclui que parece não haver relação entre a microdureza Vickers e a resistência ao desgaste por abrasão, sendo esta afirmativa válida para todos os casos estudados em sua tese. Na mesma linha estão Alarcon e Rossini (1992) ao estudarem vários vidrados com diferentes aditivos, pois colocam que a resistência à abrasão, a porosidade e a dureza são propriedades independentes entre si, não sendo possível estabelecer uma relação satisfatória entre as mesmas. Atribuem este fato à heterogeneidade do vidro após a queima. Com efeito, Zaro et al. (1994) citam que a relação da dureza com a resistência à abrasão verificada para os metais e elastômeros não se aplica aos vidrados cerâmicos, pois estes últimos não são suficientemente homogêneos.

Apesar destas ressalvas, Meng e Ludema (1995) verificaram que a dureza corresponde à propriedade com maior número de citações nas diferentes equações que procuram descrever o

fenômeno do desgaste. Shigley e Mischke (1989) apresentam conclusão semelhante ao apontarem a dureza como um dos parâmetros mais frequentemente encontrados nos modelos desta natureza. Com efeito, parece coerente considerar a dureza no estudo do desgaste na medida em que consiste na resistência de um corpo à penetração de outro. Weinstein (1991) apresenta claramente este ponto de vista ao colocar que cerâmicas mais duras apresentam maior resistência ao desgaste. Parece haver, entretanto, certa dissociação entre o significado da dureza e os resultados apropriados fisicamente para representá-la.

2.3.4.1.3 Tenacidade

A tenacidade representa a capacidade de um material em absorver energia. Conforme Bergmann et al. (1994b), apesar de K_{IC} mostrar-se um conceito pouco palpável, é o que normalmente se adota para representar a tenacidade de materiais em projetos de Engenharia.

Conforme Bar-On (1991), muitos métodos têm sido propostos para determinar a tenacidade à fratura, no entanto nenhum foi totalmente aceito devido às diversas dificuldades associadas à inserção de uma trinca experimentalmente controlada. Em geral, os defeitos superficiais são introduzidos a partir de indentadores Vickers ou Knoop (CASELLAS et al., 1999). Cabe distinguir que a utilização de um dispositivo que avalia a dureza de um material não visa simular o efeito de corte provocado por uma partícula abrasiva, mas criar uma ou duas trincas superficiais, conforme o indentador utilizado. Para a determinação de K_{IC} , Amin (1991) cita o método da resistência à indentação, o qual não exige medida do comprimento da trinca, mas envolve a carga de indentação, sendo o corpo cerâmico submetido a uma condição de flexão. Moreno et al. (199-?) mostram-se favoráveis a esta técnica e comentam que sua precisão já havia sido comprovada por outros pesquisadores.

O enfoque tradicional, evidenciado através dos modelos de desgaste mencionados anteriormente, considera que maior resistência ao desgaste pode ser obtida através de alta dureza e alta resistência à fratura, sendo este último parâmetro o mais significativo, conforme Briscoe e Adams (198-). Aparentemente, mesmo que a resistência ao desgaste seja afetada por outros fatores, incrementos na dureza e, principalmente, na resistência à fratura, são determinantes de um melhor comportamento.

Costa et al. apud Zum Ghar (1994) relacionam os três mecanismos de abrasão, citados no item 2.3.2, com a tenacidade à fratura e a dureza. Estes parâmetros comportam-se diferentemente de acordo com a região, conforme mostra a figura 2.4. A região I é relativa aos materiais de baixa tenacidade com predominância do microlascamento, onde um aumento da tenacidade implica em decréscimo na dureza, mas ainda assim, ocorre um aumento da resistência à abrasão. A região II é denominada região de transição, onde a resistência ao desgaste apresenta um pico para então diminuir progressivamente e, na região III, há predominância de microcorte e microsulcamento. Na região III, o aumento da tenacidade implica em redução da dureza e da resistência ao desgaste. Os autores enfatizam que, nesta região, um aumento na dureza é mais significativo sobre a resistência ao desgaste do que a tenacidade.

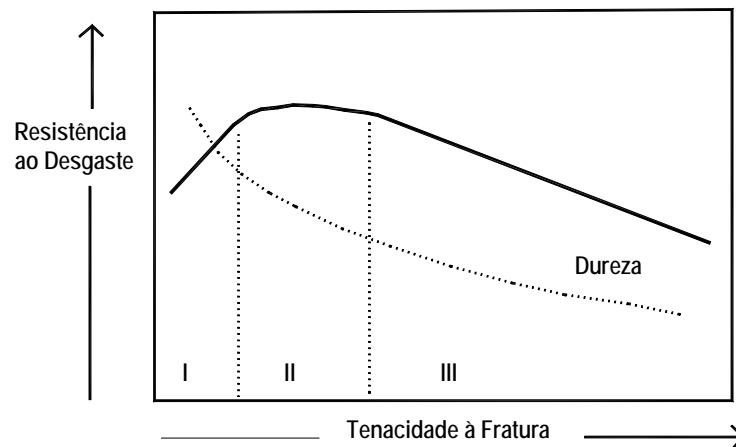


Figura 2.4: representação esquemática da resistência ao desgaste abrasivo em função da dureza e da tenacidade à fratura (COSTA et al. apud ZUM GHAR, 1994)

Para Yamamoto et al. (1994), a adoção isolada de propriedades mecânicas, dentre as quais inclui a tenacidade, não pode ser usada para determinar o desgaste. Esposito e Tucci (2000) manifestam insatisfação semelhante e lembram da participação do sistema tribológico.

A insuficiência de dados experimentais que permitam compreender o processo de desgaste, e também a própria complexidade dos mecanismos envolvidos, na opinião de Felú et al. (1990), dificultam o estudo da influência da microestrutura e das propriedades dos materiais sobre o comportamento à abrasão. Com efeito, Costa et al. (1994) comentam que apesar de vários autores relacionarem alta resistência ao desgaste com alta tenacidade, existe pouca

informação experimental que efetivamente fundamente tais expectativas. Ibáñez (1998) é de opinião que deve existir entre a tenacidade e a microdureza alguma relação ainda não determinada em função da complexidade do tema. Em seus experimentos, a resistência ao desgaste parece não depender isoladamente de nenhuma destas propriedades.

2.3.4.2 Aspectos relacionados ao material intermediário

Presume-se que o material presente sobre os pisos seja constituído essencialmente de uma mistura de terra vegetal oriunda de canteiros e áreas não ocupadas, de areia de construção, proveniente de obras e do transporte da mesma; e ainda, do solo existente nas vias sem revestimento, ou que aflora através de calçadas abertas ou então, proveniente de terrenos não ocupados com edificações. A proporção entre estes constituintes é, provavelmente, variável conforme as condições particulares de cada região: se no centro da cidade, se próximo de construções, se próximo de praças e parques, se em bairros de menor infra-estrutura viária. Em se tratando especificamente do local de assentamento do piso, o material encontrado sobre o mesmo vai estar associado ainda à proximidade da rua.

Além das características mineralógicas, o material pode também ser descrito enquanto sua morfologia, densidade, dureza, granulometria e concentração, como mostra a tabela 2.3. Os fatores mencionados caracterizam as condições de entorno de um revestimento e representam diferentes níveis de agressividade, o que permite classificar os ambientes em tantos grupos quanto se considere adequado com relação a este aspecto. Portanto, as condições particulares de determinado material é que irá defini-lo como mais ou menos agressivo. A importância, todavia, de uma característica ou propriedade sobre outra, a fim de comparar múltiplas variações, deve ser feita experimentalmente. As indicações extraídas da bibliografia, comentadas a seguir, não dispõem de comprovação experimental ou indicação quanto ao grau de influência que cada variável exerce sobre o desgaste em relação às demais.

Quanto à forma das partículas abrasivas, Larsen-Basse (1990) coloca que abrasivos angulosos apresentam superfícies cujo efeito de corte é superior às partículas arredondadas. No mesmo sentido, Weinstein (1991) comenta que o desgaste provocado por partículas angulosas é duas vezes superior em relação ao provocado por partículas arredondadas. Esta indicação parece um tanto genérica, no entanto serve como indicativo.

Weinstein (1991) faz ainda outras observações. Com relação ao tamanho, menciona que partículas maiores aumentam a severidade do desgaste. Quanto à densidade, o aumento da mesma eleva a energia cinética das partículas e assim, provoca um contato mais severo. Quanto à dureza das partículas, sua influência está condicionada à dureza da superfície: quando a primeira é maior do que a segunda, o desgaste é intensificado.

Com relação à concentração do material intermediário, Weinstein (1991) menciona que um aumento da concentração aumenta a severidade do desgaste. Acredita-se, todavia que deva existir uma concentração acima da qual o desgaste deve manter-se praticamente constante, pois tende a formar um filme contínuo sobre a superfície.

A natureza do contato é descrita através da velocidade das partículas e do ângulo com que as mesmas atingem o material. Quanto maior a velocidade, maior a severidade do desgaste (YAMAMOTO et al., 1994). Com relação ao ângulo de incidência, Weinstein (1991) ressalta que existem configurações mais cortantes do que outras.

2.3.4.3 Aspectos relacionados ao trânsito de pessoas

Os aspectos relativos ao trânsito das pessoas, que atuam sobre o desenvolvimento da abrasão, referem-se basicamente ao tipo de solado dos calçados, à carga e à dinâmica do movimento, conforme mostrado anteriormente na tabela 2.3.

Nenhum comentário foi encontrado na bibliografia quanto à influência exercida pelo tipo de solado sobre o desgaste de pisos. Certamente que existem solados mais e menos agressivos. À parte esse aspecto, a influência destes está associada a como tais solados se distribuem entre a população.

A carga, relacionada ao peso das pessoas, corresponde à pressão de contato. Quanto maior a carga, maior o esforço de abrasão gerado sobre o revestimento. A título de especificação do material cerâmico para condições reais de utilização, a carga atuante pode ser estimada através de estudos sobre dados antropométricos da população, que resultam em tabelas como as de Panero e Zelnik (2001). Estas apresentam a distribuição de pesos da população, relacionando as cargas às faixas etárias, sexos e aos percentis de 1 a 99.

Cabe ressaltar que a intensidade do esforço causado por uma pessoa de maior peso não é linear ao esforço de uma pessoa de menor peso, portanto, a adoção do percentil 50 provavelmente minimiza a deterioração. Ou seja, o desgaste provocado por uma pessoa duas vezes mais pesada do que outra, é maior do que o dobro. Idealmente, dever-se-iam considerar cargas equivalentes, resultantes da consideração conjunta com o volume de tráfego associado ao perfil de idade e sexo. Estas seriam calculadas para determinados ambientes-padrão, pois implica em conhecer o perfil da população que tende a transitar no local.

Excetuando-se situações particulares como, por exemplo, escolas exclusivas de ensino fundamental ou creches, onde a carga poderia ser calculada considerando preponderantemente a população de crianças e, por outro lado, ambientes cuja população tende a ser essencialmente adulta, como é o caso de pisos de empreendimento comerciais ou de serviços voltados para este público, outros deverão apresentar certa regularidade, seguindo a distribuição de cargas da própria população. Há de se questionar, todavia, se convém considerar índices específicos e ainda, se estes se aplicam ao longo do tempo, na medida em que os ambientes podem passar a contemplar outros tipos de atividade, sofrendo alterações no público-padrão. De qualquer forma, incertezas relativas à carga devem ser consideradas como um erro inerente à modelagem, erro em representar as condições reais de agressividade e em quantificar o desgaste efetivamente sofrido pelo material, ou seja, em estimar a vida útil.

Paralelamente à carga, há o volume de tráfego, ou seja, a quantidade de pessoas que se espera venham a transitar sobre o piso. Certamente, quanto maior o número, maior o desgaste. Neste momento, é claro perceber que o desgaste ocasionado pelo trânsito de uma pessoa pesada pode ser bem mais significativo do que o desgaste provocado por duas de baixo peso.

A dinâmica do movimento é referida no sentido de que certas configurações geram esforços abrasivos mais importantes do que outras. Pode-se mencionar as rampas e escadas, cujo efeito de arraste pode ser bem mais significativo relativamente ao que ocorre no plano. Em condições de laboratório, a dinâmica do movimento está associada ao equipamento utilizado.

Enrique et al. (1995), ao proporem um equipamento para o estudo da abrasão, estudaram o caminhar humano e identificaram a presença de dois picos de força: um de impacto, quando o calcanhar é colocado no chão, e outro de deslizamento, quando o movimento alcança a ponta do pé. Esta configuração não necessariamente deve ser reproduzida em um equipamento que

se propõe a simular o desgaste, desde que o mecanismo através do qual o desgaste real se desenvolve seja mantido.

As normas ASTM dispõem de diversos métodos para apropriação da abrasão de materiais em termos comparativos. Certamente, a concepção destes métodos busca de alguma forma, envolver as situações de agressão a que os materiais são expostos na realidade. Podem-se mencionar as películas de tinta, avaliadas através das normas ASTM D 4213 e ASTM D 968 que atuam, respectivamente, por escovação e descarga de areia. E, da mesma forma, as superfícies de concreto que, de acordo com a ASTM C 418, são submetidas a jatos de areia.

Verifica-se, contudo, certa preferência na utilização de equipamentos que atuam através de rodas ou discos sobre a superfície em análise. Neste caso, pode-se mencionar o equipamento Taber, que consiste de rodas abrasiva sob carregamento de 9,8N. Este método é utilizado para cerâmicas não esmaltadas, rochas sujeitas ao tráfego de pessoas, películas orgânicas e coberturas resilientes, respectivamente através das normas ASTM C 501, ASTM C 1353, ASTM D 4060 e ASTM F 510. Esta última modifica o padrão original ao adotar rodas revestidas de couro. No caso de superfícies de alto brilho, a ASTM D 6037, destinada a pintura de carros, barcos e brinquedos, também adota um equipamento constituído de rodas, as quais permitem representar diferentes níveis de agressividade sob carga de 5N.

2.3.4.4 Aspectos relacionados ao ambiente

A exposição ao ar representa a situação típica que compõe o sistema tribológico de uma placa cerâmica para revestimento. A presença de água, todavia, é considerada como o principal aspecto responsável pela redução da resistência à fratura com o tempo de materiais submetidos a cargas constantes, conforme mencionado no item 2.2.3. Em vista disso, pode-se supor que a frequência de lavagem do piso, assim como a localização do revestimento, em ambientes externos, tendem acelerar o processo de desgaste.

2.3.5 Características e propriedades que intervêm na percepção do fenômeno

A partir de um amplo estudo em que foram analisadas placas cerâmicas esmaltadas que sofreram desgaste durante sua utilização, Felú et al. (1990) concluem que os principais fatores que influem na alteração da aparência original de uma superfície consistem nos seguintes:

- no aspecto visual da superfície, caracterizado pela cor, pelo número e grau de disseminação dessas cores na placa e pelo brilho;
- na resistência à abrasão e;
- na porosidade do vidrado.

A porosidade do esmalte é apontada na bibliografia a partir de dois enfoques diferenciados. O primeiro em termos de microestrutura, onde maior compacidade representa maior resistência à fratura e portanto, redução no desgaste (ESPOSITO, 2000). O segundo, motivo pelo qual é citado por Felú et al. (1990), refere-se a limpabilidade, onde uma redução na porosidade representa menor possibilidade de retenção de sujeira na superfície da placa cerâmica. Nesse sentido, pode-se relacionar cor e porosidade, onde placas de tonalidades claras tendem a denotar mais facilmente a sujeira retida na porosidade aberta. Cabe observar que a impregnação de sujeira pode estar relacionada tanto à porosidade quanto à textura superficial, seja esta original ou resultante do processo de desgaste. Dessa forma, considera-se mais conveniente referir-se à limpabilidade como um dos fatores que influem na percepção do desgaste.

Com relação ao uso de várias cores, tende a diminuir a percepção do comprometimento do aspecto, no entanto depende do grau de dispersão sobre a peça. Se as cores estão localizadas em áreas independentes, este efeito não se aplica, pois são percebidas como se fossem únicas (FELÚ et al., 1990).

Quanto ao brilho, Felú et al. (1990) apontam que as placas menos brilhantes acusam menor variação visual em relação ao estado original. Ainda, a perda de brilho se produz nos primeiros estágios da abrasão, sendo que sua evolução depende fortemente das características técnicas do vidrado como dureza, brilho inicial e outras. A influência do aspecto original na maior ou menor evidência do desgaste também é relatada por Walters e Harrison (1986) ao

comentarem que as placas monocromáticas e brilhantes evidenciam a abrasão em menor prazo do que as decoradas, com algum tipo de textura ou ainda com menor brilho.

2.3.5.1 Propriedades ópticas

O comportamento óptico representa a maneira pela qual um material reflete, absorve ou transmite a luz visível. Ao incidir sobre um objeto, a luz tende a desviar-se da sua trajetória original. Este fenômeno ocorre sempre em que há passagem de um meio para outro, o que implica em uma mudança na sua velocidade de propagação. A velocidade de propagação depende da densidade atômica e molecular do corpo sobre o qual a luz incide. Este comportamento é descrito pelo índice de refração, que relaciona o ângulo da luz incidente com o ângulo de refração através da Lei de Snell, conforme a equação 2.5 (CERVELLE e MOELO, 1990).

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_r} = \frac{n_0}{n_1} \quad (\text{equação 2.5})$$

onde, θ_i = ângulo de incidência

θ_r = ângulo de refração

n_0 = índice de refração do ar ou vácuo

n_1 = índice de refração do material

Como o índice de refração do ar equivale a 1,0003, a equação pode ser simplificada conforme segue:

$$n = \text{sen}\theta_i/\text{sen}\theta_r \quad (\text{equação 2.6})$$

Resulta que, ao diminuir a densidade do material, diminui o seu índice de refração. White (1999) lembra que o índice de refração pode sofrer variações, por exemplo, em função da temperatura. Por outro lado, o índice de refração é função da frequência da luz, tende a

diminuir com o aumento do comprimento de onda e, portanto, com o decréscimo da energia associada.

Dessa forma, a reflexão é expressa por uma curva, denominada espectro de reflectância, para os diversos comprimentos de onda do espectro visível. O índice de refração normalmente referido, em verdade, representa um valor médio na região do visível. O espectro de reflectância indica em termos relativos, qual parte da luz incidente é refletida ao colidir com uma superfície, conforme a equação 2.7, e pode expressar tanto a parcela relativa à reflexão especular quanto à difusa ou ainda, representar a reflexão total. No caso de uma superfície não metálica, um observador percebe o brilho através da reflexão especular e a cor através da reflexão difusa (SCHACKELFORD, 1999). Ambas compõem a reflexão total.

$$R = I / I_0 \quad (\text{equação 2.7})$$

onde, R = reflectância

I = intensidade refletida

I₀ = intensidade incidente

O brilho, a cor e a textura são atributos que permitem caracterizar a aparência de um objeto. A cor é composta pela luminosidade, saturação e tonalidade. Já o brilho e a textura constituem os atributos geométricos, cuja particularidade reside no fato de que sua percepção varia conforme as condições de iluminação e observação (HUNTER e HAROLD, 1987).

Cabe ressaltar que a face esmaltada pode apresentar inúmeros efeitos estéticos, com as mais variadas decorações e textura. A título de produzir um efeito estético diferenciado ou enfatizar alguma característica em específico, utilizam-se produtos complementares como as granilhas, os sinterizadores e os peletizados (CAMARGO,-) que, como consequência, tornam ainda mais complexa a análise do aspecto superficial.

2.3.5.1.1 Brilho

A reflexão especular consiste na reflexão clássica, onde os ângulos de reflexão e de incidência da luz são iguais e constantes. Dessa forma, fica claro que as condições de observação da superfície, basicamente relacionadas às direções de iluminação e visualização, são fundamentais para a identificação do brilho. Na figura 2.5, pode-se observar situações de reflexão especular e a reflexão difusa associada à orientação da superfície.

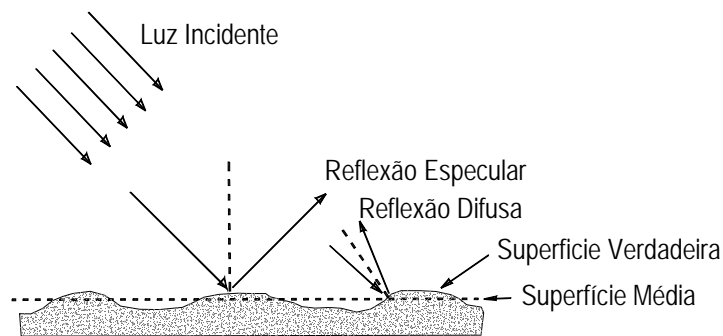


Figura 2.5: reflexão especular relativa à superfície média e reflexão difusa relativa às superfícies não paralelas (SCHACKELFORD, 1999)

A reflexão especular consiste em uma fração da reflectância, a qual pode ser calculada através da Lei de Fresnel, conforme a equação 2.8, conhecendo-se os índices de refração (n) e de absorção (k) do material, ambos dependentes da sua estrutura eletrônica (CERVELLE e MOELO, 1990). Em geral, o índice de refração aumenta com a densidade do material (HIORNS e PRIESE, 2003b).

$$R = [(n-1)^2 + k^2] / [(n+1)^2 + k^2] \quad (\text{equação 2.8})$$

A equação 2.8 considera o ar como meio de inserção do objeto. Na medida em que aumentam os índices de refração e de absorção, aumenta a capacidade de reflexão da luz incidente. Esta equação pode ser simplificada para o caso de materiais transparentes, onde $k = 0$, resultando na equação 2.9.

$$R = [(n-1) / (n+1)]^2 \quad (\text{equação 2.9})$$

Considera-se, todavia, os esmaltes cerâmicos como materiais opacos, mesmo nas situações em que são obtidos a partir de fritas transparentes, em função da adição de pigmentos opacificantes. Como não há transmissão em materiais opacos, ao aumentar a absorção, diminui a reflexão para determinada luz incidente, pois esta compreende o somatório da luz refletida, absorvida e transmitida (KINGERY et al., 1976). Mesmo nas situações em que os opacificantes não são capazes de cobrir totalmente o engobe, Kingery et al. (1976) colocam que o coeficiente de absorção é muito inferior ao de refração e pode ser simplificado para a faixa visível do espectro.

Os silicatos constituintes das fritas apresentam índice de refração entre 1,5 e 1,9, o que significa que a reflexão pode alcançar entre 4% e 9,6%, respectivamente (KINGERY et al., 1976). Esta consiste na reflexão especular máxima, calculada através da equação de Fresnel, considerando-se a superfície idealmente lisa e para incidência normal. Diversos autores (MINOLTA, 1998; SCHACKELFORD, 1999; CERVELLE e MOELO, 1990) mencionam que a rugosidade de uma superfície determina a quantidade relativa entre reflexão especular e reflexão difusa. Ou seja, a participação da reflexão especular na reflexão total, desde um valor mínimo até o máximo citado, é dada pelo estado superficial do objeto, para determinado material e ângulo de incidência da luz.

Na medida em que aumentam as irregularidades, a parcela de reflexão especular passa gradualmente à difusa, como mostra a figura 2.6. Nesta, ocorre um aumento da rugosidade superficial da esquerda para a direita, com a conseqüente redução da parcela de reflexão especular.

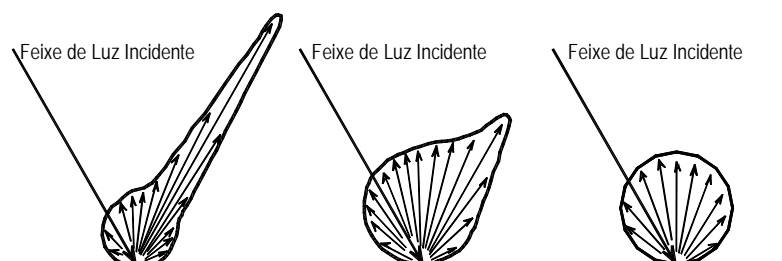


Figura 2.6: representação esquemática da reflexão com o aumento das irregularidades superficiais (KINGERY et al., 1976)

A altura das irregularidades superficiais, a partir das quais a reflexão especular máxima deixa de ser alcançada, pode ser calculada através do critério de Rayleigh, expresso na equação 2.10 (CERVELLE e MOELO, 1990). Outro critério encontrado na bibliografia, classifica como lisas as superfícies cuja rugosidade é menor do que o comprimento de onda (LORICI e BRESCIANI, 1990). Cabe observar que este último é significativamente mais tolerante do que o de Cervelle e Moelo (1990).

$$h = \lambda/8.\cos\theta \quad (\text{equação 2.10})$$

onde, h = altura média das irregularidades superficiais (nm)

θ = ângulo da luz incidente

λ = comprimento de onda (nm)

Pode-se verificar através da equação 2.10, que quanto maior o comprimento de onda, maior a tolerância com relação à rugosidade, no sentido de permitir maximizar a reflexão especular. Por exemplo, para $\theta=60^\circ$ e os comprimentos de onda de 400nm e 700nm, resultam respectivamente $h=100\text{nm}$ e $h=175\text{nm}$. Dessa forma, é interessante observar que os iluminantes poderão atuar favorável ou desfavoravelmente na percepção do desgaste. Iluminantes cuja composição espectral enfatiza os maiores comprimentos de onda (mais amarelos do que azuis) são favoráveis, ou seja, lâmpadas incandescentes permitem maior estágio de deterioração, representado por maiores irregularidades superficiais, para então revelarem perda de brilho especular. Da mesma forma, na medida em que aumenta o ângulo de incidência da luz, aumenta a tolerância com relação à rugosidade.

Hiorns e Priese (2003a) relacionam a intensidade da luz refletida (I_0) com a intensidade da luz incidente (I) a partir da equação 2.11.

$$I/I_0 = \exp\{-(4\pi\sigma\cos\theta)/\lambda\}^2 \quad (\text{equação 2.11})$$

Nesta equação, σ representa a rugosidade e λ , o comprimento de onda. Quando a superfície é perfeitamente lisa, $\sigma=0$ e $I_0=I$. Trabalhando com cinco rugosidades entre $0,05\mu\text{m}$ e $0,15\mu\text{m}$,

Hiorns e Priese (2003a) encontraram que a fração de luz refletida diminui na medida em que aumenta a magnitude da rugosidade, como indica a equação. De qualquer forma, os autores comentam que $\sigma \ll \lambda$, ou seja, a rugosidade que afeta o comportamento óptico de uma superfície tem ordem de grandeza $\ll 0,7\mu\text{m}$, considerando-se o maior comprimento de onda do espectro visível. Esta informação é importante, pois a relação entre brilho e rugosidade não envolve qualquer dimensão desta última. Estes pesquisadores afirmam que rugosidades macroscópicas, que causam efeito do tipo “casca de laranja”, não geram mudanças importantes nas medidas de brilho, embora certamente afetem o aspecto do vidro.

O desgaste, além de atuar sobre a rugosidade em si, acaba por expor poros originalmente fechados. Se a densidade de poros aumentar em relação à superfície original, poderá resultar em diminuição do brilho, pois nestes ocorre o espalhamento da luz incidente e não a reflexão. Ainda, conforme Hiorns e Priese (2003b), quanto menor o diâmetro dos poros, maior o espalhamento e assim, menor o brilho resultante. Portanto, se os poros revelados forem menores que os originais, aumenta a tendência de perda de brilho.

a) medição do brilho

A psicofísica é um segmento da psicologia através do qual pesquisadores buscam estabelecer escalas de medida da aparência. Experimentos relacionados ao brilho têm se baseado nos fatores de reflexão e na busca de geometrias que conduzam à melhor percepção de variações de aparência. As superfícies têm capacidades diferentes de reflexão da luz de acordo com a direção em que esta se manifesta, onde algumas direções apresentam maior refletividade do que outras (HUNTER e HAROLD, 1987). Justamente, Schackelford (1999) coloca que a avaliação do brilho é significativamente mais complexa do que a da cor por envolver atributos geométricos relacionados à distribuição espacial da luz.

A medição do brilho pode ser feita através de medidores de brilho (*glossmeter*), equipamentos específicos para esta finalidade, ou através de espectrofotômetros. Os medidores de brilho normalmente contam com três ângulos para leitura: 20°, 60° e 85°, cuja escolha depende do quão brilhante é o padrão, conforme indica a norma ASTM D 523 (1994):

- 60° para comparar a maioria dos materiais;

- 20° quando a medição com 60° resulta em valores de reflexão superiores a 70;
- 85° quando a medição com 60° resulta em valores de reflexão inferiores a 10.

Ao adotar um ângulo de trabalho, significa que a luz incide neste ângulo e que a medição é realizada em ângulo complementar. As direções associadas aos ângulos de medição são chamadas de direções especulares. Normalmente, estas direções são as que apresentam maior reflectância. Este fato evidencia que a reflexão especular é direcional, ou seja, para uma mesma superfície, varia conforme muda a posição do observador ou a posição da luz incidente (HUNTER e HAROLD, 1987).

Hunter e Harold (1987) comentam que no início da década de 30 foi introduzido o ângulo de 45°, mas que após sucessivos experimentos chegou-se à conclusão que o ângulo de 60° fornecia resultados otimizados para a maior parte das superfícies, tendo sido introduzido em 1939 pela ASTM. Posteriormente, foram agregados os ângulos de 20° e 85° para melhor caracterizar as superfícies de alto e baixo brilho, respectivamente. De qualquer maneira, os referidos autores manifestam-se favoráveis a que cada material busque as condições mais adequadas para avaliar os atributos geométricos relacionados à sua aparência. Complementam que alguns materiais podem exigir mais do que uma escala de brilho para serem adequadamente avaliados.

Com a utilização de espectrofotômetros, o brilho resulta das diferenças associadas às curvas de reflexão fornecidas para as configurações com componente especular incluso e com componente especular exclusivo. A primeira corresponde à reflexão total e a segunda à reflexão difusa. A opção com componente especular exclusivo é obtida através de uma janela posicionada a 8° com a vertical, a qual aberta, permite eliminar a incidência de luz nesta direção. Como o detector está posicionado também a 8° com a vertical, mas no sentido oposto, a reflexão especular medida neste ângulo é nula e a curva de reflexão resultante corresponde à reflexão difusa.

Hunter e Harold (1987) comentam que os resultados apropriados através de medidores de brilho sempre serão limitados, pois o poder de resolução do olho humano é muito superior às medidas de reflexão. No mesmo sentido, Ibáñez (1998) coloca que ainda não foi possível reproduzir artificialmente um estímulo equivalente à percepção do brilho. Hunter e Harold (1987) ilustram a complexidade do problema ao mencionarem a existência de pelo menos,

seis tipos de brilho, à parte o fato de que a percepção varia na medida em que mudam as condições geométricas de observação. Os autores exemplificam que para análise de superfícies metálicas adotam-se quatro medidas para definir o brilho, cada uma associada às variações existentes em relação a esta propriedade.

Cabe acrescentar que a avaliação visual considera as imperfeições da superfície, percebe o efeito global e considera os aspectos psicológicos associados à experiência para formar uma opinião a respeito do brilho de uma superfície, difíceis de serem contemplados em medições físicas. A ASTM D 523 (1994) inclusive se refere a situações em que os resultados instrumentais diferem grandemente da percepção visual. Dada a dificuldade em estabelecer condições de avaliação que representem adequadamente a percepção visual do usuário, é importante ter em mente que os resultados numéricos devem estar alinhados com a percepção, estabelecendo uma relação coerente com a mesma.

Apesar das dificuldades, Rodrigo et al. (1994) utilizaram medidores de brilho com o ângulo de 60° para estudar a influência de algumas variáveis relacionadas à composição da cerâmica e mostraram-se satisfeitos com os resultados obtidos. Da mesma forma, Barbera et al. (1996) justificam que a adoção do ângulo de 60° permite abranger ampla faixa de superfícies.

b) o brilho das superfícies esmaltadas

Dado que a reflexão especular varia conforme o índice de refração, o índice de absorção e com o tipo de acabamento da superfície, pode-se modificar o brilho superficial ou explicar a mudança do mesmo a partir destas condicionantes. Com efeito, Melchiades e Boschi (1999) colocam que se um determinado lote de placas cerâmicas apresentar variação de brilho em relação ao padrão, algum dos fatores mencionados a seguir devem ter se modificado, dentre outras possibilidades de menor importância:

- composição química do vidrado;
- caminho óptico percorrido;
- presença de cristais na matriz vítrea;
- textura das superfícies.

Do ponto de vista do desgaste, pode-se fazer o caminho inverso. Dado um piso em utilização, cujo aspecto inicial não revelou variação de brilho, se esta ocorrer ao longo do tempo significa que houve mudança em um ou vários dos aspectos citados.

Na medida em que se desenvolve o processo de desgaste, espera-se variações na superfície devido ao surgimento de trincas e cavidades que passam a compor uma nova textura e ainda, variações de espessura de esmalte já que a mesma é consumida ao longo do processo. Se a superfície desgastada apresentar densidade diferente da original, resultam mudanças no índice de refração e conseqüentemente no brilho percebido. Conforme Sánches (1997), a espessura do esmalte normalmente varia de 200 a 300 μ m. O caminho óptico refere-se ao caminho percorrido pela luz, onde duas placas idênticas com diferente espessura, apresentarão diferente aparência. Como o desgaste dificilmente ocorre igualmente sobre toda a placa cerâmica e ainda, sobre todo um piso que está sendo analisado, é provável que ocorram mudanças no caminho óptico. Além disso, a matriz vítrea poderá conter cristais como resultado da adição de fases cristalinas insolúveis ou pela formação das mesmas por ocasião do resfriamento. Se a distribuição desta não é homogênea, poderá influir na medida em que a espessura do material é consumida.

É necessário avaliar a partir de qual magnitude os fatores mencionados apresentam variação suficiente para serem efetivamente significativos e dessa forma, justificar a perda ou ganho de brilho em relação ao estado original. Neste sentido, a textura da superfície parece diferenciar-se, pois representa por si só uma propriedade do material. Ainda, os poucos trabalhos que estudam a variação do brilho de superfícies esmaltadas costumam justificá-la em função da variação de rugosidade sofrida pelo material como efeito da abrasão. Schackelford (1999) é claro neste sentido ao atribuir o brilho de cerâmicas esmaltadas brilhantes ao seu alto índice de refração e ao acabamento liso da superfície. Mesmo na situação de produção, Kingery et al. (1976) colocam que a principal dificuldade de obtenção de vidrados brilhantes resulta das variações no acabamento superficial, geradas pela formação de cristais, pela ondulação ou cavidades resultantes da eclosão de poros.

Melchiades e Boschi (1999) classificam as superfícies cerâmicas, de acordo com o brilho, em brilhantes, mates, semi-mates e foscas. Já Barbera et al. (1996) adotam 3 grupos: brilhante, semi-brilho e foscas, os quais configuram diferentes níveis de percepção da variação do aspecto.

Ibáñez (1998) propõe a equação 2.12 para descrever o comportamento da perda de brilho em consequência da abrasão. Cabe ressaltar que todas as placas estudadas pela autora eram brilhantes e, neste caso, todas mostraram redução do brilho com o aumento da intensidade do desgaste, porém a partir de determinado nível, esta perda tende a um valor constante. As medições foram feitas utilizando-se de um medidor de brilho com ângulo de incidência de 60°.

$$\beta = A.e^{-K_B.N} \quad (\text{equação 2.12})$$

onde, β = brilho

A = brilho inicial da superfície

K_B = constante relacionada à velocidade com que a superfície perde o brilho

N = número de giros

c) limites de aceitação para variações de brilho

A separação entre reflexão especular e reflexão difusa é arbitrária. Ao variarem-se os ângulos de observação, percebe-se tanto variações de cor, por reflexão difusa, quanto variações de brilho, por reflexão especular. Assim, há necessidade de se especificar condições que permitam a identificação de um e outro parâmetro independentemente (HUNTER e HAROLD, 1987).

Podem-se considerar dois critérios: por comparação visual ou por comparação numérica. A ASTM D 4449 (1995) define as condições necessárias para a avaliação visual de diferenças de brilho e, para tanto, indica a utilização simultânea de dois tipos de fontes de luz: iluminação concentrada, proporcionada por uma luminária de bancada cujo interior recebe pintura preta fosca e duas lâmpadas fluorescentes de 20W, e iluminação difusa, proporcionada por duas lâmpadas fluorescentes de 40W, posicionadas acima das amostras. Estas últimas caracterizam a iluminação do ambiente e devem ser tal que o registro de um fotômetro colocado sobre o testemunho diminua menos de 1/10 quando a lâmpada de bancada é apagada. Como a percepção da reflexão especular varia conforme o brilho da amostra, a norma ASTM D 4449 (1995) indica as mesmas configurações adotadas nos medidores de

brilho: 20° para cerâmicas de alto brilho; 60° para cerâmicas de brilho intermediário ou baixo e 85° para as foscas. A figura 2.7 ilustra as configurações mencionadas.

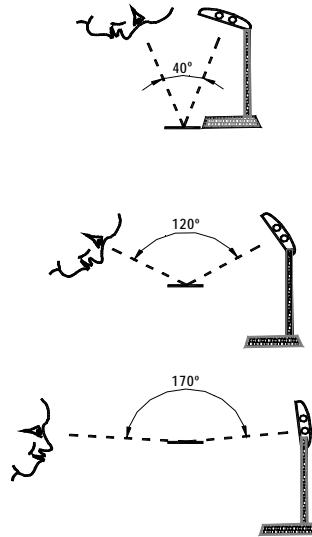


Figura 2.7: configurações geométricas de análise visual do brilho (ASTM D 4449, 1995)

Apesar da disponibilidade de critérios para a identificação de variações de brilho, dispõe-se de poucos trabalhos que abordem este tema quando se trata de placas cerâmicas. Há de se considerar a complexidade do assunto, conforme anteriormente exposto, e que o grande número de tipologias disponíveis no mercado representa uma dificuldade adicional. Limites numéricos de variação do brilho não foram encontrados. Com efeito, estes são conseqüentes de uma análise conjunta entre medições instrumentais e classificação da aparência.

Quando se trata de modelagem da vida útil, há necessidade de estabelecer limites a partir dos quais as variações de brilho são percebidas, ou seja, a partir dos quais o desgaste passa a produzir um efeito visível. Como as pessoas têm capacidades distintas de percepção e como as condições de observação real são inúmeras, deve-se estabelecer parâmetros que bem representem ambas as situações.

A variabilidade de aceitação entre pessoas é contemplada por Barbera et al. (1996). Este trabalho define faixas em que as variações de brilho não foram percebidas por um grupo de 10 observadores com 90% de segurança, ou seja, definiram limites de percepção. Para tanto, adotaram as seguintes condições de observação: ângulo de 65° , intensidade de luz de 1000lux e distância de 1m. No entanto, como o aspecto inicial das placas representa maior ou menor

tolerância às variações, as mesmas foram classificadas em sete grupos de brilho. A cada um destes corresponde uma faixa de aceitação, ou seja, em que estas variações não são percebidas.

A figura 2.8 ilustra a evolução do brilho com o aumento da abrasão para placas cerâmicas lisas brilhantes (brilho inicial > 70 utilizando-se de um medidor de brilho) e os limites para os quais as variações do brilho são visíveis e não visíveis. A região intermediária representa as variações entre os observadores.

Assim, conforme o brilho inicial da cerâmica, maior ou menor é a percepção do desgaste, portanto maior ou menor será a tolerância que define a vida útil do material.

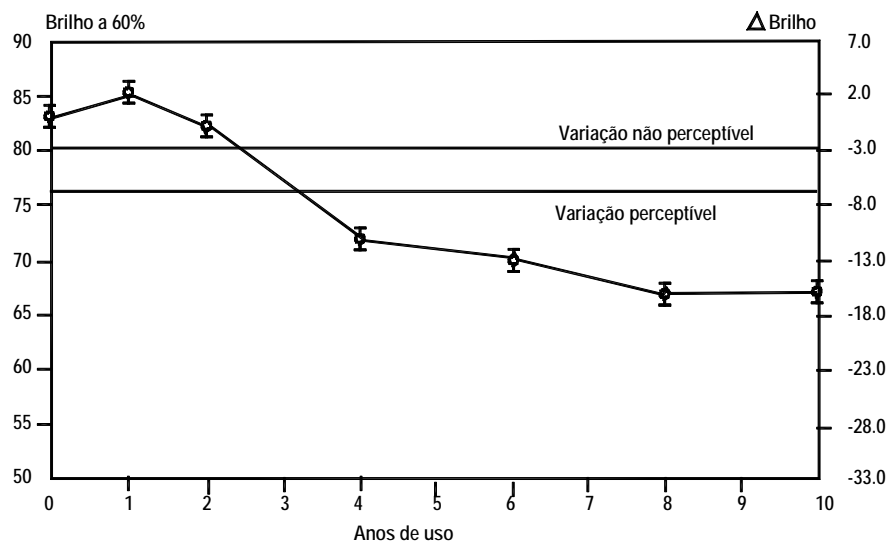


Figura 2.8: evolução do brilho para placas cerâmicas lisas e brilhantes (BARBERA et al, 1996)

2.3.5.1.2 Cor

A cor é percebida pela reflexão difusa. Esta, por distribuir-se em todas as direções, permite que a mesma cor seja percebida independentemente da posição do observador. Conforme Hunter e Harold (1987), este tipo de reflexão corresponde à maioria das situações de avaliação da aparência na indústria e suficiente para cerca de 90% dos materiais.

O olho humano distingue na forma de cor os comprimentos de onda entre 380nm e 770nm, aproximadamente. Estes caracterizam a parte visível do espectro de ondas eletromagnéticas, o qual abrange desde o infravermelho até o ultravioleta, conforme a figura 2.9.

Ao incidir sobre determinado objeto, a luz tem o seu espectro original alterado. A cor percebida consiste em um espectro subtraído da cor absorvida. O branco corresponde a um objeto capaz de refletir todas as cores básicas e o preto, a um objeto capaz de absorver todos os comprimentos de onda. (MELCHIADES e BOSCHI, 1999). Estas são denominadas cores neutras.

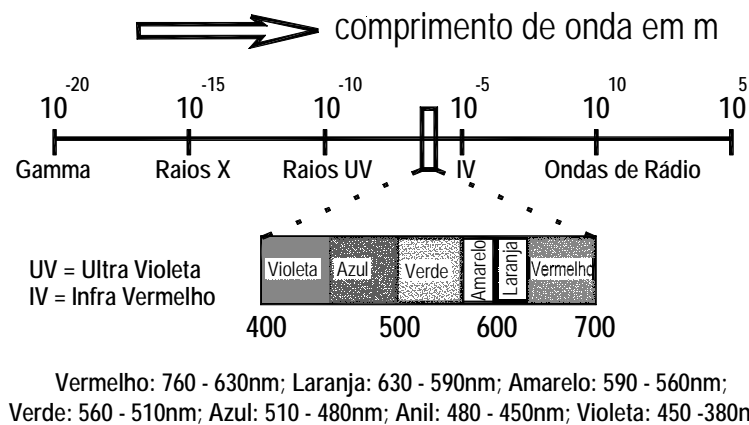


Figura 2.9: espectro visível da radiação solar (MELCHIADES e BOSCHI, 1999)

A percepção da cor depende da interação de três elementos: fonte, objeto e observador. Alterar um destes significa alterar esta percepção (ZASSO, 1997). A fonte constitui o espectro incidente, sendo que o espectro resultante sempre estará condicionado à configuração deste. Nas figuras 2.10 e 2.11, pode-se observar o quão diferentes são os espectros de radiação das lâmpadas incandescente e fluorescente branca, respectivamente.

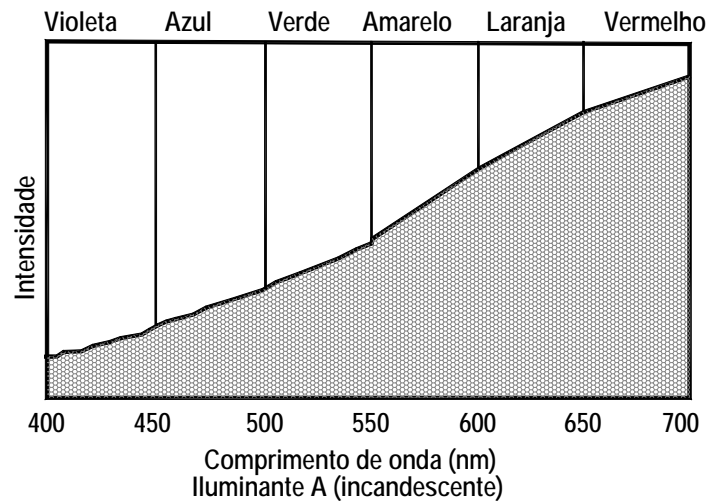


Figura 2.10: espectro de radiação da lâmpada incandescente (ZASSO, 1997)

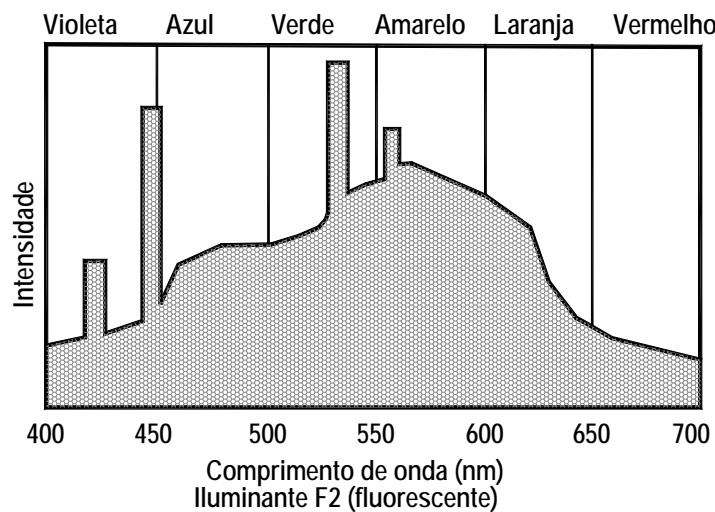


Figura 2.11: espectro de radiação da lâmpada fluorescente branca (ZASSO, 1997)

A sensibilidade de um observador em perceber as cores e as conseqüentes diferenças de cor, varia de acordo com o comprimento de onda. A região de maior sensibilidade situa-se no centro do espectro visível e diminui na medida em que se afasta para os extremos, conforme o perfil representado na figura 2.12. Cabe distinguir que, à noite, a curva de sensibilidade desloca-se para a esquerda, do verde para o azul (PETTER e GLIESE, 2002). À parte este aspecto, existem variações pessoais difíceis de serem estabelecidas.

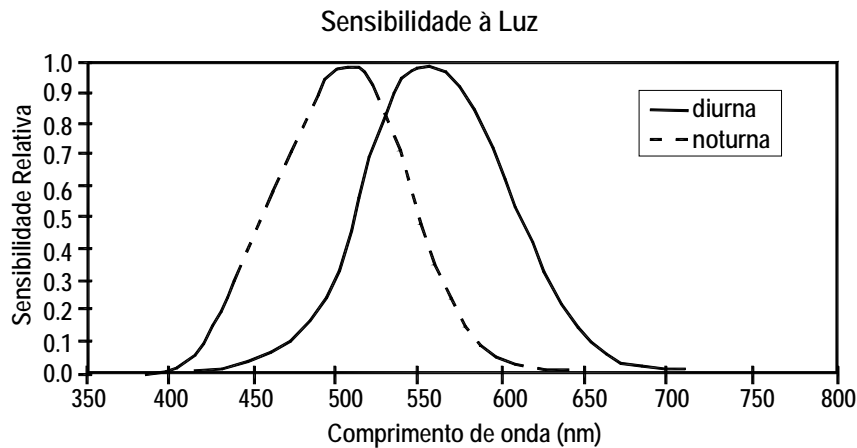


Figura 2.12: sensibilidade à luz visível (PETTER e GLIESE, 2002)

Dessa forma, percebe-se o quão problemática pode se tornar a avaliação da cor de uma placa cerâmica em condições reais de utilização. Determinado nível de desgaste poderá facilmente passar de não percebido para perceptível de acordo com o tipo de iluminação e as características visuais do observador, gerando eventualmente conflitos no relacionamento fabricante/cliente.

a) a cor das placas cerâmicas esmaltadas

A face esmaltada das placas cerâmicas é constituída basicamente por fritas e corantes, ambos materiais inorgânicos diluídos em água. Nestes, o TiO_2 e outros pigmentos brancos são os responsáveis pelo espalhamento da luz enquanto os óxidos inorgânicos e os pigmentos presentes nos vidros são os responsáveis pela absorção da luz (SCHACKELFORD, 1999). Com frequência, utilizam-se também aditivos que possuem funções diversas, de acordo com o que se deseja, por exemplo, ação defloculante, ligante, fluidificante, espessante (CAMARGO,-). De acordo com Matthes (1990), as cores podem ser obtidas por reação química de incorporação de íons pelos silicatos ou por dispersão física dos corantes internamente ao vidro. No primeiro caso, os corantes dissolvem-se totalmente na massa do vidro fundido, incorporando-se à rede vítrea e/ou em cristais.

Melchiades e Boschi (1999) colocam que a produção atual caracteriza-se pela adição de pigmentos calcinados. Neste, o vidro é composto por uma matriz vítrea com partículas de pequeno tamanho que permanecem insolúveis após a queima, corresponde portanto ao

segundo processo mencionado. O diâmetro das partículas é enfatizado por Matthes (1990) uma vez que se excessivamente grande pode resultar em superfícies de cor irregular ou manchada, se demasiado fino, perde estabilidade e intensidade de cor. O autor recomenda que o vidrado e os pigmentos sejam moídos juntos somente até que estejam suficientemente dispersos.

À parte o processo de produção, os aspectos relacionados a seguir são citados por Matthes (1990) como aqueles que definem a cor de um vidrado:

- quantidade e tipo de corante;
- composição química do vidrado;
- temperatura de cozimento;
- atmosfera do forno durante o cozimento;
- cor do suporte cerâmico no caso de vidrados transparentes;
- espessura de aplicação e;
- a forma como o vidrado se solidifica, se vítreo ou cristalino.

Melchiades e Boschi (1999) destacam a natureza do pigmento, que definirá a capacidade do vidrado em absorver ou refletir determinados comprimentos de onda; a fração em volume do pigmento, que incide na intensidade da cor, e a área superficial do pigmento. Presume-se que Matthes (1990) englobe todos estes aspectos ao se referir à quantidade e tipo de corante. Zasso (1997) também enfatiza a granulometria do corante, onde um aumento na área superficial representa maior espalhamento da luz incidente, o que resulta em uma diminuição da intensidade da cor.

Outro trabalho a respeito do assunto (ABRIL FILHO, 1999) cita que as causas para a variação da cor estão relacionadas à preparação, ao método de aplicação e à composição química dos vidrados. Destes, também destaca o processo de moagem, ou seja, a granulometria dos pigmentos. O método de aplicação não é citado por Matthes (1990), todavia a opção entre campana ou disco acarreta certa diferença de textura, que tende a afetar a percepção da cor.

Possivelmente Matthes (1990) esteja sugerindo que a técnica de aplicação se mantenha constante para um mesmo produto.

Quanto ao processo de decoração, Sanzs et al. (1999) apontam que a serigrafia é o principal responsável pelas oscilações de cor, totalizando mais de 50% das incidências. Penalver et al. (1996) também citam a decoração serigráfica, atribuindo de 40 a 60% das variações de cor à mesma. Através do processo de serigrafia ocorre a deposição de tinta sobre a placa, onde o volume depositado através deste processo poderá variar devido aos seguintes aspectos:

- às características da tela serigráfica,
- à constituição das tintas;
- ao processo de impressão (regulagem da máquina);
- às características do fixador (material com a função de formar uma camada protetora).

Ao processo de queima é atribuído 10% das variações de cor, conforme uma pesquisa realizada pelo (ITC) em 1994. Tal processo envolve a temperatura, o ciclo de queima, a pressão interna no forno, a atmosfera no interior do forno e o resfriamento da placa ao sair do mesmo. Destas, a temperatura é considerada a principal responsável pelas variações de tonalidade (BORGERT, 1999). Conforme Matthes (1990), poucas são as cores estáveis às variações de temperatura. Alguns vidrados apresentam também variação de tonalidade mesmo quando submetidos a uma segunda queima, de temperatura mais baixa, para efeitos de decoração. Borgert (1999) complementa que a temperatura sempre acarretará variação na cor do vidrado, todavia ocorre que, algumas vezes, estas variações têm magnitude inferior à sensibilidade humana.

b) medição da cor

Barba et al. (1997) dividem os sistemas de avaliação da cor em dois grupos: aqueles que trabalham com amostras padrão por comparação visual e aqueles que buscam quantificar as cores numericamente.

Dada a boa capacidade humana em diferenciar cores e a simplicidade dos métodos qualitativos em termos de instrumentação, os sistemas que trabalham a partir da observação têm sido muito utilizados. Estes, todavia, não permitem quantificar diferenças. Conforme Schackelford (1999), o olho humano é incapaz de fornecer medidas quantitativas apesar de diferenciar de 5 a 10 milhões de cores em situações de comparação lado-a-lado. Quando se requer a ação da memória, a capacidade humana é reduzida para cerca de 300 cores.

Constituem exemplos do método comparativo o sistema Munsell e o sistema Ostwald. Nestes, a cor é identificada através de nome e número dada a semelhança com cartões pré-estabelecidos. É fácil perceber que esta forma de descrição da cor é limitada. Barba et al. (1997) colocam que se fossem incluídas todas as cores em um catálogo, isso representaria mais de 10 milhões de cartelas. Ainda, as características superficiais, como textura e brilho, alteram a percepção das cores, o que exigiria cartelas diferenciadas.

A análise visual de diferenças de cor pode também se basear na ASTM D 1729/96. Para tanto, são sugeridas configurações geométricas e condições de iluminação que favorecem a percepção da cor. A situação mais adequada é aquela que permite individualizar a reflexão difusa, relacionada à cor; da reflexão especular, relacionada ao brilho.

A figura 2.13 ilustra as geometrias de observação para cor e brilho. Se o observador posiciona-se perpendicular à superfície, como mostra o lado esquerdo, não é capaz de identificar reflexão especular, somente reflexão difusa. Este posicionamento comumente é associado ao ângulo de 45° para incidência da luz. Se o observador posiciona-se de forma contrária à luz incidente, conforme o lado direito da mesma figura, percebe a reflexão especular.

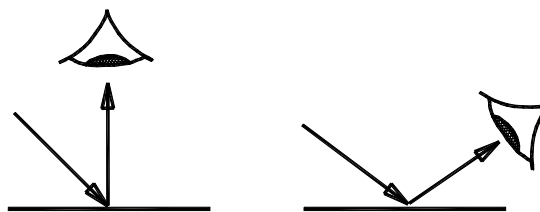


Figura 2.13: geometrias de observação da cor (à esquerda) e do brilho (à direita) em superfícies não metálicas (HUNTER e HAROLD, 1987)

A ASTM D 1729/96 recomenda a utilização de uma câmara de observação padrão cujo interior deve ser preto fosco de modo a evitar reflexão especular. As amostras devem estar

posicionadas a uma distância de 45 a 60cm do observador, sobre um suporte que faz 45° com a horizontal. Este cria a condição geométrica favorável à observação da cor tanto de amostras foscas quanto brilhantes. A iluminação consiste em dispor lâmpadas fluorescentes de forma que a luminosidade no centro de amostras resulte entre 810 e 1880lux. No caso de materiais muito claros, a iluminação pode ser reduzida para 540lux e, no caso de amostras muito escuras, aumentada para 2150lux. Esta pode ser obtida com a aproximação da fonte de luz.

Existem diversos testes padronizados que permitem avaliar a habilidade das pessoas envolvidas com a avaliação de cores, como os descritos na ASTM E 1499/97, relacionada à seleção, avaliação e treinamento de observadores. Araújo (2002), por exemplo, considera o “Teste de 100 tonalidades de Farnsworth-Munsell” de alta precisão para identificar a capacidade de discriminação de tonalidades. Neste, o observador deve posicionar diversas amostras na busca de um degradê. O autor também destaca o “Teste de Habilidade de Visão HVC”, no qual o observador compara algumas amostras com padrões definidos e avalia à qual graduação as mesmas correspondem. Este teste é considerado de maior dificuldade que o anterior.

O primeiro acordo sobre a descrição matemática da cor foi coordenado pelo CIE (*Comission Internationale d'Eclairage*) em 1931 (BARBA et al., 1997). Nesta ocasião, foram padronizadas três fontes de luz: o iluminante A, que define a luz típica diurna de uma lâmpada incandescente (filamento de tungstênio); o iluminante B, que representa a luz direta do sol, e o iluminante C, que representa a média da luz do dia, excluído o ultravioleta. Em 1966, foi proposto o iluminante D. Este representa melhor a luz do dia, envolvendo os comprimentos de onda relacionados ao ultravioleta. Normalmente, os iluminantes são definidos por números relacionados à temperatura: 6500K para D65 (HUNTER e HAROLD, 1987). Posteriormente, surgiram outros iluminantes, como os fluorescentes F2, F6, F7, cada um com suas particularidades.

Os sistemas de avaliação numérica da cor baseiam-se na medida da reflectância e normalmente representam-na a partir dos parâmetros tonalidade, saturação e luminosidade. A tonalidade representa a sua especificação geral, mas não indica a concentração, dada pela saturação. A luminosidade compõe o terceiro atributo, variando do branco ao preto. Dado o seu caráter tridimensional, a cor pode ser graficamente representada por um sistema de coordenadas perpendiculares: $L^*a^*b^*$, conhecido como sistema CIE $L^*a^*b^*$, definido em

1976 (SCHACKELFORD, 1999). Na figura 2.14, observa-se que cada atributo segue orientação distinta.

A localização da cor é dada pelas coordenadas no espaço de cor, onde a L^* indica a luminosidade, a^* indica a cromaticidade na direção do verde para o vermelho e b^* indica a cromaticidade na direção do amarelo para o azul.

O espectrofotômetro, a partir do qual são obtidos os parâmetros de cor, fornece o espectro de reflectância para os comprimentos de onda entre 400 e 700nm, em geral, e com medições a cada 10nm ou 20nm. A luz refletida pela amostra é medida comparativamente à reflexão difusa do branco, tomada como perfeita, sob as mesmas condições de observação (HUNTER e HAROLD, 1987).

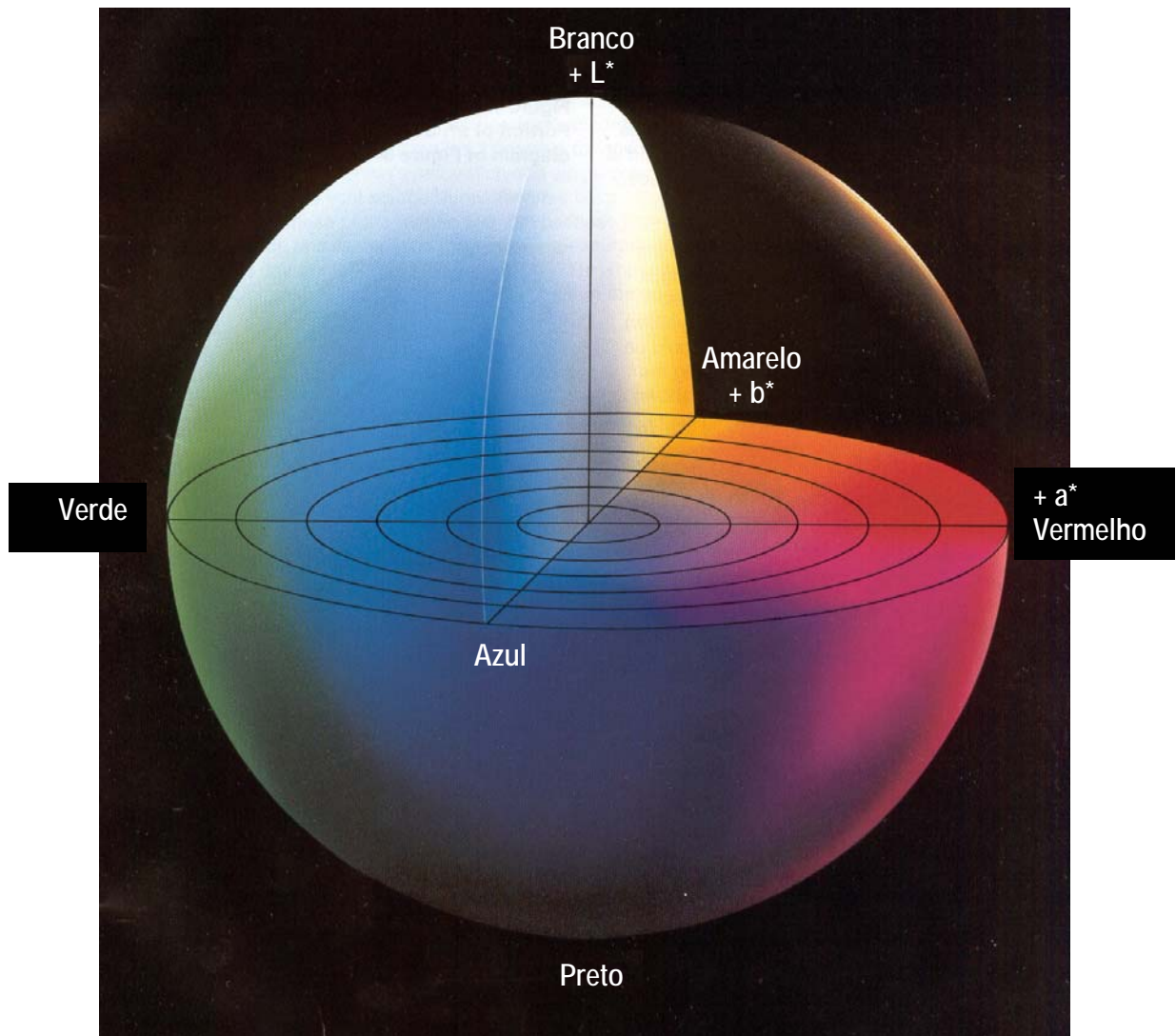


Figura 2.14: diagrama $L^*a^*b^*$ do sistema CIE $L^*a^*b^*$
(MINOLTA , 1998)

A cor também pode ser representada a partir de coordenadas polares através da cromaticidade C^* , da luminosidade L^* e do ângulo de tonalidade h . A cromaticidade C^* representa a saturação e corresponde à distância da origem $(0,0)$ até a coordenada (a^*,b^*) , como mostra a equação 2.13. O ângulo de tonalidade é medido em graus, de 0° a 360° , tomado a partir do eixo positivo de a^* , no sentido anti-horário e é representado através da equação 2.14. Este sistema é conhecido por L^*C^*h .

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (\text{equação 2.13})$$

$$h = \arctg(b^*/a^*) \quad (\text{equação 2.14})$$

Barbera et al. (1996), utilizando-se de um espectrofotômetro de reflexão, identificaram que o desgaste geralmente manifesta-se através da perda de saturação da cor, com nenhuma influência sobre a forma da curva de reflexão. Portanto, aparece como um deslocamento da curva como mostra a figura 2.15, para as situações antes e depois da abrasão.

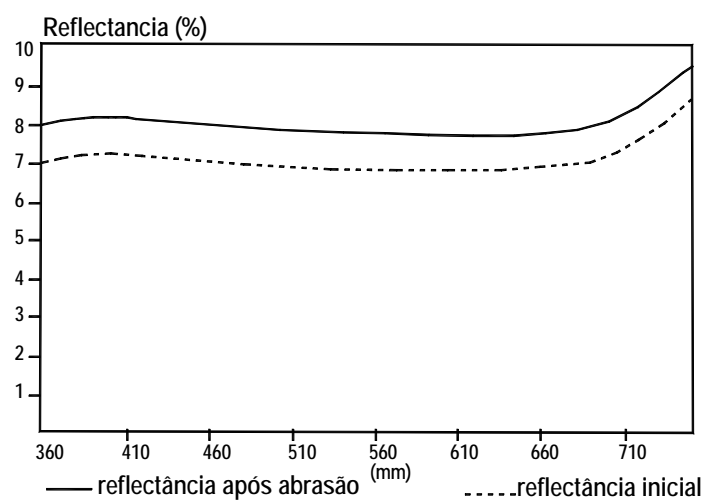


Figura 2.15: curvas de reflexão antes e depois da abrasão (BARBERA et al., 1996)

Em outro estudo, Zaro et al. (1994) quantificam o desgaste por meio da reflexão medida com o auxílio de um transdutor óptico. Neste, identificaram que superfícies escuras e sem brilho apresentam menor diferença de reflexão entre a região abrasionada e não abrasionada de uma mesma amostra.

c) limites de aceitação para variações de cor

A título de classificação da produção, as normas em geral não estabelecem limites de aceitação de um lote, mas sim que estes devem ser o resultado de acordo entre as partes, como é o caso da NBR 13818 (1997) e ASTM D 3134 (1989) ao se referirem às diferenças de tonalidade. Esta última alerta, todavia que o equilíbrio entre limites permissivos ou rígidos demais não é simples e que pequenas mudanças numéricas podem representar um aumento significativo no custo e/ou na dificuldade de produção.

A quantificação numérica das diferenças de cor é amplamente difundida no meio técnico e industrial através do parâmetro conhecido como Delta E (ΔE), o qual corresponde à hipotenusa espacial no espaço de cor, em unidade Judd, conforme mostra a equação 2.15, extraída da ASTM D 2244 (1993).

$$\Delta E_{a,b}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{equação 2.15})$$

onde, ΔL^* = variação de luminosidade, dada por $(L^*_1 - L^*_0)$;

Δa^* = variação de cromaticidade na direção verde/vermelho, dada por $(a^*_1 - a^*_0)$;

Δb^* = variação de cromaticidade na direção amarelo/azul, dada por $(b^*_1 - b^*_0)$.

A situação *I* corresponde à amostra em análise e *O* à placa padrão.

Cabe observar que ΔE descreve a magnitude, mas não a tendência da cor em análise. Para tanto, há de se analisar os valores individuais. Por exemplo, Δa^* negativo indica cromaticidade na direção do verde e Δa^* positivo na direção do vermelho. Esta interpretação, todavia, não tem maior relevância ao se tratar de desgaste, mas sim para correções no processo de produção.

Pode-se também avaliar a diferença de tonalidade através do parâmetro ΔH , descrito pela equação 2.16.

$$\Delta H^*_{a,b} = \sqrt{(\Delta E^*_{a,b})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{a,b})^2} \quad (\text{equação 2.16})$$

Com relação aos limites de aceitação para variações de cor, pode-se mencionar três situações distintas: limites de ΔE diferenciados conforme a cor que está sendo observada, dado que a sensibilidade humana é variável neste sentido; limites de ΔE diferenciados conforme o material em análise, por exemplo, tintas, cerâmicas, plásticos. E ainda, pode-se mencionar o caso de indústrias que acham mais conveniente trabalhar com as variações associadas aos parâmetros de cor individuais: ΔL^* , Δa^* e Δb^* . Normalmente a tolerância para a luminosidade é menor que para a cromaticidade. Possivelmente, a análise individual facilita a intervenção no processo com vistas à correção das diferenças.

Referindo-se ao primeiro caso mencionado, a ASTM D 3134 (1989) coloca que a tolerância admitida para determinada região do espaço espectral pode não ser satisfatória para outra. Com efeito, Penalver et al. (1996), ao realizarem um estudo sobre aplicações serigráficas, identificaram diferenças significativas entre os valores de ΔE a partir dos quais se percebe variação de cor, conforme a cor original. Amostras cinza correspondem a $\Delta E = 0,2$, amostras rosa ao $\Delta E = 0,4$ e amostras azuis ao $\Delta E = 2,0$. Conforme estes dados, a cor azul é muito mais tolerante em termos de variações antes destas serem percebidas.

Normalmente, os limites de aceitação da variação de cor são apresentados de forma genérica. Machado et al. (1997) indicam que diferenças passam a ser percebidas para ΔE em torno de 0,5 e 0,7. Já Tozzi (1992) indica resumidamente que valores superiores a 1 são perceptíveis. Maior detalhamento encontrou-se na tabela 2.4, apresentada por Petter e Gliese (2002), conforme consta a seguir. Nesta, pequenas variações passam a ser percebidas para o valor de $\Delta E = 0,5$.

Tabela 2.4: significado das diferenças de cor
(PETTER e GLIESE, 2002)

ΔE	Diferença de cor
------------	------------------

< 0,2	imperceptível
0,2 a 0,5	muito pequena
0,5 a 1,5	pequena
1,5 a 3,0	distinguível
3,0 a 6,0	facilmente distinguível
6,0 a 12,0	grande
> 12,0	muito grande

Estabelecer uma correspondência entre a variação de cor e limites que representem a percepção dos usuários é importante em trabalhos de estimativa da vida útil, pois o término desta não está relacionado a qualquer variação de cor, mas sim àquelas percebidas, as quais são representadas por estes limites. Barbera et al. (1996) procuram contemplar este aspecto classificando as placas cerâmicas em três grupos, conforme a reflexão inicial. A cada um destes grupos corresponde uma faixa de aceitação da variação da cor. Para estabelecer esta correspondência, as placas foram analisadas visualmente por um grupo de 10 pessoas em condições padronizadas de observação. Assim, conforme a cor inicial da cerâmica, maior ou menor é a percepção do desgaste e, portanto, maior ou menor a tolerância associada ao término da vida útil.

2.3.5.2 Número de cores e grau de disseminação das cores

O número e o grau de disseminação das cores são mencionados por Felú et al. (1990) como artifícios para disfarçar o efeito da abrasão. Esta evidência representa um complicador no estudo da aparência já que o mercado disponibiliza as mais diversas tipologias de materiais cerâmicos para revestimento. As placas podem ser classificadas em dois grupos básicos: lisas e decoradas, sendo que o segundo tipo compreende uma infinidade de alternativas, desde a disposição de duas cores, segundo uma forma geométrica definida, até o uso de várias cores distribuídas aleatoriamente.

2.3.5.3 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial constitui, juntamente com a ondulação e forma, as irregularidades que caracterizam a textura de uma superfície. Estas se distinguem conforme indicado a seguir (DIN 4760 apud SALDANHA et al., 1999):

- a rugosidade compreende os desvios cuja relação entre distância e profundidade varia de 150:1 a 5:1, com frequências periódicas ou aperiódicas;
- a ondulação compreende desvios cuja relação entre distância e profundidade varia de 1000:1 a 100:1, com frequências predominantemente periódicas.

Com o mesmo propósito, Ibáñez (1998) refere-se à altura das irregularidades como segue:

- a rugosidade apresenta magnitude de frações de milímetros até abaixo do micrômetro;
- as ondulações compreendem centenas de micrômetros até vários milímetros e;
- os desvios da forma original, denominam-se as irregularidades maiores.

Partindo-se do pressuposto que o desgaste representa uma perda de material superficial, parece óbvio que a rugosidade inicial é de alguma forma alterada. Portanto, a variação da rugosidade consiste em um efeito da abrasão. Conforme Ibáñez (1998) e Felú et al. (1990), o caso mais típico representa situações de aumento da rugosidade como consequência do desgaste. No caso de placas originalmente rugosas, todavia, poderá ocorrer uma diminuição nos picos superficiais que lhes caracterizam. Com efeito, Enrique et al. (1995) encontraram redução no coeficiente de atrito como consequência do desgaste. Da mesma forma, Ford (1996) alerta que materiais concebidos como resistentes ao deslizamento podem sofrer perda da rugosidade sob condições de abrasividade e expor uma superfície gradativamente mais lisa, comprometendo a segurança dos usuários.

a) medição da rugosidade

A rugosidade de uma superfície pode ser apropriada através de rugosímetros, de uso bastante difundido, ou através da dispersão da luz.

Os rugosímetros buscam caracterizar geometricamente uma superfície através de perfis. Há de distinguir o perfil real, obtido pela interseção da superfície real com um plano perpendicular imaginário, do perfil efetivo, gerado pela técnica de medição utilizada. Como a rugosidade é sobreposta a uma superfície ondulada, o perfil de rugosidade é obtido a partir do perfil efetivo, utilizando-se de um filtro que visa eliminar a ondulação (MITUTOYO, s/data). A

filtragem é obtida através da seleção de um comprimento de amostragem (*cut-off*) adequado. Este deve ser pequeno o suficiente para que as ondulações da superfície não interfiram nos resultados. Conforme a figura 2.16, o comprimento l_{e1} é adequado e o comprimento l_{e2} é excessivo.

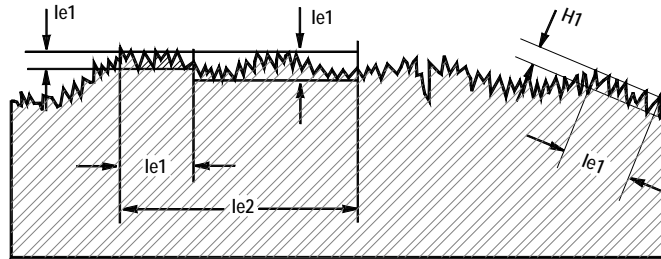


Figura 2.16: comprimentos de amostragem (MITUTOYO, s/data)

O *cut-off* varia entre 0,25mm e 8mm, sendo selecionado conforme o grau de acabamento da superfície. Normalmente, o próprio fabricante do equipamento fornece uma tabela indicativa. Recomenda-se que o rugosímetro trabalhe sobre um segmento de trechos independentes de pelo menos 5 vezes o valor do *cut-off*, chamado percurso de medição.

A partir do perfil de rugosidade, pode-se quantificar e analisar diversos parâmetros: rugosidade média (R_a e R_z), rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$), rugosidade média do 3º pico e vale (R_{3z}), desvio médio quadrático (R_q), profundidade total (R_t), e outros. Saldanha et al. (1999) indicam a existência de pelo menos 50 parâmetros distintos. Conforme Ibáñez (1998), cada parâmetro tem suas vantagens e desvantagens e cabe ao usuário da informação selecionar aqueles que refletem de forma mais precisa as características que pretende estudar. Dentre estes, o mais citado na bibliografia é a rugosidade média R_a .

A rugosidade média R_a é definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas y_i , posicionados em relação à linha média, na extensão do percurso de medição, conforme representado na figura 2.17 e descrito pela equação 2.17 (MITUTOYO, s/data).

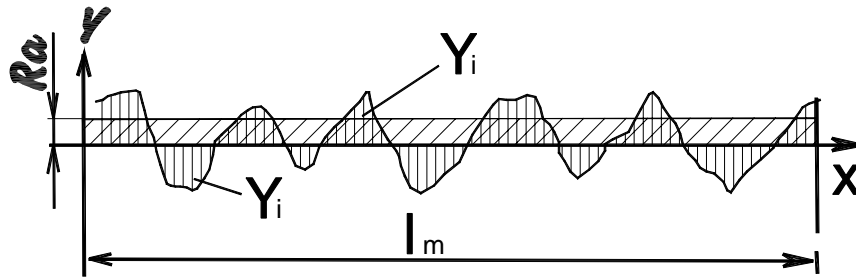


Figura 2.17: rugosidade média Ra (MITUTOYO, s/data)

$$Ra = \sum y_i/n \quad (\text{equação 2.17})$$

onde, i varia de 1 a n .

A linha média representa a superfície de referência ideal, sem qualquer irregularidade, e consiste no sistema de medição adotado mundialmente, e também pela ABNT através da NBR 6405/88, para quantificar os desvios de forma de uma superfície. Esta linha é posicionada de maneira que a soma das áreas sobre si seja igual à soma das áreas abaixo dela. Como dificilmente se obtém esta igualdade, a diferença consiste na rugosidade média, a qual pode ser interpretada como um retângulo sobre a linha média.

Utilizando-se do equipamento PEI, Ibáñez (1998) relaciona o número de giros com a rugosidade, interpretada pelo parâmetro Ra, e encontra uma relação crescente dada por uma curva em forma de S , que se adapta à equação 2.18. Para um número suficientemente grande de revoluções, a rugosidade Ra acaba por convergir para um valor constante próprio de cada vidrado.

$$Ra = B/(1 + C \cdot e^{-K_R \cdot N}) \quad (\text{equação 2.18})$$

onde, Ra = rugosidade média (μm)

B, C, K_R = constantes cujos valores diferem conforme o vidrado

N = número de giros

O parâmetro R_a , todavia, não distingue entre picos e vales, de forma que superfícies de mesmo R_a podem ser completamente diferentes, como mostra a figura 2.19. Convém que a rugosidade média seja acompanhada de outro parâmetro para complementar a descrição. No caso de superfícies desgastadas, onde se deseja comparar as irregularidades em relação ao estado original, os parâmetros mostrados na figura 2.18 são especialmente adequados. Estes descrevem justamente a altura dos picos (R_{pk}), a profundidade da rugosidade central (R_k) e a profundidade dos vales (R_{vk}), obtidos a partir da chamada curva de Abbott-Firestone.

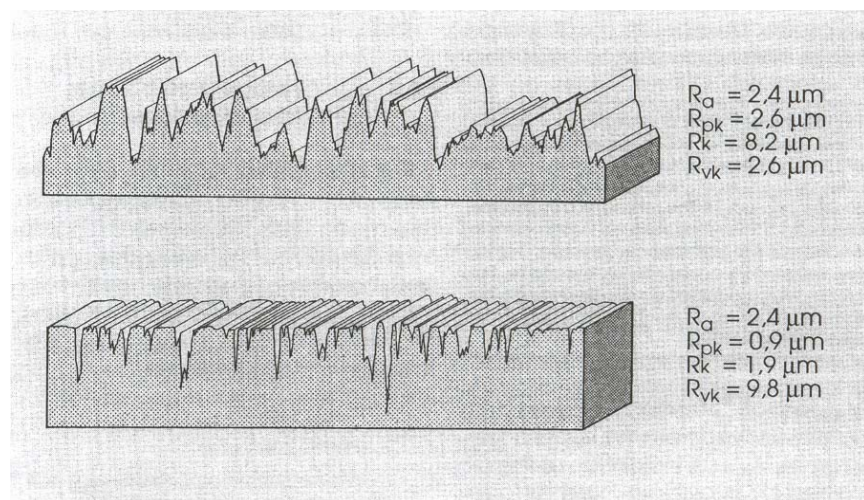


Figura 2.18: perfis de rugosidade com mesmo R_a , porém com diferente altura dos picos (R_{pk}), profundidade da rugosidade central (R_k) e profundidade dos vales (R_{vk}) (MUMMERY, 1992)

A rugosidade média R_z consiste na média das cinco rugosidades parciais correspondentes à diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada um dos cinco comprimentos de amostragem. Este parâmetro informa sobre a destruição de uma superfície, portanto também interessante para o caso de desgaste (MITUTOYO, s/data).

b) rugosidade e brilho

A relação entre brilho e rugosidade é comumente referida na bibliografia que trata de propriedades ópticas. A presença de irregularidades limita a parcela de luz especularmente

refletida, pois distorce o ângulo de reflexão da luz incidente fazendo com que o brilho percebido seja menor do que o brilho potencial, determinado pelo índice de refração.

Conforme Ibáñez (1998), as irregularidades que produzem este efeito concentram-se principalmente na faixa dimensional de micrômetros até frações de milímetro, o que corresponde justamente à rugosidade. Com efeito, a autora obtém uma relação linear entre as constantes relacionadas ao brilho e à rugosidade, fazendo-a concluir que o aumento da rugosidade e a diminuição do brilho, conseqüentes do desgaste, estão diretamente relacionados. Cabe salientar que o efeito observado poderá ser de aumento do brilho nas áreas desgastadas se ocorrer redução da rugosidade original.

Por outro lado, a rugosidade apresenta-se como um quesito que, dentro de certos limites, permite disfarçar a percepção da abrasão. Conforme Walters e Harrison (1986), placas lisas evidenciam mais facilmente o desgaste. Do ponto de vista óptico, talvez a perda de alguns picos em uma placa rugosa tenha efeito menor sobre a percepção do que as mudanças provocadas pelo desgaste em uma placa lisa.

2.3.5.4 Limpabilidade

Para designar a eficiência e a facilidade com que manchas são removidas de uma superfície esmaltada será empregado o termo limpabilidade. Como conseqüência de um processo abrasivo, esta capacidade poderá ser alterada em vista da retenção de sujeira.

A retenção de sujeira pode estar relacionada tanto aos riscos e trincas decorrentes do processo de desgaste, os quais favorecem a impregnação de material nas suas cavidades e sulcos, quanto à exposição de poros superficiais. Estes poros, anteriormente internos, na medida em que se desenvolve o desgaste, passam a aflorar na superfície, facilitando a retenção de sujeira (IBÁÑEZ, 1998). Felú et al. (1990) lembram que o tamanho dos poros e a distância dos mesmos à superfície é tão importante quanto a sua quantidade. Dessa forma, um aumento na porosidade, não necessariamente representa um aumento da impregnação de sujeira.

Interessante observar que baixos níveis de desgaste, não perceptíveis visualmente, poderão ser revelados em função da menor limpabilidade. Mesmo que se trate de material removível, conforme a facilidade com que a retenção de sujeira ocorre, o aspecto visual poderá resultar

constantemente prejudicado. De fato, Simioli (1992) comenta que, em cerâmicas esmaltadas, a perda de material torna-a menos funcional em termos de facilidade de limpeza e higiene.

Conforme Ibáñez (1998), os poros abertos tendem a reter sujeira de modo irreversível enquanto que as trincas e sulcos, de modo reversível. Certamente que a primeira é substancialmente mais grave, todavia, do ponto de vista do usuário, a segunda representa importante fonte de insatisfação. Cabe destacar que não se trata de areia ou material equivalente, solto sobre o revestimento, mas efetivamente impregnado, acarretando o conhecido “encardimento”.

Para o usuário, o comprometimento da limpabilidade representa a perda de uma das vantagens associadas ao uso dos revestimentos cerâmicos. Em condições de utilização, a impregnação de sujeira reversível pode iniciar transcorrido pequeno período de tempo. Na medida em que o período entre a impregnação de sujeira e a necessidade de intervenções de limpeza torna-se cada vez menor, o usuário percebe que o piso já não apresenta as condições originais de superfície. Como o comprometimento do aspecto é transitório, não representa o término da vida útil, permite entretanto visualizar um desgaste antes não identificável. Sem dúvida que um piso pode exigir mesmo originalmente procedimentos mais enérgicos para que seja restaurada sua condição de limpeza, porém este caso representa uma situação de má especificação do material. Por exemplo, em ambientes de alto tráfego se faz necessária uma limpeza mais freqüente com escova e material abrasivo (placas cerâmicas classe C).

De acordo com Timellini e Carani (1997), a natureza do produto de limpeza utilizado ao longo da vida do material pode protegê-lo do processo de abrasão ou mesmo, acelerá-lo. Este estudo mostra duas situações distintas: uma em que um produto de limpeza, sem qualquer efeito prejudicial à cerâmica se utilizado no estado original da mesma, gera deterioração precoce da superfície ao atuar simultaneamente à ação abrasiva. Por outro lado, outro agente de limpeza, ao ser usado conjuntamente à ação abrasiva, diminuiu substancialmente os efeitos da abrasão comparativamente a amostras sem o uso do mesmo. Esta evidência revela-se fundamental na manutenção do revestimento, ocasião em que se pode reduzir a ação abrasiva através do uso rotineiro de um produto adequado. Na prática, deveria haver instruções por parte dos fabricantes de placas cerâmicas, de forma que o consumidor pudesse se beneficiar de produtos que auxiliassem na preservação do revestimento. Certamente, pesquisas neste sentido teriam de ser realizadas.

a) Retenção de sujeira reversível

Ibáñez (1998) propõe a adoção do parâmetro V_o , volume de retenção de óleo, para indicar a tendência à impregnação de sujeira removível. O parâmetro V_o é utilizado na área mecânica e representa o volume de vazios por unidade de área capaz de reter óleo. Popp et al. (1999) comentam que este parâmetro indica a propriedade de uma superfície em armazenar e transportar lubrificante. Calcula-se V_o a partir de curva de fração de contato, ou seja, curva de Abbott-Firestone, cujo traçado é obtido através do perfil de rugosidade fornecido por um rugosímetro (MUMMERY, 1992). A curva de Abbott-Firestone relaciona em termos percentuais a superfície resultante do corte dos picos a diversas profundidades, conforme mostra a figura 2.19.

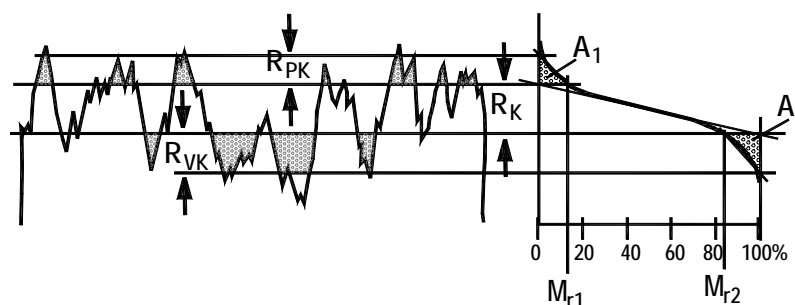


Figura 2.19: curva de fração de contato (Abbott-Firestone) função do perfil de rugosidade (MUMMERY, 1992)

O traçado da curva abrange, no eixo vertical, a distância entre o pico mais elevado (0%) e o vale mais profundo (100%), o que representa a profundidade total da rugosidade e, no eixo horizontal, a fração de contato (t_p), que varia de 0 a 100%. Dadas duas superfícies, aquela que apresentar maior fração de contato para uma mesma profundidade é a mais lisa.

O volume de retenção de óleo (V_o) é calculado conforme a equação 2.20. O parâmetro R_{vk} é determinado transformando-se a área resultante da integral, indicada por A_2 na figura 2.20 (MUMMERY, 1992), em um triângulo de mesma área e base M_{r2} . Este ajuste busca minimizar a influência de valores extremos.

$$V_o = (R_{vk}(100 - M_{r2}))/200 \quad (\text{equação 2.20})$$

onde, R_{vk} = profundidade simplificada dos vales

M_{r2} = fração de contato nos vales

Ibáñez (1998) relaciona o parâmetro V_o com o aspecto de superfícies originais e desgastadas segundo o método PEI, após o encardimento das mesmas com uma mistura de óleo mineral e carvão ativado, na proporção de 85 para 15, em peso. Através de uma escova, procura-se fazer com que o material penetre nos poros, sendo que, posteriormente, as superfícies são limpas com um pano seco.

A autora comenta que o volume de poros abertos é muito pequeno em relação ao de trincas. E, ainda, que o volume de poros em suas amostras praticamente não varia na medida em que estas são submetidas a maior número de giros. Estas evidências levaram-na a concluir que o aumento do volume de retenção de óleo com o aumento do número de ciclos, se deve ao desencadeamento progressivo das trincas.

Em seu estudo, Ibáñez (1998) determinou que o encardimento aumenta progressivamente com o desgaste até alcançar um valor máximo, para então diminuir até um valor constante. Provavelmente, em um estado mais avançado de abrasão, ocorra o arrancamento das partículas que constituem as bordas dos poros abertos, desconfigurando-os e implicando em menor retenção de sujeira. A autora encontrou que para volume de retenção de óleo entre 0,012 e 0,016 $\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$ a superfície dos vidrados passa a reter sujeira. Quando V_o é inferior a este intervalo não há problema de limpabilidade. Cabe lembrar que não necessariamente o encardimento de uma superfície está condicionado ao processo de abrasão, basta que o material apresente originalmente volume de retenção de óleo superior à faixa limite proposta.

Interessante observar que Ibáñez (1998) não encontrou relação da rugosidade média R_a com o encardimento, ou seja, o aumento da rugosidade não condiciona o aumento do encardimento. O aumento do volume de retenção de óleo, por sua vez, é conseqüência do aumento da profundidade dos vales, conforme indica a equação 2.20.

b) Retenção de sujeira irreversível

O aprisionamento de sujeira em caráter irreversível foi encontrado por Ibáñez (1998) em amostras cujos poros apresentavam diâmetro entre 50 e 80 μm . A autora comenta que esta

faixa dimensional favorece a retenção de sujeira. Arantes et al. (2001), referindo-se ao porcelanato, também mencionam esta ordem de grandeza e indicam que a presença de poros grandes, de 50 a 100 μm , é significativamente mais relevante do que o volume total de poros em se tratando de manchamento. Estes autores destacam, todavia, a profundidade dos poros como o fator mais influente sobre a facilidade de limpeza, ocorre que, em geral, profundidade e diâmetro estão relacionados. Escardino et al. (2002) colocam que a porosidade aumenta a partir da superfície original até um valor máximo próximo a 50% da espessura. Na superfície, os poros são menores e em menor número. A figura 2.20 representa esquematicamente a variação da porosidade em função dos cortes *a*, *b*, *c* e *d* ao longo da espessura da camada do esmalte. Em seu experimento, os pesquisadores encontraram para os poros maiores, dimensões de 40 a 50 μm .

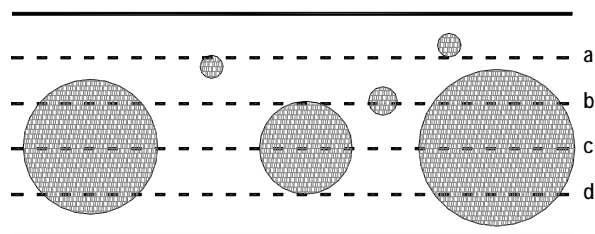


Figura 2.20: variação da porosidade em função dos cortes *a*, *b*, *c* e *d* ao longo da espessura da camada do vidrado (ESCARDINO et al., 2002)

O ensaio de resistência à manchas previsto na NBR 13818/97 em seu Anexo G tem a intenção de avaliar a limpabilidade de placas cerâmicas. Normalmente, o ensaio é realizado em amostras originais, a exceção das placas candidatas à classe PEI 5, quando somente poderão ser assim designadas se apresentarem resistência a manchas após a abrasão. Um estudo conduzido por Timellini e Carani (1997) mostra que a limpabilidade de placas esmaltadas novas é muito boa. Neste, todas as manchas foram passíveis de remoção com os métodos propostos, todavia, em superfícies desgastadas, aproximadamente a metade das manchas não foram removidas. Os autores mostram que a eficácia da limpeza diminui sensivelmente com o progresso do desgaste e que não há relação com a resistência à abrasão e/ou resistência química do material, pois ocorre tanto para materiais originalmente de baixa resistência quanto de alta. Produtos de mesma classe podem ter comportamento diferente com respeito a limpabilidade. Este trabalho alerta que a limpabilidade pode mudar ao longo da vida útil devido às modificações de superfície mencionadas anteriormente.

Simioli (1992), ao referir-se à antiga norma europeia EN 122, coloca que as substâncias manchantes eram claramente insatisfatórias. Por ocasião da revisão normativa que deu origem às atuais normas ISO 10545 e NBR 13818/97, foram propostos novos agentes, quais sejam, solução de iodo, óxido de cromo e azeite de oliva. Paralelamente, Timellini e Carani (1997) sugerem a adoção do método do Centro Cerâmico Italiano, que amplia a relação de agentes manchantes para permitir maior sensibilidade e seletividade quanto as possibilidade de uso da cerâmica. Esta relação compreende nove produtos, dentre os quais está incluído o azeite de oliva e os indicados pela antiga EN 122: azul de metileno e permanganato de potássio. Cabe observar que os agentes recomendados pelo Centro Cerâmico Italiano procuram abranger os principais mecanismos de manchamento: ação química, ação oxidante, ação penetrante com coloração e formação de película. Certas manchas podem acarretar verdadeiros ataques químicos sobre as superfícies desgastadas, sendo este efeito pouco relevante no caso de superfícies originais, mas pode ser significativo em superfícies desgastadas. O azeite de oliva atua segundo este mecanismo e também como formador de película.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O trabalho experimental da presente tese é desenvolvido através de estudo de caso e testes em laboratório. Busca-se, por meio destes métodos, contemplar as variáveis mais influentes no processo de abrasão, pertencentes ao sistema tribológico, disponibilizando dados numéricos que, modelados, permitam selecionar dentre as variáveis de resposta aquelas que melhor descrevem o comportamento do material ao longo de um processo abrasivo, com vistas a estimar sua vida útil.

Os modelos de abrasão encontrados na bibliografia não foram considerados neste trabalho tendo em vista que, a exceção da tese de Ibáñez (1998), não enfocam características e propriedades relacionadas à percepção do desgaste, mas se referem ao desenvolvimento do fenômeno. De qualquer forma, diferentes pesquisadores apontam que estes modelos são limitados dada a insuficiência das propriedades selecionadas em descrever o comportamento de placas cerâmicas expostas a condições de abrasão a três corpos e, por vezes, às dificuldades associadas à determinação experimental destas propriedades. Tais modelos, em sua maioria, baseiam-se em conceitos da Mecânica da Fratura.

Desta forma, os ensaios acelerados despontam como um possível encaminhamento para a situação apresentada. Conforme Clifton (1990), este tipo de abordagem é especialmente pertinente quando existe uma causa fundamental para a deterioração, ou seja, quando o mecanismo de deterioração previsto no ensaio é o mesmo responsável pela deterioração ao longo da vida do material.

Posteriormente à modelagem dos resultados experimentais, busca-se estabelecer uma relação com dados extraídos de condições reais de desgaste a fim de obter o fator de aceleração entre as situações de campo e laboratório.

O trabalho experimental baseia-se na metodologia conhecida como projeto de experimentos (RIBEIRO e ten CATEN, 2001). Esta tem por objetivo 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.

As etapas que se seguem consistem em definir as variáveis a serem contempladas no estudo através de pesquisa a especialistas, planejar os experimentos, definir o equipamento de abrasão, o material abrasivo e os critérios para a medição das variáveis de resposta.

3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO

A seleção das variáveis a serem contempladas no trabalho experimental deve partir da definição do sistema tribológico. Este deve ser o mais completo possível, de forma a contemplar o maior número de fatores que participam do processo de desgaste.

Como são muitas as variáveis que compõem o sistema tribológico, há necessidade de priorizá-las de forma a compatibilizar o nível de complexidade no tratamento das informações. Para tanto, utilizou-se da 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 para a tomada de decisão. Cabe colocar que, na bibliografia consultada, não há indicação quanto à importância relativa entre as variáveis, o que impede que a priorização resulte deste encaminhamento.

As variáveis consideradas na pesquisa a especialistas envolvem tanto o material cerâmico, como o corpo em movimento sobre o piso e o material intermediário, conforme a tabela 3.1.

Tabela 3.1: variáveis consideradas na pesquisa a especialistas realizada no escopo deste trabalho

GRUPO	VARIÁVEIS	AMPLITUDE
Material solicitado	Rugosidade	liso a áspero
	Cor	clara a escura
	Padronagem	liso a estampado
	Brilho	fosco a brilhante
	Limpabilidade	retém sujeira a não retém
	Tenacidade	mais tenaz a menos tenaz
	Dureza	mais duro a menos duro
	Umidade	úmido a seco
Corpo em movimento sobre o piso	Tipo de solado	macio a duro
	Carga	pouca a muita
	Dinâmica do movimento	unidirecional, bi ou multi.
Material intermediário	Tipo de material	arenoso a argiloso
	Granulometria	fina a grossa
	Quantidade	pouca a muita
	Umidade	seco a úmido

Na tabela 3.1, a última coluna procura mostrar de forma qualitativa a amplitude que se pretende contemplar no estudo, correspondente a cada variável. O especialista busca estabelecer uma hierarquia, dentre as variáveis apresentadas, de acordo com o grau de influência que exercem na alteração da aparência do material. A ordem de importância deve ser indicada por 1 para a variável mais importante, 2 para a segunda mais importante e assim por diante. Se, eventualmente, mais de uma variável são consideradas igualmente importantes, podem ser referidas com o mesmo numeral e, dessa forma, existir, por exemplo, três variáveis referidas com o numeral 2 no primeiro grupo.

A pesquisa contou com dez especialistas, cujo perfil distribui-se da seguinte maneira:

- 5 profissionais da indústria cerâmica, com formação técnica;
- 3 professores universitários ligados ao ensino e pesquisa na área de cerâmica;
- 2 pesquisadores ligados à área de cerâmica.

Considerou-se necessário fornecer aos participantes os esclarecimentos que seguem:

- a) a rugosidade constitui-se em um dos aspectos que compõe a textura de uma superfície. A hipótese é de que, conforme a rugosidade original, há maior ou menor percepção do desgaste;
- b) a cor é composta pela luminosidade, tonalidade e saturação. A hipótese é de que conforme a cor original da cerâmica, há maior ou menor percepção do desgaste;
- c) por padronagem, entende-se o desenho, o número e o grau de disseminação de cores na superfície do material. A hipótese é de através destas variáveis há maior ou menor percepção do desgaste;
- d) quanto ao brilho, a hipótese é de que conforme o brilho inicial da cerâmica, há maior ou menor percepção do desgaste;
- e) quanto à possibilidade de retenção de sujeira, a hipótese é de que o desgaste pode afetar a limpabilidade da superfície e dessa forma, afetar a percepção do desgaste;

- f) a tenacidade representa a capacidade do material em absorver energia. A hipótese é de que conforme a tenacidade do material, há maior ou menor desgaste e assim, maior ou menor percepção do desgaste;
- g) a dureza é entendida como a resistência de um corpo à penetração de outro. A hipótese é de que, conforme a dureza da cerâmica, há maior ou menor desgaste e assim, maior ou menor percepção do desgaste;
- h) quanto à umidade, a hipótese é de que, conforme o número de ciclos seco/úmido a que a placa é submetida ao longo da sua vida, há maior ou menor desgaste e, dessa forma, maior ou menor percepção do desgaste.

O resultado da pesquisa a especialistas consta na tabela 3.2. A coluna *importância* é o resultado da ordenação atribuída pelo grupo de participantes, para cada um dos três grupos de variáveis. A coluna *facilidade* resulta de considerações pessoais a respeito da facilidade em considerar-se cada uma das variáveis no trabalho experimental que conduz à modelagem. Os graus atribuídos correspondem a 2 para fácil, 1 para difícil e 1,5 para médio. A coluna *prioridade* resulta da multiplicação das duas colunas anteriores. Tais valores originam a classificação final.

Tabela 3.2: resultados da pesquisa a especialistas

GRUPO	VARIÁVEIS	ESPECIALISTAS										IMPOR	FACIL	PRIOR	ORDEM FINAL
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J				
Material solicitado	Rugosidade	3	2	4	4	5	2	1	2	2	3	0,036	1,5	0,054	5
	Cor	5	3	2	3	1	1	5	2	1	2	0,04	2	0,080	2
	Padronagem	7	3	6	5	6	3	2	1	3	2	0,026	1,5	0,039	7
	Brilho	2	1	3	1	2	1	2	1	1	1	0,067	2	0,133	1
	Limpabilidade	4	1	5	6	4	3	1	3	4	3	0,029	2	0,059	3
	Tenacidade	6	2	7	7	7	2	3	3	6	4	0,021	2	0,043	6
	Dureza	1	1	1	2	3	1	4	3	5	5	0,038	1,5	0,058	4
Umidade	8	3	8	7	8	3	6	4	7	6	0,017	2	0,033	8	
Corpo em movimento sobre o piso	Tipo de solado	3	2	3	3		1	3	1		3	0,053	1	0,053	3
	Carga	1	1	2	1		1	1	2		1	0,1	2	0,200	1
	Dinâmica do movimento	2	1	1	2		2	1	2		1	0,083	1	0,083	2
Material intermed.	Tipo de material	1	1	1	1			1	2		1	0,125	1	0,125	1
	Granulometria	3	1	2	2		1	2	2		3	0,063	1,5	0,094	2
	Quantidade	2	1	3	2		2	3	1		2	0,063	2	0,125	1
	Umidade	4	3	4	3		2	4	3		4	0,037	1	0,037	3

Cabe observar que as variáveis são ordenadas para cada um dos três grupos separadamente. Nos experimentos, é necessário contemplar pelo menos uma variável pertencente a cada um dos grupos, a exclusão de qualquer deles não é permitida, mesmo que aparentemente determinada variável seja menos importante do que outra, pertencente a outro grupo.

A seleção, todavia, de quantas propriedades pertencentes a cada grupo serão contempladas no estudo, após ordenação, baseia-se em uma interpretação particular sobre quais são as mais significativas no desenvolvimento do fenômeno.

Resulta da pesquisa a especialistas, a seleção de 5 variáveis experimentais: brilho, cor, limpabilidade, carga e concentração do abrasivo.

As variáveis de resposta, através das quais se busca quantificar o fenômeno, estão associadas às características e propriedades que intervêm na percepção do desgaste. Resultam quatro variáveis: brilho, cor, rugosidade e aspecto visual, as quais são calculadas em termos de variações relativas ao estado original. A cor é analisada através da curva de reflexão e do Delta E e a rugosidade, através dos parâmetros médios Ra e Rz. Selecionou-se estas variáveis na hipótese de que possam atuar como indicadores da deterioração do material quando submetido à ação abrasiva. Como o desgaste é interpretado como variação da aparência, buscam-se respostas envolvendo basicamente as propriedades ópticas. A rugosidade é também quantificada na medida em que modificações geométricas na superfície poderão gerar mudanças na percepção da aparência. Com certeza, um ou alguns destes parâmetros devem mostrar melhor ajuste do que outros em representar o fenômeno. A análise da qualidade das respostas baseia-se no uso de parâmetros estatísticos conjuntamente às impressões visuais.

3.2 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos planejados formam uma matriz composta de 72 combinações, conforme mostra a tabela 3.3. Cada combinação envolve três ensaios realizados em tempos diferentes. Pelo fato de que a evidência da abrasão ocorre após diferentes períodos de ensaio, conforme a cor e o brilho iniciais da amostra, os tempos foram estabelecidos a partir de pré-testes. As variáveis selecionadas foram desdobradas nos níveis a seguir indicados:

- cores: bege e marrom;
- brilho: com brilho e sem brilho;
- cargas: 5N, 10N, 15N, 20N e 25N;
- concentrações de abrasivo, em peso: 5%, 10%, 15%, 20% e 25%;
- agente manchante: com e sem a presença de agente manchante.

A ordem de execução dos ensaios foi definida de forma que os mesmos fossem realizados de modo aleatório. Assim, a influência de fatores não controláveis, que acabam por gerar erro sobre os experimentos, ficou distribuída aleatoriamente sobre todos os resultados.

Tabela 3.3: matriz de combinações experimentais

Rodada	Cor	Brilho	Conc. (%)	Carga (N)	Tempo (min)			T total
					T1	T2	T3	
1	Bege	SemBri	15	5	12	34	96	142
2	Marrom	ComBri	15	25	2	6	16	24
3	Bege	SemBri	20	10	4	12	35	51
4	Bege	SemBri	20	20	4	10	29	43
5	Bege	ComBri	25	15	6	16	44	65
6	Marrom	SemBri	25	15	2	7	18	27
7	Bege	ComBri	5	15	9	29	97	135
8	Marrom	SemBri	5	15	4	12	40	56
9	Marrom	ComBri	10	20	5	15	51	70
10	Marrom	ComBri	10	10	5	18	60	84
11	Bege	ComBri	15	15	7	22	73	102
12	Marrom	SemBri	15	15	3	9	30	42
13	Marrom	ComBri	20	10	7	23	76	106
14	Bege	ComBri	20	20	3	10	33	46
15	Bege	SemBri	10	20	3	10	33	45
16	Marrom	SemBri	10	10	7	22	75	104
17	Marrom	SemBri	15	25	3	9	29	40
18	Bege	ComBri	15	5	30	85	218	333
19	Marrom	ComBri	15	5	24	74	202	300
20	Marrom	SemBri	15	25	2	6	19	26
21	Marrom	ComBri	20	10	12	38	98	148
22	Marrom	ComBri	20	20	4	12	41	57
23	Bege	SemBri	25	15	5	15	50	70
24	Bege	ComBri	25	15	4	12	40	56
25	Bege	SemBri	5	15	7	23	78	108
26	Bege	ComBri	5	15	18	49	124	191
27	Marrom	SemBri	10	20	4	12	41	56
28	Marrom	SemBri	10	10	4	14	48	67
29	Bege	SemBri	15	15	5	18	59	82
30	Bege	ComBri	15	15	13	21	94	142
31	Marrom	SemBri	20	10	6	18	61	85
32	Bege	SemBri	20	20	2	8	27	37
33	Marrom	ComBri	10	20	3	10	33	45
34	Bege	ComBri	10	10	30	90	232	352
35	Bege	ComBri	15	25	4	14	45	63
36	Bege	SemBri	15	5	8	26	87	121
37	Marrom	SemBri	15	5	10	33	109	151
38	Bege	ComBri	15	25	3	9	26	40
39	Marrom	SemBri	20	10	4	12	39	55
40	Marrom	SemBri	20	20	3	10	24	46
41	Marrom	ComBri	25	15	5	15	10	35
42	Bege	SemBri	25	15	3	10	32	45
43	Marrom	ComBri	5	15	14	41	117	172
44	Bege	SemBri	5	15	5	15	50	70
45	Bege	ComBri	10	20	18	48	126	191
46	Bege	ComBri	10	10	21	57	82	228
47	Marrom	ComBri	15	15	5	18	59	82
48	Bege	SemBri	15	15	3	11	38	53
49	Bege	ComBri	20	10	27	68	190	285
50	Marrom	ComBri	20	20	2	8	27	37
51	Marrom	SemBri	10	20	2	8	26	36
52	Bege	SemBri	10	10	8	28	55	130
53	Bege	SemBri	15	25	3	8	36	50
54	Marrom	ComBri	15	5	16	47	9	193
55	Bege	ComBri	15	5	45	133	338	516
56	Bege	SemBri	15	25	2	7	23	32
57	Bege	ComBri	20	10	18	47	122	187
58	Bege	ComBri	20	20	15	39	20	74
59	Marrom	SemBri	25	15	4	12	40	56
60	Marrom	ComBri	25	15	3	10	32	45
61	Marrom	SemBri	5	15	6	19	62	87
62	Marrom	ComBri	5	15	10	27	75	112
63	Bege	SemBri	10	20	5	15	51	70
64	Bege	SemBri	10	10	5	18	60	84
65	Marrom	SemBri	15	15	4	14	47	66
66	Marrom	ComBri	15	15	3	11	38	53
67	Bege	SemBri	20	10	7	23	76	106
68	Marrom	SemBri	20	20	2	6	21	30
69	Bege	ComBri	10	20	12	31	82	125
70	Marrom	ComBri	10	10	16	50	140	206
71	Marrom	ComBri	15	25	3	11	36	50
72	Marrom	SemBri	15	5	6	21	70	97

3.3 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:

- permitir aplicação variável de carga;
- permitir o movimento do material abrasivo;
- gerar desgaste em uma região cuja área fosse suficiente para a determinação da reflexão utilizando-se de um espectrofotômetro.

A figura 3.1 mostra o equipamento desenvolvido, cujas características construtivas são as seguintes:

- sistema de rotação impulsionado por um motor elétrico síncrono de 1HP e 830rpm sendo que, através de um sistema de polias, obtêm-se 150rpm no eixo do disco metálico. Este possui 200mm de diâmetro e 50mm de largura. Sobre o disco foi fixada uma tira borracha de estireno butadieno, dureza 70 ± 5 shore A, de mesma largura e com espessura de 3,2mm. A região de contato do disco com a amostra envolve toda a largura da amostra, de $40,5 \pm 0,5$ mm, por uma altura de 11,04mm, como mostra a figura 3.2 (à esquerda);
- sistema de translação constituído por um cilindro pneumático de dupla ação cujo êmbolo tem o diâmetro de 25mm. Este movimento permite ampliar a altura de contato para 41,65mm (figura 3.2 à direita), o que proporciona adequada medição da reflexão da superfície abrasionada através de um espectrofotômetro. A pressão de ar situa-se entre 1 e $1,5 \text{Kg}/\text{cm}^2$ e o movimento de translação é ajustado por dois sensores elétricos de fim de curso;
- sistema de aplicação de carga constituído de um braço de alavanca cuja relação com a carga aplicada sobre a amostra é de 2,5;
- sistema de fixação da amostra, constituído de um suporte metálico em forma de *U*, no qual é aparafusada uma base de madeira sobre a qual a amostra é colada;
- sistema de alimentação do material abrasivo.

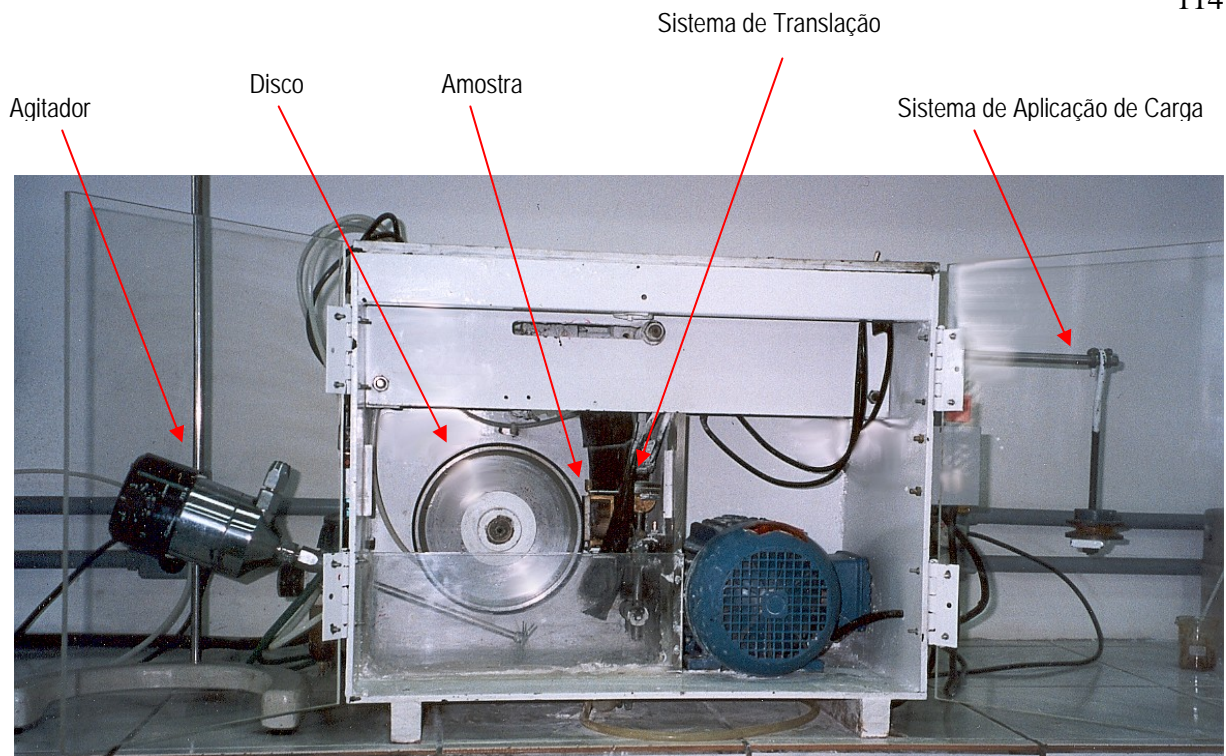


Figura 3.1a: fotografia do equipamento de desgaste utilizado no trabalho

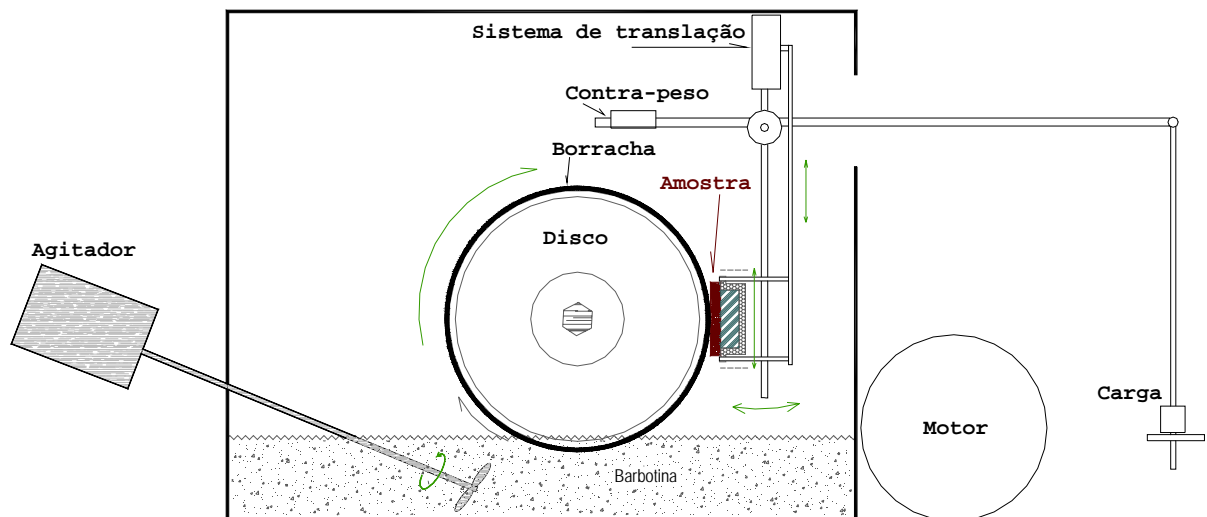


Figura 3.1b: diagrama de funcionamento do equipamento de desgaste utilizado no trabalho

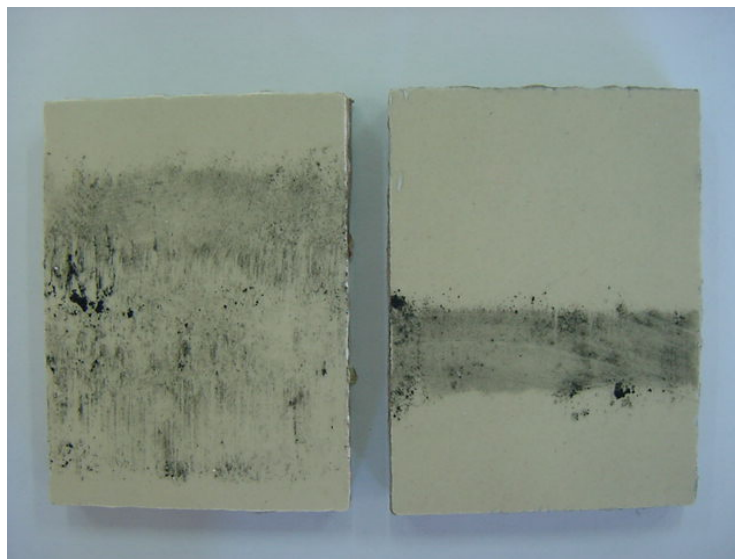


Figura 3.2: região de contato do disco com a amostra sem o efeito de translação (à esquerda) e com o efeito de translação (à direita)

Os testemunhos apresentam largura de $40,5 \pm 0,5\text{mm}$ e altura de $55,0 \pm 0,5\text{mm}$. As amostras são cortadas de placas cerâmicas $310 \times 310\text{mm}^2$, desprezando-se os 20mm mais externos de cada lado da placa original.

O sistema através do qual o abrasivo foi contemplado no ensaio sofreu sucessivas modificações durante a realização de pré-testes a fim de adaptar-se aos diferentes materiais analisados por ocasião da seleção do mesmo. Quando da utilização do abrasivo na forma de pó, o mesmo era armazenado em um silo posicionado na parte superior do equipamento, a partir do qual o abrasivo caía livremente entre a amostra e o disco através de um bico ejetor com abertura interna de $2 \times 20\text{mm}^2$. Quando da utilização do abrasivo na forma de barbotina, o sistema de alimentação foi inicialmente concebido acima do equipamento de desgaste, de forma a despejar o material abrasivo entre a amostra e o disco através de um tubo com seção interna de 3,3mm de diâmetro. O fluxo de barbotina nesta situação, todavia, não se mostrou suficientemente constante, o que gerou dúvidas quanto à homogeneidade da concentração do agente abrasivo sobre a amostra. A partir desse momento, optou-se por alimentar a amostra com o abrasivo através do próprio giro do disco, onde a borracha conduzia por arraste um filme contínuo de barbotina que se encontrava em uma bacia de contenção, conforme é indicado na fotografia da figura 3.3.

Bacia de armazenagem

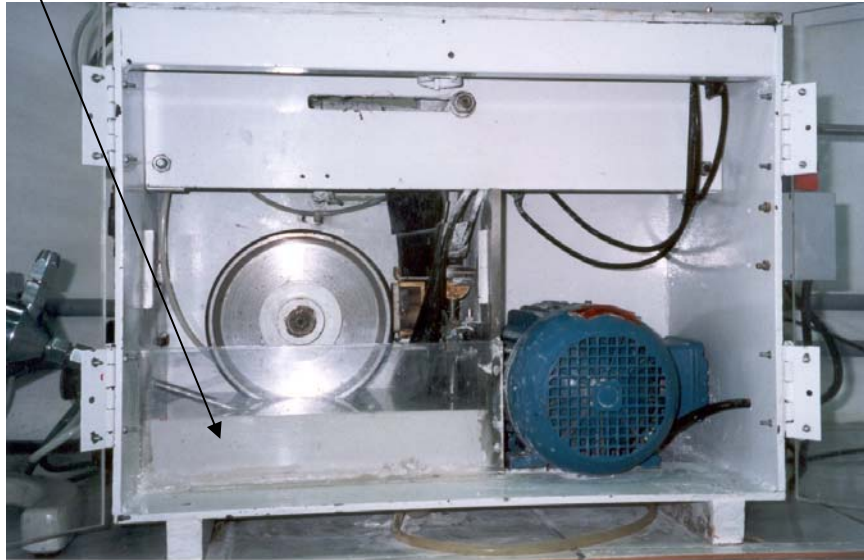


Figura 3.3: bacia de armazenagem da barbotina no equipamento de desgaste

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 4h30min. Após este período não foram prosseguidos os experimentos, adotando-se como prazo máximo para a troca da borracha o período de 4 horas.

3.4 O MATERIAL ABRASIVO

A seleção de um material para atuar como agente abrasivo, baseou-se em algumas premissas básicas, quais sejam:

- facilidade de obtenção do material, de forma a permitir a reprodução do ensaio em outras localidades, seja para a utilização direta do mesmo, seja para estabelecer uma relação de agressividade com o material que se deseja utilizar;
- fornecer resultados de desgaste em períodos de 2 a 20 minutos quando as amostras são observadas mediante condições padronizadas, na forma de variações de cor e/ou brilho;
- distribuir-se homoganeamente 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, de forma que a sua substituição possa ocorrer em período igual ou superior a 4 horas 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 interativo. 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.

Estudou-se o comportamento dos seguintes materiais com vistas à seleção de um agente abrasivo: areia normal brasileira, areia de corrente emprego na construção civil de Porto Alegre, pó atomizado utilizado para a fabricação de placas cerâmicas de revestimento, pó atomizado para fabricação de bolas cerâmicas para moinhos e farinha de quartzo.

3.4.1 Areia

A areia normal brasileira, extraída do rio Tietê, beneficiada e comercializada para a caracterização de cimentos de acordo com a ABNT, foi analisada enquanto material abrasivo para utilização no equipamento. Esta tem como grande vantagem sua caracterização normalizada e o fato de constituir-se mineralogicamente de quartzo, material industrialmente utilizado como abrasivo.

Das quatro frações que constituem a areia normal, utilizou-se a fração mais fina, de granulometria 0,15mm. Esta gerou desgaste em 1 minuto para a carga de 3,75N em cerâmicas de diferentes fabricantes. Com vistas a diminuir a agressividade, estudou-se a possibilidade de adotar areia de menor granulometria, o que descartaria a utilização da areia normal brasileira.

Dessa forma, testou-se a areia de corrente emprego na construção civil de Porto Alegre, procedente do rio Jacuí, peneirada de forma a utilizar-se o material passante na malha 0,15mm. Os resultados encontrados foram semelhantes ao anterior, com desgaste em 1 minuto

para placas procedentes de fabricantes diferentes. Cabe salientar que o período de 1 minuto constitui-se no tempo mínimo de observação do desgaste, possivelmente existam variações entre 0 e 1 minuto já que as placas possuem diferentes características.

3.4.2 Pó atomizado

O pó atomizado é o resultado de um processo de atomização ou *spray drying*. Este consiste em submeter a matéria-prima em suspensão a uma corrente de ar quente. Ao evaporar a água, as partículas reúnem-se em aglomerados cuja forma esférica facilita o escoamento e o preenchimento dos moldes para a fabricação de placas cerâmicas de revestimento.

Justamente, em vista da facilidade de escoamento, o pó atomizado mostra-se um material potencialmente adequado para utilização no equipamento como agente abrasivo, favorecendo a homogeneidade da sua concentração sobre as placas cerâmicas.

A título de comparação dos resultados, foram estudados dois pós atomizados, identificados como PAD e PAE. O primeiro, produzido para a fabricação de placas cerâmicas de revestimento, sofreu peneiramento a fim de se utilizar o passante na peneira 0,6mm. O segundo, empregado para a fabricação de bolas cerâmicas para moinhos, foi utilizado em seu estado original. O primeiro tem como vantagem adicional o fato de estar presente nas indústrias cerâmicas em larga escala, dado que se constitui na matéria-prima de conformação das placas. Analisaram-se ambos quanto a composição mineralógica e granulométrica.

A esfericidade dos aglomerados pode ser visualizada nas figuras 3.4 e 3.5, para os atomizados PAD e PAE, respectivamente, a partir de fotos obtidas com uma lupa Olympus SZ 40. A reentrância que se observa nos grânulos é característica quando há condições ótimas de atomização (PEDRASSANI apud SITI, 2001).

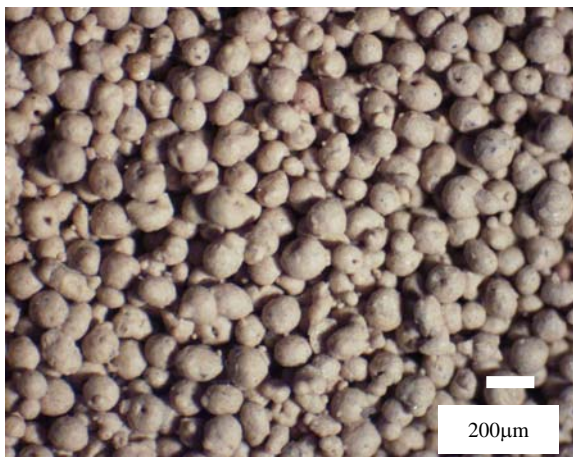


Figura 3.4: pó atomizado PAD (40X)

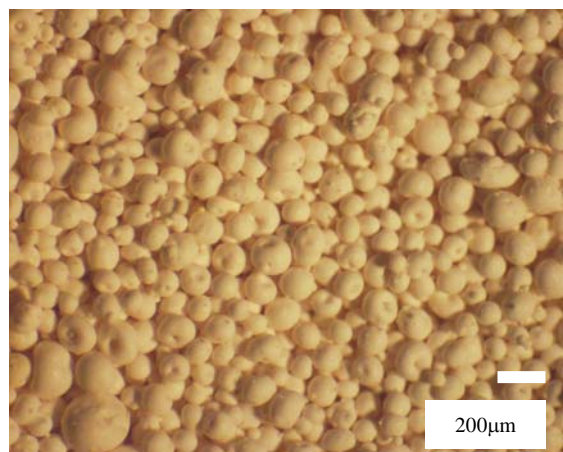


Figura 3.5: pó atomizado PAE (40X)

A identificação dos constituintes dos pós atomizados foi realizada por difração de raios-X em um equipamento Philips X'Pert com ânodo de cobre operando em 40KV e 30mA.

O difratograma referente ao atomizado PAD consta no Apêndice A e revela principalmente a presença de quartzo, talco e caolinita. A caolinita é um silicato hidratado de alumínio, resultante do intemperismo dos feldspatos (SANTOS e BRITO, 1998). Apresenta dureza 2 na escala Mohs, portanto, não atua como abrasivo sobre o esmalte que recobre as placas de revestimento, mas sim é atacado por este. Soma-se a este aspecto, a lamelaridade das suas partículas (AZAMBUJA, 2001). O talco é um silicato de magnésio hidratado formado pela alteração hidrotermal de silicatos magnesianos (SANTOS e BRITO, 1998). Possui dureza 1 na escala Mohs, portanto sem expressão sobre o desgaste do esmalte das placas de revestimento. Dessa forma, a ação abrasiva do pó atomizado PAD se deve à presença do quartzo. Este mineral possui dureza 7 na escala Mohs, maior que a dureza da maioria dos esmaltes empregados nas placas para revestimento de piso. A morfologia pontiaguda das partículas atua de forma a aumentar a sua abrasividade. Conforme Leinz e Amaral (1978), o quartzo não possui planos de clivagem definidos e se rompe de forma irregular.

O difratograma referente ao pó atomizado PAE consta no Apêndice A e revela principalmente a presença de alumina (córindom) e calcita. A ação abrasiva deste atomizado deve-se principalmente à alumina. Esta consiste em um mineral artificial de dureza 9 na escala Mohs, utilizado industrialmente como material abrasivo (SANTOS e BRITO, 1998). A calcita, por sua vez, apresenta dureza 3 na escala Mohs, o que é pouco significativo na ação de desgaste sobre a superfície esmaltada.

Com relação à distribuição granulométrica, cabe observar que o pó atomizado é pressionado entre o disco do equipamento e a amostra cerâmica, e dessa forma, os aglomerados originais são parcialmente desfeitos. A eficiência do esmagamento depende da carga atuante, sendo que quando há esmagamento total, resulta na distribuição granulométrica das partículas formadoras do atomizado.

As distribuições granulométricas foram determinadas utilizando-se um granulômetro Cilas 1180, para as seguintes situações:

- original, com o ensaio realizado a úmido, o que provoca a desagregação dos aglomerados, e como resultado, fornece a distribuição granulométrica das partículas que o compõem;
- original, com o ensaio realizado a seco, o que identifica a composição granulométrica dos aglomerados que compõem o atomizado;
- após ensaio de desgaste com carga de 11,25N, realizado a seco, o que identifica a composição do material após esmagamento pelo disco, ou seja, do material que efetivamente atua como abrasivo. Neste caso, o material foi coletado com funil de abertura menor do que a largura do disco, posicionado imediatamente abaixo deste, ou seja, não inclui os aglomerados que eventualmente caem pelos lados da roda, que não tiveram contado com a amostra.

A tabela 3.4 apresenta os dados das análises granulométricas realizadas com o pó atomizado em cada uma das situações mencionadas anteriormente.

Tabela 3.4: parâmetros das distribuições granulométricas dos pós atomizados PAE e PAD, nas situações como recebido, em análise a seco e a úmido, e após ensaio de desgaste

Parâmetros		Pó Atomizado PAE			Pó Atomizado PAD	
		original a úmido	original a seco	após carga de 11,25N	original a úmido	original a seco
Diâmetro máximo para (μm)	10% das partículas	0,52	103,77	83,58	1,74	111,82
	50% das partículas	3,53	189,05	167,94	11,36	216,69
	90% das partículas	15,99	274,48	293,11	39,03	314,48
Diâmetro médio (μm)		5,92	189,46	181,33	16,31	216,49

Comparando-se os diâmetros médios originais a seco, verifica-se que o pó atomizado PAE é aproximadamente 12,5% mais fino do que o pó atomizado PAD.

Para a carga de 11,25N, o diâmetro médio do abrasivo PAE apresenta uma pequena redução, de 4,3%, em relação ao material original introduzido no equipamento. O fato de a granulometria variar conforme a carga aplicada dificulta a utilização do pó atomizado, pois a comparação dos resultados de desgaste não ocorre para condições similares do agente abrasivo. A granulometria do abrasivo acaba por tornar-se uma variável no processo. A tentativa de se trabalhar com cargas que desfaçam totalmente os aglomerados não se mostra favorável, pois tendem a provocar variações de aspecto em períodos muito pequenos, inferiores há 1 minuto.

De qualquer forma, ambos os pós atomizados foram analisados quanto ao efeito produzido em termos de variações de brilho. Resultou que o pó atomizado PAE gera variação de aspecto mais rapidamente que o pó atomizado PAD. Mineralogicamente, este resultado é adequado, pois o pó atomizado PAE é formado essencialmente por minerais de dureza 9 na escala Mohs, comparativamente ao atomizado PAD, cujo mineral agressivo possui dureza 7 na escala Mohs. Granulometricamente, partículas mais grossas tendem a ser mais agressivas, o que recai sobre o atomizado PAD. Possivelmente, a variável mais significativa seja a concentração das partículas efetivamente agressivas. O atomizado PAE possui aproximadamente 97% de alumina enquanto o quartzo presente no atomizado PAD representa uma pequena fração, entre 5 e 7%.

3.4.3 Barbotina de farinha de quartzo

Face às dificuldades associadas à variação da granulometria dos pós atomizados durante os experimentos, estudou-se a possibilidade de trabalhar com o material abrasivo na forma de uma mistura fluida, ou seja, de uma barbotina. A barbotina tem a grande vantagem de permitir variar a concentração do agente abrasivo, avaliando-se a influência deste aspecto no processo de desgaste. Dessa forma, pode-se representar diferentes ambientes, cujas condições do entorno são mais ou menos agressivas.

A utilização de farinha de quartzo mostra-se favorável na medida em que este mineral está contido em boa parcela dos solos urbanos e revela importante potencial agressivo em se tratando de pisos cerâmicos esmaltados.

A distribuição granulométrica da farinha de quartzo foi determinada com o granulômetro Cilas 1180. A composição é mostrada na figura 3.6, expressa em percentual passante acumulado, na condição a úmido. O diâmetro médio e o diâmetro máximo para alguns percentuais são apresentados na tabela 3.5.

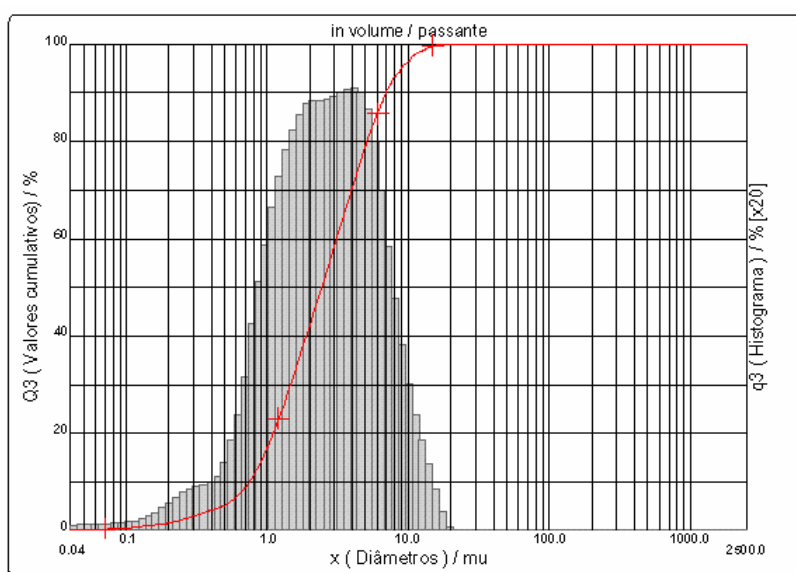


Figura 3.6: distribuição granulométrica da farinha de quartzo utilizada como abrasivo nos ensaios de desgaste

Tabela 3.5: 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

Tendo em vista a manutenção da concentração dos sólidos que atuam como abrasivo entre a placa e o disco, estudou-se a dispersão do quartzo na mistura. Este estudo iniciou pela consideração de dois dispersantes: pirofosfato de sódio e silicato de sódio.

Para atuar também sobre o pH da mistura, que é de 7,55 a 25°C, auxiliando na suspensão das partículas, estudou-se a adição do hidróxido de sódio a 20%, cujo pH é de 13,05 a 25°C. A tabela 3.6 apresenta as concentrações utilizadas de sólidos, de dispersantes e da base.

Tabela 3.6: estudo da dispersão do quartzo na barbotina utilizada como abrasivo nos ensaios de desgaste

Abrasivo		Solvente	Dispersante		Base	
Tipo	Concentração de sólidos (% em peso)		Tipo	Concentração (% em peso sobre sólidos)	Tipo	Concentração (% em peso sobre sólidos)
Farinha de quartzo original	11 a 25	Água	Pirofosfato de sódio	0,5 a 6		
Farinha de quartzo passante na peneira 0,038mm (malha 400)	20 a 30	Água destilada	Pirofosfato de sódio	0,5 a 1,5		
Farinha de quartzo original	20	Água	Silicato de sódio	0,1 a 1,3	-	-
			-	-	Hidróxido de sódio	0,7, a 2,8
			Silicato de sódio	1,3	Hidróxido de sódio	0,2 a 0,8
			Silicato de sódio	2,0	Hidróxido de sódio	0,8
			Silicato de sódio	2,0, a 2,8	Hidróxido de sódio	1,3

O uso simultâneo de silicato de sódio e hidróxido de sódio mostrou resultados levemente superiores ao serem utilizadas as concentrações de 2% para o primeiro e 1,3% para o segundo. Como efeito secundário, todavia, a barbotina acaba por remover a lubrificação das partes móveis do equipamento, que estão em contato com o fluido, o que pode ser atribuído ao seu elevado pH, de 11,36%. De qualquer maneira, a eficiência do uso conjunto destes aditivos é parcial, pois não dispensam a constante agitação da barbotina a fim de impedir a deposição do quartzo. Portanto, optou-se por utilizar apenas o silicato de sódio na proporção de 2%. A agitação da barbotina é obtida 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 3.1, e permanece acionada durante todo o período de ensaio.

Os resultados de variação de aspecto, utilizando-se as mesmas cargas adotadas para os pós atomizados, resultam em tempos adequados, de forma que o fenômeno se manifesta nem excessivamente rápido nem excessivamente devagar. A farinha de quartzo, portanto, mostra-se viável para a obtenção de dados cujo traçado de curvas descrevam o comportamento da cerâmica quando da introdução de outras variáveis, como cargas, tempos e concentrações de abrasivo.

3.5 MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

As variáveis de resposta são quantificadas a partir dos critérios e métodos descritos a seguir. Primeiramente, no entanto, descreve-se o procedimento de limpeza das superfícies das amostras após ensaio de desgaste.

3.5.1 Procedimento de limpeza das amostras após ensaio

Com vistas a eliminar qualquer vestígio de impregnação da borracha, que reveste o disco do equipamento, na superfície das amostras após os ciclos de desgaste, buscou-se definir um procedimento de limpeza padrão a partir da análise das superfícies com uma lupa Olympus SZ 40. Para a realização do estudo, provocou-se a degradação acentuada da borracha utilizando-se areia normal do rio Tietê de granulometria passante na malha 0,3mm e retida na malha 0,15mm, por 750 ciclos, com carga de 15N, o que corresponde a um período de 5 minutos de ensaio sobre cada amostra.

Avaliaram-se três métodos: exposição ao ultra-som por 10 minutos, estando a amostra imersa em acetona; calcinação a 300°C por 2 horas e limpeza manual com hexano.

A utilização de ultra-som não apresentou resultados satisfatórios, pois permaneceram resíduos de borracha na superfície da cerâmica, como pode ser observado na foto da figura 3.7. De forma semelhante, comportou-se a amostra submetida à calcinação, como ilustra a figura 3.8. Possivelmente, aumentando-se a temperatura para aproximadamente 500°C, obter-se-ia a queima da borracha. Esta alternativa, todavia, não foi avaliada dado que o hexano mostrou

resultados satisfatórios, como mostra a figura 3.9, consistindo em um procedimento consideravelmente mais simples.



Figura 3.7: amostra de placa cerâmica após desgaste submetida à limpeza com ultra-som por 10min (40X)

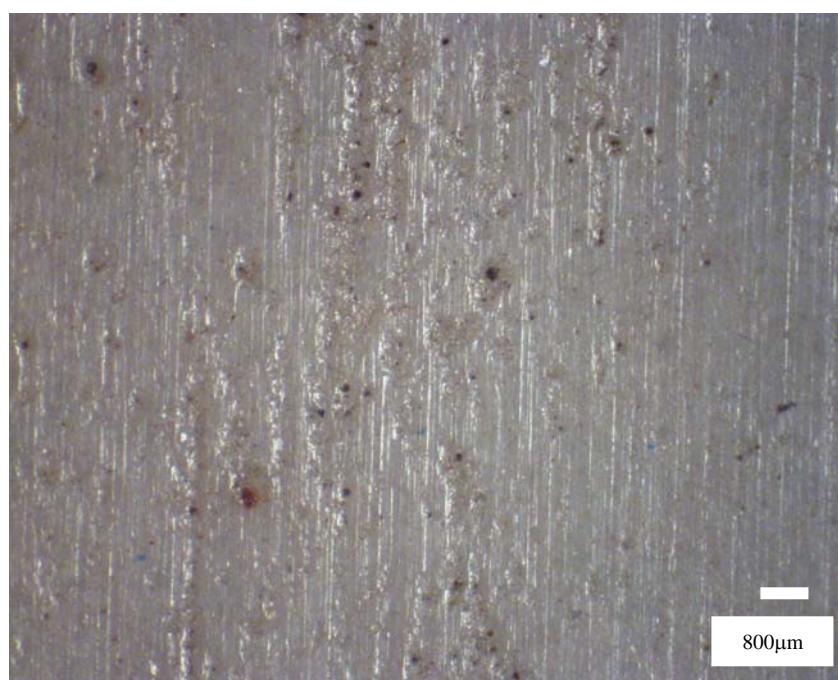


Figura 3.8: amostra de placa cerâmica após desgaste submetida à limpeza por calcinação à temperatura de 300°C por 2 horas (40X)

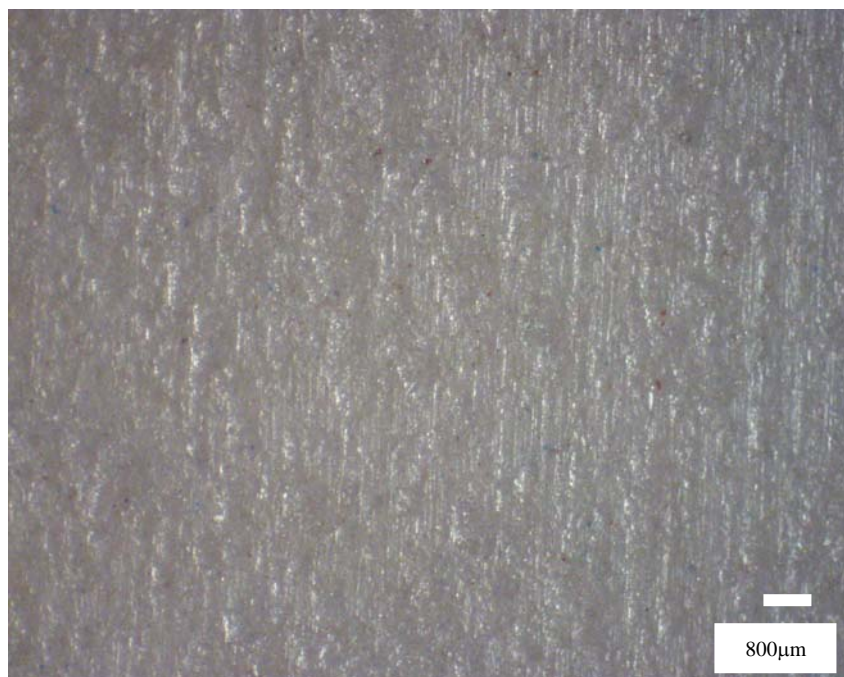


Figura 3.9: amostra de placa cerâmica após desgaste submetida à limpeza manual com hexano (40X)

Dessa forma, após o ensaio, procede-se à limpeza de cada amostra com algodão embebido em hexano. Posteriormente, quando da medição da reflexão, as amostras são limpas apenas com álcool etílico para a remoção de poeira e impressões de manuseio.

3.5.2 Medição da reflexão especular

A reflexão especular foi apropriada através de um espectrofotômetro Minolta CM 508D, o qual fornece o espectro de reflectância para comprimentos de onda entre 400 e 700nm, com medições a cada 10nm. Este equipamento disponibiliza dois sistemas de medição: com componente especular incluso, associado à reflexão total e componente especular excluído, associado à reflexão difusa. O brilho resulta das diferenças associadas a estas curvas. Dentre os possíveis iluminantes com os quais o espectrofotômetro trabalha, optou-se pelo 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.

3.5.3 Medição da reflexão difusa

A reflexão difusa foi determinada através de um espectrofotômetro Minolta CM 508D, o qual fornece o espectro de reflectância para comprimentos de onda entre 400 e 700nm, com medições a cada 10nm, utilizando-se da configuração com componente especular excluído. Esta opção significa que a reflexão especular é excluída da medição. O equipamento dispõe de uma janela posicionada a 8° com a vertical, a qual aberta, acaba por eliminar a incidência de luz nesta direção. Como o detector está posicionado também a 8° com a vertical, mas no sentido oposto, a reflexão medida neste ângulo é nula e a curva de reflexão resultante corresponde à reflexão difusa. Como iluminante, adotou-se o mesmo CWF (fluorescente F2).

Neste trabalho, não se considera relevante identificar como se comportam os parâmetros $L^*a^*b^*$ e/ou L^*C^*h , que descrevem a cor do material. Trabalhou-se com a hipótese de utilizar a própria curva de reflexão como indicador de desgaste. Neste caso, a reflexão difusa. Ainda, como indicador global de variação da cor, o parâmetro Delta E.

3.5.4 Medição da rugosidade

A rugosidade das placas foi determinada através de um rugosímetro Mitutoyo SurfTest 211, utilizando-se a configuração da norma DIN para obtenção dos parâmetros de rugosidade média R_a e R_z .

O *cut-off* de trabalho foi selecionado conforme instruções do fabricante a partir de uma medição inicial utilizando-se o valor de 0,8mm. Os resultados confirmam a utilização deste mesmo valor para o prosseguimento das medições tanto para R_a como para R_z .

Em cada amostra foram realizadas 12 medidas, distribuídas 3 em cada uma das 4 direções mostradas na figura 3.10. Cabe salientar que as amostras são extraídas de placas 310x310mm² sempre no mesmo sentido, de forma que as direções de estudo mantêm a mesma relação angular com a placa original.

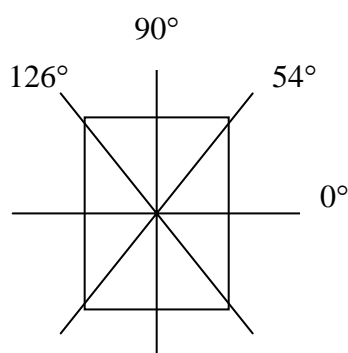


Figura 3.10: configurações de medição da rugosidade das placas cerâmicas

Realizando-se as medidas a partir de radiais, procurou-se contemplar a rugosidade de forma mais abrangente, considerando que a mesma pode ser mais acentuada em uma ou outra direção, conforme o desenho do próprio estampo.

3.5.5 Limpabilidade

Neste trabalho, avaliou-se a limpabilidade através da retenção de sujeira reversível e sujeira irreversível. Em ambos, procura-se relacionar a alteração de aparência decorrente de dois procedimentos diferentes que buscam simular o comportamento do material quando em condições reais de utilização.

O estudo da retenção de sujeira reversível baseia-se na metodologia proposta por Ibáñez (1998) em sua tese. As amostras recebem, em sua superfície, gotas de uma mistura de óleo mineral e carvão ativado, na proporção de 85 para 15, em peso. Procurou-se fazer com que esta mistura penetrasse nos poros superficiais através de escovação em diversos sentidos. A limpeza é executada posteriormente com um pano seco. Este é passado diversas vezes até que não se consiga remover mais qualquer resíduo, o que não quer dizer que a superfície estará com aspecto limpo. A seguir, as amostras foram visualizadas na câmara de observação padrão, descrita no item relativo à análise visual, e registrados os casos em que se percebe variação de aspecto. À classificação encontrada, procura-se relacionar o parâmetro denominado volume de retenção de óleo (V_o).

O parâmetro V_o foi determinado a partir das curvas de Abbott-Firestone, cujos traçados foram obtidos através dos perfis de rugosidade fornecidos por um rugosímetro Mitutoyo 178-601, cuja incerteza de medição é de $\pm 8\%$. O *cut-off* de trabalho foi selecionado conforme instruções do fabricante a partir de uma medição inicial utilizando-se o valor de 0,8mm. Como tratavam-se das mesmas amostras mencionadas no item 3.5.4, os resultados iniciais confirmaram a utilização deste mesmo valor para o prosseguimento das medições. Para o cálculo do V_o original adotou-se o valor resultante da média das quatro radiais para seis placas, ou seja, de 24 perfis de rugosidade para cada grupo. Para as amostras desgastadas, calculou-se a média dos quatro perfis de rugosidade obtidos nas direções radiais indicadas.

O estudo da retenção de sujeira irreversível baseou-se nos métodos que buscam avaliar a resistência a manchas de placas cerâmicas esmaltadas. Utilizou-se como agente manchante o azul de metileno a 1%, recomendado pela antiga norma europeia EN 122. Optou-se por este produto em função de que no âmbito dos laboratórios que fazem ensaios deste tipo, é considerado com maior poder manchante do que os produtos atualmente previstos na NBR 13818 (1997) em seu Anexo G. Com efeito, este agente permanece na relação indicada pelo Centro Cerâmico de Bolonha, conforme comentado na revisão bibliográfica. Após 24 horas de exposição, procede-se à limpeza da superfície. Para tanto, adotou-se o procedimento descrito pela norma brasileira, onde o último estágio de limpeza corresponde à imersão das amostras em um solvente, também por 24h, que poderá ser ácido clorídrico a 3%, hidróxido de potássio 200g/l, acetona ou tricloroetileno. O estágio imediatamente anterior a este consiste na escovação da superfície com um produto comercial abrasivo.

A análise da retenção de sujeira foi realizada apenas para os grupos bege, tanto com brilho quanto sem brilho. Ressalva-se, todavia, que as placas marrons também podem revelar este efeito e que a discriminação dos grupos consiste tão somente em uma priorização.

3.5.6 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 fim de contemplar ambas as geometrias em uma mesma câmara, esta possui 135cm de profundidade, 90cm de

largura e 95cm de altura. Internamente recebeu pintura preta fosco e os iluminantes descritos no item 2.3.5.1.2, do capítulo 2.

Para a observação da cor, as amostras foram posicionadas sobre um dispositivo auxiliar que formava um ângulo de 45° com a horizontal. Como os iluminantes foram posicionados no teto da câmara, incidiam a 45° com o plano de análise. O observador colocava-se a 60cm do centro das amostras, com direção de observação perpendicular à superfície.

Para a observação do brilho, as amostras foram posicionadas diretamente sobre o plano horizontal da câmara. Dos quatro grupos de placas cerâmicas estudados, os de maior brilho, denominados BC e MC, foram observados através do ângulo de 20°, tanto para a incidência da luz quanto para a observação; e os de menor brilho, denominados BS e MS, através do ângulo de 60°, iguais para incidência e observação. A distância de observação e de disposição da lâmpada, em relação à amostra, é consequência da altura da luminária de bancada, que possui 37,6cm. Resulta, portanto, 65cm para o ângulo de 60° e, 13,7cm para o ângulo de 20°. Cabe observar que a seleção dos ângulos 20° e 60°, ao invés de 60° e 85°, respectivamente, para os grupos com brilho e sem brilho se deve à pré-testes, cujos resultados mostraram os primeiros mais eficientes do que os segundos. Dessa forma, perante a ASTM D 4449 (1995), os grupos BC e MC compreendem amostras com alto brilho e os grupos MS e BS, intermediário a baixo.

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 consistiu 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, estado este não alcançado por nenhuma das amostras ensaiadas. 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.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A previsão do comportamento das variáveis de resposta relativas às placas cerâmicas desgastadas, foi obtida através da modelagem dos dados experimentais com o apoio do *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*, versão 8.0). Esta modelagem contempla as variáveis: carga (ca), concentração do abrasivo (co) e tempo (t). À carga e à concentração são atribuídos níveis que variam de 0,2 a 1,0, como mostra a tabela 4.1, os quais representam a agressividade da condição de ensaio. O tempo é considerado em minutos.

Tabela 4.1: níveis de agressividade relacionados às variáveis: carga (ca) e concentração de sólidos na barbotina (co)

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

Todas as análises baseiam-se nas diferenças entre as situações desgastada e original, ou seja, considera as variações provocadas pelo fenômeno. As medições após o desgaste são realizadas no mesmo local da amostra onde foram realizadas as medições originais.

As variáveis: reflexão especular, reflexão difusa, delta E, Ra, Rz e aspecto visual foram analisadas separadamente, para os quatro grupos de placas cerâmicas: bege com brilho (BC), bege sem brilho (BS), marrom com brilho (MC) e marrom sem brilho (MS). Deve-se salientar que as denominações “sem brilho” são qualitativas e visam facilitar o entendimento. Fisicamente, tais placas não correspondem à reflexão especular zero, conforme mostram os dados originais apresentados no item 4.1.

Para ilustrar a influência da carga aplicada pelo disco sobre a superfície da placa cerâmica, da concentração de sólidos (farinha de quartzo) presentes na barbotina e do tempo de ensaio sobre as curvas que representam o comportamento de cada grupo, foram feitas comparações tomando-se como referência o resultado obtido para a condição média, equivalente à carga de 15N, concentração de sólidos na barbotina de 15%, em peso, e tempo de 60min.

Conforme representado na figura 4.1, para a análise da carga, comparam-se os resultados referentes às cargas 15N e 25N para o tempo de 60min e concentração de 15%. Para a análise

do tempo, comparam-se os resultados para os tempos de 60min e 150min, para a carga de 15N e concentração de 15%. Para a análise da concentração do abrasivo, comparam-se as concentrações de 15% e 20%, para a carga de 15N e tempo de 60min. Cabe observar que a variável tempo está associada ao número de giros do equipamento, que por sua vez, representa o número de pessoas que transita sobre o piso cerâmico.

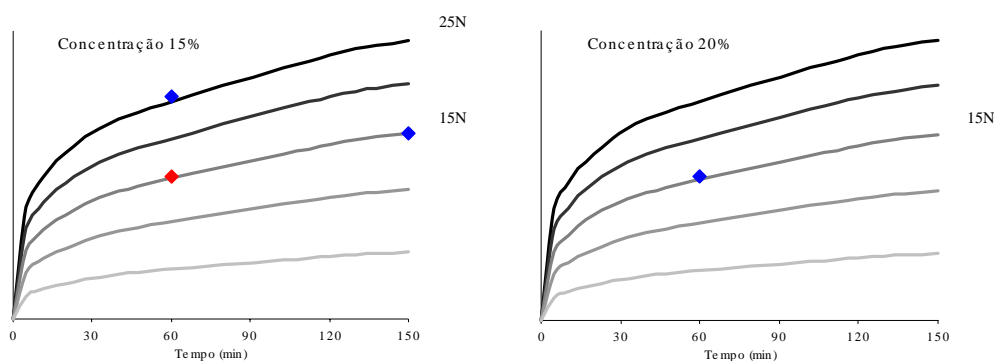


Figura 4.1: pontos de comparação para análise ilustrativa da carga aplicada pelo disco sobre a superfície da placa cerâmica, da concentração de sólidos (farinha de quartzo) na barbotina e do tempo de ensaio

Neste trabalho, o erro relativo (ER) foi calculado dividindo-se o erro absoluto médio (MAE) pelo resultado esperado para a condição intermediária de ensaio, representada pela concentração de 15%, carga de 15N e tempo de 60min. Entre outros parâmetros estatísticos, nas tabelas que contêm os modelos que descrevem o comportamento de cada variável de resposta, consta a significância dos modelos. No âmbito da Engenharia, é comum considerar significância igual a 0,05 como valor limite para a rejeição da hipótese nula e aceitação do modelo proposto. Em outras palavras, o modelo é aceito sempre que a significância for inferior a 0,05.

4.1 REFLEXÃO ESPECULAR

A reflexão especular original dos grupos bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho é mostrada na figura 4.2. As curvas correspondem à média das amostras envolvidas no estudo, em número de 44 a 57 por grupo, a partir das diferenças associadas às curvas de reflexão determinadas com componente especular incluso e excluído.

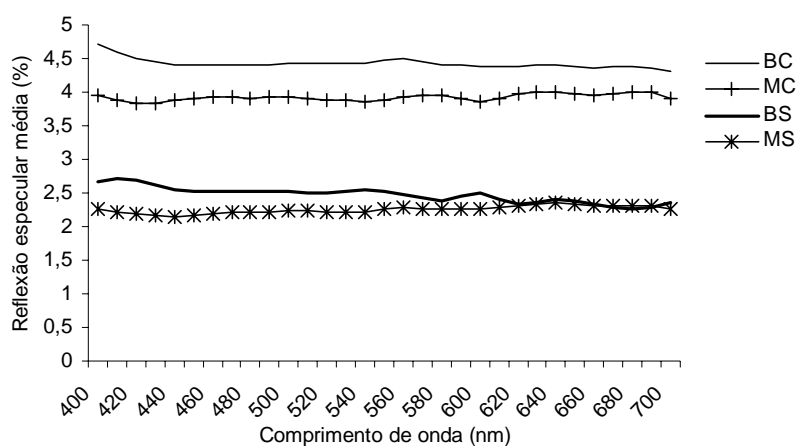


Figura 4.2: reflexão especular média original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS

Como a reflexão especular varia com o comprimento de onda, buscou-se eleger um deles para prosseguir a análise. Para tanto, considerou-se a figura 2.13 da revisão bibliográfica, a qual mostra que a região de maior sensibilidade humana situa-se no centro do espectro visível e diminui na medida em que se afasta para os extremos, o que levou à adoção do comprimento de onda de 550nm, o qual está incluso na faixa do espectro reconhecida pela cor verde.

Para o comprimento de onda de 550nm, a figura 4.3 mostra a amplitude da reflexão especular. O grupo marrom sem brilho abrange amostras que variam de 1,6% até o máximo de 2,6%; o grupo bege sem brilho, amostras com reflexão especular entre 2,0% até 3,1%. Já o grupo marrom com brilho distribui-se entre 3,2% e 4,2%. O grupo com a maior reflexão especular corresponde às amostras bege com brilho, que abrange de 3,7% até o máximo de 5,0%.

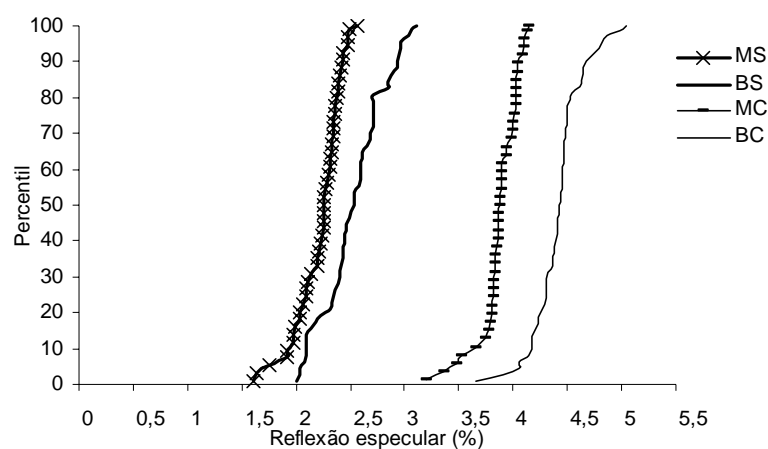
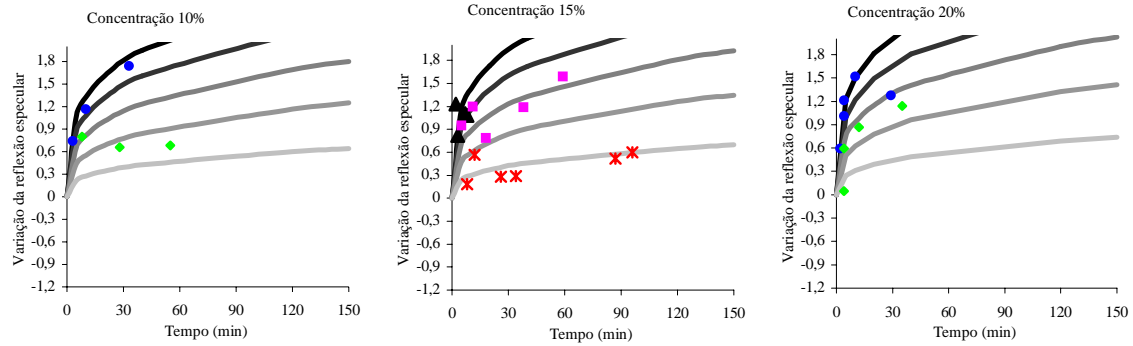


Figura 4.3: distribuição ordenada da reflexão especular original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS

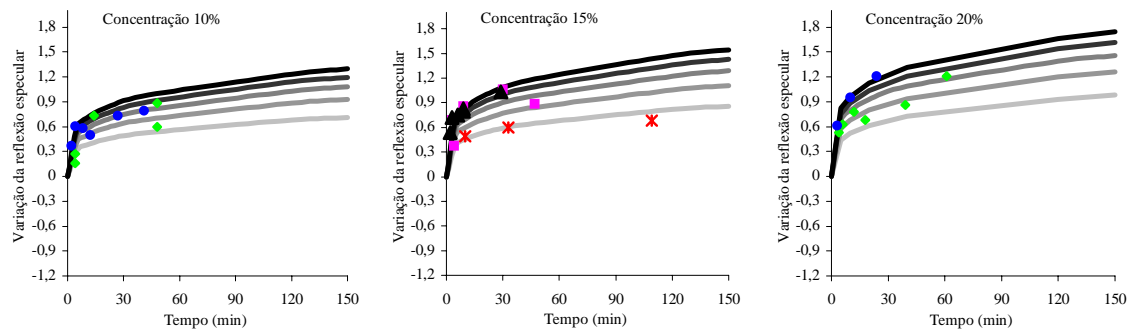
A figura 4.4 apresenta a representação gráfica da variação da reflexão especular entre as situações desgastada e original, para as concentrações de abrasivo de 10%, 15% e 20% de cada grupo cerâmico. As curvas correspondem aos modelos propostos e os pontos, aos dados experimentais a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais, incluindo as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo de cerâmica.

Em todos os modelos, como é de se esperar, quanto maior a carga, concentração e tempo, maior o desgaste. Conforme a reflexão especular inicial da cerâmica, todavia, há aumento ou redução do brilho. Os grupos sem brilho (MS, BS) passam a revelar aumento da reflexão especular na medida em que aumenta o desgaste, enquanto que os grupos com brilho (MC, BC), redução da reflexão especular.

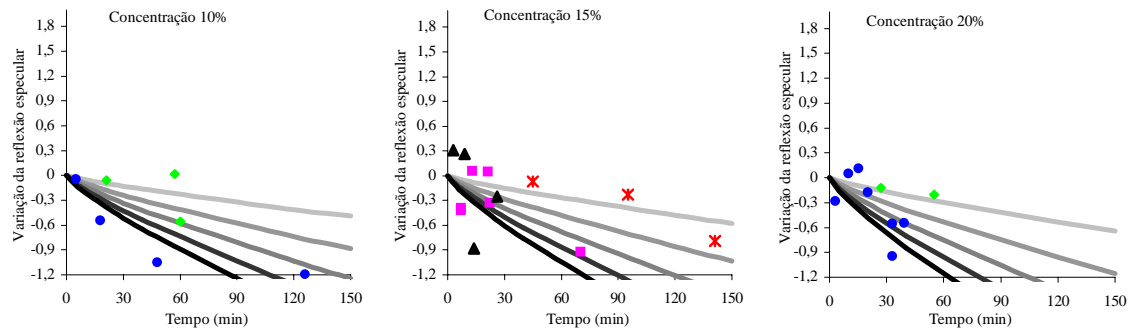
a) Grupo Bege sem brilho



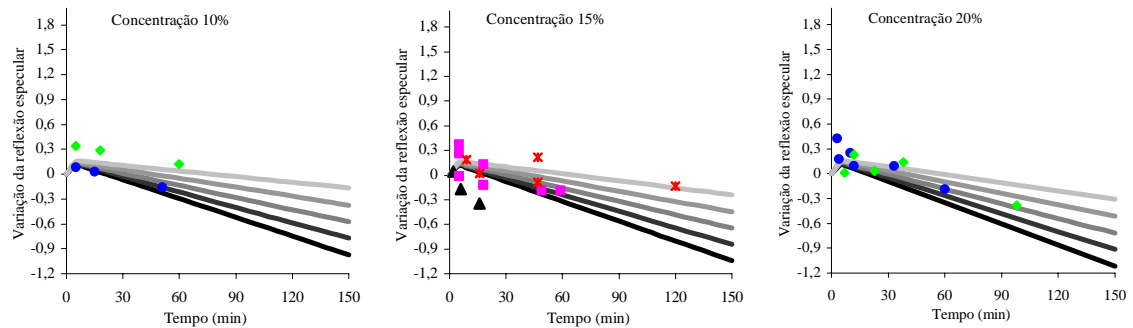
b) Grupo Marrom sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



d) Grupo Marrom com brilho



Legenda:
 5N 10N 15N 20N 25N
x 5N exp. ◆ 10N exp. ■ 15N exp. ● 20N exp. ▲ 25N exp.

Figura 4.4: representação gráfica da variação da reflexão especular das placas cerâmicas após desgaste, em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio

A tabela 4.2 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (*mean absolut error* - *MAE*), o erro relativo (ER) e a significância do modelo para cada grupo (SIGN).

Tabela 4.2: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão especular em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = 6[1 - \text{EXP}(-0,141 \cdot \text{ca}^{1,0434} \cdot \text{co}^{0,2068} \cdot t^{0,329})]$	$R^2 = 0,719$
		$MAE = 0,19$
		ER = 13,0%
		SIGN = 0,0000
MS	$f(t) = 6[1 - \text{EXP}(-0,1099 \cdot \text{ca}^{0,4067} \cdot \text{co}^{0,494} \cdot t^{0,249})]$	$R^2 = 0,7502$
		$MAE = 0,09$
		ER = 9,0%
		SIGN = 0,0000
BC	$f(t) = -0,0453 \cdot \text{ca}^{0,845} \cdot \text{co}^{0,386} \cdot t^{0,818}$	$R^2 = 0,455$
		$MAE = 0,25$
		ER = 35,8%
		SIGN = 0,0000
MC	$f(t) = \frac{(0,623 \cdot \text{ca} + 1,62 \cdot \text{co})t}{1 + (5,43 \cdot \text{ca} + 7,84 \cdot \text{co})t} - (0,00663 \cdot \text{ca} + 0,00250 \cdot \text{co})t$	$R^2 = 0,383$
		$MAE = 0,12$
		ER = 71,6%
		SIGN = 0,0000

Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

Os grupos bege sem brilho e marrom sem brilho apresentam resultados experimentais coerentes com modelos do tipo exponencial para representar o comportamento da reflexão especular frente à abrasão. Estes modelos ajustam-se bem aos dados na medida em que revelam coeficientes de determinação razoavelmente altos, 0,719 e 0,7502, respectivamente, além de erros de pequena magnitude.

Para o grupo bege sem brilho, a carga consiste no principal fator atuante. Como ilustração, para o tempo de 60min e concentração de 15%, ao passar da carga de 15N para 25N, a variação de brilho sofre um aumento em torno de 56%. Já a concentração do abrasivo consiste na variável menos importante: ao passar de 15% para 20%, a variação da reflexão especular é intensificada em 5,4%, considerando-se a carga de 15N aos 60min. A influência do tempo é

intermediária, pois de 60min para 150min, a variação de brilho mostra um valor 29,5% mais alto considerando-se a carga de 15N e tempo de 60min.

No grupo marrom sem brilho o efeito da carga não se mostra tão intenso como no caso anterior, sendo um pouco inferior ao efeito do tempo. O primeiro responde com um aumento da reflexão especular de 20% e o segundo, com 22,9% para as mesmas condições anteriormente citadas. Já a concentração, ao passar de 15% para 20%, aumenta em 13,3% a variação do brilho considerando-se a carga de 15N aos 60min.

Comparando-se estes grupos, percebe-se que o efeito do desgaste do ponto de vista da variação da reflexão especular, é substancialmente mais significativo nas cerâmicas bege sem brilho do que nas marrons sem brilho. Para a condição intermediária de carga, concentração e tempo, o grupo bege sem brilho mostra variação da reflexão especular 1,4 vezes superior à variação encontrada para o grupo marrom sem brilho, sendo que esta proporção é ainda mais significativa na medida em que cresce a carga e o tempo.

Neste momento, é importante enfatizar que brilho e cor são aspectos independentes. A reflexão especular depende da composição química do vidrado, do caminho óptico percorrido pela luz e da textura da superfície. Na medida em que o desgaste provoca alterações superficiais, com o surgimento de trincas e cavidades, e ainda, com a presença de poros revelados na medida em que a espessura do material é consumida, incide em variações de brilho. A maneira como o material se comporta frente às modificações de superfície, determinará respostas diferentes para cada grupo.

Para o grupo bege com brilho, o modelo multiplicativo foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, apesar de responder com coeficiente de determinação inferior a 0,5. Os erros reforçam a idéia de que as medições possuem variabilidade acentuada, pois resulta em *MAE* de 0,25 e erro relativo de 35,8%. Neste modelo, o tempo consiste no principal fator atuante. Ao passar de 60min para 150min há um aumento na variação da reflexão especular de 110%, para a concentração de 15% e carga de 15N. A carga mostra o segundo maior efeito: de 15N para 25N, gera sobre a variação de brilho um aumento de 53,6%, para a concentração de 15% e tempo de 60min. Mais uma vez a concentração do abrasivo mostra ser a variável menos importante. Ao passar de 15% para 20%, a variação da reflexão especular aumenta 11,6%, considerando-se a carga de 15N aos 60min.

O grupo marrom com brilho revela um comportamento mais complexo na medida em que os dados experimentais indicam que o desgaste provoca aumento de brilho no início do processo para então diminuí-lo progressivamente. O modelo encontrado não se ajusta bem aos valores medidos, pois resulta em coeficiente de determinação inferior a 0,5, além de erros relevantes. Estes parâmetros indicam que os dados experimentais possuem grande variabilidade. Neste momento, cabe colocar que, possivelmente, a dificuldade de bem representar o fenômeno para esta configuração de cerâmica esteja associada à dificuldade do espectrofotômetro em medir a reflexão nestas placas. Isto porque, visualmente, são amostras que mostram significativa tendência a embaçar, fazendo com que sua superfície tenha que ser limpa várias vezes para eliminar este efeito. Além disso, revelam importante alteração de aparência para mínimas variações geométricas, passando da situação “muito desgastada” para “nenhum desgaste” de forma bem mais sensível do que os demais grupos. Portanto, as grandes variações medidas são coerentes com a percepção visual.

No grupo marrom com brilho, novamente a variável mais influente correspondente ao tempo. Para a concentração de 15% e carga de 15N, ao passar de 60min para 150min, a variação da reflexão especular aumenta em 288%. A carga, de 15N para 25N gera um aumento de 100% para a concentração de 15% e tempo de 60min. E a concentração, a variável menos influente, ao passar de 15% para 20% resulta em um aumento de 17,6% para a condição intermediária.

Cabe observar que a figura 2.8, apresentada na revisão bibliográfica, apesar de utilizar-se de um *glossmeter* para medir o brilho e apresentar outra escala de tempo, revela, para amostras de alto brilho inicial, comportamento semelhante ao encontrado para o grupo marrom com brilho: aumento seguido de redução da reflexão especular. Ibáñez (1998), por outro lado, ao utilizar-se deste mesmo equipamento e também placas brilhantes, não encontra comportamento similar, mas concorda com a diminuição do brilho na medida em que se desenvolve o processo de desgaste. Portanto, da mesma forma que no presente estudo, variações no comportamento de placas brilhantes também podem ser encontradas na bibliografia.

Comparando-se os grupos: bege com brilho e marrom com brilho, verifica-se que o primeiro é significativamente mais sensível ao processo de abrasão. O modelo associado ao grupo bege com brilho indica que a variação de reflexão especular aos 60min para a condição intermediária é 4 vezes superior ao modelo marrom com brilho, para a mesma condição.

À parte os aspectos mencionados anteriormente, relativos ao comportamento das superfícies ao longo do processo de desgaste, alguns pesquisadores mencionam, conforme item 2.3.5 da revisão bibliográfica, que placas de maior brilho tendem a revelar o desgaste em menor tempo comparativamente às de menor brilho. O brilho médio original dos grupos bege sem brilho e marrom sem brilho é de 2,5% e 2,2%, respectivamente, e, dos grupos bege com brilho e marrom com brilho, 4,4% e 3,9%, respectivamente. Aparentemente, existe um valor de brilho acima do qual as placas tendem a mostrar redução quando submetidas ao desgaste e abaixo do qual tendem a revelar ganho. Para cada campo de comportamento, quanto maior o índice de refração, maior a perda ou ganho de brilho.

4.2 REFLEXÃO DIFUSA

A reflexão original dos grupos bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho é apresentada na figura 4.5. As curvas correspondem à média das amostras envolvidas no estudo, em número de 44 a 57 por grupo, a partir de medições realizadas com componente especular excluído.

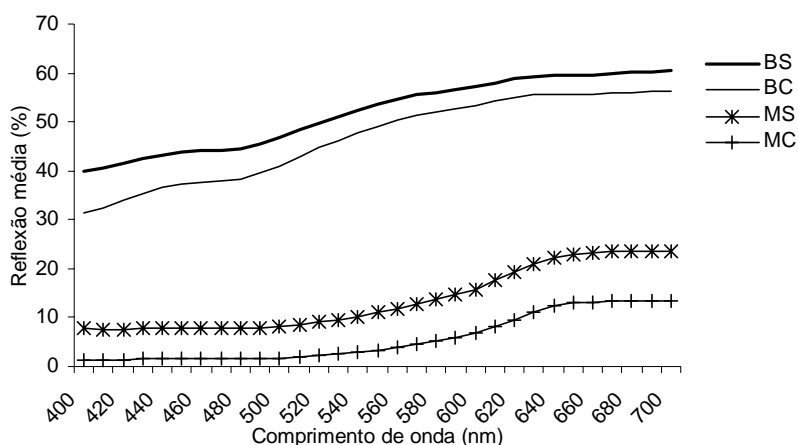


Figura 4.5: reflexão difusa média original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS

Para o comprimento de onda de 550nm, selecionado para o estudo, a figura 4.6 mostra a amplitude da reflexão. Os grupos marrom com brilho e marrom sem brilho apresentam respectivamente, reflexão entre 2,1% e 3,1% e 9,1% até 10,4%. Já o grupo bege com brilho distribui-se entre 43,1% e 49,0% e o grupo bege sem brilho, entre 49,5% até o máximo de 52,8%.

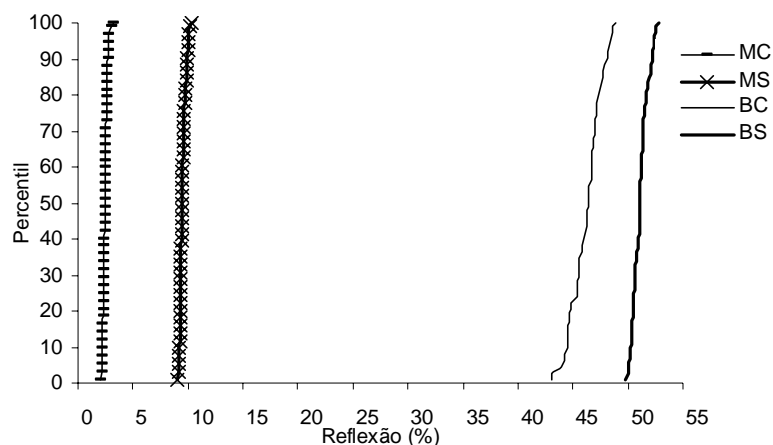
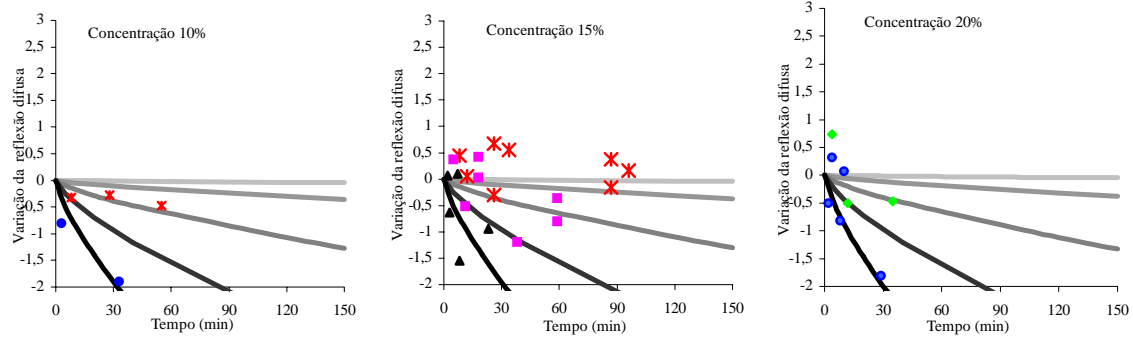


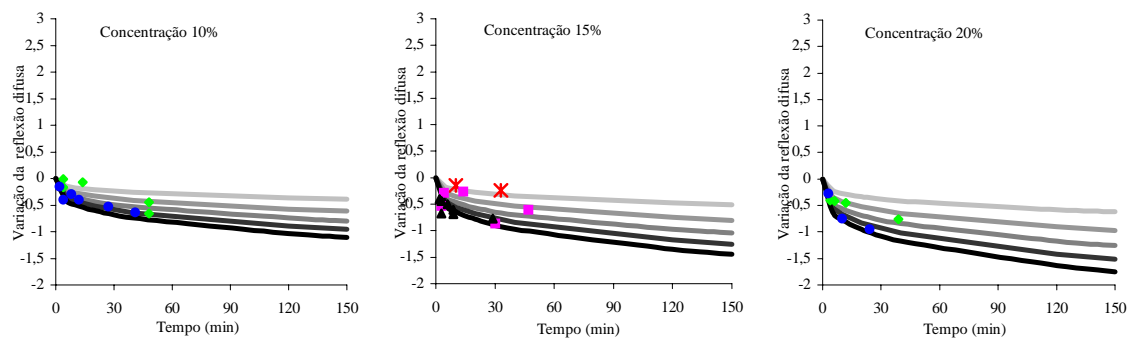
Figura 4.6: distribuição ordenada da reflexão difusa original de placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS

A figura 4.7 apresenta a representação gráfica das diferenças de reflexão difusa entre as situações desgastada e original para o comprimento de onda de 550nm e as concentrações de 10%, 15% e 20% de abrasivo para cada grupo de placa cerâmica. As curvas correspondem aos modelos propostos e, os pontos, aos dados experimentais a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais, incluindo-se as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo de placa cerâmica.

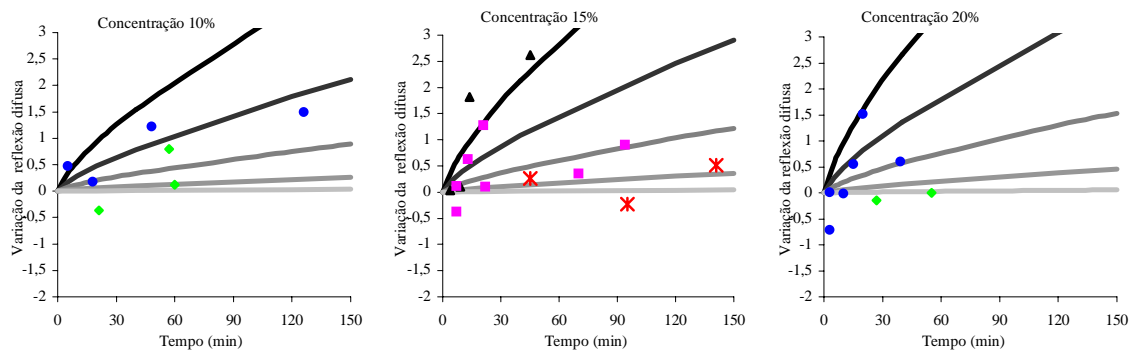
a) Grupo Bege sem brilho



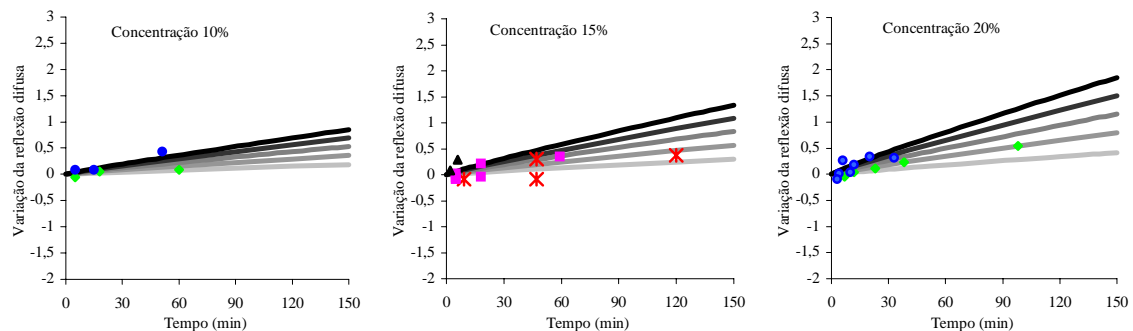
b) Grupo Marrom sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



d) Grupo Marrom com brilho



Legenda:
 5N
 10N
 15N
 20N
 25N
x 5N exp.
◆ 10N exp.
■ 15N exp.
● 20N exp.
▲ 25N exp.

Figura 4.7: representação gráfica da variação da reflexão difusa das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio

A tabela 4.3 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (*MAE*), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo.

Tabela 4.3: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão difusa em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = -0,160 \cdot ca^{3,12} \cdot co^{0,0626} \cdot t^{0,743}$	$R^2 = 0,355$
		$MAE = 0,44$
		ER = 66,4%
		SIGN = 0,0000
MS	$f(t) = -0,446 \cdot ca^{0,647} \cdot co^{0,662} \cdot t^{0,3025}$	$R^2 = 0,693$
		$MAE = 0,10$
		ER = 12,5%
		SIGN = 0,0000
BC	$f(t) = 0,2046 \cdot ca^{3,0109} \cdot co^{0,789} \cdot t^{0,744}$	$R^2 = 0,525$
		$MAE = 0,40$
		ER = 65,1%
		SIGN = 0,0000
MC	$f(t) = 0,0257 \cdot ca^{0,933} \cdot co^{1,122} \cdot t^{0,904}$	$R^2 = 0,601$
		$MAE = 0,09$
		ER = 23,9%
		SIGN = 0,0000

Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

Os quatro grupos estudados apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo para representar o comportamento da reflexão difusa frente ao fenômeno da abrasão. Os grupos marrom sem brilho e marrom com brilho, no entanto, ajustam-se melhor aos valores obtidos na medida em que revelam bons coeficientes de determinação: 0,693 e 0,601, respectivamente, e erros aceitáveis. O grupo bege com brilho, apesar de mostrar coeficiente de determinação superior a 0,5, apresenta elevada margem de erro, com *MAE* de 0,40 e erro relativo de 65,1%. De forma semelhante, os parâmetros estatísticos do grupo bege sem brilho indicam que os valores medidos possuem grande variabilidade. Para este, o coeficiente de determinação resultou em 0,355 e os erros, *MAE* e erro relativo, 0,44 e 66,4%, respectivamente.

Em todos os grupos, a carga consiste na variável mais influente sobre o processo, seguida do tempo e por fim, da concentração do abrasivo. A magnitude com que estas variáveis afetam os modelos previstos, no entanto, varia significativamente conforme mostram as análises ilustrativas que seguem.

Para o grupo bege sem brilho, a influência da carga é muito forte. Ao passar de 15N para 25N, a variação da reflexão difusa sofre um aumento de 390% para a condição intermediária de tempo e concentração. O tempo, por sua vez, gera um aumento de 97% quando o ensaio passa de 60min para 150min considerando-se a concentração de 15% e carga de 15N. Já a concentração do abrasivo, praticamente não afeta a abrasão: ao passar de 15% para 20% gera sobre a variação da reflexão um aumento de 1,5%.

No grupo marrom sem brilho, o modelo indica menor efeito da carga, assemelhando-se este efeito à influência do tempo. Ao passar de 15N para 25N, resulta um aumento da variação da reflexão difusa em torno de 39%, para o tempo de 60min e concentração de 15%. Quando o fenômeno passa de 60min para 150min gera um aumento de 32% sobre variação da reflexão, para a concentração de 15% e carga de 15N. O efeito da concentração do abrasivo torna-se um pouco maior neste grupo: acresce em 20% a variação da reflexão difusa ao passar de 15% para 20% considerando-se a condição intermediária de ensaio.

Para o grupo bege com brilho, a influência da carga novamente é muito forte, à semelhança do grupo bege sem brilho. Considerando-se a concentração intermediária, ao passar de 15N para 25N, ocorre sobre a variação da reflexão difusa, um acréscimo de 363%. O tempo tem efeito menor: quando o processo passa de 60min para 150min, resulta em um aumento de 97% na variação da reflexão difusa, para a condição intermediária. A concentração do abrasivo mantém aproximadamente a mesma influência que no grupo anterior: ocasiona um aumento de 24% na variação da reflexão difusa, ao passar de 15% para 20% considerando-se o tempo de 60min e carga de 15N.

Sobre o grupo marrom com brilho, o efeito da concentração do abrasivo é mais pronunciado, apesar de permanecer como a variável menos influente. Este aumenta em 39% a variação da reflexão difusa quando passa de 15% para 20%, para a carga de 15N e tempo de 60min. A carga, ao passar de 15N para 25N, aumenta em 64% a variação da reflexão difusa para a condição intermediária, enquanto que o tempo gera um aumento de 41%.

A figura 4.7 mostra dois comportamentos diferenciados: redução e aumento progressivos da reflectância na medida em que evolui o processo de desgaste. A fim de melhor compreender estas tendências, mostra-se de maneira simplificada, na tabela 4.4, como se comportam a luminosidade (L^*) e a saturação (C^*), dentre os parâmetros que representam a cor, em relação à reflectância. Este indicativo resulta da análise numérica dos respectivos dados, não apresentados neste trabalho.

Tabela 4.4: indicativo do comportamento da luminosidade (L^*), saturação (C^*) e reflectância das placas cerâmicas desgastadas pertencentes aos grupos em análise

Parâmetro	Grupos			
	BS	MS	BC	MC
L^*	↓	↓	↑	↑
C^*	↓	↑	↓	↓
Reflectância	↓	↓	↑	↑

Conforme a tabela 4.4, a luminosidade das placas diminui para os grupos BS e MS e aumenta para os grupos BC e MC, ou seja, os primeiros tornam-se mais escuros e os últimos mais claros em relação aos respectivos estados originais. Este parâmetro vai de encontro à própria da medida da reflectância. Já a saturação tende a diminuir com o desgaste, a exceção do grupo MS. Com efeito, conforme exposto na revisão bibliográfica, Barbera et al. (1996), identificaram que o desgaste geralmente se manifesta através da perda de saturação da cor.

Independentemente do sentido da variação da reflexão difusa (aumento ou redução em relação ao estado original), os grupos bege mostram-se significativamente mais sensíveis ao processo de abrasão do que os grupos marrons para as cargas de 15, 20 e 25N. Este efeito pode ser observado através da grande abertura destas curvas. Modificações devem ocorrer no transcorrer do processo, em algum ou alguns dos fatores que determinam a cor do esmalte cerâmico, os quais foram citados na revisão bibliográfica.

4.3 DELTA E

O parâmetro Delta E (ΔE) representa a variação de cor de um material em relação a um padrão de referência, o qual, neste trabalho, consiste nas respectivas amostras originais. Todos os resultados são obrigatoriamente positivos uma vez que resultam da hipotenusa formada pelas coordenadas Δa^* , Δb^* e ΔL^* .

A figura 4.8 mostra a representação gráfica do ΔE , para as concentrações de abrasivo de 10%, 15% e 20% para cada grupo cerâmico. As curvas correspondem aos modelos propostos e os pontos, aos dados experimentais a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais incluindo-se as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo cerâmico.

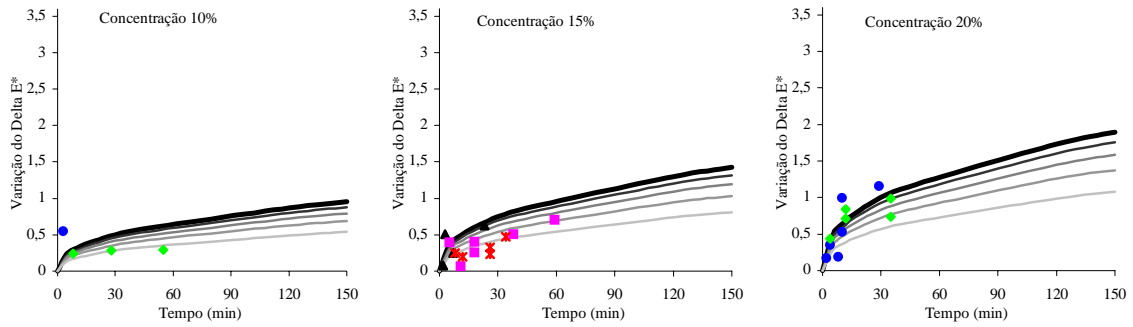
A tabela 4.5 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (MAE), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo.

Tabela 4.5: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do ΔE em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

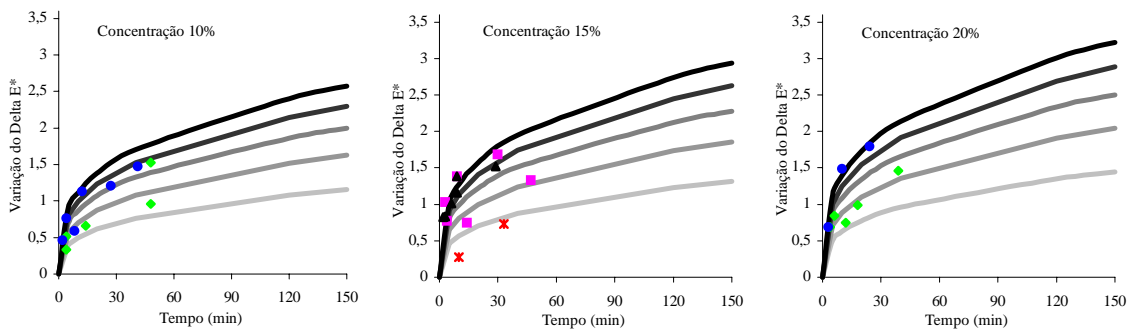
Grupo	Modelo	Parâmetros estatísticos
BS	$f(t) = 0,318 \cdot ca^{0,352} \cdot co^{0,998} \cdot t^{0,4049}$	$R^2 = 0,446$
		$MAE = 0,16$
		ER = 19,2%
		SIGN = 0,0000
MS	$f(t) = 0,737 \cdot ca^{0,498} \cdot co^{0,327} \cdot t^{0,309}$	$R^2 = 0,738$
		$MAE = 0,16$
		ER = 9,5%
		SIGN = 0,0000
BC	$f(t) = 0,543 \cdot ca^{1,32} \cdot co^{0,092} \cdot t^{0,259}$	$R^2 = 0,442$
		$MAE = 0,22$
		ER = 29,2%
		SIGN = 0,0000
MC	$f(t) = 1,297 \cdot ca^{0,824} \cdot co^{0,4073} \cdot t^{0,289}$	$R^2 = 0,377$
		$MAE = 0,56$
		ER = 24,8%
		SIGN = 0,0000

Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

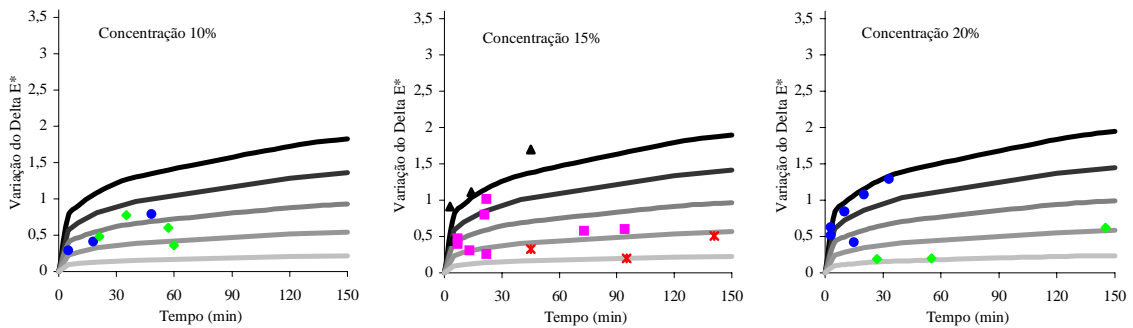
a) Grupo Bege sem brilho



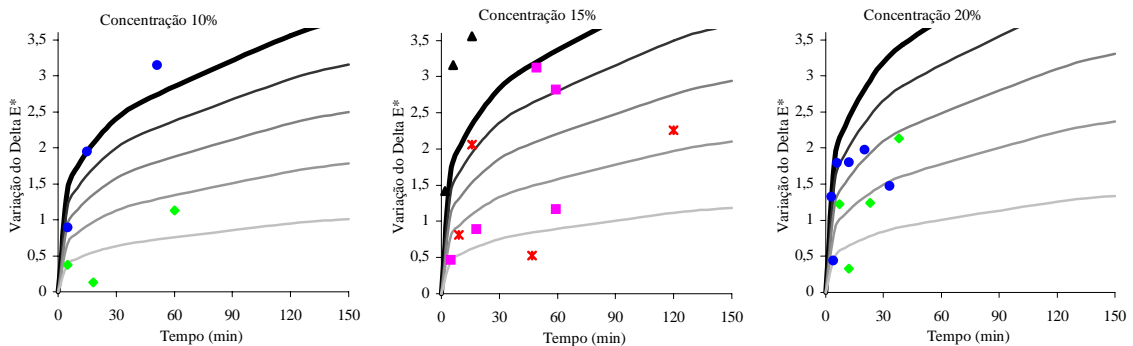
b) Grupo Marrom sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



d) Grupo Marrom com brilho



Legenda:
 — 5N — 10N — 15N — 20N — 25N
 × 5N exp. ◆ 10N exp. ■ 15N exp. ● 20N exp. ▲ 25N exp.

Figura 4.8: representação gráfica do ΔE das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio

Os quatro grupos estudados apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo para representar o comportamento da variação da cor frente ao fenômeno da abrasão. Dos modelos propostos, os dados experimentais relativos ao grupo marrom sem brilho ajustam-se bastante bem, pois resultam em coeficiente de determinação de 0,738, *MAE* de 0,16 e erro relativo de 9,5%. O grupo bege sem brilho, todavia, apesar de mostrar erro relativo de 19,2%, possui coeficiente de determinação inferior a 0,5. Também o grupo bege com brilho apresenta coeficiente da mesma ordem de grandeza, porém com maior margem de erro. Por fim, o coeficiente de determinação de 0,377 do grupo marrom com brilho indica não haver bom ajuste do respectivo modelo com relação aos dados experimentais, apesar do erro relativo pouco menor do que 25%.

O efeito das variáveis que compõem os modelos varia conforme o grupo em análise. De qualquer forma, os grupos sem brilho indicam que o tempo se constitui na variável mais influente sobre o desgaste, enquanto que os grupos com brilho indicam a carga.

Para o grupo bege sem brilho, a variável tempo implica em um aumento de 45% no ΔE na medida em que o fenômeno passa de 60min para 150min considerando-se a concentração de 15% e carga de 15N. Quanto à concentração do abrasivo, ao passar de 15% para 20%, eleva em 33% a variação do ΔE . Interessante observar que a carga, neste modelo, mostra uma das menores influências, aumentando em 19,5% a variação de cor ao passar de 15N para 25N, considerando-se a condição intermediária.

Para o grupo marrom sem brilho, a influência do tempo e da carga se aproximam. O primeiro implica em um aumento em torno de 33% sobre a variação de cor, considerando-se a condição intermediária. E a carga, ao passar de 15N para 25N aumenta em 29% o ΔE para o tempo de 60min e concentração de 15%. A participação da concentração do abrasivo diminui neste modelo: ao passar de 15% para 20% gera um aumento de 9,9% sobre a variação de cor para a carga de 15N e tempo de 60min.

O modelo proposto para o grupo bege com brilho considera que a concentração do abrasivo pouco influi no desenvolvimento da abrasão. Esta variável responde com um aumento de 2,6% na variação de cor ao passar de 15% para 20%, para a carga de 15N e tempo de 60min. A carga, todavia quando passa de 15N para 25N, gera um aumento de 97% sobre o ΔE para a condição intermediária. Já o tempo eleva em 28% a variação da cor na medida em que o fenômeno transcorre de 60min para 150min.

No grupo marrom com brilho, o efeito da carga sobre o aumento da variação do ΔE é de 52%, considerando-se a condição intermediária. O tempo, passando de 60min para 150min eleva esta variável em 30% para a concentração de 15% e carga de 15N. A concentração permanece como a variável menos influente na medida em que gera 12,4% de aumento ao passar de 15% para 20% para a condição intermediária.

A figura 4.8 mostra que, do ponto de vista da variação da cor, os grupos marrons são mais sensíveis ao desgaste do que os grupos bege. Isso significa que a variação dos parâmetros que definem a cor: L^* , a^* e b^* , em termos absolutos, é maior no primeiro grupo.

Em paralelo, cabe observar a grande abertura das curvas do grupo marrom com brilho. Para a condição intermediária, representada pela concentração de 15%, carga de 15N e tempo de 60min, resulta ΔE 32% maior que o correspondente para o grupo MS. Ao passar para a carga de 25N, a diferença aumenta para 56%. O modelo proposto, todavia, faz com que este comportamento se modifique para a carga de 5N, para a qual o grupo marrom com brilho apresenta variação de cor inferior ao grupo marrom sem brilho.

Interessante observar que o entendimento geral é de que as tonalidades claras tendem a disfarçar melhor o efeito da abrasão em relação às tonalidades escuras. Apesar destes relatos referirem-se à apreciação visual, poderão estar reproduzindo o comportamento efetivo das diferentes cores quando em utilização. Assim, os resultados encontrados mostram coerência com as impressões empíricas.

4.4 RUGOSIDADE MÉDIA R_a

A amplitude da rugosidade média R_a original dos grupos bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho é mostrada na figura 4.9. O grupo marrom com brilho mostra a menor rugosidade média, com valores entre 0,29 μm e 1,33 μm . Este é seguido do grupo bege com brilho, que se distribui entre 0,37 μm e 2,0 μm . Os grupos marrom sem brilho e bege sem brilho mostram rugosidades mais elevadas e próximas. O primeiro com valores entre 0,99 μm e 3,12 μm e o segundo, distribui-se entre 1,0 μm e 2,5 μm .

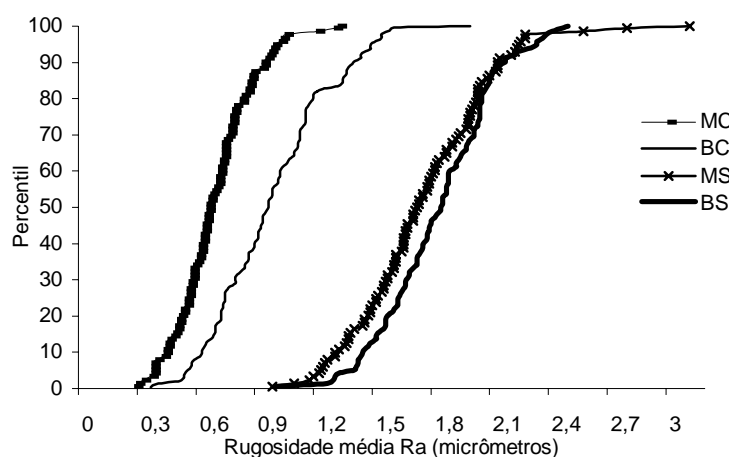


Figura 4.9: distribuição ordenada da rugosidade média Ra original das placas cerâmicas dos grupos BC, MC, BS e MS

A rugosidade média original resulta da média de 12 medições realizadas em cada uma das 9 amostras consideradas para cada grupo. Cabe distinguir que a denominação *rugosidade média* refere-se à medição de um perfil de rugosidade, pois procura descrever a rugosidade média encontrada ao longo do percurso de medição. Os dados considerados no estudo, para cada placa, resultam da média de 12 destes valores. A variabilidade encontrada entre leituras para os grupos BS, MS, BC e MC é apresentada na tabela 4.6.

Tabela 4.6: variabilidade entre as 12 medições de Ra realizadas em cada amostra de placa cerâmica

Parâmetros Estatísticos	Limites	BS	MS	BC	MC
Desvio padrão (μm)	mín.	0,11	0,12	0,13	0,07
	máx.	0,44	0,38	0,37	0,48
Coeficiente de variação (%)	mín.	6,78	7,31	15,3	11,9
	máx.	34,1	27,3	37,4	39,1

Cabe observar que efetivamente se percebe diferença de rugosidade entre as medições realizadas a 0° e 90° com relação às realizadas a 54° e 126° . Dessa forma, a variabilidade indicada na tabela 4.6 não contempla somente as variações inerentes ao ensaio, mas as existentes nas próprias amostras.

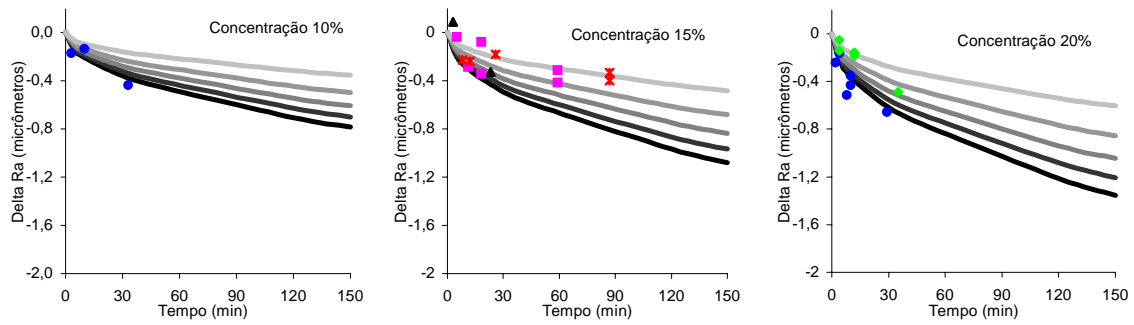
A figura 4.10 mostra a representação gráfica da variação de Ra entre as situações desgastada e original, para as concentrações de 10%, 15% e 20% de abrasivo para cada grupo cerâmico. As

curvas correspondem aos modelos propostos e, os pontos, aos dados experimentais a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais incluindo-se as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo de cerâmica.

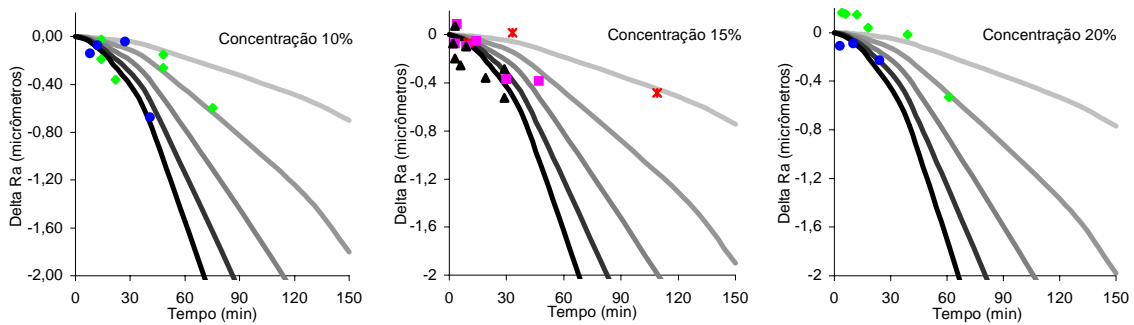
Todos os quatro grupos mostram redução da rugosidade Ra quando submetidos ao processo de desgaste. Este efeito, todavia, é substancialmente importante no grupo marrom sem brilho, o qual, em curto período de tempo, mostra rápida diminuição da rugosidade. Interessante observar que este e o grupo bege sem brilho mostram valores originais de rugosidade bastante próximos, no entanto, resultam em comportamento bem diferenciado.

A título de ilustração, para o tempo de 60min, carga de 15N e concentração de 15%, e tomando-se como referência o grupo BC, o grupo MC mostra variação de Ra quase 2 vezes superior; já o grupo BS, aproximadamente 5 vezes maior e; o grupo MS, sete vezes. Cabe observar que estas diferenças aumentam gradativamente na medida em que evolui o processo, devido às diferentes aberturas das curvas. A análise isolada da rugosidade média Ra, no entanto, não permite concluir se as placas efetivamente se tornaram mais lisas sob efeito do desgaste. Para tanto, deve-se considerar mais de um parâmetro, pois superfícies de diferentes texturas poderão apresentar a mesma média.

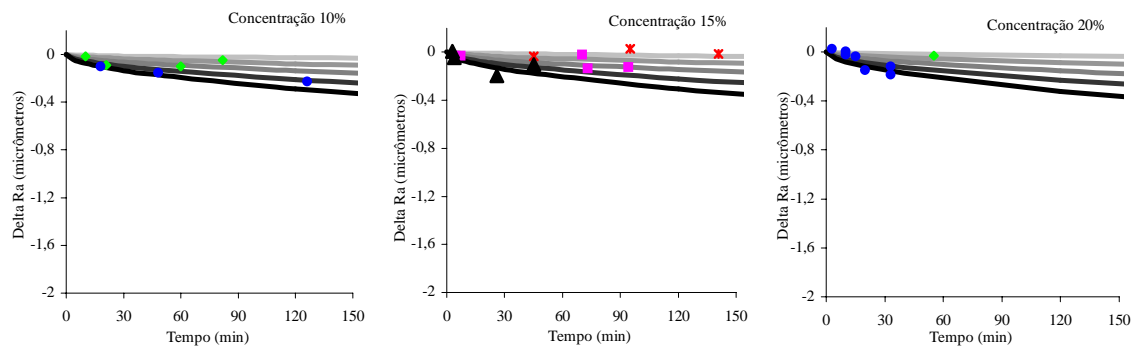
a) Grupo Bege sem brilho



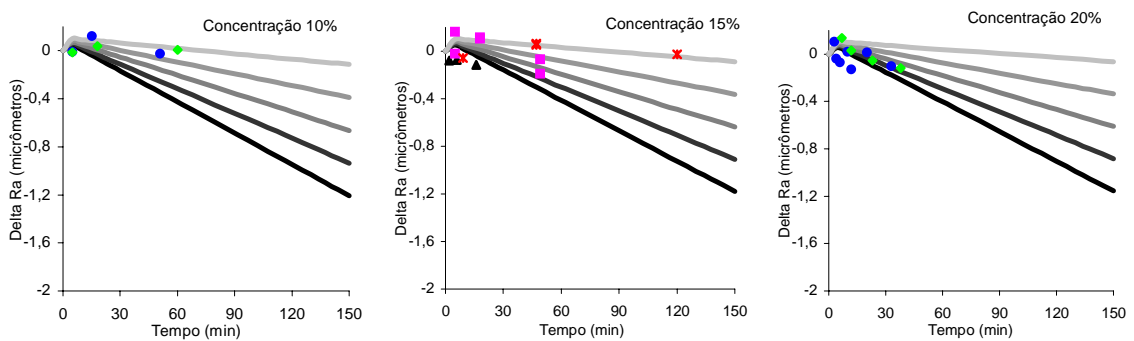
b) Grupo Marrom sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



d) Grupo Marrom com brilho



Legenda: — 5N — 10N — 15N — 20N — 25N
 × 5N exp. ◆ 10N exp. ■ 15N exp. ● 20N exp. ▲ 25N exp.

Figura 4.10: representação gráfica da variação da rugosidade média Ra das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração e tempo de ensaio

A tabela 4.7 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (*MAE*), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo estudado.

Tabela 4.7: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da rugosidade média R_a em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = -0,136 \cdot ca^{0,503} \cdot co^{0,786} \cdot t^{0,494}$	$R^2 = 0,664$
		$MAE = 0,09$
		ER = 16,5%
		SIGN = 0,0000
MS	$f(t) = -0,00173 \cdot ca^{1,36} \cdot co^{0,137} \cdot t^{1,66}$	$R^2 = 0,664$
		$MAE = 0,10$
		ER = 13,6%
		SIGN = 0,0000
BC	$f(t) = -0,0235 \cdot ca^{1,45} \cdot co^{0,158} \cdot t^{0,553}$	$R^2 = 0,562$
		$MAE = 0,03$
		ER = 33,7%
		SIGN = 0,0000
MC	$f(t) = \frac{(0,9061 \cdot ca + 3,17 \cdot co)t}{1 + (12,5 \cdot ca + 27,4 \cdot co)t} - (0,009 \cdot ca - 0,0005 \cdot co)t$	$R^2 = 0,0837$
		$MAE = 0,09$
		ER = 44,9%
		SIGN = 0,0000

Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

Os três primeiros grupos apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo, enquanto que o grupo marrom com brilho ajusta-se a um modelo mais complexo, onde os primeiros estágios da abrasão geram aumento da variação da rugosidade R_a para então apresentar queda. De qualquer forma, os modelos relativos aos grupos bege sem brilho e marrom sem brilho resultam em bom ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação iguais a 0,664, além de erros de pequena magnitude. Já o grupo bege com brilho, apesar do coeficiente de determinação superior a 0,5 e baixo *MAE*, revela alto erro relativo: de 33,7%. Por fim, como mostram os parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do grupo marrom com brilho, os dados experimentais revelam grande variabilidade, não viabilizando a obtenção de um modelo bem ajustado.

No grupo bege sem brilho, a carga consiste na variável de maior influência sobre o processo: implica em aumento de 30% sobre a variação da rugosidade Ra ao passar de 15 para 25N, considerando-se a concentração de 15% e tempo de 60min. A concentração do abrasivo constitui-se no segundo fator mais importante, sendo este um dos poucos casos em que isso ocorre: ao passar de 15% para 20%, resulta em um aumento de 26,4% para o tempo de 60min e carga de 15N. O tempo, ao passar de 60min para 150min, eleva em 20,3% a variação da rugosidade Ra, considerando-se a condição intermediária.

No grupo marrom sem brilho, a influência do tempo se destaca. Para ilustrar, ao passar de 60min para 150min, a variação de rugosidade aumenta em 358% para a condição intermediária. Já a carga, ao passar de 15N para 25N aumenta em 100% a variação da rugosidade média. A concentração do abrasivo, no entanto mostra pouca influência: aumenta em 4,2% a rugosidade média ao passar de 15% para 20% para a carga de 15N e o tempo de 60min.

O grupo bege com brilho também revela que a concentração do abrasivo pouco influi sobre o processo: ao passar de 15% para 20%, aumenta em 4% a rugosidade Ra, para a condição intermediária. Neste grupo, a carga constitui-se no fator mais influente: ao aumentar de 15N para 25N, a variação da rugosidade média é elevada em 110% para o tempo de 60min e concentração de 15%. Já o tempo responde com 70% de aumento ao passar de 60min para 150min para a carga de 15N e concentração de 15%.

Por fim, o grupo marrom com brilho também mostra que a participação da concentração do abrasivo é pequena: ao passar de 15% para 20% aumenta em 1,5% a variação da rugosidade, para o tempo de 60min e carga de 15N. O tempo corresponde ao principal fator atuante, pois de 60min para 150min gera um aumento de 237% na variação de Ra para a condição intermediária. A carga aumenta em 116% a variação da rugosidade média ao passar de 15N para 25N, considerando-se o tempo de 60min e a concentração de 15%. Cabe lembrar, todavia, que este modelo está associado a dados experimentais com grande variabilidade.

4.5 RUGOSIDADE MÉDIA Rz

A amplitude da rugosidade média R_z original dos grupos bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho é mostrada na figura 4.11. O grupo marrom com brilho mostra a menor rugosidade média, com valores entre $1,5\mu\text{m}$ e $4,0\mu\text{m}$. Este é seguido do grupo bege com brilho, que se distribui entre $1,5\mu\text{m}$ e $9,0\mu\text{m}$. Os grupos bege sem brilho e marrom sem brilho mostram rugosidades mais elevadas e próximas. O primeiro com valores entre $3,2\mu\text{m}$ e $11,3\mu\text{m}$ e o segundo, entre $5,8\mu\text{m}$ e $15,0\mu\text{m}$.

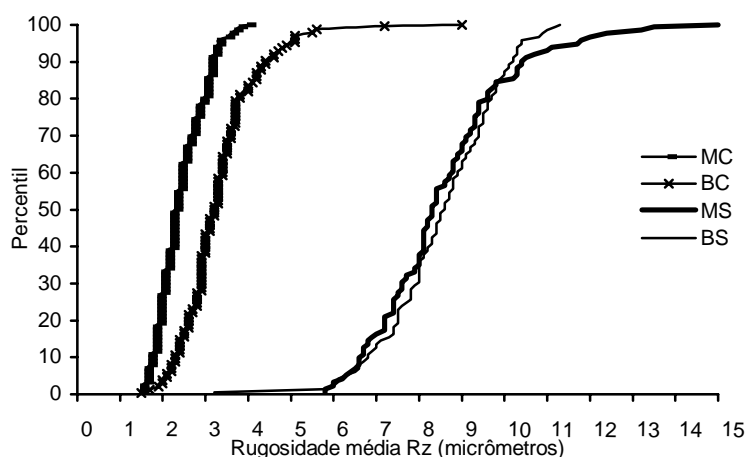


Figura 4.11: distribuição ordenada da rugosidade média R_z original das placas cerâmicas dos grupos MC, BC, MS e BS

A rugosidade média original resulta da média das 12 medições realizadas em cada uma das 9 amostras originais medidas para cada grupo. Cabe distinguir que a denominação *rugosidade média R_z* refere-se à medição de um perfil de rugosidade, pois procura descrever a média das cinco maiores diferenças entre picos e vales ao longo do percurso de medição. Os dados considerados no estudo, para cada amostra, resultam da média de 12 destes valores. A variabilidade encontrada entre leituras para os grupos BS, MS, BC e MC é apresentada na tabela 4.8.

Tabela 4.8: variabilidade entre as 12 medições de R_z para as placas dos grupos MC, BC, MS e BS

Parâmetros Estatísticos	Limites	BS	MS	BC	MC
Desvio padrão (μm)	mín.	0,64	0,63	0,34	0,14
	máx.	2,07	2,25	2,58	0,89
Coeficiente de variação (%)	mín.	8,23	9,23	11,8	5,9
	máx.	35,38	29,7	33,9	34,9

A figura 4.12 mostra a representação gráfica da variação de R_z entre as situações desgastada e original, para as concentrações de 10%, 15% e 20% de abrasivo para cada grupo cerâmico. As

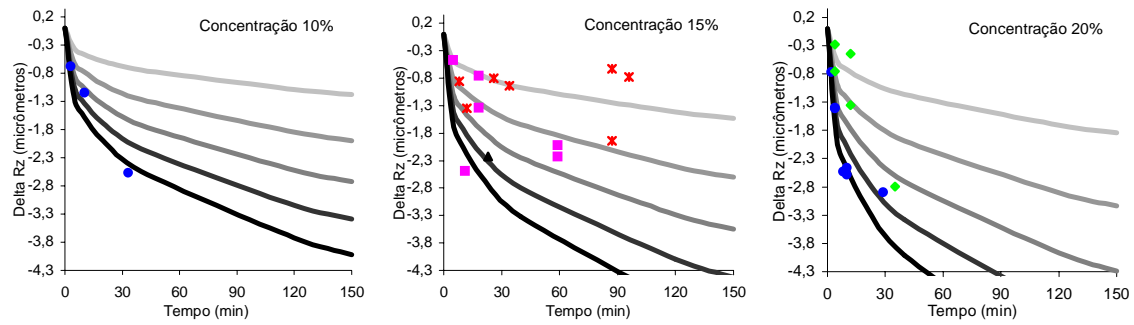
curvas correspondem aos modelos propostos e, os pontos, aos dados experimentais a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais incluindo-se as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo de cerâmica.

Todos os grupos mostram redução da rugosidade R_z na medida em que aumenta a carga, o tempo e a concentração do abrasivo. O grupo bege com brilho, no entanto, se destaca pela pouca sensibilidade ao processo de abrasão: a rugosidade R_z diminui para então prosseguir praticamente constante ao longo do tempo, sendo que a magnitude desta redução é de pequena grandeza. Os grupos bege sem brilho e marrom sem brilho, por outro lado, mostram forte sensibilidade ao desgaste, diminuindo rapidamente na medida em que evolui o processo, principalmente para cargas maiores dado que apresentam importante abertura entre as curvas.

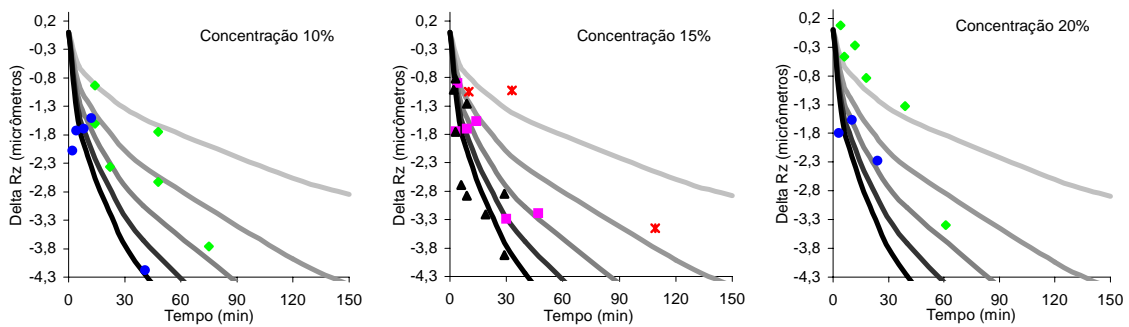
A título de ilustração, para o tempo de 60min, carga de 15N e concentração de 15%, o grupo bege sem brilho mostra variação da rugosidade R_z 14 vezes mais alta comparativamente ao grupo bege com brilho. Ainda, comparando-se a variação de R_z indicada pelo modelo do grupo marrom sem brilho para as mesmas condições, houve um aumento de quase 21 vezes em relação ao grupo bege com brilho. Cabe observar que estas diferenças aumentam gradativamente na medida em que evolui o processo.

A redução de ambas as rugosidades, R_a e R_z , permite concluir que efetivamente as placas em estudo tornaram-se mais lisas sob ação abrasiva. Esta situação, todavia, pode variar conforme a textura original. Ibáñez (1998) e Felú et al. (1990) comentam que o caso mais típico representa situações de aumento da rugosidade como consequência do desgaste. No entanto, placas originalmente rugosas, poderão apresentar uma diminuição nos picos superficiais que lhes caracterizam. Com efeito, Ford (1996) refere que, em consequência do desgaste, placas rugosas tornam-se gradativamente mais lisas. No mesmo sentido, Enrique et al. (1995) encontraram redução no coeficiente de atrito de placas rugosas em situações de desgaste.

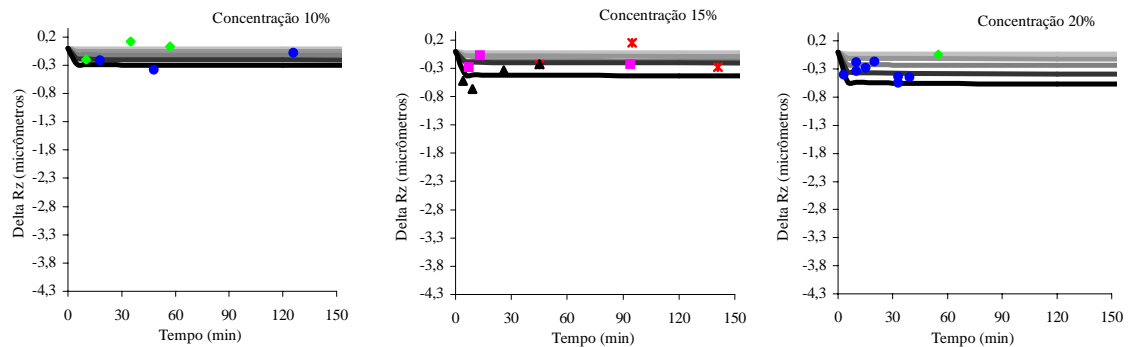
a) Grupo Bege sem brilho



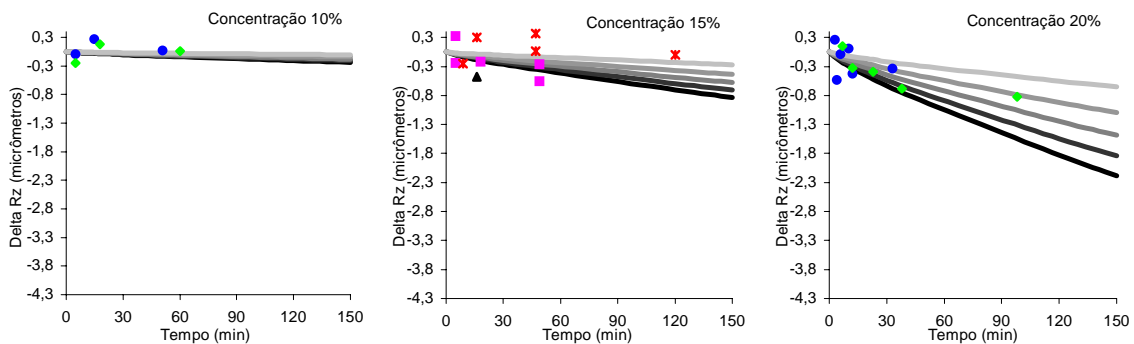
b) Grupo Marrom sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



d) Grupo Marrom com brilho



Legenda: — 5N — 10N — 15N — 20N — 25N
 × 5N exp. ◆ 10N exp. ■ 15N exp. ● 20N exp. ▲ 25N exp.

Figura 4.12: representação gráfica da variação da rugosidade média Rz das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

A tabela 4.9 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (*MAE*), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo estudado.

Tabela 4.9: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da rugosidade média R_z em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = -1,29 \cdot ca^{0,766} \cdot co^{0,656} \cdot t^{0,347}$	$R^2 = 0,675$
		$MAE = 0,41$
		ER = 15,9%
		SIGN = 0,0000
MS	$f(t) = -0,736 \cdot ca^{0,634} \cdot co^{0,0229} \cdot t^{0,478}$	$R^2 = 0,643$
		$MAE = 0,54$
		ER = 14,5%
		SIGN = 0,0000
BC	$f(t) = -0,6104 \cdot ca^{1,75} \cdot co^{0,868} \cdot t^{0,0235}$	$R^2 = 0,431$
		$MAE = 0,13$
		ER = 72,0%
		SIGN = 0,0000
MC	$f(t) = -0,0819 \cdot ca^{0,786} \cdot co^{3,49} \cdot t^{0,8062}$	$R^2 = 0,451$
		$MAE = 0,02$
		ER = 69,2%
		SIGN = 0,0000

Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

Os quatro grupos estudados apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo para representar o comportamento da variação da rugosidade média R_z frente ao fenômeno da abrasão. Dos modelos propostos, verifica-se que os grupos bege sem brilho e marrom sem brilho ajustam-se bem, pois resultam em coeficientes de determinação de 0,675 e 0,643, respectivamente, além de erros aceitáveis. Os grupos bege com brilho e marrom com brilho, todavia, mostram coeficientes de determinação inferiores a 0,5, além de erros relevantes, o que indica que os dados experimentais possuem grande variabilidade.

A variável mais influente sobre o desgaste para o grupo bege sem brilho consiste na carga: ao passar de 15N para 25N, gera um aumento de 48% sobre a variação de Rz, para o tempo de 60min e concentração de 15%. O tempo, por sua vez, aumenta em 38% a variação de Rz ao passar de 60min para 150min, considerando-se a condição intermediária. A concentração do abrasivo revela a menor influência: ao passar de 15% para 20% eleva em 21% a variação de Rz, para o tempo de 60min e carga de 15N.

No grupo marrom sem brilho, a concentração do abrasivo praticamente não tem influência sobre o fenômeno: ao passar de 15% para 20% eleva em 0,54% a variação de Rz, para o tempo de 60min e carga de 15N. Neste grupo, o tempo apresenta a maior influência: ao passar de 60min para 150min, a variação de Rz aumenta em 55%, para a condição intermediária. Por fim, a carga, ao passar de 15N para 25N implica em um aumento de 38% na variação de Rz, para o tempo de 60min e concentração de 15%.

No grupo bege com brilho, a influência do tempo é muito pequena: gera um aumento de 2,15% sobre a variação de Rz ao passar de 60min para 150min, sendo que não mostra alteração importante quando em tempos superiores a este. A carga consiste na variável de maior influência: ao passar de 15N para 25N, eleva em 139% a variação de Rz, para a condição intermediária. Já a concentração do abrasivo, ao passar de 15% para 20%, eleva esta variação em 30%, para o tempo de 60min e carga de 15N.

Por fim, o grupo marrom com brilho apresenta um comportamento bastante particular no que diz respeito à influência da concentração do abrasivo. Esta aumenta em 172% a variação da rugosidade Rz quando passa de 15% para 20%, considerando-se o tempo de 60min e a carga de 15N, o que a torna a principal variável a atuar sobre o fenômeno. O tempo participa em segundo lugar: ao passar de 60min para 150min, eleva em 108% a variação de Rz, para a condição média. Por fim, quando a carga passa de 15N para 25N, aumenta em 48% a variação de Rz, para o tempo de 60min e a concentração de 15%.

4.6 ANÁLISE VISUAL

A avaliação visual das amostras procurou contemplar tanto as variações de cor como as variações de brilho. Visualmente, a distinção entre estas propriedades é obtida através de condições de observação diferenciadas enquanto luminosidade e disposição geométrica, conforme descrito no capítulo 3 referente à metodologia.

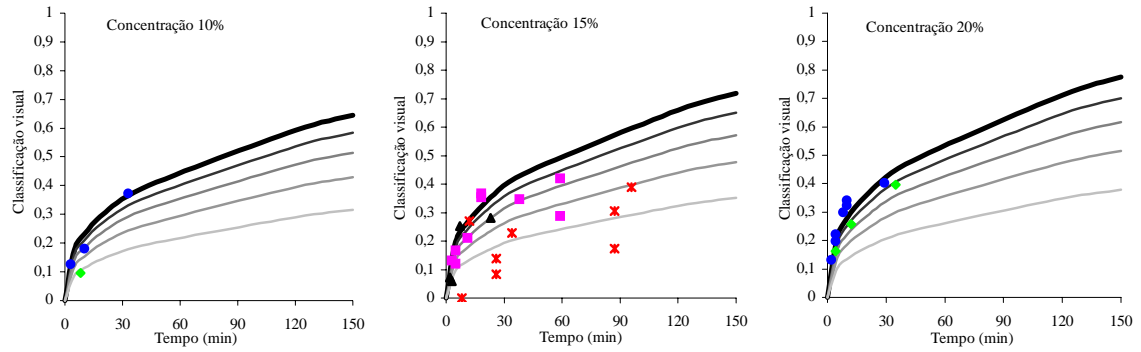
Para a análise da cor, não houve preocupação em identificar qual ou quais dos parâmetros que a caracterizam apresentaram variação, mas sim visualizá-la de forma global. De qualquer forma, poucas foram as amostras que evidenciaram tal efeito, não permitindo sequer estabelecer uma classificação visual significativa.

Por outro lado, a análise do brilho mostrou-se bastante sensível à identificação de variações entre as situações original e desgastada. As condições de observação adotadas mostraram-se eficientes, permitindo identificar pequenas variações.

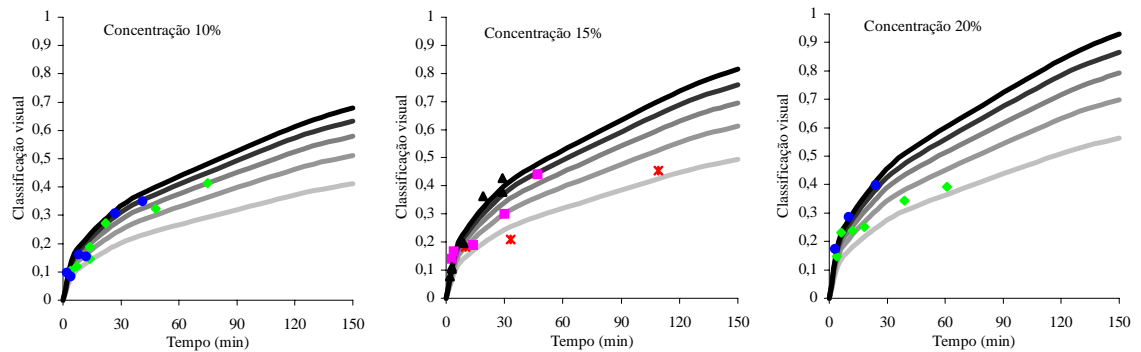
Cabe observar que não se procurou ordenar visualmente as amostras do ponto de vista da rugosidade. Algumas análises iniciais mostraram que são necessárias grandes variações nesta propriedade para que efetivamente se consiga distinguir as amostras com segurança.

A figura 4.13 mostra a representação gráfica da classificação visual entre as situações desgastada e original, para as concentrações de abrasivo de 10%, 15% e 20% para cada grupo cerâmico. As curvas correspondem aos modelos propostos e, os pontos, aos valores numéricos a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais incluindo-se as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo de cerâmica.

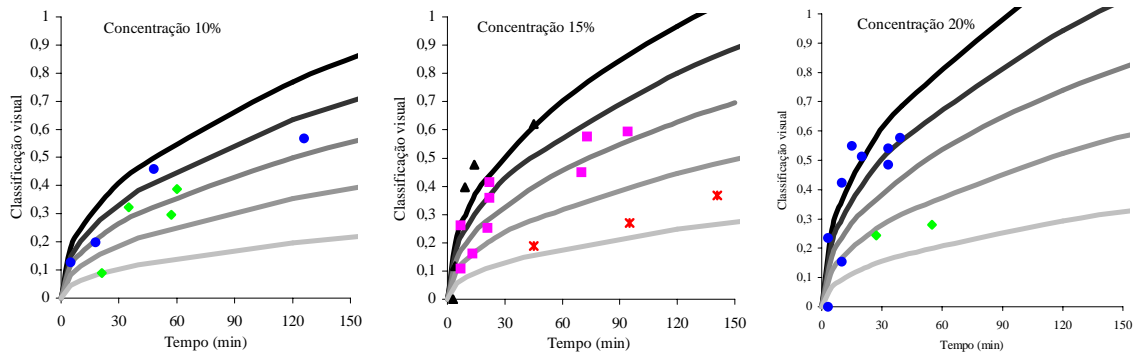
a) Grupo Bege sem brilho



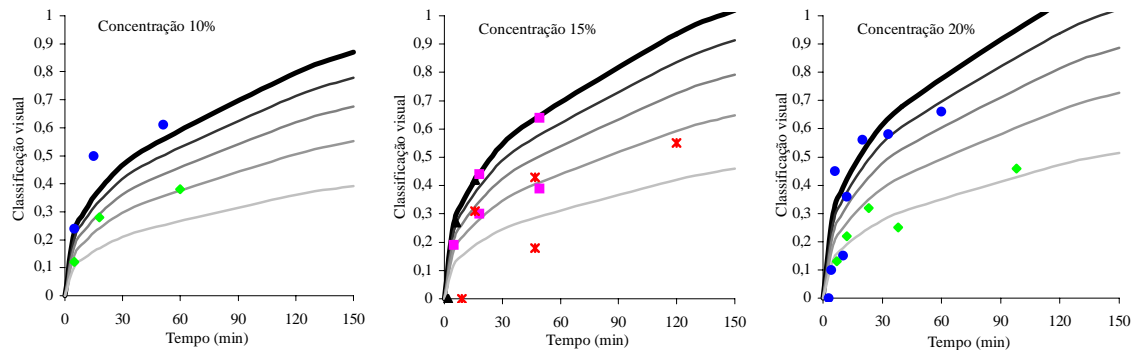
b) Grupo Marrom sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



d) Grupo Marrom com brilho



Legenda: — 5N — 10N — 15N — 20N — 25N
 × 5N exp. ◆ 10N exp. ■ 15N exp. ● 20N exp. ▲ 25N exp.

Figura 4.13: representação gráfica da classificação visual das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

A escala de 0 a 1, relativa à classificação visual, procura abranger os vários níveis de comprometimento estético desde o estado original, ao qual se atribui 0, até a deterioração total, que corresponde a 1. Por deterioração total, entende-se a remoção total do esmalte, situação esta, muito além do início da percepção da abrasão e também da interpretação do fenômeno como preocupante. De qualquer forma, constitui-se em um limite bem definido. Arbitrou-se que a amostra visivelmente mais desgastada, dentre todas as ensaiadas, corresponde ao numeral 0,7. A escolha de outro numeral como limite altera apenas os valores numéricos em si, porém as relações entre eles é mantida.

Como não é possível observar simultaneamente a aparência das placas com e sem brilho, ordenou-se os grupos em separado. A seguir, comparou-se as quatro amostras mais desgastadas de cada grupo e atribuiu-se valores numéricos de forma a indicar o nível de desgaste em termos relativos. Nesta análise, pôde-se observar que o desgaste nas placas com brilho parece mais intolerável do que nas placas sem brilho, talvez justamente por revelar perda de brilho e assim, estar psicologicamente associado ao que normalmente se espera como efeito do desgaste. Nas placas sem brilho, o aumento da reflexão especular revela-se como uma condição esteticamente suave.

Interessante observar que o entendimento geral apresentado na revisão bibliográfica é de que as placas lisas e brilhantes evidenciam a abrasão em menor prazo do que as decoradas, com algum tipo de textura ou ainda com menor brilho. Possivelmente, este entendimento esteja associado tanto à efetiva resistência destas placas quanto à sensação que o desgaste causa sobre os usuários, onde estes poderão ser mais tolerantes com umas do que com outras.

Com relação à cor, a variação do brilho nas placas marrons parece mais desagradável visualmente em comparação às placas bege. Generalizando, em cores escuras, a variação de brilho tende a ser mais agressiva. Cabe ressaltar que a cor não supera o brilho na classificação entre grupos de forma que, da aparência mais desagradável para a menos desagradável, os grupos são assim ordenados: MC, BC, MS e BS.

A tabela 4.10 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (*MAE*), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo estudado.

Tabela 4.10: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da análise visual em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = 0,122. ca^{0,444}.co^{0,263}.t^{0,38}$	$R^2 = 0,631$
		$MAE = 0,09$
		$ER = 14,1\%$
		$SIGN = 0,0000$
MS	$f(t) = 0,142. ca^{0,3108}.co^{0,453}.t^{0,449}$	$R^2 = 0,919$
		$MAE = 0,04$
		$ER = 6,0\%$
		$SIGN = 0,0000$
BC	$f(t) = 0,108 ca^{0,846}.co^{0,568}.t^{0,461}$	$R^2 = 0,745$
		$MAE = 0,08$
		$ER = 16,5\%$
		$SIGN = 0,0000$
MC	$f(t) = 0,173. ca^{0,495}.co^{0,394}.t^{0,395}$	$R^2 = 0,599$
		$MAE = 0,10$
		$ER = 17,5\%$
		$SIGN = 0,0000$

Como todos os valores de significância são inferiores a 0,05, os modelos propostos são significativos.

Os quatro grupos estudados apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo para representar a análise visual frente ao fenômeno da abrasão. Todos os modelos ajustam-se bem aos resultados, pois resultam em coeficientes de determinação superiores a 0,5 e erros aceitáveis. 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.

Em todos os grupos, as variáveis que compõem os modelos indicam a mesma ordem de importância: o tempo revela-se como o fator mais influente sobre o processo de desgaste seguido da carga e por fim, da concentração do abrasivo.

4.7 LIMPABILIDADE

A modificação da limpabilidade das placas bege com brilho e bege sem brilho, após o desgaste, é avaliada segundo duas metodologias distintas, conforme os itens 4.7.1 e 4.7.2.

4.7.1 Impregnação com carvão ativado e óleo mineral

A figura 4.14 mostra a representação gráfica da variação do volume de retenção de óleo (V_o) para as concentrações de 10%, 15% e 20% de abrasivo em relação ao estado original, respectivamente para os grupos bege sem brilho e bege com brilho. As curvas correspondem aos modelos propostos e, os pontos, aos dados experimentais a partir dos quais estes foram gerados. Cabe lembrar que os modelos são ajustados considerando-se todos os resultados experimentais incluindo-se as concentrações de 5% e 25%, não apresentadas graficamente, para cada grupo de cerâmica.

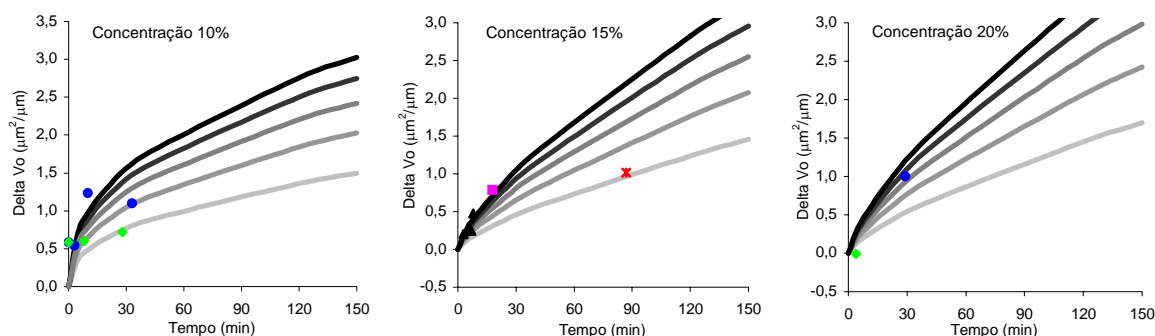
A tabela 4.11 apresenta a representação numérica dos modelos, os coeficientes de determinação (R^2), o erro absoluto médio (MAE), o erro relativo (ER) e a significância do modelo (SIGN) para cada grupo.

Tabela 4.11: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da variação do volume de retenção de óleo em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

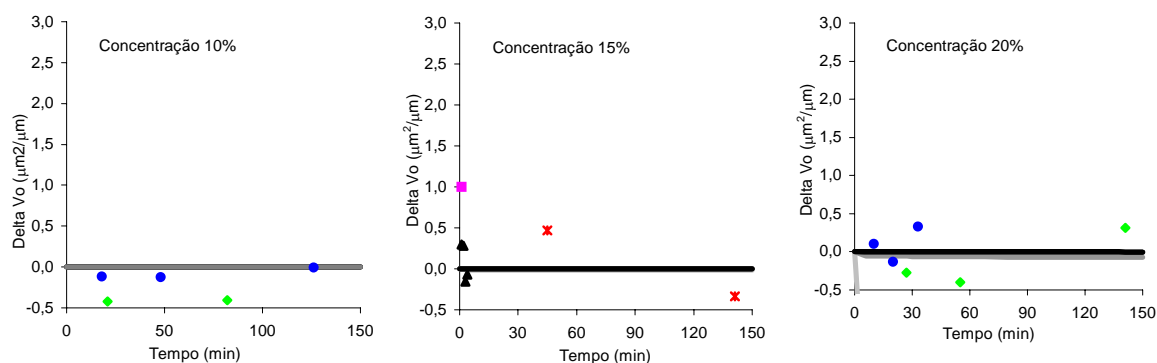
Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$f(t) = 0,118 \cdot ca^{0,5104} \cdot co^{0,542} \cdot t^{0,721}$	$R^2 = 0,528$
		$MAE = 0,21$
		ER = 15,9%
		SIGN = 0,0000
BC	$f(t) = -0,0162 \cdot ca^{-5,28} \cdot co^{17,6} \cdot t^{0,125}$	$R^2 = 0,153$
		$MAE = 0,21$
		ER = -
		SIGN = 0,0000

Como os valores de significância dos modelos são inferiores a 0,05, ambos são aceitos.

a) Grupo Bege sem brilho



c) Grupo Bege com brilho



Legenda: — 5N — 10N — 15N — 20N — 25N
 × 5N exp. ◆ 10N exp. ■ 15N exp. ● 20N exp. ▲ 25N exp.

Figura 4.14: representação gráfica da variação do volume de retenção de óleo das placas cerâmicas após ensaio de desgaste em função das variáveis: carga, concentração do abrasivo e tempo de ensaio

Os dois grupos estudados apresentam dados experimentais coerentes com modelos do tipo multiplicativo para representar o comportamento da variação do volume de retenção de óleo frente ao fenômeno da abrasão. No caso do grupo bege sem brilho, o modelo ajusta-se bem aos dados experimentais, pois resulta em coeficiente de determinação superior a 0,5, *MAE* de 0,21 e erro relativo de 15,9%. Já o grupo bege com brilho apresenta grande variabilidade nos resultados experimentais o que implica em baixo coeficiente de determinação.

Interessante observar o comportamento diferenciado dos grupos. No primeiro, o parâmetro V_o aumenta significativamente na medida em que evolui o processo de desgaste. Este fato indica que a profundidade dos vales (R_{vk}) aumenta e/ou a fração de contato nos vales (Mr_2) diminui. Já para o grupo bege com brilho, o volume de retenção de óleo parece não variar de maneira importante com o desgaste, mantendo-se em torno do valor original. Cabe observar que a grande variabilidade nos resultados experimentais deste grupo impede conclusões seguras.

Para o grupo bege sem brilho, o modelo indica que o tempo consiste na variável mais influente sobre o processo de abrasão, seguido da carga e da concentração do abrasivo.

Após impregnação com a mistura de óleo mineral e carvão ativado e a conseqüente limpeza com pano seco, verifica-se que todas as placas bege sem brilho mostram resíduos superficiais que lhe alteram o aspecto. Inclusive as amostras originais mostraram impossibilidade de remoção do agente manchante. Estes resultados são coerentes com os limites propostos por Ibáñez (1998), onde $V_o > 0,012$ a $0,016\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$ indica que a superfície esmaltada passa a reter sujeira. Cabe observar, no entanto, que esta ordem de grandeza é significativamente inferior aos valores de V_o obtidos na presente tese para este grupo, que variam de 0,54 a $1,8\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$.

No grupo bege com brilho, após limpeza com pano seco, apenas duas amostras permitiram a remoção total do agente impregnado, sendo uma delas a placa original. As placas impregnadas, entretanto, revelam a presença de manchas de forma bem mais suave que o grupo bege sem brilho. Diferentemente dos pontos pretos característicos deste último grupo, percebe-se que a superfície como um todo se torna mais escura. Com esta aparência, excetuam-se as placas com maior impregnação, as quais também manifestam a presença do agente manchante através de pontos.

A fim de verificar a correspondência entre o parâmetro V_o com a percepção visual, classificou-se as amostras conforme a gravidade das manchas. Inicialmente, trabalhou-se com ambos os grupos em separado, todavia os gráficos individuais mostraram tendências complementares, resultando inclusive em coeficiente de determinação superior aos obtidos quando os grupos são trabalhados em separado. A figura 4.15 mostra esta correlação considerando-se a totalidade dos resultados dos grupos bege com brilho e bege sem brilho. Os valores do volume de retenção de óleo para o primeiro grupo situa-se entre 0,04 e $0,8\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$ enquanto que para o grupo bege sem brilho entre 0,54 e $1,8\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$.

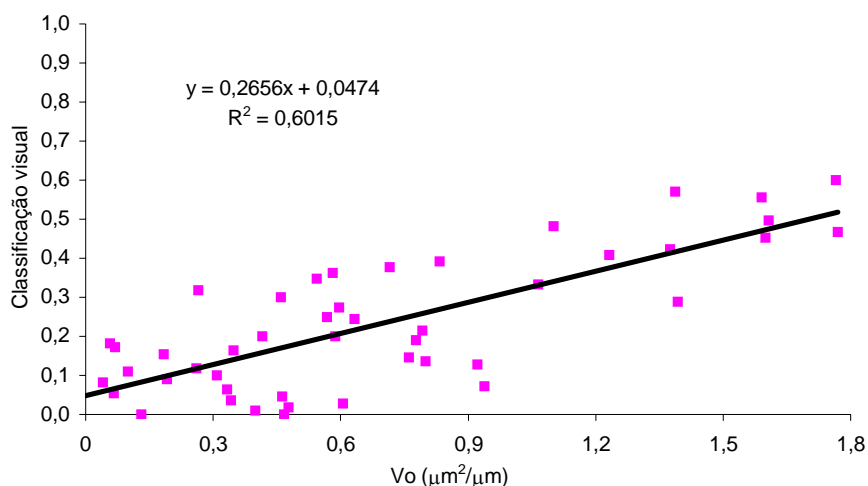


Figura 4.15: correlação entre a classificação visual e o volume de retenção de óleo das placas cerâmicas desgastadas dos grupos: bege sem brilho e bege com brilho

O coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,6, mostrado na figura 4.15, sugere que há correspondência entre o aumento do manchamento com o aumento de V_o . Como este último aumenta na medida em que evolui o desgaste, é de se esperar que a impregnação de sujeira do também se agrave.

A linha de tendência mostrada na figura 4.15 indica que quando $V_o = 0$, ainda assim, a superfície revela impregnação de sujeira. Se esta situação é válida, outros parâmetros, além de V_o , influenciam neste comportamento. Por outro lado, os valores de V_o encontrados no presente estudo apresentam ordem de grandeza, em média, 84 vezes maior em relação aos valores encontrados por Ibáñez (1998). Dessa forma, pode-se questionar se há definição suficiente no extremo inferior da linha de tendência, que permita estabelecer a relação de V_o com o aspecto visual quando o primeiro se aproxima de zero. Assim, a concordância com esta autora com respeito ao limite a partir do qual a superfície passa a reter sujeira pode sofrer variações. Cabe observar que os dois valores individuais de V_o , para os quais não se percebe retenção do agente manchante após limpeza com pano seco, não são suficientes para definir um comportamento, como se pode observar na figura 4.15, ou seja, estes valores não podem ser individualmente associados ao início da tendência à impregnação de sujeira.

Dessa forma, resultam duas conclusões: a) a magnitude da retenção de óleo das placas em estudo não permite definir a partir de qual valor ocorre impregnação de sujeira; b) o parâmetro V_o aumenta com o desgaste e reflete adequadamente a percepção do manchamento.

A permanência de manchas não removíveis conduziu a novas tentativas de limpeza. Para tanto, seguiu-se as recomendações da NBR 13818/97, iniciando pelo uso de escova e abrasivo comercial. Este procedimento consiste no penúltimo estágio de limpeza, anterior ao uso de solvente. Como resultado, obteve-se certa melhoria no aspecto das placas do grupo bege sem brilho, com redução da impregnação do agente manchante, todavia, em nenhuma delas conseguiu-se a remoção total, inclusive na amostra original. Já para o grupo bege com brilho, 56% das amostras permaneceram impregnadas com a mistura de óleo mineral e carvão ativado. Cabe observar que, neste grupo, as placas cujos resíduos de agente manchante permaneceram, a diferença entre a primeira e a quarta mais manchada é muito grande, com redução de aproximadamente metade dos pontos.

Dessa forma, procedeu-se ao último estágio de tentativa de remoção das manchas, que consiste na utilização de solventes. Iniciou-se pela imersão em ácido clorídrico a 3% por 24h. Transcorrido este período, todas as superfícies do grupo bege sem brilho ainda permaneceram com resíduos visíveis, da mesma forma que as amostras do grupo bege com brilho. Cabe lembrar que, neste último, submeteu-se somente 56% das placas a este procedimento uma vez que as manchas sobre as demais já haviam sido removidas com escova e abrasivo. Em vista da ineficácia do ácido clorídrico em restabelecer o aspecto original, procedeu-se à imersão em hidróxido de potássio 200g/l, também por 24h. Após este período, todas as amostras continuaram com vestígios do agente manchante, inclusive a placa original do grupo bege sem brilho. Utilizando-se tricloroetileno por 24h obteve-se resultados similares.

A figura 4.16 apresenta duas amostras do grupo bege sem brilho: à esquerda, no estado original e, à direita, desgastada, onde ambas foram submetidas à impregnação com óleo mineral e carvão ativado e posterior tentativa de remoção do agente manchante por imersão em ácido clorídrico a 3% por 24h.

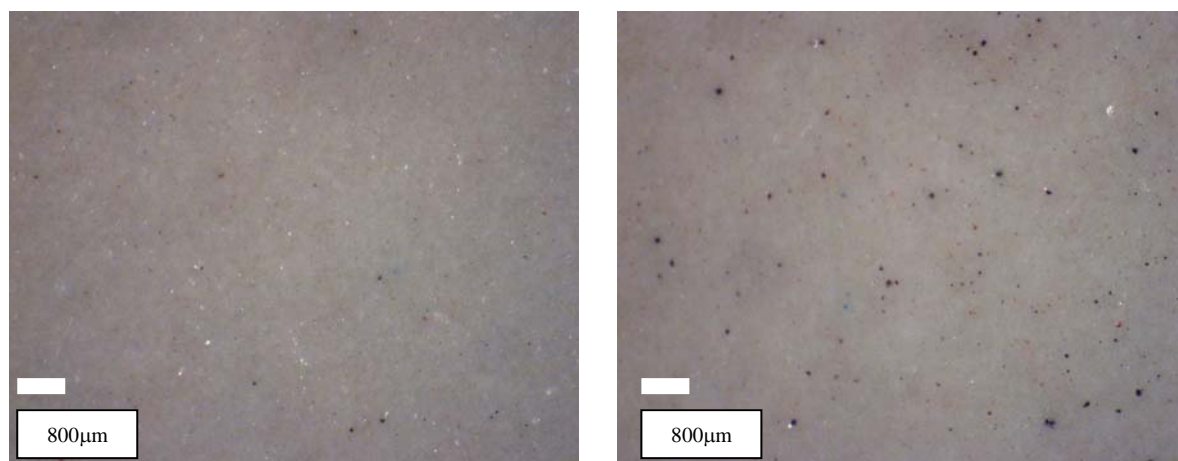


Figura 4.16: amostras do grupo bege sem brilho: original (à esquerda) e desgastada (à direita) após impregnação de óleo mineral e carvão ativado e imersão em HCl a 3% por 24h

4.7.2 Impregnação com azul de metileno

A remoção das manchas oriundas da impregnação com azul de metileno também segue às recomendações da NBR 13818/97. Inicia-se a partir do estágio que contempla escova e abrasivo comercial. Após a limpeza, todas as amostras do grupo bege sem brilho permaneceram com indícios do agente manchante, com exceção da amostra original, cujos resíduos foram totalmente removidos. Certamente, algumas placas desgastadas revelam a impregnação com maior intensidade do que outras. O grupo bege com brilho comportou-se de maneira semelhante, a exceção da placa original, em cuja superfície também permaneceram resíduos do azul de metileno.

Em vista da ineficácia deste método de limpeza, procedeu-se à imersão das amostras em ácido clorídrico a 3% por 24h. Como resultado, apenas três placas do grupo bege sem brilho permaneceram com resíduos superficiais. A análise da tendência ao manchamento irreversível é prejudicada em vista do pequeno número de exemplares que resultaram manchados. Somado a isso, os valores de V_o correspondentes às três amostras manchadas, não permitem associar determinada ordem de grandeza à tendência de manchamento, pois não se limitam a um pequeno intervalo. De qualquer forma, este grupo mostra rebaixamento da classe original de resistência a manchas em consequência do desgaste.

Quanto ao grupo bege com brilho, após imersão em ácido clorídrico a 3% por 24h, resultaram 3,7% das amostras desgastadas ainda com indícios do agente manchante, sendo que a placa original permitiu sua total remoção.

4.7.3 Análise conjunta

A tabela 4.12 mostra o comportamento das placas desgastadas dos grupos bege com brilho e bege sem brilho com relação à limpabilidade para ambos os agentes manchantes de acordo com os resultados descritos nos itens 4.7.1 e 4.7.2.

Tabela 4.12: percentuais das placas cerâmicas desgastadas que permaneceram com resíduos de agente manchante após tentativa de remoção da impregnação

Agente manchante	Procedimento de limpeza	Grupo	
		Bege sem brilho	Bege com brilho
Azul de metileno	escova + abrasivo comercial	100%	100%
	solvente por 24h	11%	3,7%
Óleo mineral + carvão ativado	pano seco	100%	96%
	escova + abrasivo comercial	100%	56%
	solvente por 24h	100%	56%

A tabela 4.13 mostra a eficácia dos procedimentos de limpeza previstos na NBR 13818/97 para a remoção dos agentes manchantes quando aplicados sobre amostras originais dos grupos bege com brilho e bege sem brilho.

Tabela 4.13: possibilidade de remoção total das manchas nas amostras originais através dos diferentes procedimentos de limpeza previstos na NBR 13818/97

Agente manchante	Procedimento de limpeza	Grupo	
		Bege sem brilho	Bege com brilho
Azul de metileno	escova + abrasivo comercial	removida	não removida
	solvente por 24h		removida
Óleo mineral + carvão ativado	pano seco	não removida	removida
	escova + abrasivo comercial	não removida	
	solvente por 24h	não removida	

A amostra original do grupo bege sem brilho permanece manchada com a mistura de óleo mineral e carvão ativado após o mais enérgico procedimento de limpeza previsto no Anexo G da NBR 13818/97. Cabe comparar o comportamento diferenciado da amostra original do grupo bege com brilho, cuja impregnação deste agente manchante foi passível de remoção simplesmente com o uso de um pano seco. Adequando estes resultados à linguagem anteriormente referida, pode-se dizer que esta mistura configura-se como sujeira irremovível para o grupo bege sem brilho e removível para o grupo bege com brilho. Interessante observar que também os valores de V_o associados às placas originais são muito superiores aos limites indicados por Ibáñez a partir dos quais ocorre retenção de sujeira. Para os grupos bege com brilho e bege sem brilho, V_o é igual a $0,466\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$ e $0,587\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$, respectivamente. Portanto, a relação do volume de retenção de óleo com a limpabilidade das superfícies, proposta por Ibáñez, não permite explicar o comportamento diferenciado entre os grupos. Acredita-se que devam existir outros parâmetros, além do volume de retenção de óleo, que permitam caracterizar as superfícies e indicar a tendência das mesmas à impregnação de sujeira.

Com relação às placas desgastadas, é interessante observar que o volume de retenção de óleo do grupo bege com brilho se mantém aproximadamente constante na medida em que evolui o processo de abrasão, como mostram os modelos da figura 4.14, onde os dados experimentais distribuem-se em torno do valor original, resultando em variação igual a zero. Analisando-se todavia, os resultados de V_o para 44% das placas cujas manchas foram removidas com escova e abrasivo comercial, comparativamente aos 56% cujas manchas não foram removidas, percebe-se que existe uma tendência diferenciada. O volume de retenção de óleo médio para o

primeiro grupo é de $0,3018\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$ e para o segundo, $0,469\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$. O primeiro grupo, apesar de V_o inferior ao original, não permite a remoção do agente manchante com pano seco como se conseguiu com a amostra original, o que sugere efetivamente que outros fatores intervêm na limpabilidade. A interferência de outros fatores também pode ser percebida no grupo cujo V_o médio é de $0,469\mu\text{m}^2/\mu\text{m}$. Este, apesar resultar em volume de retenção de óleo pouco superior ao inicial, não permite inclusive a remoção das manchas com solvente.

Ainda que não se tenha encontrado um valor definido para V_o , a partir do qual inicia a tendência à impregnação de sujeira, a mistura de óleo mineral e carvão ativado, pode atuar como um indicativo do comportamento do material. Cabe avaliar se simula adequadamente a tendência ao encardimento registrado em condições reais de utilização ou se é por demais exigente. De qualquer forma, o grupo bege com brilho passa a reter sujeira na medida em que desgasta, enquanto que o grupo bege sem brilho a retém mesmo no seu estado original.

O azul de metileno revela menor poder manchante comparativamente à mistura de óleo mineral e carvão ativado quando aplicado em placas desgastadas. Após limpeza com solvente, permanecem manchadas com azul de metileno 11% e 3,7% das placas dos grupos bege sem brilho e com brilho, respectivamente, e, com a mistura de óleo mineral e carvão ativado, 100% e 56%, respectivamente.

Quando se trata das placas originais, também se verifica menor poder manchante do azul de metileno. Após limpeza com solvente, as amostras impregnadas com este agente, de ambos os grupos, tiveram sua aparência restabelecida. Quando impregnadas com a mistura de óleo mineral e carvão ativado, a amostra bege sem brilho permaneceu manchada.

Considerando-se o estado original, pode-se dizer que o grupo bege com brilho é sensível à impregnação com azul de metileno, enquanto que o grupo bege sem brilho à ação do óleo mineral e carvão ativado. Este aspecto revela a importância de se dispor de diferentes agentes manchantes para analisar o comportamento das superfícies. O tipo de mecanismo através do qual o agente atua pode determinar ou não o manchamento. Portanto, são análises complementares.

4.8 SELEÇÃO DOS MODELOS

A seleção dos modelos que melhor representam o comportamento de placas cerâmicas quando submetidas a condições de abrasão baseia-se no atendimento de duas condições:

- coeficiente de determinação (R^2) > 0,5 e,
- erro relativo (ER) < 25%.

Dentre os 26 modelos apresentados nos itens precedentes, 15 satisfazem ambas as condições, conforme mostra a tabela 4.14.

Tabela 4.14: modelos que descrevem o comportamento das placas cerâmicas ao desgaste e que apresentam $R^2 > 0,5$ e $ER < 25\%$

Grupo	Reflexão especular	Reflexão difusa	Delta E	Ra	Rz	Análise visual	Vo
BS							
BC							
MS							
MC							

Observando-se a tabela 4.14, se percebe que nenhuma das variáveis de resposta é totalmente descartada enquanto propriedade que permite representar o comportamento do material frente à abrasão. Ocorre que algumas são mais adequadas para determinado grupo de cerâmica e outras para outros grupos. Sem dúvida, este fato representa um complicador no estudo dos materiais, pois impede a adoção de indicadores de desempenho padrão, a exceção da análise visual. Esta se constitui na única variável de resposta de ampla utilização.

Cabe lembrar que a análise visual envolve condições padronizadas de observação em uma câmara especialmente projetada para este fim. Ainda, as pessoas selecionadas para o trabalho devem ser avaliadas quanto a sua capacidade visual e devidamente treinadas.

Interessante observar que o método PEI analisa os resultados de ensaio também do ponto de vista visual. Face aos resultados obtidos neste trabalho, este encaminhamento mostra-se adequado. Ocorre que a configuração geométrica de observação adotada neste método não permite visualizar as variações de brilho da superfície, mas basicamente a cor do material. Dessa forma, a alteração da configuração geométrica de observação apresenta-se como uma sugestão para a análise de superfícies submetidas ao desgaste. Cabe lembrar que a observação

a partir da cor não revelou variações importantes, ao passo que a análise envolvendo a configuração do brilho permitiu discernir amplamente as amostras, como exposto no item 4.6.

Em resumo, dentre as variáveis de resposta estudadas neste trabalho, a única que revelou ser um bom indicador da abrasão para todos os grupos de cerâmica consiste na análise visual do brilho. Considera-se que esta variável representa adequadamente as transformações que ocorrem na superfície do material, percebidas visualmente. Nesse sentido, pode-se mencionar os trabalhos de Hiorns e Priese (2003a,b), no qual os pesquisadores concluem que os resultados de brilho mostram boa correlação com a análise visual.

Observando-se a tabela 4.14, justamente os grupos com brilho têm dificuldade em dispor de modelos passíveis de utilização como indicadores do desgaste, além do modelo visual. Isso significa que os dados experimentais a partir dos quais estes modelos foram gerados apresentam grande variabilidade, como já referido. Nesta situação, destaca-se o grupo bege com brilho, onde o único modelo que apresenta parâmetros estatísticos satisfatórios é o relativo à análise visual. Para o grupo marrom com brilho, além deste, apenas a reflexão difusa apresenta resultados que satisfazem as condições previamente definidas.

Os grupos sem brilho permitem com facilidade o estudo da abrasão através de outros indicadores além da classificação visual, conforme mostra a tabela 4.14. Apenas a reflexão difusa não se mostra adequada para o grupo bege sem brilho. Neste caso, a opção sobre qual das propriedades é a mais conveniente para representar o comportamento ao desgaste, pode ocorrer no âmbito da própria indústria ou laboratório envolvido com o estudo.

4.9 CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

O estudo da relação entre as variáveis de resposta inicia pela obtenção das respectivas linhas de tendência. Estas são ajustadas a pontos cujas coordenadas referem-se aos dados experimentais de duas das propriedades em estudo. Da correlação entre os dados, resultam os coeficientes indicados nas tabelas 4.15 a 4.18. Quando estes são maiores do que 0,5 considera-se que há boa correlação.

Tabela 4.15: matriz de correlação referente ao grupo bege sem brilho

Propriedades	Reflexão especular r	Reflexão difusa	Delta E	Ra	Rz	Visual	Limpabilidade	
							Vo	Visual
Reflexão especular	1	0,4	0,2	0,3	0,5	0,5	0,1	0,4
Reflexão difusa		1	0,2	0,2	0,2	0,1	0	0
Delta E			1	0,2	0,5	0,4	0,3	0,3
Ra				1	0,9	0,8	0,3	0,6
Rz					1	0,8	0,2	0,4
Visual						1	0,4	0,8
Vo							1	0,5
Limpabil. visual								1

Tabela 4.16: matriz de correlação referente ao grupo marrom sem brilho

Propriedades	Reflexão especular r	Reflexão difusa	Delta E	Ra	Rz	Visual
Reflexão especular	1	0,9	0,9	0,3	0,3	0,7
Reflexão difusa		1	0,9	0,2	0,2	0,6
Delta E			1	0,3	0,3	0,7
Ra				1	0,9	0,5
Rz					1	0,5
Visual						1

Tabela 4.17: matriz de correlação referente ao grupo bege com brilho

Propriedades	Reflexão especular r	Reflexão difusa	Delta E	Ra	Rz	Visual
Reflexão especular	1	0,1	0	0,2	0,3	0,5
Reflexão difusa		1	0,7	0,4	0	0,4
Delta E			1	0,2	0	0,3
Ra				1	0,1	0,4
Rz					1	0,1
Visual						1

Tabela 4.18: matriz de correlação referente ao grupo marrom com brilho

Propriedades	Reflexão especular r	Reflexão difusa	Delta E	Ra	Rz	Visual
Reflexão especular	1	0,6	0,6	0,1	0,1	0,4
Reflexão difusa		1	0,6	0,1	0,2	0,6
Delta E			1	0,1	0	0,3
Ra				1	0,6	0,1
Rz					1	0
Visual						1

A relação entre algumas das propriedades merece comentários conforme apresentado nos itens seguintes.

4.9.1 Reflexão especular e Classificação visual

Como a classificação visual mostrou ser um bom indicador de desgaste a partir da configuração geométrica que permite visualizar o brilho, é de se esperar que exista correlação entre ambos. Com efeito, para todos os grupos, a relação entre classificação visual e reflexão especular mostra $R^2 > 0,5$, a exceção do grupo marrom com brilho. Este apresenta grande variabilidade nos dados experimentais, como indica o coeficiente de determinação do modelo, de 0,382 e erro relativo de 71,6%, o que impede resposta adequada nesta análise. A figura 4.17 exemplifica para o grupo marrom sem brilho a correlação entre a reflexão especular e classificação visual.

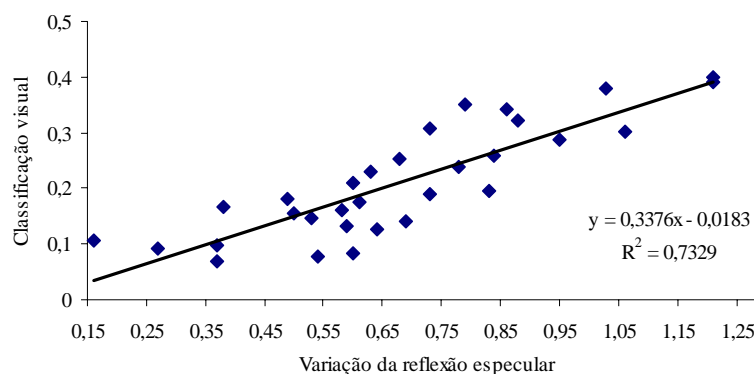


Figura 4.17: correlação entre classificação visual e reflexão especular para o grupo marrom sem brilho após desgaste das amostras

4.9.2 Rugosidade média e Reflexão especular

Conforme exposto na revisão bibliográfica, os trabalhos que estudam a variação do brilho de superfícies esmaltadas costumam justificá-la em função da variação de rugosidade sofrida pelo material como efeito da abrasão. No presente estudo, todavia, não se encontrou boa correlação entre estas propriedades para qualquer dos grupos em análise.

Cabe distinguir dois aspectos: a rugosidade de uma superfície pode ser representada através de vários parâmetros e não necessariamente a rugosidade média seja o mais adequado, apesar de a maioria dos trabalhos se referirem a este. Ainda, quando se deseja avaliar as alterações decorrentes de um processo abrasivo, convém que esta seja acompanhada de um outro

parâmetro. A rugosidade média R_z , entretanto também não indica a relação esperada. Somente o grupo bege sem brilho mostra $R^2 > 0,5$, mesmo por que somente este e o grupo marrom sem brilho apresentam modelos cujos coeficientes de determinação são superiores a 0,5 e os erros relativos, inferiores a 25%. Portanto, resta verificar se outros parâmetros extraídos do perfil de rugosidade mantêm relação com a variação de brilho.

Por outro lado, é necessário avaliar a partir de qual magnitude a variação de rugosidade atua sobre a perda ou ganho de brilho. A rugosidade original das placas em estudo, apresentadas na tabela 4.19, é muito superior à altura das irregularidades superficiais a partir das quais a reflexão especular máxima deixa de ser alcançada. Conforme o critério de Rayleigh, expresso na equação 2.10 da revisão bibliográfica, considera-se lisas as superfícies com irregularidades de até $0,175\mu\text{m}$ (valor obtido para o maior comprimento de onda do espectro visível). Este critério não informa, todavia, sobre a faixa dimensional que pode influenciar o brilho.

Tabela 4.19: valores médios da rugosidade média R_a e R_z das placas cerâmicas originais

Grupo	R_a (μm)	R_z (μm)
MC	0,7	2,4
BC	1,0	3,3
MS	1,8	9,2
BS	1,8	8,6

Com este enfoque, Hiorns e Priese (2003a) colocam que a rugosidade que afeta o comportamento óptico de uma superfície tem dimensão bem menor do que a magnitude correspondente aos comprimentos de onda do espectro visível, portanto, $\ll 0,7\mu\text{m}$, considerando-se o maior deles. Também afirmam que a rugosidade macroscópica que causa efeito do tipo “casca de laranja”, não causa mudanças importantes nas medidas de brilho, embora certamente afetem o aspecto do vidro. Contemplando ambas as indicações, a rugosidade capaz de modificar o brilho de uma superfície situa-se entre $0,175\mu\text{m}$ e $\ll 0,7\mu\text{m}$, sendo este último valor não bem definido.

Todos os grupos estudados mostram valores originais de rugosidade R_a superiores aos limites sugeridos, os quais são alterados em decorrência do processo abrasivo. Considerando-se a redução de rugosidade para a condição média de ensaio, representada pela concentração de abrasivo de 15%, carga de 15N e tempo de 60min, a rugosidade R_a média dos grupos marrom

com brilho, bege com brilho, marrom sem brilho e bege sem brilho resulta em $0,51\mu\text{m}$; $0,9\mu\text{m}$, $1,08\mu\text{m}$ e $1,27\mu\text{m}$, respectivamente. A exceção do primeiro grupo, todos os demais apresentam ordem de grandeza ainda superiores às indicadas anteriormente. Já o grupo marrom com brilho, apesar de mostrar rugosidade compatível com o limite sugerido, revela redução de brilho quando desgastado, contrariamente ao esperado quando há diminuição da rugosidade. Há de se ter em mente que o brilho também recebe influência das alterações que ocorrem no caminho óptico percorrido pela luz incidente, provocadas por variações na porosidade. Se a densidade de poros superficiais, revelados em decorrência do desgaste, for superior à densidade original, poderá resultar em diminuição do brilho, pois nestes ocorre o espalhamento da luz. Ainda, conforme Hiorns e Prieese (2003b), quanto menor o diâmetro destes poros, maior o espalhamento e assim, menor o brilho.

Cabe lembrar que para o grupo marrom com brilho, tanto o modelo que descreve o comportamento da reflexão especular, quanto o de R_a , apresentam coeficiente de determinação inferior a 0,5, ou seja, os dados experimentais associados à medição destas propriedades possuem grande variabilidade.

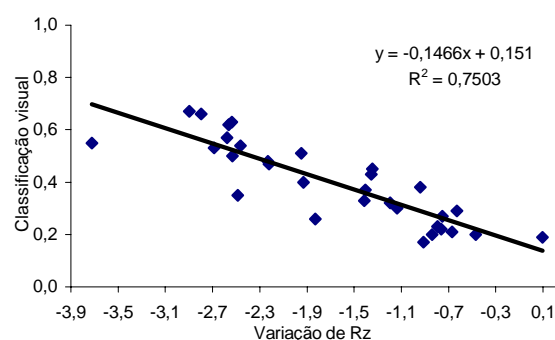
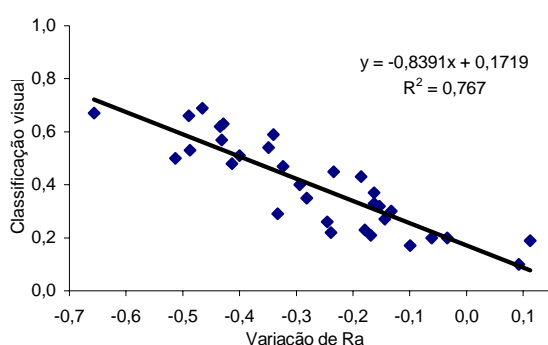
4.9.3 Rugosidade média e Classificação visual

Nas tabelas 4.15 e 4.16, pode-se verificar que os dois grupos sem brilho mostram boa correlação entre as rugosidades médias e a classificação visual. A cor bege responde com coeficiente de correlação igual a 0,8 e a cor marrom, a 0,5, tanto para R_a quanto para R_z . Estes grupos correspondem àqueles de menor desgaste visual, conforme a figura 4.13 e às maiores rugosidades médias originais, conforme as figuras 4.9 e 4.11. Cabe observar que as placas desgastadas destes grupos, ainda que sujeitas a reduções mais acentuadas de rugosidade, resultam em valores de R_a superiores aos grupos com brilho considerando-se as mesmas condições de ensaio.

A figura 4.18 apresenta as linhas de tendência para R_a e R_z , respectivamente, para os grupos bege sem brilho e marrom sem brilho. Cabe lembrar que a classificação visual não tem como parâmetro de análise a rugosidade, mas o brilho das amostras. Conforme esta figura, as placas desgastadas de menor rugosidade mostram maior variação de aspecto. Como a variação do aspecto está relacionada ao brilho e, como nos grupos sem brilho, o desgaste manifesta-se

através de um incremento neste aspecto, pode-se dizer que as placas que obtiveram maior perda de rugosidade, sofreram maior aumento do brilho comparativamente ao brilho original, a partir de observações visuais. Estas relações são interessantes porque estão em sintonia com a tendência esperada, registrada na revisão bibliográfica, de que uma diminuição na rugosidade gera um aumento na reflexão especular. Este comportamento, todavia, não foi encontrado comparando-se os resultados experimentais da reflexão especular, mas sim a percepção desta.

a) Grupo Bege sem Brilho



b) Grupo Marrom sem Brilho

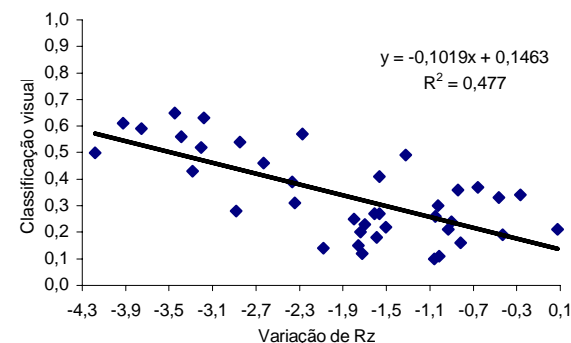
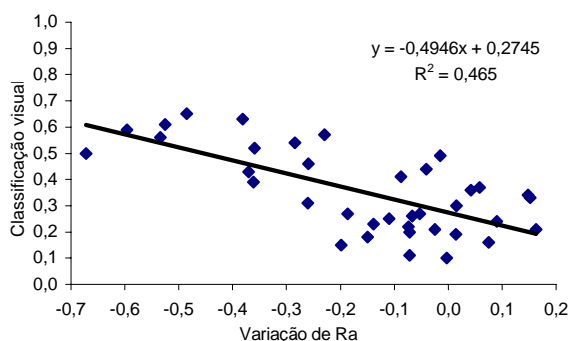


Figura 4.18: correlação entre classificação visual e Ra e classificação visual e Rz para as placas cerâmicas dos grupos bege sem brilho e marrom sem brilho

De qualquer maneira, não é possível afirmar que placas menos rugosas tendem a revelar o desgaste de forma mais acentuada que placas de maior rugosidade. O alinhamento encontrado entre os resultados poderá ser uma coincidência e a maior ou menor percepção do desgaste estar relacionada unicamente à cor e brilho originais da placa cerâmica. A possibilidade de envolver também a rugosidade original haveria de ser testada utilizando-se placas de diferentes rugosidades original, mas mesma cor e brilho.

4.9.4 Limpabilidade e Rugosidade média Ra

A correlação entre limpabilidade, representada pela classificação visual das superfícies após tentativa de remoção das manchas com pano seco, e a rugosidade média Ra é mostrada na figura 4.19. Nesta, a rugosidade não é representada pelas diferenças em relação ao estado original, mas pelos valores médios reais das amostras.

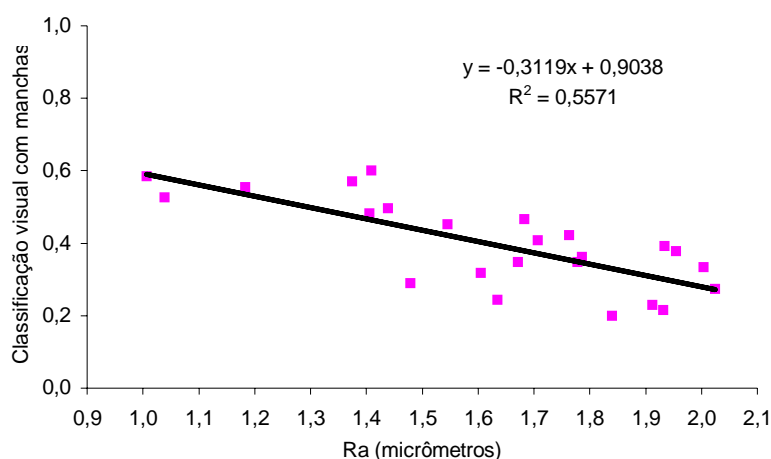


Figura 4.19: correlação entre classificação visual relativa às manchas e rugosidade média Ra para as placas do grupo bege sem brilho após submetidas ao ensaio de desgaste

Conforme indica a figura 4.19, o coeficiente de correlação de 0,6 permite concluir que na medida em que a rugosidade Ra aumenta, diminui a percepção da impregnação de sujeira na superfície das placas. Dessa forma, pode-se esperar que a tendência da superfície em manchar diminua com o aumento de Ra. Interessante observar que Ibáñez (1998) menciona não ter encontrado relação entre Ra e V_o , informação esta confirmada pelo coeficiente de correlação de 0,3 obtido neste trabalho. Ocorre que, ao comparar não o parâmetro V_o , mas sim a percepção das manchas com Ra, então se obtém a relação esperada. Significa que o encardimento em si não está univocamente relacionado à V_o , mas à Ra e a outros parâmetros não contemplados no estudo, dentre os quais, possivelmente, a porosidade.

De acordo com a linha de tendência, somente amostras com rugosidade superior a $2,9\mu\text{m}$ não deverão revelar encardimento para o grupo bege sem brilho. Esta hipótese sugere que a partir de determinada magnitude, a rugosidade não mais retém sujeira, mas permite que a mesma seja totalmente removida. Cabe ressaltar que estas tendências eventualmente podem não

ocorrer na prática, tendo em vista a intervenção de outros fatores no comportamento do material, que não foram aqui considerados.

Interessante observar que o comportamento relatado não ocorre com o grupo bege com brilho, para o qual o coeficiente de correlação entre classificação visual e Ra resulta em 0,0051. A rugosidade média deste grupo é, aproximadamente, a metade do grupo bege sem brilho.

Verificou-se também a relação entre a rugosidade média Rz e a classificação visual. Como resultado, obteve-se o coeficiente de correlação de 0,429, o qual indica não haver suficiente confiança em estabelecer uma tendência de comportamento entre ambas.

5 ESTUDO DE CASO

Partindo-se do princípio que o desempenho do material em condições reais de utilização pode ser estimado através do desempenho em laboratório, busca-se, através do estudo de caso, determinar o fator de aceleração que permite relacionar os resultados de uma para outra situação. Vale observar que o fator de aceleração é um parâmetro que depende do material e tecnologia empregada na fabricação do produto.

Como premissa básica, deve haver correspondência entre o mecanismo de desgaste observado no estudo do tráfego de pessoas (condições reais de utilização) e aquele observado expondo o material ao equipamento (condição gerada no laboratório). Esta correspondência é avaliada a partir dos próprios resultados medidos em campo e em laboratório.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo de caso desenvolve-se 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. As placas cerâmicas visualmente desgastadas encontravam-se dispostas no acesso externo, em duas das três portas destinadas à entrada de clientes: na porta principal e em uma das portas laterais, conforme representado nas figuras 5.1 e 5.2. As placas apresentam dimensões $295 \times 295 \text{mm}^2$ e são declaradas pelo fabricante como PEI V na cor areia.

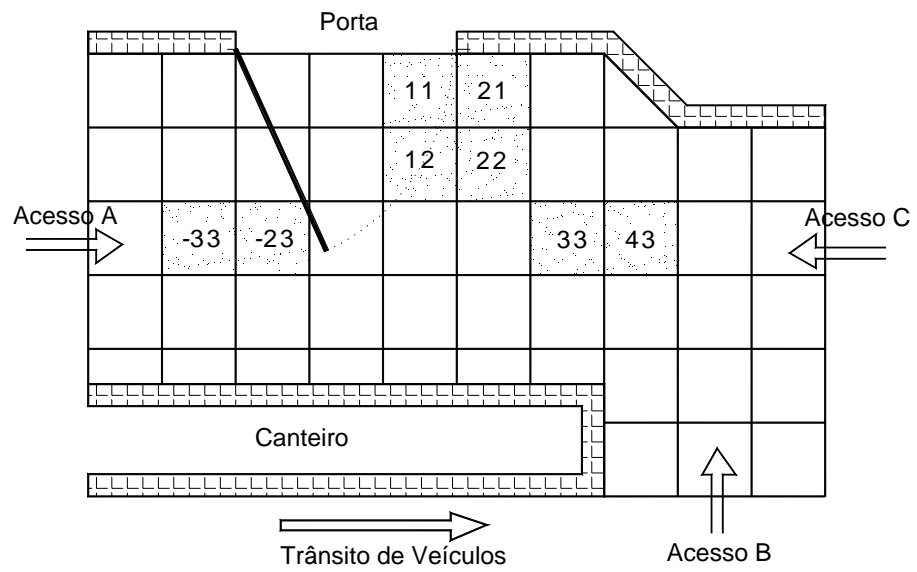


Figura 5.1: situação das placas cerâmicas junto à porta principal, no acesso externo da lanchonete objeto do estudo de caso

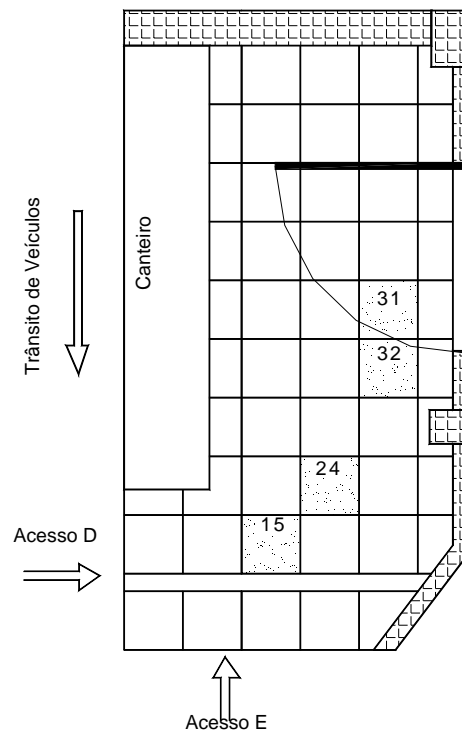


Figura 5.2: situação das placas cerâmicas junto à porta secundária, no acesso externo da lanchonete objeto do estudo de caso

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 5.1 pelas coordenadas 11, 12, 21 e 22 para a porta principal e, na figura 5.2, pelas coordenadas 31 e 32 para a porta secundária;
- relacionado ao trânsito livre, cujo desgaste é avaliado através das placas identificadas na figura 5.1 pelas coordenadas -33, -23, 33 e 43 para a porta principal e, na figura 5.2, pelas coordenadas 24 e 15 para a porta secundária.

A disposição da porta principal permite que o acesso de clientes ocorra a partir de três direções distintas: pela esquerda, pela direita ou ainda, pela frente, atravessando a via de trânsito de veículos. A porta secundária permite apenas duas direções já que, após a mesma, há uma parede divisória. De qualquer forma, ambos os acessos a esta porta: D e E, tendem a assumir a mesma trajetória, pois um canteiro com plantas não permite que o trânsito frontal se dê exatamente na perpendicular à porta.

5.2 METODOLOGIA

O material cerâmico que compõe o estudo de caso foi avaliado, tanto em campo quanto em laboratório, através das seguintes variáveis de resposta: reflexão especular, reflexão difusa, delta E, rugosidade média Ra e classificação visual. O estudo baseia-se nas diferenças entre os estados desgastado e original.

Dada a portabilidade do espectrofotômetro e do rugosímetro, descritos no capítulo 3, utilizou-se os mesmos equipamentos e os mesmos procedimentos de medição no desenvolvimento do estudo de caso, tanto em campo quanto em laboratório. Para a medição da rugosidade adotou-se o *cut off* de 2,5mm tendo em vista que a medição inicial, com o *cut off* de 0,8mm, registrou valores em torno de 4 e 6 μ m. O *cut off* de trabalho é selecionado em função das recomendações do fabricante a partir desta análise inicial.

A classificação visual procura avaliar o brilho das superfícies. Para tanto, utilizou-se da lâmpada de bancada definida no capítulo 3, posicionada a 65cm do centro de cada placa, fazendo ângulo de 60° com a vertical. Como esta análise é feita em campo, com as placas assentadas, percebe-se certa dificuldade em ignorar a aparência global das placas, que revela forte desgaste. As amostras desgastadas em laboratório foram avaliadas na câmara de observação, tal como descrito no capítulo 3. Os limites procuram descrever condições bem definidas do material, onde 0 representa o estado original e 1 a remoção total do esmalte. Aos níveis intermediários, procurou-se atribuir alguns valores que pudessem balizar de forma mais precisa 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.

As medições em campo foram realizadas em dois momentos: em dezembro de 2000 para as placas 11, 12, 21 e 22 e, em novembro de 2002 para as demais. Anteriormente às medições, as placas foram devidamente 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.

Para simular o desgaste em laboratório, utilizou-se o equipamento descrito no capítulo 3, o mesmo material abrasivo e demais procedimentos associados ao ensaio. Os testemunhos foram extraídos de uma placa original, resultando em largura de $40,5 \pm 0,5$ mm e altura de $55,0 \pm 0,5$ mm, sendo que os 20mm mais externos de cada lado da placa foram desprezados. Como condições de ensaio, adotou-se a carga de 25N, concentração do abrasivo de 15% e os tempos de 4, 14, 45, 90, 145 e 356min.

A definição da amostragem para a medição das variáveis de resposta em campo baseou-se nos critérios da ASTM D 523, na qual uma placa 30×30 cm² deve ter suas propriedades quantificadas em, no mínimo, 8 regiões, cada uma das quais com três leituras. Dessa forma, são necessárias 24 medidas de brilho. No presente estudo, optou-se por efetuar a medição em 25 pontos equidistantes, localizados no centro das áreas resultantes da subdivisão da superfície em 5 linhas (1, 2, 3, 4, 5) e 5 colunas (A, B, C, D, E), conforme a figura 5.3.

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 5.3: subdivisão das placas cerâmicas em 25 regiões para avaliação do desgaste em campo

O estado original considerado na análise de campo é representado pela média das 25 medições feitas em uma placa cerâmica sem uso. O estado original considerado na análise das amostras ensaiadas em laboratório consiste na medição das próprias amostras, no mesmo local cujas medições são feitas após o ensaio.

5.3 IDENTIFICAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS

Para a análise do desgaste, é necessário definir valores de brilho, cor, reflectância, rugosidade e aspecto visual associados às diferentes condições de tráfego. Considera-se que variáveis de resposta não devem ser associadas às placas cerâmicas como um todo, mas sim a regiões de semelhante deterioração, pois as pessoas poderão transitar apenas sobre parte de uma

determinada placa, de acordo com a rota adotada. Se a análise fosse realizada por placa, o tráfego sobre algumas regiões estaria sendo minimizado e, em outras, maximizado.

Este encaminhamento baseia-se no estado de deterioração percebido visualmente. No conjunto formado pelas quatro placas mais desgastadas, junto à porta principal, identificam-se claramente regiões de desgaste diferenciado. Somente no canto superior direito da placa 21 é possível reconhecer a placa original, pois revela aspecto semelhante a este, o que não ocorre em nenhuma outra posição deste conjunto.

Em vista disso, buscou-se identificar as rotas preferenciais que as pessoas tendem a assumir para cada um dos acessos mostrados nas figuras 5.1 e 5.2. Esta etapa do trabalho é fundamental na medida em que virá a definir o percentual do tráfego global que cabe a cada trajetória, sendo este o responsável pelo desgaste particular daquela região.

Inicialmente, por observação, procurou-se identificar quantas trajetórias as pessoas tendem a assumir para cada acesso e quais porções das placas formam estes caminhos. Efetivamente, os passos das pessoas não ocupam exatamente a totalidade de cada placa, mas porções bem definidas das mesmas. Dessa forma, a definição das trajetórias é anterior à contagem de tráfego. As delimitações relativas à porta principal são mostradas na figura 5.4.

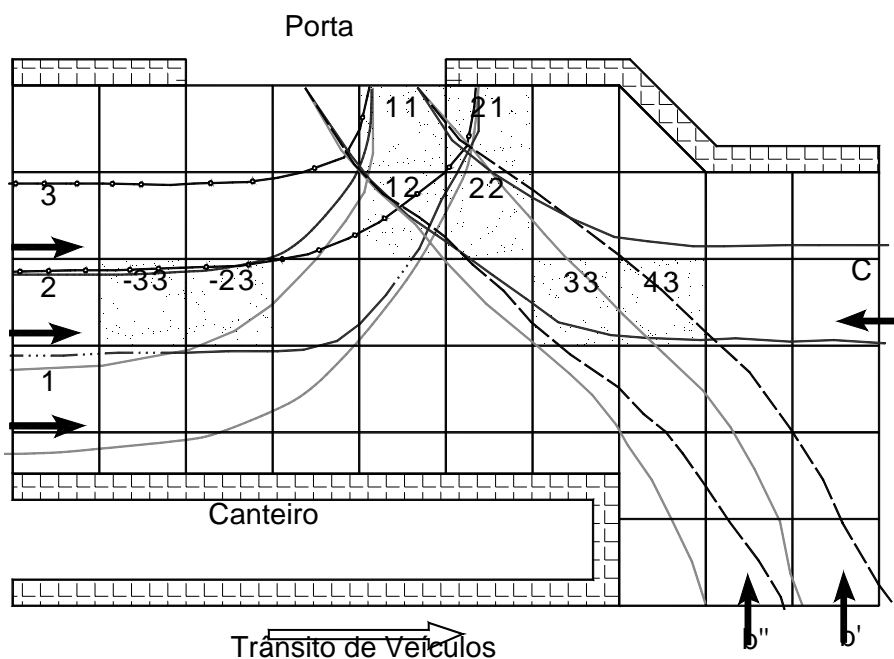


Figura 5.4: trajetórias preferenciais que levam à porta principal da lanchonete, cujas placas cerâmicas são objeto deste estudo de caso

Para a porta principal, as pessoas vindas do acesso A tendem a assumir 3 rotas diferentes, denominadas 1, 2 e 3. A placa -33 recebe, em sua maior parte, o tráfego da rota 2 e, a placa -23, além deste, a sobreposição com tráfego relativo à rota 1 no canto inferior direito. A placa posicionada à direita da placa -23 não foi estudada tendo em vista que se observaram freqüentes movimentos de recuo das pessoas que chegam através deste acesso, a fim de permitir que as pessoas no interior do estabelecimento abram a porta e saiam.

O acesso frontal tende a caracterizar duas trajetórias, denominadas b' e b''. Ambas incidem sobre a maior parte da placa 33 enquanto que somente a rota b'' permanece sobre o canto superior da placa 33 e o centro da placa 43. Esta placa recebe em seu canto superior direito apenas o tráfego do acesso C. Interessante observar que o acesso C configura uma situação bastante regular. Praticamente a totalidade das pessoas vindas desta direção descreve a mesma trajetória.

Posteriormente, associou-se graficamente as trajetórias aos 25 segmentos que formam cada placa em estudo. Como resultado, se obtém as configurações representadas nas figuras 5.5 e 5.6, respectivamente, para as situações de frenagem e livre movimento, relativas à porta principal.

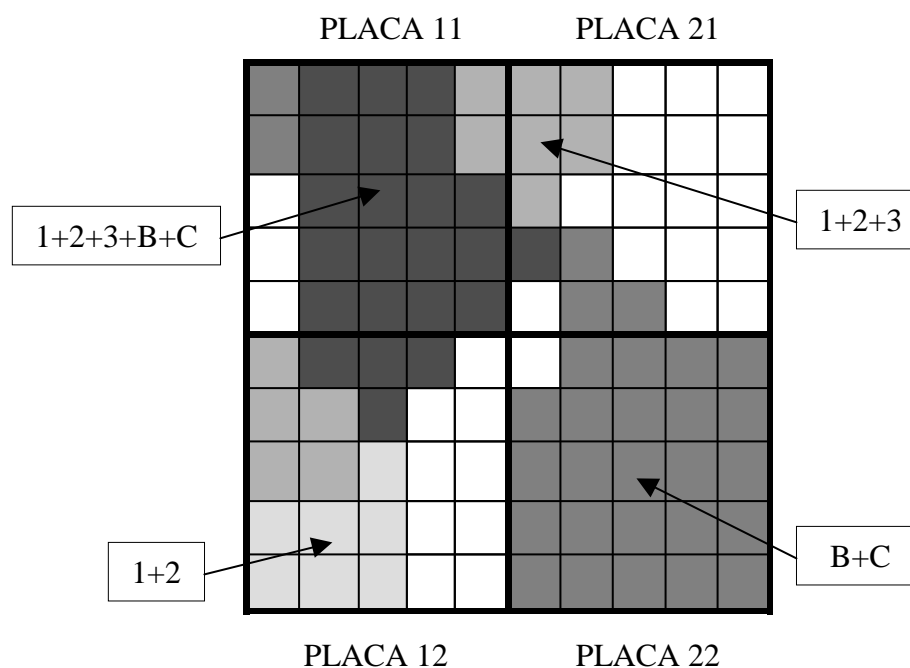


Figura 5.5: segmentos das placas cerâmicas sujeitas à frenagem associados às trajetórias de acesso à porta principal da lanchonete

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. Quando há sobreposição dos tráfegos de b' e b'' , este é denominado B.

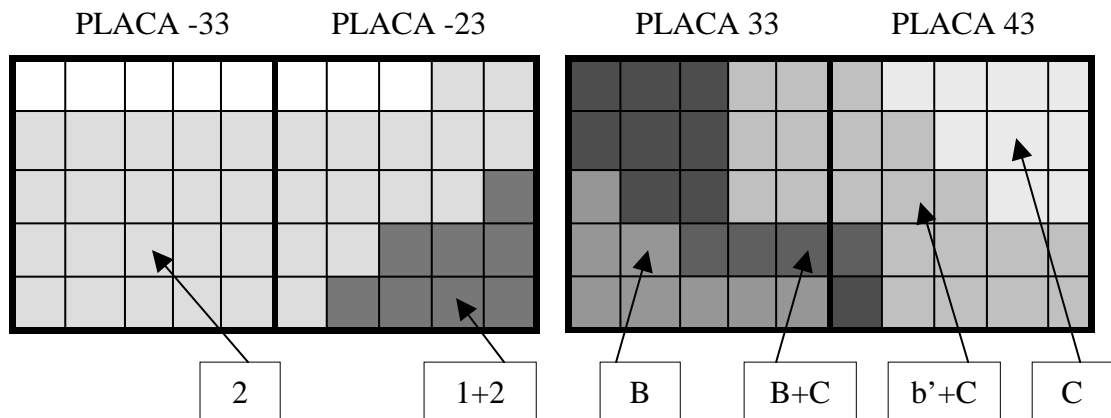


Figura 5.6: segmentos das placas cerâmicas sujeitas ao livre movimento junto à porta principal, associados às trajetórias do acesso A (à esquerda) e acessos B e C (à direita) da lanchonete

A figura 5.7 mostra as configurações, respectivamente, para as situações de frenagem e livre movimento relativas à porta secundária e, a figura 5.8, os segmentos associados a cada trajetória.

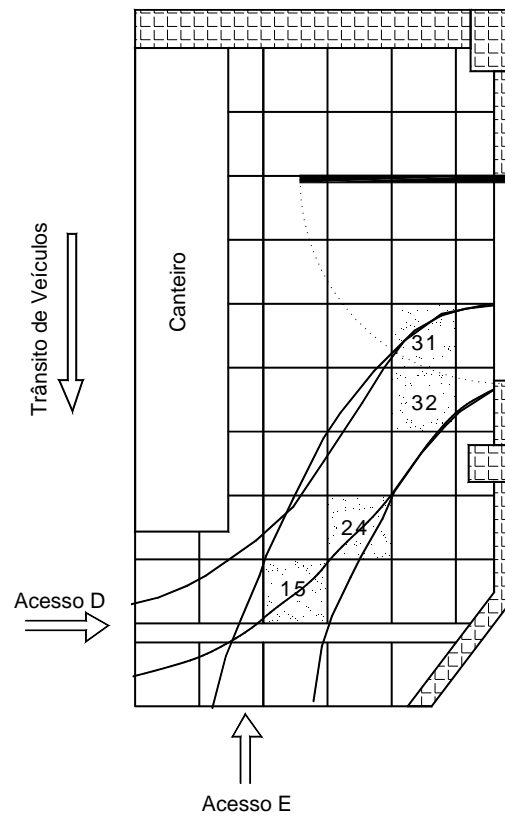


Figura 5.7: trajetórias preferenciais que levam à porta secundária da lançonete

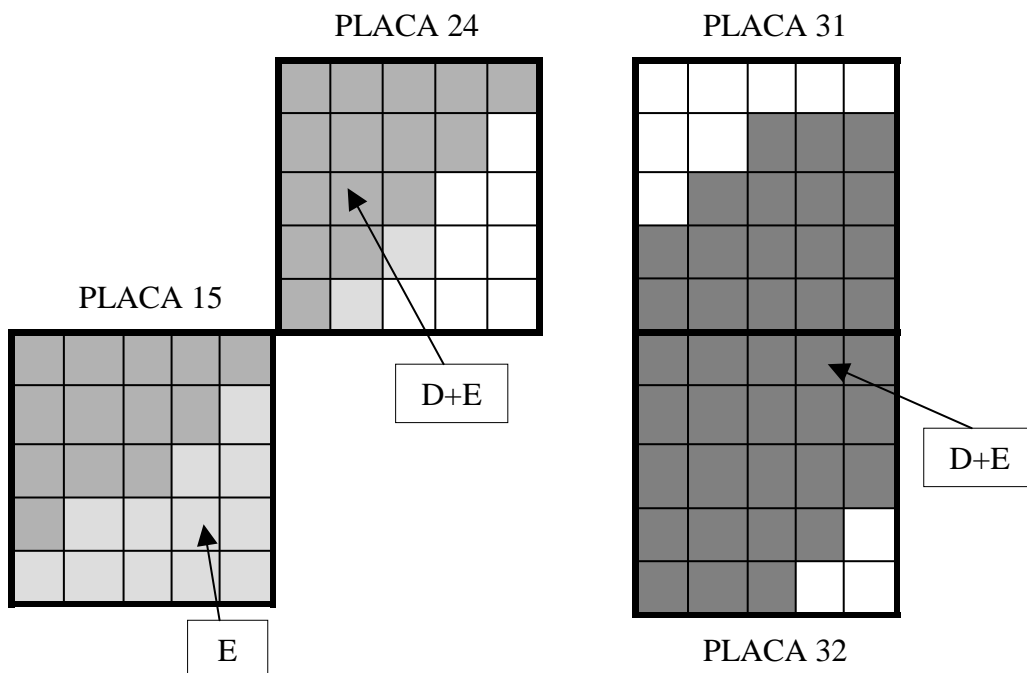


Figura 5.8: segmentos das placas cerâmicas sujeitas ao livre movimento (à esquerda) e à frenagem (à direita) da porta secundária, associados às trajetórias dos acessos D e E da lançonete

O número de pontos de medição que compõem cada trajetória é apresentado na tabela 5.1, respectivamente, para frenagem e livre movimento. O efeito de frenagem conta com 5 coordenadas para a análise do fenômeno e o efeito de livre movimento, 8 coordenadas.

Tabela 5.1: número de segmentos que compõem as trajetórias junto aos acessos à lanchonete para movimento livre (à esquerda) e frenagem (à direita)

Movimento livre		Frenagem	
Trajectoria	Número de pontos	Trajectoria	Número de pontos
E	14	D+E	39
D+E	28	1+2	7
C	9	1+2+3	7
b'+C	20	B+C	27
2	34	1+2+3+B+C	23
B	8		
1+2	8		
B+C	13		

5.4 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. Claro que as pessoas transitam ao longo do tempo, porém esta é uma informação de projeto, na medida em que o especificador, de posse do número estimado de pessoas que virá a transitar sobre o piso em função de alguma variável temporal, como dia, mês ou ano, poderá estimar por quanto tempo o revestimento apresentará desempenho satisfatório. Dessa forma, a variável "número de pessoas" parece mais adequada para representar a progressão do fenômeno.

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, a 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.

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

- separação dos percentuais correspondentes às portas secundária e frontal, 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 16h às 20h.

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 e do número de clientes que passou pela porta principal até os anos de 2000 e 2002, calculou-se os dados apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: tráfego estimado correspondente à porta principal de acesso à lanchonete

DADOS	PORTA PRINCIPAL												
	ACESSO A						ACESSO B		ACESSO C		TOTAL clientes	TOTAL funcion.	TOTAL PESSOAS
	ROTA 1		ROTA 2		ROTA 3		Clientes	Funcion.	Clientes	Funcion.			
	Clientes	Funcion.	Clientes	Funcion.	Clientes	Funcion.							
total (pess/h)	34,80	9,76	44,15	11,65	12,07	1,33	72,45	9,26	21,16	18,27	184,62	50,27	
total (%)	18,85	5,28	23,91	6,31	6,54	0,72	39,24	5,01	11,46	9,90	100,00	27,23	
peessoas até 2000	3.088.737	866.054	3.918.693	1.034.412	1.071.397	118.354	6.431.047	821.671	1.878.274	1.621.742	16.388.148	4.462.232	20.850.380
peessoas até 2002	4.138.333	1.160.351	5.250.319	1.385.919	1.435.473	158.572	8.616.407	1.100.886	2.516.538	2.172.833	21.957.070	5.978.561	27.935.631

O tráfego associado às trajetórias é obtido agrupando-se os dados apresentados na tabela 5.2, conforme mostram as tabelas 5.3 e 5.4 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.

Tabela 5.3: tráfego estimado correspondente às trajetórias de frenagem relativas à porta principal de acesso à lanchonete

DADOS	trajetórias de frenagem			
	ROTA 1+2	ROTA 1+2+3	B+C	1+2+3+C+B
peessoas até 2000	7.957.662	9.088.237	9.531.028	18.619.264

Tabela 5.4: tráfego estimado correspondente às trajetórias de livre movimento relativas à porta principal de acesso à lanchonete

DADOS	trajetórias de movimento livre					
	ROTA 2	ROTA 1+2	B	C	B+C	B+C
peçoas até 2002	6.636.239	11.934.922	9.717.293	4.689.371	14.406.664	6.632.829

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 5.5 contém o tráfego para a porta secundária com a inclusão dos funcionários e a tabela 5.6, o tráfego associado às trajetórias.

Tabela 5.5: tráfego estimado correspondente à porta secundária de acesso à lanchonete

DADOS	PORTA SECUNDÁRIA			TOTAL
	Clientes	Func. Entrega lanches	Func. Limpeza e segurança	
total (pes/h)	24,55	não computado	24,33	
total (%)	10,95	78,15	10,90	100
peçoas até 2002	410.180	2.927.609	408.528	3.746.317

Tabela 5.6: tráfego estimado correspondente às trajetórias da portas secundária de acesso à lanchonete

DADOS	Trajetórias fren. e livre mov	
	ROTA E	ROTA D+E
peçoas até 2002	3.213.579	3.746.317

5.5 CÁLCULO DAS CARGAS

Para o cálculo das cargas, consideram-se os perfis relativos ao sexo e a idade dos funcionários e clientes, fornecidos pela empresa, calculados a partir de dados históricos. Com relação aos clientes, a tabela 5.7 mostra a distribuição etária, sendo que a proporção entre homens e mulheres é, respectivamente, de 42 e 58%. Com relação aos funcionários, cuja faixa etária situa-se entre 18 e 25 anos, a proporção entre homens e mulheres é de 50% para cada.

Tabela 5.7: distribuição de clientes da lanchonete em relação à idade

Idade (anos)	Clientes (%)
< 14	5,2
14 a 19	16,6
20 a 24	34,0
25 a 34	23,8
35 a 49	18,5
50 a 59	1,6
60 ou mais	0,3

Os pesos dos homens e das mulheres, para as diferentes faixas etárias, foram extraídos das tabelas de Panero e Zelnik (2001). Todavia, estas não contemplam os adolescentes entre 12 e 17 anos e as crianças menores de 6 anos, de forma que se estimou os pesos faltantes de acordo com a tendência dos dados existentes, por extrapolação. Ainda, as tabelas de Panero e Zelnik (2001) apresentam as pessoas agrupadas em faixas etárias diferentes daquelas fornecidas pela empresa. Portanto, desmembrou-se os dados da tabela 5.7 e trabalhou-se com as idades em separado. Entretanto, ocorre que os percentuais indicados nesta tabela, entre faixas contíguas, não devem mudar abruptamente na situação real. Assim, foram calculados valores de transição para os pares que formam os limites de faixas contíguas, equivalentes à metade da soma dos valores originais. A figura 5.9 mostra o histograma resultante, o qual representa a distribuição dos clientes em relação às idades. Observa-se que o pico ocorre para as idades de 20 a 24 anos.

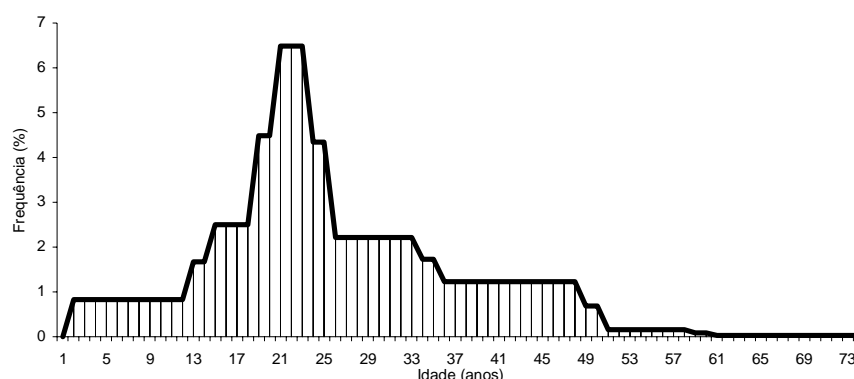


Figura 5.9: distribuição de freqüências dos clientes da lanchonete em relação às idades

Os pesos ponderados da população que compõe o ambiente de estudo, considerando-se a proporção de clientes por faixa etária e o peso das pessoas para cada idade, são apresentados na tabela 5.8 para os percentis 10, 30, 50, 70 e 90. O cálculo foi feito separadamente conforme o sexo, pois diferem em peso e no percentual com que participam sobre a população total. Ao final, os dados são agrupados de forma a compor um índice único para cada percentil.

Tabela 5.8: peso ponderado da população que freqüenta o estabelecimento (Kg)

Idade (anos)	Percentil				
	10	30	50	70	90
6 a 79	50,05	56,38	61,03	66,54	76,89

Cabe observar que a carga associada ao desgaste do revestimento em campo não corresponde à carga média da população que freqüenta o estabelecimento. Esta diferenciação é importante na medida em que o esforço causado por uma pessoa de maior peso não é linear ao esforço de uma pessoa de menor peso. Exemplificadamente, uma pessoa de 100Kg provoca desgaste superior ao provocado por duas pessoas de 50Kg. Portanto, caracterizar a carga associada ao desgaste registrado em campo implica em definir uma carga equivalente, a qual não está relacionada à distribuição da população, mas ao desgaste provocado por ela.

As tabelas de Panero e Zelnik (2001) abrangem percentis de 1 a 99. A seleção de um percentil significa que aquele percentual da população apresenta menor peso do que o indicado pelo

valor numérico associado ao percentil. Por exemplo, adotar o percentil 70 significa que 70% dos clientes apresentam peso menor do que o indicado na tabela. A adoção do percentil 50 indica que 50% dos clientes apresentam peso superior a este e 50% inferior. No caso de dois ambientes com a mesma média, aquele cujas pessoas apresentam maior dispersão deverá apresentar maior desgaste. De qualquer forma, quando não se conhece a qual percentil da população determinado público pertence, a carga associada ao percentil 50 constitui-se em um indicativo do nível de agressividade. Poder-se-ia apropriar a importância deste aspecto e prever o comportamento da placa cerâmica caso o público real estivesse distribuído em um percentil superior ao 50, conhecendo-se o efeito da carga sobre o desgaste.

Em resumo, o desgaste que foi observado em campo não deve corresponder à carga associada ao percentil 50 e, se fosse tentado reproduzi-lo em outra situação, com o mesmo número de pessoas, todas com a mesma carga, de valor igual à associada ao percentil 50, obteríamos, provavelmente, desgaste inferior ao registrado no estudo de caso. Esta simulação somente alcançaria o mesmo resultado se fosse utilizada a carga equivalente.

5.6 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL INTERMEDIÁRIO

Presume-se que o material intermediário presente sobre os pisos seja constituído essencialmente de uma mistura de terra vegetal, oriunda de canteiros e áreas não ocupadas; de areia de construção, proveniente de obras e do transporte da mesma; e ainda, do solo existente nas vias sem revestimento e nos terrenos não ocupados com edificações, ou que aflora através de calçadas abertas. A proporção entre estes constituintes é, provavelmente, variável conforme as condições particulares de cada região: se no centro da cidade, se próximo de construções, se próximo a praças e parques, se em bairros de menor infra-estrutura viária. Em se tratando especificamente de um local de assentamento do piso, o material encontrado sobre o mesmo vai estar associado ainda à proximidade da rua.

Os fatores mencionados caracterizam as condições de entorno de um revestimento e representam diferentes níveis de agressividade. O potencial de agressividade relativo ao material abrasivo é definido por sua morfologia, densidade, dureza, granulometria e concentração.

A fim de caracterizar o material presente no estudo de caso, realizaram-se três coletas de campo, em dias secos e precedidos por, pelo menos, três dias sem chuva. A remoção do material consiste em varrer lentamente o piso com uma vassoura de cerdas macias de pequeno tamanho. Dessa forma, a operação é realizada em pequenas porções, o que auxilia no recolhimento das frações granulométricas mais finas.

Visualmente, o material contém uma fração significativa de matéria orgânica, na forma de folhas, gravetos, restos de alimento, insetos, entre outros, além de resíduos de borracha provavelmente dos pneus dos carros que trafegam na via de acesso ao *drive-thru*. A remoção destes por calcinação foi descartada, pois as cinzas acabariam por distorcer os resultados da composição mineralógica. Optou-se por retirar os materiais orgânicos por flutuação. A utilização de água não se mostrou efetiva, pois se observou visualmente que as partículas mais finas tendem a aglutinar pequenas partículas de quartzo e suspendê-las conjuntamente. Com vistas a obter um meio com densidade superior à água e com menor tensão superficial, adotou-se uma solução composta de 35% de bromofórmio, cuja densidade é $2,89\text{g/cm}^3$, e 65% de hexano, cuja densidade é $0,7\text{g/cm}^3$. A densidade resultante é de $1,47\text{g/cm}^3$. A presença de resíduos de borracha não preocupa na medida em que não atua como agente abrasivo e não afeta a identificação dos minerais que podem atuar neste sentido. Após remoção do material orgânico e secagem, determinou-se a composição granulométrica e mineralógica.

5.6.1 Distribuição granulométrica

A composição granulométrica relativa às três coletas do material presente sobre o piso consta na tabela 5.9, juntamente com os respectivos valores médios. Considerando-se a classificação de solos proposta pela NBR 6502/95, conforme tabela 5.10, pode-se defini-lo como uma areia de granulometria grossa/média, pois, aproximadamente, 53% do material caracteriza-se como areia grossa, 44% como areia média e 3%, areia fina.

Tabela 5.9: distribuição granulométrica do material coletado sobre o piso externo da lanchonete

Peneira		% Passante Acumulado			
(mm)	n°	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
2,4	8	100	100	100	100
2,0	10	80,88	74,37	91,22	82,16
1,7	12	76,11	71,06	84,56	77,24
1,0	18	63,73	57,88	69,97	63,86
0,6	30	47,97	41,99	49,80	46,59
0,3	50	21,82	18,17	16,29	18,76
0,15	100	4,37	4,09	0,90	3,12
0,075	200	1,03	0,07	0	0,37

Tabela 5.10: classificação dos solos segundo a NBR 6502/95

Limites granulométricos (mm)	Denominação
$0,6 < \phi < 2,0$	areia grossa
$0,2 < \phi < 0,6$	areia média
$0,06 < \phi < 0,2$	areia fina
$0,002 < \phi < 0,06$	silte
$\phi < 0,002$	argila

5.6.2 Composição mineralógica

A identificação da composição mineralógica do material coletado sobre o piso torna-se complexa na medida em que este material resulta da mistura de elementos de diferentes procedências. Pode-se citar a terra vegetal existente nos canteiros de plantas ornamentais, a areia de construção presente no entorno, o solo originalmente existente no local, os resíduos do material de rejunte que ocasionalmente se desprendem, os resíduos da desagregação do pavimento de concreto que faz divisa com o piso cerâmico, e ainda, materiais de outras localidades que são carregados pelos sapatos das pessoas que ali transitam.

Com vistas a analisar se há variação nos constituintes conforme o tamanho das partículas que compõem a sujeira local, separou-se o material em oito frações granulométricas e procurou-se identificar os minerais presentes em cada uma separadamente. A identificação foi realizada por difração de raios-X em um equipamento Philips X'Pert com ânodo de cobre operando em 40KV e 30mA e auxiliada por resultados de fluorescência. As frações granulométricas correspondem ao material retido nas seguintes peneiras: 2; 1,7; 1; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm além do material passante da malha 0,075mm.

Os cinco principais compostos químicos indicados por fluorescência são o SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O e Al_2O_3 , para as oito frações granulométricas de cada coleta de material. Os difratogramas, por sua vez, indicam a presença dos seguintes minerais: quartzo, albita, anortoclásio, ferrosilicato magnesiano e anortita, e constam no Apêndice A.

Na fluorescência, a sílica desponta invariavelmente como o mineral de participação mais significativa. Cabe observar, no entanto que este não corresponde em sua totalidade à formação de quartzo, pois os principais compostos identificados por difração também contêm sílica.

A hipótese de que ao variar a faixa granulométrica houvesse mudança nos minerais que compõem o material ocorre apenas para a fração retida na malha 1,7mm, que contém também ferrosilicato magnesiano e a fração retida na malha 1mm que é a única que contém anortita além dos demais compostos. Os demais difratogramas revelam basicamente a presença de quartzo, albita e anortoclásio.

A presença significativa de quartzo é coerente com a região em estudo na medida em que, em frente ao passeio revestido de placas cerâmicas, existe um canteiro com vegetação e uma via de concreto de cimento Portland, a qual dá acesso ao *drive thru*. Ainda, a brita utilizada nesse concreto é do tipo granítica, portanto, a presença de minerais de decomposição do granito é esperada. Na escala Mohs, o quartzo possui dureza 7 (SANTOS e BRITO, 1998), maior que a dureza da maioria dos esmaltes empregados nas placas para revestimento de piso, que se situa em torno de 5 e 6 Mohs. Como este mineral não possui planos de clivagem definidos, se rompe de forma irregular (LEINZ e AMARAL, 1978). A morfologia das partículas, neste caso, incrementa o potencial agressivo.

A albita e a anortita compõem, entre outros, o grupo dos feldspatos. A diferença entre ambos os minerais deve-se à presença de sódio para o primeiro e cálcio, para o segundo. Possuem dureza 6 Mohs e apresentam clivagem segundo dois planos quase perpendiculares (LEINZ e AMARAL, 1978). O anortoclásio é a denominação dada aos feldspatos triclinicos, onde o conteúdo de Na_2O é maior do que o conteúdo de K_2O . Apresenta dureza de 6 a 6,5 na escala Mohs (BETEJTIN, 1977). Os compostos de ferro, magnésio e silício apresentam dureza entre 6 e 7 na escala Mohs (LEINZ e AMARAL, 1978), portanto, potencialmente superior aos já citados albita, anortita e anortoclásio. Ocorre, todavia que este mineral foi identificado apenas na fração retida na malha de 1,7mm.

As placas cerâmicas existentes no local, cuja utilização resultou em desgaste, apresentam dureza superior a 6 e inferior a 7 na escala Mohs, pois não são riscadas pelo feldspato e sim pelo quartzo, minerais utilizados para a análise. Dessa forma, acredita-se que dentre os compostos presentes no material que constitui o estudo de caso, o quartzo seja o principal responsável pelo desgaste.

Cabe observar que a concentração do abrasivo consiste em um outro aspecto que deve ser considerado ao caracterizar o nível de agressividade do ambiente. Nesse sentido, o local que constitui o estudo de caso apresenta condições favoráveis à preservação do revestimento. Apesar de encontrar-se na parte externa, é pequeno o conteúdo de material intermediário encontrado sobre o piso. O estabelecimento tem como padrão, a limpeza freqüente do piso com vassoura de tecido, onde pessoas especialmente designadas para esta atividade estão disponíveis, de forma que a sujeira sobre o revestimento é sistematicamente removida.

5.7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores associados ao estado original em campo resultam da média entre as medições realizadas em cada um dos 25 pontos representados na figura 5.3. Já os resultados associados ao desgaste, resultam da média dos pontos pertencentes às regiões delimitadas pelas trajetórias apresentadas no item 5.3.

5.7.1 Reflexão difusa

A reflectância original do material cerâmico que compõe o estudo de caso, apropriada com componente especular excluído, é mostrada na figura 5.10. Para o comprimento de onda de 550nm, a reflexão corresponde a 42,2%, com desvio padrão de 4,7% e coeficiente de variação de 11,1%.

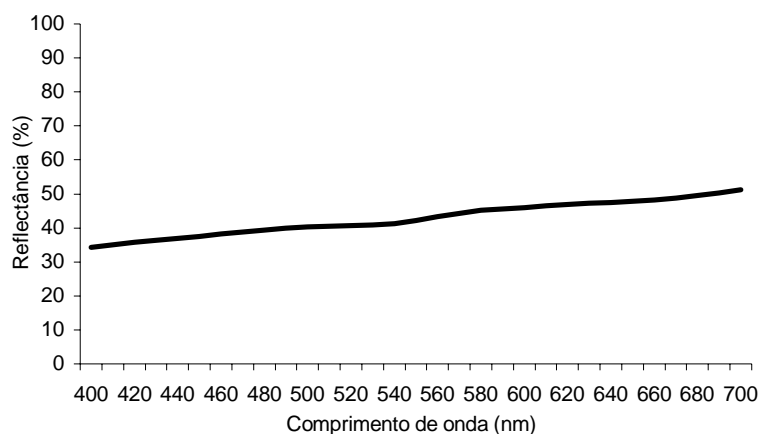


Figura 5.10: reflexão difusa média das placas cerâmicas originais

A reflexão difusa média das regiões desgastadas, para o comprimento de onda de 550nm, é apresentada nas tabelas 5.11 e 5.12, respectivamente, para as trajetórias que compõem a frenagem e o movimento livre, juntamente com os desvios-padrão (sd) e os coeficientes de variação (CV).

Tabela 5.11: reflexão difusa média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de frenagem para $\lambda = 550\text{nm}$

Trajетória	Reflexão difusa (%)	sd (%)	CV (%)
D+E	49,4	3,29	9,40
1+2	55,3	2,57	8,77
1+2+3	54,0	3,72	12,2
B+C	56,5	2,69	9,46
1+2+3+B+C	55,6	2,25	7,59

Conforme indica a tabela 5.11, o desgaste gerado pelo efeito de frenagem causa um aumento de 17 a 34% em relação à reflectância original. Cabe observar que as medições das placas cerâmicas desgastadas tendem a revelar menor variabilidade, ou seja, maior uniformidade entre os pontos que compõem as trajetórias. Esta tendência é ainda mais acentuada quando do movimento livre, como mostra a tabela 5.12. Neste caso, o aumento da reflectância situa-se entre 11 e 28%, comparativamente ao estado original.

Tabela 5.12: reflexão difusa média das regiões desgastadas sob efeito de livre movimento para $\lambda = 550\text{nm}$

Trajectoria	Reflexão difusa (%)	sd (%)	CV (%)
E	46,8	2,26	6,01
D+E	47,9	2,47	6,74
C	48,6	1,64	4,58
b'+C	51,3	2,65	7,98
2	48,1	1,96	5,38
B	51,9	2,41	7,40
1+2	50,7	1,49	4,42
B+C	54,1	1,72	5,66

A partir destes dados, calculam-se as variações de reflectância, conforme mostra a tabela 5.13, para frenagem e movimento livre.

Tabela 5.13: variações de reflectância das placas sujeitas ao movimento livre (à esquerda) e à frenagem (à direita) em relação ao estado original para $\lambda = 550\text{nm}$

Movimento livre		Frenagem	
Trajectoria	Δ Reflexão difusa (%)	Trajectoria	Δ Reflexão difusa (%)
E	4,64	D+E	7,19
D+E	5,73	1+2	13,12
C	6,41	1+2+3	11,82
b'+C	9,08	B+C	14,3
2	5,86	1+2+3+B+C	13,4
B	9,74		
1+2	8,49		
B+C	11,89		

A seguir, na tabela 5.14, apresentam-se os dados relativos às amostras ensaiadas em laboratório, com o equipamento de desgaste, para a carga de 25N e concentração do abrasivo de 15% e, na última coluna, a conseqüente variação da reflectância.

Tabela 5.14: reflexão difusa das placas desgastadas em laboratório e variação da reflectância em relação ao estado original para $\lambda = 550\text{nm}$

Amostra	Reflexão difusa (%)		Δ Reflexão difusa (%)
	original	após desgaste	
AM1	47,2	46,8	-0,42
AM2	38,3	42,8	4,43
AM3	39,2	39,0	-0,21
AM4	37,5	44,3	6,74
AM5	39,4	48,0	8,57
AM6	40,2	49,3	9,07

A cor original da cerâmica, representada no sistema Ciel**a***b**, consta na tabela 5.15. Tendo como referência as coordenadas referidas nesta tabela e às associadas às trajetórias identificadas em campo, são calculados os valores de Delta E. Estes constam nas tabelas 5.16 e 5.17, para o comprimento de onda de 550nm.

Tabela 5.15: parâmetros estatísticos relativos às coordenadas do espaço de cor para a condição original das placas cerâmicas objeto do estudo de caso

Coordenada	Média	sd	CV (%)
L*	71,9	2,04	2,8
a*	1,85	0,34	18,4
b*	7,55	1,12	14,8

Tabela 5.16: ΔE médio das placas objeto do estudo de caso para as regiões sob efeito de frenagem e $\lambda = 550\text{nm}$

Trajectoria	ΔE	sd	CV (%)
D+E	5,4	0,69	12,8
1+2	10,4	0,93	8,97
1+2+3	9,4	1,04	11,0
B+C	11,0	2,30	20,9
1+2+3+B+C	10,2	2,38	23,3

Tabela 5.17: ΔE médio das placas objeto do estudo de caso para as regiões sob efeito de livre movimento e $\lambda = 550\text{nm}$

Trajectoria	ΔE	sd	CV (%)
E	4,1	0,50	12,1
D+E	3,3	0,13	9,41
C	4,7	0,46	9,83
b'+C	6,9	0,75	10,9
2	4,2	0,40	9,69
B	7,4	0,71	9,65
1+2	6,4	0,71	11,1
B+C	9,2	0,65	7,10

As variações de cor resultantes do desgaste são bastante significativas. Se forem considerados os limites de percepção indicados no item 2.3.5.1.2, diferenças entre 3 e 6 são facilmente percebidas e, valores entre 6 e 12 demonstram grande diferença de cor. Os índices relacionados à dispersão dos dados mostram-se satisfatórios, o que reforça a escolha dos pontos que compõem cada trajetória.

A tabela 5.18 apresenta os dados relativos às amostras ensaiadas em laboratório, com o equipamento de desgaste, para a carga de 25N e concentração do abrasivo de 15%.

Tabela 5.18: ΔE das placas cerâmicas desgastadas em laboratório para $\lambda = 550\text{nm}$

Amostra	ΔE
AM1	0,6
AM2	3,2
AM3	5,6
AM4	5,2
AM5	6,4
AM6	6,0

5.7.2 Reflexão especular

A reflexão especular média da placa cerâmica no seu estado original é mostrada na figura 5.11. Esta curva resulta das diferenças entre as reflectâncias medidas com brilho especular incluso e excluído. Para o comprimento de onda de 550nm, corresponde a 1,59%, com desvio padrão de 1,65%.

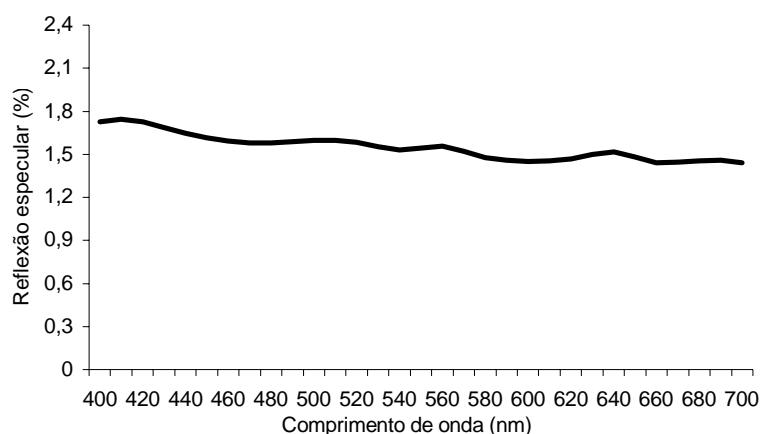


Figura 5.11: reflexão especular média da placa cerâmica original (sem desgaste)

Para o comprimento de onda de 550nm, a figura 5.12 mostra os 25 valores individuais de brilho, ordenados e associados a percentis que variam de 0 a 100. Observa-se que o brilho se distribui entre 0 e 5,7%, o que explica a grande dispersão de dados indicada pelo desvio padrão original.

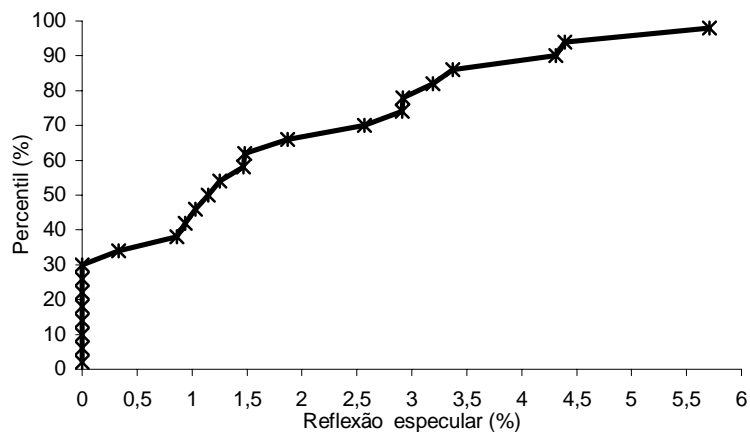


Figura 5.12: distribuição dos valores ordenados da reflexão especular da placa cerâmica original para $\lambda = 550\text{nm}$

A reflexão especular média das regiões desgastadas, para o mesmo comprimento de onda, é apresentada nas tabelas 5.19 e 5.20, respectivamente, para as trajetórias que compõem a frenagem e o movimento livre.

Tabela 5.19: reflexão especular média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de frenagem para $\lambda = 550\text{nm}$

Trajectoria	Reflexão especular (%)	sd (%)	CV (%)
D+E	0,64	0,51	79,7
1+2	0,61	0,48	78,7
1+2+3	0,55	0,41	73,0
B+C	0,47	0,47	100
1+2+3+B+C	0,47	0,47	100

A partir da tabela 5.19, percebe-se que o brilho diminui como consequência do desgaste em torno de 2,5 a 3,4 vezes para a condição de frenagem. Para a condição de livre movimento, apresentada na tabela 5.2, a trajetória C resulta em brilho demasiadamente baixo, de modo que a reflexão especular diminui de 1,6 a 5,5 vezes em relação ao estado original. De qualquer maneira, a reflexão especular final é sempre inferior a 1%.

Tabela 5.20: reflexão especular média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de livre movimento para $\lambda = 550\text{nm}$

Trajectoria	Reflexão especular (%)	sd (%)	CV (%)
E	0,98	0,73	74,5
D+E	0,87	0,44	50,9
C	0,29	0,35	122,9
b'+C	0,65	0,56	85,7
2	0,64	0,52	80,9
B	0,48	0,61	129,3
1+2	0,45	0,53	118,0
B+C	0,43	0,50	115,3

Chama a atenção a importante dispersão dos dados, para ambas as condições de tráfego, tal qual foi registrado para a condição original. Para analisar este aspecto, procurou-se comparar os dados com os grupos estudados no capítulo 4, a partir do quê se podem fazer duas observações:

- a) a placa cerâmica original relativa ao estudo de caso mostra, visualmente, brilho significativamente superior ao grupo marrom sem brilho ou mesmo bege sem brilho. Numericamente, o valor médio de reflexão especular do primeiro corresponde a 1,59% e dos demais a 2,20% e 2,53%, respectivamente, portanto, a relação entre os dados não é coerente. Por outro lado, visualmente, o brilho original da placa cerâmica relacionada ao estudo de caso é próximo aos grupos marrom com brilho e bege com brilho, cujos valores são 3,87 e 4,42%, respectivamente;
- b) as medições originais relativas aos grupos descritos no capítulo 4 resultam em coeficientes de variação significativamente inferiores aos encontrados no estudo de caso. Estes correspondem a 4,98%; 5,45%; 9,61% e 11,6%, respectivamente, para os grupos marrom com brilho, bege com brilho, marrom sem brilho e bege sem brilho.

Uma primeira hipótese para o comportamento diferenciado entre as placas cerâmicas que compõem o estudo de caso e os grupos estudados em laboratório, aponta para a grande diferença de rugosidade. A rugosidade das primeiras é de 10 a 26 vezes superior à das segundas, conforme o grupo em análise. Mesmo quando desgastadas, as placas cerâmicas que compõem o estudo de caso ainda permanecem com rugosidade superior às originais associadas aos grupos analisados em laboratório. Exemplificando através da trajetória de menor rugosidade após o desgaste, as placas cerâmicas desta ainda permanecem com rugosidade de 2,1 a 5,4 vezes superior à rugosidade dos grupos.

Dessa forma, cabe questionar sobre a capacidade do espectrofotômetro em apropriar o brilho de superfícies cuja rugosidade esteja acima de certos limites. O olho humano consegue discernir entre brilho e rugosidade e perceber o primeiro de forma global, portanto, considera o brilho apesar da rugosidade. O espectrofotômetro, todavia, mede a reflexão sobre uma superfície com 8mm de diâmetro, não é capaz de perceber e considerar os efeitos de superfície.

Cabe registrar que se iniciou o presente trabalho com um medidor de brilho Minolta Multi-Gloss 268 (*glossmeter*) ao invés de o espectrofotômetro. Os resultados medidos em campo, sobre as placas desgastadas, entretanto não foram coerentes com a percepção visual. Esta inconsistência é esperada em certas situações, conforme mencionam alguns pesquisadores (HUNTER e HAROLD, 1987; IBÁÑEZ, 1998) e a própria ASTM D 523/94, dada a dificuldade de interpretação instrumental do brilho.

Através do brilhansímetro, identificaram-se duas situações: perda de brilho para algumas trajetórias e aumento de brilho para outras. O aumento do brilho sugere que o desgaste gera certo polimento sobre as placas. Esta hipótese, no entanto, não coincide com a percepção visual. Acredita-se que o equipamento tenha dificuldade em interpretar as mudanças que ocorrem na superfície. Com a abrasão, a amostra vai se tornando mais lisa e, como consequência, o brilhansímetro consegue quantificar maior região de brilho especular e interpreta como um aumento do brilho. No entanto, possivelmente o que ocorre é um aumento no número de medições e não na intensidade da reflexão.

A análise do brilho ao longo de um processo de desgaste é, portanto, bastante complexa, pois é afetada pelas características da superfície, as quais poderão sofrer alterações contínuas ao longo do processo abrasivo.

Apesar da variabilidade, prosseguiu-se o estudo com o uso do espectrofotômetro. As variações de reflexão especular encontradas *in loco* são apresentadas na tabela 5.21, para o comprimento de onda de 550nm e ambas as condições de tráfego, movimento livre e frenagem.

Tabela 5.21: variações da reflexão especular das placas cerâmicas desgastadas em relação ao estado original para o tráfego em movimento livre (à esquerda) e frenagem (à direita) para $\lambda = 550\text{nm}$

Movimento livre		Frenagem	
Trajectoria	Δ Reflexão especular (%)	Trajectoria	Δ Reflexão especular (%)
E	-0,61	D+E	-0,95
D+E	-0,72	1+2	-0,98
C	-1,3	1+2+3	-1,04
b'+C	-0,94	B+C	-1,12
2	-0,95	1+2+3+B+C	-1,12
B	-1,11		
1+2	-1,14		
B+C	-1,16		

A tabela 5.22 contém os dados relativos às amostras ensaiadas em laboratório, com o equipamento de desgaste, para a carga de 25N e concentração do abrasivo de 15%, e as consequentes variações de reflexão especular.

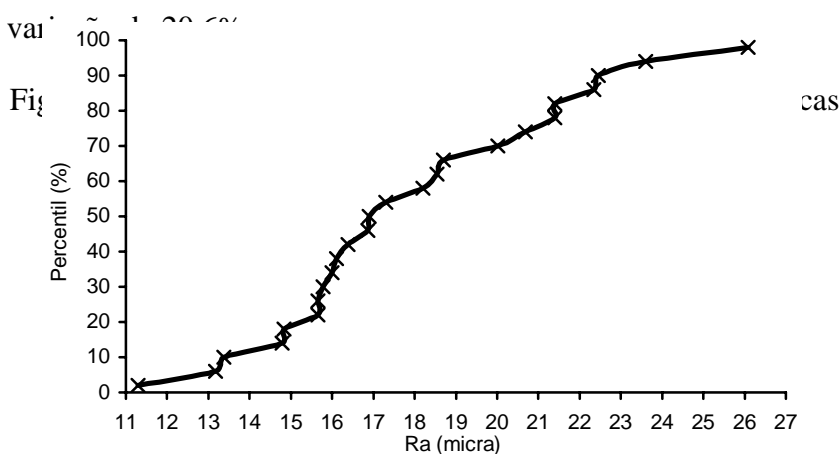
Tabela 5.22: reflexão especular das placas cerâmicas desgastadas em laboratório para $\lambda = 550\text{nm}$

Amostra	Reflexão especular (%)		Δ Reflexão especular (%)
	original	após desgaste	
AM1	0,54	1,06	0,52
AM2	3,61	2,56	-1,05
AM3	2,66	0,39	-1,17
AM4	2,16	0,99	-2,27
AM5	4,88	2,04	-2,84

O brilho original associado às amostras ensaiadas em laboratório abrange de 0,54% a 4,88%, como mostra a segunda coluna da tabela 5.22, coerente com a dispersão dos dados originais, de 0 a 5,7%. Chama a atenção, todavia, o fato de que a variação máxima de brilho encontrada em laboratório, de $-2,84\%$, é superior à encontrada *in loco*, de $-1,3\%$, sendo que esta última representa maior condição de agressividade. Cabe observar que a variabilidade dos dados relativos à placa original tende a prejudicar a análise do desgaste *in loco*. A diferença está que, para o estudo em laboratório, a variação de brilho é calculada tomando-se não a média, mas o próprio valor individual de cada placa. Na situação de campo, isso não é possível, pois o estudo de caso iniciou-se com as placas já desgastadas. Para exemplificar, atribuindo-se para a região 1+2+3+B+C, o brilho inicial de 5% ao invés de 1,59%, obter-se-ia a variação de $-4,53\%$ e não $-1,12\%$.

5.7.3 Rugosidade média Ra

A rugosidade da placa original é representada na figura 5.13 através dos 25 valores ordenados e associados a percentis que variam de 0 a 100. Apesar de não mensurável fisicamente, percebe-se sobre a superfície, saliências e reentrâncias de pequena magnitude que criam um efeito crespado por toda a superfície. Nesse sentido, a dispersão de valores coincide com a percepção tátil. Em média, a rugosidade é de $17,9\mu\text{m}$, com desvio padrão de $3,6\mu\text{m}$ e coeficiente de variabilidade de $20,1\%$.



A rugosidade Ra média das regiões desgastadas é apresentada nas tabelas 5.23 e 5.24, respectivamente, para as trajetórias que compõem a frenagem e o movimento livre, juntamente com os desvios-padrão e os coeficientes de variação.

Tabela 5.23: rugosidade Ra média das regiões desgastadas das placas cerâmicas sob efeito de frenagem

Trajectoria	Ra (μm)	sd (μm)	CV (%)
D+E	4,65	1,16	24,9
1+2	5,24	1,26	24,0
1+2+3	4,52	1,01	22,4
B+C	5,64	1,02	18,1
1+2+3+B+C	4,97	0,92	18,5

Tabela 5.24: rugosidade Ra média das placas cerâmicas das regiões desgastadas sob efeito de livre movimento

Trajectoria	Ra (μm)	sd (μm)	CV (%)
E	9,88	2,61	26,4
D+E	7,10	2,62	36,8
C	4,62	1,56	31,5
b'+C	4,74	1,19	25,0
2	4,55	1,45	31,9
B	4,52	1,80	17,6
1+2	3,76	0,84	22,2
B+C	4,74	0,61	13,0

Como mostram as tabelas 5.23 e 5.24, a rugosidade das placas cerâmicas diminui sensivelmente em consequência do processo de desgaste. Para o movimento de frenagem, resulta em valores de 3,2 a 4 vezes menores comparativamente ao estado inicial. Para a dinâmica de livre movimento, encontram-se valores até mesmo inferiores aos associados à frenagem, todavia estes não devem ser considerados individualmente, mas sim como um comportamento que segue determinada tendência, como posteriormente será analisado. Cabe observar que as trajetórias E e D+E, em livre movimento, revelam Ra diferenciado. Com efeito, visualmente, o estado de deterioração das placas cerâmicas nessas trajetórias é bem menos acentuado que os demais.

A variabilidade entre os valores de rugosidade que compõem cada trajetória, entretanto, mostra-se relativamente alta, entre 13 e 36,8%. A título de comparação, as medições dos

grupos descritos no capítulo 4, com o mesmo equipamento, resultam em coeficientes de variação de 6,54; 10,3; 14,9 e 5,7%, respectivamente, para os grupos bege sem brilho, marrom sem brilho, bege com brilho e marrom com brilho.

As variações de rugosidade encontradas *in loco* são apresentadas na tabela 5.25, para ambas as condições de tráfego.

Tabela 5.25: variações da rugosidade média Ra das placas cerâmicas desgastadas em relação ao estado original para as condições de livre movimento (à esquerda) e frenagem (à direita)

Movimento livre		Frenagem	
Trajectoria	ΔRa (μm)	Trajectoria	ΔRa (μm)
E	-8,02	D+E	-13,3
D+E	-10,8	1+2	-12,7
C	-13,3	1+2+3	-13,4
b'+C	-13,2	B+C	-12,3
2	-13,4	1+2+3+B+C	-12,9
B	-13,4		
1+2	-14,1		
B+C	-13,2		

A tabela 5.26 contém os dados relativos às amostras ensaiadas em laboratório, com o equipamento de desgaste, para a carga de 25N e concentração do abrasivo de 15% e as conseqüentes variações de rugosidade.

Tabela 5.26: rugosidade média Ra das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e variação em relação ao estado original

Amostra	Ra (μm)		ΔRa (μm)
	original	após abrasão	
AM1	16,9	17,0	0,18
AM2	15,7	15,6	-0,12
AM3	20,0	16,8	-3,20
AM4	15,4	14,9	-0,53
AM5	19,1	14,2	-4,92
AM6	16,9	8,77	-8,10

5.7.4 Classificação visual

As classes visuais relacionadas às regiões que compõem as diferentes trajetórias são indicadas nas figuras 5.14 e 5.15, respectivamente, para frenagem e movimento livre da porta principal e, na figura 5.16, para a porta secundária em ambas as condições de tráfego.

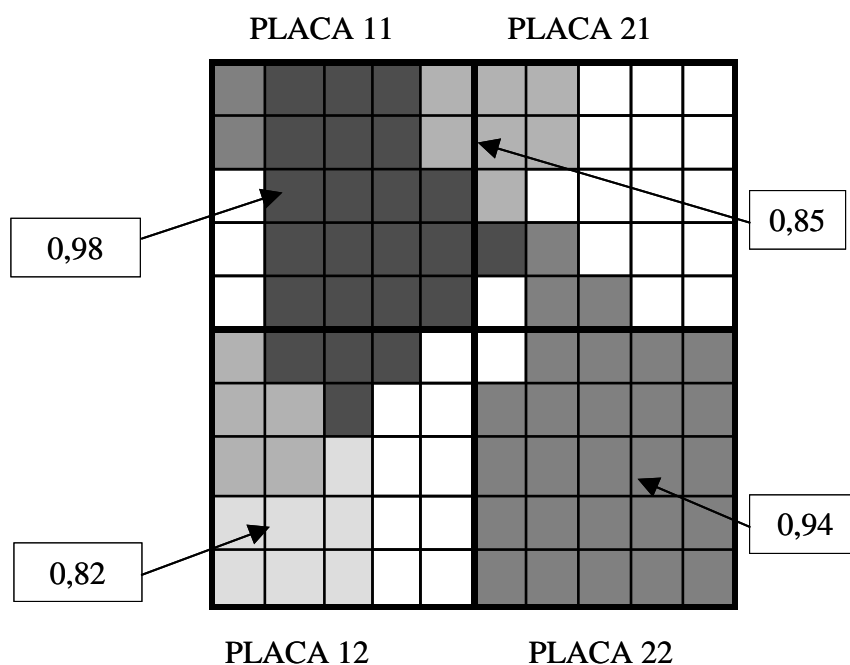


Figura 5.14: classificação visual correspondente às regiões sujeitas à frenagem junto à porta principal da lanchonete

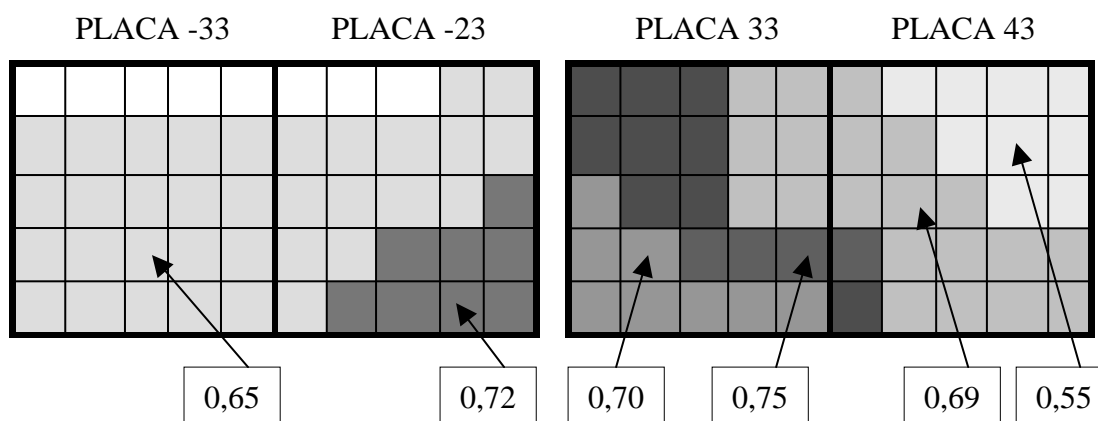


Figura 5.15: classificação visual correspondente às regiões sujeitas ao livre movimento junto à porta principal da lanchonete

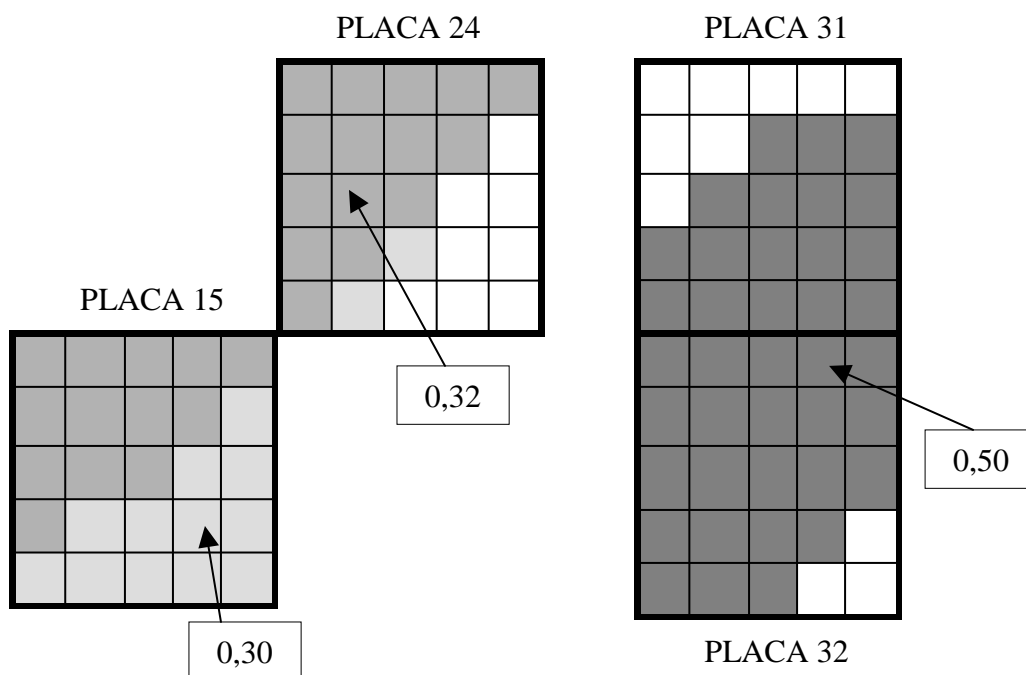


Figura 5.16: classificação visual correspondente às regiões sujeitas ao livre movimento (à esquerda) e à frenagem (à direita) junto à porta secundária da lanchonete

Para as amostras ensaiadas em laboratório, com o equipamento de desgaste, atribuiu-se os valores apresentados na tabela 5.27. Cabe lembrar que as condições de ensaio compreendem a carga de 25N e a concentração do abrasivo de 15%.

Tabela 5.27: classificação visual correspondente às placas cerâmicas desgastadas em laboratório

Amostra	Classe visual
AM1	0
AM2	0
AM3	0,1
AM4	0,25
AM5	0,33
AM6	0,5

5.8 MODELAGEM

A modelagem dos resultados obtidos em laboratório e medidos em campo contou com o apoio do *software* SPSS. Todas as análises baseiam-se nas diferenças entre as situações desgastada e original, ou seja, consideram as variações provocadas pelo fenômeno.

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.

A seguir, analisam-se as variáveis: reflexão difusa, delta E, aspecto visual, reflexão especular e rugosidade média Ra. 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, 60min e 6 milhões de pessoas.

5.8.1 Reflexão difusa

Os modelos numéricos que descrevem o comportamento dos resultados experimentais são apresentados na tabela 5.28 para as situações de laboratório e campo.

Tabela 5.28: 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
--	--	--------------

Comparando-se o modelo que descreve o comportamento em laboratório com os modelos de campo, percebe-se que os expoentes relacionados ao tempo e tráfego do primeiro e do último são próximos e permitem ajuste através do valor médio. Os modelos finais ajustados são mostrados na tabela 5.29. Os parâmetros estatísticos permanecem praticamente os mesmos, considerados satisfatórios, a exceção do erro relativo obtido em laboratório, que já no primeiro ajuste mostra-se elevado.

Tabela 5.29: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão difusa das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta R_d = 0,531.t^{0,5}$	$R^2 = 0,651$
		$MAE = 2,09$
		$ER = 41,4\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta R_d = 6,26.tr^{0,296}$	$R^2 = 0,579$
		$MAE = 1,48$
		$ER = 13,9\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta R_d = 2,88.tr^{0,5}$	$R^2 = 0,786$
		$MAE = 0,91$
		$ER = 12,9\%$
		$SIGN = 0,000$

A figura 5.17 contém a representação gráfica dos modelos ajustados, de laboratório e movimento livre, e do modelo original de frenagem.

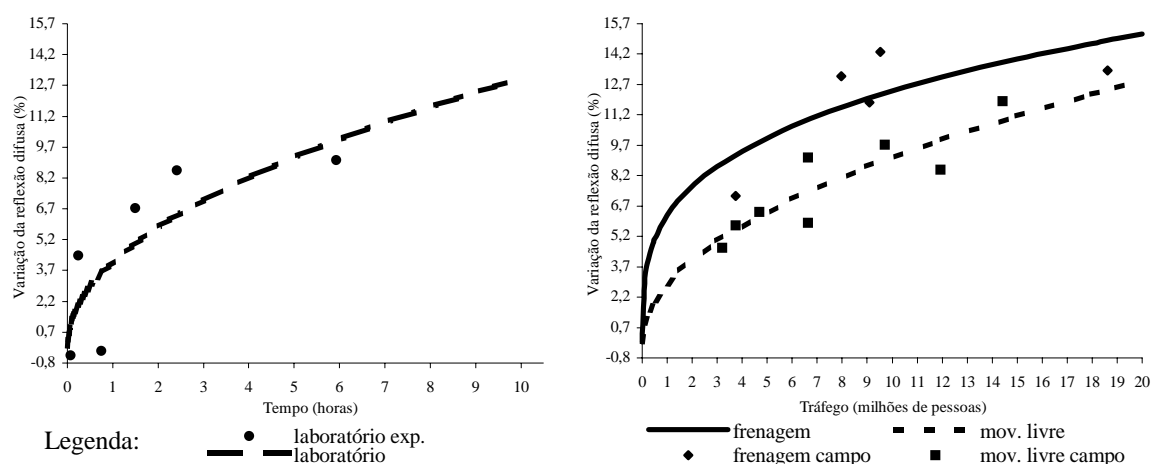


Figura 5.17: representação gráfica dos modelos e dos dados experimentais relativos à variação da reflexão difusa com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas

Para ilustrar, a variação de reflexão difusa de 6,7% é alcançada através de 2,65 horas no equipamento de desgaste ou 1,26 milhões de pessoas sob frenagem ou ainda, com 5,41 milhões de pessoas em movimento livre. A relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas, para cada um dos movimentos em estudo, é mostrada na tabela 5.30 e representada na figura 5.18.

Tabela 5.30: relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas após ajuste dos expoentes

Relação	Modelo	Aceleração
Laboratório/ Frenagem	$t = 139,1.tr^{0,592}$	60 min = 241.629 pessoas
Laboratório/Livre movimento	$t = 29,4.tr$	60 min = 2.040.816 pessoas

Após ajuste dos expoentes, o tempo em laboratório mostra relação linear com o tráfego sob movimento livre. Para ilustrar, 60min de ensaio corresponde a 2,04 milhões de pessoas transitando sobre o revestimento. Quando em situação de frenagem, o trânsito relaciona-se de forma exponencial com o tempo de ensaio. Neste caso, a equivalência entre tempo e tráfego varia conforme representado na figura 5.18. Para o tempo de 60min, por exemplo, o desgaste produzido em laboratório corresponde ao tráfego de 241.629 pessoas sob frenagem.

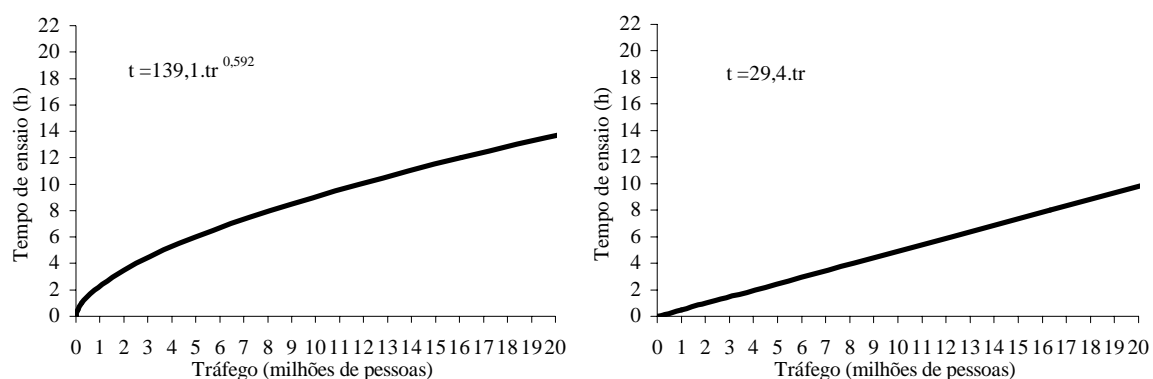


Figura 5.18: representação gráfica do tempo de ensaio em função do tráfego para as situações de frenagem (à esquerda) e movimento livre (à direita)

5.8.2 Delta E

Os modelos numéricos que descrevem o comportamento dos dados experimentais são apresentados na tabela 5.31 para as situações de laboratório e campo.

Tabela 5.31: 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	$\Delta E = 1,62 \cdot t^{0,249}$	$R^2 = 0,729$
		$MAE = 0,86$
		$ER = 19,12\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta E = 4,96 \cdot tr^{0,287}$	$R^2 = 0,526$
		$MAE = 1,24$
		$ER = 14,9\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta E = 1,88 \cdot tr^{0,567}$	$R^2 = 0,757$
		$MAE = 0,83$
		$ER = 16,0\%$
		$SIGN = 0,000$

Comparando-se o modelo que descreve o comportamento em laboratório com os modelos de campo, percebe-se que os expoentes relacionados ao tempo de ensaio e tráfego sob frenagem são próximos e permitem ajuste, considerando-se o valor médio. A tabela 5.32 mostra os

modelos finais ajustados, onde os parâmetros estatísticos sofrem pequena redução, mantendo-se porém satisfatórios.

Tabela 5.32: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento do delta E das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta E = 1,48.t^{0,268}$	$R^2 = 0,725$
		$MAE = 0,89$
		$ER = 20,2\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta E = 5,18.tr^{0,268}$	$R^2 = 0,524$
		$MAE = 1,23$
		$ER = 14,7\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta E = 1,88.tr^{0,567}$	$R^2 = 0,757$
		$MAE = 0,83$
		$ER = 16,0\%$
		$SIGN = 0,000$

A figura 5.19 contém a representação gráfica dos modelos ajustados, de laboratório e frenagem, e do modelo original de movimento livre. Por exemplo, pode-se observar que a variação do delta E de 8,0 é obtida através de 9,04 horas de funcionamento do equipamento em laboratório, 5,06 milhões de pessoas sob efeito de frenagem ou 12,86 milhões de pessoas em movimento livre.

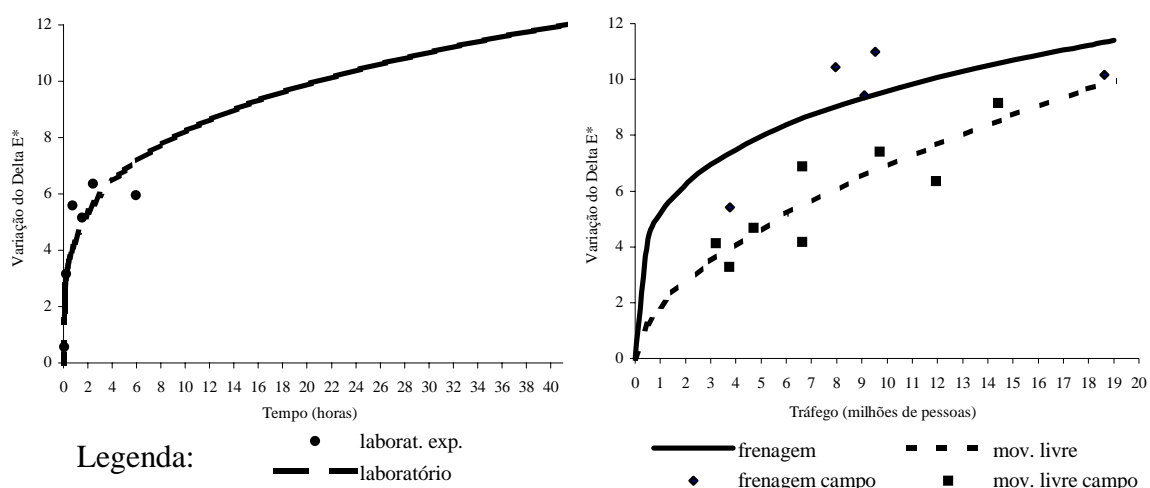


Figura 5.19: representação gráfica dos modelos ajustados e dos dados experimentais relativos à variação do delta E com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas

A tabela 5.33 apresenta as equações que descrevem as relações entre tempo de ensaio e tráfego, para os dois tipos de movimento em estudo. Após ajuste, o tempo em laboratório mostra relação linear com o tráfego em campo sob condição de frenagem. Para ilustrar, 60min de ensaio corresponde a 560.433 pessoas transitando sobre o revestimento.

Tabela 5.33: relação entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas após ajuste dos expoentes

Relação	Modelo	Aceleração
Laboratório/ Frenagem	$t = 107,06.tr$	60 min = 560.433 pessoas
Laboratório/Livre movimento	$t = 2,42.tr^{2,12}$	60 min = 4.546.797 pessoas

Quando em situação de livre movimento, o trânsito relaciona-se de forma exponencial com o tempo de ensaio. Neste caso, a equivalência entre tempo e tráfego varia conforme representado na figura 5.20. Para o tempo de 60min, por exemplo, o desgaste produzido em laboratório corresponde ao tráfego de 4,55 milhões de pessoas.

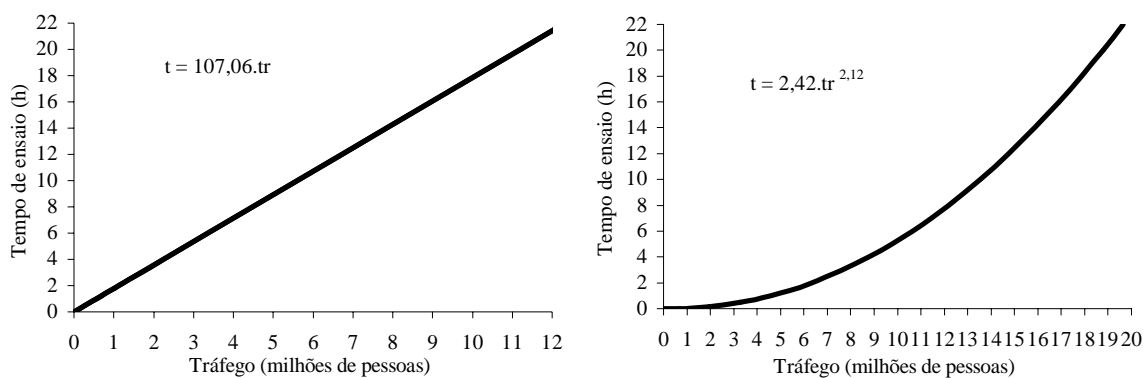


Figura 5.20: representação gráfica do tempo de ensaio em função do tráfego de pessoas para as situações de frenagem (à esquerda) e movimento livre (à direita)

5.8.3 Classificação visual

Os modelos numéricos que descrevem o comportamento dos resultados experimentais são apresentados na tabela 5.34 para as situações de laboratório e campo.

Tabela 5.34: 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	$\Delta_{vis} = 0,0102.t^{0,6705}$	$R^2 = 0,953$
		$MAE = 0,04$
		$ER = 23,6\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta_{vis} = 0,381.tr^{0,348}$	$R^2 = 0,795$
		$MAE = 0,07$
		$ER = 9,8\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta_{vis} = 0,234.tr^{0,468}$	$R^2 = 0,754$
		$MAE = 0,08$
		$ER = 14\%$
		$SIGN = 0,000$

Comparando-se o modelo que descreve o comportamento em laboratório com cada um dos modelos de campo, percebe-se que o expoente relacionado ao tempo não mostra nítida semelhança com qualquer dos expoentes de tráfego. O melhor ajuste, todavia, ocorre com a condição de livre movimento.

A tabela 5.35 mostra os modelos após ajuste, onde, apesar da situação exposta, os parâmetros estatísticos não sofrem redução importante. Os coeficientes de determinação passam de 0,95 e 0,75 para 0,94 e 0,72, respectivamente, para as condições de laboratório e livre movimento. Os erros relativos passam de 23,6 e 14% para 21 e 15,6%, para as mesmas condições. Dessa forma, considera-se viável considerar que estes se desenvolvem a partir do coeficiente médio.

Tabela 5.35: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo

Resultados	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Laboratório	$\Delta_{vis} = 0,0175.t^{0,569}$	$R^2 = 0,940$
		$MAE = 0,04$
		$ER = 21,0\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: frenagem	$\Delta_{vis} = 0,381.tr^{0,348}$	$R^2 = 0,795$
		$MAE = 0,07$
		$ER = 9,8\%$
		$SIGN = 0,000$
Campo: movimento livre	$\Delta_{vis} = 0,188.tr^{0,569}$	$R^2 = 0,722$
		$MAE = 0,08$
		$ER = 15,6\%$
		$SIGN = 0,000$

A figura 5.21 contém a representação gráfica dos modelos ajustados, de laboratório e movimento livre, e do modelo original de frenagem. Para ilustrar, o aspecto correspondente à classe visual 0,5 é alcançado após 6,03 horas de ensaio ou com 2,18 milhões de pessoas sob frenagem ou ainda, com 5,58 milhões de pessoas em movimento livre.

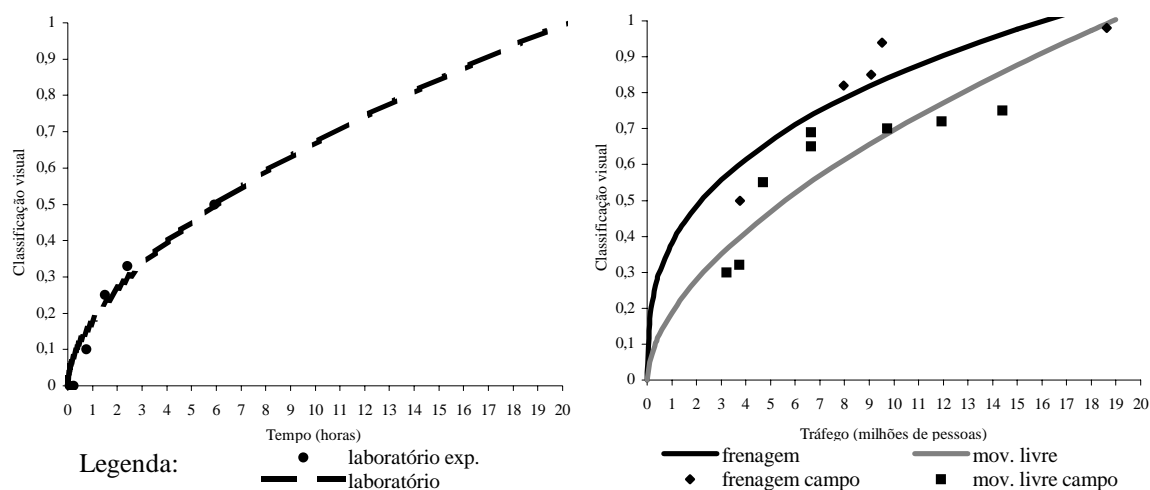


Figura 5.21: representação gráfica dos modelos ajustados e dos resultados experimentais relativos à variação da classificação visual com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas

As relações entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas, para os movimento em estudo, são descritas através das equações apresentadas na tabela 5.36 e representadas na figura 5.22.

Tabela 5.36: relações entre tempo de ensaio e tráfego de pessoas após ajuste dos expoentes

Relação	Modelo	Aceleração
Laboratório/ Frenagem	$t = 224,5.tr^{0,612}$	60min = 115.776 pessoas
Laboratório/Livre movimento	$t = 64,9.tr$	60min = 924.499 pessoas

Após ajuste, o tempo em laboratório mostra relação linear com o tráfego em campo sob movimento livre. Para ilustrar, 60min de ensaio corresponde a 924.499 pessoas em movimento livre. Quando em situação de frenagem, o trânsito relaciona-se de forma exponencial com o tempo de ensaio. Neste caso, a equivalência entre tempo e tráfego varia conforme representado na figura 5.22. Para o tempo de 60min, por exemplo, o desgaste produzido em laboratório corresponde ao tráfego de 115.776 pessoas sob frenagem.

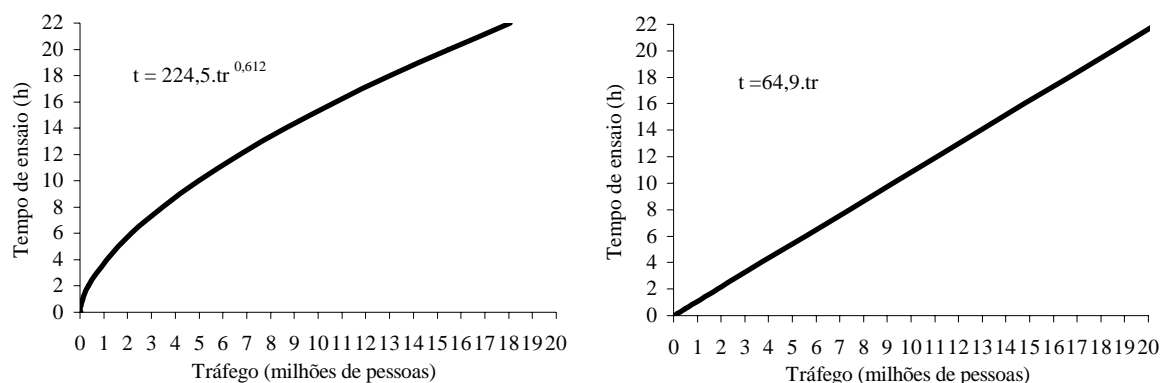


Figura 5.22: representação gráfica do tempo de ensaio em função do tráfego de pessoas para as situações de frenagem (à esquerda) e movimento livre (à direita)

5.8.4 Reflexão especular

Os modelos numéricos que descrevem o comportamento dos resultados experimentais são apresentados na tabela 5.37 para as situações de laboratório e campo.

Tabela 5.37: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da reflexão especular das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo

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

Comparando-se o modelo que descreve o comportamento em laboratório com cada um dos modelos de campo, percebe-se que o expoente relacionado ao tempo não mostra semelhança com qualquer dos expoentes de tráfego. Com relação aos dados de campo, observa-se na

figura 5.23 que há inversão das curvas a partir de certo tráfego, comportamento este que não deve ocorrer na realidade. Atribui-se esta tendência às dificuldades já relatadas do equipamento em interpretar o que efetivamente ocorre na superfície do material com relação à reflexão especular. Dessa forma, optou-se por não realizar ajuste entre os expoentes relativos ao brilho.

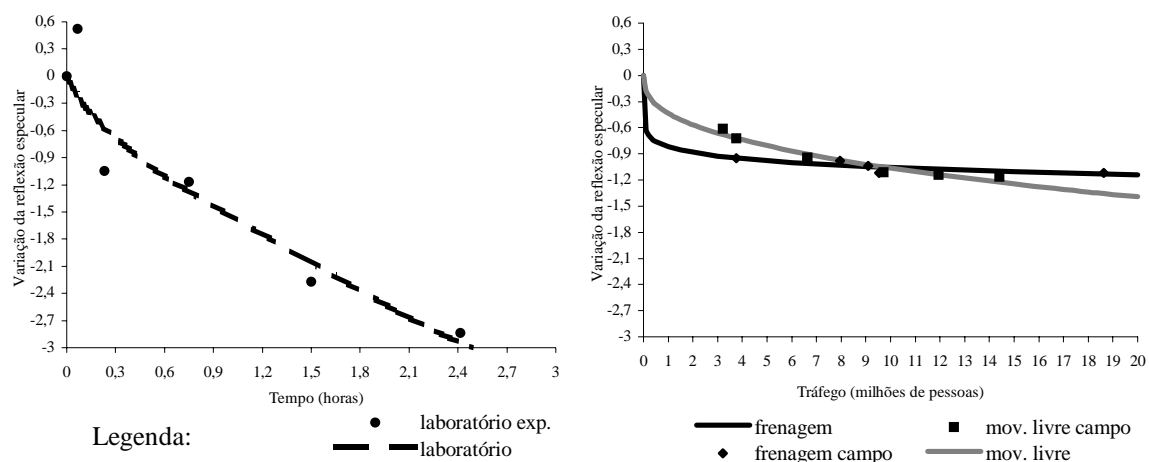


Figura 5.23: representação gráfica dos modelos e dos resultados experimentais relativos à variação da reflexão especular com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas

A partir da metodologia adotada neste trabalho para apropriar a reflexão especular, considera-se que esta propriedade não se constitui em um bom indicador do comportamento das placas cerâmicas quando submetidas a um processo abrasivo.

5.8.5 Rugosidade média Ra

Os modelos numéricos que descrevem o comportamento dos resultados experimentais são apresentados na tabela 5.38 para as situações de laboratório e campo.

Comparando-se o modelo que descreve o comportamento em laboratório com cada um dos modelos de campo, percebe-se que o expoente relacionado ao tempo de ensaio não mostra semelhança com qualquer dos expoentes de tráfego. Ainda, o modelo relativo à frenagem mostra coeficiente de determinação significativamente baixo.

Tabela 5.38: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da rugosidade média Ra das placas cerâmicas desgastadas em laboratório e em campo

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

A figura 5.24 mostra a evolução do fenômeno em campo e em laboratório. Os dados relativos à frenagem resultam em um modelo cuja perda de rugosidade ocorre muito rapidamente, no início do processo de desgaste, de forma que a região de menor tráfego, já apresenta perda da rugosidade equivalente à região de maior tráfego. Este comportamento não é coerente com o que ocorre sob movimento livre e o cruzamento das curvas não deve ocorrer na realidade. Dessa forma, optou-se por não realizar ajuste entre os coeficientes relativos à rugosidade média. Novamente, considerando os dados experimentais disponíveis, conclui-se que a propriedade em análise não se constitui em um bom indicador do comportamento das placas cerâmicas quando submetidas a um processo abrasivo.

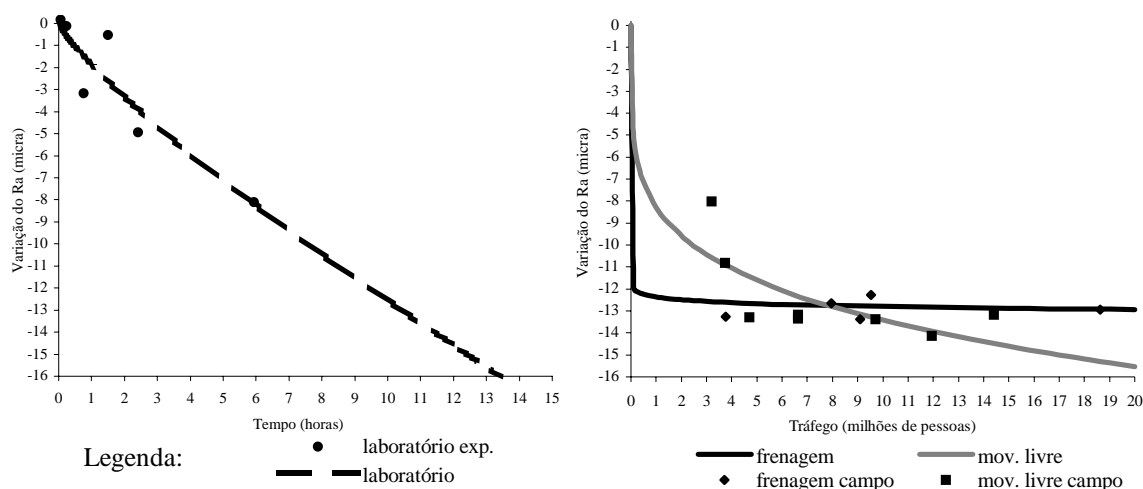


Figura 5.24: representação gráfica dos modelos e dos resultados experimentais relativos à variação da rugosidade média Ra com o tempo de ensaio e tráfego de pessoas

5.9 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 resultaram significativas na modelagem. Dentre estas: reflexão difusa, delta E e classificação visual, seleciona-se a que apresenta os melhores parâmetros estatísticos.

A tabela 5.39 mostra os valores originais dos respectivos expoentes de tempo e tráfego para cada uma das variáveis citadas. 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.

Tabela 5.39: 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

Os expoentes médios revelam que o comportamento em laboratório tem afinidade com o desgaste gerado em campo pela condição de livre movimento. Em ambos os casos, poderia ser utilizado um expoente igual a 0,5. Isso equivale a considerar que o desgaste evolui proporcionalmente a raiz quadrada do uso (tempo ou tráfego). Esta tendência já havia sido demonstrada a partir dos expoentes individuais de reflexão difusa e classificação visual, descritos nos itens 5.4 e 5.5.

A tabela 5.39 permite inferir ainda que, possivelmente, os expoentes relativos ao laboratório e livre movimento, relativos à variável delta E, não foram ajustados pela dificuldade de reprodução desta propriedade em laboratório, já que no caso do movimento livre, o valor numérico deste expoente se mantém coerente com os pertencentes às demais variáveis.

Em vista do exposto, modelou-se o desgaste considerando-se o valor médio de 0,5 para os expoentes relativos ao tempo de ensaio e tráfego de pessoas. Apresentam-se os resultados na tabela 5.40.

Tabela 5.40: 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	$\Delta R_{d_l} = 0,531.t^{0,5}$	$R^2 = 0,651$
			$MAE = 2,09$
			$ER = 41,4\%$
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	$\Delta R_{d_{cl}} = 2,88.tr^{0,5}$	$R^2 = 0,786$
			$MAE = 0,91$
			$ER = 12,9\%$
Classificação visual	$\Delta vis_{cl} = 0,218.tr^{0,5}$	$R^2 = 0,750$	
		$MAE = 0,08$	
		$ER = 14,5\%$	

Como pode ser visto na tabela 5.40, os parâmetros estatísticos relacionados ao processo desenvolvido em laboratório, tanto para delta E quanto para a reflexão difusa, compreendem 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, a partir do ponto de vista estatístico (erros de previsão), conclui-se que a classificação visual é a propriedade mais adequada para estimar a vida útil de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas à abrasão.

Conforme mostram os modelos da tabela 5.40, 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 5.25 contém a representação gráfica da evolução do fenômeno.

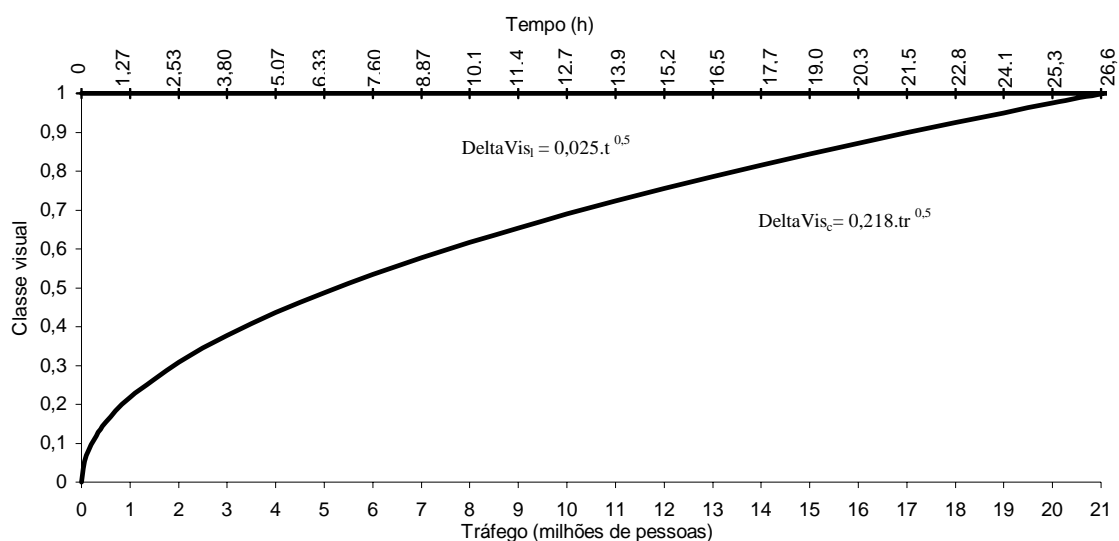


Figura 5.25: representação gráfica dos modelos que descrevem a variação do aspecto em função do tempo de ensaio e do tráfego

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 fórmula 5.1. 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.

$$tr = 0,0132.t \quad (\text{equação 5.1})$$

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

O movimento de frenagem, por sua vez, pode ser representado pelo expoente médio de 0,31, como indica a tabela 5.40. Dessa forma, na tabela 5.41, constam os modelos que descrevem o comportamento da reflexão difusa, delta E e aspecto visual após ajuste, onde todos permanecem com coeficientes de determinação e erros satisfatórios. Para o movimento de frenagem, resulta que a variação de aspecto é aproximadamente proporcional à raiz cúbica do tráfego.

Tabela 5.41: modelos e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento das variáveis: delta E, reflexão difusa e classificação visual sob efeito de frenagem

Resultados	Variável	Modelo	Parâmetros Estatísticos
Campo: frenagem	Delta E	$\Delta E_{cf} = 4,70.tr^{0,31}$	$R^2 = 0,523$
			$MAE = 1,26$
			$ER = 15,3\%$
	Reflexão difusa	$\Delta Rd_{cf} = 6,06.tr^{0,31}$	$R^2 = 0,578$
			$MAE = 1,49$
			$ER = 14,1\%$
	Classificação visual	$\Delta vis_{cf} = 0,416.tr^{0,31}$	$R^2 = 0,786$
			$MAE = 0,07$
			$ER = 9,2\%$

A relação entre tempo de ensaio e tráfego relacionado à frenagem não é linear e pode ser representada através da equação 5.2.

$$tr = 0,000115.t^{1,61} \quad (\text{equação 5.2})$$

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

A figura 5.26 contém a representação gráfica das equações 5.1 e 5.2, que relacionam tempo de ensaio com tráfego para as situações de movimento livre e frenagem, respectivamente.

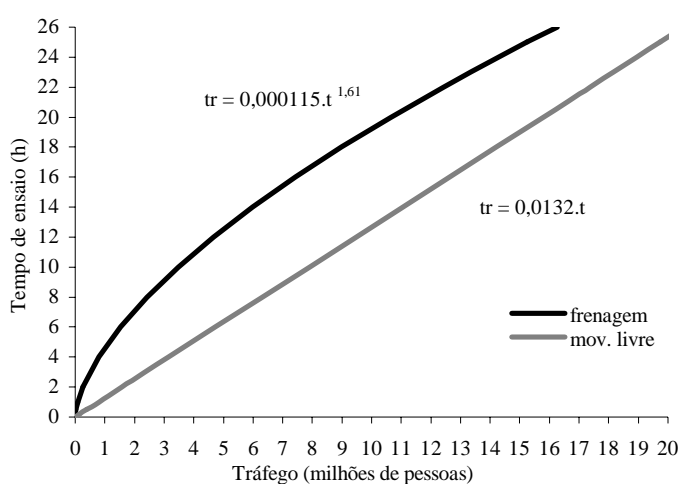


Figura 5.26: representação gráfica dos modelos que descrevem a relação entre tempo de ensaio e tráfego para as situações de movimento livre e frenagem

A relação entre o tráfego associado ao movimento livre e à frenagem é variável dada a não linearidade deste último. Para ilustrar, a tabela 5.42 mostra o número de pessoas que representa 10 minutos, 1 hora e 10 horas de ensaio quando o tráfego desenvolve-se segundo um ou outro mecanismo. Para o período de ensaio de 10 minutos, a frenagem é 28 vezes mais agressiva do que o movimento livre; para 1 hora, a frenagem é 9 vezes mais agressiva, enquanto que para 10 horas de ensaio, é duas vezes mais agressiva em relação a este.

Tabela 5.42: tráfegos associados aos períodos de ensaio de 10min, 1h e 10h para frenagem e movimento livre

Tempo de ensaio	Tráfego (pessoas)	
	Frenagem	Movimento livre
10min	4.685	132.000
1h	83.854	792.000
10h	3.416.028	7.920.000

6 APLICAÇÃO DO MODELO

Os modelos propostos no capítulo 5 procuram definir o comportamento de placas cerâmicas sujeitas ao desgaste em laboratório, provocado pelo equipamento desenvolvido neste trabalho, e em campo, para a condição de tráfego sob movimento livre. A extrapolação da relação entre os mesmos para outros materiais é possível, desde que consideradas as condições de agressividade a partir das quais os fatores de aceleração foram gerados. Quando os materiais são submetidos a outros níveis de severidade, se faz necessário o ajuste dos coeficientes de aceleração, conforme se apresenta nos itens que seguem.

6.1 GRUPOS BC, BS, MC e MS

A análise da abrasão baseou-se em medições relativas a sete propriedades do material, associadas à caracterização do aspecto superficial. Dentre estas, o desgaste apropriado através da classificação visual mostrou os melhores resultados, propiciando a definição de modelos bem ajustados para os quatro grupos cerâmicos analisados no capítulo 4: bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho. Para o estudo de caso, obteve-se resposta semelhante, onde a percepção visual permitiu modelar o comportamento do material, obtendo-se parâmetros estatísticos satisfatórios. Esta afinidade, por certo, simplifica o estudo das placas cerâmicas esmaltadas para revestimento.

Ajustando-se para os grupos: bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho, o comportamento identificado através do estudo de caso, no qual a abrasão evolui segundo a raiz quadrada do tempo para a condição de movimento livre e, então adotando-se os expoentes médios de carga e concentração do abrasivo, obtidos para estes modelos ajustados, resultam os modelos apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1: modelos ajustados e parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento da classificação visual para os grupos BC, BS, MC e MS

Grupo	Modelo	Parâmetros Estatísticos
BS	$\Delta Vis_1 = 0,06017.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,543$
		$MAE = 0,10$
		$ER = 23,3\%$
		$SIGN.=0,000$
BC	$\Delta Vis_1 = 0,0951.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,697$
		$MAE = 0,08$
		$ER = 18,0\%$
		$SIGN.=0,000$
MS	$\Delta Vis_1 = 0,0766.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,847$
		$MAE = 0,07$
		$ER = 15,2\%$
		$SIGN.=0,000$
MC	$\Delta Vis_1 = 0,132.Ca^{0,6}.Co^{0,5}.t^{0,5}$	$R^2 = 0,563$
		$MAE = 0,10$
		$ER = 16,8\%$
		$SIGN.=0,000$

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

Substituindo-se, nos modelos apresentados na tabela 6.1, 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 6.2 a 6.5. Nestas, constam 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 6.1.

$$\Delta Vis_1 = b_0' . \sqrt{t} \quad (\text{equação 6.1})$$

Nas tabelas 6.2 a 6.5, à direita, constam os coeficientes relacionados ao tráfego, b_0'' , os quais foram obtidos substituindo-se t por $tr/0,0132$ na equação 6.1. Resulta que a variação de aspecto decorrente do tráfego de pessoas para cada grupo pode ser estimada pela equação 6.2. 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 através do estudo de caso.

$$\Delta Vis_{cl} = b_0'' \cdot \sqrt{tr} \quad (\text{equação 6.2})$$

Tabela 6.2: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo BS

Co	Ca					Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0102	0,0155	0,0198	0,0235	0,0269	0,2	0,089	0,135	0,173	0,205	0,235
0,4	0,0145	0,0220	0,0280	0,0333	0,0381	0,4	0,126	0,191	0,244	0,290	0,332
0,6	0,0177	0,0269	0,0343	0,0408	0,0466	0,6	0,155	0,234	0,299	0,355	0,406
0,8	0,0205	0,0311	0,0396	0,0471	0,0538	0,8	0,179	0,271	0,345	0,410	0,469
1,0	0,0229	0,0347	0,0443	0,0526	0,0602	1,0	0,200	0,303	0,386	0,459	0,525

Tabela 6.3: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo BC

Co	Ca					Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0162	0,0245	0,0313	0,0372	0,0425	0,2	0,141	0,214	0,273	0,324	0,371
0,4	0,0229	0,0347	0,0443	0,0526	0,0601	0,4	0,200	0,303	0,386	0,459	0,524
0,6	0,0280	0,0425	0,0542	0,0644	0,0737	0,6	0,245	0,371	0,473	0,562	0,642
0,8	0,0324	0,0491	0,0626	0,0744	0,0851	0,8	0,282	0,428	0,546	0,649	0,742
1,0	0,0362	0,0549	0,0700	0,0832	0,0951	1,0	0,316	0,478	0,610	0,7252	0,829

Tabela 6.4: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo MS

Co	Ca					Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0130	0,0198	0,0252	0,0300	0,0343	0,2	0,114	0,172	0,220	0,261	0,299
0,4	0,0184	0,0280	0,0357	0,0424	0,0484	0,4	0,161	0,244	0,311	0,369	0,422
0,6	0,0226	0,0342	0,0437	0,0519	0,0593	0,6	0,197	0,299	0,381	0,452	0,517
0,8	0,0261	0,0395	0,0504	0,0599	0,0685	0,8	0,227	0,345	0,440	0,522	0,597
1,0	0,0292	0,0442	0,0564	0,0670	0,0766	1,0	0,254	0,385	0,492	0,584	0,668

Tabela 6.5: coeficientes b_0' relacionados ao tempo (à esquerda) e coeficientes b_0'' relacionados ao tráfego (à direita) para o grupo MC

Co	Ca					Co	Ca				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,0225	0,0341	0,0434	0,0516	0,0590	0,2	0,196	0,297	0,379	0,450	0,515
0,4	0,0318	0,0482	0,0614	0,0730	0,0835	0,4	0,277	0,420	0,536	0,637	0,728
0,6	0,0389	0,0590	0,0753	0,0894	0,1022	0,6	0,339	0,514	0,656	0,780	0,891
0,8	0,0450	0,0681	0,0869	0,1033	0,1181	0,8	0,392	0,594	0,758	0,900	1,029
1,0	0,0503	0,0762	0,0972	0,1155	0,1320	1,0	0,438	0,664	0,847	1,007	1,15

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 6.1 ilustra a evolução do desgaste para a condição de agressividade representada pela carga de 25N ($ca=1$) e concentração do abrasivo de 15% ($co=0,6$). Por exemplo, após 60min 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 que 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.

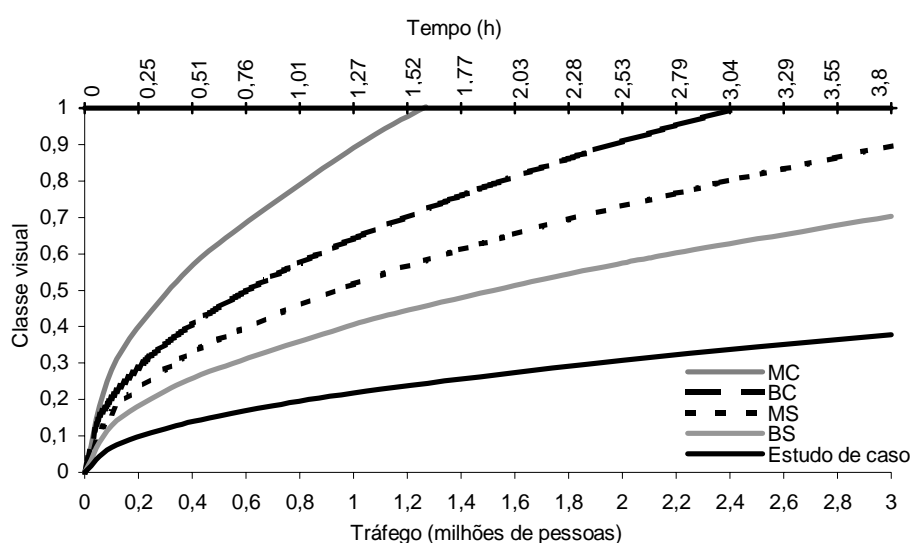


Figura 6.1: representação gráfica do comportamento das placas que compõem o estudo de caso e os grupos BS, MS, BC e MC quando submetidas ao desgaste em laboratório ou sob o tráfego de pessoas em livre movimento

6.2 OUTRAS TIPOLOGIAS

A estimativa de vida útil de outras tipologias de placas cerâmicas esmaltadas pode ser feita utilizando-se do equipamento desenvolvido neste trabalho conjuntamente a 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, através da equação $tr = 0,0132.t$, onde tr é dado em milhões de pessoas e t em minutos de ensaio em laboratório.

Para exemplificar, um material que ao término de 15min de ensaio, resulte em classe visual 0,5, deverá apresentar esta mesma classificação visual após o tráfego de 198.000 pessoas em livre movimento sob condições reais de utilização. A figura 6.2 pode ser usada para se ter idéia do comportamento deste novo material neste ambiente, onde a curva correspondente estaria posicionada acima da curva do grupo MC, mostrando-se o primeiro mais sensível ao desgaste.

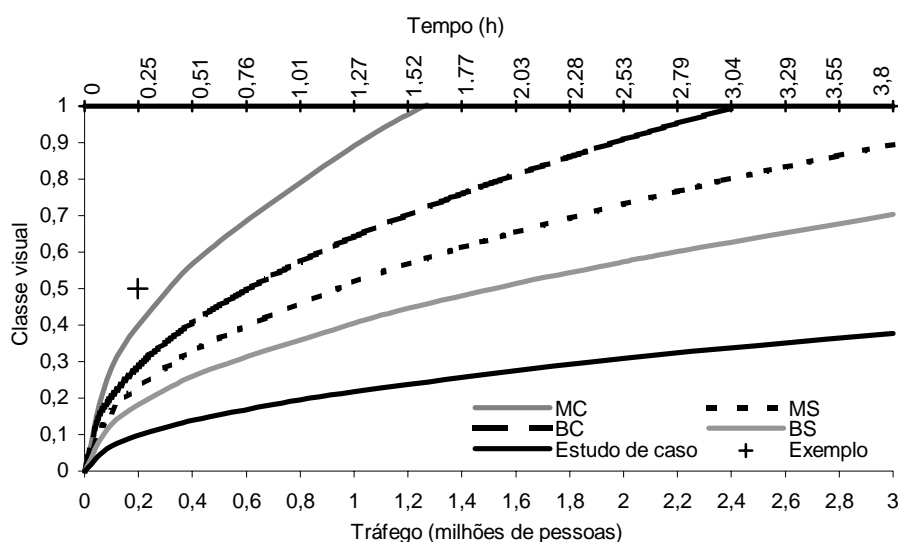


Figura 6.2: representação gráfica do comportamento das placas que compõem o estudo de caso, dos grupos BS, MS, BC e MC e de um material hipotético quando submetidos ao desgaste em laboratório ou sob o tráfego de pessoas em livre movimento

Em ambientes cujas condições de agressividade diferem do estudo de caso, há de se atribuir à carga e à concentração do abrasivo, índices que bem representem os novos níveis de severidade. Estes resultam de uma análise comparativa do potencial de agressividade do novo ambiente, tomando-se como referência o estudo de caso caracterizado no capítulo 5.

A tabela 6.6 mostra os coeficientes b_0^* , resultantes do produto das diversas combinações entre ca e co , calculados em relação à condição de referência, correspondente a $ca = 1$ e $co = 0,6$, conforme indica a equação 6.3.

$$b_0^* = Ca^{0,6} \cdot Co^{0,5} / (Ca^{0,6} \cdot Co^{0,5})_{ref}. \quad (\text{equação 6.3})$$

Tabela 6.6: coeficientes b_0^* que indicam as condições relativas de agressividade associadas à carga e concentração do abrasivo

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

A estimativa do tráfego associado a qualquer tempo de ensaio pode ser feita através da equação 6.3. 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 $fa' = 0,0132 \cdot b_0^*$.

$$tr = fa' \cdot t \quad (\text{equação 6.3})$$

onde, fa' = fator de aceleração ajustado

t = tempo de ensaio, em minutos

tr = estimativa de tráfego, em milhões de pessoas

A tabela 6.7 mostra os valores de fa' correspondentes aos níveis de carga e concentração do abrasivo considerados neste trabalho.

Tabela 6.7: fator de aceleração ajustado (fa')

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

Para ilustrar, considerando-se um ambiente cujas condições de agressividade são representadas por $ca = 0,8$ e $co = 0,6$. Supondo que, em laboratório, o material cerâmico resulte, após 45min de ensaio, na classe visual 0,3. Estima-se que, quando submetido ao tráfego, este material alcançará esta mesma classe visual após a passagem de 517.500 pessoas, pois $tr = 0,0115 \times 45 = 0,5175$ milhões de pessoas.

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 6.7 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 73Kg, o coeficiente de carga a considerar no ajuste do fator de aceleração deve ser 1,2, pois é relativo à carga equivalente do estudo de caso, que corresponde a 61Kg.

No caso da concentração do abrasivo, pode haver maior dificuldade em apropriar o conteúdo existente sobre o piso, de forma que a essa decisão poderá estar associada certa subjetividade.

Com relação à classificação visual, há de se considerar os mesmos critérios descritos no capítulo 3. A câmara de observação deve ser dotada de condições geométricas e de iluminação relativas à visualização do brilho e esta etapa deve ser realizada por pessoal devidamente habilitado e treinado. Para atribuir determinada classe visual às amostras desgastadas, deve-se considerar os níveis de desgaste definidos neste trabalho, aos quais está relacionado o fator de aceleração. Para tanto, há de se utilizar um painel de referência que estabeleça a relação entre a aparência e os respectivos valores numéricos (escala 0 a 1).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada neste trabalho para modelar o comportamento de placas cerâmicas esmaltadas sujeitas à abrasão mostrou-se consistente, permitindo estimar a vida útil em campo a partir de ensaios acelerados desenvolvidos em laboratório.

O equipamento proposto revelou-se capaz de simular o desgaste decorrente do tráfego de pessoas em livre movimento, permitindo aplicação variável de carga e diferentes concentrações de abrasivo. A utilização de farinha de quartzo na forma de barbotina, além de provocar desgaste em tempos adequados, mostrou-se satisfatória tanto com relação à simplicidade de manuseio, quanto com as inúmeras possibilidades de variação da concentração.

7.1 GRUPOS BS, BC, MS E MC

Os grupos cerâmicos estudados: bege com brilho, bege sem brilho, marrom com brilho e marrom sem brilho, reagem de forma diferente à ação abrasiva conforme a propriedade em análise. Esta ponderação se refere tanto à inversão de comportamento, quanto à sensibilidade dos grupos em responder ao desgaste. Este aspecto, por certo, gera complexidade ao estudo das placas cerâmicas. A extrapolação de análises realizadas em trabalhos que estudam poucas tipologias deve ser cuidadosa. Por outro lado, pode-se considerar que a escolha dos grupos foi satisfatória, pois permitiu detectar tais particularidades.

Dentre as propriedades analisadas, destaca-se o comportamento das reflexões especular e difusa. Ambos os grupos sem brilho, quando submetidos ao desgaste, mostram aumento da primeira e diminuição da segunda, enquanto que os grupos com brilho revelam o inverso. Nas duas situações, os grupos bege revelam maior sensibilidade, pois correspondem às maiores variações. Cabe observar que a variação da reflexão especular está associada a alterações superficiais oriundas do processo abrasivo. Neste caso, pode-se destacar o surgimento de trincas e o aparecimento de poros cuja morfologia e densidade diferem das existentes no estado original. Soma-se ainda, a hipótese de que placas de maior brilho tendem a revelar

desgaste em menor tempo comparativamente às de menor brilho. Cabe observar que este comportamento coincide com o encontrado neste trabalho, onde os grupos de menor brilho suportam maior tráfego antes de apresentarem determinada variação de aspecto, comparativamente aos grupos com brilho.

Com relação à variação de cor, representada pelo Delta E, os grupos marrons mostraram-se mais sensíveis ao desgaste. Estes resultados são coerentes com o entendimento geral de que as tonalidades claras tendem a disfarçar melhor o efeito da abrasão em relação às tonalidades escuras. Do ponto de vista da percepção visual, no entanto o grupo marrom com brilho corresponde à maior variação de aspecto, mas o grupo marrom sem brilho não o acompanha em segundo lugar. Este fato revela que, apesar destes grupos serem mais sensíveis à variação de cor, esta propriedade não é preponderante na percepção do desgaste.

Quanto à rugosidade, em todos os grupos, tanto R_a quanto R_z diminuem na medida em que evolui o processo abrasivo. Pode-se dizer que as placas tornam-se mais lisas. Em ambos os casos, os grupos sem brilho, possuidores de maior rugosidade original, mostram-se mais sensíveis do que os grupos com brilho.

A partir dos modelos propostos para os quatro grupos, observou-se que a análise visual foi a única variável de resposta passível de utilização. Quanto às outras propriedades, algumas são mais adequadas para determinado grupo e outras para outros grupos. De qualquer forma, nenhuma é totalmente descartada enquanto propriedade que permite representar o comportamento do material frente à abrasão. Cabe observar que os grupos com brilho mostraram maior dificuldade em dispor de modelos passíveis de representação do desgaste, além do modelo visual, o que significa que os dados experimentais a partir dos quais estes modelos foram gerados apresentam grande variabilidade. Os grupos sem brilho, por outro lado, permitem com facilidade o estudo da abrasão através de outros indicadores que não o aspecto visual.

Diferentemente do que registra a bibliografia, não se encontrou boa correlação entre a reflexão especular e a rugosidade, para qualquer dos grupos analisados. Acredita-se que a magnitude da porosidade e rugosidade contempladas neste trabalho não corresponde ao comportamento esperado, pois estas apresentam ordem de grandeza superior aos comprimentos de onda do espectro visível, faixa em que se estabelece maior interação entre luz e matéria.

Com relação à limpabilidade, o estudo da correlação entre rugosidade média R_a e classificação visual permite concluir que, na medida em que R_a aumenta, diminui a percepção da impregnação de sujeira na superfície das placas. Dessa forma, pode-se esperar que a tendência da superfície em manchar diminui com o aumento de R_a . Esse comportamento, no entanto não foi observado para o grupo bege com brilho.

A impregnação das superfícies com óleo mineral e carvão ativado sugere que há correspondência entre o aumento do manchamento com o aumento do parâmetro V_o (volume de retenção de óleo). Como este último aumenta na medida em que evolui o desgaste, é de se esperar que a impregnação de sujeira também se agrave. No entanto, não foi possível determinar a magnitude da retenção de óleo a partir da qual inicia a impregnação de sujeira.

A necessidade de utilizar diferentes agentes manchantes para avaliar a limpabilidade dos materiais é comprovada neste trabalho. O grupo bege com brilho mostrou-se sensível à impregnação com azul de metileno, enquanto que o grupo bege sem brilho à ação do óleo mineral e carvão ativado. O tipo de mecanismo através do qual o agente atua pode determinar ou não o manchamento. Portanto, são análises complementares.

7.2 ESTUDO DE CASO

Das cinco variáveis de resposta utilizadas para avaliar o desgaste em condições reais de utilização, a reflexão especular e a rugosidade média R_a não mostraram resultados satisfatórios. Para a reflexão especular, os resultados medidos em campo não são coerentes com a percepção, tomando-se como referência os valores correspondentes aos grupos analisados em laboratório. Os modelos, por sua vez, revelam que o expoente relacionado ao tempo de ensaio (obtido em laboratório) não é compatível com quaisquer dos expoentes de tráfego. Do ponto de vista do brilho, portanto não se conseguiu estabelecer uma relação satisfatória entre o fenômeno real e o simulado em laboratório. Possivelmente este comportamento esteja associado a dificuldades do espectrofotômetro em interpretar o brilho quando ocorrem variações superficiais.

A análise global dos expoentes de tempo de ensaio e tráfego de pessoas, pertencentes às propriedades potencialmente capazes de representar o comportamento à abrasão, mostrou que

o equipamento desenvolvido para este trabalho reproduz o mecanismo de desgaste associado ao tráfego de pessoas sob movimento livre e que, tanto em campo quanto em laboratório, o comportamento pode ser modelado através do expoente 0,5, o que indica que o desgaste ocorre proporcionalmente à raiz quadrada do uso.

Dentre as propriedades analisadas, propõem-se adotar a classificação visual para estimar a vida útil de placas cerâmicas sujeitas à abrasão provocada pelo tráfego de pessoas sob movimento livre. Esta propriedade revela os melhores parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação de 0,912 e 0,75, respectivamente, para laboratório e campo, e erro relativo de 23,7 e 14,5%, para as mesmas situações. 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. A observação da cor, por outro lado, foi descartada, não permitindo estabelecer uma classificação visual significativa.

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. Os modelos finais são descritos pelas equações 7.1 e 7.2, respectivamente, para o comportamento em laboratório e em campo.

$$\Delta vis_l = 0,025 \cdot \sqrt{t} \quad (\text{equação 7.1})$$

$$\Delta vis_{cl} = 0,218 \cdot \sqrt{tr} \quad (\text{equação 7.2})$$

A relação entre tempo (em minutos) e tráfego (em milhões de pessoas) é dada pela equação 7.3.

$$tr = 0,0132.t \quad (\text{equação 7.3})$$

Para o movimento de frenagem, a variação de aspecto é aproximadamente proporcional à raiz cúbica do tráfego, dado em milhões de pessoas. Dessa forma, os expoentes de tempo de ensaio e tráfego não coincidem e, portanto, a relação entre os mesmos não é linear, como mostra a equação 7.5. Conclui-se que o equipamento desenvolvido neste trabalho não reproduz o mecanismo de desgaste provocado pela frenagem do tráfego e, sendo assim não é recomendado para inferir sobre o efeito deste movimento.

$$tr = 0,000115.t^{1,61} \quad (\text{equação 7.5})$$

7.3 APLICAÇÃO DO MODELO

A estimativa de vida útil de novos materiais pode ser feita utilizando-se do equipamento desenvolvido neste trabalho conjuntamente a um painel de referência. Este estabelece as classes visuais relacionadas a certos níveis de desgaste, onde a nova placa desgastada é comparada às de referência para então ser definida sua classe visual.

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 $tr = 0,0132.t$. Para estas 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 compõem o estudo de caso.

Em ambientes cujas condições de agressividade diferem do 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, considera-se os coeficientes de carga (Ca) e

concentração do abrasivo (Co) relativos, tomando-se como padrão os coeficientes associados ao estudo de caso.

7.4 SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS

A seguir, sugere-se alguns temas para o desenvolvimento de novos trabalhos, que venham a contribuir com a evolução do assunto abordado neste trabalho:

- aplicar a metodologia proposta em outros estudos de caso, a fim de avaliar a correspondência com os modelos propostos;
- aplicar a metodologia proposta em placas decoradas e examinar o grau de dificuldade em estabelecer-se a classificação visual;
- analisar o efeito do abrasivo em condições reais de utilização, em função da sua composição granulométrica;
- avaliar o efeito visual decorrente da participação de agentes manchantes durante o processo de desgaste em laboratório através do uso simultâneo de um destes juntamente à barbotina. Supõe-se que a ação causada por um agente manchante, ao longo do tempo, resultante de sucessivos contatos, pode ser substancialmente diferente da ação causada por um contato após o desgaste;
- ampliar a análise de limpabilidade para os demais agentes manchantes previstos na NBR 13818/97, quais sejam, solução de iodo, óxido de cromo e azeite de oliva, de forma a verificar o efeito destes em superfícies desgastadas;
- ampliar o estudo do volume de retenção de óleo (V_o), com vistas a tentar identificar o volume a partir do qual a placa cerâmica tende a reter sujeira.

APÊNDICE A – Difratomogramas

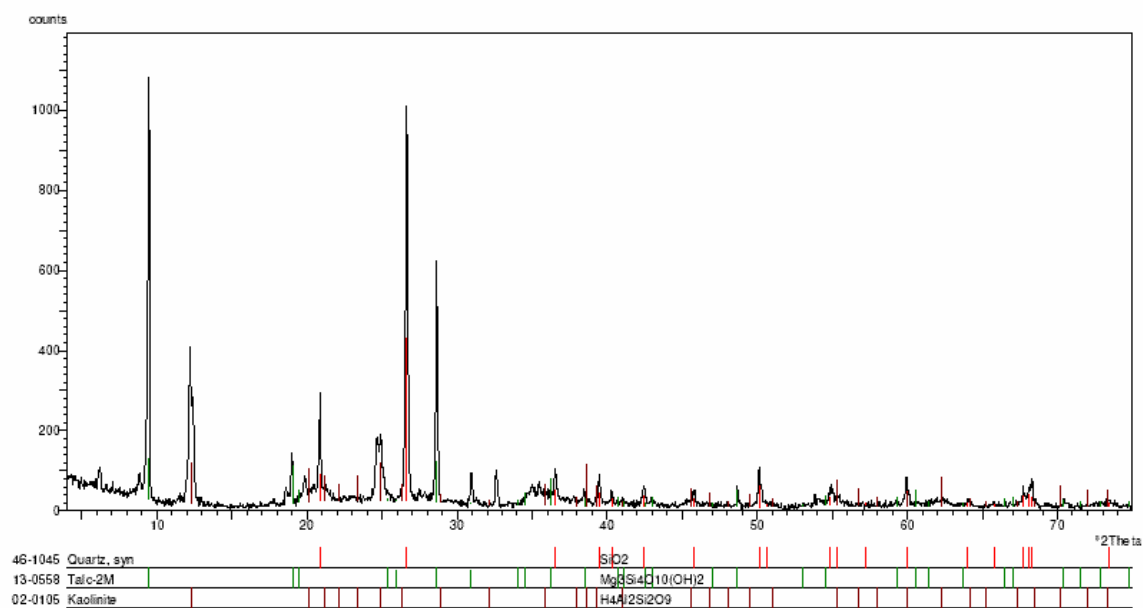


Figura A1: Difratoograma de raios-X do pó atomizado PAD

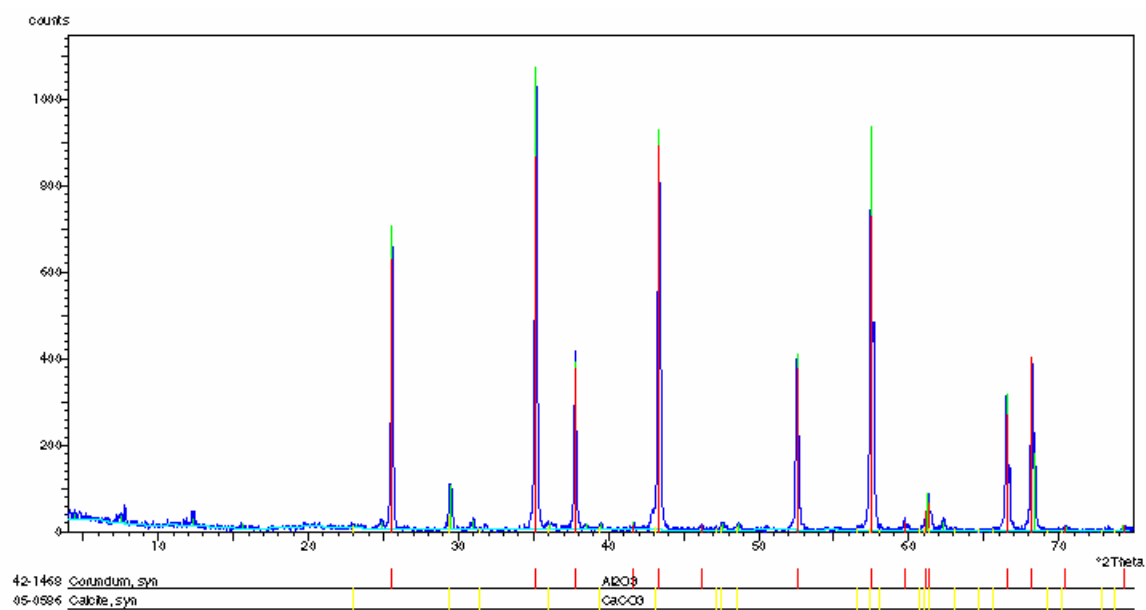


Figura A2: Difratoograma de raios-X do pó atomizado PAE

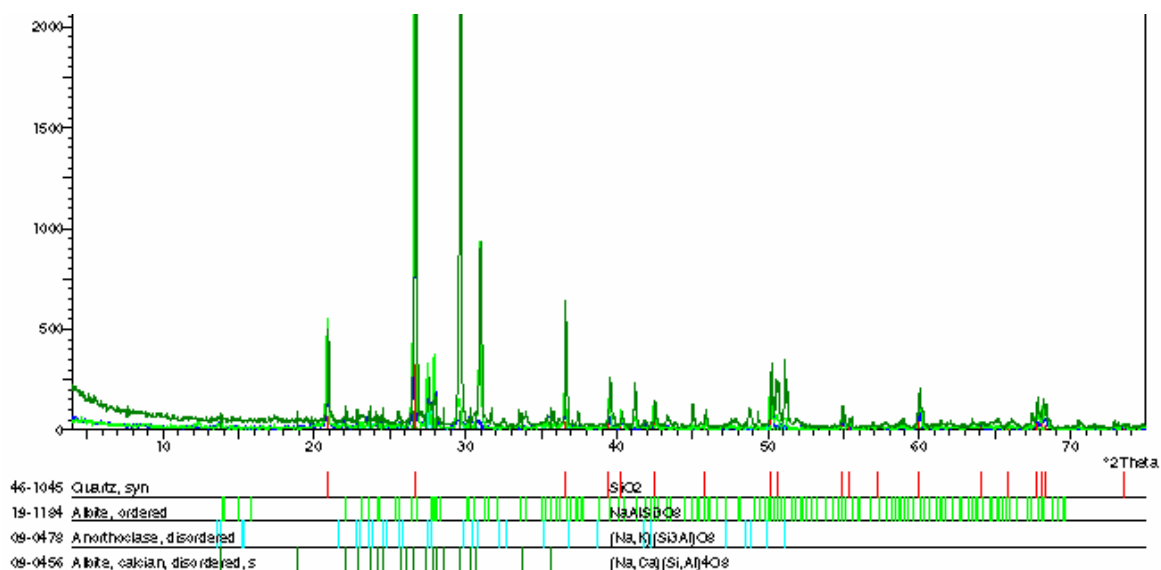


Figura A3: Difratomogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 2mm para as coletas 1, 2 e 3.

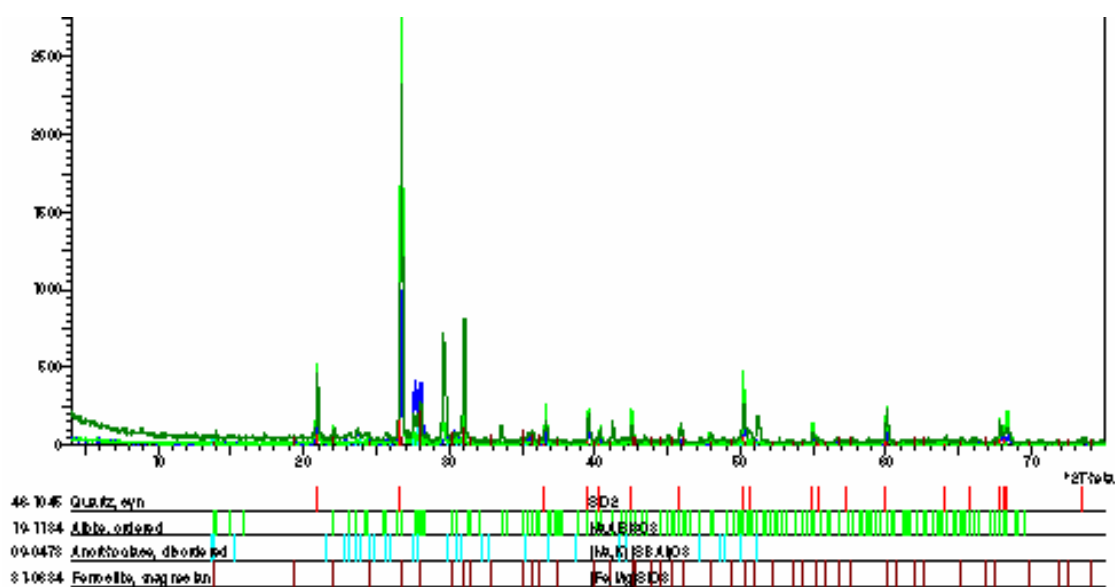


Figura A4: Difratomogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 1,7mm para as coletas 1, 2 e 3

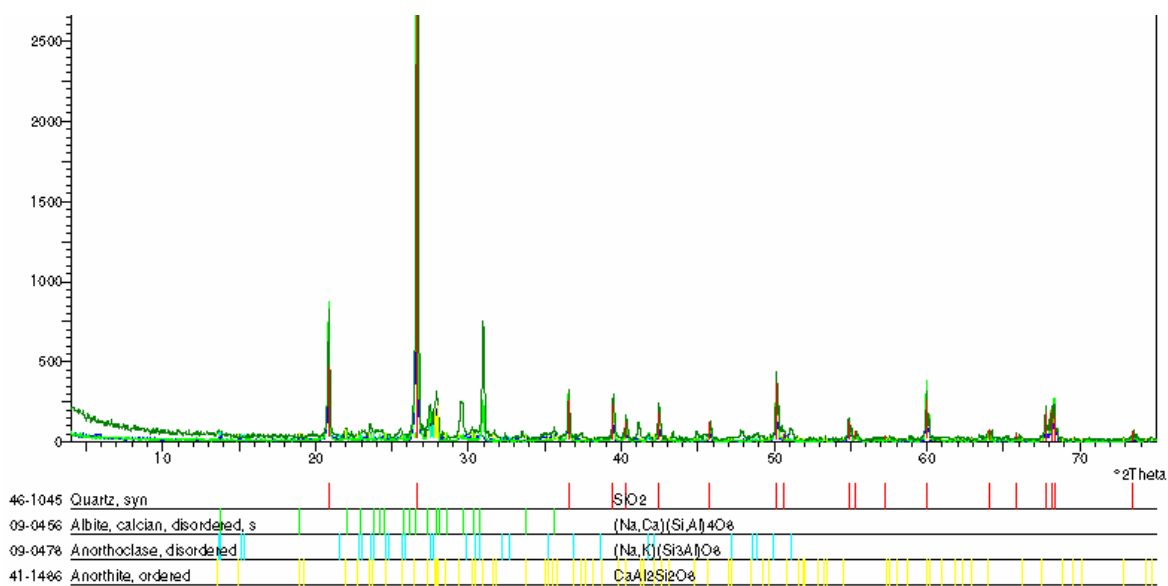


Figura A5: Difractogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 1mm para as coletas 1, 2 e 3

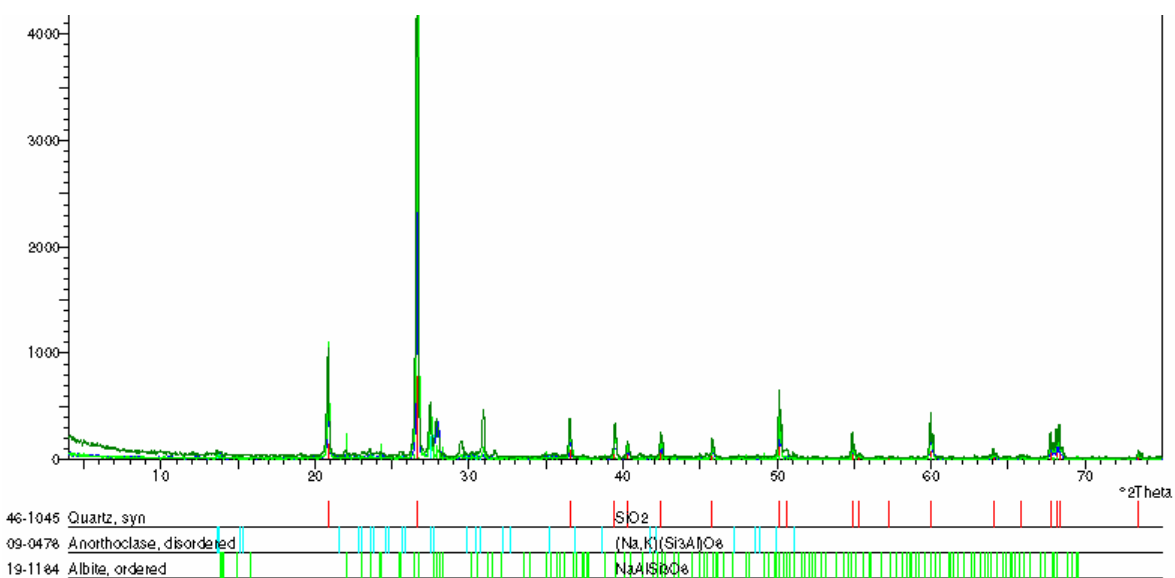


Figura A6: Difractogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 0,6mm para as coletas 1, 2 e 3

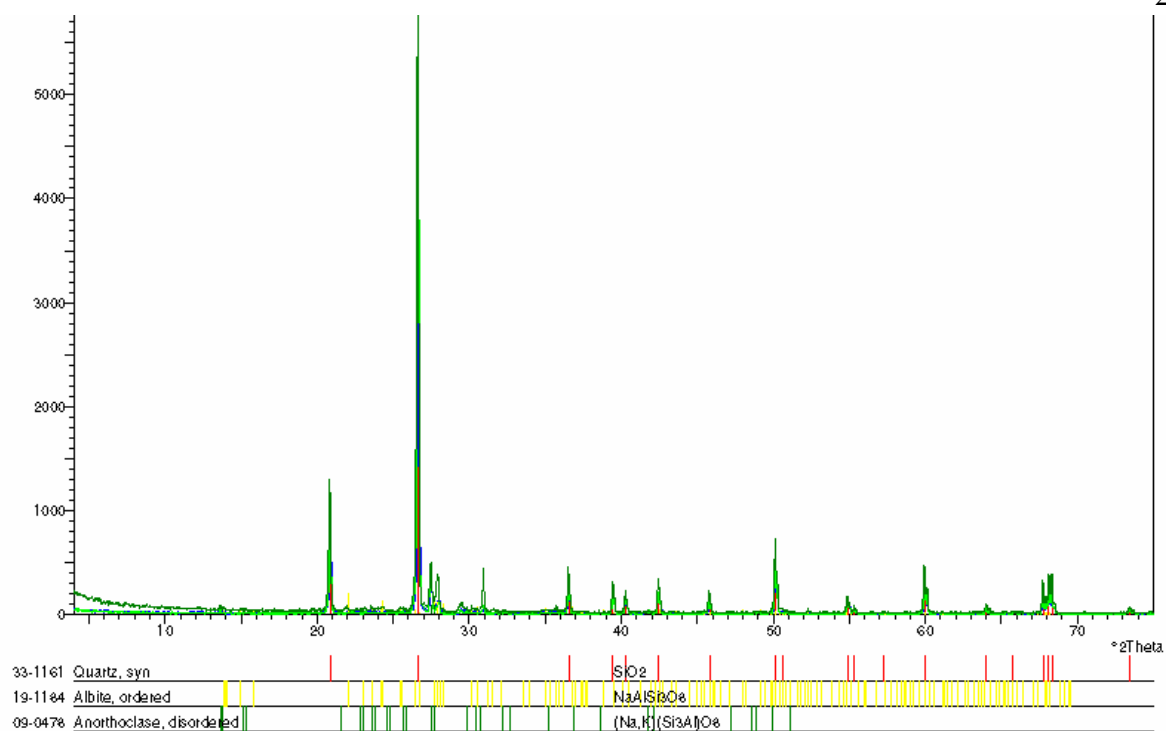


Figura A7: Difratomogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 0,3mm para as coletas 1, 2 e 3

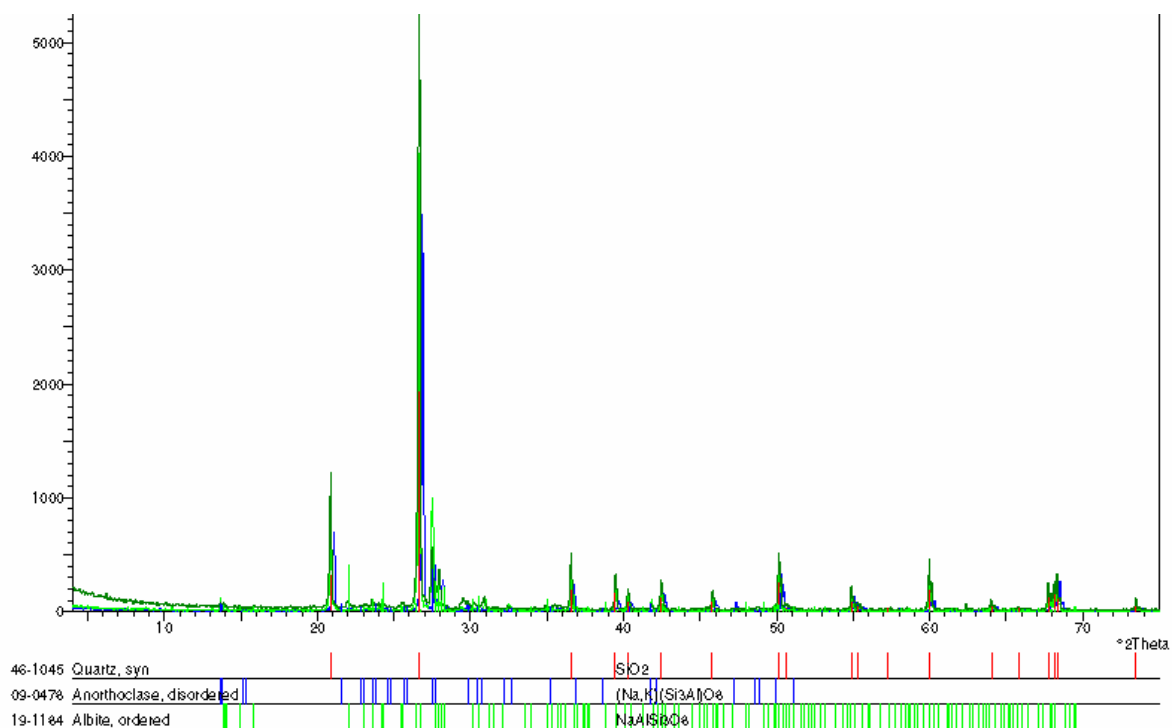


Figura A8: Difratomogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 0,15mm para as coletas 1, 2 e 3

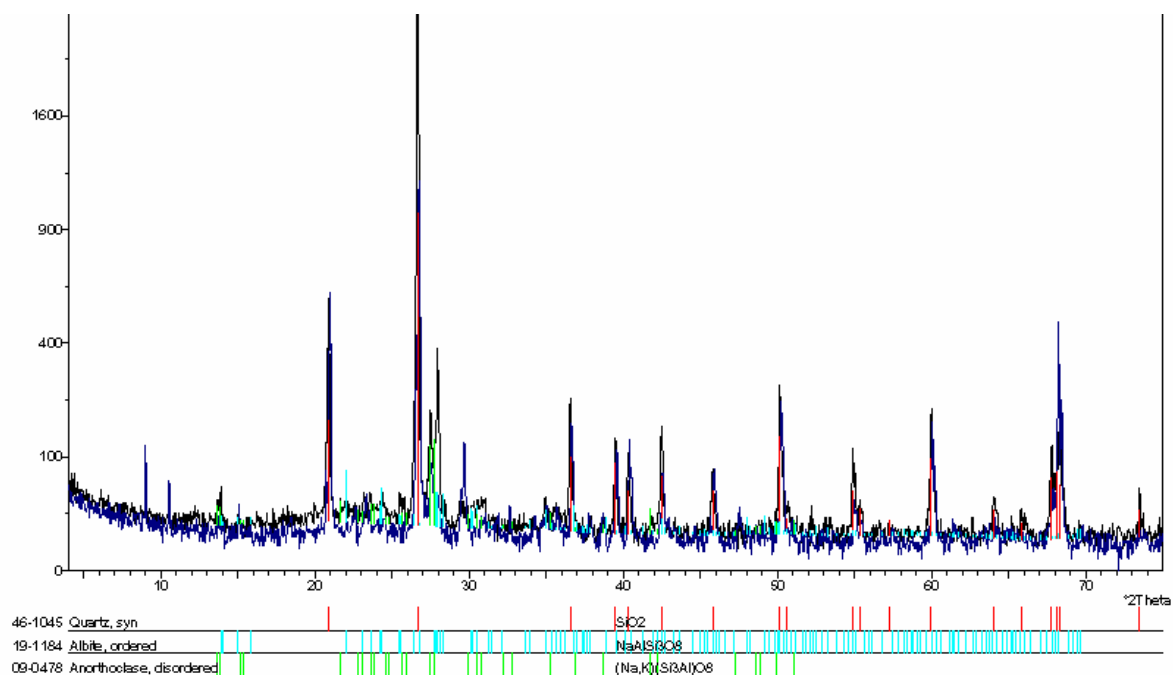


Figura A9: Difractogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica retida na peneira # 0,075mm para as coletas 1, 2 e 3

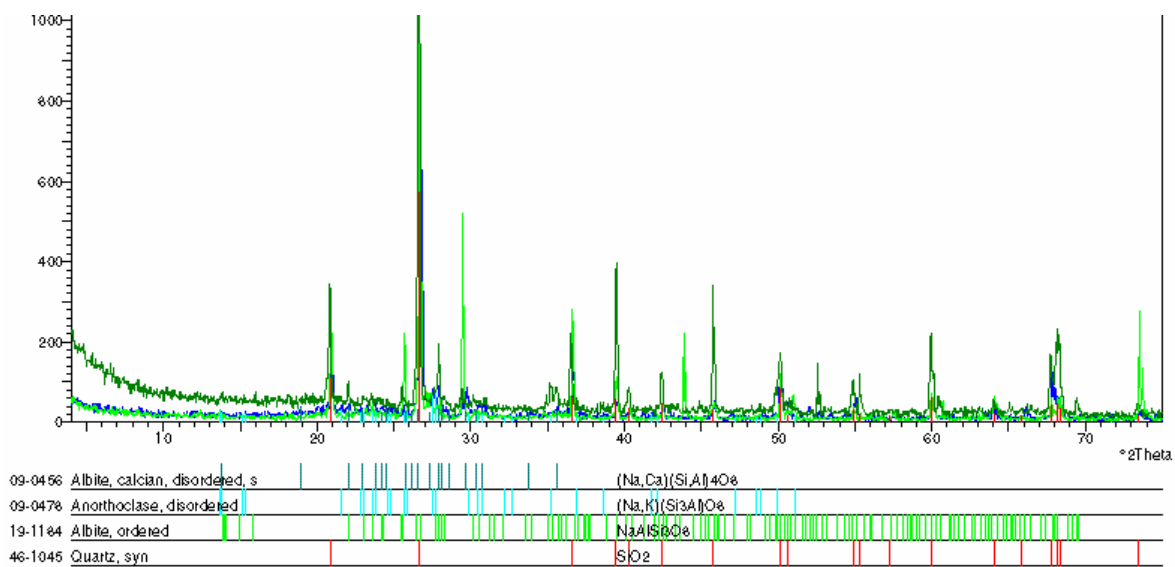


Figura A10: Difractogramas de raios-X correspondente à fração granulométrica passante na peneira # 0,075mm p/ as coletas 1, 2 e 3