

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

RESISTÊNCIA AO ESCORREGAMENTO DE REVESTIMENTOS  
CERÂMICOS: AVALIAÇÃO POR DIFERENTES MÉTODOS, CORRELAÇÕES  
COM A TOPOGRAFIA E O DESGASTE DA SUPERFÍCIE DURANTE O USO

Ana Virgínia Lot

São Carlos  
2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E**  
**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**RESISTÊNCIA AO ESCORREGAMENTO DE REVESTIMENTOS  
CERÂMICOS: AVALIAÇÃO POR DIFERENTES MÉTODOS, CORRELAÇÕES  
COM A TOPOGRAFIA E O DESGASTE DA SUPERFÍCIE DURANTE O USO**

Ana Virgínia Lot

Tese apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia  
de Materiais como requisito parcial à  
obtenção do título de DOUTORA EM  
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Anselmo Ortega Boschi

Coorientador: Dr. Fábio Gomes Melchiadés

Agência Financiadora: CNPq – Processo 142276/2016-2

São Carlos  
2020



## **DEDICATÓRIA**

A quem possa vir a escorregar.

Mais especialmente, às pessoas que, entre seus próprios escorregões, seguem a postos para me levantar a cada queda.

## **VITAE DA CANDIDATA**

Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade de São Carlos

(2016)

Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos

(2013)



¿dime quién camina  
cuando se puede volar?

(Shakira)





## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Ana Virginia Lot, realizada em 17/09/2020.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Anselmo Ortega Boschi (UFSCar)

Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli (UFSCar)

Prof. Dr. João Baptista Baldo (UFSCar)

Profa. Dra. Ana Paula Margarido Menegazzo (CCB)

Prof. Dr. Dachamir Hotza (UFSC)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.  
O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.



## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa (processo 142276/2016-2).

Ao PPGCEM/DEMa, pela estrutura disponibilizada.

À Dra. Ana Paula Margarido e todo o CCB, pela concessão de amostras e realização dos testes de escorregamento e manchamento. Em especial, à Lilian Lima Dias (*in memoriam*), por suas contribuições e inspiração.

Ao Prof. Dr. José Antônio Eiras, do Grupo de Materiais Ferróicos do Departamento de Física da UFSCar, pela concessão do Perfilômetro Mecânico, e ao André e à Lais, pela atenção e auxílio durante o uso do equipamento.

Ao Prof. Dr. Renato Jasinevicius, do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, pelas medidas realizadas com o Perfilômetro Óptico.

À Eliane Revestimentos pelas medidas realizadas com o BOT-3000E.

À Reitoria da UFSCar, pela permissão e concessão do espaço para o assentamento dos pisos no Restaurante Universitário do Campus de São Carlos. Ao Mazinho, pela realização da obra. À equipe de colaboradores do buffet, por todo o esforço para o êxito do experimento. E à toda a comunidade universitária, pela compreensão e participação no mesmo.

Ao LaRC e ao CRC, por anos de acolhimento, e às colegas do grupo, pelo suporte com atividades deste e de outros trabalhos.

Aos orientadores que muito admiro, Prof. Anselmo e Fábio, pelas portas abertas e por uma década de caminhada, lado ao lado, em que tive a honra de poder desfrutar de sabedoria imensurável e convivência prazerosa.

À minha família, por ser o solo firme e fértil que dá suporte às minhas raízes e me proporciona as condições necessárias para florescer.

Ao Álvaro, pela força e motivação nos episódios mais críticos do trabalho.

Às companhias de almoço e café, pelas conversas inteligentes e risos que trouxeram para meus dias mais cinzas. Em especial, aos que se tornaram ouvidos e ombros amigos neste cotidiano e que levarei para toda a vida.

Ao Lô, Pistola, Banzo, Jack e Ferrugem, pelo cuidado comigo e pelos anos de alegrias vivenciadas. Por ter me encontrado com vocês e em vocês.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O desenvolvimento de pisos cerâmicos seguros para uso em ambientes associados a riscos de acidentes de escorregamento, aumentados na presença de água e contaminantes, esbarra nas seguintes dificuldades: 1) o aumento da rugosidade das superfícies pode melhorar sua resistência ao escorregamento, mas, por outro lado, torná-las mais susceptíveis ao encardimento e desgaste. 2) há uma variedade de métodos para avaliação e classificação dos produtos em recomendáveis ou não para áreas onde há riscos de escorregamento e os resultados de métodos distintos divergem 3) o bom desempenho de um piso, medido antes da sua instalação, pode não ser mantido ao longo da sua vida útil. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi contribuir para o desenvolvimento de pisos seguros e duráveis, através do entendimento do papel e da forma como variam as características das superfícies relacionadas ao seu desempenho. Várias tipologias de pisos comerciais foram caracterizadas quanto à sua resistência ao escorregamento - com os dispositivos DS, BOT-3000 e Pêndulo - e resistência ao manchamento. Os resultados foram correlacionados com parâmetros de rugosidade obtidos por perfilômetros e se identificaram as características das superfícies mais relevantes para seu desempenho. Os pisos foram submetidos à uma situação de tráfego intenso, para aceleração do seu desgaste e encardimento, e, então, reavaliados. Observaram-se alterações superficiais como a redução na rugosidade média, amplitude e inclinação do perfil, aumento do espaçamento entre irregularidades e arredondamento de seus formatos. Em consequência, observou-se, para os três métodos de avaliação da resistência ao escorregamento, a deterioração dessa propriedade para todas as superfícies que, inicialmente, haviam apresentado desempenho satisfatório. Aspectos das superfícies também foram associados à tendência das mesmas ao acúmulo de sujeira e foi proposta uma análise complementar à forma usual de previsão do encardimento dos pisos cerâmicos em laboratório.

**Palavras-chave:** resistência ao escorregamento; rugosidade; pisos cerâmicos.



## ABSTRACT

### CERAMIC TILES SLIP RESISTANCE: EVALUATION BY DIFFERENT METHODS, CORRELATIONS WITH THE TOPOGRAPHY AND SURFACE CHANGES DURING USE

The development of ceramic floors for safe use in environments associated with slip and fall accident risks, which are even higher in the presence of water and contaminants, deals with the following difficulties: 1) although some roughness increase may contribute to the slip resistance of the surfaces, on the other hand, this can make them more susceptible to grime and wear. 2) there is a wide variety of methods for evaluating and classifying tiles as recommended or not for use in slip-risk areas and results of different methods may disagree between them. 3) satisfactory slip performances of floors measured before installation may not be maintained during their use. In this sense, the objective of this work was to contribute to the development of safe and durable ceramic floors by identifying the characteristics of the surfaces related to their performance and investigating how they vary over time. Several types of commercial floors were characterized regarding their slip resistance - with the DS, BOT-3000 and Pendulum devices - and staining resistance. The results were correlated with roughness parameters obtained by profilometers for the identification of the surface's characteristics relevant to their performance. The samples were subjected to heavy traffic, to accelerate their wear and grime, and re-evaluated. Surface changes were observed, such as reductions in average roughness and profile amplitude and inclination, as well as the increase in the spacing between irregularities and rounding of their shapes. Consequently, all the high initial slip resistance surfaces presented a deterioration of this property in the three methods of evaluation. Surface aspects were also associated with tendency to grime and a new complementary analysis to the usual laboratorial method for predicting ceramic floors cleanability was proposed.

**Keywords:** slip resistance; roughness; ceramic tiles.



## SUMÁRIO

	Pag.
FOLHA DE APROVAÇÃO .....	i
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT .....	vii
SUMÁRIO .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
SÍMBOLOS E ABREVIações .....	xxi
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Acidentes de queda por escorregamento .....	3
2.2 Tribologia do escorregamento .....	5
2.2.1 O atrito durante a caminhada .....	5
2.2.2 Mecanismos do atrito.....	6
2.2.3 O controle do atrito para prevenção do escorregamento .....	8
2.3 Atrito e escorregamento em pisos cerâmicos.....	9
2.3.1 Revestimentos cerâmicos.....	9
2.3.2 A topografia dos revestimentos cerâmicos .....	11
2.3.3 Condições de uso dos pisos.....	14
2.3.3.1. Presença de contaminantes .....	14
2.3.3.2. Tempo de uso: manutenção e desgaste.....	15
2.4 A avaliação da resistência ao escorregamento .....	16
2.4.1 Pêndulo Britânico .....	17
2.4.2 Deslizadores motorizados .....	18
2.4.3 Rampa.....	20
2.4.4 Considerações sobre os métodos de medida da resistência ao escorregamento .....	22
2.5 A avaliação da rugosidade .....	23
2.5.1 Perfilômetro de contato.....	24

2.5.2.	Perfilômetro Óptico .....	32
2.5.3.	Correlações Rugosidade x Resistência ao escorregamento.....	36
2.5.4.	Manutenção do desempenho de pisos cerâmicos durante o uso. ....	42
2.5.5.	O desgaste.....	42
2.5.6.	O encardimento .....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
3.1	Etapa 1.....	47
3.2	Etapa 2.....	51
3.3	Etapa 3.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1	ETAPA 1 .....	59
4.1.1	Avaliação da Resistência ao Escorregamento.....	59
4.1.2	Seleção de amostras para prosseguimento do estudo .....	69
4.1.3	Avaliação da Resistência ao Manchamento .....	74
4.1.4	Conclusões Parciais.....	77
4.2	ETAPA 2 .....	79
4.2.1	Caracterização da rugosidade das superfícies. ....	79
4.2.2	Correlações entre resistência ao escorregamento e rugosidade .....	93
4.2.3	Expressões matemáticas para descrição da resistência ao escorregamento de pisos cerâmicos. ....	110
4.2.4	Conclusões parciais.....	117
4.3	ETAPA 3 .....	119
4.3.1	Exposição das amostras ao tráfego de pedestres e contaminações ...	119
4.3.2	Alterações superficiais das amostras após sua utilização. ....	119
4.3.3	Manutenção das características relevantes para o desempenho das superfícies durante sua utilização .....	159
4.3.4	Previsão realista do encardimento das superfícies.....	181
4.3.5	Conclusões parciais.....	187
5	CONCLUSÕES.....	189
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	191
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	193

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Revestimentos Cerâmicos: Classificação de acordo com método de conformação e absorção de água (AA) pela NBR 13817:1997 e 15463:2013 [29,30]. .....	10
Tabela 2.2 Pêndulo Britânico: Limites de segurança para pisos [52].....	18
Tabela 2.3 Tortus: Uso de pisos conforme coeficiente de atrito [55].....	19
Tabela 2.4 Coeficiente de atrito segundo a norma DIN 51097 para pés descalços em superfícies contaminadas com água ou sabão [60]. .....	21
Tabela 2.5 Classificação segundo a norma DIN 51130 para superfícies contaminadas com óleo de motor e operador com botas especializadas, sendo R9 a classe de pisos mais escorregadios [61]. .....	21
Tabela 2.6 Parâmetros de rugosidade superficial – dados e ilustrações compilados de [49,69,70,71,72,73]. .....	26
Tabela 2.7 Parâmetros fornecidos pelo perfilômetro óptico [79] .....	34
Tabela 2.8 Potencial de escorregamento do piso de acordo com Rz [83]. ....	36
Tabela 3.1 Tipologias de superfícies selecionadas para o estudo. ....	47
Tabela 3.2 Tipo e especificações da borracha utilizada para a varredura com os métodos de avaliação da resistência ao escorregamento estudados. ....	48
Tabela 4.1 R <sup>2</sup> do ajuste linear dos dados para as correlações entre os métodos estudados.....	65
Tabela 4.2 Coeficiente de atrito das amostras selecionadas, medidas com DS (a seco e a úmido), BOT-3000E (a seco e a úmido) e Pêndulo (a úmido). ....	71
Tabela 4.3 Classificação das amostras avaliadas quanto à limpabilidade, após contato com agentes manchantes previstos pela ISO 10545-14. ....	74
Tabela 4.4 Classificação das superfícies quanto a limpabilidade após contato com agentes manchantes previstos pela ASTM C1378. Para amostras com limpabilidade nível 2, consta na tabela o agente limpante capaz de remover as manchas (HCl: solução de HCl, KOH: solução de KOH ou A: acetona). ....	76
Tabela 4.5 Parâmetros de rugosidade das superfícies avaliadas, obtidos para o cut-off de 2,5 mm. ....	88

Tabela 4.6 Parâmetros de rugosidade tridimensionais das amostras avaliadas, pelo perfilômetro óptico. ....	89
Tabela 4.7. Coeficientes de correlação, $R^2$ , para o ajuste linear dos dados de resistência ao escorregamento em função de parâmetros de rugosidade. ....	95
Tabela 4.8 Coeficiente de determinação – $R^2$ – entre resistência ao escorregamento e parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro mecânico para o conjunto total de amostras e o subgrupo selecionado do mesmo. ....	101
Tabela 4.9 Coeficiente de determinação $R^2$ entre resistência ao escorregamento e parâmetros de rugosidade obtidos com o perfilômetro óptico para o conjunto total de amostras (esquerda) e um subgrupo do mesmo (direita). ....	102
Tabela 4.10. Combinações de parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro mecânico e coeficiente de determinação – $R^2$ – entre os valores calculados a partir dessas expressões e a resistência ao escorregamento a úmido das doze superfícies avaliadas (conjunto completo de amostras). ....	113
Tabela 4.11 Combinações de parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro ótico e coeficiente de determinação – $R^2$ – entre os valores calculados a partir dessas expressões e a resistência ao escorregamento a úmido das doze superfícies avaliadas (conjunto completo de amostras). ....	115
Tabela 4.12 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície A3, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	122
Tabela 4.13 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície C2, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	125
Tabela 4.14 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície E2, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	128
Tabela 4.15 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície E5, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	132

Tabela 4.16 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície F3, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	136
Tabela 4.17 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície F7, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	139
Tabela 4.18 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície G1, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	142
Tabela 4.19 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície G4, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	145
Tabela 4.20 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície H4, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	148
Tabela 4.21 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície I2, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	151
Tabela 4.22 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície J6, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	154
Tabela 4.23 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície L13, antes e após 6 meses de uso intensivo. ....	157
Tabela 4.24 Parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro mecânico para as amostras avaliadas após 6 meses assentadas em área de tráfego intenso no Restaurante Universitário da UFSCar. ....	160
Tabela 4.25 Parâmetros de rugosidade tridimensionais fornecidos pelo perfilômetro óptico para as amostras avaliadas após 6 meses assentadas em área de tráfego intenso no Restaurante Universitário da UFSCar. ....	161

Tabela 4.26. Notas atribuídas à limpabilidade das amostras estudadas por observação visual e classificação segundo procedimento previsto pela NBR - para agentes manchantes recomendados por esta norma e ASTM.....	182
Tabela 4.27 Limpabilidade das superfícies, de 1 a 5, em relação a 9 agentes manchantes, recomendados pela ISO 10545-14 e ASTM C1378.....	184

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1 Etapas de um acidente de queda por escorregamento [15].....	4
Figura 2.2 Forças aplicadas e forças de reação na caminhada [21].....	5
Figura 2.3 Composição da textura de uma superfície real: a ondulação e a rugosidade [37]. .....	11
Figura 2.4 Superfície com relevo macroscópico [43]. .....	13
Figura 2.5 Curva de Stribeck – regime de lubrificação limite, misto e hidrodinâmico [46].....	14
Figura 2.6 Pêndulo Britânico para avaliação de superfícies [51] .....	17
Figura 2.7 Deslizadores motorizados: Tortus e BOT-3000E [51].....	19
Figura 2.8 Execução do teste da rampa por um operador [58,59].....	20
Figura 2.9 Componentes da superfície medida ou efetiva [65] .....	24
Figura 2.10 Perfilômetro mecânico de contato.....	25
Figura 2.11 Perfil primário obtido com um perfilômetro, perfil filtrado, e comprimentos para avaliação da rugosidade. Adaptado de [67].....	26
Figura 2.12 Impossibilidade de penetração do apalpador em vales estreitos (a) e reentrâncias (b) [67]. .....	32
Figura 2.13 Perfilômetro óptico Wyko e componentes do sistema [74].....	32
Figura 2.14 Perfilômetro óptico interfereométrico [77]. .....	33
Figura 2.15 Canhão com lentes para diferentes aumentos [74].....	33
Figura 2.16 Perfil com $R_k$ elevado, caso extremo [72].....	37
Figura 2.17 Parâmetros topográficos pertinentes estabelecidos como determinantes da resistência ao escorregamento [84].....	38
Figura 2.18 Idoneidade dos diferentes métodos de ensaio de escorregamento em função das características das superfícies [85].....	39
Figura 2.19 Parâmetro $S_{sk}$ como indicação da distribuição de picos e vales sobre o plano de referência médio do perfil [53] .....	40
Figura 2.20 Efeito das diferenças de $S_{sk}$ na resistência ao escorregamento de duas superfícies com $S_p$ e $R_k$ próximos. ....	41

Figura 2.21 Descrição simplificada para possíveis situações de contato entre a superfície do piso e a do pé/sapato.....	42
Figura 2.22 Máquina e cabeças polidoras giratórias sobre amostras [86].....	43
Figura 2.23 Durabilidade da resistência ao escorregamento para diferentes pisos cerâmicos [86]. .....	44
Figura 3.1 Local do assentamento das amostras no Restaurante Universitário da UFSCar e disposição dos pisos selecionados para o estudo, ao longo da faixa delimitada. ....	53
Figura 3.2 Finalização da obra e montagem do corredor projetado para centralizar e direcionar o fluxo de pedestres sobre a passarela de amostras. .	54
Figura 3.3 Funcionamento do esquema de passagem de pedestres no corredor projetado, sobre a passarela de amostras.....	55
Figura 3.4 Remoção das amostras da área do experimento no Restaurante universitário da UFSCar e uma das placas removidas. ....	56
Figura 4.1 Coeficiente de atrito dinâmico médio, $\mu_d$ , para os grupos de amostras das diferentes tipologias de pisos cerâmicos estudados – esmaltados, G, e não esmaltados, UG – avaliados com o DS, o BOT-3000E e o Pêndulo. ....	59
Figura 4.2 Correlações entre os resultados de resistência ao escorregamento obtidos com métodos avaliados – DS, BOT e Pêndulo – correlacionados dois a dois.....	62
Figura 4.3 Variação do $\mu_d$ determinado com o BOT e o Pêndulo, para amostras com coeficientes de atrito entre 0,35 e 0,45 quando medidos pelo DS. ....	65
Figura 4.4 Correlações entre os resultados de resistência ao escorregamento obtidos com a interface seca e úmida para o DS e o BOT.....	67
Figura 4.5 Amostras selecionadas para caracterização superficial.....	70
Figura 4.6 Coeficiente de atrito das amostras selecionadas, avaliadas na condição úmida pelo DS, BOT-3000E e Pêndulo.....	73
Figura 4.7 Perfis de rugosidade das amostras avaliadas, obtidos a partir da varredura de 12,5 mm das superfícies, utilizando-se cut off de 2,5 mm.....	80
Figura 4.8 Visão lateral tridimensional (esquerda) e visão superior (direita) da topografia das superfícies estudadas, obtidas com o perfilômetro óptico. ....	83

Figura 4.9. Coeficiente de atrito avaliado pelo DS, a úmido, em função dos parâmetros de rugosidade Rz, $\Delta a$ , Rk e Rpm.....	97
Figura 4.10. Coeficiente de atrito avaliado pelo BOT-3000E, a úmido, em função dos parâmetros de rugosidade Rz, $\Delta a$ , Rk e Rpm. ....	97
Figura 4.11 Coeficiente de atrito avaliado pelo Pêndulo Britânico, a úmido, em função dos parâmetros de rugosidade Rz, $\Delta a$ , Rk e Rpm. ....	98
Figura 4.12 Superfície A3 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	121
Figura 4.13 Superfície C2 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	124
Figura 4.14 Superfície E2 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	127
Figura 4.15 Superfície E5 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	131
Figura 4.16 Superfície F3 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	135
Figura 4.17 Superfície F7 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	138
Figura 4.18 Superfície G1 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	141
Figura 4.19 Superfície G4 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.....	144

Figura 4.20 Superfície H4 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica. ....	147
Figura 4.21 Superfície I2 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica. ....	150
Figura 4.22 Superfície J6 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica. ....	153
Figura 4.23 Superfície L13 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica. ....	156
Figura 4.24 Rugosidade média obtida pelo perfilômetro mecânico, $R_a$ , e óptico, $S_a$ , para as amostras avaliadas antes e a após 6 meses de uso. ....	162
Figura 4.25 Altura da zona central da rugosidade obtida com o perfilômetro mecânico, $R_k$ , antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	164
Figura 4.26 Índice de rugosidade obtido pelo perfilômetro mecânico, $I_r$ , antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	165
Figura 4.27 Amplitude total do perfil obtida pelo perfilômetro mecânico, $R_t$ , antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	166
Figura 4.28 Parâmetro $R_z$ obtido pelo perfilômetro mecânico, antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	167
Figura 4.29 Altura média de picos, $R_{pm}$ , e altura da zona de picos na curva de razão de material, $R_{pk}$ , ambos obtidos com o perfilômetro mecânico, antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	168
Figura 4.30 Profundidade do maior vale da superfície, $S_v$ , obtida pelo perfilômetro óptico, antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	169
Figura 4.31 Volume de líquido mínimo para o recobrimento das superfícies das amostras, antes e após 6 meses de uso. ....	171
Figura 4.32 Comprimento de onda médio dos perfis das amostras, antes e após 6 meses de uso. ....	172

Figura 4.33 Espaçamento entre picos locais, $S$ , e número total de picos locais no perfil, $P_c$ , antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	174
Figura 4.34 Densidade de picos locais no perfil das amostras analisadas, antes de serem expostas ao tráfego de pedestres. ....	175
Figura 4.35 – Inclinação média do perfil das amostras, antes e após 6 meses de uso, avaliada pelo perfilômetro mecânico. ....	176
Figura 4.36 Resistência ao escorregamento, antes e após 6 meses de uso das amostras, avaliada, a úmido, pelo DS, BOT-3000E e Pêndulo Britânico. ....	178
Figura 4.37 Assimetria do perfil avaliada com o perfilômetro mecânico, $S_k$ , antes e após 6 meses de uso das amostras. ....	180
Figura 4.38 Novo índice de limpabilidade, $L$ , estimado e manutenção da limpeza após o uso de acordo com análise visual por observadores voluntários. ....	186



## SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR = Norma Brasileira

ANSI = *American National Standards Institute*

DIN = *German Institute for Standardization*

ISO = *International Organization for Standardization*

ASTM = *American Society for Testing and Materials Standards*

UNE = *Asociación Española de Normalización*

V = componente vertical da força aplicada pelo pé do pedestre na caminhada

H = componente horizontal da força aplicada pelo pé do pedestre na caminhada

$F_{at}$  = força de atrito

$\mu$  = coeficiente de atrito ou atrito disponível no sistema durante a caminhada

$\mu_e$  = coeficiente de atrito estático

$\mu_d$  = coeficiente de atrito dinâmico

AA = absorção de água de revestimentos cerâmicos

G = revestimentos cerâmicos esmaltados (*glazed*)

UG = revestimentos cerâmicos não esmaltados (*unglazed*)

ABS = textura para superfícies cerâmicas em forma de pontos produzidos com esmalte

PTV = Pendulum Test Value, escala de resultados do Pêndulo Britânico

BOT = BOT-3000E, dispositivo de avaliação da resistência ao escorregamento

DS = *Dynamic Slip*, dispositivo de avaliação da resistência ao escorregamento

$R^2$  = coeficiente de determinação para uma correlação linear entre variáveis.

HCl = Solução de HCl 3% (V/V)

KOH = Solução de KOH (200 g/L)

A = acetona, grau técnico

$\lambda_c$  ou “*cut-off*” – comprimento de amostragem na avaliação da rugosidade

LM = linha média do perfil de rugosidade

$R_a$  = rugosidade média do perfil de rugosidade

$R_q$  = rugosidade média quadrática do perfil de rugosidade

$R_c$  = altura média de picos + profundidade média de vales do perfil de rugosidade

$R_z$  = altura média dos 5 maiores picos + profundidade média dos 5 maiores vales do perfil de rugosidade

$R_p$  = altura do maior pico do perfil de rugosidade

$R_{pm}$  = média da altura do maior pico em cada *cut-off* do perfil de rugosidade

$R_v$  = profundidade do maior vale do perfil de rugosidade

$R_{vm}$  = média da profundidade do maior vale em cada *cut-off* do perfil de rugosidade

$R_t$  = altura total do perfil do perfil de rugosidade

$R_y$  = média da máxima distancia pico-vale em cada *cut-off* do perfil de rugosidade

$R_{3y}$  = máxima distância entre o 3º maior pico e 3º maior vale em cada *cut-off* do perfil de rugosidade

$R_{3z}$  = média da distância entre o 3º maior pico e 3º maior vale em cada *cut-off*

$S_m$  = distância média entre picos adjacentes do perfil de rugosidade

$S$  = distância média entre picos locais do perfil de rugosidade

$P_c$  = número de picos locais do perfil de rugosidade

$\Delta a$  = inclinação média do perfil de rugosidade

$\Delta q$  = inclinação média quadrática do perfil de rugosidade

$\lambda_a$  = comprimento de onda médio do perfil de rugosidade

$\lambda_q$  = comprimento de onda médio quadrático do perfil de rugosidade

$S_k$  = assimetria (*skewness*) do perfil de rugosidade

$K_u$  = curtose (*kurtoise*) do perfil de rugosidade

$L_o$  = comprimento do perfil de rugosidade desenvolvido

$I_r$  = índice de rugosidade do perfil

$m_r$  = porcentagem de material na curva de razão de material de uma superfície

$R_k$  = altura da zona central na curva de razão de material de uma superfície

$R_{pk}$  = altura da zona de picos na curva de razão de material de uma superfície

$R_{vk}$  = altura da zona de vales na curva de razão de material de uma superfície

$m_{r1}$  = porcentagem de material correspondente ao limite entre a zona de picos e zona central da rugosidade em uma curva de razão de material

$m_{r2}$  = porcentagem de material correspondente ao limite entre a zona central da rugosidade e a zona dos vales em uma curva de razão de material

$A_1$  = área entre a curva de razão de material e a linha que separa a zona de picos e a zona central de um perfil de rugosidade

$V_1$  = parâmetro tridimensional análogo a  $A_1$

$A_2$  = área entre a curva de razão de material e a linha que separa a zona central e a zona de vales de um perfil de rugosidade

$V_2$  = parâmetro tridimensional análogo a  $A_2$

$S_a$  = rugosidade média da topografia da superfície

$S_q$  = rugosidade média quadrática da topografia da superfície

$S_z$  = altura média dos 5 maiores picos + profundidade média dos 5 maiores vales da topografia da superfície

$S_p$  = altura do maior pico da topografia da superfície

$S_v$  = profundidade do maior vale da topografia da superfície

$S_{sk}$  = assimetria (*skewness*) da topografia da superfície

$S_{ku}$  = curtose (*kurtoise*) da topografia da superfície

$S_{dq}$  = inclinação média quadrática da topografia da superfície

$S_{dr}$  = razão entre a área interfacial desenvolvida e a área varrida da topografia da superfície

$A_{surf}$  = área superficial

$A_{lat}$  = área lateral da superfície

Index área = índice de área da superfície

$V$  = volume natural da superfície



## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de revestimentos cerâmicos do mundo [1]. A popularização do uso desses produtos em diversos ambientes, se deve, em grande medida, às vantagens que oferecem em relação a outros tipos de revestimentos. Um aspecto muito valorizado das superfícies cerâmicas mais lisas, em especial, é a facilidade com que podem ser limpas [2]. Isso justifica sua larga utilização em ambientes onde permanecem em contato com sujidades e líquidos, como áreas externas, banheiros, cozinhas e espaços comerciais e públicos de alto tráfego. No entanto, essas superfícies lisas, tipicamente já associadas a acidentes de escorregamento, podem se tornar ainda menos seguras na presença de líquidos em tais condição de uso [3].

Esse tipo de acidente causa sofrimento e graves consequências para a saúde e qualidade de vida do acidentado e família – principalmente no caso de idosos – além de perdas econômicas [4]. Isso evidencia a necessidade do uso de pisos adequados aos riscos de escorregamento oferecidos por diferentes tipos de ambiente. Nesse sentido, sabe-se que a presença de alta rugosidade e/ou relevo nas superfícies pode contribuir com sua resistência ao escorregamento [5], mas que, por outro lado, pode prejudicar sua limpabilidade.

Conciliar esses aspectos é um desafio global que requer um entendimento abrangente sobre a forma com que diferentes características superficiais de um piso podem contribuir com seu desempenho. Entre tantos fatores que dificultam a solução desse problema, cita-se a própria complexidade dos mecanismos de atrito desenvolvidos na interface entre o piso e o calçado, que variam, ainda, consideravelmente com as condições de uso dos produtos.

Há, também, a ausência de um método de medida da resistência ao escorregamento universalmente aceito, que forneça resultados reprodutíveis, confiáveis e representativos dos reais riscos de acidente oferecidos pelo piso. Assim, ainda que os produtos sejam classificados, de acordo com as normas vigentes, como recomendáveis para uso em locais onde os riscos de acidente são críticos, há insegurança, por parte dos produtores, sobre se os mesmos são, de fato, adequados para tais ambientes. Ademais, ainda que as propriedades

tribológicas de um produto sejam satisfatórias antes da sua instalação, estas podem ser prejudicadas ao longo do tempo de uso, devido às mudanças em suas características superficiais provocadas pelo desgaste e encardimento [6].

Deve-se mencionar, ainda, que, na falta de um método universal para a avaliação da resistência ao escorregamento, dispositivos de medida e limites de segurança distintos são adotados em normas de diferentes países. Como resultados de métodos diferentes podem divergir, um mesmo produto pode ser aprovado de acordo com a norma de um determinado país e reprovado em outra, o que dificulta a adequação dos pisos para exportação para diferentes mercados.

Essas questões evidenciam a necessidade de estudos aprofundados que possam trazer novas contribuições sobre o tema. Dentro do contexto apresentado, o objetivo do presente trabalho é contribuir para a identificação das principais variáveis que influenciam na resistência ao escorregamento e outros aspectos do desempenho de pisos cerâmicos, como a resistência ao desgaste e limpabilidade, tendo em vista o desenvolvimento de pisos com performance otimizada. Como objetivos específicos, o estudo pretende:

- Estudar o comportamento de variedades de tipologias de pisos quando avaliadas por diferentes métodos de medida da resistência ao escorregamento.
- Buscar correlações entre resultados de resistência ao escorregamento obtidos por dispositivos distintos, para diferentes tipologias de pisos.
- Identificar as características superficiais dos pisos cerâmicos que afetam em seu desempenho em termos de resistência ao escorregamento, limpabilidade e resistência ao desgaste
- Investigar o efeito das características identificadas no desempenho dos pisos cerâmicos, de forma que estas possam ser controladas no processo de fabricação desses produtos para o desenvolvimento de pisos com performance otimizada.
- Analisar o comportamento e a variação dessas características durante a vida útil do piso, devido ao potencial desgaste e encardimento sofridos por este.
- Avaliar o efeito dessas possíveis variações observadas nas superfícies, devido ao uso, no seu aspecto visual, tátil, e resistência ao escorregamento.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Acidentes de queda por escorregamento**

Acidentes de escorregamento representam um problema mundial de saúde pública [7] devido à sua frequência, sofrimento humano causado e alto custo socioeconômico decorrente das lesões provocadas. O problema atinge maiores proporções no caso de idosos devido à alta incidência – em razão da maior dificuldade do idoso em equilibrar-se e recuperar-se de um eventual escorregão [8,9,10] – e à gravidade das consequências – no caso de fraturas, por exemplo. De acordo com o National Floor Safety Institute dos Estados Unidos, metade dos adultos com mais de 65 anos hospitalizados devido à fratura de quadril, tipo de fratura mais grave, não retorna à casa ou perde a capacidade de viver de forma independente [11].

Além disso, os acidentes de escorregamento representam um problema econômico. No Brasil, o SUS – Sistema Único de Saúde – registra gastos anuais acima de R\$ 51 milhões com o tratamento de fraturas decorrentes de queda [4]. São estimados, ainda, pelo Observatório Digital de Saúde e Segurança do Trabalho, mais de R\$ 26 milhões gastos entre 2012 a 2017 pelo INSS – Instituto Nacional do Seguro Social – com benefícios acidentários [12]. Apesar de esses dados não especificarem as origens da queda, sabe-se que uma parcela significativa desses acidentes é advinda de episódios de escorregamento. Cabe, ainda, mencionar que altos riscos de escorregamento estão associados a alguns tipos de ambientes laborais e, portanto, os acidentes implicam, também, em prejuízos para empresas e empregadores [13]. Nos Estados Unidos, por exemplo, esse tipo de acidente tem sido responsável pelo maior número de lesões em locais de trabalho e maior parte dos prejuízos com indenizações e dias de trabalho perdidos [11].

Nesse contexto, há um interesse global em se evitar acidentes de escorregamento e, para tanto, é de suma importância conhecer o fenômeno como um todo a partir das várias abordagens através das quais este é tratado. O escorregamento é a perda de equilíbrio causada por uma ação imprevista fora

do controle do indivíduo ou pelo decréscimo no coeficiente de atrito entre seus pés e a superfície de apoio [14]. O esquema de um acidente de queda por escorregamento, dividido em etapas, está ilustrado na Figura 2.1.

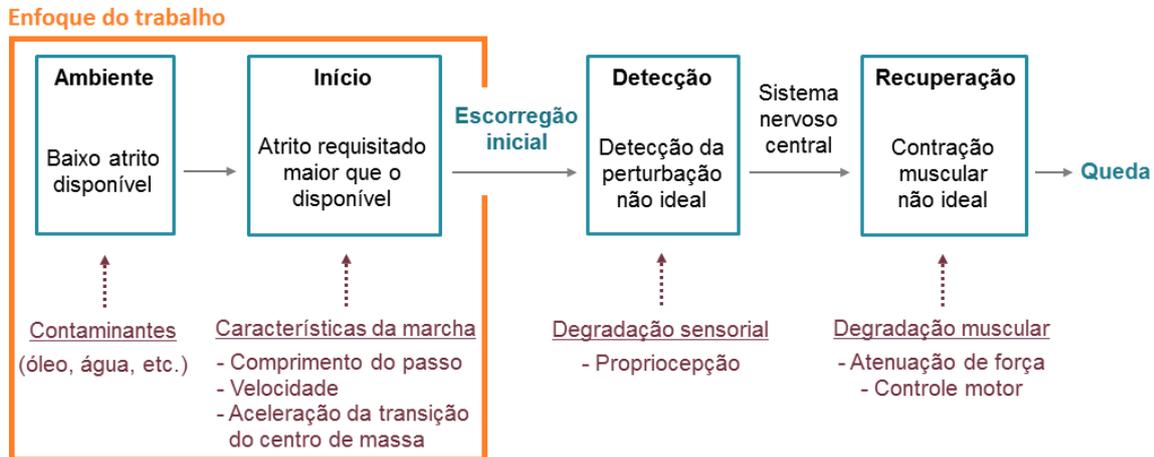


Figura 2.1 Etapas de um acidente de queda por escorregamento [15].

Devido ao elevado número de fatores envolvidos em um acidente de escorregamento, sua compreensão envolve a análise conjunta de diferentes áreas de estudo [15]. A tribologia, ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo [16], se ocupa dos fatores responsáveis pelo início do escorregamento. A psicofísica estuda sua detecção. Por fim, a capacidade de resposta motora para evitar a queda a partir de um escorregamento já iniciado e detectado pelo indivíduo é abordada pela biomecânica.

Fatores intrínsecos ao indivíduo, como limitações motoras, características do seu pé ou sola do sapato e cuidados na execução dos movimentos, podem contribuir com o início do escorregamento. Ademais, há influência de fatores externos, relacionados à segurança do ambiente, como as características do piso e suas condições de uso, além da facilidade de acesso à área sobre a qual este está instalado, uma vez que movimentos complexos podem levar a solicitações de atrito maiores [17,3].

O enfoque deste trabalho, em particular, são as características dos pisos. Estas influenciam na relação entre atrito requisitado e disponível no sistema, o que, por sua vez, determina se o escorregamento é iniciado. Assim, o

desenvolvimento desse trabalho é centrado na abordagem tribológica do problema de escorregamento, discutida mais detalhadamente a seguir.

## 2.2 Tribologia do escorregamento

### 2.2.1 O atrito durante a caminhada

Define-se a força de atrito como a força de reação na direção oposta à do movimento entre dois corpos em contato, agindo como uma resistência ao deslizamento de um em relação ao outro [18].

A locomoção humana envolve aceleração durante o arranque, uma fase de movimento constante, a desaceleração e manobras. Na aceleração e desaceleração, forças tangenciais são transferidas do pé do pedestre para a superfície do solo e, para que o caminhar seja possível, essas forças devem ser resistidas pela força de atrito [19]. Na aceleração, a parte frontal do pé aplica uma força para trás e o atrito reage na direção contrária (direção da caminhada) fornecendo um impulso para o avanço. Na desaceleração, há o impacto do calcanhar na colocação do outro pé no chão, com aplicação de uma força para frente. Nesse caso, o atrito reage na direção oposta à caminhada, provendo a força para parar o movimento [20]. A Figura 2.2 ilustra a atuação dessas forças no sistema quando o pé aplica forças sobre a superfície.

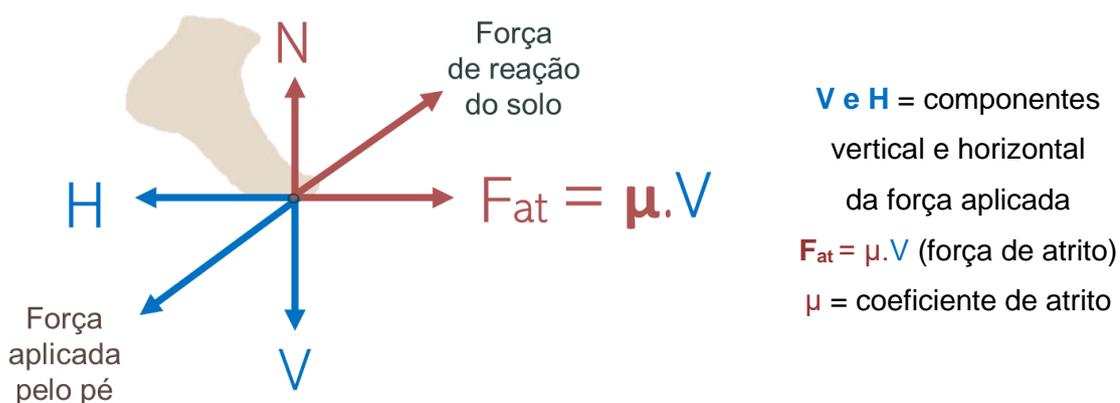


Figura 2.2 Forças aplicadas e forças de reação na caminhada [21]

A componente horizontal,  $H$ , da força aplicada, é oposta a força de atrito entre as superfícies,  $F_{at}$ . Esta é calculada pela multiplicação da componente vertical da força aplicada no chão,  $V$ , por um coeficiente de atrito,  $\mu$  (ou seja,  $F_{at} = \mu V$ ). Entre corpos parados, esse coeficiente de atrito é chamado de estático ( $\mu_e$ ), sendo a resistência ao início do movimento relativo entre eles. Após o início do movimento entre os corpos, utiliza-se o coeficiente de atrito dinâmico ( $\mu_d$ ), sempre menor que o primeiro, visto que os efeitos de acoplamento entre superfícies se movendo são menos intensos [22].

Se em um momento durante a caminhada  $H$  se iguala à força de atrito, ou seja, se  $H = \mu V$ , o pé está a ponto de escorregar. Se  $H$  supera  $\mu V$  ou, escrevendo de forma mais conveniente, se a relação  $H/V$  supera o coeficiente de atrito,  $\mu$ , o pé escorrega. Pensar na condição de escorregamento a partir da relação  $H/V$  é interessante porque esta representa o chamado atrito requisitado que se origina no sistema durante a execução dos movimentos. Se  $\mu$ , o atrito disponível provido pelas condições das superfícies em contato é inferior ao valor do atrito requisitado ( $H/V$ ), o escorregamento é desencadeado [19].

Estudos utilizaram plataformas para medição de forças para monitorar as componentes  $H$  e  $V$  da força aplicada pelo pé durante uma caminhada [23]. A partir dos resultados obtidos foi possível traçar a variação da relação  $H/V$ , o atrito requisitado, ao longo das etapas da marcha. A relação atinge valores mais elevados durante o impacto do calcanhar quando o pé toca o chão e no impulso dado pelos dedos na retirada do pé para o avanço. Esses são, portanto, os momentos mais críticos da caminhada para o início do escorregamento [19]. Para evitar escorregões, uma medida intuitiva adotada por pedestres, ao caminhar, é adaptar a marcha para que o pé permaneça o mais paralelo possível ao solo nesses dois momentos, de forma que a componente  $V$  da força aplicada seja aumentada e a componente  $H$  seja reduzida.

### **2.2.2 Mecanismos do atrito**

As forças de atrito mencionadas acima, que surgem como reações às forças aplicadas pelo pé sobre o solo, são resultado de muitas forças que atuam, através de diferentes mecanismos, entre os átomos das superfícies em contato.

Podem ser citadas, como as principais fontes de atrito, forças microscópicas de adesão e de deformação, plástica e/ou elástica [24].

A nível microscópico, mesmo as superfícies mais lisas possuem irregularidades, e, somente no topo das mesmas ocorre o contato efetivo entre elas. Esses pontos de contato se unem como uma espécie de soldagem a frio, que dá origem ao atrito no sistema. Essas junções formadas entre as superfícies se devem às forças atrativas entre os átomos que as constituem, como as forças de van der Waals. Para que ocorra o deslizamento de uma superfície em relação a outra, deve-se aplicar uma força suficiente para romper essas ligações [24] que é chamada de força de atrito por adesão.

Essa componente do atrito depende intimamente das características da rugosidade das superfícies, fator que determina o número de pontos e a área de contato efetivo entre elas. Consequentemente, para superfícies mais lisas, em que essa área é maior, o mecanismo de atrito por adesão é mais expressivo [25]. Nesse sentido, vale mencionar, ainda, que os topos das saliências das superfícies nem sempre são capazes de suportar as cargas às quais estas estejam submetidas, podendo deformar-se plasticamente. O aumento da pressão entre duas superfícies favorece essa deformação dos topos das suas irregularidades que se tocam, promovendo o aumento da área de contato efetiva entre as mesmas e, portanto, originando ligações adesivas mais fortes e maiores forças de atrito por adesão [26].

Irregularidades superficiais interferem, ainda, em outros mecanismos de atrito. As saliências de duas superfícies em contato podem atuar como barreiras físicas ao deslizamento entre elas, promovendo forças de atrito com módulos bastante elevados, comparados ao mecanismo de adesão.

No caso em que duas superfícies têm durezas diferentes, há uma componente de força de atrito devido ao chamado efeito de aragem ou "*plowing*". As saliências da superfície de maior dureza penetram na superfície mais mole formando espécies de ranhuras na mesma à medida que uma se move em relação à outra. No caso do atrito originado por esse mecanismo, as saliências mais afiadas (geometria cônica) promovem atrito mais elevado se comparadas às mais suaves (arredondadas) [24].

No caso de materiais viscoelásticos, geralmente utilizados em solas dos sapatos, ocorre, ainda, deformação elástica durante um deslizamento horizontal. Supondo-se que a carga aplicada localmente não exceda seu limite elástico, essa deformação se recupera durante o descarregamento. Essa etapa de carregamento/descarregamento resulta em uma perda de energia [10-12] que é responsável por outro mecanismo de atrito, chamado de atrito por histerese [25].

É imprescindível considerar, ainda, que, em condições úmidas, os mecanismos de atrito são todos desenvolvidos de forma distinta dos mecanismos desenvolvidos em condições secas. Em uma interface lubrificada, se a viscosidade do fluido é baixa, seu escoamento é facilitado e o contato entre as irregularidades das superfícies pode ser permitido. Por outro lado, se o fluido é muito viscoso, as superfícies podem ser completamente separadas e uma escorrega facilmente sobre a outra. Há ainda o caso em que ocorre o contato parcial entre as saliências devido a elevada altura de algumas delas, que conseguem penetrar o filme formado [25]. Em cada caso, os mecanismos de atrito desenvolvidos na interface são consideravelmente distintos.

### **2.2.3 O controle do atrito para prevenção do escorregamento**

Parte da complexidade do fenômeno do escorregamento deve-se ao fato de que inúmeras variáveis estão envolvidas na determinação da magnitude das forças de atrito. Sendo o atrito uma resposta a uma solicitação, seu módulo será afetado pelo tipo de atividade sendo executada, pela velocidade e pela forma peculiar com que cada indivíduo realiza os movimentos. O atrito é, ainda, uma propriedade do sistema que envolve as duas superfícies em contato e, portanto, o fato de o usuário estar descalço ou calçado, o tipo de calçado, o material e o design da sola também influenciam no risco de escorregamento [6]. Além desses fatores mencionados, relacionados aos pedestres, o atrito também é influenciado por aspectos do meio em que estes caminham, como a presença de desníveis e inclinações no plano da superfície e a presença de contaminantes. Assim, são inúmeros os fatores que interferem no risco de escorregamento em um ambiente e que, nem sempre, podem ser monitorados durante o uso ou evitados no projeto

de edificações. Tais fatores, combinados em sua pior hipótese possível, devem ser considerados por engenheiros civis e arquitetos na previsão da segurança do uso de um piso para guiar a seleção de produtos adequados aos riscos de escorregamento oferecidos pelos mais diversos tipos de ambiente.

Aos fabricantes de pisos, cabe o desenvolvimento de produtos seguros, em relação aos riscos de escorregamento, e com desempenho satisfatório em relação a outros aspectos estéticos e funcionais. Portanto, o conhecimento das características das superfícies e suas condições de uso que influenciam no atrito originado durante a caminhada é de suma importância. Isso é abordado no item 2.3, a seguir, mais especificamente para pisos cerâmicos, objetos de estudo desse trabalho.

## **2.3 Atrito e escorregamento em pisos cerâmicos**

### **2.3.1 Revestimentos cerâmicos**

Revestimentos cerâmicos são placas cerâmicas fabricadas a partir de argilas e outras matérias-primas inorgânicas geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes [27]. Estes produtos são tradicionalmente utilizados em ambientes residenciais, industriais e comerciais devido às diversas vantagens que oferecem. Dentre essas vantagens, podem-se destacar a elevada resistência mecânica, estabilidade química, durabilidade, inúmeras opções estéticas, versatilidade de uso, facilidade de instalação e o preço acessível [28].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas classifica os revestimentos cerâmicos de acordo com o seu método de fabricação e sua absorção de água, expressa em porcentagem [29,30]. A absorção de água (AA) é um indicativo da penetração de água nos poros da peça e uma medida indireta da sua porosidade aberta, o que determina muitas de suas características físicas e químicas, como a própria facilidade de assentamento. A classificação dos revestimentos cerâmicos segundo a ABNT é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Revestimentos Cerâmicos: Classificação de acordo com método de conformação e absorção de água (AA) pela NBR 13817:1997 e 15463:2013 [29,30].

CONFORMAÇÃO	ABSORÇÃO DE ÁGUA			
	Grupo I AA ≤ 3%	Grupo II 3% < AA ≤ 6%	Grupo IIb 6% < AA ≤ 10%	Grupo III AA > 10%
A - Extrusão	AI	AII a1	AII b1	AIII
		AII a2	AII b2	
B - Prensagem	BIIa Porcelanato técnico AA ≤ 0,1%	BIIa	BIIb	BIII
	BIIb Porcelanato esmaltado 0,1% < AA ≤ 0,5%			
	BIIb - Grês 0.5% < AA ≤ 3%			
C - Outros métodos	CI	CIIa	CIIb	CIII

Os revestimentos mais porosos (também chamados de azulejos) são utilizados em paredes, apresentando baixa retração de queima, alta estabilidade dimensional e facilidade de instalação [31]. Em contrapartida, os pisos são os revestimentos cerâmicos menos porosos, utilizados para recobrir o chão. Estes devem apresentar absorção de água inferior a 10% [32] para que seja garantida a resistência mecânica necessária para o uso.

Os produtos cerâmicos ainda são classificados em esmaltados (G, *glazed*) ou não esmaltados (U, *unglazed*) [29]. No caso dos esmaltados, os revestimentos são constituídos por três camadas: o suporte, o esmalte e o engobe, que atua como uma camada de transição entre eles. O esmalte, por sua vez, é uma camada vítrea que impermeabiliza o revestimento e o decora, definindo cor, brilho, e rugosidade da superfície [33].

A redução da rugosidade superficial para a maior suavidade ao toque e brilho da superfície - características bastante valorizadas no produto - pode ser obtida através de um polimento. Este tratamento é executado por um equipamento dotado de várias cabeças polidoras de alta rotação, compostas por materiais abrasivos. À medida em que a peça passa pela máquina, operando

com velocidade controlada e na presença de água, abrasivos com granulometrias cada vez mais finas são utilizados até que se alcance o acabamento desejado [34]. Apesar de esse tratamento ter sido, originalmente, aplicado aos suportes (não esmaltados), atualmente, grande parte dos produtos polidos são, na realidade, também esmaltados, recebendo o polimento sobre a camada de esmalte.

Percebe-se, portanto, a enorme variedade de características superficiais dos revestimentos cerâmicos, o que faz com que estes apresentem desempenhos muito distintos no tocante a aspectos estéticos, sensação ao toque, resistência ao desgaste, ao manchamento e ao escorregamento.

### 2.3.2 A topografia dos revestimentos cerâmicos

É sabido que a topografia das superfícies tem grande influência sobre seu comportamento de atrito. Desde os primeiros projetos de calçados, antigamente, até os mais recentes projetos de pneus, ondulações e padrões sulcados são utilizados para evitar derrapagens [35,36]. Perfis e sulcos são as irregularidades macroscópicas de maior amplitude da superfície, compondo seu relevo. Além disso, as superfícies são constituídas pela textura, composta, por sua vez, pela ondulação e rugosidade. A ondulação é a componente observável a olho nu, com maiores comprimentos de onda, muitas vezes referida como os erros de forma da superfície real em relação à ideal. A rugosidade é composta por irregularidades pequenas, em escala micrométrica, e menos espaçadas entre si. A Figura 2.3 ilustra essas duas componentes da textura de uma superfície real.

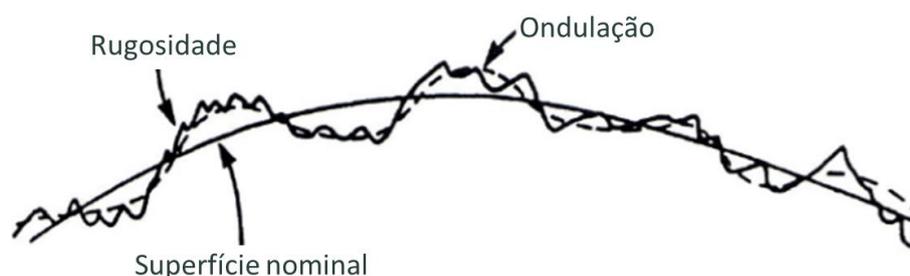


Figura 2.3 Composição da textura de uma superfície real: a ondulação e a rugosidade [37].

Com toda a variedade de superfícies disponíveis para os revestimentos cerâmicos, estes diferem entre si em relação a vários aspectos do seu relevo e textura superficial, que afetam os mecanismos de atrito na interface entre o piso e o pé ou calçado do pedestre. Como resultado, a resistência ao escorregamento desses produtos varia, também, dentro de um espectro bastante abrangente.

As superfícies mais lisas – vidradas ou polidas – são muito convenientes para locais onde há presença de fluidos e contaminantes devido à sua fácil manutenção e limpeza. Apesar disso, a maior quantidade de casos registrados de queda da própria altura ocorre justamente nesses locais [38,39,40], onde a presença de contaminantes pode tornar essas superfícies muito escorregadias.

Dessa forma, o aumento da rugosidade dos pisos é uma das principais medidas utilizadas para promover o aumento do seu coeficiente de atrito. Uma forma típica de se atingir esse objetivo é através da aplicação de granilhas, fritas moídas a seco, geralmente com granulometria grosseira (0,15 a 2 mm). No entanto, o aumento da rugosidade pode ser um problema para as superfícies, visto que a presença de saliências e reentrâncias contribui para a retenção de sujeira. Há, portanto, uma dificuldade em se conciliar resistência ao escorregamento e limpabilidade.

Deve-se mencionar que a expressão “aumento da rugosidade”, como utilizada no parágrafo anterior, pode referir-se ao aumento na quantidade, altura ou inclinação de saliências e reentrâncias, por exemplo. A rugosidade pode ser descrita por uma série de parâmetros numéricos (detalhados no item 2.5) que quantificam aspectos dos elementos micrométricos presentes em uma superfície. A caracterização das superfícies para determinação desses parâmetros é útil para diversas áreas de estudo e permite a diferenciação de superfícies que, através de uma simples comparação visual ou tátil, poderiam ser consideradas muito similares. No caso da resistência ao escorregamento de pisos, o conhecimento destes parâmetros se mostra interessante pois, enquanto alguns dos aspectos da rugosidade da superfície podem não afetar significativamente seu desempenho, outros podem estar intimamente relacionados a esta propriedade, podendo ser identificados e explorados para seu controle.

Nesse sentido, deve-se considerar que o atrito na interface entre o piso e o pé depende, também, da presença e das características do relevo na superfície. Pisos com perfis de relevo oferecem maior resistência ao movimento dos pés do pedestre [41] devido aos maiores efeitos de ancoramento entre as duas superfícies e ao aumento na pressão entre as mesmas, promovido pela redução da área sobre a qual o peso do indivíduo é distribuído.

O uso de placas de revestimento pequenas, como as pastilhas, por exemplo, promove um efeito similar ao do relevo. A própria alternância das pastilhas e o rejunte entre elas eleva o número de pontos de ancoramento por área de solo recoberta, em comparação com placas grandes [42], aumentando a resistência ao escorregamento local.

Como ilustra a Figura 2.4, o relevo ainda pode atuar facilitando o escoamento e permitindo a acomodação de líquidos, em suas regiões mais baixas. Um elevado volume de drenagem do piso - volume de líquido que o mesmo acomoda sem ter sua superfície recoberta [43] – ajuda a evitar a formação de filmes lubrificantes que poderiam incrementar, significativamente, os riscos de escorregamento na interface com o pé do pedestre.

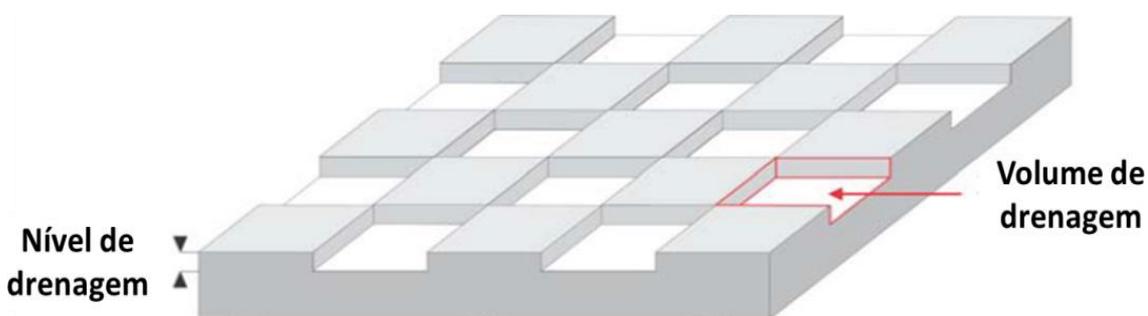


Figura 2.4 Superfície com relevo macroscópico [43].

Assim como ocorre no caso das reentrâncias presentes na rugosidade dos pisos, a presença de cavidades nos perfis de relevo das superfícies também pode favorecer o acúmulo de sujeira nas regiões mais profundas da mesma, prejudicando sua limpabilidade.

### 2.3.3 Condições de uso dos pisos

#### 2.3.3.1. Presença de contaminantes

As condições de uso sempre devem ser consideradas na seleção de pisos adequados para ambientes específicos. Como mencionado anteriormente, a presença de fluidos entre o pé e o piso pode criar efeitos de lubrificação e afetar os mecanismos de atrito desenvolvidos na interface entre eles. A Figura 2.5 ilustra os diferentes regimes de lubrificação possíveis na interface entre duas superfícies na presença de fluidos e o comportamento do coeficiente de atrito em cada situação. Quando um fluido se encontra pressurizado entre as duas superfícies e provoca a separação total entre elas, a situação é chamada de lubrificação hidrodinâmica e o atrito disponível no sistema pode ser reduzido para quase zero [44,45].

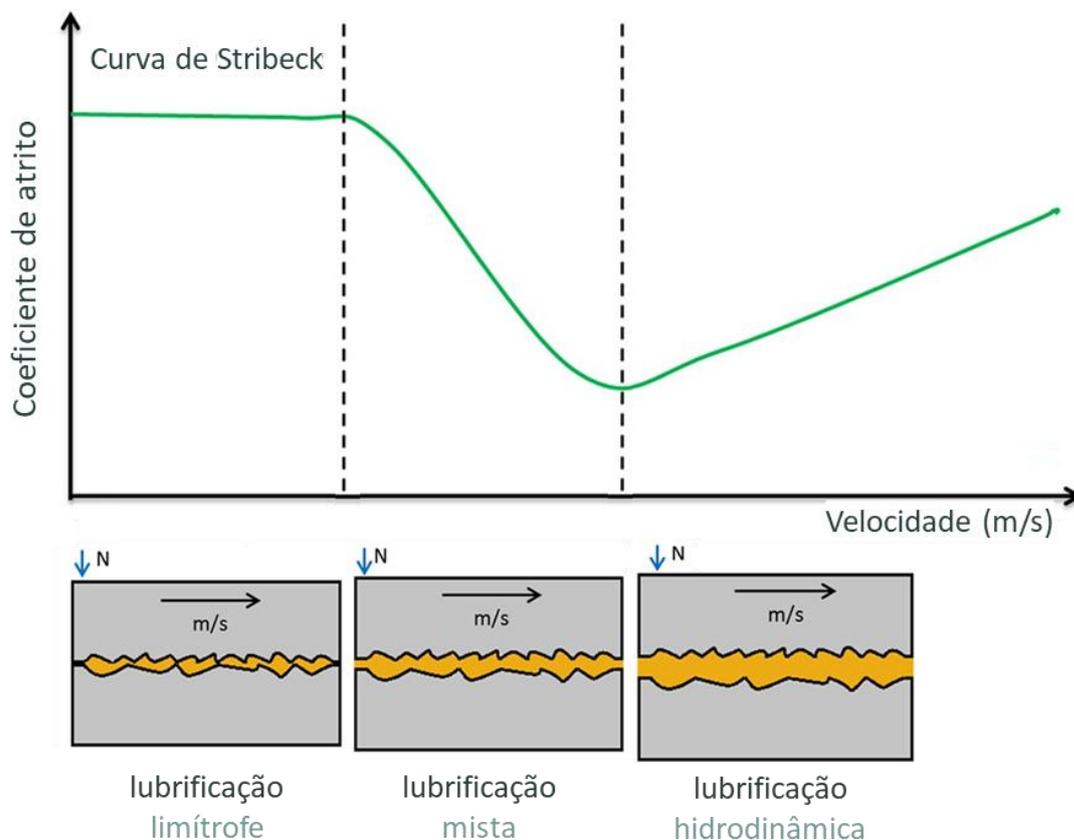


Figura 2.5 Curva de Stribeck – regime de lubrificação limite, misto e hidrodinâmico [46].

Como também já mencionado, a formação de filmes lubrificantes é afetada pela viscosidade dos fluidos. Para os fluidos mais viscosos, o tempo necessário para seu escoamento, a ponto de permitir a conexão entre a sola do sapato e o piso, é muito grande e as chances de se ocorrer um escorregamento são aumentadas. Um estudo de 2015 [47] comprovou que, por mais áspera que seja a superfície do piso sobre o qual o pedestre caminha, o coeficiente de atrito se aproxima de zero se a viscosidade do fluido é maior que 38mPa.s.

Além disso, contaminantes sólidos podem influenciar na resistência ao escorregamento das superfícies. Esses podem facilitar o deslizamento/rolagem de uma superfície sobre a outra ou, por outro lado, atuar como pontos de ancoramento, contribuindo para o aumento do coeficiente de atrito. Isso vai depender das características das partículas – tamanho, fator de forma e rigidez, por exemplo – e da sua interação com a rugosidade do piso e até com as propriedades viscoelásticas da sola do calçado do pedestre, por exemplo [48].

Nota-se, portanto, grande complexidade envolvida nos mecanismos de atrito na presença de contaminantes. Essa complexidade se agrava se há dois ou mais contaminantes atuando juntos na interface, visto que o efeito da presença de cada um será afetado pela presença do outro.

Em superfícies lisas, o atrito é bastante influenciado pelos fenômenos de adesão e, por esse motivo, durante a caminhada, depende fortemente da área de contato efetiva entre o calçado e o piso. Para esse tipo de superfície, portanto, a presença de contaminantes na interface, diminuindo essa área de contato, pode promover uma redução drástica do atrito disponível. Esse impacto é progressivamente reduzido conforme se adicionam, às superfícies, elementos que promovem o atrito, principalmente através de efeitos de ancoragem, como algumas características da rugosidade e a presença de relevo [6].

### **2.3.3.2. Tempo de uso: manutenção e desgaste**

Além da complexidade do desenvolvimento do atrito na interface piso-calçado, outra razão para a dificuldade de uma aproximação holística a uma solução para o problema do escorregamento é a alteração da resistência ao

escorregamento do piso com o tempo de uso do mesmo, devido ao desgaste mecânico, envelhecimento e acúmulo de sujeira em sua superfície.

Em superfícies mais rugosas, as saliências da superfície formam “cantos vivos” que se desprendem facilmente quando o piso é submetido ao desgaste abrasivo [49]. Além disso, ocorre o acúmulo de sujeira nas reentrâncias, o que pode alterar a superfície do piso tanto pelo preenchimento dessas regiões mais profundas quanto pelo desgaste devido aos maiores esforços necessários para sua limpeza [49]. Ou seja, além do tráfego de pedestres, os esforços impostos por mecanismos de limpeza mais agressivos para a manutenção do piso também podem provocar a remoção de picos das superfícies que seriam fundamentais para evitar escorregamentos.

Fica evidente, portanto, que a redução da resistência ao escorregamento dos pisos ao longo do tempo em que este é utilizado é uma questão a ser considerada pelos fabricantes desses produtos. Deve-se buscar garantir, além do desempenho satisfatório do piso quanto à resistência ao escorregamento e à limpabilidade logo após seu assentamento, que esse desempenho perdure durante toda a vida útil do produto. Nesse sentido, além de compreender a forma com que as características superficiais do piso afetam seu desempenho na saída da fábrica, é fundamental, para os produtores cerâmicos, entender como tais características são alteradas com o tempo e o efeito dessas alterações no desempenho do produto. Para tal, são necessárias técnicas adequadas para avaliação, tanto da resistência ao escorregamento, quanto das características superficiais dos pisos cerâmicos.

#### **2.4 A avaliação da resistência ao escorregamento**

A resistência ao escorregamento de uma superfície é, usualmente, avaliada por meio da medição do seu coeficiente de atrito. Existe uma grande diversidade de técnicas, baseadas em diferentes princípios de medição, disponíveis para a avaliação dessa propriedade.

A seguir, algumas delas técnicas, especificamente adotadas para pisos cerâmicos – e, portanto, de conhecimento essencial para o desenvolvimento desse trabalho – são detalhadas.

#### 2.4.1 Pêndulo Britânico

O chamado Pêndulo Britânico foi desenvolvido, originalmente, para simular efeitos de frenagem de pneus de carros em rodovias [50]. No caso da avaliação da resistência ao escorregamento de superfícies, o dispositivo simula, aproximadamente, as condições do contato no momento do impacto do calcanhar do pedestre no piso, para desaceleração da caminhada [25].

O Pêndulo, ilustrado na Figura 2.6, possui um braço com a extremidade revestida por uma borracha que é solto de um determinado ângulo e resvala em uma faixa de 124-126 mm da superfície sob análise. Um marcador registra o ângulo máximo atingido pelo braço após o contato com a superfície. Quanto menor esse ângulo, maior a desaceleração imposta pela superfície à borracha e, portanto, maior o coeficiente de atrito do piso.



Figura 2.6 Pêndulo Britânico para avaliação de superfícies [51]

A escala do marcador do pêndulo é a PTV – Pendulum Test Value – uma escala própria, que varia de 0 a 100. A relação entre os resultados da leitura do

pêndulo e o potencial de escorregamento da superfície avaliada é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Pêndulo Britânico: Limites de segurança para pisos [52]

PTV	0 - 24	25 – 35	≥ 36
Potencial de Escorregamento	Alto	Moderado	Baixo

Uma vantagem do método é a possibilidade de medição *in situ*. Dessa forma, é possível avaliar pisos em condições reais de uso, considerando-se seu encardimento e desgaste natural ou causado por manutenção inadequada.

Como desvantagem da técnica, pode-se citar a dificuldade de se ajustar corretamente o equipamento durante sua calibração, antes da realização das medidas. Além dessas complicações envolvidas na preparação do ensaio, há também forte possibilidade de os resultados serem afetados pela forma com que o operador conduz a medida, que depende de sua experiência/treinamento.

Há também menor eficiência na avaliação de pisos com perfis com grandes desníveis, com a possibilidade de subestimação do coeficiente de atrito devido à perda de contato durante a varredura das regiões profundas. Já para superfícies muito suaves, o coeficiente pode ser superestimado devido a efeitos de aderência na interface de medida [53].

O teste de Pêndulo é bem estabelecido no Reino Unido e na Espanha [50]. Apesar do debate constante existente sobre a credibilidade das técnicas de medida da resistência ao escorregamento, a literatura relata boas correlações entre os resultados obtidos com esse equipamento e riscos de escorregões [54].

#### 2.4.2 Deslizadores motorizados

Tribômetros do tipo *drag-sled* (deslizadores motorizados, como chamados no Brasil) como o Tortus e o BOT-3000E, ilustrados, nessa ordem, na Figura 2.7, são dispositivos que percorrem o piso arrastando uma base de borracha. A resistência do piso ao movimento da borracha arrastada pelo carrinho é registrada e convertida em medida de coeficiente de atrito dinâmico.



Figura 2.7 Deslizadores motorizados: Tortus e BOT-3000E [51].

O Tortus percorre a superfície de peças montadas sobre um painel de 1m de comprimento. De acordo com o coeficiente de atrito registrado, a NBR 13818/Anexo N [55] recomenda seu local de uso, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Tortus: Uso de pisos conforme coeficiente de atrito [55].

Coeficiente de Atrito	Uso
$\geq 0,40$	Ambientes com alto risco de escorregamento
$< 0,40$	Apenas instalações normais

O BOT-3000E é um dispositivo mais avançado que o Tortus. Seu último modelo possui câmera frontal para registro do trajeto, entrada USB para armazenagem de dados e display digital com funções configuradas de acordo com a ANSI B101.3:2012 [56], que aceita o equipamento como um teste válido. No caso dessa norma, os pisos são classificados como recomendáveis para ambientes que oferecem maior risco de escorregamento se apresentam coeficiente de atrito, no mínimo, igual a 0,42.

Por serem portáteis, os deslizadores motorizados, assim como o Pêndulo, permitem medições *in situ*. No entanto, como para os deslizadores o processo de medição é quase inteiramente automatizado, dispensa-se o minucioso trabalho de calibração requerido antes do ensaio realizado com o Pêndulo. Além disso, minimizam-se as possíveis influências do operador nos resultados

obtidos, o que justifica a credibilidade da análise fornecida pelos deslizadores em casos de acidentes de queda que culminam em ações judiciais.

Um ponto negativo dos Tortus é o fato de ser patenteado, o que impede sua adoção em diversas normas internacionais. Há, também, indicativos de que os resultados dos deslizadores motorizados não representam bem a realidade devido às diferenças entre os esforços aplicados pelos aparelhos e os desenvolvidos durante o caminhar [57]. Assim como para o Pêndulo, pode haver uma superestimativa do coeficiente de atrito para superfícies suaves devido à aderência e uma subestimativa para pisos com relevos profundos devido à perda de área de contato entre a superfície e o equipamento na varredura [53].

### 2.4.3 Rampa

Na avaliação da resistência ao escorregamento com o método da rampa, um operador caminha de modo padronizado sobre um painel montado com placas da superfície avaliada sobre uma plataforma de inclinação variável, como ilustrado na Figura 2.8.



Figura 2.8 Execução do teste da rampa por um operador [58,59].

Com base no ângulo de inclinação do equipamento para o qual o operador começa a escorregar, estima-se o coeficiente de atrito do piso conforme recomendações das normas alemãs DIN 51097 e DIN 51130 [60,61]. A Tabela 2.4 e Tabela 2.5 apresentam a relação entre o ângulo de escorregamento e o coeficiente de atrito para duas condições de medida distintas.

Tabela 2.4 Coeficiente de atrito segundo a norma DIN 51097 para pés descalços em superfícies contaminadas com água ou sabão [60].

	A	B	C
<b>Ângulo do Escorregamento</b>	12° -17°	18°-23°	>24°
<b>Coeficiente de Atrito</b>	0,21-0,31	0,32-0,42	>0,45

Tabela 2.5 Classificação segundo a norma DIN 51130 para superfícies contaminadas com óleo de motor e operador com botas especializadas, sendo R9 a classe de pisos mais escorregadios [61].

	R9	R10	R11	R12	R13
<b>Ângulo do Escorregamento</b>	6°-10°	10°-19°	19°-27°	27°-35°	>35°
<b>Coeficiente de Atrito</b>	0,11-0,18	0,18-0,34	0,34-0,51	0,51-0,70	>0,70

O método da rampa é considerado, por muitos, o método de ensaio mais realista existente. Neste ensaio, é gerada uma solicitação bem próxima do caminhar humano, difícil de ser reproduzida por dispositivos mecânicos. Além disso, realizam-se repetições do teste para minimização das variáveis humanas, como peso, cansaço, equilíbrio etc. Os pisos podem, ainda, ser avaliados em diferentes combinações de condições de uso e tipos de calçados, permitindo definir, com mais precisão, as condições seguras para sua utilização.

Apesar das vantagens mencionadas, o teste da rampa não permite medições in situ, o que exige, para a avaliação de placas já assentadas, que estas sejam arrancadas do solo. Além disso, as placas padrões e a bota padrão requeridas para a execução do ensaio são caras e a norma que se refere a esse

teste é revisada com muita frequência. Além desses entraves para a adoção do método, menciona-se, ainda, a necessidade de se haver um operador padronizado para a realização das medidas.

#### **2.4.4 Considerações sobre os métodos de medida da resistência ao escorregamento**

Dispositivos mecânicos de teste devem prever adequadamente o atrito que será experimentado pelo pedestre durante a caminhada, o que é bastante complicado devido às inúmeras variáveis envolvidas no sistema. Assim, apesar da variedade de equipamentos disponíveis, permanece o debate sobre se estes quantificam os riscos reais de escorregamento. Isso é ainda mais complicado no caso de banheiros, ambientes já críticos devido à presença de água, pelo fato de o atrito requisitado pelas solicitações e movimentos executados durante o banho serem diferentes do caminhar.

Além disso, cada método baseia-se em princípios teóricos e mecânicos distintos e operam em condições diferentes. Um exemplo a ser citado é a variação, de um equipamento para outro, do material e da forma do pé de teste, elemento que entra em contato com a superfície medida, durante sua varredura, para avaliação do coeficiente de atrito. Sendo o atrito não apenas propriedade do piso, mas do sistema como um todo, ocorrem contradições significativas entre resultados de métodos diferentes na avaliação de uma mesma superfície [5]. Por esse motivo, resultados fornecidos por um método não podem ser comparados com os obtidos por outro equipamento e, sempre que um valor de coeficiente de atrito é mencionado, deve-se haver uma referência ao método de medida utilizado para sua avaliação [62].

Deve-se considerar, ainda, que os resultados dos ensaios são afetados pelas características da própria superfície ensaiada, devido aos diferentes mecanismos de atrito que podem atuar na interface de medição. Como já mencionado anteriormente, os resultados das medidas podem ser influenciados no caso de superfícies muito lisas ou com relevos muito profundos, sendo mais

fidedignos, para alguns métodos, apenas para amostras sem relevo e em determinadas faixas de rugosidade [53].

Nesse contexto, não há um consenso global sobre qual equipamento deve ser utilizado para a avaliação adequada da resistência ao escorregamento de pisos cerâmicos e, conseqüentemente, a adoção de um valor seguro de coeficiente de atrito é bastante difícil.

Em decorrência dessa falta de consenso, métodos de avaliação distintos são adotados em normas de diferentes nações. Dado que os resultados dos métodos divergem, classificações conflitantes de um mesmo produto são comuns.

Muitas vezes, para um mesmo dispositivo adotado, há divergências nas recomendações das normas e os testes são realizados com variações no método de medida. Um exemplo é a escolha da borracha utilizada para o contato com as amostras. Um estudo comprovou, para o teste do pêndulo, que produtos avaliados com borrachas de dureza moderada geralmente recebem classificações mais baixas do que os avaliados com borrachas mais duras [63].

## **2.5 A avaliação da rugosidade**

Sendo a rugosidade apontada como uma das principais variáveis que afetam a resistência ao escorregamento dos pisos, sua avaliação é fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Isto posto, alguns conceitos sobre a forma com que a rugosidade das superfícies é medida e quantificada devem ser estabelecidos.

A superfície real de um corpo sempre apresenta desvios em relação à sua superfície nominal, teórica, definida pelo seu contorno dimensionado em um desenho ou especificação. Os desvios de maior amplitude, denominados erros de forma, podem ser medidos com instrumentos convencionais. No entanto, como já apresentado, a superfície possui, ainda, uma textura, composta por sua ondulação e rugosidade. No caso da rugosidade, sendo estas irregularidades micrométricas, sua avaliação só é possível com instrumentos especiais que

operem nessa escala, como a microscopia de força atômica e a perfilometria mecânica ou ótica.

Na avaliação de uma superfície, chama-se superfície medida ou efetiva a representação da superfície real, deformada pela imprecisão e limitações do instrumento [64]. Um exemplo é ilustrado na Figura 2.9, onde são definidos, a partir da superfície medida, seus erros de forma e as componentes de sua textura: ondulação e rugosidade.

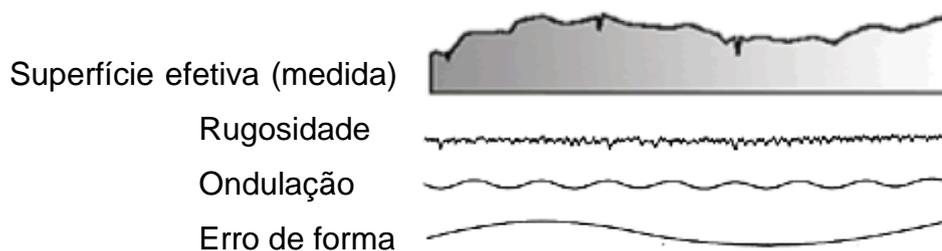


Figura 2.9 Componentes da superfície medida ou efetiva [65]

Dentre as técnicas mencionadas para a avaliação da rugosidade, a perfilometria mecânica (ou perfilometria de contato) mostra-se bastante adequada para avaliar pisos cerâmicos, devido à magnitude da rugosidade na superfície desses produtos [66]. Além disso, os softwares integrados aos equipamentos determinam parâmetros que quantificam aspectos da rugosidade das superfícies particularmente úteis para o estudo, sob o ponto de vista da identificação das variáveis que contribuem com a resistência ao escorregamento. O equipamento é apresentado a seguir.

### 2.5.1 Perfilômetro de contato

No perfilômetro de contato, ilustrado na Figura 2.10, um apalpador que consiste em uma haste mecânica com uma ponta metálica fina percorre um perfil pré-determinado da superfície a uma dada velocidade.

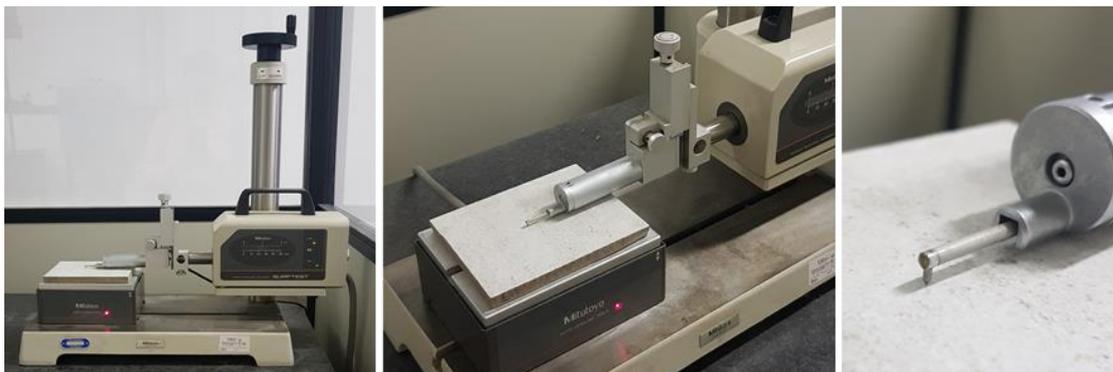


Figura 2.10 Perfilômetro mecânico de contato

Os movimentos verticais do apalpador são medidos em relação a uma referência definida como o zero no eixo z. Esses movimentos são convertidos por um transdutor em sinais elétricos que, por sua vez, são transformados, a partir de uma unidade elétrica para uma unidade dimensional. Dessa forma, é traçado um perfil bidimensional da superfície avaliada [67].

O segmento de superfície percorrido pelo apalpador é o comprimento total. Um trecho é descartado no início e no final do perfil devido a distorções da medição pela aceleração e desaceleração, respectivamente, do carro que movimenta o apalpador sobre a amostra. O segmento intermediário restante é o chamado comprimento de medição.

Um recurso gráfico para separar a rugosidade de irregularidades maiores é a subdivisão do comprimento varrido em segmentos menores, chamados de comprimentos de amostragem,  $\lambda_c$  ou, ainda “*cut-off*”. Os rugosímetros utilizam filtros que deixam passar os sinais de altas frequências, com comprimentos de onda abaixo do  $\lambda_c$  pré-determinado, correspondentes à rugosidade, enquanto atenuam aqueles com comprimentos de onda maiores, as ondulações e demais erros de forma. A Figura 2.11 ilustra o efeito da filtragem em um perfil obtido e os comprimentos utilizados para avaliação de rugosidade. No perfil filtrado, uma linha média (LM na figura) é traçada de forma que a soma das áreas superiores entre a mesma e o perfil seja igual à soma das áreas inferiores, como recomenda a NBR ISO 4287/2002 e a NBR 8404/1988 [64,68].

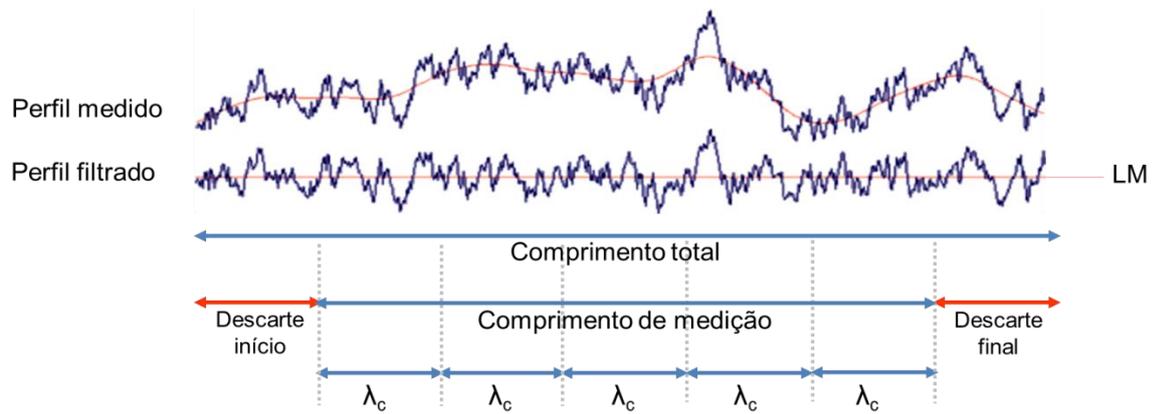
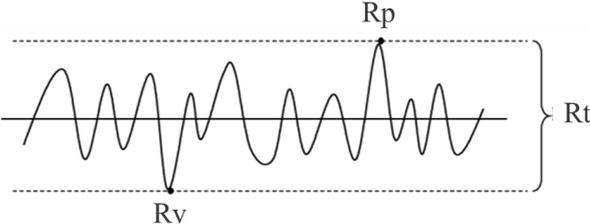
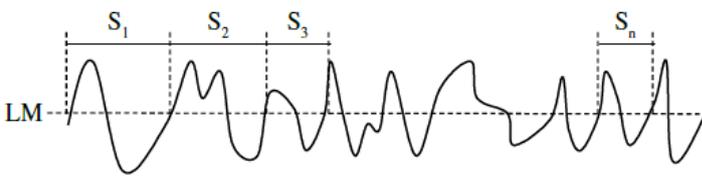


Figura 2.11 Perfil primário obtido com um perfilômetro, perfil filtrado, e comprimentos para avaliação da rugosidade. Adaptado de [67].

O ponto mais alto entre dois cruzamentos do perfil com a linha média é chamado de pico, e, o mais baixo, de vale. Com base nessas definições, são calculados os parâmetros de rugosidade, apresentados na Tabela 2.6.

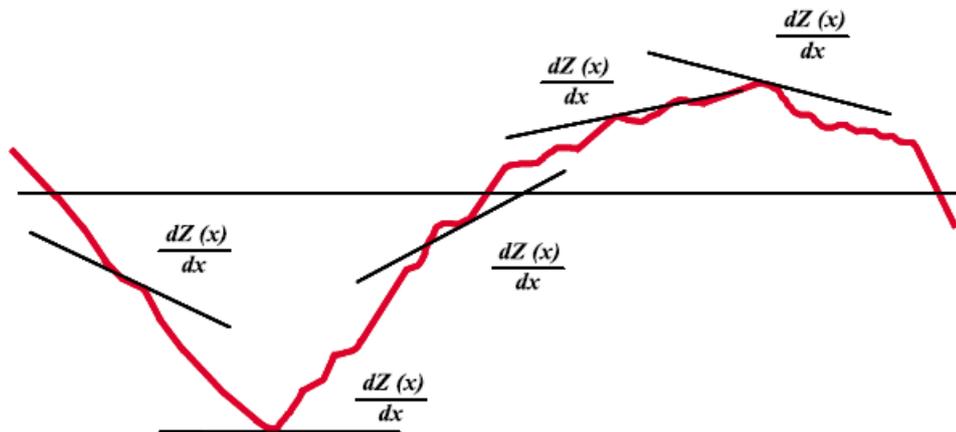
Tabela 2.6 Parâmetros de rugosidade superficial – dados e ilustrações compilados de [49,69,70,71,72,73].

Ra	Rugosidade média = média aritmética das alturas dos pontos que compõem o perfil, em relação à linha média (LM).
Rq	Rugosidade média quadrática dos valores absolutos das alturas dos pontos que compõem o perfil, em relação à linha média (LM).
Rz	Soma da média das alturas dos 5 picos mais altos com a média das profundidades dos 5 vales mais profundos do perfil

Rc	Soma da média das alturas de todos os picos com a média da profundidade de todos os vales do perfil
Rp	Altura do pico mais alto no perfil todo
Rpm	Média das alturas do pico mais alto de cada cut-off
Rv	Profundidade do vale mais profundo no perfil todo
Rvm	Média das profundidades do vale mais profundo de cada cut-off
Rt	(R <sub>y</sub> DIN) Altura total do perfil = $R_p + R_v$ = máxima distância pico a vale
Ry	(R <sub>z</sub> DIN) Média da máxima distancia de pico a vale em cada cut-off
	
R3y	Máxima distância entre o 3º maior pico e 3º maior vale em um cut-off
R3z	Média da distância entre o 3º maior pico e 3º maior vale de cada cut-off
Sm	Média aritmética das distâncias $S_1, S_2, \dots, S_n$ entre picos adjacentes, ou seja, entre um ponto em que o perfil toca a linha média e se desenvolve para cima, formando um pico, até o próximo ponto em que isso ocorre, com o fechamento de um ciclo pico + vale.
	

- S Média da distância entre picos locais, sendo considerado um pico local o ponto mais alto do perfil entre dois pontos de mínimos da curva (diferente de  $S_m$ , que considerava a distância entre picos definidos pela linha média).
- $P_c$  O número total de picos locais contabilizados é expresso pelo parâmetro  $P_c$  (*peak count*).

- $\Delta a$  Inclinação média do perfil,  
definida por:  $\Delta a = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{dZ}{dx} dx$



- $\Delta q$  Inclinação quadrática média do perfil,  
definido por:  $\Delta q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (\theta(x) - \theta')^2 dx}$  onde  $\theta' = \frac{1}{L} \int_0^L \theta(x) dx$

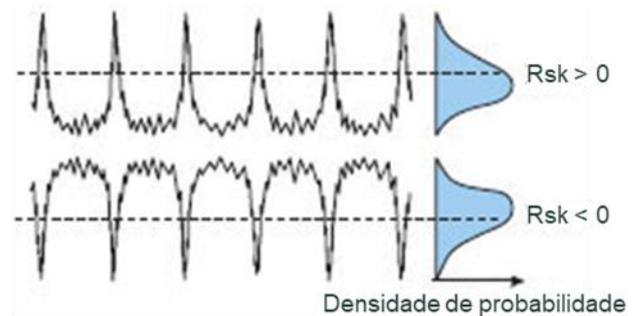
- $\lambda_a$  Comprimento de onda médio do perfil =  $360 * (Ra / \Delta A)$
- $\lambda_q$  Comprimento de onda quadrático médio do perfil =  $360 * (Rq / \Delta q)$

Sk

“Skewness” ou assimetria do perfil mede sua simetria em torno da linha média, calculado como o 3º momento central da função de densidade de probabilidade.

- Sk vale zero para uma distribuição totalmente simétrica de picos e vales.
- Valores positivos são referentes a perfis com predominância de picos.
- Valores negativos são referentes a perfis com predominância de vales.

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \left( \sum_{i=1}^N Y_i^3 \right)$$



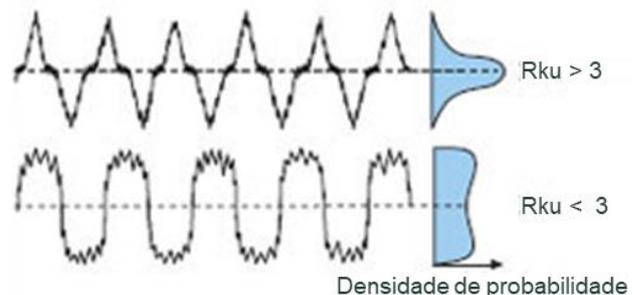
Ku

A curtose do perfil é o grau de concentração de material em torno da linha média, calculada como o 4º momento central da função de probabilidade de densidade.

Ku descreve se o perfil é mais ou menos afiado, sendo que:

- Valores superiores a 3 se referem às superfícies compostas, predominantemente, por picos e vales íngremes.
- Valores inferiores a 3 se referem às superfícies compostas por irregularidades mais arredondadas.

$$R_{ku} = \frac{1}{NR_q^4} \left( \sum_{i=1}^N Y_i^4 \right)$$

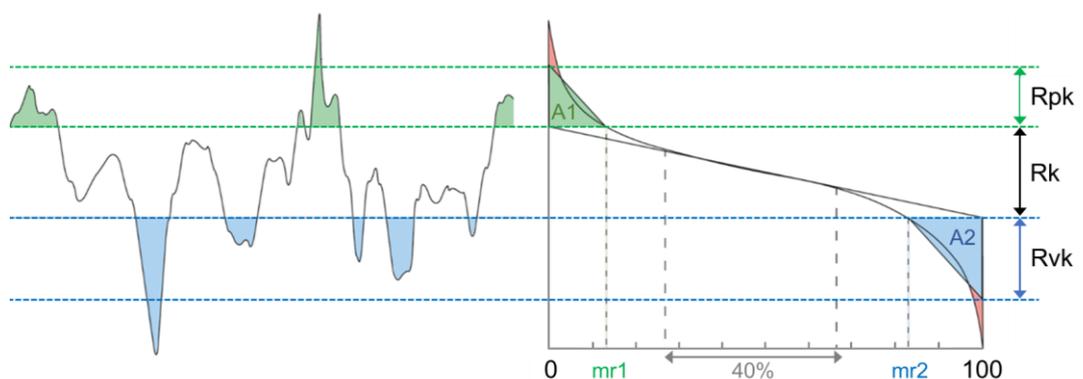


**Lo** Comprimento de perfil desenvolvido. O perfil da superfície é descrito por uma linha e Lo tem o valor do comprimento dessa linha esticada.

**Ir** Índice de rugosidade =  $Lo / \text{comprimento de amostragem}$

Alguns parâmetros são calculados a partir de uma curva de Abbott-Firestone, *Bearing Ratio Curve* ou, ainda, curva de razão de material. Essa curva é uma representação gráfica do parâmetro  $mr$  (%) – ou *material ratio* – em relação ao nível do perfil.

- Supõe-se uma linha plana tocando o ponto mais alto do perfil e que esta vai sendo abaixada até o ponto mais baixo do mesmo. O  $mr$  (%), para cada altura considerada, é a razão entre o comprimento da linha que corta o perfil, “passando dentro” do material, e seu comprimento total.
- Representa-se no eixo y de um gráfico a altura correspondente ao valor de  $mr$  (%) representado no eixo x, desde  $mr = 0\%$  (quando a linha começa a tocar o perfil) até  $100\%$  (quando linha toda já está dentro do material).
- Na curva obtida, como ilustrado a seguir, traça-se uma linha com a menor inclinação possível que toque a curva formada em dois valores de  $mr$  (%), com uma janela de pelo menos 40% entre eles (região mais plana da curva).



- |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rk         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• A partir da reta traçada, determina-se sua intersecção no eixo y para as duas extremidades do gráfico (ou seja, em <math>mr = 0\%</math> e <math>mr = 100\%</math>), dividindo-se o perfil de rugosidade em zonas. A região da rugosidade do material localizada entre esses dois limites definidos é chamada de rugosidade central, de altura igual a Rk.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| mr1<br>mr2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• O valor de <math>mr</math> (%), no eixo x, correspondente ao limite entre a zona dos picos e a zona central da rugosidade é o parâmetro mr1. Este valor representa a porcentagem de material concentrada na região dos picos da rugosidade. O valor de <math>mr</math> (%) correspondente ao limite entre a zona da rugosidade central e a zona de vales é o parâmetro mr2. Este valor representa a porcentagem de material concentrada, conjuntamente, na região dos picos e na região central da rugosidade. Dessa forma, <math>(100 - mr2)</math> corresponde a porcentagem de material concentrada na região dos vales.</li> </ul> |
| A1<br>A2   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• A área entre a curva de razão de material e a reta que delimita a região dos picos, é o parâmetro A1. A área entre a curva e a linha que separa a rugosidade central da região dos vales é o parâmetro A2.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Rpk        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Um triângulo de área igual a A1 é construído sobre a linha que define o limite superior da zona central da rugosidade do material, de forma que um ângulo reto se forme entre essa linha e o eixo y, em <math>mr = 0\%</math>. A altura desse triângulo é definida como o parâmetro Rpk, a altura da zona dos picos da curva de razão de material.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Rvk        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Um triângulo de área igual a A2 é construído sobre a linha que define o limite inferior da zona central da rugosidade do material, de forma que um ângulo reto se forme entre essa linha e o eixo y, em <math>mr = 100\%</math>. A altura desse triângulo é definida como o parâmetro Rvk, a altura da zona dos vales da curva de razão de material.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Como uma das principais limitações da técnica, cita-se a impossibilidade, por impedimento físico, de penetração do apalpador em vales muito profundos e reentrâncias, como ilustra a Figura 2.12.



Figura 2.12 Impossibilidade de penetração do apalpador em vales estreitos (a) e reentrâncias (b) [67].

### 2.5.2. Perfilômetro Óptico

Uma alternativa aos perfilômetros mecânicos são os que operam através de um sistema óptico. Um perfilômetro óptico é apresentado na Figura 2.13

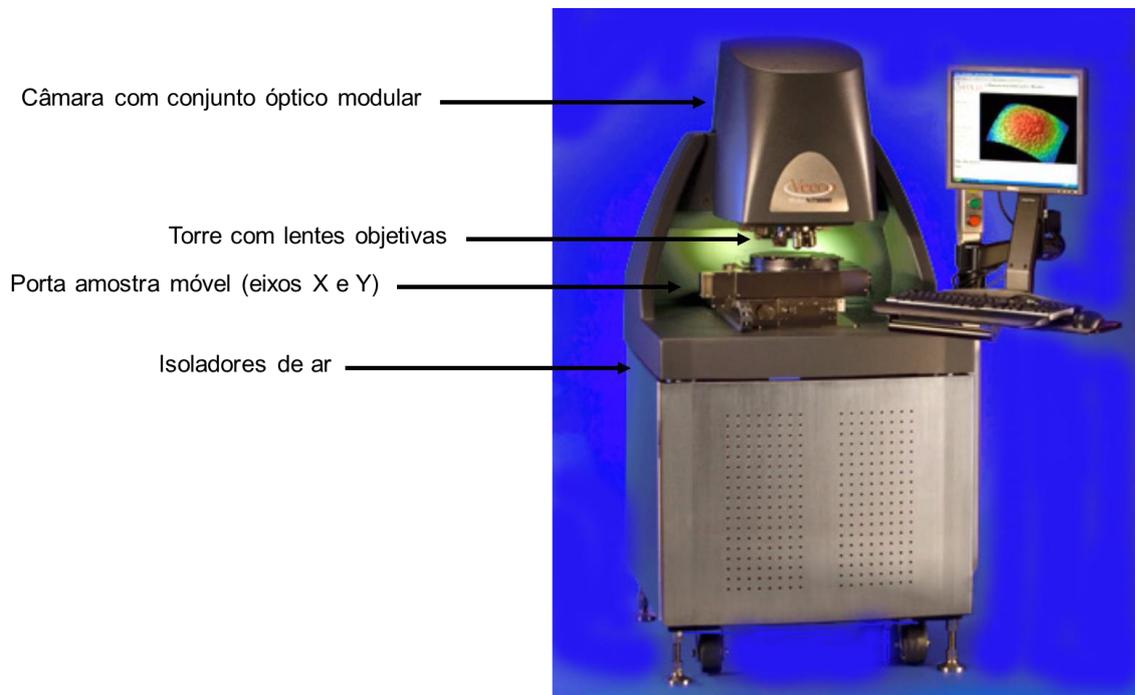


Figura 2.13 Perfilômetro óptico Wyko e componentes do sistema [74].

A leitura da superfície é realizada por detecção do erro focal ou por interferometria, sendo esta última configuração a mais comum. Seu princípio de funcionamento, ilustrado na Figura 2.14, baseia-se na reflexão de um feixe

de luz de LED pela superfície examinada e de outro feixe por um plano perfeito, adotado como superfície de referência. Os dois feixes de luz se recombinam e formam um padrão de interferência de faixas claras e escuras chamadas franjas, registradas por fotodiodos conectados a um microprocessador. Qualquer desvio, por menor que seja, ocasiona uma mudança no padrão das franjas e a distribuição das alturas da superfície examinada, registradas pelo processador, é alterada [75]. Variações verticais da ordem de até 1nm são detectadas pela medição da diferença de fase entre os feixes registrados pelos sensores.

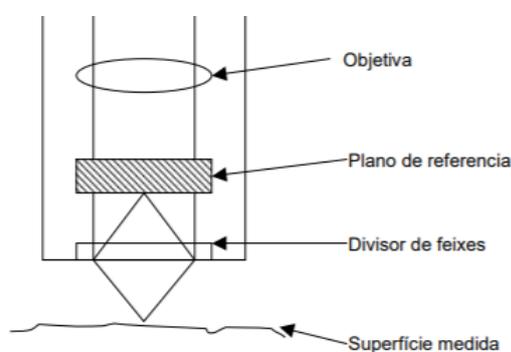


Figura 2.14 Perfilômetro óptico interferométrico [76].

Como mostra a Figura 2.15, diferentes tipos de lentes objetivas estão disponíveis, permitindo o uso de aumentos distintos para a análise da amostra. Cada lente tem sua própria distância de operação - distância a ser posicionada a partir do topo da amostra para que esta esteja em foco [74]. Essa distância, conseqüentemente, determinará a área da amostra que pode ser varrida.



Figura 2.15 Canhão com lentes para diferentes aumentos [74].

Em relação ao perfilômetro de contato, o óptico apresenta como principal vantagem a capacidade de analisar superfícies em três dimensões, incluindo regiões em que a agulha do perfilômetro de contato não consegue penetrar devido a sua dimensão física. Apesar das vantagens, a técnica é menos difundida que a perfilometria de contato, principalmente na indústria, devido ao seu maior custo e menor praticidade. Com isso, , grande parte da literatura e normas envolvendo rugosidade superficial referem-se a parâmetros bidimensionais determinados com perfilômetros mecânicos [77].

Deve-se mencionar, ainda, que, embora consiga representar uma área, e não somente um comprimento, o perfilômetro óptico avalia uma área pequena comparada à extensão varrida pelo mecânico. Isso pode fazer com que a técnica seja menos adequada que a perfilometria de contato para a avaliação de superfícies heterogêneas ou compostas por elementos superfícies de dimensões próximas à área varrida (como algumas superfícies de produtos cerâmicos).

Alguns dos parâmetros calculados a partir da superfície gerada após a varredura da amostra são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 Parâmetros fornecidos pelo perfilômetro óptico [78]

	Parâmetros de superfície análogos aos bidimensionais:
Rugosidades médias Sa, Sq,	Ra, Rq
Parâmetros de amplitude Sz, Sp, Sv,	Rz, Rp, Rv
<i>Skewness</i> e <i>Kurtosis</i> Ssk, Sku	Sk, Ku

Sdq	Análogo ao parâmetro bidimensional $\Delta q$ Inclinação média quadrática da superfície.
Sdr	<p>Razão da área interfacial desenvolvida:</p> $\frac{\text{Área adicional (contribuição da textura)}}{\text{Área do plano varrido}}$ <p>Sendo a área adicional definida pela diferença entre a área superficial medida e a área do plano varrido.</p>
Área superficial	Área total exposta de uma superfície, considerando regiões planas, picos e vales.
Área Lateral	Área superficial medida na direção lateral.
Index área	Razão entre a área superficial e a área lateral (medida da planicidade da superfície).
Volume natural	Quantidade de líquido necessária para submergir a superfície por completo, até seu ponto mais elevado.

O perfilômetro óptico também fornece a curva de razão de material e calcula os parâmetros  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_{pk}$ ,  $mr_1$ ,  $mr_2$  e, ainda,  $V_1$  e  $V_2$ , análogos tridimensionais a  $A_1$  e  $A_2$ , respectivamente.

### 2.5.3. Correlações Rugosidade x Resistência ao escorregamento

Em estudos anteriores, são mencionadas correlações entre alguns dos parâmetros bidimensionais de rugosidade apresentados na Tabela 2.6 e a resistência ao escorregamento ou coeficiente de atrito medidos por técnicas como as descritas no item 2.4 acima

Estudos datados de 1988 apontam uma tendência quase linear no aumento do coeficiente de atrito dinâmico com a rugosidade média da superfície, denotada pelo parâmetro  $R_a$  [79]. Correlações fortes também foram observadas entre essas variáveis em outro estudo de 2004 [3]. Em 2010, CHANG *et al* [80] afirmaram que esse parâmetro,  $R_a$ , seria suficiente para representar o atrito medido, ainda que para alguns modelos de regressão não se atingisse um nível estaticamente significativo.

De acordo com a *Health and Safety Executive*, que adota o método do Pêndulo Britânico para avaliação da resistência ao escorregamento, há uma forte correlação entre o PTV (*Pendulum Test Value*) e  $R_z$ . Assim, a utilização desse parâmetro é considerada uma eficiente análise complementar ao teste do Pêndulo, especialmente em pisos duros sob condições molhadas [81]. A Tabela 2.8 mostra uma classificação das superfícies de acordo com o parâmetro  $R_z$ , presente no Guia de Resistência ao Escorregamento do Reino Unido.

Tabela 2.8 Potencial de escorregamento do piso de acordo com  $R_z$  [82].

Potencial de Escorregamento	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )
Alto	< 10
Médio	10 – 20
Baixo	> 20

O parâmetro  $R_{pm}$  também se correlaciona bem com valores de coeficiente de atrito de revestimentos molhados. Altos valores de  $R_{pm}$  são relacionados a presença de picos elevados, que promovem bom ancoramento entre o pé ou calçado do pedestre e o piso. Além disso, esses elementos previnem a formação de filmes lubrificantes, visto que há espaços vazios para acomodar grande volume de líquido, evitando-se o recobrimento de pontos de contato [72]. Dessa forma, microgeometrias com altos valores de  $R_{pm}$  seriam desejáveis para aumentar a resistência ao escorregamento do piso e a segurança no uso do produto. O grande problema é que picos altos podem ser facilmente arrancados e podem dificultar o acesso, por mecanismos de limpeza tradicionais, à sujeira acumulada nos vales entre eles.

Afirma-se que apesar de parâmetros como o  $R_t$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ,  $R_{3y}$  e  $R_{3z}$  quantificarem a distância entre picos e vales de um perfil, o parâmetro mais representativo desse aspecto seria o  $R_k$ , profundidade do perfil reduzido, obtido graficamente através de curva de razão de material. E que um alto valor de  $R_k$  em uma superfície contribui para que seja evitada a lubrificação hidrodinâmica entre a mesma e outra superfície em contato, além de aumentar os pontos reais de contato na interface, elevando o atrito [72]. A Figura 2.16 ilustra um exemplo de um caso extremo de um perfil com alto  $R_k$ .

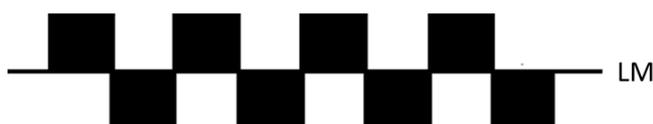


Figura 2.16 Perfil com  $R_k$  elevado, caso extremo [72]

A literatura também aponta  $\Delta a$ , a inclinação média do perfil, como um parâmetro a ser buscado para elevar a resistência ao escorregamento dos pisos. O aumento de  $\Delta a$  é alcançado com a redução do comprimento de onda das irregularidades, mantendo-se a mesma altura entre o pico e o vale, ou aumentando o número de irregularidades no local, por exemplo [72].

Em estudos bem recentes, abordam-se, também, relações entre a topografia tridimensional das superfícies e sua resistência ao escorregamento. Contribuições importantes, nesse sentido, têm sido proporcionadas pelo projeto

SlipSTD - desenvolvimento de superfícies padrão resistentes ao escorregamento. Esse é um projeto europeu parte do consórcio internacional de institutos líderes nas áreas de cerâmica, tribologia, segurança no trabalho e seguro obrigatório de acidentes, assim como organizações de arquitetura e fabricantes de placas cerâmicas. No âmbito desse projeto, o FGK, Instituto de Pesquisa de Materiais Inorgânicos, da Alemanha, desenvolveu um método para caracterização de superfícies cerâmicas por perfilometria óptica com base em normas internacionais e pôde ser estabelecida uma correlação da topografia superficial com o risco de escorregamento esperado para diferentes tipos de superfície. [50]. Definiram-se como parâmetros determinantes para a resistência ao escorregamento a altura da zona central da topografia,  $R_k$ , e a altura do pico mais elevado da topografia da superfície,  $S_p$ . Ambos estão representados na Figura 2.17, relacionados com o atrito e o ancoramento da superfície, influenciando sua resistência ao escorregamento [53]. De acordo com a literatura, a altura da zona de vales da superfície,  $R_{vk}$ , abaixo da zona central, tende a estar mais relacionada ao comportamento de limpabilidade e sujidade da superfície [50].

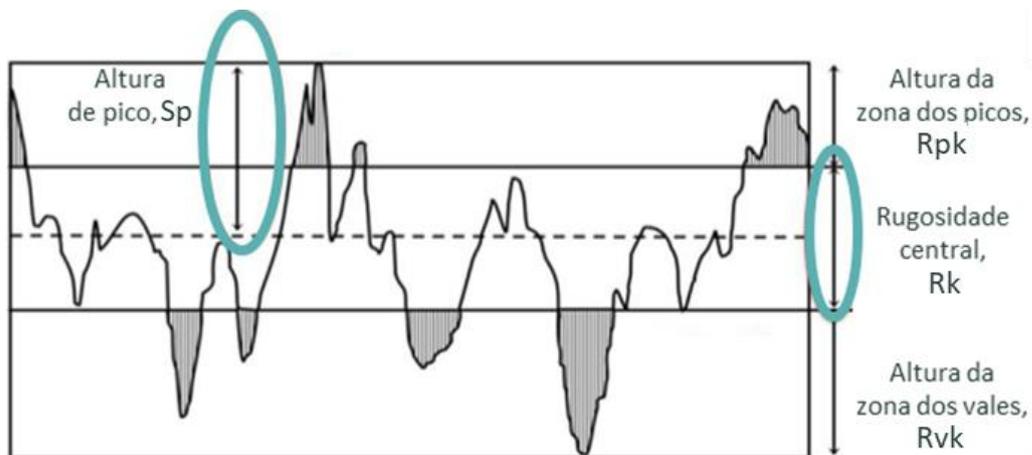


Figura 2.17 Parâmetros topográficos pertinentes estabelecidos como determinantes da resistência ao escorregamento [83].

A Figura 2.18 especifica a idoneidade de diferentes métodos de ensaio para diferentes superfícies classificadas de acordo com esses parâmetros. Nota-

se a falta de correlação entre os resultados dos métodos em todo o alcance de topografia de superfície disponível. Em superfícies lisas (grupo 1, incluindo pisos polidos) parâmetros como o meio e a velocidade de medição e tipo do material que faz a varredura do piso podem ser mais significativos que a topografia na determinação do atrito devido aos efeitos de aderência entre as superfícies em contato. Somente com o aumento da rugosidade (grupo 2), são estabelecidas correlações entre os métodos. Entretanto, para rugosidades mais elevadas, a perda de contato entre as superfícies em pontos mais profundos da varredura começa a prejudicar a confiabilidade das medidas para alguns métodos – a princípio para o deslizador motorizado e logo para o Pêndulo [84] – e a geometria macroscópica do perfil passa a ter grande influência.



Figura 2.18 Idoneidade dos diferentes métodos de ensaio de escorregamento em função das características das superfícies [84]

O estudo em questão foi ampliado de forma a incluir parâmetros que quantificam a distribuição espacial dos elementos salientes do perfil a fim de se explicarem as diferenças de coeficiente de atrito entre superfícies com valores de  $R_k$  e  $S_p$  similares. O parâmetro  $S_{sk}$ , a assimetria do perfil, está relacionada com a distribuição de picos e vales sobre o plano de referência médio do perfil, como nota-se na Figura 2.19.

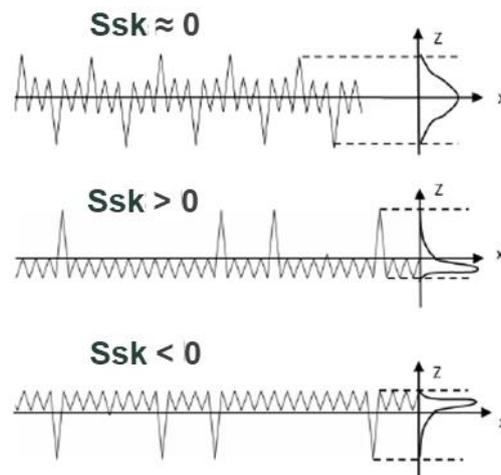


Figura 2.19 Parâmetro  $S_{sk}$  como indicação da distribuição de picos e vales sobre o plano de referência médio do perfil [53]

A Figura 2.20 ilustra a topografia e apresenta a resistência ao escorregamento de duas amostras do grupo 2 com valores comparáveis de  $S_p$  e  $R_k$ , mas valores de  $S_{sk}$  distintos. A linha vermelha simula uma carga plana e, assim, nota-se que, para a primeira superfície, com maior valor de  $S_{sk}$  (predominância de picos elevado distribuídos sobre uma superfície regular) há menos pontos de contato (flechas azuis) em comparação com a que apresenta  $S_{sk}$  próximo de zero. Em relação ao coeficiente de atrito, nota-se que os resultados mais satisfatórios foram obtidos para a primeira superfície, com alto valor de  $S_{sk}$ .

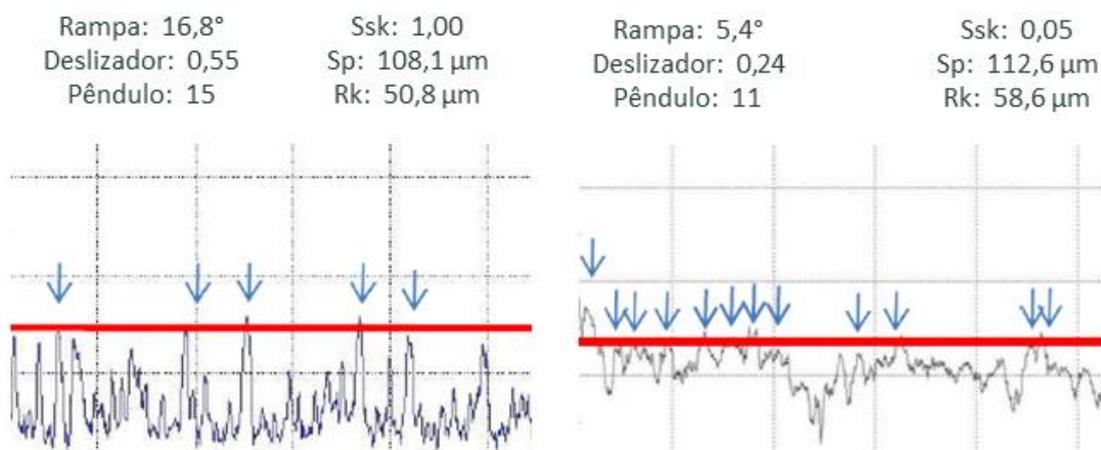


Figura 2.20 Efeito das diferenças de  $S_{sk}$  na resistência ao escorregamento de duas superfícies com  $S_p$  e  $R_k$  próximos.

Uma possível explicação foi dada pelos autores, conforme Figura 2.21, que representa três situações distintas de contato entre o relevo superficial e o sapato/material de varredura do teste. Na situação 1, os picos elevados proporcionam um efeito de ancoramento que é somado ao atrito desenvolvido no contato do pé com as outras regiões mais baixas da superfície, resultando em elevada resistência ao escorregamento. No entanto, nas situações 2 e 3, o valor de  $S_p$  é muito maior que  $R_k$ , o que indica que os picos da superfície são muito elevados, e, portanto, nesses casos, o contato do pé do pedestre com a região mais baixa do material depende de  $S_{sk}$ . Na situação 2, em que  $S_{sk}$  é próximo de zero, o contato do sapato se dá principalmente com os elementos mais salientes do perfil. Assim, apesar da contribuição desses elementos para o ancoramento do pé, há uma perda de atrito devido ao contato reduzido com as irregularidades da zona central da topografia do material. Como consequência, a superfície teria menor resistência ao escorregamento e seria, possivelmente, mais suscetível ao desgaste. Entretanto, se  $S_{sk}$  é diferente de zero, como na situação 3, a distribuição espacial mais esparsa dos picos permite que ocorra contato do pé com a rugosidade central. A contribuição do atrito devido ao contato somada ao efeito de ancoramento proporcionado pelos picos altos resulta em alta resistência ao escorregamento. Apesar disso, assim como na situação 2, a presença dos picos altos pode tornar a superfície mais susceptível ao desgaste. Nesse caso, em que os picos estão distribuídos da maneira não regular, os picos isolados podem tornar a resistência ao desgaste ainda menor.

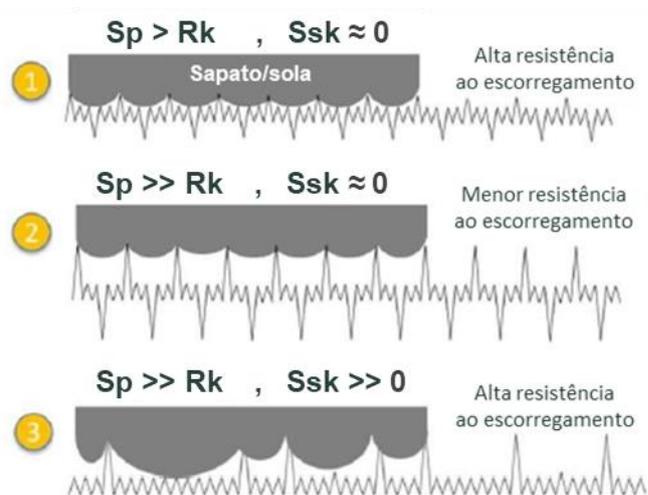


Figura 2.21 Descrição simplificada para possíveis situações de contato entre a superfície do piso e a do pé/sapato.

#### 2.5.4. Manutenção do desempenho de pisos cerâmicos durante o uso.

Como já mencionado, o perfil de rugosidade dos pisos cerâmicos pode ser significativamente alterado ao longo do seu tempo de uso devido ao desgaste e acúmulo de sujeira, o que pode comprometer sua resistência ao escorregamento e seus aspectos estéticos. Por esse motivo, deveria haver, por parte dos fabricantes desses produtos, uma forte preocupação com a manutenção do seu desempenho durante toda sua vida útil. Apesar disso, a resistência ao escorregamento dos pisos cerâmicos é, atualmente, avaliada apenas para as superfícies como saem da fábrica [50]. A previsão adequada do comportamento da resistência ao escorregamento das superfícies ao longo do tempo de uso esbarra nas dificuldades para a simulação fiel do desgaste e encardimento reais sofridos pelos pisos durante sua utilização. Nessa seção, são comentados alguns métodos utilizados em estudos recentes para tal finalidade.

#### 2.5.5. O desgaste

Os métodos de laboratório disponíveis para simular a evolução da abrasão em pisos cerâmicos submetidos ao tráfego de pedestres são aplicáveis apenas sobre amostras pequenas. No entanto, para permitir a varredura com os

dispositivos para avaliação da resistência ao escorregamento como o Pêndulo e os deslizadores motorizados, seria necessário produzir um desgaste controlado e uniforme em uma área maior.

Um processo de simulação de desgaste para placas grandes foi desenvolvido em um estudo de MUÑOZ, A., *et al* [85]. As amostras passam em uma cinta por uma máquina com cabeças polidoras que permitem a fixação de abrasivos diferentes e que giram sobre as mesmas para desgastá-las. O equipamento é ilustrado na Figura 2.22.



Figura 2.22 Máquina e cabeças polidoras giratórias sobre amostras [85].

Para o mesmo estudo, amostras foram aplicadas em um corredor de um restaurante *self service* - onde uma catraca registrava o tráfego diário de pessoas - e avaliadas, periodicamente, quanto à sua resistência ao escorregamento. Os resultados foram similares aos obtidos com a máquina polidora e, assim, como pretendia o estudo, a metodologia de simulação de desgaste desenvolvida foi validada.

Como ilustra a Figura 2.23, o valor de PTV para nove pisos – três que apresentam relevo superficial, três com superfícies com textura e três que apresentam somente irregularidades superficiais na escala da rugosidade – foi monitorado em função do número de pedestres que passaram sobre os mesmos em uma situação de uso real. A princípio se observa uma queda na resistência ao escorregamento das amostras. No entanto, após a passagem de um

determinado número de pedestres, a propriedade estabiliza-se, o que sugere que o desgaste da superfície dos pisos tenha atingido um nível máximo.

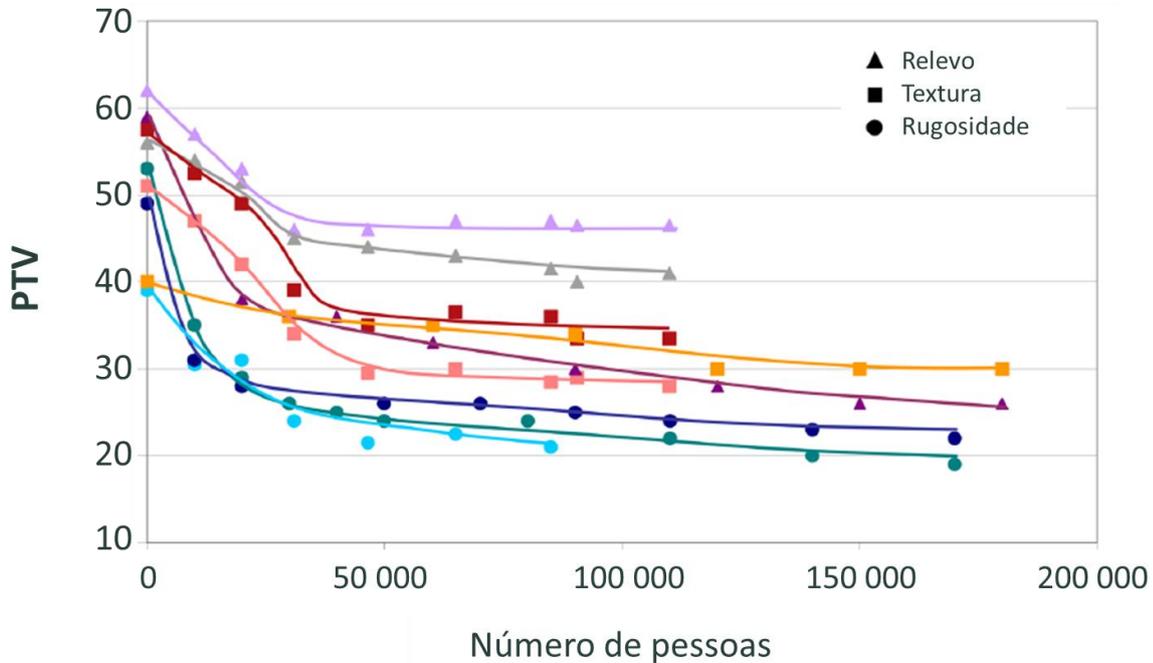


Figura 2.23 Durabilidade da resistência ao escorregamento para diferentes pisos cerâmicos [85].

Observa-se, entretanto, que a intensidade com que a resistência ao escorregamento diminui ao longo do experimento é diferente para as distintas superfícies consideradas.

Para as placas que apresentam apenas rugosidade (irregularidades micrométricas em sua superfície, houve uma queda significativa na resistência ao escorregamento logo para um tráfego inicial de pedestres, atribuído às modificações da rugosidade já em estágios iniciais de desgaste. Após a passagem de um determinado número de pedestres, a queda na resistência ao escorregamento dessas superfícies começa a ocorrer de forma mais suave.

As placas que apresentam textura superficial (além de elementos de rugosidade, apresentam ondulações) sofreram menor desgaste nas etapas iniciais do experimento e, ao final, sua resistência ao escorregamento se mantém

em níveis mais elevados, em comparação com os valores obtidos para as primeiras.

Para as peças com relevo, inicialmente, há uma queda na resistência ao escorregamento, devido às modificações da rugosidade do esmalte que as recobrem. Posteriormente, os valores começam a diminuir de forma mais suave provavelmente devido a contribuição do relevo, pouco afetado pelo desgaste, para atrito desenvolvido na interface entre o piso e o pé.

### **2.5.6. O encardimento**

Além do desgaste, ao longo da vida útil de um piso cerâmico, sua superfície também pode ser alterada pelo acúmulo de sujeira, com consequentes prejuízos em aspectos estéticos e funcionais. Isso evidencia a relevância da previsão do encardimento de uma superfície ao longo do tempo em que a mesma é utilizada. No entanto, assim como para a avaliação da resistência ao escorregamento, os métodos para avaliar as características de limpabilidade das superfícies em laboratório são aplicados às superfícies de produtos novos, antes da instalação.

Tais métodos, na realidade, consistem na exposição das superfícies a agentes manchantes e classificação das mesmas quanto à possibilidade / facilidade de limpeza, com base no tipo de agente limpante necessário para remover a mancha produzida. No entanto, os testes utilizam agentes manchantes não relevantes para a maioria das aplicações práticas de pisos, especialmente para áreas com tráfego intenso de pedestres. Como consequência, o que se observa na prática, em muitos casos, é a falta de correlação entre os resultados da avaliação e os problemas de limpeza reais relatados pelos usuários de pisos cerâmicos.

Apesar de avanços apresentados na simulação do desgaste para pisos com as dimensões requeridas para os ensaios de avaliação da resistência ao escorregamento, o acúmulo de sujeira, que ocorre simultaneamente ao desgaste na superfície dos pisos durante sua utilização, não é considerado.

O FGK desenvolveu um método para avaliação dos dois aspectos concomitantemente. A determinação da abrasão segundo o método de teste EN ISO 10545-7 (PEI) resulta em um padrão de abrasão não uniforme (com um maior efeito abrasivo na borda da superfície testada) e, por este motivo, no estudo em questão, outra abordagem foi utilizada. O uso de almofadas abrasivas em um dispositivo único de limpeza foi otimizado e validado, comparando-se a topografia das superfícies submetidas ao tratamento com réplicas idênticas de silicone de alta precisão das mesmas superfícies instaladas em locais onde há tráfego de pedestres e contato com sujidades. As superfícies foram sujas com uma mistura de óleo de amendoim, caulim e fuligem, para compor um solo adesivo, gorduroso e com partículas de sujeira, simulando a sujeira das ruas. Para a determinação da limpabilidade, foi testado um limpador de teste automático com multipistas usando escovas, esponjas e tecidos preparados [50].

Determinou-se que a susceptibilidade à sujeira é dependente, não apenas da rugosidade, mas, também, do percentual e profundidade de poros e depressões na superfície, muitas vezes irrelevantes para a resistência ao escorregamento. Isso reforça a importância de os fabricantes considerarem que as características da superfície do piso afetam, além do seu desempenho na saída da fábrica, a forma com que este é alterado com o tempo, a depender das condições de uso.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Etapa 1

Para o estudo proposto, 70 amostras de pisos cerâmicos com características superficiais bastante diversas foram selecionadas. Todos os pisos são produtos comerciais nacionais com desempenho e propriedades em conformidade com as exigências da normalização. Na Tabela 3.1, é apresentado o conjunto de amostras selecionadas, agrupadas em tipologias, de acordo com suas características superficiais.

Tabela 3.1 Tipologias de superfícies selecionadas para o estudo.

Superfícies estudadas		Amostras
Não Esmaltada	Polida	A1, A2, A3
Não Esmaltada	Natural	C1, C2, C3
Não Esmaltada	Natural, com relevo	D1, D2, D3, D4, D5, D6
Esmaltada	Brilhante	E1, E2, E3, E4, E5, E6
Esmaltada	Satinada	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10
Esmaltada	Brilhante gotejada	G1, G2, G3, G4
Esmaltada	Mate com granilha	H1, H2, H3, H4
Esmaltada	Textura ABS (protetiva)	I1, I2, I3
Esmaltada	Textura de madeira	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11
Esmaltada	Textura de pedra	L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13, L14
Esmaltada	Textura de pedra, com relevo	M1, M2, M3, M4, M5, M6

Todas as amostras foram avaliadas quanto à sua resistência ao escorregamento no Centro Cerâmico do Brasil (CCB), em Santa Gertrudes, através de três métodos distintos:

- Pêndulo Britânico, conforme procedimento descrito na norma UNE ENV 12633:2003 [86]. As medidas foram realizadas com a interface úmida, após a impregnação da superfície avaliada com água.
- Deslizador motorizado similar ao Tortus, conforme procedimento descrito na NBR 13818:1997/ Anexo N [55]. O dispositivo utilizado foi o DS - *Dynamic Slip*, da marca *Gabbrielli*, que opera da mesma maneira que o Tortus, equipamento mais conhecido, cujo nome é utilizado, popularmente, para se referir a esse ensaio. A interface de medida utilizada entre a borracha e o revestimento, nesse caso, foi água com agente tensoativo. Ademais, foram realizadas medidas com a interface seca.
- Deslizador motorizado BOT-3000E: conforme procedimento descrito na norma ANSI B101.3:2012 [56]. Assim como para o DS, foram realizadas medidas para as condições da superfície úmida, impregnada com água e agente tensoativo, e seca.

A Tabela 3.2 apresenta um comparativo entre os métodos de avaliação da resistência ao escorregamento listados acima, em relação ao tipo, à dureza e às dimensões da borracha utilizada para a varredura em cada um deles.

Tabela 3.2 Tipo e especificações da borracha utilizada para a varredura com os métodos de avaliação da resistência ao escorregamento estudados.

	Borracha	Dureza	Dimensões
Pêndulo	59	IRHD 59±4	76,2 mm x 25,4 mm
DS	4S	IRHD 96±2	9 mm de diâmetro
BOT-3000E	SBR	Shore A 95±3	3 mm x 28 mm

O CCB foi um importante parceiro na realização desse trabalho, oferecendo apoio e disponibilidade para a realização dos ensaios previstos

nessa etapa. Com base nos resultados obtidos na caracterização da resistência ao escorregamento dos pisos estudados, doze amostras, com superfícies distintas e desempenhos bastante diversos, foram selecionadas. Ainda nessa etapa inicial do trabalho, também no CCB, essas amostras foram avaliadas quanto à sua facilidade de limpeza através de testes de resistência ao manchamento conforme as normas ISO 10545-14 [87] e ASTM C1378 [88].

Para o ensaio da ISO 10545-14, as superfícies permaneceram, por 24 horas, em contato com três agentes manchantes, mantidos sob um vidro de relógio. Isso garante o contato direto da superfície com os agentes, que são líquidos, evitando-se a evaporação dos mesmos e assegurando sua concentração na região central da peça para a produção da mancha desejada. Os agentes manchantes utilizados, estabelecidos pela norma, foram:

- Azeite de oliva, como agente formador de película
- Óxido de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), pigmento verde, em óleo leve, 40% (m/m)
- Iodo em solução alcoólica (13 g/L), como agente oxidante

Após o tempo de exposição aos agentes manchantes, fizeram-se tentativas de remoção da mancha produzida. Os agentes limpantes recomendados pela ISO 10545-14, utilizados no estudo, foram:

- Água quente
- Agente de limpeza fraco: agente comercial, não abrasivo, com pH de 6,5 a 7,5 (detergente neutro)
- Agente de limpeza forte: agente de limpeza comercial contendo partículas abrasivas, com pH de 9 a 10 (saponáceo)
- Solução de HCl 3% (V/V), preparada a partir de Ácido Hidroclorídrico 38%, pela adição de 79 mL do reagente em 951 mL de água destilada

De acordo com o tipo de agente limpante capaz de remover a mancha com eficácia, as superfícies foram classificadas numa escala de limpabilidade de 1 a 5:

- Nível 5 – máxima facilidade de limpeza, limpeza com água quente
- Nível 4 – limpeza com detergente neutro e esponja macia

- Nível 3 – limpeza com saponáceo em escova rotativa
- Nível 2 – limpeza por imersão (24h) em solução de HCl 3% (V/V)
- Nível 1 – remoção de manchas é impossível

Para o ensaio de resistência a manchas da ASTM C1378, seis agentes manchantes foram mantidos em contato com as superfícies. No caso dos agentes líquidos (quatro primeiros dentre os seis listados abaixo), o contato da superfície com o volume de solução foi assegurado com a ajuda de um tubo de ensaio invertido e vedado. Os agentes manchantes utilizados foram:

- Tinta lavável (fabricada pela Parker ou equivalente)
- Tinta preta insolúvel em água (fabricada pela Parker ou equivalente)
- Solução de azul de metileno 1%
- Solução de permanganato de potássio 1%, preparada a partir de cristais de  $\text{KMnO}_4$  com grau de pureza 99%, com a dissolução de 1 g do reagente em 100 mL de água destilada.
- Negro de fumo, em pó
- Rejunte de cor contrastante, sem areia, aplicado na forma de pasta

Após a exposição das superfícies a esses agentes manchantes por 24h, utilizaram-se os mesmos procedimentos de limpeza previstos na ISO 10545-14. No ensaio da ASTM C1378, as superfícies apenas são classificadas quanto à possibilidade ou impossibilidade de remoção das manchas com as soluções limpantes testadas. No entanto, neste trabalho, em específico, as superfícies também foram classificadas quanto à sua facilidade de limpeza, em classes de 1 a 5, em relação às manchas produzidas com agentes manchantes recomendados pela ASTM C1378.

Além disso, na etapa de limpeza das superfícies por imersão em solução de HCl 3% (V/V), no caso da impossibilidade de remoção da mancha com esse agente ácido, foi realizada a tentativa de limpeza por imersão, também por 24h, em outros dois agentes diferentes. A princípio, em uma solução básica, de KOH (200 g/L), preparada pela dissolução de 200 g de hidróxido de potássio 90% em 1 L de água destilada. Posteriormente, havendo a persistência da mancha, em

acetona (grau técnico). Enfim, às superfícies que permaneceram manchadas após os procedimentos mencionados, atribuiu-se classe 1 de limpabilidade.

### 3.2 Etapa 2

As 12 amostras selecionadas na etapa anterior do trabalho, com resultados de resistência ao escorregamento bastante distintos entre si, foram caracterizadas quanto a aspectos superficiais que pudessem estar relacionados com os diferentes comportamentos de atrito observados.

Um perfilômetro mecânico Mitutoyo, do Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, foi utilizado para a obtenção dos perfis de rugosidade de cada amostra. O comprimento de amostragem – *cut-off* – utilizado para a medição foi de 2,5 mm, conforme recomendações da literatura [72] e da ABNT NBR 6405:1988 [68]. Também como sugere essa norma, 17,5 mm na superfície de cada amostra foram varridos (7 comprimentos de amostragem de 2,5 mm) e, desse segmento varrido, 2,5 mm foram descartados de cada uma das extremidades. Foi obtido, portanto, um perfil de 12,5 mm (5 comprimentos de amostragem de 2,5 mm), a partir do qual foram determinados os parâmetros de rugosidade das superfícies avaliadas. Foram realizadas 4 repetições das medidas - 2 em uma direção e 2 na direção contrária - tomadas em pontos diferentes das amostras.

Um perfilômetro óptico Veeko, do Departamento de Eng. Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC – USP), foi utilizado para a obtenção de imagens da topografia das superfícies. O padrão de interferência detectado e transferido para o computador foi processado pelo software Vision. O Vision produz uma exibição gráfica representativa do mapa de contorno da superfície da amostra e, com base na superfície gerada após a varredura, parâmetros de topografia, como apresentados na revisão da literatura, foram determinados.

Os parâmetros de rugosidade obtidos com os dois perfilômetros foram correlacionados, através de ferramentas estatísticas, com a resistência ao

escorregamento avaliada com os métodos utilizados na etapa anterior do trabalho e nas condições de medida mencionadas (superfície seca ou úmida).

### **3.3 Etapa 3**

Nessa etapa do trabalho investigaram-se os efeitos do desgaste e acúmulo de sujeira nas características superficiais dos pisos estudadas na etapa 2 e o impacto dessas mudanças no desempenho dos produtos. Optou-se por submeter as amostras a uma situação de desgaste real, ao invés de simulações em laboratório. A escolha se deu devido à dificuldade de se promover, com as técnicas laboratoriais disponíveis, um nível de desgaste uniforme e homogêneo em peças da dimensão necessária para as análises de escorregamento subsequentes e, também, para que o acúmulo de sujeira fosse contemplado no estudo. Para isso, as amostras foram expostas a uma situação de uso intensivo.

Três placas de 20x10cm foram cortadas de peças originais de cada uma das doze amostras caracterizadas na etapa anterior. Essas placas foram assentadas no Restaurante Universitário da UFSCar, sobre a passarela em amarelo demarcada na Figura 3.1, onde, diariamente, formam-se filas para devolução das bandejas do Buffet. Na mesma figura, ilustra-se o projeto do assentamento, com a disposição das 36 amostras no local do experimento.

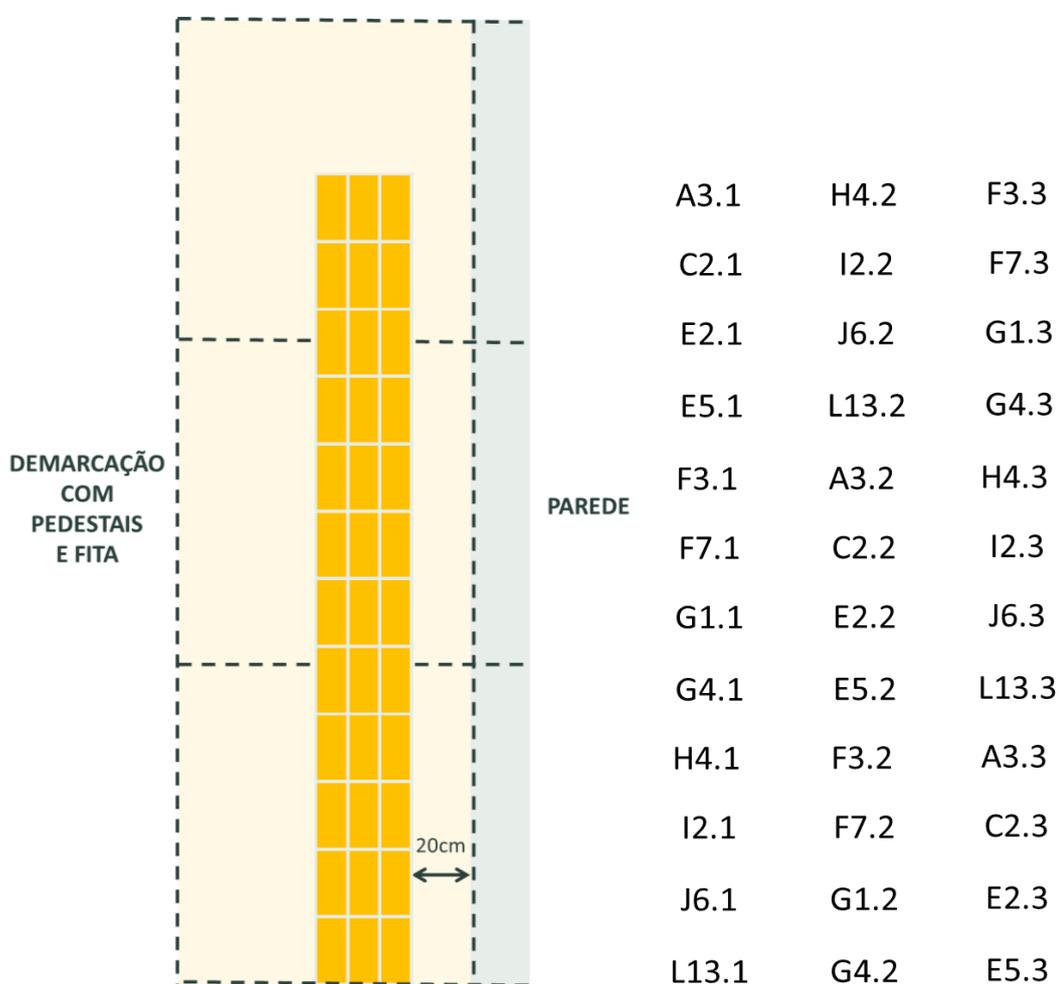


Figura 3.1 Local do assentamento das amostras no Restaurante Universitário da UFSCar e disposição dos pisos selecionados para o estudo, ao longo da faixa delimitada.

A conclusão da obra pode ser observada na Figura 3.2. Conforme previsto no projeto apresentado acima, um corredor foi demarcado com pedestais e fitas para garantir o fluxo homogêneo e unidirecional de pedestres, sem desvios, sobre a faixa de amostras.



Figura 3.2 Finalização da obra e montagem do corredor projetado para centralizar e direcionar o fluxo de pedestres sobre a passarela de amostras.

A posição dos pedestais foi monitorada diariamente, assim como o fluxo de pedestres, para se averiguar se o mesmo, de fato, ocorria sobre as amostras. Os pisos foram limpos de segunda a sexta-feira, após o almoço, com água e sabão comum.

A Figura 3.3 mostra o experimento em funcionamento, exemplificando a passagem de pedestres.

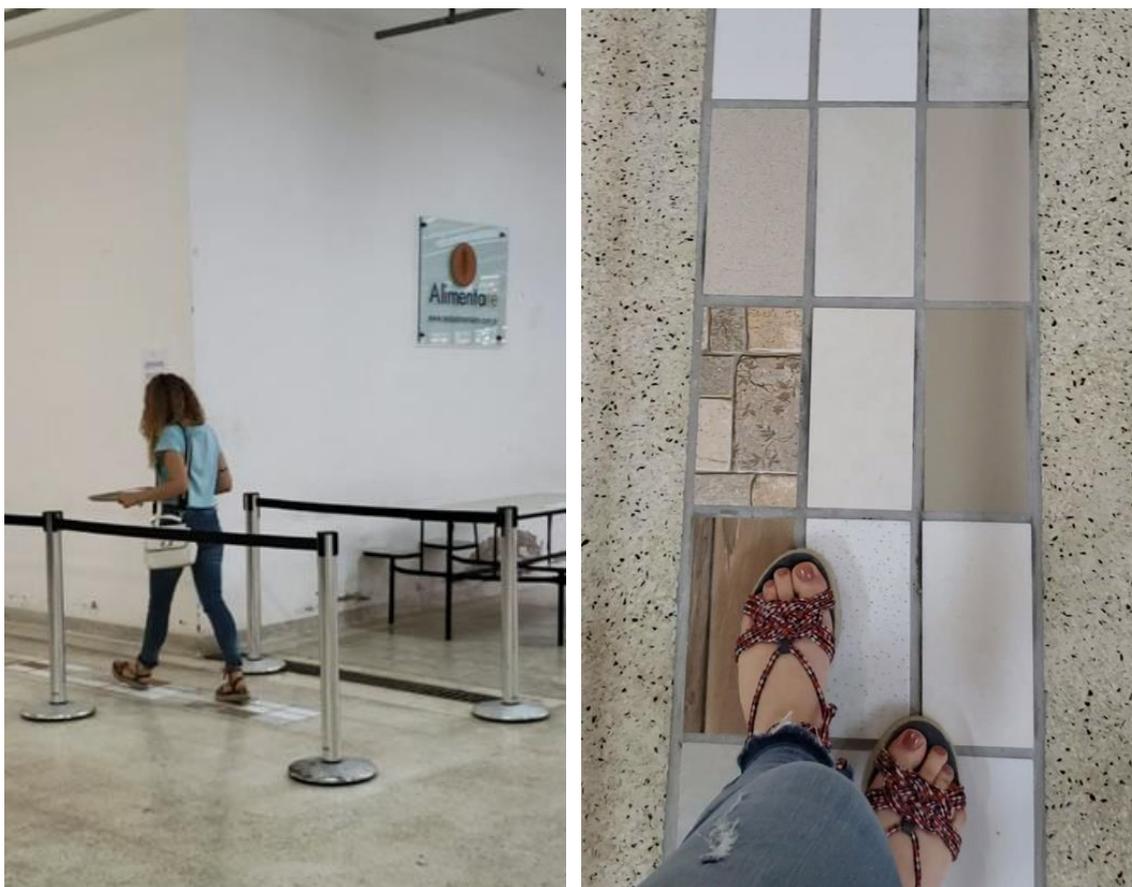


Figura 3.3 Funcionamento do esquema de passagem de pedestres no corredor projetado, sobre a passarela de amostras.

Procedimentos similares foram realizados em um estudo sobre a durabilidade da resistência ao escorregamento de pisos cerâmicos [85] e, os resultados, já apresentados na Figura 2.23, revelam uma estabilização na queda dessa propriedade após a passagem de um determinado número de pedestres, da ordem de 100 mil.

Com base nesse estudo, estimou-se o número de pedestres que deveriam passar sobre os pisos para que se atingisse esse patamar, com o nível máximo de desgaste. A partir desse número, determinou-se o tempo que as amostras deveriam ficar assentadas, de acordo com o tráfego semanal de pedestres no Restaurante. Nesse sentido, contagens estimaram que, por semana, ao menos 10 mil pedestres passavam sobre as amostras. Considerando que nem todos os pedestres obedeceram ao fluxo centralizado sobre a passarela com os pisos e que houve períodos sem aulas, nos quais a frequência no restaurante é

significativamente menor, optou-se por aguardar um semestre para a retirada das amostras, para garantia da obtenção do seu desgaste máximo.

A obra para o assentamento das amostras foi realizada no dia 1º de abril de 2019 e a remoção das placas do solo ocorreu no dia 5 de outubro do mesmo ano. Em seguida, o piso original de granilite removido do local do experimento no restaurante foi recomposto. A Figura 3.4 mostra o processo de arrancamento das amostras, executado pelo profissional que havia executado o assentamento, e uma amostra já removida do solo.



Figura 3.4 Remoção das amostras da área do experimento no Restaurante universitário da UFSCar e uma das placas removidas.

As amostras menos porosas, como porcelanatos, foram mais facilmente removidas do solo. As outras, como, por exemplo, a apresentada na figura acima, foram removidas com mais cuidado e geralmente saíam do solo com argamassa grudada ao tardo, removida posteriormente para nivelar as placas para os testes. Apesar do cuidado, na retirada das amostras mais porosas do conjunto, três placas das 36 assentadas se romperam. Essa possibilidade já havia sido considerada e não comprometeu a continuidade do estudo.

Após a remoção das peças, realizou-se uma reavaliação da sua resistência ao escorregamento a úmido, com os três métodos utilizados nas análises da etapa 1. Os testes foram realizados para as 36 placas – 3 de cada uma das 12 amostras estudadas. Para cada uma dessas 12 amostras, a média dos resultados das 3 placas foi realizada.

O encardimento foi avaliado através da observação visual, por razões e de acordo com procedimentos detalhados, posteriormente, na apresentação dos resultados. O acúmulo de sujeira observado foi confrontado com o desempenho que as superfícies apresentaram nos testes de manchamento realizados na etapa 1.

Os perfis / topografias e parâmetros quantificadores das características superficiais das amostras foram novamente determinados. No caso dos parâmetros, estes foram determinados para as 3 placas de cada uma das 12 amostras e o valor médio foi calculado.

Buscaram-se correlações entre as características superficiais das amostras antes do uso com o nível de desgaste e encardimento sofridos por estas. Da mesma forma, observou-se o efeito desse desgaste e acúmulo de sujeira nas características superficiais das amostras e a consequência dessas alterações na resistência ao escorregamento final dos produtos.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ETAPA 1

#### 4.1.1 Avaliação da Resistência ao Escorregamento

Os 70 pisos comerciais selecionados foram avaliados com o Pêndulo e os deslizadores motorizados. Para cada conjunto de amostras de mesma tipologia, os valores médios de coeficiente de atrito dinâmico,  $\mu_d$ , são apresentados na Figura 4.1. Apesar de os resultados do Pêndulo serem fornecidos em escala própria, com valores de PTV variando de 0 a 100, nesse trabalho, esses valores foram divididos por 100 para serem representados na mesma escala que os obtidos com os outros tribômetros, de 0 a 1. No entanto, deve-se ressaltar que o artifício foi utilizado apenas para facilitar a comparação dos resultados e que o valor obtido não corresponde, exatamente, ao coeficiente de atrito. Para que isso fosse verdade, além da divisão por 100, deveria se utilizar um fator de correção para os desvios da conversão. No entanto, esse fator de correção não foi considerado no cálculo, justamente, para que as diferenças de comportamento dos resultados dos métodos pudessem ser observadas.

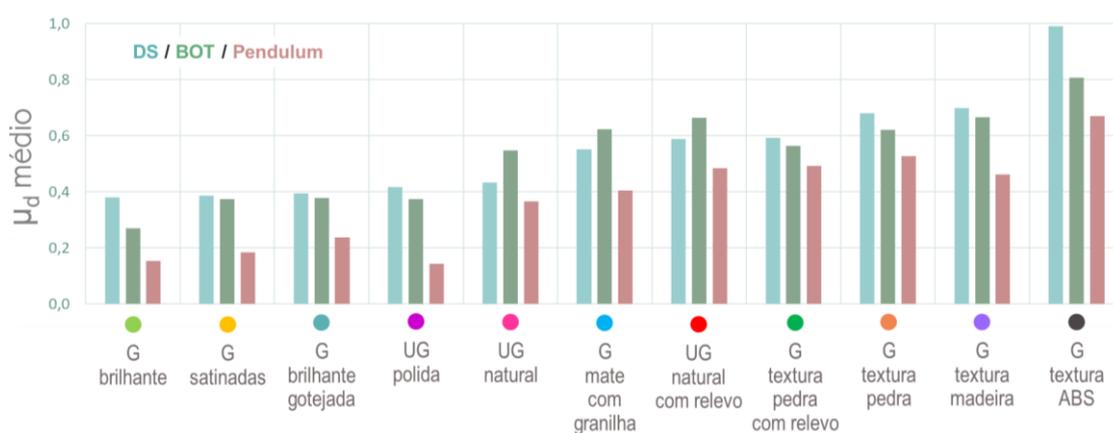


Figura 4.1 Coeficiente de atrito dinâmico médio,  $\mu_d$ , para os grupos de amostras das diferentes tipologias de pisos cerâmicos estudados – esmaltados, G, e não esmaltados, UG – avaliados com o DS, o BOT-3000E e o Pêndulo.

Como pode ser observado, para todas as tipologias avaliadas, há diferenças significativas entre resultados obtidos com os três métodos distintos, como esperado, de acordo com relatos de diversos estudos prévios. Além disso, também indo ao encontro da literatura disponível, essas diferenças entre métodos ocorrem de formas distintas para cada tipo de superfície. Para as superfícies não esmaltadas (UG) – naturais e com perfis de relevo – e para o grupo das superfícies mate com granilhas, o coeficiente de atrito médio é mais elevado quando mensurado pelo BOT. No entanto, para todos os outros grupos avaliados, os resultados obtidos com o DS, equipamento similar ao patenteado Tortus, foram superiores. Para várias das tipologias estudadas, os valores de coeficiente de atrito médio obtidos com esses dois deslizadores motorizados são próximos, o que é plausível dado que a determinação do  $\mu_d$  pelos dois dispositivos é baseada no mesmo princípio de funcionamento.

Em contraposição, os resultados obtidos com o Pêndulo se distanciam dos valores retornados pelos deslizadores motorizados, provavelmente devido à diferença significativa entre os modos de operação desses dispositivos. Para todos os grupos de amostras, sem exceção, os valores de coeficiente de atrito médio fornecidos pelo Pêndulo são significativamente inferiores aos outros. Essa tendência sugere uma subestimação desses resultados em relação aos obtidos com os deslizadores motorizados e/ou a superestimação dos valores fornecidos pelos deslizadores em relação aos resultados do Pêndulo. É comum a subestimação do coeficiente de atrito da superfície quando, durante a varredura, há perda de contato entre a borracha do equipamento medidor e as regiões mais profundas do relevo ou rugosidade da mesma [53]. Por sua vez, associa-se a superestimação do coeficiente de atrito aos efeitos de aderência da borracha à superfície das amostras mais lisas. Como os métodos operam de formas e em condições distintas, a magnitude desses efeitos é diferente para cada um deles e, ainda, influenciada pelo tipo e características de cada superfície avaliada.

As divergências de  $\mu_d$  esperadas entre as tipologias avaliadas foram, de fato, constatadas e bastante significativas. Observa-se uma clara tendência de aumento do coeficiente de atrito, desde a origem do gráfico, das superfícies lisas mais brilhantes para as menos brilhantes, seguidas por grupos de amostras que

possuem alguma textura ou relevo superficial. Dentre esses últimos, observa-se que os grupos de superfícies com perfis de relevo apresentaram coeficiente de atrito médio abaixo dos valores determinados para os grupos de amostras que, apesar de não perfiladas, apresentam algum tipo de textura superficial. Isso sugere que a textura mais áspera das superfícies desses últimos três grupos de amostras exerça um papel bastante relevante na contribuição para o aumento da resistência ao escorregamento desses pisos.

Contudo, alguns pisos perfilados com textura mais áspera podem apresentar valores de  $\mu_d$  mais elevados, inclusive, que os coeficientes médios obtidos para os três últimos conjuntos do gráfico, devido ao efeito combinado do relevo e da textura na definição dos mecanismos de atrito na superfície desses produtos. O que ocorre é que, apesar desses possíveis resultados individuais elevados de  $\mu_d$  para essas amostras, a média geral desses conjuntos de pisos perfilados, bastante variados, acaba por ser reduzida devido a presença de outras amostras que, apesar do relevo proeminente, apresentam rugosidades muito baixas.

Essa variação de características superficiais e, portanto, de desempenho entre amostras de um mesmo conjunto, ocorre para outros grupos de pisos estudados. Apesar de permitir fácil comparação do coeficiente de atrito médio entre as tipologias avaliadas, a Figura 4.1 não explicita os valores individuais de  $\mu_d$  das amostras para a observação da dispersão desses resultados dentro de um mesmo grupo. Isso está ilustrado nos gráficos da Figura 4.2, em que os resultados individuais de coeficiente de atrito para as 70 amostras avaliadas são apresentados. Três gráficos foram traçados visto que, em cada um, dois dos três métodos de avaliação da resistência ao escorregamento estudados – DS, BOT e Pêndulo – foram correlacionados entre si. Pontos de uma mesma cor correspondem a amostras individuais pertencentes a um mesmo grupo de tipologia de superfícies, detalhadas na legenda.

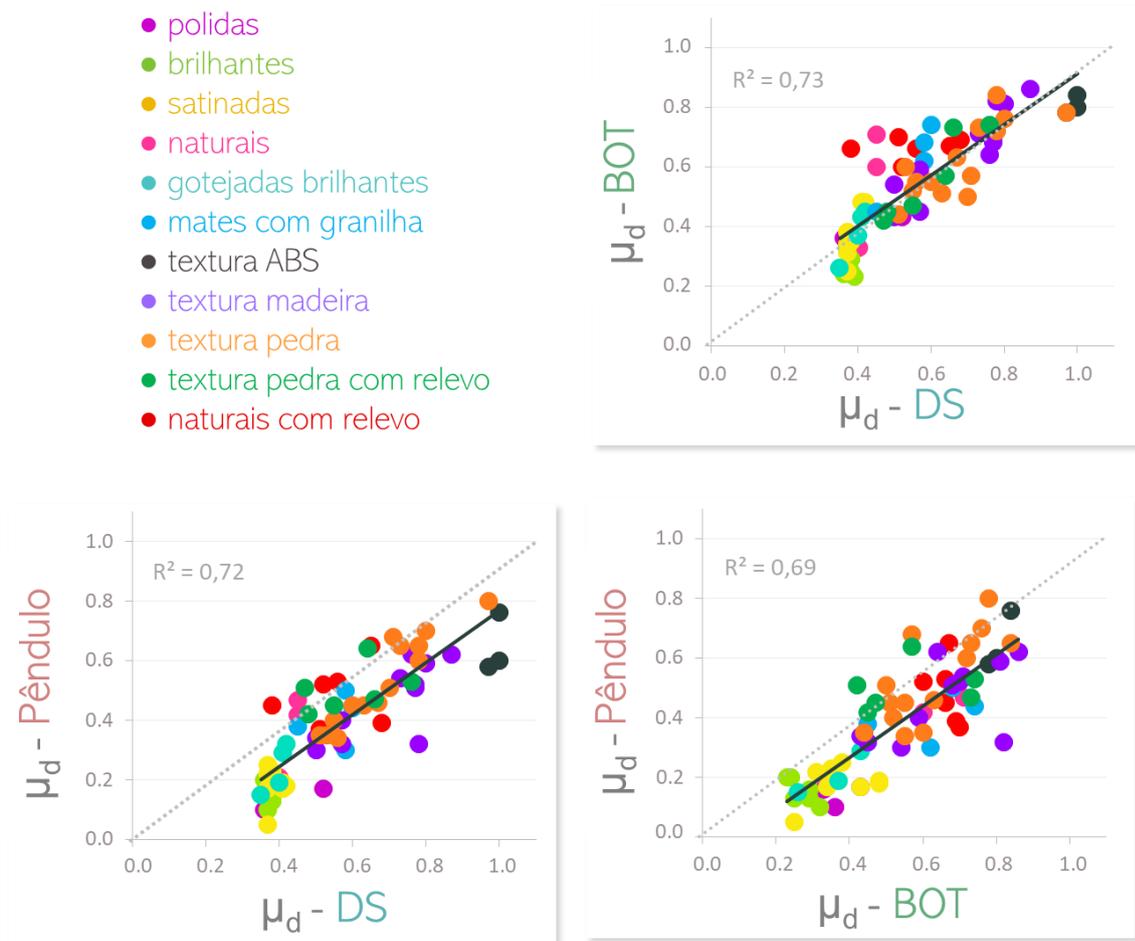


Figura 4.2 Correlações entre os resultados de resistência ao escorregamento obtidos com métodos avaliados – DS, BOT e Pêndulo – correlacionados dois a dois.

Para algumas tipologias observa-se uma tendência de agrupamento dos pontos em uma determinada região do gráfico. Por exemplo, as amostras com superfícies polidas (●) e as esmaltadas lisas brilhantes (●), lisas satinadas (●) e gotejadas brilhantes (●) se encontram agrupadas mais próximas da origem do gráfico, com coeficientes de atrito mais baixos. As amostras ABS (●) também apresentam resultados próximos entre si, mas, nesse caso, os pontos se agrupam no extremo oposto do gráfico. Esses produtos são recobertos com uma camada protetiva (camada de esmalte sem finalidade de colorir) projetada especialmente para criar uma textura em sua superfície, com elevações que contribuem com sua resistência ao escorregamento.

Para todos os outros grupos de superfícies, esse agrupamento de pontos correspondentes às amostras de mesma tipologia não é observado. Os pontos de uma mesma cor são mais espaçados entre si, o que sugere que, dentro do mesmo grupo, os pisos apresentem superfícies com características muito variadas. Isso ocorre, por exemplo, para os grupos de amostras com relevo e/ou textura em sua superfície. Como já comentado anteriormente, a maior dispersão dos resultados, nesse caso, pode ser atribuída ao efeito combinado de mais de um elemento superficial – relevo, ondulação e rugosidade – e da interação entre eles no  $\mu_d$ . A consequência da variedade de combinações dos diferentes tipos de relevos, ondulações e rugosidades das superfícies é a ampla variedade em seus resultados de resistência ao escorregamento.

Supondo-se uma situação idealizada em que os três métodos utilizados para avaliar os pisos retornassem exatamente o mesmo valor de  $\mu_d$  para cada uma das amostras, então todos os pontos representados nos gráficos acima recairiam sobre a linha tracejada, traçada da origem do gráfico ao ponto (1,1). Na situação real, contudo, mecanismos de atrito distintos se originam na interface de medida para cada um dos métodos e, além disso, cada dispositivo faz uma leitura e interpretação diferente dos elementos superficiais dos pisos, o que faz com que os resultados de  $\mu_d$  sejam divergentes entre si para muitas amostras. Consequentemente, fazendo-se um ajuste linear dos dados plotados nos três gráficos acima, para os três pares de métodos correlacionados, obtêm-se coeficientes de correlação,  $R^2$ , não satisfatórios. Em outras palavras, o fato de uma mesma amostra apresentar  $\mu_d$  distintos, quando avaliadas por métodos diferentes, faz com que os dados não se ajustem à linha tracejada que representa a situação ideal descrita acima. Quanto maior o desvio dessa situação ideal, ou seja, quanto maior a discrepância entre os resultados obtidos pelos dispositivos diferentes, menor o valor de  $R^2$ .

Para o gráfico em que são comparados os dois deslizadores motorizados, DS e BOT, apesar do valor de  $R^2=0,73$ , com uma considerável dispersão dos dados, a linha de tendência real dos resultados do conjunto de amostras é praticamente coincidente com a linha idealizada. Por outro lado, confrontando-se esses métodos com o Pêndulo, nota-se que a linha de tendência dos

resultados é deslocada para a direita. Este é um reflexo da subestimação, de modo geral, do  $\mu_d$  estimado com o Pêndulo em relação aos deslizadores motorizados, tendência já observada anteriormente (Figura 4.1). O manuseio do Pêndulo requer bastante experiência por parte do operador, principalmente para a avaliação de superfícies com relevos mais proeminentes. Para a condução adequada do teste, é necessária familiaridade com todo o procedimento, desde o princípio, quando se ajusta a área da superfície que efetivamente entrará em contato com a borracha na medição. A ausência de contato da borracha com a superfície durante a varredura de regiões mais profundas pode levar, facilmente, a uma subestimação do coeficiente de atrito.

Como já mencionado, há maior dificuldade em se encontrar correlações satisfatórias entre resultados de  $\mu_d$  de métodos distintos quando são considerados grupos de amostras muito diversificados, com superfícies em que diferentes aspectos (relevo, ondulação e rugosidade) possam atuar de forma combinada no desenvolvimento dos mecanismos de atrito. Por esse motivo, a presença de amostras perfiladas no conjunto de pisos estudados pode contribuir, significativamente, para o abaixamento dos valores de  $R^2$  para os ajustes lineares entre métodos. Além disso, essas correlações podem ser prejudicadas pela facilidade de subestimação do  $\mu_d$  mencionada acima para essas superfícies com relevo. Como resultado, a avaliação do coeficiente de atrito para superfícies com relevo mostra-se uma tarefa bastante complexa e há baixa confiabilidade dos resultados obtidos a partir dos métodos disponíveis.

Nesse sentido, com a remoção das amostras com relevo profundo do conjunto de superfícies avaliadas, poderia se esperar, portanto, um aumento do  $R^2$  para as correlações obtidas anteriormente. Na Tabela 4.1 observa-se que, de fato, retirando-se os dados referentes às amostras com perfis de relevo do conjunto total estudado, o  $R^2$  aumenta significativamente para as 3 correlações buscadas.

Tabela 4.1 R<sup>2</sup> do ajuste linear dos dados para as correlações entre os métodos estudados.

			R <sup>2</sup> do ajuste linear	
Par de métodos correlacionados:			Conjunto com todas as amostras	Sem placas com perfil de relevo
<b>BOT</b>	X	<b>DS</b>	<b>0,73</b>	<b>0,79</b>
<b>Pêndulo</b>	X	<b>DS</b>	<b>0,72</b>	<b>0,81</b>
<b>Pêndulo</b>	X	<b>BOT</b>	<b>0,69</b>	<b>0,76</b>

Voltando à Figura 4.2, nota-se que, além da observação da variação do  $\mu_d$  dentro de um mesmo grupo de tipologia, os gráficos possibilitam a análise de como essa variação se dá para cada método de medida.

Para os grupos de superfícies mais lisas, por exemplo, essa variação do  $\mu_d$  entre as amostras é consideravelmente menor para os resultados obtidos com o DS, em comparação com o BOT ou o Pêndulo. Para melhor observação desse comportamento, na Figura 4.3, gráficos como os da figura anterior foram traçados, considerando-se apenas essas superfícies. Mais especificamente, foram selecionadas as superfícies que apresentaram, quando avaliadas pelo dispositivo DS, coeficiente de atrito entre 0,35 (valor mínimo obtido) e 0,45.

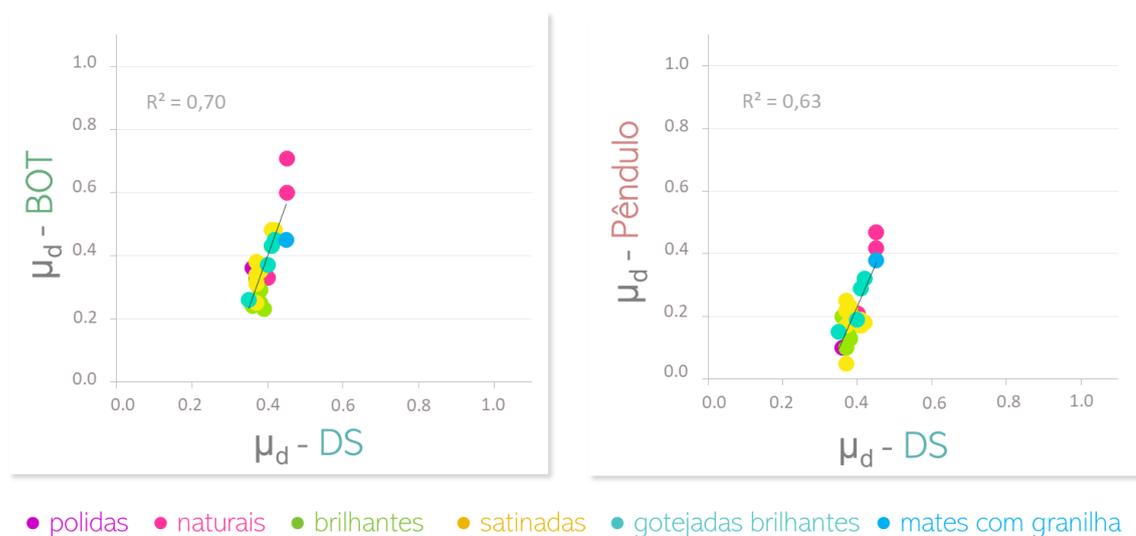


Figura 4.3 Variação do  $\mu_d$  determinado com o BOT e o Pêndulo, para amostras com coeficientes de atrito entre 0,35 e 0,45 quando medidos pelo DS.

As linhas de tendência, nesses gráficos, com valores razoáveis de  $R^2$ , são mais inclinadas no sentido vertical, em comparação com as observadas para os dados do conjunto total de 70 amostras. Isso significa que as mesmas amostras que apresentam coeficiente de atrito na estreita faixa de 0,35 a 0,45 quando avaliadas com o DS, apresentam resultados consideravelmente mais variados quando estimados por outros métodos de medição.

Para o BOT, essa variação vai de 0,23 a 0,71, havendo amostras com resistência ao escorregamento mais baixas e outras bem mais elevadas em comparação com o DS. Para os resultados do BOT, destacam-se dois valores muito superiores ao restante, correspondentes a duas superfícies naturais (não esmaltadas e não polidas, ●).

No segundo gráfico, nota-se a similaridade no limite superior dos valores medidos pelo DS e pelo Pêndulo para as superfícies avaliadas, de 0,45 e 0,47, respectivamente. No entanto, enquanto o menor resultado obtido com o DS foi de 0,35, no caso do pêndulo, esse valor foi de 0,05. Essa tendência, de os resultados obtidos com o Pêndulo serem, de modo geral, inferiores aos obtidos com outros métodos, já fora previamente observada.

Conclui-se, a partir disso, que, justamente para essas amostras que tendem a ser mais escorregadias, os métodos de avaliação da resistência ao escorregamento diferem quanto à sua sensibilidade e fornecem resultados mais ou menos conservadores, uns em relação aos outros. O conhecimento de tais relações é primordial para que se possa ser definido um método adequado e universal para avaliar as superfícies dos pisos e selecioná-los para o uso, de forma segura, para diferentes ambientes e riscos que ofereçam.

Um dos maiores problemas, no que se refere à determinação inadequada da resistência ao escorregamento dos pisos, é a superestimação do  $\mu_d$ , que pode fazer com que amostras que são, na prática, bastante escorregadias, sejam classificadas como seguras em situações em que não o são. Isso é mais comum para os deslizadores motorizados, dado que a interface plana entre as amostras e a borracha do equipamento favorecem efeitos de aderência. Se a presença de líquidos entre as superfícies, ao invés de facilitar o movimento relativo entre elas, promover a intensificação desses efeitos de aderência na interface, o  $\mu_d$  da

superfície avaliada a úmido pode ser maior que o avaliado a seco. Superfícies muito lisas, por exemplo, com valores de  $\mu_d$  a seco muito baixos, podem apresentar resultados mais elevados a úmido e, inclusive, dependendo da magnitude da superestimação do coeficiente, serem classificadas erroneamente como seguras nessa condição. Em alguns casos, na avaliação dessas superfícies muito lisas, a aderência da superfície com a borracha do tribômetro é perceptível durante o deslizamento do equipamento, como se houvesse um vácuo na interface de medida. Nesses casos, o resultado é comprometido e repete-se o ensaio.

Considerando-se as discussões acima e a ampla variedade de superfícies no conjunto de pisos estudados, esperam-se comportamentos bastante distintos em relação às mudanças do  $\mu_d$  entre a condição seca e úmida de avaliação. Não se esperam, portanto, boas correlações entre os resultados de  $\mu_d$  obtidos nas duas condições, para nenhum dos métodos de medida. Na Figura 4.4, gráficos similares aos anteriores foram plotados, correlacionando-se, para os dois deslizadores motorizados, os resultados de  $\mu_d$  obtidos a seco e úmido. Os coeficientes de atrito referentes às amostras com perfil de relevo foram desconsiderados para se minimizar o efeito dessa variável nos resultados.

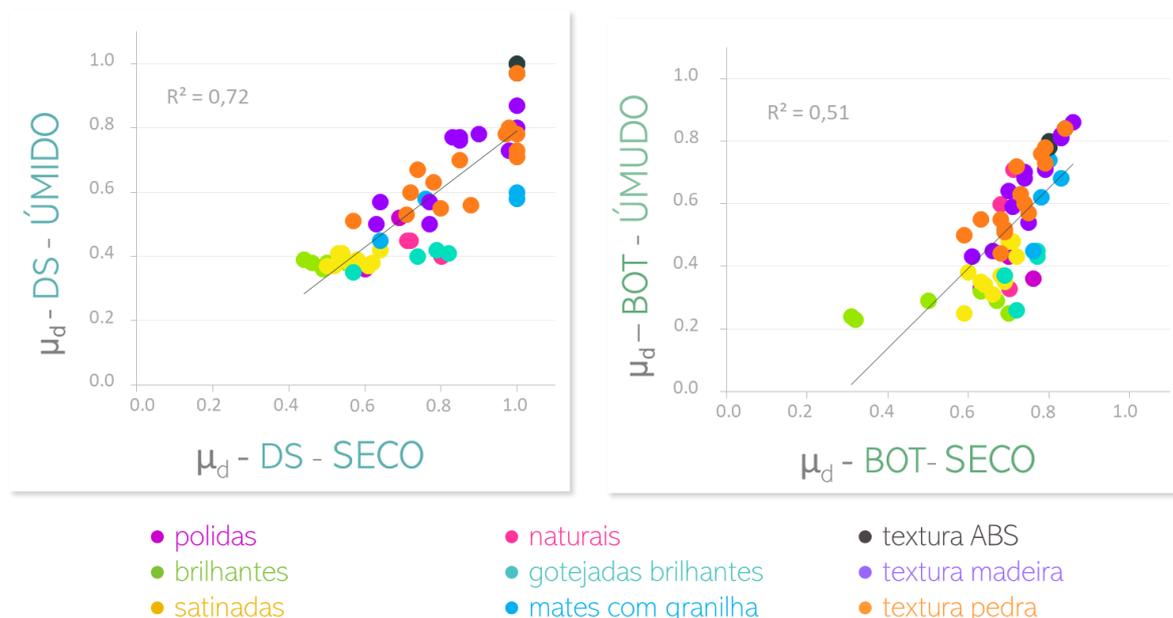


Figura 4.4 Correlações entre os resultados de resistência ao escorregamento obtidos com a interface seca e úmida para o DS e o BOT.

Para ambos os gráficos as linhas de tendência estão deslocadas do centro ligeiramente para o canto inferior direito, dada a diminuição, de forma geral, dos coeficientes de atrito medidos com a presença de líquido na interface. Como esperado, as correlações entre os resultados a seco e a úmido são medianas, dado que o abaixamento do  $\mu_d$  devido à presença de líquido se deu de formas variadas entre as superfícies estudadas. Mesmo dentro de um grupo de amostras de mesma tipologia, nota-se essa variação devido à influência das peculiaridades das superfícies, não sendo, portanto, observado um padrão para a variação do  $\mu_d$  entre as duas condições de avaliação.

Para o BOT, a inclinação da linha de tendência indica que a queda no  $\mu_d$  devido a presença de água na interface é mais suave para os pisos com maiores coeficientes de atrito a seco. Por outro lado, para os pisos que apresentam baixa resistência ao escorregamento inicial, a redução do  $\mu_d$  se deu de forma mais brusca. Para as amostras com textura de madeira, pedra e ABS (●, ● e ●), a ondulação e rugosidade superficiais mais evidentes podem ter contribuído com a maior resistência ao escorregamento a seco desses produtos e, nesse caso, com a manutenção dessa propriedade na presença de líquidos. Essas saliências nas superfícies dessas amostras atuam aumentando seu coeficiente de atrito através de mecanismos de ancoramento e aumentando a capacidade de acomodação de volume de líquido nas cavidades do perfil, prevenindo-se a formação de filmes lubrificantes. Por outro lado, as amostras mais escorregadias avaliadas a seco, tornam-se ainda menos seguras na condição úmida.

Nesse gráfico, nota-se, ainda, o deslocamento notável de algumas amostras lisas brilhantes (●) em relação à linha de tendência dos resultados, fator que contribui para o baixo  $R^2$  obtido para a correlação. Uma possível explicação para o comportamento dos resultados dessas amostras é a superestimação do  $\mu_d$  devido a intensificação dos efeitos de aderência pela adição do líquido na interface de avaliação, como mencionado acima.

Para o gráfico com os resultados obtidos com o DS, a linha de tendência se inclina no sentido contrário, em relação ao observado no caso do BOT. Isso significa que, nesse caso, a maior redução do  $\mu_d$  ocorre para as amostras com maior resistência ao escorregamento a seco. De acordo com a leitura desse

equipamento, os elementos mais salientes do perfil, aparentemente, se tornam menos efetivos em contribuir com a resistência ao escorregamento dos pisos quando estes se encontram molhados. Ao mesmo tempo, é possível que o coeficiente de atrito das superfícies mais lisas, já inicialmente baixos, não tenham sofrido grandes reduções devido à contribuição de efeitos de aderência aumentados pela presença do líquido na interface de medida.

Deve-se destacar que vários pontos encostam na extremidade direita desse gráfico. Em outras palavras, há pontos referentes a amostras com  $\mu_d$  máximo, igual a 1, na condição seca. A observação visual dessa tendência dos resultados sugere que, apesar de ser impossível pela própria definição do coeficiente de atrito, se o equipamento pudesse retornar valores ainda superiores à unidade, o faria para essas amostras. Este é um indício bastante forte da superestimação dos resultados a seco, de forma geral, para o método. Para o BOT, esse comportamento não foi observado.

Deve-se mencionar que, apesar de as medidas da resistência ao escorregamento a seco terem sido consideradas neste trabalho, para melhor compreensão do comportamento do atrito na presença de líquidos na interface de medida da propriedade, esses valores não são relevantes para a classificação das superfícies. A NBR 13818/Anexo N solicita que apenas os resultados obtidos a úmido sejam considerados para tal finalidade.

#### **4.1.2 Seleção de amostras para prosseguimento do estudo**

Um conjunto reduzido de amostras foi selecionado para as próximas análises e caracterizações previstas para o desenvolvimento do trabalho. Com base nos resultados obtidos no item 4.1.1 anterior, selecionaram-se doze amostras dentre as avaliadas. Foram escolhidos pisos de tipologias distintas e que apresentam características superficiais e resultados de resistência ao escorregamento bastante diversos. As superfícies das amostras selecionadas estão ilustradas na Figura 4.5.



Figura 4.5 Amostras selecionadas para caracterização superficial.

As duas primeiras amostras são porcelanatos técnicos, sendo as únicas do conjunto todo que não receberam esmalte em sua superfície. No entanto, a amostra A3 foi submetida a um processo de polimento e, por essa razão, apresenta uma superfície bastante espelhada, ao contrário do piso C2, natural, com aspecto mais rústico.

As amostras E são porcelanatos esmaltados brilhantes, mas cabe mencionar que E2 se diferencia de E5 por ter sido submetido ao polimento após o processo de esmaltação.

As amostras F, também porcelanatos esmaltados, têm superfícies satinadas, ou seja, com um aspecto menos brilhantes que as amostras E, devido ao tipo de esmalte recebido em sua superfície.

Sobre a superfície dos pisos G, um esmalte brilhante foi pulverizado para produzir um efeito conhecido por “gotejado”. A superfície G1 apresenta ondulações bastante evidentes, mas muito lisa ao toque, enquanto G4 é ligeiramente mais áspera.

O piso H4 recebeu, em sua superfície, um esmalte mate e, também, a aplicação de granilhas.

A amostra I2, apresenta, em sua superfície, classificada como ABS, uma camada de esmalte mate gravado na forma de pontos para produzir, intencionalmente, uma textura interessante para aplicações onde alta resistência ao escorregamento é requisitada.

A amostra J6 é um porcelanato que recebeu esmalte e decoração de forma a simular a aparência e textura de madeira.

Por fim, o porcelanato L13, além de esmaltado e decorado, recebeu aplicação de granilha para que sua superfície apresentasse características similares às de uma pedra natural. Para essas amostras, apresentam-se na Tabela 4.2, os resultados da avaliação da resistência ao escorregamento para os métodos e condições adotados na análise.

Tabela 4.2 Coeficiente de atrito das amostras selecionadas, medidas com DS (a seco e a úmido), BOT-3000E (a seco e a úmido) e Pêndulo (a úmido).

$\mu_d$	A3	C2	E2	E5	F3	F7	G1	G4	H4	I2	J6	L13
<b>DS</b> seco	0,69	0,71	0,49	0,46	0,52	0,61	0,57	0,79	1,00	1,00	0,85	1,00
<b>DS</b> úmido	0,52	0,45	0,36	0,38	0,37	0,37	0,35	0,42	0,60	1,00	0,77	0,97
<b>BOT</b> seco	0,70	0,68	0,31	0,67	0,64	0,60	0,72	0,77	0,80	0,80	0,74	0,79
<b>BOT</b> úmido	0,43	0,60	0,24	0,29	0,34	0,38	0,26	0,45	0,74	0,80	0,70	0,78
<b>PÊNDULO</b> úmido	0,17	0,42	0,20	0,13	0,17	0,25	0,15	0,32	0,44	0,60	0,52	0,80

Nota-se ampla variedade de resultados de resistência ao escorregamento devido à diversidade de características superficiais presentes nas amostras selecionadas. Por exemplo, considerando os resultados obtidos para a condição úmida, enquanto a amostra F3, porcelanato técnico esmaltado satinado, apresenta, para o Pêndulo,  $\mu_d$  de 0,17, a amostra I2, com protetiva ABS, apresenta coeficiente de atrito igual a 1,00 quando avaliada com o DS.

Dessa forma, é possível identificar características, tanto relacionadas à elevada resistência ao escorregamento de algumas amostras, quanto responsáveis pelo desempenho insatisfatório de outras, a fim de que sejam, respectivamente, exploradas ou evitadas nas superfícies de produtos destinados a áreas de risco de escorregamento.

Cabe mencionar que a ampla gama de resultados apresentados pelo conjunto de amostras não se deve apenas à variedade de superfícies consideradas, mas sim também às variações de resultados entre métodos, mesmo considerando uma única amostra. A amostra A3, por exemplo, apresentou coeficiente de atrito a úmido igual a 0,53 quando avaliada com o DS e igual a 0,17, quando avaliada com o Pêndulo.

Como já observado, os resultados obtidos com o Pêndulo são, em geral, inferiores e mais distantes dos resultados obtidos com os deslizadores motorizados. Já entre os deslizadores, apesar dos resultados próximos devido à semelhança entre os princípios de operação, percebe-se que o DS, geralmente, fornece resultados mais elevados. Inclusive, o  $\mu_d = 1,00$ , obtido para a amostra I2 na condição úmida, é, claramente, um resultado superestimado pela técnica de medição.

A Figura 4.6 a seguir apresenta uma comparação visual dos resultados dos testes realizados na condição úmida. Apenas os resultados das peças avaliadas a úmido foram considerados pois a comparação entre os resultados de diferentes métodos só faz sentido quando os ensaios são realizados nas mesmas condições. A linha tracejada delimita o valor acima do qual o coeficiente de atrito deve estar para que um piso possa ser recomendado para uso em áreas onde há riscos de escorregamento.

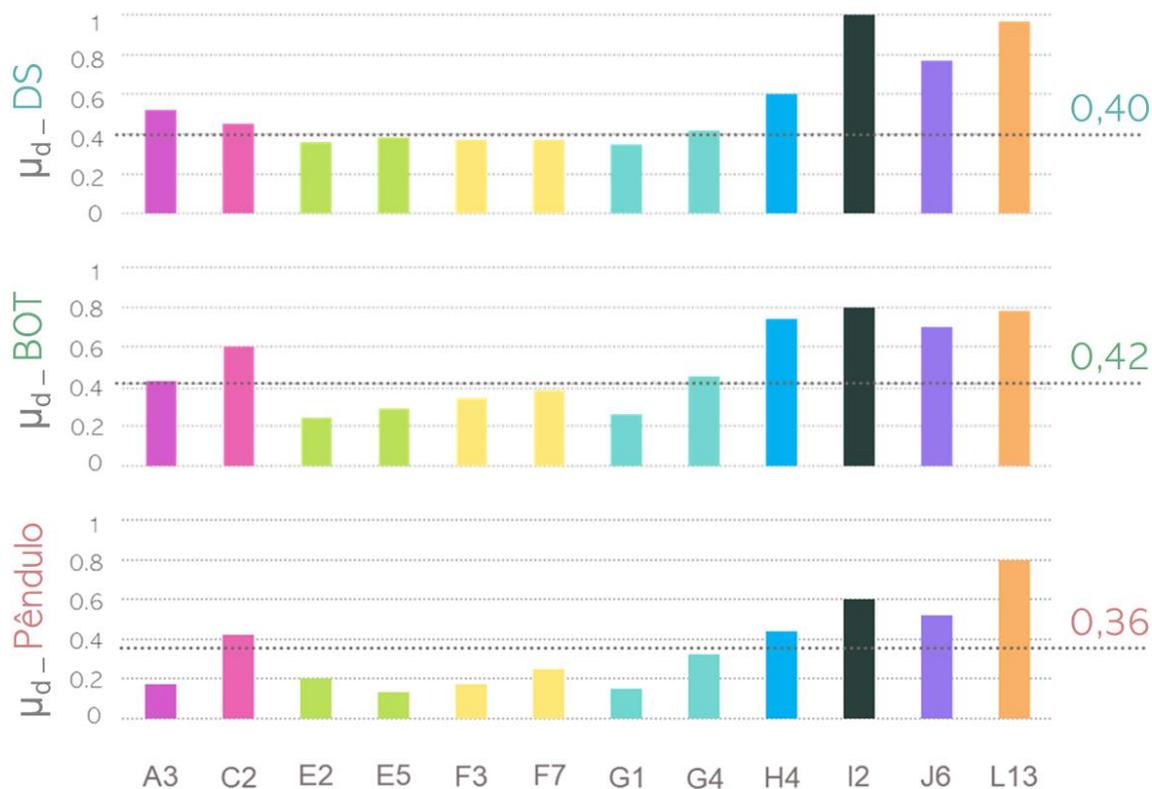


Figura 4.6 Coeficiente de atrito das amostras selecionadas, avaliadas na condição úmida pelo DS, BOT-3000E e Pêndulo.

A figura auxilia na visualização da variação do  $\mu_d$  entre as diferentes superfícies avaliadas e, para uma mesma amostra, as divergências de resultados entre métodos. De modo geral, apesar dessas divergências, analisando-se a linha tracejada que representa o requisito de coeficiente de atrito para que o produto possa ser utilizado em áreas de risco de escorregamento, nota-se que, praticamente, todas as amostras que seriam aprovadas para um dos métodos, também seriam aprovadas pelos outros dois. É o caso das amostras C2, H4, I2, J6 e L13. Da mesma forma, as amostras que não cumprem o requisito de resistência ao escorregamento para um dos métodos, também não cumprem para os outros.

A única amostra que apresenta comportamento diferente dessa tendência é a amostra A3, o porcelanato polido. Esta apresenta um resultado muito baixo de coeficiente de atrito quando avaliada com o Pêndulo, o que faria com que esta fosse reprovada para uso em ambientes críticos. No entanto, quando



Observa-se, de modo geral, que as superfícies das doze amostras são facilmente limpáveis após sua exposição, por 24h, aos agentes manchantes recomendados pela ISO 10545-14 – azeite de oliva, óxido de cromo em óleo leve e iodo em solução alcóolica. Com exceção da amostra A3 e da amostra L13, todas as outras apresentaram, para esses três agentes manchantes, nível 5 de limpabilidade – ou máxima facilidade de limpeza – de acordo com a classificação prevista nessa norma. Isso significa que, para a maioria das amostras, as manchas produzidas com os agentes considerados puderam ser removidas com o simples enxágue com água corrente.

A amostra L13, com relevo e textura trabalhados de forma a reproduzir, artificialmente, as características superficiais de uma pedra natural, apresentou classe de limpabilidade 4 para o azeite de oliva e óxido de cromo em óleo leve. Isso significa que, para a remoção das manchas produzidas com esses agentes, o enxágue com água corrente não foi efetivo, tendo sido necessário o uso de um detergente neutro. A amostra A3, o porcelanato polido, apresentou classe 3 de limpabilidade para as manchas produzidas com iodo em solução alcóolica, visto que somente a limpeza com saponáceo em escova rotativa foi capaz de limpar a superfície. Muito provavelmente, a presença de poros abertos pelo processo de polimento na superfície dessa amostra, susceptíveis à penetração de contaminantes, contribuiu para esse resultado.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de limpabilidade para as amostras expostas a agentes manchantes recomendados para o ensaio da ASTM C1378 [88]. No caso da norma ISO 10545-14, as amostras que permanecem manchadas após a tentativa de limpeza com escova rotativa e saponáceo são expostas a uma solução de HCl por 24h e, se a limpeza for eficaz, as superfícies são classificadas como Nível 2. Do contrário, são classificadas como Nível 1, o mais baixo na escala de limpabilidade da norma.

Apesar de este processo de classificação não ser adotado pela ASTM C1378, no caso desse trabalho, as superfícies manchadas com agentes especificados nessa norma também foram classificadas de 1 a 5 quanto a sua facilidade de limpeza. Nesse caso, ainda, para manchas remanescentes após limpeza com solução de HCl, outros dois agentes limpantes previstos na ASTM

C1378 – solução de KOH e acetona grau técnico – foram utilizados. Se a limpeza com algum desses agentes foi eficaz, as amostras foram classificadas como nível 2 de limpabilidade e, na Tabela 4.4, a seguir, tem seus resultados apresentados em vermelho, com um código referente ao agente limpante que foi capaz de remover a mancha.

Tabela 4.4 Classificação das superfícies quanto a limpabilidade após contato com agentes manchantes previstos pela ASTM C1378. Para amostras com limpabilidade nível 2, consta na tabela o agente limpante capaz de remover as manchas (HCl: solução de HCl, KOH: solução de KOH ou A: acetona).

Agente manchante	Amostras											
	A3	C2	E2	E5	F3	F7	G1	G4	H4	I2	J1	L13
Negro de fumo	5	5	4	5	5	4	5	4	5	4	4	3
Rejunte contrastante	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4
Tinta Lavável	KOH	5	5	3	5	KOH	4	4	5	5	5	4
Tinta preta insolúvel em água	A	4	5	3	5	5	3	4	5	KOH	5	4
Solução de azul de metileno	A	KOH	3	3	KOH	KOH	KOH	4	4	KOH	4	3
Solução de permanganato de potássio	HCl	HCl	3	3	3	HCl	HCl	HCl	3	3	HCl	A
<b>Classe de limpabilidade na escala NBR</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

Pela ASTM C1378, todas as amostras seriam classificadas como limpáveis, o que não diferencia as superfícies ou fornece informações sobre a previsão do nível de encardimento das mesmas durante o uso. No entanto, adotou-se a classificação da ISO 10545-14 para a facilidade de limpeza, de 1 a 5, para a melhor interpretação dos resultados.

Para os agentes manchantes sugeridos pela ASTM C1378, foi observada menor facilidade de limpeza das superfícies avaliadas, em comparação com os agentes sugeridos pela norma ISO 10545-14. Nenhuma das amostras apresenta Nível 5 de limpeza para todos os agentes, como aconteceu para os agentes utilizados anteriormente. Tampouco houve amostras que apresentaram somente Nível 5 e Nível 4. Todas as superfícies avaliadas, pelo menos para algum dos agentes manchantes, apresenta classe de limpabilidade de Nível 3 ou 2.

Os resultados indicam uma dificuldade clara, principalmente, na remoção das manchas produzidas com solução de azul de metileno e de permanganato de potássio, para todas as amostras consideradas no estudo. Apesar disso, não houve nenhuma superfície classificada com limpabilidade Nível 1. Ou seja, por mais difícil que tenha sido a remoção das manchas provocadas pelos agentes manchantes utilizados no ensaio, isso foi possível com algum dos agentes limpantes testados.

Deve-se mencionar que os testes realizados com os agentes manchantes previstos pelas normas e a classificação das superfícies em níveis de limpabilidade, não preveem adequadamente o real acúmulo de sujeira durante o uso do piso. Apesar disso, fornecem indicativos do desempenho das amostras em termos de facilidade de limpeza úteis como base para comparação entre as diferentes tipologias, com características superficiais variadas. Nas próximas etapas do estudo, através da caracterização de aspectos superficiais das amostras, pretende-se compreender como as peculiaridades das mesmas estão correlacionadas com os desempenhos observados até este ponto da investigação. Em outras palavras, busca-se descobrir que características das superfícies avaliadas fazem com que estas sejam mais ou menos escorregadias, susceptíveis ao acúmulo de sujeira e fáceis de serem limpas.

#### **4.1.4 Conclusões Parciais**

Os resultados de coeficiente de atrito dos pisos cerâmicos variaram consideravelmente entre os métodos estudados e tal variação se deu de forma distinta para cada tipologia avaliada. A leitura e interpretação das características

superficiais de uma mesma amostra é diferente para cada um dos equipamentos de medição e, ainda, para algumas superfícies, afetadas por efeitos de super e subestimação do atrito. De modo geral, os resultados do Pêndulo são inferiores aos obtidos com os deslizadores motorizados, que fornecem valores mais similares entre si. Dentre estes, para a maioria dos grupos de amostras, o coeficiente de atrito é superior quando avaliado pelo DS.

Correlações razoáveis entre resultados de métodos distintos podem ser encontradas quando se desconsideram as amostras perfiladas, dado que, para estas, o coeficiente de atrito é afetado pelo relevo em combinação com outros elementos superficiais (rugosidade e ondulação) e, comumente por efeitos de subestimação do atrito, pela perda de contato com a borracha do equipamento durante a varredura sobre regiões mais profundas.

O abaixamento do coeficiente de atrito devido a presença de líquido na interface de medida ocorre em diferentes medidas para cada amostra avaliada e a tendência desse abaixamento varia para os dois métodos estudados. Para o DS, amostras inicialmente mais escorregadias sofrem menor redução na resistência ao escorregamento. Para o BOT, são as amostras com maior resistência ao escorregamento a seco que sofrem menor redução dessa propriedade na presença de líquidos. Para o DS, a observação da tendência visual dos dados de coeficiente de atrito a seco, quando confrontados com os dados obtidos a úmido, sugere uma superestimação desses resultados.

Doze superfícies bastante distintas foram selecionadas, com uma gama bastante ampla de resultados de resistência ao escorregamento para os métodos avaliados. O comportamento das amostras em ensaios de manchamento foi avaliado para nove agentes manchantes diferentes e mostraram-se bastante diversificados, assim como os resultados de coeficiente de atrito. Dessa forma, a caracterização superficial desse conjunto de amostras pode prover informações sobre aspectos das superfícies dos pisos que são favoráveis ou não ao bom desempenho dos produtos em termos de resistência ao escorregamento e limpabilidade.

## **4.2 ETAPA 2**

Na segunda etapa do trabalho, as doze superfícies selecionadas anteriormente foram caracterizadas em relação a aspectos potencialmente responsáveis pelos desempenhos observados. Nesse sentido, a rugosidade e a topografia das superfícies, que, como já sabido, podem ser determinantes para o desenvolvimento dos fenômenos de atrito, foram caracterizadas em detalhes.

### **4.2.1 Caracterização da rugosidade das superfícies.**

A Figura 4.7 apresenta os perfis obtidos com o perfilômetro mecânico. Em seguida, a Figura 4.8 apresenta, à esquerda, a visão tridimensional da topografia das superfícies e à direita, a visão superior das mesmas, obtidas com o perfilômetro óptico.

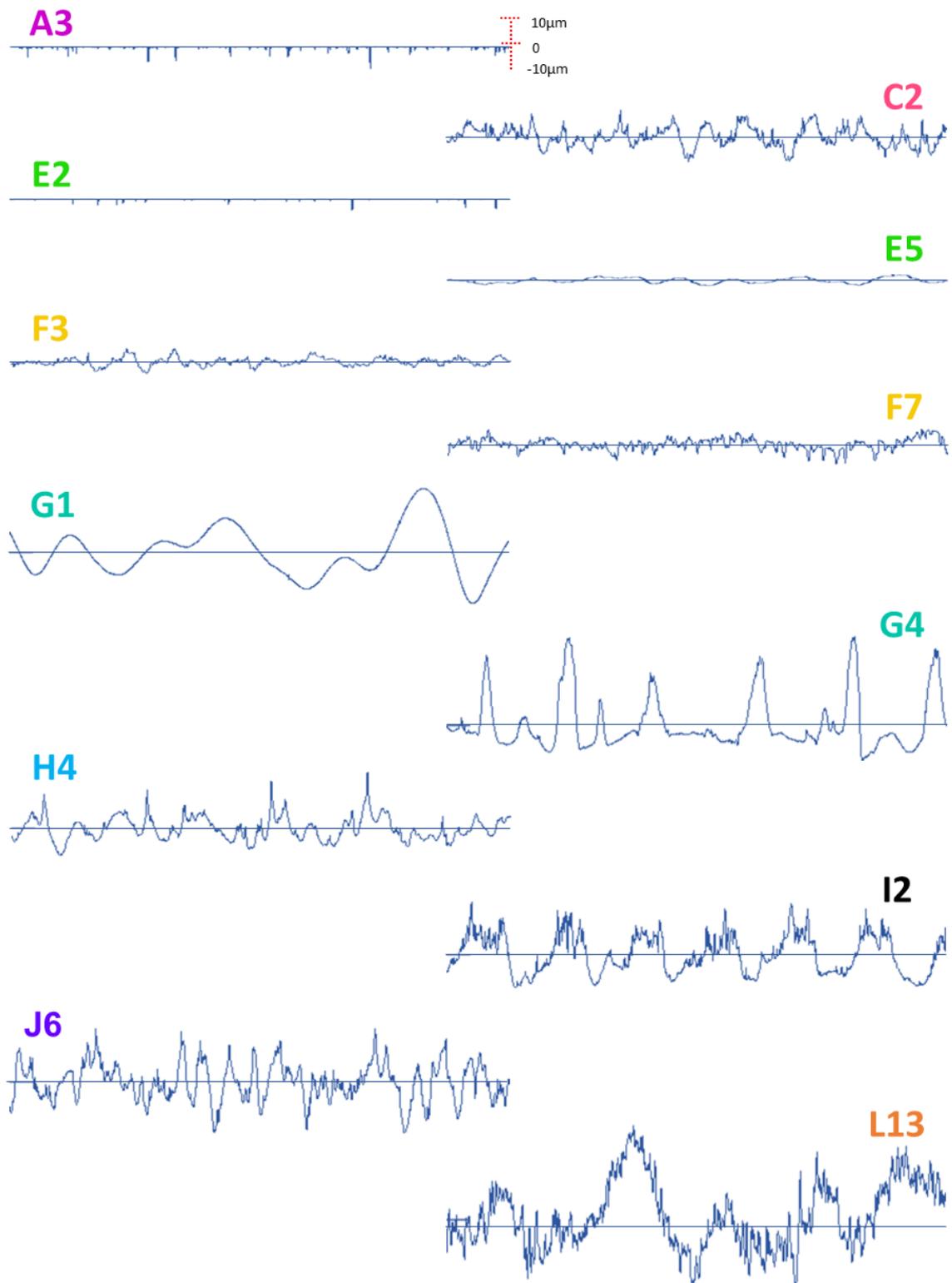
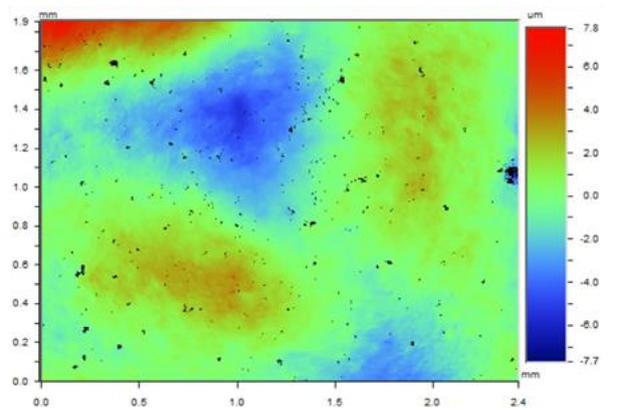
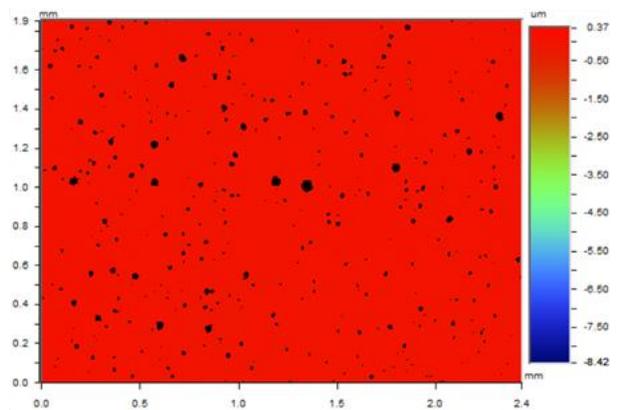
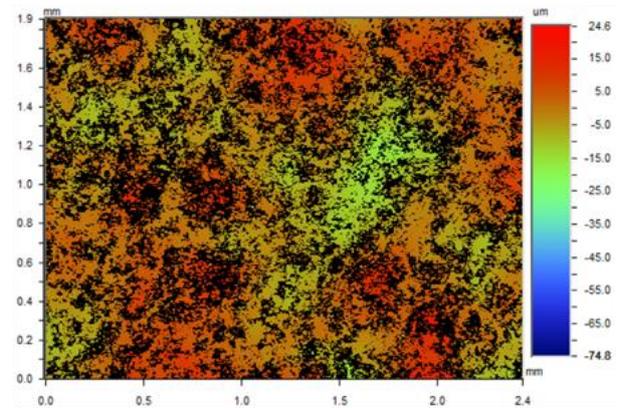
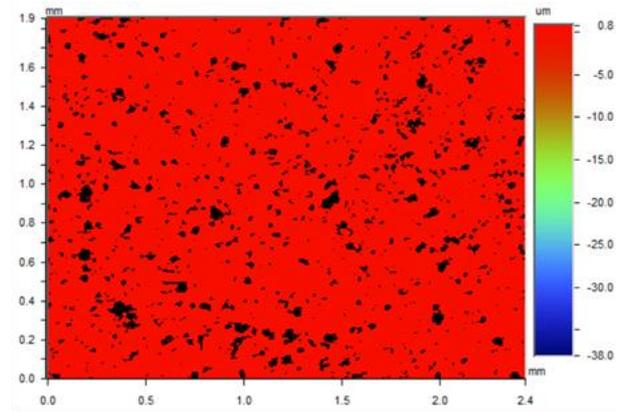
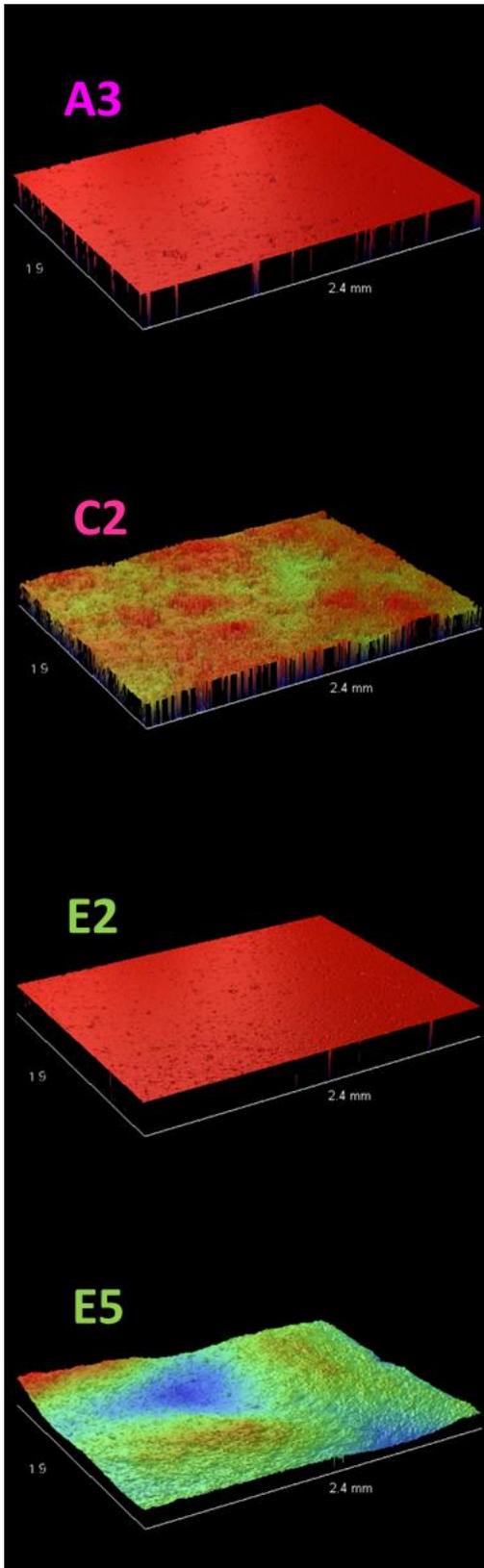
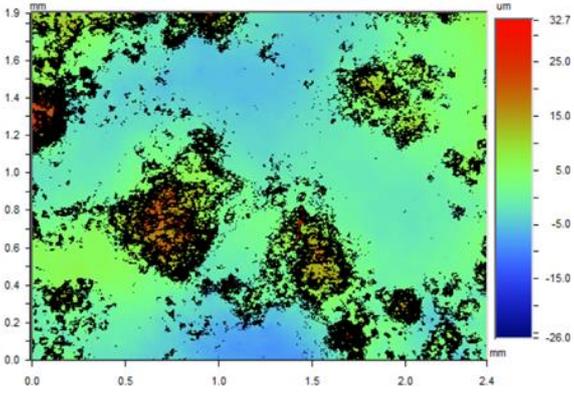
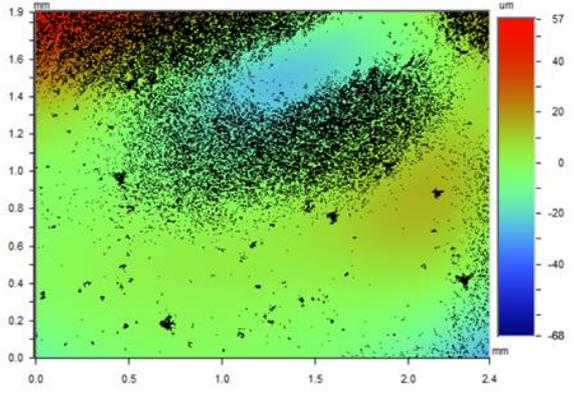
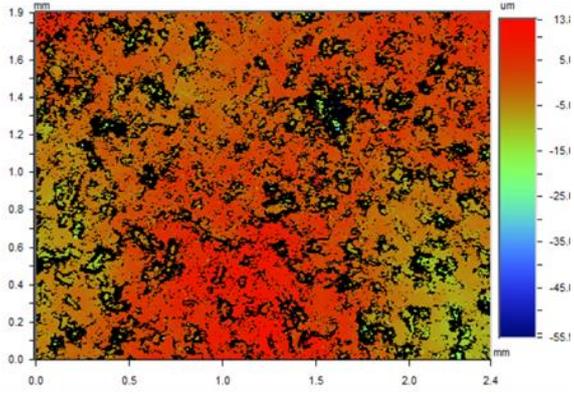
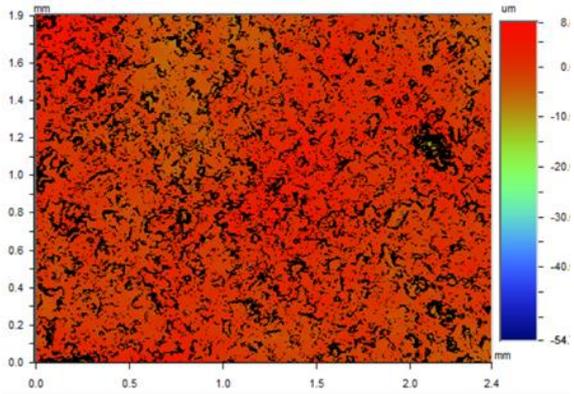
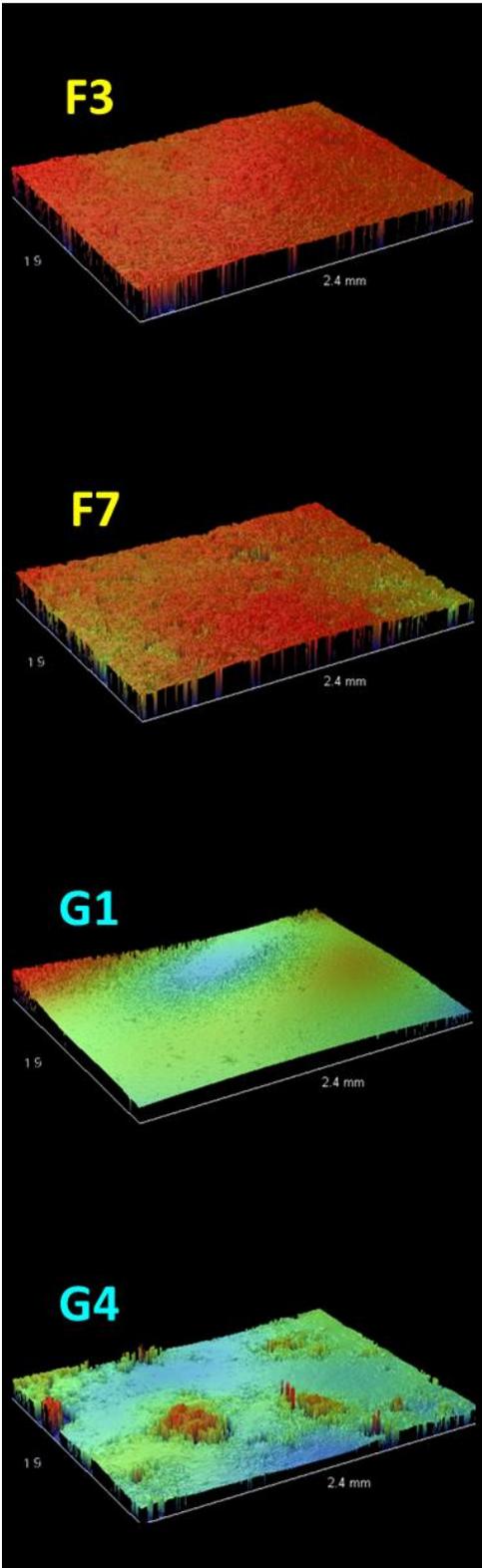


Figura 4.7 Perfis de rugosidade das amostras avaliadas, obtidos a partir da varredura de 12,5 mm das superfícies, utilizando-se cut off de 2,5 mm.





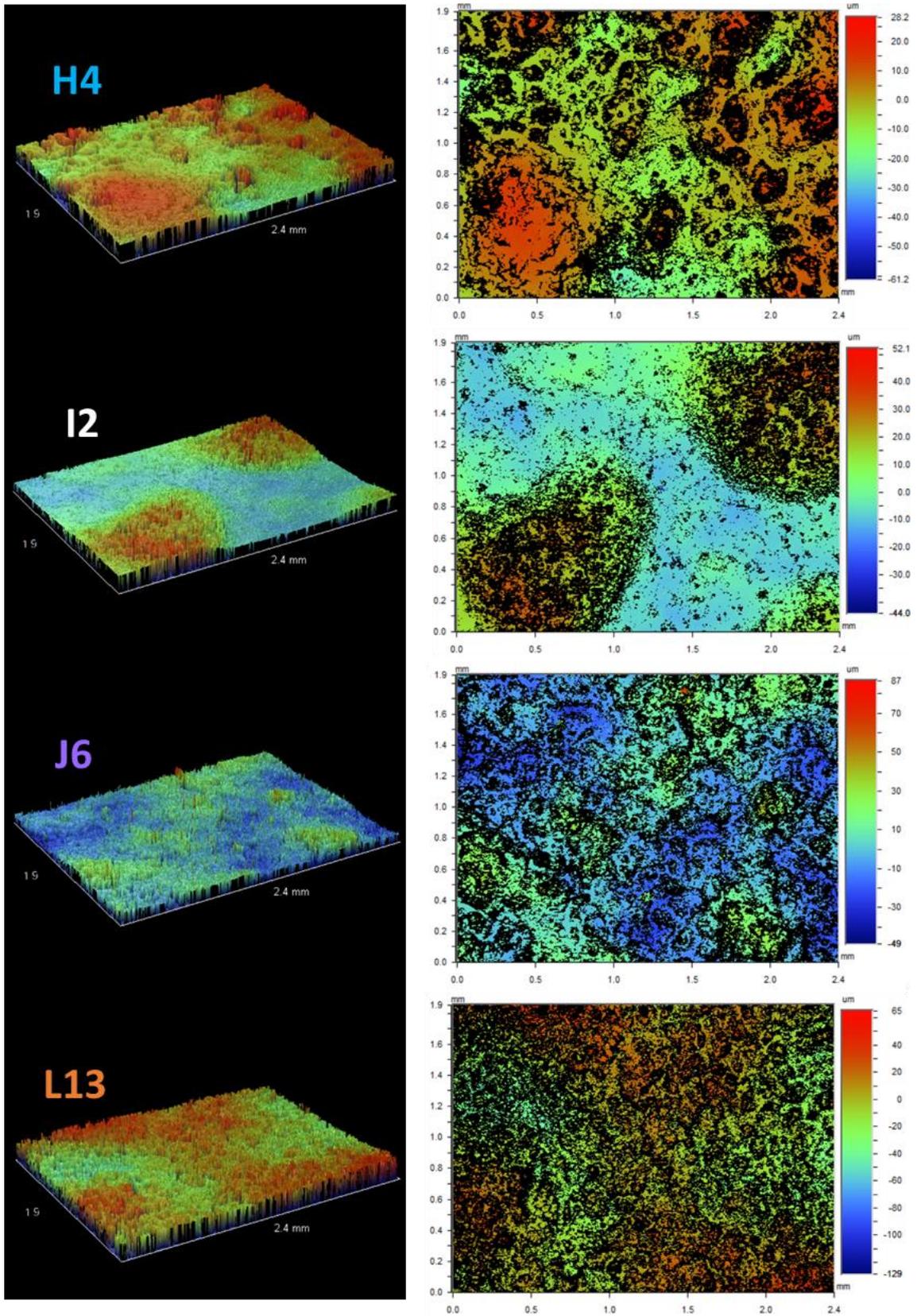


Figura 4.8 Visão lateral tridimensional (esquerda) e visão superior (direita) da topografia das superfícies estudadas, obtidas com o perfilômetro óptico.

Enquanto o perfilômetro óptico varre uma área de 2,4 mm x 1,9 mm, o perfilômetro mecânico varre um comprimento de 12,5 mm. Dessa forma, enquanto o primeiro capta detalhes das características superficiais dos pisos, o outro é mais adequado para a visualização de superfícies mais heterogêneas e com elementos superficiais de maiores dimensões, como granilhas e ondulações. Assim, a observação conjunta dos perfis de rugosidade e das imagens da topografia fornece informações complementares sobre diversos aspectos das superfícies que as diferenciam entre si, como amplitude, espaçamento, formato e quantidade de irregularidades superficiais. Essas variadas configurações das superfícies, por sua vez, se refletem em diferentes comportamentos que as mesmas podem manifestar em relação à aparência, sensação que provocam ao tato, facilidade de limpeza ou tendência ao acúmulo de sujeira, e propriedades de fricção.

As amostras A3 e E2, lisas e brilhantes, apresentam perfis planos e regulares, alcançados com a remoção das saliências da superfície com o processo de polimento que recebem como acabamento superficial. No entanto, apesar da ausência de picos, observam-se vales correspondem aos poros que são abertos com a remoção de material da camada superficial das peças durante esse tratamento. De forma análoga, nas imagens obtidas com o perfilômetro óptico, observam-se superfícies bastante planas com os vales originados da abertura dos poros. Uma das maiores vantagens comerciais desses produtos polidos é seu aspecto visual altamente brilhante e espelhado. Apesar disso, a ausência de irregularidades acima do plano da superfície não é favorável à resistência ao escorregamento, o que explica os baixos valores de  $\mu_d$  apresentados por A3 e E2 na etapa anterior do estudo. Além disso, os poros abertos pelo polimento podem tornar essas superfícies significativamente mais susceptíveis ao acúmulo de sujeira e encardimento.

A superfície C2, que consiste em um porcelanato não esmaltado e não polido, apresenta um perfil de rugosidade típico de um produto natural. Ainda que a superfície se apresente menos brilhante e suave ao toque, em comparação com algumas amostras que recebem esmalte ou polimento como acabamento superficial, sua resistência ao escorregamento é consideravelmente maior.

Em relação a uma superfície natural, uma superfície esmaltada, como E5, se diferencia por apresentar um perfil mais regular, devido ao preenchimento dos espaços entre irregularidades pelo fluxo viscoso do esmalte em elevadas temperaturas. Como consequência, ainda que E5 não apresente a mesma planaridade do perfil das amostras polidas, os valores de  $\mu_d$  são comparáveis tão baixos quanto os obtidos para A3 e E2.

As amostras F3 e F7, satinadas, apresentam perfis menos regulares, com picos e vales mais evidentes, em comparação com a amostra E5. Essas diferenças advêm das características dos esmaltes aplicados em cada superfície, com a finalidade de conferir aspectos mais brilhantes ou mates para as mesmas, conforme desejado. O que se nota para essas amostras lisas e com sensação suave ao toque, tanto brilhantes, quanto satinadas, é que apresentam perfis com uma amplitude reduzida, ao que se pode atribuir sua resistência ao escorregamento insatisfatória. Essas amostras não atingem, para nenhum dos métodos de avaliação utilizados, os requisitos mínimos de  $\mu_d$  para serem recomendáveis para locais onde há riscos de escorregamento.

A análise visual do perfil de algumas amostras permite diferenciar sua ondulação - irregularidades superficiais com maior comprimento de onda - e a rugosidade propriamente dita - irregularidades micrométricas, não observáveis a olho nu. As regularidades observadas no perfil da amostra G1, por exemplo, consistem em ondulações devido às gotas de esmalte pulverizadas sobre a superfície. Não se observam, no entanto, elementos salientes de rugosidade propriamente dita, o que é condizente com o aspecto bastante brilhante do produto.

De modo contrário, o perfil da amostra C2, por exemplo, não apresenta ondulações e as irregularidades observadas ao longo do mesmo correspondem somente à escala da rugosidade. Macroscopicamente, isso faz com que a amostra se apresente plana, mas com aparência menos brilhante que G1. Enquanto a pequena amplitude do perfil de C2 se deve à altura de suas inúmeras irregularidades superficiais (picos e vales), para G1, essa amplitude é maior e devida à presença de regiões mais elevadas e rebaixadas da sua superfície, que consistem em sua ondulação. No que se refere ao desempenho desses pisos

em termos de resistência ao escorregamento, observou-se, na etapa anterior que C2 apresenta valores de  $\mu_d$  razoáveis enquanto o piso G1 se mostra inadequado para uso em áreas em que há riscos de escorregamento. Esses resultados sugerem que superfícies planas, mas bastante rugosas - ou seja, com inúmeras irregularidades microscópicas - sejam mais interessantes para aplicações em locais críticos que superfícies que, apesar de apresentarem um nível de ondulação, não possuem saliências de menor escala dimensional.

Em relação à limpabilidade, poderia se esperar que a amostra G1, menos rugosa, fosse mais facilmente limpável que a amostra C2. Entretanto, voltando-se aos resultados dos testes de manchamento apresentados na etapa 1, nota-se que isso não foi verdade. A facilidade de limpeza de C2, de modo geral, é inclusive maior que o da amostra brilhante, evidenciando que o perfil de G1 não é desejável nem em termos de segurança e nem da limpeza do piso.

Para algumas amostras, a ondulação e rugosidade se sobrepõem, como se observa para L13, superfície trabalhada de forma a simular o aspecto visual e tátil de uma pedra natural. A variação de amplitude total, nesse caso, é maior em relação aos dois casos anteriores devido à uma soma das contribuições das duas componentes da textura do produto. Além de promover o efeito de ancoramento entre superfície e calçado do pedestre, esse tipo de superfície ainda é favorável em situações úmidas devido a possibilidade de acomodação de líquidos em suas regiões mais profundas, evitando-se a formação de filmes lubrificantes. Em termos de resistência ao escorregamento, o resultado da combinação desses elementos superficiais, como observado na etapa 1 do trabalho, foi excelente. Com ondulação menos marcante, mas, ainda, com um perfil constituído por picos numerosos, elevados e afiados, a superfície J6 (aspecto artificial de madeira) também apresentou  $\mu_d$  elevado para os três métodos de avaliação dessa propriedade.

Outros aspectos e peculiaridades das amostras podem, ainda, ser visualizadas através dos perfis e imagens obtidos. Em relação ao perfil da superfície G4, por exemplo, nota-se, com clareza, que o mesmo é caracterizado por picos espaçados e de elevada amplitude, que correspondem às gotas de esmalte pulverizadas sobre o produto. O formato das irregularidades produzidas

na superfície de G4 sugere que o esmalte pulverizado sobre esse revestimento seja, provavelmente, mais duro e, portanto, não tenha se estirado, em altas temperaturas, na mesma extensão que o esmalte aplicado sobre G1.

No caso da amostra H4, as irregularidades de maior dimensão foram produzidas pela aplicação de microgranilhas e, além disso, o perfil apresenta picos e vales mais numerosos na escala da rugosidade, promovidos pelo esmalte mate utilizado para seu recobrimento. Comparando-se essa superfície com G1 e G4, em relação ao  $\mu_d$ , constata-se que o desempenho da superfície H4 mostrou-se superior. Isso, mais uma vez, evidencia a relevância do papel da microgeometria da superfície em suas propriedades de fricção e indica que pisos ondulados, mas, também, com irregularidades em escala microscópica, que proporcionem um toque seco e mais áspero ao produto, são preferíveis para aplicações de risco.

Para I2, visualizam-se regiões mais lisas e rebaixadas em contraste com pontos mais elevados onde vários picos de rugosidade estão agrupados. Essas elevações foram produzidas intencionalmente pela aplicação de uma camada de esmalte mate em pontos específicos da superfície, o que confere, à mesma, ondulações e, sobrepostas aos pontos mais elevados, uma alta rugosidade. A resistência ao escorregamento dessa amostra, como resultado da contribuição conjunta desses dois fatores, foi a maior encontrada dentre os pisos avaliados.

Toda essa diversidade de perfis obtidos explica a gama variada de resultados de  $\mu_d$  dos produtos. Nesse sentido, como diversos aspectos superficiais contribuem, isoladamente ou em conjunto, para o desempenho dos pisos cerâmicos, é interessante que os mesmos sejam quantificados para que se busquem correlações com a resistência ao escorregamento.

A partir dos perfis e imagens obtidas, foram determinados, por softwares integrados aos perfilômetros, alguns dos parâmetros, já apresentados na revisão bibliográfica, que quantificam diversos aspectos dessas superfícies. A Tabela 4.5 apresenta esses valores para os parâmetros bidimensionais, determinados com base nos perfis obtidos pelo perfilômetro mecânico e, na Tabela 4.6, os parâmetros calculados pelo software integrado ao perfilômetro óptico.

Tabela 4.5 Parâmetros de rugosidade das superfícies avaliadas, obtidos para o cut-off de 2,5 mm.

	<b>A3</b>	<b>C2</b>	<b>E2</b>	<b>E5</b>	<b>F3</b>	<b>F7</b>	<b>G1</b>	<b>G4</b>	<b>H4</b>	<b>I2</b>	<b>J6</b>	<b>L13</b>
	Polida	Natural	Brilhante (polida)	Brilhante	Satinada	Satinada	Gotejada brilhante	Gotejada brilhante	Mate granilha	Textura ABS	Textura madeira	Textura pedra
<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	4,9	0,1	1,2	2,4	2,6	10,2	8,0	6,3	9,1	8,2	12,7
<i>Rq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,8	6,1	0,4	1,4	2,8	3,2	11,9	10,3	7,7	10,5	10,2	15,2
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	5,0	16,0	2,7	3,2	6,6	10,2	36,0	26,2	19,9	22,2	28,4	39,2
<i>Rc</i> ( $\mu\text{m}$ )	1,5	9,4	0,5	2,7	4,5	5,2	33,4	24,7	17,3	19,4	19,4	22,6
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	13,4	39,6	7,9	7,4	19,3	21,4	73,6	63,4	46,0	51,0	60,2	93,3
<i>Ry</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,4	28,9	5,7	5,4	13,2	16,5	44,4	43,6	35,5	40,9	49,0	70,2
<i>Rp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,6	21,4	0,3	3,9	10,9	10,1	42,5	43,4	30,0	31,4	35,3	47,9
<i>Rpm</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	15,7	0,2	2,7	7,2	7,3	23,2	29,2	20,6	24,0	27,1	36,6
<i>Rv</i> ( $\mu\text{m}$ )	12,8	19,8	7,7	3,9	8,9	12,0	35,8	23,0	20,5	22,5	27,9	51,3
<i>Rvm</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,0	13,2	5,5	2,7	6,0	9,1	21,2	14,3	14,9	16,9	21,7	33,7
<i>R3z</i> ( $\mu\text{m}$ )	4,5	13,4	2,1	1,1	4,4	9,6	2,4	11,7	12,6	8,6	26,4	30,8
<i>R3y</i> ( $\mu\text{m}$ )	6,5	18,3	3,2	1,7	6,6	11,7	3,4	20,1	18,6	16,2	33,1	42,2
<i>Sm</i> ( $\mu\text{m}$ )	86	271	63	635	348	185	1436	773	576	673	325	267
<i>S</i> ( $\mu\text{m}$ )	157	161	315	290	195	144	578	491	354	191	226	139
<i>Pc</i> ( $\text{cm}^{-1}$ )	122	44	215	30	39	60	18	16	22	23	36	50
$\Delta\alpha$ ( $^\circ$ )	2,4	7,4	1,2	0,9	2,8	5,0	2,3	4,2	4,7	7,8	9,7	17,3
$\Delta q$ ( $^\circ$ )	6,3	10,8	3,8	1,5	3,9	6,8	3,1	6,7	6,8	11,6	13,1	21,6
$\lambda\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	49	243	32	457	297	186	1520	665	489	405	305	265
$\lambda q$ ( $\mu\text{m}$ )	45	205	35	348	263	169	1339	531	416	314	282	254
<i>Ku</i>	47,7	2,8	122,5	2,2	2,4	3,0	2,3	4,0	2,8	2,4	2,9	2,6
<i>Sk</i>	-6,1	0,1	-7,4	0,0	0,1	-0,3	0,0	1,1	0,2	0,3	0,1	0,2
<i>Lo</i> (mm)	2,52	2,55	2,51	2,50	2,51	2,52	2,50	2,52	2,52	2,56	2,57	2,71
<i>lr</i>	1,01	1,02	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,01	1,01	1,03	1,03	1,09
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	16,2	0,2	3,7	7,2	8,2	29,9	18,2	20,2	25,3	26,7	41,3
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	6,4	0,1	1,4	3,6	3,0	15,1	23,5	9,0	10,1	11,6	15,0
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	2,4	6,3	1,0	1,1	2,9	4,0	13,3	8,0	6,1	6,4	9,6	15,5
<i>mr1</i> (%)	4,7	10,0	6,1	9,9	10,0	8,5	10,9	18,5	12,5	18,4	10,2	12,3
<i>mr2</i> (%)	86,3	91,8	75,3	89,5	91,0	88,6	87,0	89,0	89,4	93,4	90,6	91,4
<i>A1</i>	0,6	31,2	0,4	7,3	27,7	10,6	86,0	184,3	57,2	99,3	56,5	101,1
<i>A2</i>	16,1	28,0	5,0	6,1	21,4	22,7	91,5	34,0	32,7	27,5	47,3	74,0

Tabela 4.6 Parâmetros de rugosidade tridimensionais das amostras avaliadas, pelo perfilômetro óptico.

	<b>A3</b> Polida	<b>C2</b> Natural	<b>E2</b> Brilhante (polida)	<b>E5</b> Brilhante	<b>F3</b> Satinada	<b>F7</b> Satinada	<b>G1</b> Gotejada brilhante	<b>G4</b> Gotejada brilhante	<b>H4</b> Mate granilha	<b>I2</b> Textura ABS	<b>J6</b> Textura madeira	<b>L13</b> Textura pedra
<i>Sa</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	4,5	0,0	1,4	1,7	3,7	7,2	3,1	6,7	8,3	9,7	14,0
<i>Sq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,2	5,7	0,0	1,8	2,2	4,7	10,1	4,3	8,0	10,6	12,1	17,3
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	17,6	76,0	2,9	13,8	43,4	59,7	92,3	51,0	70,7	76,4	121,2	153,2
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	38,8	99,4	8,8	15,5	63,5	69,8	125,2	58,7	89,4	96,1	135,5	193,8
<i>Sp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,8	24,7	0,4	7,8	8,8	13,8	56,8	32,7	28,2	52,1	86,7	65,1
<i>Sv</i> ( $\mu\text{m}$ )	-38,0	-74,8	-8,4	-7,7	-54,7	-55,9	-68,4	-26,0	-61,3	-44,0	-48,8	-128,7
<i>Sdq</i> ( $^{\circ}$ )	2,2	16,5	0,5	2,3	9,3	29,7	11,4	10,8	9,8	19,9	56,4	68,7
<i>Ssk</i>	-140,6	-0,1	-30,0	-0,2	-0,4	-0,5	0,4	1,5	-0,2	1,4	0,4	-0,3
<i>Sku</i>	24312,5	4,0	4753,8	3,5	9,6	5,8	5,5	7,8	2,7	3,9	3,4	3,0
<i>Sdr</i>	0,03	2,8	0,0	0,1	0,9	10,9	1,4	1,2	1,1	4,5	61,1	169,7
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	14,2	0,07	4,0	5,4	11,4	15,8	8,4	23,5	11,6	31,9	48,0
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	5,8	0,04	1,8	2,2	4,6	13,1	6,6	4,4	27,0	12,8	12,0
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	6,2	0,1	2,2	2,5	5,4	15,7	2,8	9,7	2,7	8,4	19,0
<i>mr1</i> (%)	12,7	10,3	10,0	9,5	10,5	10,1	16,5	16,6	6,7	28,0	11,0	6,4
<i>mr2</i> (%)	84,1	90,1	87,9	85,1	89,1	88,9	81,9	91,5	93,5	97,3	92,5	90,8
<i>V1</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	1,1	0,5	0,2	3,8	0,7	0,4
<i>V2</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	0,3	0,0	0,1	0,1	0,3	1,4	0,1	0,3	0,0	0,3	0,9
<i>A<sub>surf</sub></i> ( $\text{mm}^2$ )	4,2	3,6	4,4	4,5	4,0	5,8	4,2	4,0	2,8	4,1	10,4	13,3
<i>A<sub>lat</sub></i> ( $\text{mm}^2$ )	4,2	2,6	4,4	4,5	3,5	3,2	3,6	3,5	2,4	2,9	2,1	1,4
<i>Index area</i>	1,0	1,4	1,0	1,0	1,1	1,8	1,2	1,2	1,2	1,4	5,1	9,2
<i>V</i> ( $\cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ )	0,0	26,9	0,0	21,0	11,8	25,9	120,0	59,6	32,6	84,0	66,6	43,6

Os parâmetros determinados, tanto para o perfilômetro mecânico quanto para o óptico, são numerosos. Além disso, muitos destes são determinados de formas parecidas para quantificar um mesmo aspecto da superfície. Por esse motivo, a discussão individual de cada parâmetro seria extensa e repetitiva. Optou-se, nesse momento, por discutir alguns dos parâmetros mais relevantes, correlacionando-os com as imagens e perfis observados anteriormente. Essa é uma medida didática para familiarizar o leitor com o significado prático dos parâmetros e com a forma como variam entre tipologias distintas.

Para ambas as tabelas, os primeiros parâmetros – Ra e Rq, calculados para os resultados do perfilômetro mecânico, e Sa e Sq, análogos para os resultados do óptico – representam a rugosidade média e média quadrática das superfícies. Esses parâmetros aumentam com a área entre o perfil traçado e a linha média, sendo, basicamente, mais baixos para superfícies lisas e brilhantes e maiores para as mais texturizadas, conforme as irregularidades tornam-se mais amplas, numerosas e evidentes nos perfis das amostras.

Os parâmetros de Rz à R3y, na primeira tabela e, de Rz a Sv, na segunda, quantificam, de formas distintas, a altura de vales, picos e a altura total dos perfis. Nota-se que, ainda que representados na mesma unidade para os dois perfilômetros, há diferenças significativas entre os valores fornecidos por eles. Isso ocorre, provavelmente, devido a capacidade do perfilômetro óptico de avaliar vales mais profundos, enquanto o mecânico, por impedimento físico, não consegue penetrar vales estreitos. Com isso, a amplitude de vales e a amplitude total determinada com o perfilômetro óptico são superiores e, devido ao deslocamento da linha média para baixo, em relação ao perfil obtido com o perfilômetro mecânico, há um aumento, também, na amplitude de picos.

Parâmetros de amplitude dos perfis, sem especificar a distribuição em picos ou vales – como o Rz, por exemplo – assumem valores bem mais baixos para as amostras A3, E2 e E5, lisas e brilhantes, em relação às outras do conjunto. O que diferencia os perfis de baixíssima amplitude dessas três amostras é o formato das irregularidades ou a forma como estão distribuídas acima ou abaixo da linha média. As superfícies polidas são caracterizadas pela presença de vales profundos e, praticamente, ausência de irregularidades acima da linha média. Dessa forma, os valores Rp e Sp, relacionados à altura de picos, especificamente, são baixos, enquanto os parâmetros Rv e Sv, referentes à profundidade de vales, são mais elevados em relação à E5.

Analisando-se os parâmetros  $\lambda$ , comprimento de onda médio e médio quadrático do perfil, notam-se valores bem inferiores para A3 e E2 em relação às outras amostras. Isso é característico dessas superfícies polidas, devido ao formato das irregularidades presentes no perfil, no caso, os vales correspondentes aos poros abertos pelo processo de polimento. Outro

parâmetro interessante para descrever superfícies polidas é o *skewness*,  $Sk$ . Este assume valores próximos de zero para a maioria das amostras, o que significa maior simetria dos perfis dessas superfícies em torno da linha média. Em outras palavras, a quantidade de material distribuída acima da linha média é próxima da quantidade de material abaixo desta. Para A3 e E2,  $Sk$  assume valores negativos e bastante elevados, que indicam um desvio da simetria do perfil para cima da linha média, com a predominância de vales na superfície, o que pode reduzir sua susceptibilidade ao desgaste prematuro. A3 e E2, apresentam, ainda, valores de  $Ku$ , curtose, acima de três e muito superiores aos de outros produtos, o que revela que os vales destes perfis são íngremes.

Os parâmetros de amplitude para as amostras J6 e L13, superfícies com aspecto de madeira e pedra, respectivamente, são, em geral, os mais elevados dentre os pisos do conjunto avaliado. No entanto, a superfície G1, por exemplo, que é uma superfície brilhante, com perfil bastante distinto das anteriores, também apresentou parâmetros de amplitude altos. No caso dessa amostra, como já discutido, a amplitude do perfil se deve à sua ondulação e, em termos de resistência ao escorregamento, seu desempenho é muito inferior ao das amostras texturizadas. A comparação entre esses produtos é, claramente, um exemplo de caso em que dois ou mais parâmetros, que quantificam aspectos distintos das superfícies, devem ser analisados em conjunto. Nesse caso, parâmetros interessantes para expressar matematicamente as diferenças das superfícies seriam, por exemplo, o parâmetro  $S$ , que quantifica o espaçamento entre as irregularidades do perfil, ou os parâmetros  $\lambda$ . Para a amostra G1, o valor do parâmetro  $S$ ,  $\lambda_a$  e  $\lambda_q$  são mais elevados do que para as amostras com textura, visto que há maior distância entre as irregularidades da sua superfície, correspondentes, não à rugosidade, mas, de fato, à ondulação.

Seguindo esse raciocínio, outra forma de quantificar as diferenças entre esses perfis é através do índice de rugosidade, que é um indicativo da complexidade do perfil. Para o perfilômetro mecânico, o  $I_r$  é a razão entre o comprimento do perfil gerado, como se este fosse totalmente esticado, e o comprimento varrido na superfície da amostra. Para G1, o  $I_r$  assume o mínimo valor possível, igual à 1,00, enquanto para L13, com perfil mais complexo em

que há uma ondulação e, sobreposta à essa, uma rugosidade caracterizada por picos e vales numerosos e altos, o índice assume o valor de 1,09. O parâmetro Sdr, obtido pelo perfilômetro óptico, apesar das diferenças adotadas para seu cálculo, é similar ao índice de rugosidade bidimensional obtido pelo perfilômetro mecânico e, como se observa, varia de forma parecida entre as tipologias.

O perfilômetro óptico determina, ainda, parâmetros de superfície relacionados ao volume que estas podem acomodar entre suas irregularidades (ou volume necessário para recobri-las). Nesse caso, independente se a superfície é áspera ou suave, brilhante ou mate, mais ou menos rugosa, os maiores volumes foram encontrados para as que apresentam ondulação.

Em relação aos parâmetros obtidos a partir da construção da curva de razão de material, nota-se que o parâmetro Rvk, altura da zona dos vales, assume valores mais expressivos que Rpk e Rk – altura da zona dos picos e altura da zona central - para as amostras polidas, A3 e E2. Para I2, quando avaliado pelo perfilômetro mecânico, e G4, quando avaliado com o perfilômetro óptico, o parâmetro mais elevado dentre os três é a altura da zona de picos, Rpk. Nesses perfis, ao contrário das amostras polidas - com superfícies mais planas, ausência de picos e predominância de vales profundos – percebe-se que são os picos que se destacam. Assim, o desbalanço entre Rpk, Rk e Rvk, comum para A3, E2, G4 e I2, também é um indício da assimetria desses perfis. Para as outras amostras, Rk assume os valores mais elevados dentre esses parâmetros, superando, usualmente, a soma dos valores de Rpk e Rvk, que, por sua vez, para amostras mais simétricas, são relativamente próximos entre si.

Os resultados dos parâmetros determinados são bastante distintos entre as superfícies avaliadas, o que era esperado devido a diversidade de topografias apresentadas por estas. Esses índices mostraram-se bastante adequados para descrever de forma numérica os mais diversos aspectos superficiais dos produtos estudados e úteis para a compará-los entre si.

Conclui-se que, apesar da riqueza de informações já obtidas somente pela observação visual dos perfis ou imagens fornecidos pelos perfilômetros, é através dos parâmetros determinados a partir dos mesmos que a descrição quantitativa das superfícies é possível. São estes valores que podem ser

confrontados com os resultados de resistência ao escorregamento dos pisos de forma a serem buscadas correlações entre eles.

Além das diferenças em valores de parâmetros de amplitude, já mencionadas, observam-se divergências entre valores absolutos de outros parâmetros análogos obtidos com perfilômetros diferentes. Além da impossibilidade de penetração da ponta do perfilômetro mecânico em vales estreitos durante a varredura, essas diferenças se devem às sensibilidades distintas dos métodos, diferentes escalas dimensionais em que operam, ao fato de um equipamento varrer um comprimento enquanto o outro varre uma área e à própria variação nas características superficiais dos produtos em diferentes regiões da superfície, mesmo para as que, macroscopicamente, aparentam ser bastante homogêneas.

Apesar de já brevemente discutidos, posteriormente, os parâmetros mais relevantes para o estudo, que se correlacionam de maneira mais significativa com o desempenho das superfícies ou que tenham significados físicos facilmente visualizáveis, serão abordados mais detalhadamente.

#### **4.2.2 Correlações entre resistência ao escorregamento e rugosidade**

Buscaram-se correlações lineares entre a resistência ao escorregamento e os diversos parâmetros de rugosidade medidos.

Representando-se, em um gráfico, a resistência ao escorregamento no eixo Y e um parâmetro de rugosidade no eixo X, então a resistência ao escorregamento é chamada de variável dependente em relação ao parâmetro de rugosidade, a variável preditora. O coeficiente de determinação,  $R^2$ , é o parâmetro estatístico que indica a porcentagem da variação da variável dependente que pode ser prevista ou explicada por uma regressão linear em relação à variável preditora no eixo X. Em geral, ainda que as interpretações do ajuste dependam do contexto da análise, um alto valor de  $R^2$  indica que o modelo é um bom ajuste para os dados [89]. Isso significa que o comportamento de variação desses dados segue uma tendência linear, ou seja, pode ser bem explicado por uma linha. Quanto mais os dados representados se afastam dessa

linha, menor a dependência linear entre as variáveis e menor o valor de  $R^2$  referente ao ajuste.

A Tabela 4.7 apresenta, à esquerda, os resultados dos valores de  $R^2$  para correlações lineares entre os parâmetros de rugosidade bidimensionais e os resultados de resistência ao escorregamento para os três métodos estudados (nas condições de medida a seco e úmido). Do lado direito apresentam-se os valores de  $R^2$  para essas correlações feitas com os parâmetros fornecidos pelo perfilômetro óptico. Os valores de  $R^2$  inferiores a 0,5, que indicam correlações bastante fracas entre as variáveis estudadas, são apresentados em fonte de cor mais clara para que fiquem destacados, em cores mais fortes, os valores referentes às correlações razoáveis. Em amarelo, foram evidenciados os valores de  $R^2$  superiores a 0,8, que ocorrem para quando já se observam correlações satisfatórias entre as variáveis envolvidas.



Não foram encontradas correlações satisfatórias entre os resultados de resistência ao escorregamento obtidos com os métodos considerados no estudo e os parâmetros de rugosidade determinados. Isso não ocorreu para os parâmetros obtidos a partir dos perfis dimensionais traçados pelo perfilômetro mecânico e, tampouco, para os fornecidos pelo software conectado ao perfilômetro óptico. No entanto, como visto na revisão bibliográfica, correlações satisfatórias entre essas variáveis já foram mencionadas pela literatura. Por exemplo, no caso dos parâmetros de amplitude, como o  $R_z$  e  $R_{pm}$ , da inclinação do perfil,  $\Delta a$ , e do parâmetro  $R_k$ , rugosidade central do perfil, determinado a partir das curvas de Abbott-Firestone.

Uma das razões pelas quais isso ocorreu é a influência de outras variáveis, além da rugosidade propriamente dita, na resistência ao escorregamento das amostras, como outros aspectos da topografia das superfícies, como seu relevo e ondulações. Outra razão ou fator agravante para que essas correlações insatisfatórias entre os dados tenham sido obtidas é a possibilidade de os resultados de resistência ao escorregamento terem sido sub ou superestimados pelos dispositivos de avaliação das superfícies.

De qualquer forma, vale a pena tentar compreender melhor as razões por trás dessa dificuldade em se correlacionar os aspectos da rugosidade com a resistência ao escorregamento. Para visualizar o comportamento dos dados, a fim de melhor compreendê-los, são apresentados, nas Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, a seguir, alguns gráficos dos resultados de  $\mu_d$  a úmido, obtidos pelos três métodos de medida considerados, em função de parâmetros para os quais boas correlações com a resistência ao escorregamento já tenham sido mencionadas em estudos prévios.

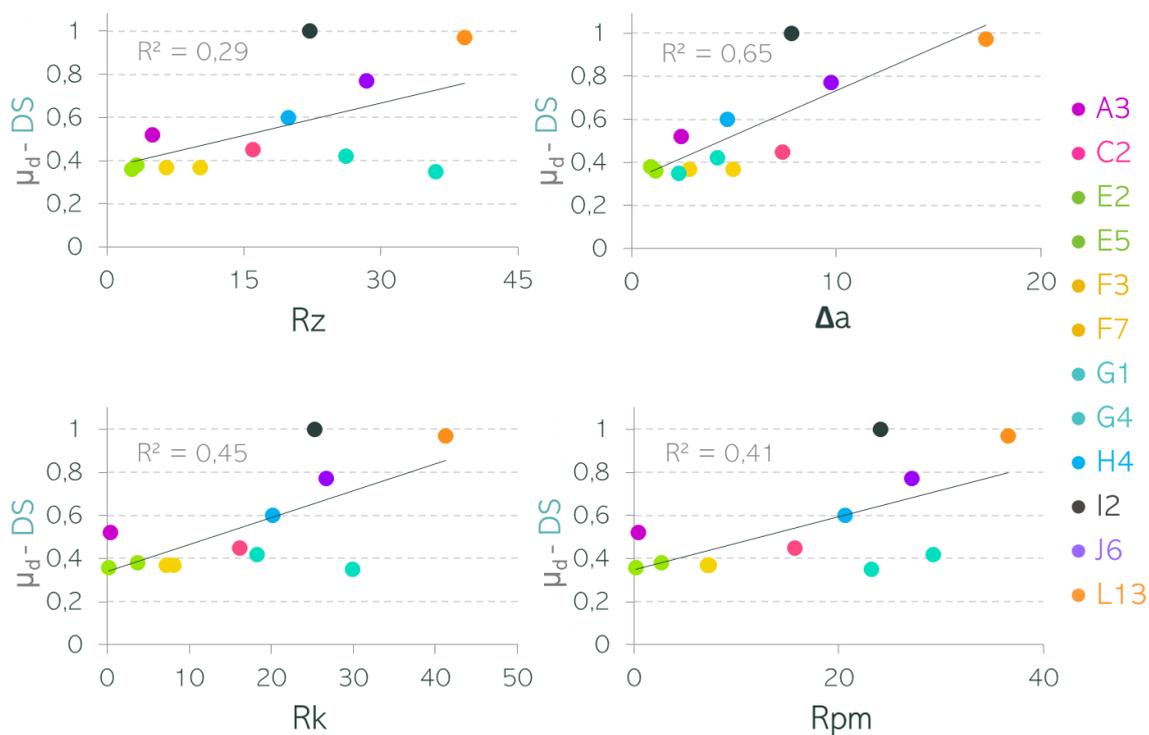


Figura 4.9. Coeficiente de atrito avaliado pelo DS, a úmido, em função dos parâmetros de rugosidade Rz,  $\Delta a$ , Rk e Rpm.

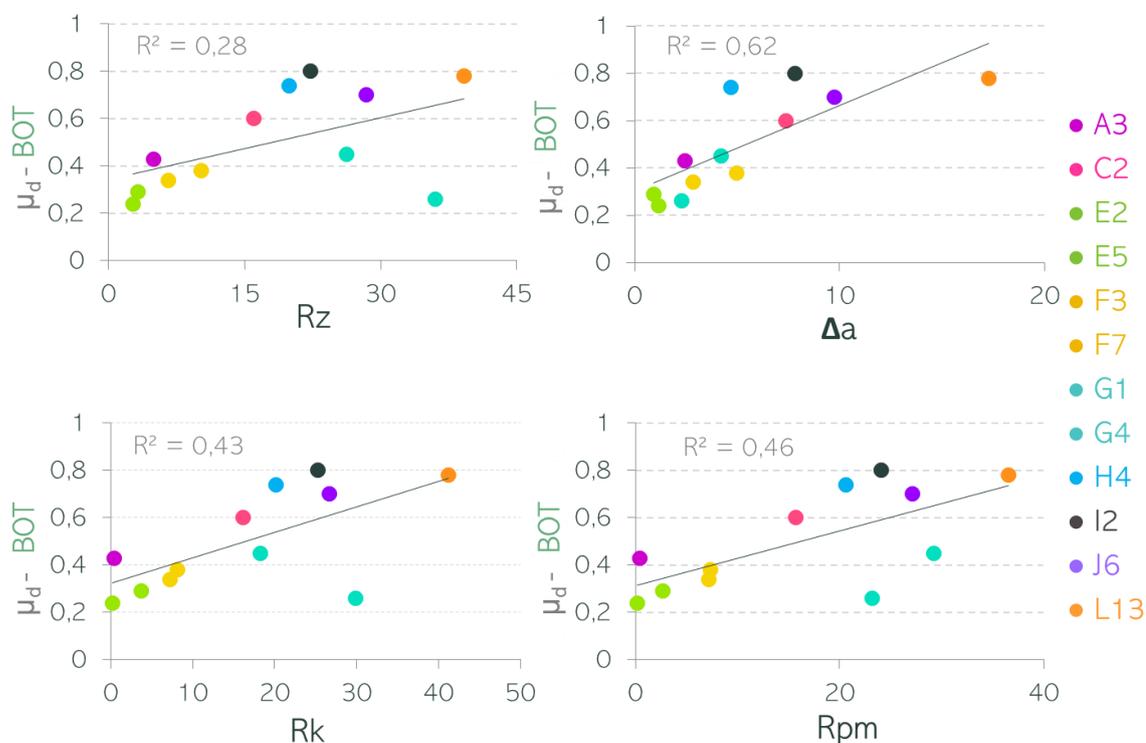


Figura 4.10. Coeficiente de atrito avaliado pelo BOT-3000E, a úmido, em função dos parâmetros de rugosidade Rz,  $\Delta a$ , Rk e Rpm.

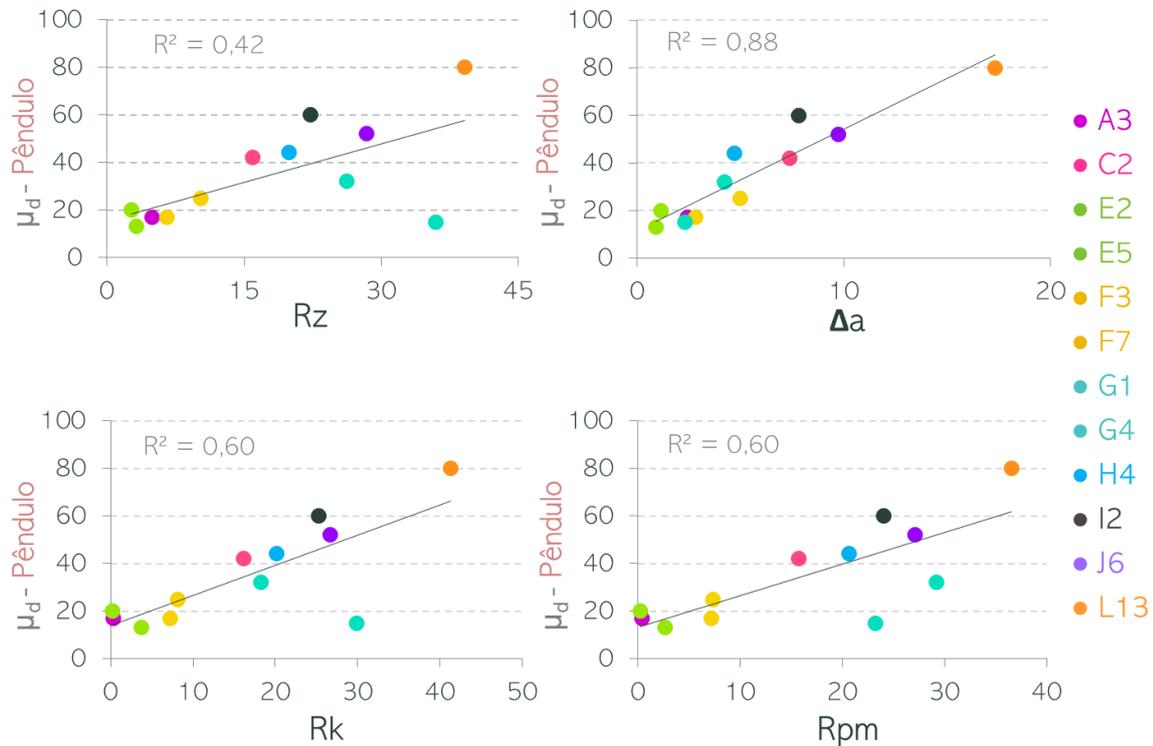


Figura 4.11 Coeficiente de atrito avaliado pelo Pêndulo Britânico, a úmido, em função dos parâmetros de rugosidade Rz, Δa, Rk e Rpm.

Observa-se que, apesar das baixas correlações estatísticas entre as variáveis, há uma forte tendência de a resistência ao escorregamento das amostras analisadas aumentarem com o aumento dos quatro parâmetros de rugosidade apresentados. Nota-se, também, que a disposição dos pontos correspondentes às amostras individuais, nos quatro gráficos, é similar, o que está relacionado ao fato de os próprios parâmetros serem correlacionados entre si. Todos os parâmetros representados estão relacionados, de alguma forma, com a amplitude – do perfil todo ou de seus elementos – e, portanto, variam de forma acoplada. Aumentar o tamanho dos picos, em uma superfície padrão, para elevar o valor do parâmetro Rpm, por exemplo, automaticamente, provoca um aumento na amplitude total desse perfil e, conseqüentemente, em Rz.

Apesar da correspondência, em certa medida, entre os padrões formados pela disposição das amostras nos quatro gráficos, pontos correspondentes a algumas das amostras se encontram em posições distintas, em relação aos

outros pontos, entre gráficos de parâmetros diferentes. É o que ocorre, por exemplo, para as amostras polidas: A3 (●) e E2 (●), ponto em posição mais baixa dentre os dois verdes). Para estas,  $R_{pm}$  assume valores muito próximos do zero devido à ausência de picos em seus perfis. O mesmo ocorre para  $R_k$ , devido à baixa amplitude da zona central da rugosidade desses perfis, em detrimento da amplitude da zona dos vales ( $R_{vk}$ ). No entanto, o parâmetro  $R_z$ , que compreende, em seu cálculo, também, a altura dos vales, assume valores mais significantes e similares ao de outra amostra lisa brilhante não polida (E5, ●). Dessa forma, os pontos correspondentes a A3 e E2 se encontram, para o gráfico deste parâmetro, mais à frente no eixo x comparando-se com o que se observa para os gráficos de  $R_{pm}$  e  $R_k$ .

Cabe observar, também, o que ocorre com a amostra G4, gotejada brilhante (ponto mais elevado dentre os dois de cor verde água, ●). Para a maioria das amostras, o parâmetro  $R_k$  parece variar de forma acoplada a  $R_{pm}$ . No entanto, para G4, a presença de picos bastante elevados em seu perfil faz com que essa amostra apresente o segundo maior valor de  $R_{pm}$  dentre o conjunto de pisos analisados, enquanto exibe um valor apenas mediano de  $R_k$ .

Algo interessante em comum nos perfis das amostras A3, E2 e G4 é a falta de simetria destes em relação ao eixo x. Em outras palavras, as características das irregularidades dessas superfícies diferem entre a porção inferior e superior do perfil. Este fator parece estar, portanto, associado ao fato de que, para essas amostras assimétricas, parâmetros que variam de forma acoplada para a maioria das superfícies do conjunto, se comportem de outras formas.

É válida, ainda, uma discussão sobre o comportamento da outra amostra gotejada brilhante, G1 (●, outro ponto de cor verde água, em posições mais baixas nos gráficos). A superfície dessa amostra é caracterizada por uma ondulação de amplitude considerável e uma rugosidade muito baixa. O valor de  $R_z$  é elevado devido a essa amplitude total do perfil, e o valor de  $R_k$  também é alto, em comparação com outras amostras de amplitude similar com mais irregularidades, visto que grande parte do material dessa superfície está em sua

rugosidade central. No entanto, como não se observam picos na escala de rugosidade, o parâmetro Rpm é reduzido.

O que ocorre com essas amostras mencionadas acima contribui para que, apesar da forte dependência do  $\mu_d$  em relação aos parâmetros de rugosidade apresentados, não se observe uma tendência exatamente linear. Seja pelo motivo exposto acima ou pela influência de outros fatores, além da rugosidade, na resistência ao escorregamento dos pisos, pontos correspondentes a algumas amostras específicas se desviam do comportamento observado para o grupo em geral. Como consequência, apesar da tendência visual dos resultados, o coeficiente de determinação,  $R^2$ , referente ao ajuste linear entre as variáveis de cada gráfico, é reduzido.

Nesse sentido, em uma análise mais atenta, percebe-se que as amostras que fogem da tendência dos dados do grupo todo são, praticamente, as mesmas para os gráficos dos três métodos de medida da resistência ao escorregamento e para os quatro parâmetros de rugosidade apresentados. Essas amostras são A3(●), G1(●) e G4(●), H4(●) e I2(●). Os resultados de  $\mu_d$  dessas amostras são superiores ou inferiores aos valores esperados de acordo com a magnitude dos parâmetros de rugosidade considerados. Buscou-se um sub grupo, dentro do conjunto de doze amostras, para o qual fossem encontradas correlações lineares mais fortes entre o  $\mu_d$  e parâmetros de rugosidade, em especial, os que a literatura especializada já menciona como relevantes na determinação da resistência ao escorregamento. Sendo assim, as amostras A3, G1 e G4, H4 e I2 foram descartadas do conjunto de amostras, tendo seus resultados desconsiderados no cálculo de novas correlações feitas entre as variáveis.

Na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 abaixo, são apresentados, para o perfilômetro mecânico e óptico, respectivamente, os novos coeficientes de determinação entre os parâmetros de rugosidade determinados e a resistência ao escorregamento dos pisos considerados: C2, E2, E5, F3, F7, J6 e L13. Estes resultados estão à direita na tabela, enquanto, à esquerda, para comparação, são retomados os valores de  $R^2$  obtidos anteriormente, para o conjunto total de 12 amostras.

Tabela 4.8 Coeficiente de determinação –  $R^2$  – entre resistência ao escorregamento e parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro mecânico para o conjunto total de amostras e o subgrupo selecionado do mesmo.

	Conjunto total completo, com 12 amostras					Conjunto de amostras sem A3, G1, G4, H4 e I2				
	DS Seco	DS Úmido	BOT Seco	BOT Úmido	Pênd. Úmido	DS Seco	DS Úmido	BOT Seco	BOT Úmido	Pênd. Úmido
<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,48	0,41	0,45	0,38	0,53	0,96	0,94	0,53	0,92	0,95
<i>Rq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,50	0,40	0,46	0,39	0,54	0,97	0,94	0,52	0,93	0,96
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,39	0,29	0,39	0,27	0,42	0,99	0,94	0,48	0,93	0,96
<i>Rc</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,14	0,39	0,14	0,20	0,95	0,94	0,54	0,94	0,90
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,44	0,32	0,41	0,32	0,49	0,98	0,93	0,47	0,92	0,98
<i>Ry</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,57	0,46	0,43	0,47	0,65	0,98	0,95	0,47	0,93	0,97
<i>Rp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,44	0,26	0,46	0,31	0,42	0,97	0,92	0,55	0,95	0,93
<i>Rpm</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,57	0,41	0,48	0,46	0,60	0,97	0,93	0,54	0,95	0,94
<i>tRv</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,40	0,37	0,30	0,30	0,52	0,94	0,92	0,37	0,84	0,98
<i>Rvm</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,50	0,49	0,32	0,42	0,64	0,97	0,94	0,38	0,88	0,98
<i>R3z</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,50	0,47	0,21	0,57	0,74	0,98	0,91	0,45	0,94	0,92
<i>R3y</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,61	0,55	0,27	0,65	0,82	0,99	0,92	0,45	0,94	0,95
<i>Sm</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,00	0,01	0,18	0,02	0,02	0,03	0,00	0,29	0,00	0,04
<i>S</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,03	0,15	0,00	0,14	0,13	0,37	0,15	0,38	0,37	0,31
<i>Pc</i> ( $\text{cm}^{-1}$ )	0,14	0,05	0,71	0,15	0,08	0,11	0,08	0,84	0,21	0,06
$\Delta\alpha$ ( $^\circ$ )	0,53	0,65	0,22	0,62	0,88	0,97	0,88	0,45	0,89	0,98
$\Delta q$ ( $^\circ$ )	0,58	0,70	0,19	0,66	0,89	0,98	0,87	0,36	0,89	0,99
$\lambda\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	0,00	0,03	0,13	0,04	0,03	0,00	0,02	0,54	0,03	0,00
$\lambda q$ ( $\mu\text{m}$ )	0,00	0,03	0,12	0,04	0,03	0,04	0,09	0,69	0,10	0,02
<i>Ku</i>	0,13	0,06	0,69	0,17	0,09	0,14	0,09	0,84	0,23	0,08
<i>Sk</i>	0,14	0,06	0,51	0,16	0,14	0,16	0,11	0,87	0,26	0,10
<i>Lo</i> (mm)	0,42	0,62	0,15	0,47	0,78	0,86	0,88	0,34	0,73	0,93
<i>lr</i>	0,42	0,62	0,15	0,47	0,78	0,86	0,88	0,34	0,73	0,93
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,49	0,45	0,42	0,43	0,60	0,97	0,94	0,53	0,92	0,96
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,28	0,10	0,37	0,14	0,21	0,96	0,93	0,56	0,94	0,92
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,30	0,25	0,32	0,22	0,39	0,98	0,92	0,47	0,91	0,97
<i>mr1</i> (%)	0,34	0,20	0,38	0,24	0,24	0,49	0,51	0,91	0,57	0,46
<i>mr2</i> (%)	0,26	0,22	0,72	0,37	0,23	0,21	0,14	0,89	0,33	0,14
A1	0,30	0,13	0,35	0,14	0,21	0,88	0,92	0,51	0,82	0,89
A2	0,12	0,09	0,24	0,06	0,15	0,95	0,90	0,50	0,87	0,93

Tabela 4.9 Coeficiente de determinação  $R^2$  entre resistência ao escorregamento e parâmetros de rugosidade obtidos com o perfilômetro óptico para o conjunto total de amostras (esquerda) e um subgrupo do mesmo (direita).

	Conjunto total completo, com 12 amostras					Conjunto de amostras sem A3, G1, G4, H4 e I2				
	DS Seco	DS Úmido	BOT Seco	BOT Úmido	Pênd. Úmido	DS Seco	DS Úmido	BOT Seco	BOT Úmido	Pênd. Úmido
<i>Sa</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,56	0,61	0,27	0,55	0,76	0,97	0,95	0,38	0,87	0,96
<i>Sq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,53	0,58	0,28	0,51	0,71	0,98	0,94	0,37	0,87	0,96
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,45	0,44	0,29	0,46	0,65	0,97	0,84	0,46	0,93	0,91
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,43	0,42	0,32	0,43	0,60	0,96	0,83	0,50	0,92	0,92
<i>Sp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,39	0,44	0,26	0,37	0,49	0,80	0,81	0,33	0,79	0,71
<i>Sv</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,27	0,23	0,23	0,30	0,43	0,71	0,53	0,43	0,66	0,72
<i>Sdq</i> ( $^\circ$ )	0,31	0,46	0,12	0,38	0,63	0,91	0,87	0,41	0,80	0,83
<i>Ssk</i>	0,02	0,01	0,00	0,03	0,11	0,20	0,07	0,01	0,15	0,18
<i>Sku</i>	0,02	0,01	0,00	0,03	0,11	0,20	0,07	0,01	0,15	0,17
<i>Sdr</i>	0,24	0,42	0,08	0,26	0,56	0,79	0,91	0,31	0,63	0,85
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,47	0,45	0,20	0,48	0,70	0,97	0,95	0,38	0,86	0,96
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,38	0,54	0,23	0,36	0,40	0,92	0,83	0,36	0,89	0,83
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,18	0,13	0,13	0,13	0,29	0,91	0,85	0,32	0,76	0,94
<i>mr1</i> (%)	0,04	0,08	0,07	0,02	0,00	0,30	0,39	0,04	0,16	0,43
<i>mr2</i> (%)	0,55	0,45	0,26	0,65	0,50	0,60	0,48	0,78	0,74	0,46
<i>V1</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,21	0,36	0,13	0,20	0,17	0,65	0,54	0,28	0,70	0,52
<i>V2</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,81	0,73	0,23	0,65	0,88
<i>A<sub>surf</sub></i> ( $\text{mm}^2$ )	0,14	0,35	0,03	0,18	0,43	0,79	0,93	0,30	0,64	0,78
<i>A<sub>lat</sub></i> ( $\text{mm}^2$ )	0,64	0,49	0,35	0,73	0,78	0,93	0,73	0,54	0,94	0,85
<i>Index area</i>	0,26	0,44	0,09	0,30	0,59	0,85	0,96	0,35	0,71	0,88
<i>V(.10<sup>6</sup><math>\mu\text{m}^3</math>)</i>	0,12	0,09	0,14	0,05	0,08	0,68	0,59	0,14	0,65	0,57

Um aumento no coeficiente  $R^2$  foi observado para a grande maioria das correlações entre os resultados obtidos com os métodos de avaliação da resistência ao escorregamento considerados no estudo e os parâmetros de rugosidade determinados. Como as células com valores de  $R^2$  acima de 0,8 e 0,9 foram realçadas em amarelo e verde, respectivamente, uma rápida observação das tabelas permite concluir que, para esse sub conjunto avaliado – incluindo os pisos C2, E2, E5, F3, F7, J6 e L13 – correlações muito satisfatórias foram encontradas para vários parâmetros de rugosidade. Isso ocorreu tanto para os parâmetros determinados pelo perfilômetro mecânico, quanto pelo óptico. Além disso, com exceção da avaliação do  $\mu_d$  pelo BOT a seco, essas

boas correlações foram encontradas para todos os outros métodos/condições de medida. É inegável, portanto, que a resistência ao escorregamento dos pisos do subgrupo selecionado, tenha sido definida, essencialmente, pelas características da sua rugosidade superficial.

Para os parâmetros de rugosidade já mencionados pela literatura como relevantes na determinação da resistência ao escorregamento, os novos valores de  $R^2$  apontam que, de fato, os aspectos que esses parâmetros quantificam influenciam no  $\mu_d$  das superfícies. Além disso, correlações altas foram encontradas para outros parâmetros de rugosidade, ainda não abordados na literatura específica do tema.

Basicamente, quando são encontrados valores de  $R^2$  elevados para um parâmetro determinado pelo perfilômetro mecânico, correlações satisfatórias também se observam para o parâmetro tridimensional análogo obtido com o perfilômetro óptico. Entretanto, os valores de  $R^2$  para o perfilômetro óptico são, em geral, ligeiramente inferiores aos obtidos com o perfilômetro mecânico. Os métodos de medição ópticos 3D de última geração proporcionam vantagens importantes em relação aos limites das técnicas bidimensionais de medição por contato. No entanto, a área da superfície coberta pela varredura do perfilômetro óptico é pequena, em comparação com o comprimento varrido pelo perfilômetro mecânico. Nesse caso, como as superfícies de algumas amostras são muito heterogêneas, a área varrida pelo perfilômetro óptico pode ter sido menor do que a ideal para que a avaliação fosse representativa. Isso pode justificar por quê, apesar de o perfilômetro mecânico ser um equipamento menos avançado, os valores de  $R^2$  obtidos para os parâmetros determinados com esse equipamento são superiores.

Deve-se mencionar que, essa separação do subconjunto de amostras realizada, não foi um artifício para que fossem encontradas, forçadamente, boas correlações entre resistência ao escorregamento e parâmetros de rugosidade. A estratégia foi adotada em uma tentativa de se comprovar a dependência já relatada entre as variáveis. Tendo sido possível a verificação da dependência íntima da resistência ao escorregamento em relação à rugosidade, evidencia-se a importância da exploração mais aprofundada do tema. Além de atestar a

relevância da rugosidade na definição do  $\mu_d$ , as melhores correlações obtidas permitem a identificação dos aspectos específicos dessa rugosidade mais determinantes para o desempenho dos pisos. A partir da identificação dessas características, os fabricantes cerâmicos podem, então, controlá-las com o objetivo de incrementar a resistência ao escorregamento de seus produtos.

Para o subconjunto selecionado, incluindo as amostras C2, E2, E5, F3, F7, J6 e L13, correlações fortes foram encontradas entre a resistência ao escorregamento e parâmetros que representam a rugosidade média ( $R_a$  e  $S_a$ ) e rugosidade média quadrática ( $R_q$  e  $S_q$ ) da superfície.

Outro parâmetro genérico quantificador da rugosidade das superfícies é o índice de rugosidade,  $I_r$ , obtido pelo perfilômetro mecânico. O perfilômetro óptico calcula um índice tridimensional similar,  $S_{dr}$ , que difere do  $I_r$  por uma definição básica adotada em seu cálculo. Para  $S_{dr}$ , não se considera, diretamente, a razão entre a área desenvolvida pela textura da superfície e a área varrida. Considera-se a razão entre a contribuição da textura – diferença entre a área superficial total desenvolvida e a área superficial correspondente à contribuição do plano varrido, como se não houvesse irregularidades – em relação à área analisada. Os resultados de  $R^2$  apresentados indicam que o  $\mu_d$  da superfície aumenta com o índice de rugosidade e com o análogo obtido com o perfilômetro óptico. Isso sugere que perfis mais complexos – com mais irregularidades e, estas, com elevada amplitude – tendem a contribuir para que as superfícies sejam menos escorregadias. Altos índices de rugosidade não são característicos de perfis típicos de superfícies lisas e brilhantes. Estas, portanto, devem ser evitadas em produtos para áreas de riscos de escorregamento.

Estes parâmetros que quantificam o grau de rugosidade de uma superfície de modo genérico, de certa forma, também estão relacionados com a amplitude dos perfis, posto que, considerando-se fixas outras variáveis, aumentam com a altura dos picos e vales presentes no mesmo. Assim, valores de  $R^2$  satisfatórios foram encontrados, também, para todos os parâmetros que, de alguma forma, quantificam a amplitude da rugosidade dos pisos. Dentre estes, os que menos se correlacionam bem com a resistência ao escorregamento avaliada pelos métodos estudados são os que quantificam a profundidade dos vales. A

amplitude geral do perfil e a amplitude de picos, portanto, devem ser priorizadas no projeto de superfícies com alta resistência ao escorregamento.

Apesar das boas correlações encontradas para os parâmetros de amplitude, índices de rugosidade e rugosidades médias, estes parâmetros não descrevem o formato do perfil, que também deve ser considerado no projeto de superfícies. Esse aspecto é mais bem descrito por outros parâmetros como  $\Delta a$  e  $\Delta q/Sdq$ , a inclinação – média e média quadrática – do perfil. Nesse estudo, correlações satisfatórias foram observadas entre os parâmetros  $\Delta$  e a resistência ao escorregamento das superfícies, o que vai ao encontro do exposto na literatura. Para os parâmetros  $\Delta$  bidimensionais, inclusive, mesmo para o conjunto completo com as doze amostras, valores de  $R^2$  de 0,89 já haviam sido encontrados. Conclui-se, portanto, que a presença de irregularidades afiadas, em detrimento das mais arredondadas, contribui para o aumento do coeficiente de atrito desenvolvido entre o piso e o pé do pedestre. As irregularidades mais afiadas do piso penetram mais profundamente na superfície do pé ou da borracha do calçado, que têm menor dureza em relação ao produto cerâmico, e, por conseguinte, aumenta-se a intensidade do atrito originado do mecanismo conhecido como *Plowing*.

As boas correlações para os parâmetros  $R_k$ ,  $R_{pk}$  e  $R_{vk}$ , reforçam a importância da amplitude do perfil, de modo geral, para a determinação da resistência ao escorregamento. Maiores valores de  $\mu_d$  são encontrados para perfis que apresentam elevados valores de amplitude das três zonas avaliadas. No entanto, para casos em que a elevada amplitude total, dada pela soma da amplitude da zona de vales, picos e rugosidade central, é devida principalmente a altura da zona de vales, o  $\mu_d$  tende a ser baixo. Ou seja, se o valor de  $R_{vk}$  se sobressai ao valor dos outros dois parâmetros, a configuração do perfil não é favorável à resistência ao escorregamento.

Apesar da utilidade das correlações já encontradas para direcionar o projeto de pisos mais seguros, é importante encontrar formas de considerar a influência dos aspectos da rugosidade das superfícies removidas do conjunto inicial de doze amostras estudado que tiveram papel relevante na determinação da sua resistência ao escorregamento. Cabe, portanto, uma discussão à cerca

das possíveis razões para os desvios que essas amostras apresentaram em relação às tendências lineares observadas entre o  $\mu_d$  e alguns parâmetros.

Os pontos correspondentes à superfície A3 (●), natural (sem esmalte) e polida, nos gráficos de  $\mu_d$  determinado pelos dois deslizadores motorizados, quando correlacionados com  $R_k$  e  $R_{pm}$ , estão deslocados para cima da linha de tendência dos resultados do conjunto de pisos estudados. Isso significa que o resultado de  $\mu_d$  dessa amostra é maior que o esperado de acordo com os valores desses parâmetros de rugosidade, em comparação com o comportamento geral das amostras. No entanto, para o Pêndulo, o ponto correspondente à amostra A3 segue a tendência do conjunto de amostras nos gráficos em que a resistência ao escorregamento é correlacionada com os quatro parâmetros de rugosidade apresentados. Assim, no caso dessa amostra, com perfil bastante plano e suave, parece ter ocorrido a superestimação do  $\mu_d$  com os deslizadores motorizado, devido a efeitos de aderência na interface com a borracha desses equipamentos. Para o Pêndulo, que opera de forma distinta, por observação dos resultados obtidos, não se percebe que isso tenha ocorrido.

Os pontos correspondentes às superfícies G1 e G4 (●), se ajustam bem à linha de tendência da correlação entre o  $\mu_d$  e o parâmetro  $\Delta$ , a inclinação do perfil. No entanto, para os outros gráficos, os resultados de  $\mu_d$  são inferiores ao que poderia se esperar pelo valor dos parâmetros representados que, no caso, estão relacionados à amplitude do perfil. No caso das duas amostras, o efeito ondulado produzido pelo esmalte gotejado contribui para a amplitude considerável dos perfis, mas a rugosidade propriamente dita é bastante baixa, o que confere o aspecto brilhante das mesmas. Como já mencionado previamente, perfis desse tipo não favorecem a resistência ao escorregamento das superfícies, o que explica por que, apesar de as mesmas apresentarem parâmetros de amplitude relativamente altos, os resultados de  $\mu_d$  não são bons. Os elementos da ondulação da superfície G4 são mais afiados, mas, para G1, em especial, são muito arredondados e, com isso, o desempenho desse produto, em termos de escorregamento, é ainda mais crítico.

Também como já comentado, parâmetros de amplitude não contemplam a quantidade de irregularidades presentes nos perfis e, tampouco, seu formato.

Assim, para garantir que um produto apresente desempenho condizente com a altura do seu perfil, os produtores cerâmicos não podem se deixar guiar apenas por um parâmetro de rugosidade. Mesmo no caso de parâmetros para os quais, considerando-se o subconjunto de amostras selecionadas, tenham sido encontradas correlações diretas com o  $\mu_d$ , alguns tipos de superfície podem apresentar comportamento totalmente distinto do previsto, como fora observado nos gráficos discutidos acima.

Em se tratando da amostra H4 (●), para o DS e o Pêndulo, a resistência ao escorregamento determinada é compatível com os valores dos parâmetros de rugosidade quantificados. Entretanto, nota-se que o ponto que representa essa amostra, nos gráficos do BOT, se desloca para cima da linha de tendência traçada para o conjunto de pisos. É possível que, para este dispositivo, nas condições em que as medidas foram realizadas, aspectos da superfície tenham promovido mecanismos de atrito mais intensos que os observados outros produtos com alguns parâmetros de rugosidade similares.

O ponto corresponde à amostra I2 (●), por sua vez, com excelente desempenho em termos de resistência ao escorregamento, se desloca, em todos os gráficos, para cima da linha de tendência dos resultados do conjunto. Para o DS e o BOT, inclusive, essa é a superfície com maior  $\mu_d$  dentre todas as avaliadas. Apesar disso, os valores dos parâmetros de rugosidade determinados para essa amostra são razoáveis, não se sobressaindo em relação aos valores de outras amostras com desempenho muito inferior, por exemplo. Esta amostra apresenta uma textura ABS produzida pela aplicação de uma camada protetiva sobre sua superfície e, a observação do seu perfil permite notar duas porções da superfície com características de rugosidade distintas entre si. Enquanto há baixa rugosidade nas regiões mais rebaixadas do perfil, nos topos das elevações superficiais vistas a olho nu encontram-se irregularidades numerosas e íngremes. Nesses pontos elevados, a inclinação do perfil e amplitude das irregularidades são elevados, mas estes valores são significativamente baixos para as regiões lisas mais baixas, o que acaba contribuindo para que o valor médio dos parâmetros que quantificam esses aspectos, para o perfil todo, seja reduzido.

No entanto, a presença dessas regiões lisas na superfície de I2, apesar de causar o abaixamento nesses valores dos parâmetros de rugosidade, contribuem positivamente para o  $\mu_d$ . As regiões mais rugosas da superfície entram em contato com o pé do pedestre incrementando o atrito por diversos mecanismos bastante eficazes. Ao mesmo tempo, a diferença de amplitude entre as regiões baixas e as elevações superficiais, por si só, cria uma ondulação no perfil da amostra, que além de contribuir com o atrito através de mecanismos de atrito por ancoramento, acomodam líquidos de forma a evitar a formação de filmes lubrificantes. O resultado dessa combinação inteligente da ondulação com a rugosidade, com regiões baixas mais lisas para acomodação de líquidos e regiões elevadas bastante ásperas, foi excelente, o que explica o deslocamento dos resultados dessa amostra para cima da linha de tendência do grupo.

Essa discussão evidencia que a análise de parâmetros de forma isolada não é adequada para prever o comportamento de grupos de produtos com perfis muito diversificados. A estimativa de um possível aumento no  $\mu_d$  devido a um incremento da rugosidade média do perfil, por exemplo, não será válida se os perfis comparados têm formatos muito distintos. E, como se observa para o conjunto de amostras estudado, representativo da variedade de superfícies disponíveis no mercado de pisos cerâmicos, as superfícies cerâmicas se configuram em formatos bastante diversos.

Também se observou que amostras assimétricas podem não se comportar segundo tendências exibidas pelo  $\mu_d$  das superfícies mais simétricas em função dos seus parâmetros de rugosidade e a assimetria de perfis também é comum nas superfícies comercializadas no mercado cerâmico. Apenas metade do conjunto de amostras estudado apresenta o parâmetro *skewness* próximo de zero, sendo, portanto, simétricas (ou praticamente simétricas). As amostras polidas A3 (●) e E2 (●), e uma das esmaltadas satinadas, F7 (●), apresentam  $Sk < 0$ , o que significa que seus perfis se caracterizam por uma predominância de vales no perfil. Da mesma forma, os valores de  $Sk$  positivos para H4 (●), G4 (●), e I2 (●), sinalizam perfis em que há uma predominância de picos.

Tomando os resultados do Pêndulo, um novo cálculo dos valores de  $R^2$  sem incluir as amostras A3, H4 e I2, já resultaria em coeficientes de correlação

de 0,99 para a inclinação do perfil, por exemplo. Algumas das amostras assimétricas apresentaram  $\mu_d$  condizente com a inclinação média da sua rugosidade superficial, dado que a assimetria pode não ter sido tão relevante quanto outros fatores atuando simultaneamente na determinação da sua resistência ao escorregamento. Entretanto, no caso das amostras A3, H4 e I2, a assimetria afetou significativamente os resultados, que se desviaram do comportamento das outras amostras do conjunto.

A inclinação elevada do perfil de A3 (●), se deve à presença de vales estreitos e profundos, que pouco contribuem para sua resistência ao escorregamento e, assim, a amostra apresenta desempenho inferior ao de outras superfícies com perfis com inclinação média similar. No caso das amostras H4 (●) e I2 (●), em que há uma predominância de picos afiados, a resistência ao escorregamento estimada supera o valor dessa propriedade obtido para amostras com valores de  $\Delta$  parecidos. Nesse caso, o que ocorre é que, apesar dos picos íngremes, a inclinação média desses perfis é reduzida devido a contribuição da baixa inclinação das regiões mais planas do perfil. No entanto, a presença dos picos afiados, ainda que sobre um plano mais regular, contribuiu de forma eficaz com os mecanismos de atrito desenvolvidos na interface.

Essa discussão evidencia que, apesar de alguns parâmetros não apresentarem correlações diretas com o  $\mu_d$  (baixo  $R^2$  para a correlação linear entre as variáveis), como ocorre para  $S_k$ , o aspecto que estes caracterizam pode ser relevante de outras formas para o desempenho das superfícies. Isso reforça a importância de se dedicarem esforços na busca por formas de se contemplarem, simultaneamente, efeitos de aspectos distintos das superfícies na sua resistência ao escorregamento, de modo que a previsão dessa propriedade para um produto, de acordo com suas características superficiais, seja válida para pisos com peculiaridades das mais variadas possíveis. Uma possível solução para se atingir esse objetivo é através do desenvolvimento de relações matemáticas, a partir de combinações de parâmetros, que sejam aplicáveis para um conjunto variado de pisos, com superfícies heterogêneas.

### 4.2.3 Expressões matemáticas para descrição da resistência ao escorregamento de pisos cerâmicos.

O objetivo da exploração desse tema é encontrar fórmulas simples que retornem valores que se correlacionam bem com a resistência ao escorregamento das amostras mesmo quando um conjunto heterogêneo de superfícies, como o grupo das doze superfícies estudadas, é considerado. Ou seja, buscar, através da combinação de parâmetros, uma maneira de corrigir desvios do comportamento esperado para a resistência ao escorregamento em função de apenas um parâmetro individual, considerado de forma isolada. Uma estratégia para que diferentes aspectos de uma superfície, que influenciam em sua resistência ao escorregamento de forma simultânea, sejam contemplados.

A inclinação de uma irregularidade está relacionada com a razão entre sua altura e a largura da sua base. Dessa forma, elevar a inclinação de um perfil determinado implica que ocorra, pelo menos, um aumento na amplitude das suas irregularidades, ou na quantidade das mesmas, ou, ainda, uma redução no seu comprimento de onda ou distância entre elas. Assim, os parâmetros  $\Delta$  já podem ser considerados parâmetros híbridos, visto que são considerados, em seu cálculo, mais de um aspecto da rugosidade das superfícies. Portanto, não é coincidência que os maiores valores de  $R^2$  tenham sido encontrados para esses parâmetros, dentre todos os parâmetros determinados, quando correlacionado com o  $\mu_d$  para o conjunto inicial de doze superfícies bastante diversificadas.

No entanto, de qualquer forma, o parâmetro não é suficiente para descrever, de forma completa, a configuração dos elementos superficiais de um produto. A determinação do parâmetro  $\Delta$  não considera, por exemplo, a assimetria dos perfis. Conseqüentemente, como se observa nos gráficos das Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, ainda ocorrem desvios na previsão da resistência ao escorregamento de acordo com esse parâmetro no caso das amostras A3 (●), H4 (●) e I2 (●), por exemplo.

Buscaram-se, portanto, combinações de parâmetros que pudessem contemplar a assimetria do perfil juntamente com sua inclinação. Para os resultados de resistência ao escorregamento obtidos com o Pêndulo,

encontraram-se correlações excelentes entre o  $\mu_d$  avaliado e valores calculados a partir de algumas fórmulas simples. Um exemplo destas é a simples multiplicação da inclinação média do perfil,  $\Delta a$ , pelo parâmetro  $mr1$ , ambos determinados para os perfis bidimensionais de rugosidade fornecidos pelo perfilômetro mecânico.

Esse parâmetro,  $mr1$ , representa a porcentagem de material contida na região dos picos da rugosidade da superfície, calculado a partir da curva de razão de material detalhada na Tabela 2.6. Dessa forma, valores inferiores de  $mr1$  foram obtidos para superfícies com perfis compostos predominantemente por vales, como das amostras polidas A3 (●) e E2 (●). Assim, quando se multiplica a inclinação do perfil dessas amostras por seus valores de  $mr1$ , o resultado é significativamente reduzido, sendo mais compatível com o desempenho de escorregamento ruim que esses pisos apresentam. O parâmetro  $mr1$  sinaliza que a elevada inclinação do perfil dessas amostras se deve à presença de vales íngremes profundos, que não contribuem para a resistência ao escorregamento das superfícies.

Por outro lado, no perfil de I2 (●), por exemplo, há uma clara predominância de picos, o que têm se mostrado favorável ao aumento da resistência ao escorregamento da superfície. Sendo  $\Delta a$  um parâmetro médio, apesar da elevada inclinação dos picos no perfil de I2, seu valor final pode ter sido reduzido devido à consideração da menor inclinação das regiões mais planas. Nesse caso, considerar esse parâmetro em conjunto com o  $mr1$ , bastante elevado para essa superfície, pode ajudar a explicar seu desempenho acima do esperado de acordo com seus valores de  $\Delta a$ .

Essas observações indicam que, enquanto perfis como os das amostras polidas devem ser evitados em superfícies de produtos para áreas de riscos de escorregamento, perfis como o das amostras H4 e I2 devem ser buscados. Traduzindo para a linguagem da indústria cerâmica, enquanto superfícies polidas dificilmente serão seguras para áreas de riscos de escorregamento, por outro lado, alcançam-se bons desempenhos quando se trabalha com superfícies mais ásperas devido à aplicação de esmaltes mates e granilhas.

A amostra G4 (●), com acabamento gotejado, apresentou valores de  $mr_1$  tão elevados quanto encontrados para I2, graças a assimetria observada em seu perfil devido a predominância de picos. No entanto, estes são largos, espaçados e arredondados, pouco efetivos em termos de promoção de mecanismos intensos de atrito. Esse aspecto, por sua vez, é representado pela baixa inclinação do perfil dessa amostra em relação a I2. Assim, mais uma vez, a expressão  $\Delta a.mr_1$  mostra-se adequada para corrigir incompatibilidades entre os desempenhos das superfícies previstos a partir de parâmetros considerados de forma isolada e o desempenho que elas realmente apresentam.

Como resultado, para a correlação entre os valores calculados a partir da multiplicação de  $\Delta a$  por  $m_1$  para as doze amostras estudadas e a resistência ao escorregamento das mesmas, medida pelo Pêndulo, observou-se um valor  $R^2=0,93$ .

Essa expressão é apenas um exemplo didático para ilustrar a estratégia do uso de fórmulas matemáticas para o cálculo de novos índices que se correlacionem bem com a resistência ao escorregamento dos produtos cerâmicos. No entanto, outras expressões mais complexas, a partir da combinação de parâmetros de rugosidade bidimensionais, foram encontradas e constatou-se sua validade para a previsão do desempenho de escorregamento das superfícies avaliadas, não apenas para o Pêndulo.

Algumas expressões e os valores de  $R^2$  alcançados para a correlação entre os resultados obtidos e o  $\mu_d$  avaliado são apresentados na Tabela 4.10 de forma bastante resumida. São mostradas, apenas, algumas expressões que envolvem os parâmetros presentes com maior frequência que outros nas inúmeras equações encontradas. Em muitos casos, é possível a substituição de parâmetros das expressões por outros com significado similar, alterando-se muito pouco os valores de  $R^2$  alcançados. No caso das equações apresentadas nessa tabela, dentre essas possíveis substituições, foram mostradas as que envolvem os parâmetros que retornam os valores de  $R^2$  mais elevados.

Tabela 4.10. Combinações de parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro mecânico e coeficiente de determinação –  $R^2$  – entre os valores calculados a partir dessas expressões e a resistência ao escorregamento a úmido das doze superfícies avaliadas (conjunto completo de amostras).

			<b>DS</b>	<b>BOT</b>	<b>Pêndulo</b>
$\Delta q \cdot Rk$	÷	A2	0,82	0,80	0,95
$\Delta q \cdot Rk \cdot Ry$	÷	A2 . Rt	0,85	0,81	0,94
$\Delta q \cdot Rq$	÷	Rvk	0,84	0,81	0,95
$\Delta q \cdot Ra$	÷	Rvk	0,83	0,80	0,93
$\Delta q \cdot Ry$	÷	Rvk	0,83	0,79	0,97
$\Delta q \cdot Rq^2$	÷	Rvk . Ra	0,85	0,81	0,97
$\Delta q^2 \cdot \lambda q$	÷	Rvk	0,83	0,82	0,96
$\Delta a \cdot Ry^2$	÷	Rvk <sup>2</sup>	0,87	0,84	0,97
$\Delta a \cdot Rt^2$	÷	Rvk <sup>2</sup>	0,82	0,82	0,98
$\Delta a \cdot Ry^2$	÷	Rvk . A2	0,86	0,81	0,94
Ra . Ry	÷	Rvk . $\lambda q$	0,83	0,81	0,97
Rq <sup>2</sup>	÷	Rvk . $\lambda q$	0,84	0,81	0,94
Rk . R3y	÷	A2 . Ku	0,80	0,83	0,97
Ry <sup>2</sup> . R3y	÷	A2 <sup>2</sup> . Ku <sup>2</sup>	0,88	0,85	0,91
Ry <sup>2</sup> . R3y	÷	Rvk <sup>2</sup> . Ku <sup>2</sup>	0,85	0,88	0,93

As relações apresentadas são expressões que, com o menor número de parâmetros combinados, permitem o cálculo de um novo valor correlacionado da forma mais satisfatória possível com a resistência ao escorregamento medida pelos três métodos considerados no estudo.

Nota-se que, em geral, as expressões envolvem, no numerador, multiplicações da inclinação do perfil por parâmetros como a rugosidade média, a altura da rugosidade central do perfil obtida pela curva de Abbott-Firestone, Rk

e parâmetros de amplitude, como  $R_y$ . Para o subgrupo de amostras considerado anteriormente, correlações satisfatórias entre o valor individual desses parâmetros e a resistência ao escorregamento já haviam sido encontradas. Alguns deles, inclusive, estão dentre os que já haviam sido mencionados pela literatura como relevantes na determinação da resistência ao escorregamento dos pisos cerâmicos. Isso sugere, portanto, que os desvios do comportamento de atrito de alguns pisos em relação ao que seria esperado de acordo com os valores individuais desses parâmetros, podem ser corrigidos pela combinação entre alguns deles e/ou, ainda, por sua divisão por outros parâmetros observados no denominador das expressões.

Esses parâmetros presentes no denominador das expressões, por sua vez, de modo geral, não são parâmetros que, individualmente, se correlacionam bem com o coeficiente de atrito. No entanto, estão associados a peculiaridades das superfícies que exercem influência em seu desempenho de escorregamento e, portanto, não devem ser negligenciados. Assim, como ocorreu no caso da expressão  $\Delta q.mr1$ , estes parâmetros se mostram interessantes fatores de correção para a previsão do desempenho dos pisos a partir dos parâmetros mais tradicionais, utilizados no numerador das fórmulas.

Esse papel também foi desempenhado por parâmetros para os quais já se haviam sido identificadas boas correlações lineares com a resistência ao escorregamento, como  $R_{vk}$ . Valores de  $R_{vk}$  muito elevados ocorrem para perfis em que há predominância de vales, como os das superfícies polidas A3 e E2. Da mesma forma,  $R_{vk}$  reduzidos estão associados a superfícies como I2, onde a presença de picos é dominante. Portanto, a utilização do parâmetro  $R_{vk}$  no denominador das expressões mostra-se uma excelente forma de contemplar o significativo efeito que a assimetria exerce no desempenho das superfícies.

A Tabela 4.11 apresenta outras expressões que fornecem resultados que se correlacionam bem a resistência ao escorregamento das amostras, envolvendo, agora, combinações de parâmetros determinados pela varredura das superfícies pelo perfilômetro óptico.

Tabela 4.11 Combinações de parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro ótico e coeficiente de determinação –  $R^2$  – entre os valores calculados a partir dessas expressões e a resistência ao escorregamento a úmido das doze superfícies avaliadas (conjunto completo de amostras).

			<b>DS</b>	<b>BOT</b>	<b>Pêndulo</b>
Rpk	÷	$Ku^4$	0,90	0,79	0,87
Rpk <sup>2</sup>	÷	$Ku^3 \cdot V \text{ nat}^2$	0,84	0,71	0,92
Rpk <sup>2</sup>	÷	$Ku^4 \cdot V \text{ nat}$	0,94	0,69	0,83
Rq <sup>2</sup>	÷	$Ku^4 \cdot Rvk$	0,91	0,80	0,83
Rz . Rvk	÷	$V2 \cdot Ku^2$	0,86	0,86	0,84
Rk <sup>2</sup> . Ra	÷	V2	0,91	0,71	0,84
Rz . Ra . Rvk	÷	V2	0,93	0,70	0,83
Rz . Rt . Rvk	÷	V2	0,90	0,71	0,88
Rk <sup>2</sup> . Rt	÷	V2	0,87	0,70	0,85
Rk . Rvk	÷	V2	0,83	0,84	0,89
Rk <sup>4</sup>	÷	$V2^2 \cdot V \text{ nat}$	0,91	0,79	0,82
Rk <sup>2</sup>	÷	$V2 \cdot V \text{ nat}$	0,74	0,89	0,79
Rk <sup>2</sup> . Rvk <sup>2</sup>	÷	$V2 \cdot Ra$	0,81	0,87	0,78

Entre essas equações e as anteriores, observam-se diferenças entre os parâmetros utilizados nas combinações e as maneiras como estes são combinados. Isso ocorre, inclusive, pelo fato de que os parâmetros determinados pelo perfilômetro óptico não são os mesmos obtidos com o mecânico. No entanto, há algumas similaridades entre as expressões.

No numerador, encontram-se as rugosidades médias e parâmetros relacionados a amplitude dos perfis, determinados diretamente a partir da topografia das superfícies ou através de curvas de Abbott-Firestone. Já os parâmetros como V2 e Ku, relacionados à simetria e distribuição do material ao

longo da amplitude dos perfis, aparecem no denominador. Em todas as expressões apresentadas, ou  $K_u$ , ou  $V_2$ , ou os dois combinados, aparecem, obrigatoriamente, no denominador. O que isso sugere é que amostras com elevados valores de curtose, como as polidas, A3 e E2, não devem apresentar elevada resistência ao escorregamento, ainda que altos valores dessa propriedade fossem previstos, por exemplo, considerando apenas a inclinação desses perfis. Da mesma forma, superfícies com elevados valores de  $V_2$ , como a superfície brilhante G1, também devem apresentar desempenhos insatisfatórios em relação às propriedades de atrito, ainda que o contrário fosse previsto de acordo com a elevada amplitude apresentada pelo perfil, devida, praticamente, à sua ondulação.

Tanto para a combinação de parâmetros obtidos com o perfilômetro mecânico, quanto o ótico, houveram equações, dentre as propostas, que permitiram o encontro de valores satisfatórios de  $R^2$  para mais de um método de avaliação da resistência ao escorregamento, simultaneamente. Essas equações são as mais interessantes quando o foco é a produção de superfícies que cumpram requisitos de segurança de normas distintas, como é o caso dos produtos destinados à exportação.

Como o objetivo de melhorar o comportamento de atrito de uma superfície deve vir acompanhado da manutenção da sua facilidade de limpeza, é interessante, também, que se considerem parâmetros relacionados à limpabilidade dos pisos. Na etapa seguinte do estudo, o manchamento sofrido pelas superfícies estudadas será investigado e relacionado com a resistência ao manchamento avaliada na etapa anterior. Em seguida, expressões para a descrição do encardimento das superfícies, como as encontradas para a resistência ao escorregamento, também serão buscadas.

Também serão verificadas as alterações sofridas, durante o uso, pelos aspectos quantificados pelos parâmetros identificados como relevantes para o desempenho das superfícies, tanto os que se correlacionam bem, diretamente, com o  $\mu_d$ , quanto os que estão presentes, em combinação com outros, nas expressões desenvolvidas para a previsão dessa propriedade.

#### 4.2.4 Conclusões parciais

Informações úteis foram obtidas através das imagens do perfil e topografia das superfícies, assim como dos parâmetros quantificadores de aspectos característicos das mesmas. Com esses resultados, foi possível diferenciar as superfícies, umas em relação às outras, e correlacionar suas peculiaridades com seu aspecto visual e desempenho de escorregamento.

Considerando um subgrupo de superfícies com perfis mais simétricos, foram encontradas correlações lineares muito satisfatórias entre vários dos parâmetros de rugosidade determinados e a resistência ao escorregamento das superfícies avaliadas pelos três dispositivos de medição. Assim, conclui-se que o coeficiente de atrito, na interface entre o piso e o dispositivo de avaliação, está intimamente ligado às características da rugosidade das superfícies. Os parâmetros para os quais foram encontrados os maiores valores de  $R^2$  para sua correlação linear com  $\mu_d$  foram as rugosidades médias, parâmetros de amplitude – geral e de picos, principalmente – e inclinação do perfil. Portanto, o controle desses parâmetros pode ser utilizado para maximizar a resistência ao escorregamento de um produto. Alguns deles já haviam sido mencionados pela literatura especializada no tema, enquanto outros não.

Devido às diferenças nos mecanismos de atrito na interface de avaliação da resistência ao escorregamento e às peculiaridades e limitações dos métodos de medição da rugosidade/topografia, o valor de  $R^2$  para a correlação entre essas duas variáveis é distinto para cada par de técnicas de avaliação das mesmas. De um modo geral, os valores de  $R^2$  mais elevados foram encontrados para o perfilômetro mecânico, provavelmente devido à maior representatividade da análise, visto que as amostras são heterogêneas e o método varre um comprimento significativo das superfícies, que compreende, de forma mais adequada, elementos superficiais de maiores dimensões.

Apenas para o BOT, na condição seca de avaliação, não se encontraram correlações satisfatórias entre parâmetros de rugosidade e a resistência ao escorregamento. As melhores correlações encontradas, por sua vez, ocorrem para os resultados de  $\mu_d$  obtidos com o DS, a seco, e o Pêndulo, a úmido.

Considerando o conjunto completo com as doze amostras avaliadas, os valores de  $R^2$  alcançados para as correlações entre rugosidade e resistência ao escorregamento são baixos. Isso ocorre devido à que, as superfícies diferem, não apenas em relação a um aspecto de rugosidade e, ainda, em relação à ondulação. Assim, quando a resistência ao escorregamento é plotada em função de parâmetros, anteriormente identificados como determinantes para o desempenho das amostras do subgrupo avaliado, há uma tendência linear entre as variáveis, mas, algumas amostras se desviam da mesma.

As que apresentam  $\mu_d$  acima do esperado de acordo com o parâmetro de rugosidade em questão, provavelmente devido à influência positiva de outro aspecto da superfície no seu desempenho, são as que podem servir como modelos a serem buscados no desenvolvimento de superfícies. Dentre essas, podem-se citar superfícies que apresentam uma assimetria no perfil de forma que haja maior concentração de material na zona dos vales – vales rasos e arredondados – e uma zona de picos elevada, com a predominância de saliências íngremes.

Por outro lado, perfis com características como os de amostras que apresentam desempenho abaixo do esperado, devem ser evitados, como é o caso das amostras mais brilhantes, mesmo quando apresentam alguma ondulação.

Como, muitas vezes, os valores de  $R^2$  obtidos para as correlações são reduzidos devido à influência de mais de um aspecto da rugosidade da superfície, de forma simultânea, em seu coeficiente de atrito, a abordagem de se trabalhar com mais de um parâmetro ao mesmo tempo para otimizar o desempenho dos produtos se mostrou promissora. Novos índices podem ser calculados através de expressões matemáticas desenvolvidas pela combinação de parâmetros que descrevem aspectos distintos das superfícies. A maximização dos valores calculados pelas equações sugeridas pode ser uma ferramenta adequada e interessante guiar os produtores cerâmicos no desenvolvimento de pisos mais seguros, com melhor previsão das suas propriedades de fricção.

### **4.3 ETAPA 3**

#### **4.3.1 Exposição das amostras ao tráfego de pedestres e contaminações**

Nas etapas anteriores, estudou-se o desempenho dos pisos em termos de resistência ao escorregamento, em diferentes condições de medida, e sua relação com diversas características das superfícies. Entretanto, é sabido que, com o tempo uso, as características superficiais dos pisos podem ser significativamente alteradas pelo desgaste e acúmulo de sujeira, o que pode comprometer suas propriedades técnicas e estéticas. Para verificar como ocorrem as mudanças nas superfícies dos pisos e qual o efeito disso na sua resistência ao escorregamento, estes foram assentados no Restaurante Universitário da Universidade Federal de São Carlos, onde permaneceram por 6 meses em situação de uso real e intenso.

Durante o período em que as amostras permaneceram instaladas, para algumas delas, mudanças nas superfícies, como a perda de brilho e o encardimento, já eram perceptíveis. Após o período de 6 meses, os pisos, logo que arrancados, foram analisados visualmente e ficou claro que mudanças significativas haviam ocorrido nas superfícies, como pretendido no plano de trabalho. Houve êxito, portanto, no uso da estratégia de assentamento dos pisos em local de tráfego intenso de pedestres para submeter as superfícies ao desgaste e encardimento acelerados.

#### **4.3.2 Alterações superficiais das amostras após sua utilização.**

Para algumas das amostras, as mudanças superficiais foram menos perceptíveis que para outras, que tiveram suas qualidades estéticas bastante comprometidas. A grande dificuldade de comparar o grau das mudanças sofridas pelas doze superfícies advém do fato de que, as formas de quantificar essas variações, podem não fornecer resultados representativos da realidade, devido à grande heterogeneidade de superfícies avaliadas.

Isso ocorre, por exemplo, em relação à possibilidade de uso de um colorímetro para o cálculo da variação de cor –  $\Delta E$  – como um indicativo do grau de encardimento sofrido pelas amostras. As amostras têm acabamentos diferentes e cores distintas, havendo, inclusive, casos de superfícies com padrões e estampas. Assim, o  $\Delta E$ , como um indicativo do grau de encardimento, poderia ser significativamente maior para amostras de cores clara em relação às superfícies escuras, ainda que todas as outras variáveis e características superficiais fossem iguais para ambas. Em outras palavras, o  $\Delta E$  depende da decoração dos pisos, que deveria ser fixada para todos eles se a intenção fosse a comparação da variação da sua cor. Além disso, em superfícies heterogêneas, com padrões estampados, o  $\Delta E$  pode diferir consideravelmente entre regiões diferentes, mais claras ou escuras, da própria peça.

O mesmo ocorre em relação à avaliação da perda de brilho das amostras, visto que a variação depende dos níveis de brilho iniciais dos produtos. Portanto, é uma análise que não funcionaria para esse caso, em que há superfícies com níveis de brilho tão distintos e, inclusive, algumas, totalmente opacas.

Por esses motivos, a análise visual e tátil das amostras, antes e após o uso, apesar de ser relativamente subjetiva, foi extremamente necessária. A seção de resultados, a seguir, apresenta a caracterização completa de cada uma das amostras estudadas de forma individual. O objetivo é confrontar todas as características de uma mesma superfície de forma conjunta para que se possa, para cada uma delas: 1) verificar as mudanças sofridas, 2) correlacionar essas mudanças com as características superficiais iniciais; e 3) verificar os efeitos macroscópicos dessas mudanças, em aspectos estéticos, sensação ao toque e, em especial, na resistência ao escorregamento, avaliada com cada um dos três métodos considerados no estudo.

Após essa análise individual, para as doze amostras, há uma discussão mais global, em que são comparados o comportamento de desgaste e encardimento entre superfícies de tipologias distintas.

A Figura 4.12 e a Tabela 4.12 apresentam os resultados da caracterização superficial de A3, antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

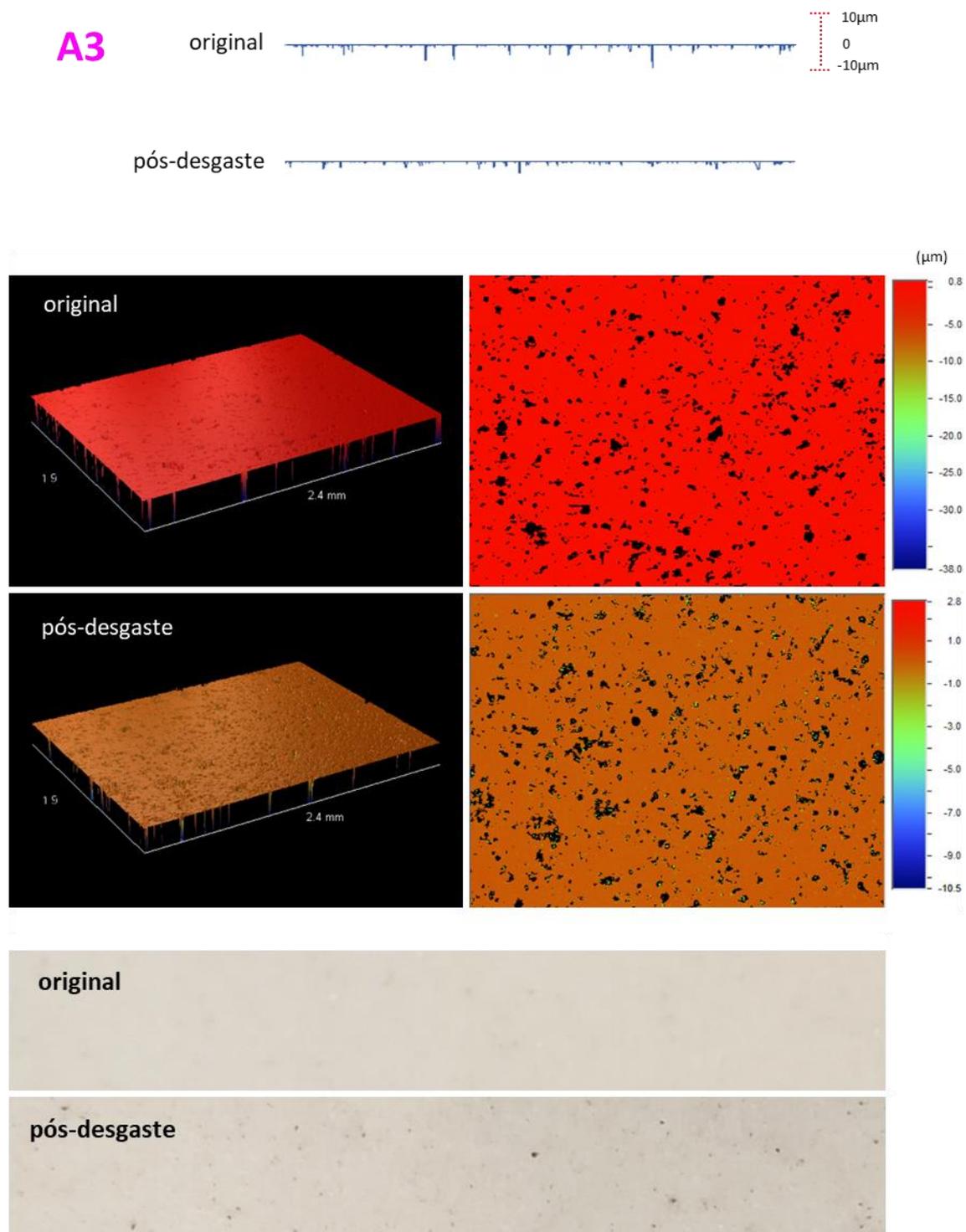


Figura 4.12 Superfície A3 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.

Tabela 4.12 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e ótica) e resistência ao escorregamento da superfície A3, antes e após 6 meses de uso intensivo.

	Perfilometria mecânica		Perfilometria ótica		
	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	
<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	0,4	<i>Sa</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	0,1
<i>Rq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,8	0,8	<i>Sq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,2	0,3
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	5,0	3,8	<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	17,6	7,8
<i>Rc</i> ( $\mu\text{m}$ )	1,5	1,3	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	38,8	13,3
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	13,4	10,7	<i>Sp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,8	2,8
<i>Ry</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,4	6,1	<i>Sv</i> ( $\mu\text{m}$ )	-38,0	-10,5
<i>Rp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,6	0,8	<i>Sdq</i> ( $^\circ$ )	2,2	2,1
<i>Rpm</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4	<i>Ssk</i>	-140,6	-10,1
<i>Rv</i> ( $\mu\text{m}$ )	12,8	10,0	<i>Sku</i>	24312,5	152,2
<i>Rvm</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,0	5,7	<i>Sdr</i>	0,0	0,1
<i>R3z</i> ( $\mu\text{m}$ )	4,5	3,3	<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	0,1
<i>R3y</i> ( $\mu\text{m}$ )	6,5	4,4	<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	0,1
<i>Sm</i> ( $\mu\text{m}$ )	86	86	<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	0,5
<i>S</i> ( $\mu\text{m}$ )	157	124	<i>mr1</i> (%)	12,7	9,7
<i>Pc</i> ( $\text{cm}^{-1}$ )	122	123	<i>mr2</i> (%)	84,1	82,6
$\Delta\alpha$ ( $^\circ$ )	2,4	2,2	<i>V1</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	0,0
$\Delta q$ ( $^\circ$ )	6,3	5,0	<i>V2</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	0,1
$\lambda\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	49	62	<i>Asurf</i> ( $\text{mm}^2$ )	4,2	4,2
$\lambda q$ ( $\mu\text{m}$ )	45	55	<i>Alat</i> ( $\text{mm}^2$ )	4,2	4,2
<i>Ku</i>	47,7	25,4	<i>Index area</i>	1,00	1,02
<i>Sk</i>	-6,1	-4,4	<i>V</i> ( $\cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ )	0,0	0,2
<i>Lo</i> ( $\text{mm}$ )	2,52	2,5			
<i>Ir</i>	1,01	1,00			
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4			
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	0,2			
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	2,4	2,4			
<i>mr1</i> (%)	4,7	12,2			
<i>mr2</i> (%)	86,3	83,5			
<i>A1</i>	0,6	1,6			
<i>A2</i>	16,1	19,1			

	Coeficiente de atrito (a úmido)	
	ANTES	DEPOIS
<i>DS</i>	0,52	0,36
<i>BOT 3000E</i>	0,43	0,34
<i>Pêndulo</i>	0,17	0,10

Dentre as amostras avaliadas, a superfície A3 é a que apresenta pior desempenho nos testes de resistência ao manchamento. O piso só atingiu classe 5 de limpabilidade para três dos nove agentes manchantes e, para quatro deles (tinta lavável, tinta preta insolúvel em água, e soluções de azul de metileno e de permanganato de potássio) a amostra alcança apenas a classe 2, o que é um resultado bastante ruim. Esse desempenho era esperado dado que a abertura dos poros superficiais do porcelanato pelo polimento o torna mais susceptível ao manchamento. Como consequência, previa-se, também, o encardimento da superfície, confirmado pelas fotografias da sua face superior antes e após sua utilização. Na superfície após exposição aos pedestres, observam-se pontos escuros bastante evidentes, que correspondem aos poros onde a sujeira se deposita. Nas imagens obtidas pelo perfilômetro óptico, as regiões mais escuras (mais profundas) representam esses poros. Na visão lateral da superfície após uso, notam-se frações verdes juntas aos poros e, na visão superior, pontos verdes dentro das cavidades escuras maiores. Estes pontos verdes, de menor profundidade, correspondem às contaminações alocadas nos poros superficiais. Em associação, observa-se que os parâmetros que quantificam profundidade de vales, e os de amplitude total, que a consideram no cálculo, foram reduzidos.

Apesar da alteração na cor da superfície, não houve mudança perceptível a olho nu em relação ao brilho e, tampouco, alterações de textura significativas perceptíveis pelo tato. Superfícies polidas, extremamente planas, após longo período de exposição a solicitações, tendem a ter a qualidade do polimento afetada pelo surgimento de irregularidades, como riscos e indentações. Ainda que isso não tenha sido visualmente observado na superfície da amostra após o uso, o aumento da sua rugosidade média sugere que isso tenha ocorrido.

Provavelmente, devido à essa redução na planaridade da superfície, houve uma redução nos efeitos de aderência na interface de medida que, usualmente, levam a uma superestimação do  $\mu_d$ . Isso explica a redução dos resultados de resistência ao escorregamento obtidos, em relação à superfície nova, com os três métodos de avaliação utilizados.

A Figura 4.13 e a Tabela 4.13 apresentam os resultados da caracterização superficial de C2, antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

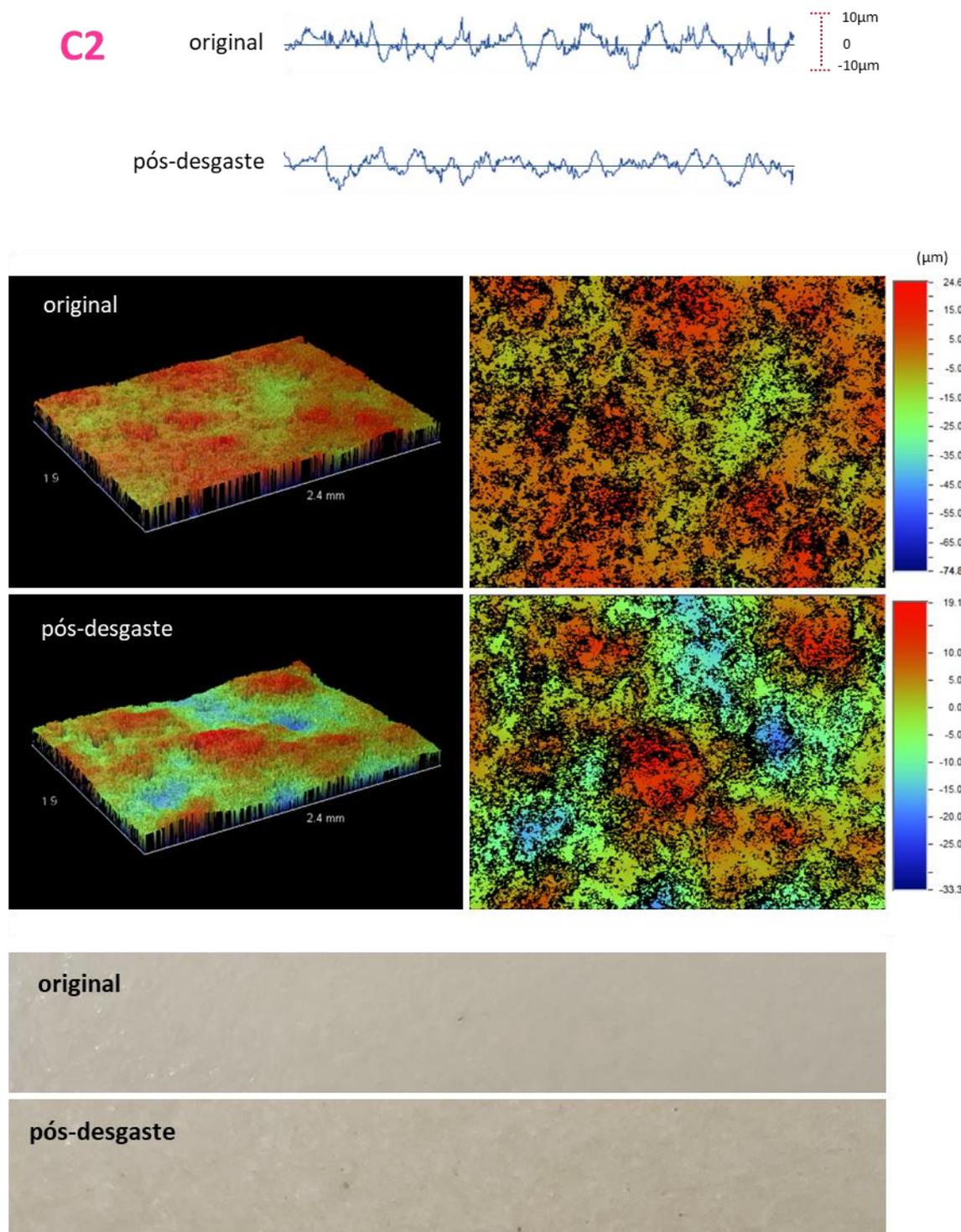


Figura 4.13 Superfície C2 antes e após 6 meses de uso intenso: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.

Tabela 4.13 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e óptica) e resistência ao escorregamento da superfície C2, antes e após 6 meses de uso intensivo.

	Perfilometria mecânica		Perfilometria óptica		
	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	
$Ra$ ( $\mu m$ )	4,9	3,8	$Sa$ ( $\mu m$ )	4,5	5,4
$Rq$ ( $\mu m$ )	6,1	4,6	$Sq$ ( $\mu m$ )	5,7	6,7
$Rz$ ( $\mu m$ )	16	10,3	$Rz$ ( $\mu m$ )	76,0	46,1
$Rc$ ( $\mu m$ )	9,4	7,2	$Rt$ ( $\mu m$ )	99,4	52,4
$Rt$ ( $\mu m$ )	39,6	25,5	$Sp$ ( $\mu m$ )	24,6	19,1
$Ry$ ( $\mu m$ )	28,9	19,7	$Sv$ ( $\mu m$ )	-74,8	-33,3
$Rp$ ( $\mu m$ )	21,4	12,0	$Sdq$ ( $^\circ$ )	16,5	9,9
$Rpm$ ( $\mu m$ )	15,7	9,5	$Ssk$	-0,1	-0,3
$Rv$ ( $\mu m$ )	19,8	13,4	$Sku$	4,0	2,7
$Rvm$ ( $\mu m$ )	13,2	10,2	$Sdr$	2,8	16,4
$R3z$ ( $\mu m$ )	13,4	7,7	$Rk$ ( $\mu m$ )	14,2	5,3
$R3y$ ( $\mu m$ )	18,3	10,7	$Rpk$ ( $\mu m$ )	5,8	7,1
$Sm$ ( $\mu m$ )	271	371	$Rvk$ ( $\mu m$ )	6,2	7,9
$S$ ( $\mu m$ )	161	220	$mr1$ (%)	10,3	84,9
$Pc$ ( $cm^{-1}$ )	44	36	$mr2$ (%)	90,1	0,2
$\Delta\alpha$ ( $^\circ$ )	7,4	4,4	$V1$ ( $\mu m$ )	0,3	0,5
$\Delta q$ ( $^\circ$ )	10,8	6,1	$V2$ ( $\mu m$ )	0,3	1,0
$\lambda\alpha$ ( $\mu m$ )	243	297	$A_{surf}$ ( $mm^2$ )	3,6	3,0
$\lambda q$ ( $\mu m$ )	205	269	$A_{lat}$ ( $mm^2$ )	2,6	2,5
$Ku$	2,8	2,5	$Index\ area$	1,41	1,21
$Sk$	0,1	0,0	$V(.10^6\mu m^3)$	26,9	31,2
$Lo$ ( $mm$ )	2,55	2,5			
$lr$	1,02	1,01			
$Rk$ ( $\mu m$ )	16,2	12,4			
$Rpk$ ( $\mu m$ )	6,4	4,0			
$Rvk$ ( $\mu m$ )	6,3	4,3			
$mr1$ (%)	10	8,4			
$mr2$ (%)	91,8	89,1			
$A1$	31,2	17,7			
$A2$	28	24,1			

	Coeficiente de atrito (a úmido)	
	ANTES	DEPOIS
$DS$	0,45	0,36
<b>BOT 3000E</b>	0,60	0,47
<b>Pêndulo</b>	0,42	0,20

Comparando-se os dados da superfície C2 original de fábrica e após exposição ao tráfego de pedestres, nota-se uma redução expressiva nos valores dos parâmetros de amplitude, como  $R_z$  e  $R_t$ , para ambos os perfilômetros. Nota-se, ainda, que tanto os parâmetros que quantificam altura de picos –  $R_p$ ,  $R_{pm}$  e  $S_p$  – quanto de vales –  $R_v$ ,  $R_{vm}$  e  $S_v$  – foram reduzidos com o uso. Nas imagens do perfil bidimensional e da topografia da superfície, nota-se que as porções mais elevadas e pontiagudas dos picos presentes na superfície original são removidas com o desgaste. No entanto, a presença de pontos escuros na superfície após o experimento sugere que, além da contribuição do desgaste para a redução da amplitude do perfil da amostra, tenha ocorrido o acúmulo de sujeira nas regiões mais profundas.

Por conta desses dois fatores, além da redução na amplitude geral, na de picos e de vales, percebe-se um leve arredondamento das irregularidades do perfil. Nota-se, portanto, uma redução em parâmetros que quantificam a inclinação da superfície –  $\Delta a$ ,  $\Delta q$  e  $S_{dq}$  –, sua rugosidade média –  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $S_a$  e  $S_q$  – e em parâmetros relacionados ao grau de complexidade do perfil, como o  $I_r$  e o índice de área. Por outro lado, observa-se o aumento nos parâmetros que representam o comprimento de onda do perfil,  $\lambda_a$  e  $\lambda_q$ .

Como consequência dessas alterações, a textura da amostra é bastante atenuada pelo desgaste e a superfície torna-se mais suave ao toque. Há, também, um impacto negativo na resistência ao escorregamento de C2, devido às modificações superficiais provocadas pelo desgaste e encardimento. Enquanto produto não instalado, a amostra cumpre os requisitos de segurança para os três métodos de avaliação utilizados para a medida dessa propriedade. No entanto, decorridos os 6 meses do experimento, o  $\mu_d$  do piso, novamente avaliado, cai para níveis abaixo dos valores mínimos recomendados para uso em áreas de risco de escorregamento.

A Figura 4.14 e a Tabela 4.14 apresentam os resultados da caracterização superficial de E2, antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

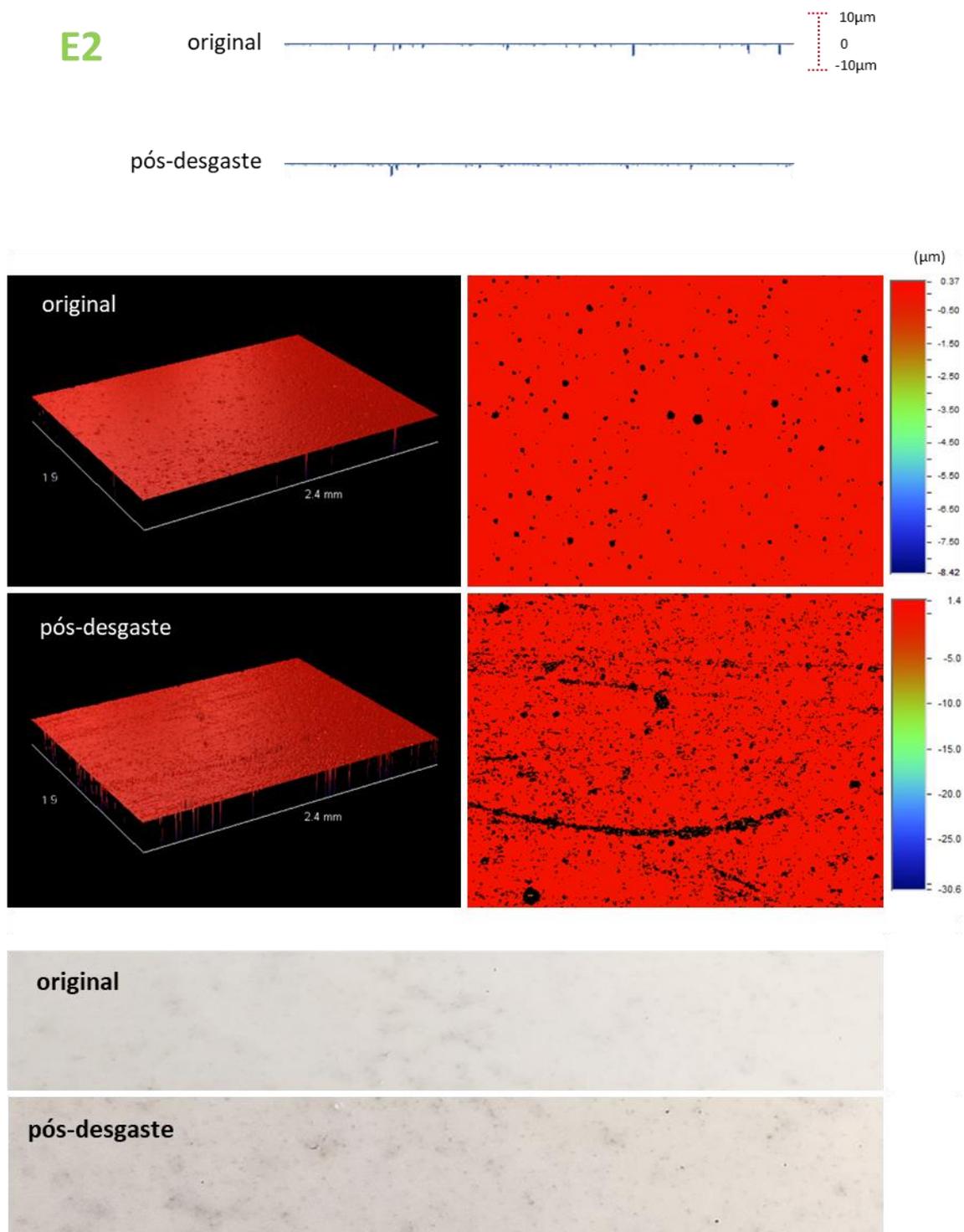


Figura 4.14 Superfície E2 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Comparando-se a vista superior da topografia de E2 antes do uso no restaurante com a mesma imagem obtida para A3, o outro produto polido do conjunto, notam-se, para E2, poros menos numerosos e de menor diâmetro. Além disso, para E2, há o surgimento de indentações e riscos que, ao contrário das irregularidades originadas em A3, são bastante evidentes e claramente observáveis a olho nu. Isso faz sentido considerando-se que a superfície que recebe o polimento, no caso da amostra A3, é o próprio porcelanato, enquanto para o produto E2, o polimento é realizado sobre uma camada de esmalte, mais mole e, portanto, mais susceptível ao desgaste e riscamento. Matematicamente, o aumento da irregularidade superficial do piso E2, devido ao surgimento dos riscos e entalhes, é refletido, por exemplo, pelo aumento em parâmetros de rugosidade média e de amplitude.

Em relação a facilidade de limpeza dos produtos antes da instalação, E2, com poros menores e em menor número, apresentou um desempenho superior a A3 nos testes de manchamento. No entanto, corridos os 6 meses de experimento, nota-se um encardimento muito mais expressivo na superfície E2. Nesse caso, as novas irregularidades superficiais originadas pelo tráfego de pedestres, podem ter atuado, nessa superfície, como concentradoras de sujeiras, comprometendo sua limpabilidade. A facilidade em se observar, a olho nu, que os riscos originados nessa superfície apresentam coloração de terra, destacando-se da base clara, corrobora com essa ideia do acúmulo de sujeira nessas novas cavidades do perfil, originadas durante o uso do produto.

Com o aparecimento dos riscos na superfície da amostra, há uma perda do brilho superficial e deterioração considerável do aspecto espelhado bastante valorizado no caso dos pisos polidos. Pelo fato de o porcelanato polido, A3, não ter sido tão afetado, com o uso, em relação a esse aspecto, este se mostra uma opção mais interessante, em comparação com E2, considerando-se a manutenção das características superficiais estéticas a longo prazo.

Em termos de resistência ao escorregamento, o desempenho do piso também é afetado. O perfil da superfície E2, caracterizado por elevada planaridade e ausência de irregularidades acima do plano superficial, é favorável ao desenvolvimento de efeitos de aderência na interface de contato com outra

superfície plana. Nesse caso, os resultados de resistência ao escorregamento, para os três métodos de avaliação utilizados, são bastante influenciados por esse mecanismo de atrito. No caso dos deslizadores motorizados, as irregularidades originadas na superfície, após o uso, não parecem ter atrapalhado o desenvolvimento desses mecanismos. Inclusive, há uma melhora na resistência ao escorregamento avaliada para o produto, sendo possível, portanto, que essas irregularidades estejam, na verdade, contribuindo com o desenvolvimento de outros mecanismos de atrito na interface de medida, principalmente no caso do BOT.

As medidas de coeficiente de atrito com deslizadores motorizados envolvem o deslizamento da borracha sobre uma área significativa da superfície avaliada, o que faz com que, durante a varredura, os efeitos de aderência sejam favorecidos. No caso do Pêndulo, esses efeitos são menos intensos. A interface de contato entre a borracha e o piso é menor, não é plana, e o contato ocorre muito rapidamente. Assim, a diminuição da planaridade da superfície E2, com o uso, levou à redução da intensidade dos efeitos de aderência. Além disso, a presença de novas irregularidades na superfície não contribuiu, nesse caso, de forma efetiva para o desenvolvimento do atrito através de outros mecanismos. Assim, o  $\mu_a$  obtido com esse dispositivo, para E2, após exposição ao tráfego de pedestres, é reduzido, ao contrário do que ocorre para os deslizadores motorizados.

Um último aspecto a ser mencionado sobre as alterações superficiais da amostra E2, também válido para A3, é a diminuição do parâmetro Sk devido a utilização desses produtos por 6 meses no solo do restaurante. Isso ocorre porque, tanto o preenchimento dos vales, quanto o surgimento de irregularidades na superfície plana, reduzem a assimetria do perfil, distanciando-o do perfil característico de amostras polidas como saem da fábrica.

A Figura 4.15 e a Tabela 4.15 apresentam os resultados da caracterização superficial de E5 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

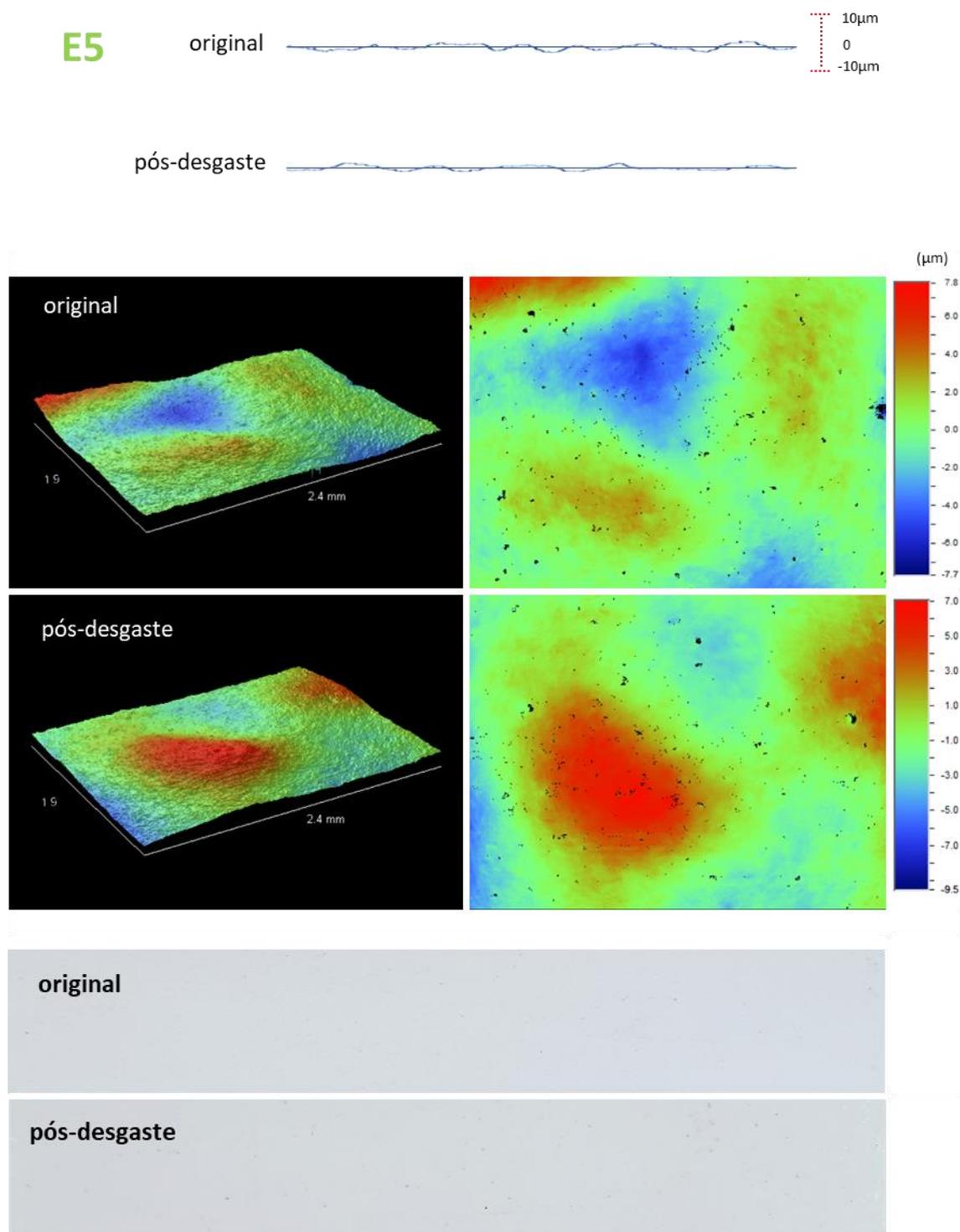


Figura 4.15 Superfície E5 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Como já comentado, a superfície esmaltada brilhante, E5, não tendo sido submetida a um processo de acabamento refinado, não atinge o mesmo grau de planaridade dos perfis das amostras polidas. No entanto, essa superfície, ainda com perfil bem pouco irregular, apresenta um aspecto bastante brilhante que, assim como para os pisos polidos, foi comprometido pelo uso devido ao surgimento de riscos, observáveis a olho nu.

No caso dos pisos polidos, isentos de picos em seus perfis, o surgimento de riscos promove o aumento da irregularidade superficial. No entanto, no perfil da superfície E5, apenas esmaltada, picos mais sobressalentes, ainda que de baixa amplitude, são observados. Assim, ao mesmo tempo em que se originam riscos na superfície, saliências podem ter sido atenuadas pelo desgaste. Além disso, contaminações podem ter se alocado em vales do perfil, visto que, a olho nu, notam-se pontos escuros, de sujeira, na superfície após o uso.

Como o efeito de cada um desses três fenômenos são sutis e podem compensar o efeito dos outros que estejam ocorrendo simultaneamente, matematicamente, não se observam tendências claras de variação para muitos dos parâmetros de rugosidade determinados. Comparando-se a superfície antes e após o experimento, alguns parâmetros calculados não apresentam variação, outros variam apenas ligeiramente e alguns variam de formas divergentes para o perfilômetro óptico e o mecânico. A rugosidade média da superfície, por exemplo, é incrementada após exposição aos pedestres quando calculada pelo perfilômetro óptico, enquanto diminui quando quantificada pelo perfilômetro mecânico.

Essa diferença de comportamento observada entre os resultados dos dois perfilômetros pode estar relacionada à escala dimensional em que esses equipamentos operam e sua sensibilidade. A ponta do perfilômetro mecânico, que varre a superfície da amostra, não consegue alcançar as regiões mais baixas de vales muito profundos e estreitos, não podendo quantificar adequadamente o perfil, nesses casos, enquanto o perfilômetro óptico pode.

Mais preciso na avaliação de pequenas áreas, o perfilômetro óptico pode ter acusado um aumento de rugosidade média para a superfície riscada, enquanto, para o perfilômetro mecânico, os riscos não são detectados ou são

quase irrelevantes no cálculo do parâmetro. Na escala em que este último dispositivo opera, o que se percebe, de fato, no perfil da amostra após o uso no restaurante, é uma ligeira redução de amplitude e arredondamento das irregularidades.

Devido às alterações muito sutis dos parâmetros de rugosidade determinados, o  $\mu_d$  da amostra não variou de forma muito significativa. Para essa superfície, bastante lisa, essa propriedade é insatisfatória para o uso do produto em áreas de risco antes da sua utilização e assim se mantém após as alterações superficiais sofridas.

O que se percebe, após a permanência da amostra no restaurante, é uma leve queda no  $\mu_d$  determinado pelo DS e Pêndulo, provavelmente, associada ao preenchimento de vales por contaminações e arredondamento dos picos de rugosidade. Portanto, os resultados obtidos com esses dois métodos parecem estar associados à parâmetros de amplitude, que no caso da análise com o perfilômetro mecânico, decaem após o uso.

No entanto, a resistência ao escorregamento avaliada pelo BOT aumentou. Os resultados obtidos com esse equipamento, por sua vez, foram mais influenciados pela rugosidade média,  $S_a$ , da superfície, que, de acordo com a leitura do perfilômetro óptico, aumenta devido ao surgimento de riscos. Apesar da similaridade entre os princípios de operação dos deslizadores motorizados, no caso do BOT, há uma maior área de contato entre sua borracha e a superfície varrida, o que pode justificar sua capacidade de detectar algumas irregularidades nas superfícies das amostras não contempladas pela varredura com o DS e, por conseguinte, os maiores resultados de resistência ao escorregamento fornecidos.

A Figura 4.16 e a Tabela 4.16 apresentam os resultados da caracterização superficial de F3, antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

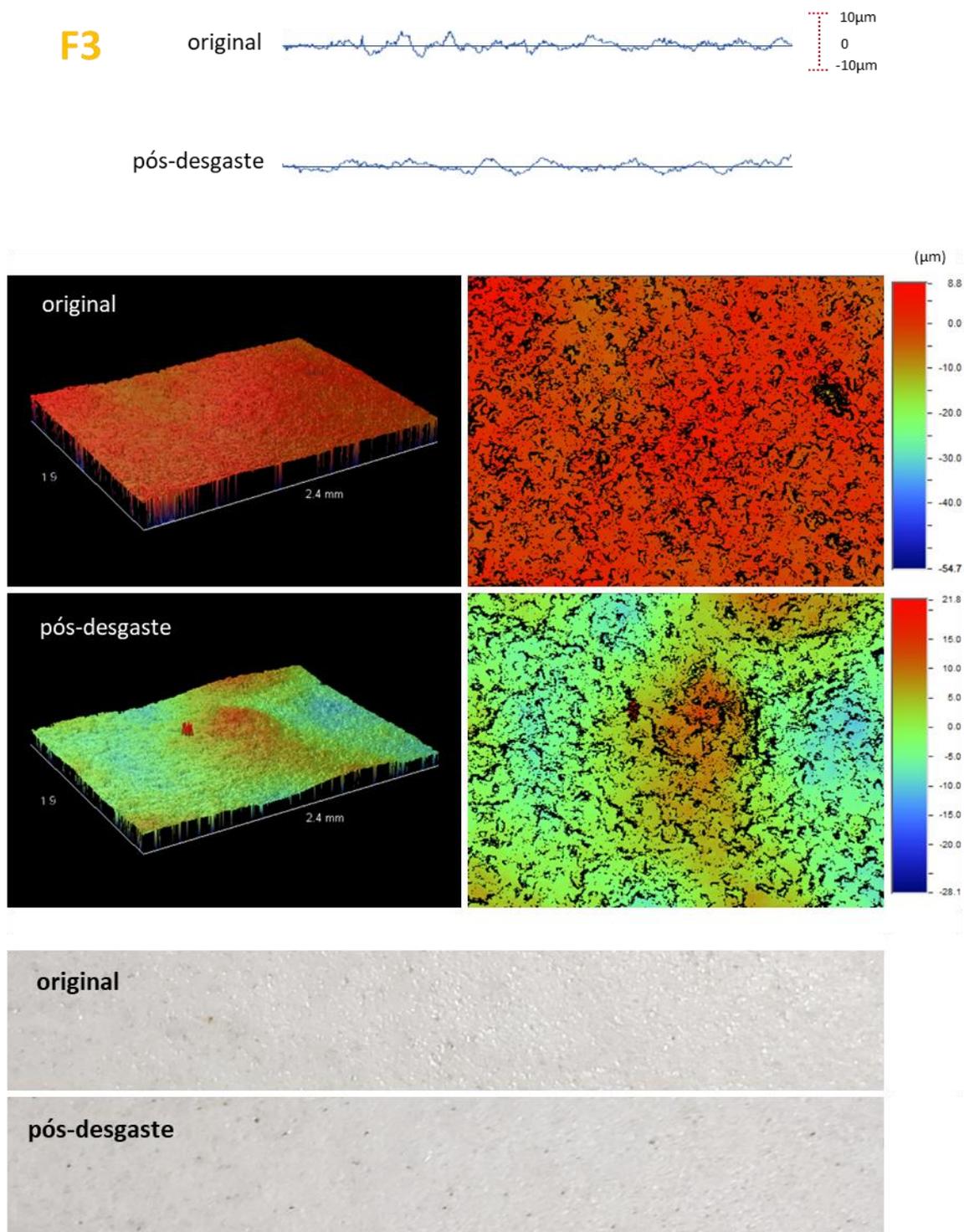


Figura 4.16 Superfície F3 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



A olho nu, não se nota encardimento de F3 após uso no restaurante, o que está de acordo com o desempenho desta superfície nos testes de manchamento, o melhor dentre as amostras avaliadas.

O tipo de esmalte aplicado sobre a superfície F3 para conferir seu aspecto mate, ao contrário dos esmaltes brilhantes (mais moles), são menos susceptíveis ao desgaste. No entanto, a observação do perfil bidimensional de F3 sugere que tenha ocorrido o desgaste de picos mais pontiagudos. Há redução de parâmetros de amplitude ( $R_z$  e  $R_t$ ) e inclinação do perfil ( $\Delta a$ ,  $\Delta q$ ,  $Sdq$ ), enquanto o comprimento de onda ( $\lambda_a$  e  $\lambda_c$ ) aumenta. Esse abrandamento dos picos devido ao desgaste ocasiona o abaixamento do plano médio da topografia observado nas imagens obtidas pelo perfilômetro óptico, o que, por conseguinte, afeta na definição dos picos e vales da superfície e no cálculo de suas alturas.

Assim como para E5, a rugosidade média avaliada pelo perfilômetro óptico,  $S_a$ , aumenta. Assim, para F3, também é provável que este equipamento mais preciso tenha detectado pequenos riscos e furos originados na superfície durante o uso, não contabilizados pelo perfilômetro mecânico. Os parâmetros  $R_{pk}$ ,  $R_k$  e  $R_{vk}$ , obtidos a partir da curva de Abbott-Firestone, também aumentam com o uso quando a curva é traçada com os dados do perfilômetro óptico, enquanto decaem no caso do perfilômetro de contato.

Novamente, como para a amostra brilhante E5, a resistência ao escorregamento da superfície satinada F3, avaliada com o BOT, aumenta, enquanto os resultados obtidos com o DS e Pêndulo decaem. Isso reforça que, enquanto, aparentemente, para o BOT, o efeito do aumento da rugosidade média  $S_a$ , percebida pelo perfilômetro óptico, tenha prevalecido no desenvolvimento do atrito na interface de medida, para o DS e o Pêndulo, a redução de amplitude do perfil de parece ter afetado mais significativamente os resultados. No entanto, apesar do perfil mais irregular de F3, em comparação com E5, sua configuração também não favorece o desenvolvimento de mecanismos de atrito a ponto de a amostra atingir resistência ao escorregamento mínima para recomendação para áreas de risco, nem antes e nem após a exposição ao tráfego de pedestres.

A Figura 4.17 e a Tabela 4.17 apresentam os resultados da caracterização superficial de F7 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

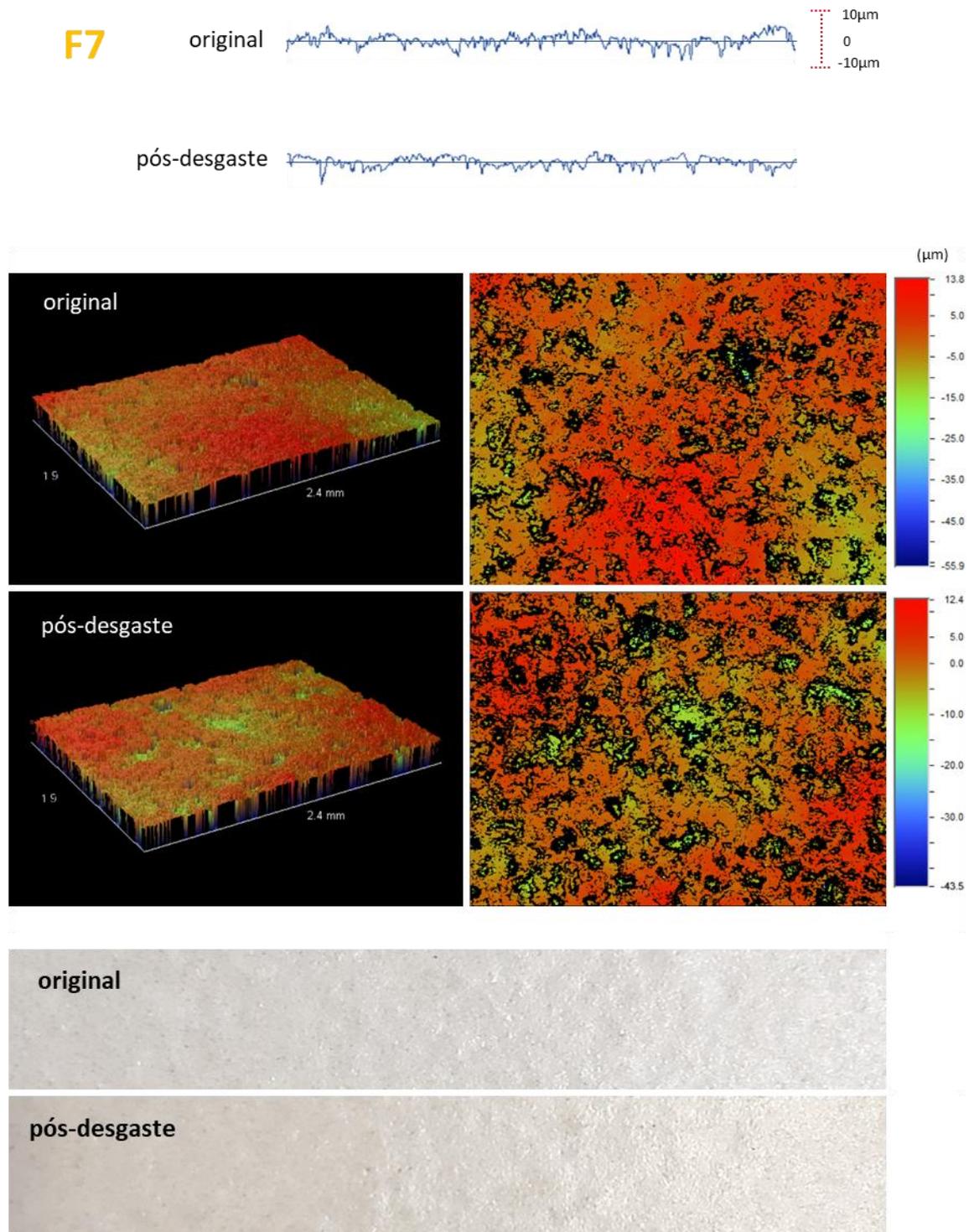


Figura 4.17 Superfície F7 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Para F7, observa-se a queda nos valores dos parâmetros de amplitude, inclinação, complexidade e rugosidade média, tanto quando determinados pelo perfilômetro mecânico, quanto pelo óptico, o que pode ser associado ao desgaste dos topos dos picos mais afiados.

A redução desses parâmetros pode ser atribuída, ainda, à diminuição na profundidade dos vales da superfície devido ao encardimento. O formato do perfil, com vales profundos e estreitos, favorece muito o acúmulo de contaminações nos espaços entre essas regularidades, de difícil acesso pelos mecanismos de limpeza. A análise visual comprova esse encardimento da superfície após o uso no restaurante, o que vai, também, ao encontro do comportamento dessa amostra observado nos testes de manchamento. Nesses ensaios, o piso F7 só não apresentou desempenho inferior à amostra polida, A3, susceptível ao manchamento devido a presença de poros superficiais abertos, e a amostra L13, a mais irregular e áspera do conjunto. Para uma amostra lisa, como F7, esse desempenho é bastante insatisfatório. Geralmente, superfícies desse tipo, apesar de escorregadias, são facilmente limpáveis. No caso de F7, o produto não apresenta boa resistência ao escorregamento e, tampouco, a facilidade de limpeza esperada.

Após os 6 meses de uso no restaurante universitário, a resistência ao escorregamento da superfície é ainda mais reduzida devido ao desgaste e encardimento sofridos. Conclui-se, portanto, que o perfil característico da superfície F7 é indesejável, tanto em termos de segurança, quanto de limpabilidade.

A Figura 4.18 e a Tabela 4.18 apresentam os resultados da caracterização superficial de G1 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

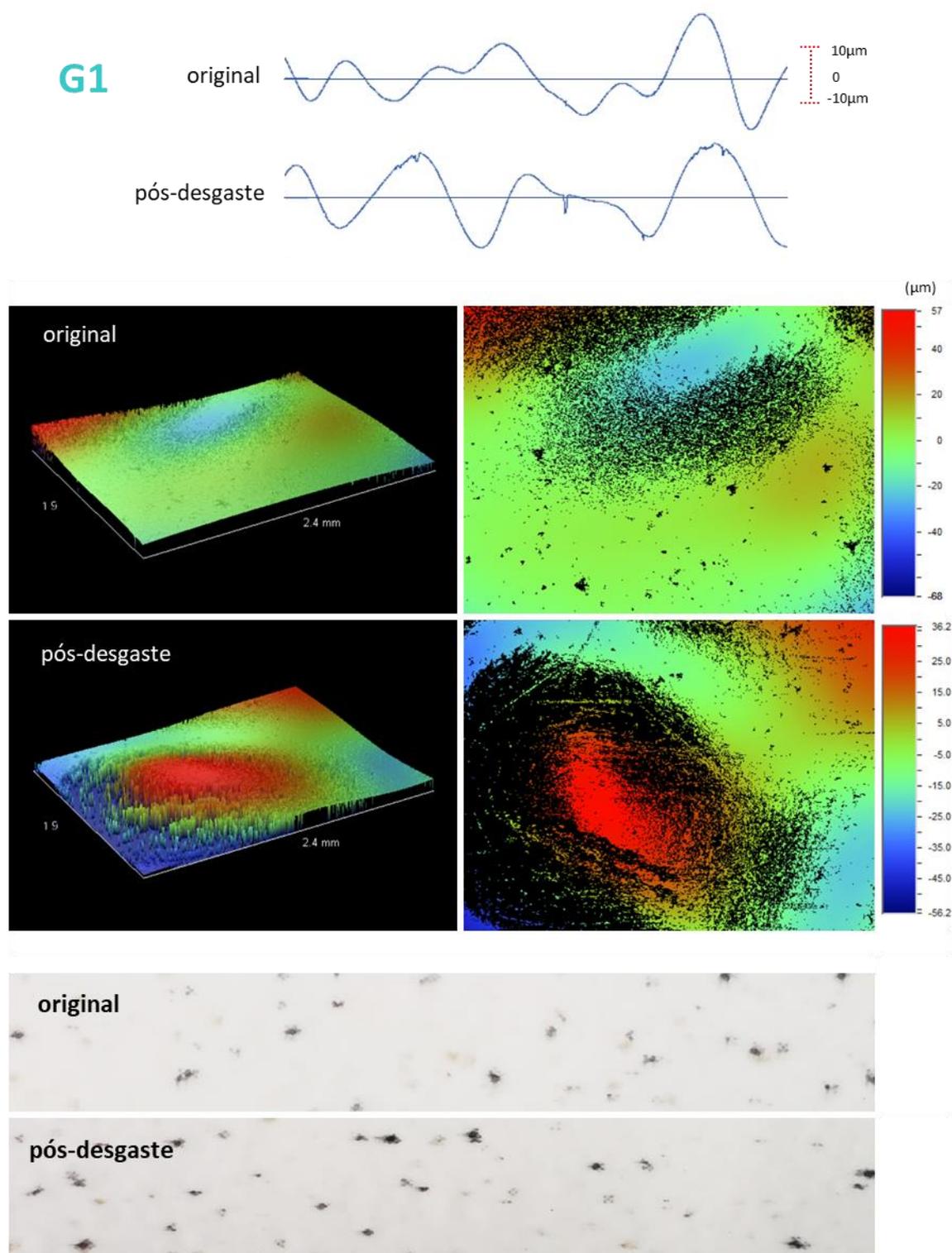


Figura 4.18 Superfície G1 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Os parâmetros de rugosidade calculados a partir do perfil traçado pelo perfilômetro mecânico praticamente não são alterados com o uso da amostra. Como visto anteriormente, os parâmetros fornecidos por esse perfilômetro, em especial os de amplitude, parecem estar bastante associados aos resultados do DS e do Pêndulo. De fato, os resultados de  $\mu_d$ , para esses dois métodos de medida, acompanham os parâmetros de amplitude determinados a partir do perfil bidimensional e se mantêm praticamente inalterados.

A observação do perfil de G1 mostra que a amplitude da sua ondulação não foi reduzida pelo desgaste. No entanto, notam-se reentrâncias abruptas que, muito provavelmente, correspondem a riscos originados pelo tráfego de pedestres, o que parece se confirmar nas imagens superiores da topografia da amostra fornecidas pelo perfilômetro óptico. Como já constatado para outras amostras, essas novas irregularidades são contabilizadas pelo perfilômetro óptico, mais sensível que o mecânico, e promovem um aumento da rugosidade média,  $S_a$ , determinada por esse perfilômetro. O mesmo foi observado para G1 e, mais uma vez, isso influenciou o coeficiente de atrito medido pelo BOT, que também aumentou. Novamente, acredita-se que esse comportamento dos resultados do BOT esteja associado à compreensão de mais irregularidades, simultaneamente, na varredura com esse equipamento, em relação aos outros, devido à maior área de contato entre sua borracha e a superfície varrida.

Em termos de segurança, o piso não é recomendável para uso em ambientes em que há riscos de escorregamento. Por outro lado, o perfil de G1 não aparenta ser favorável ao acúmulo de sujeira e, realmente, não se observou o encardimento dessa superfície. Apesar desse resultado, nos testes de manchamento, a G1 não havia apresentado bom desempenho. Isso evidencia, portanto, o fato de que, nem sempre, o encardimento das superfícies e sua limpabilidade podem ser bem previstos pelos ensaios realizados com os agentes manchantes e limpantes conforme recomendações das normas que regulamentam esses testes em laboratório.

A Figura 4.19 e a Tabela 4.19 apresentam os resultados da caracterização superficial de G4 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

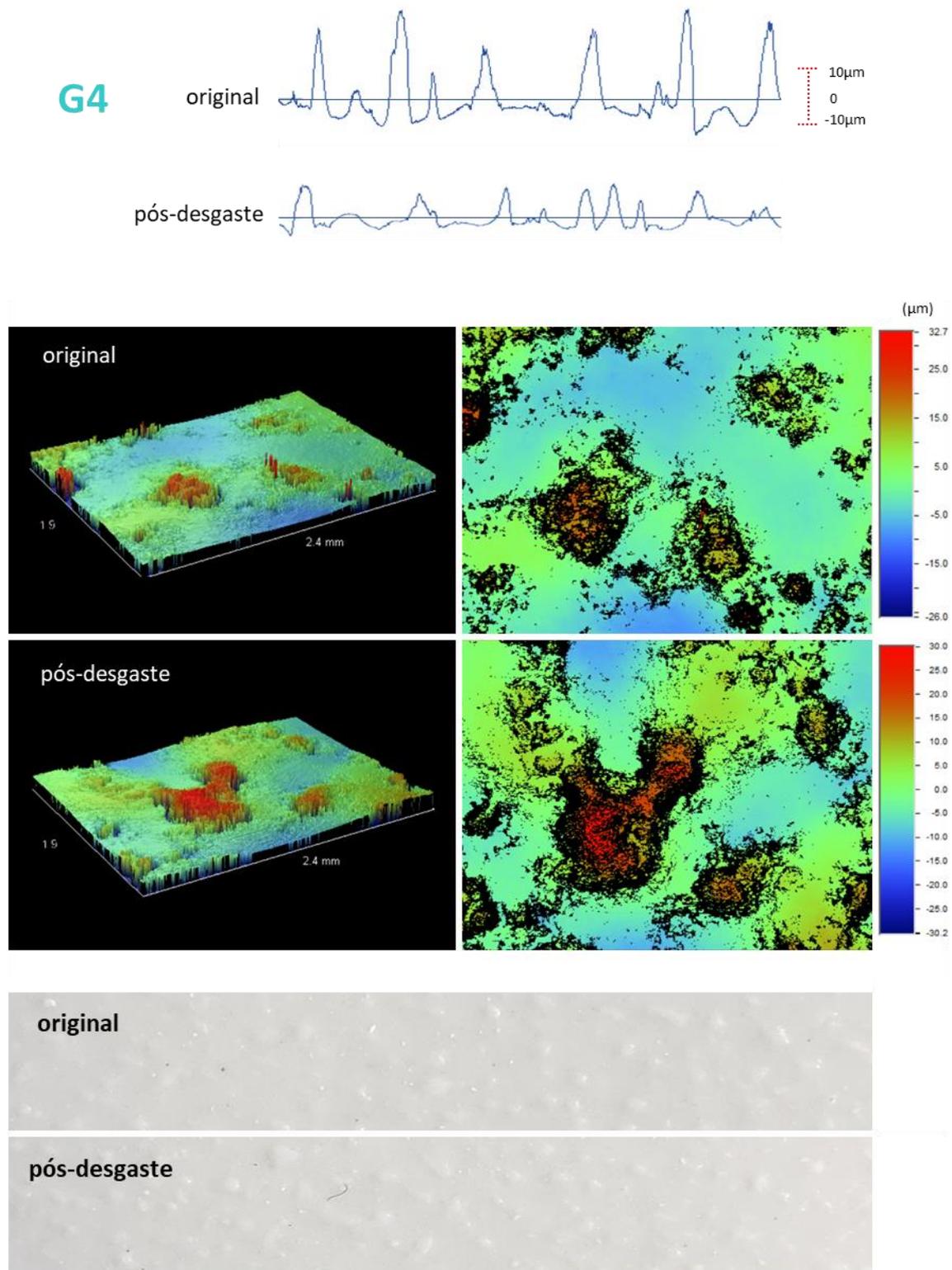


Figura 4.19 Superfície G4 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.

Tabela 4.19 Parâmetros de rugosidade (calculados a partir dos resultados da perfilometria mecânica e óptica) e resistência ao escorregamento da superfície G4, antes e após 6 meses de uso intensivo.

	Perfilometria mecânica		Perfilometria óptica		
	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	
<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,0	5,1	<i>Sa</i> ( $\mu\text{m}$ )	3,1	4,7
<i>Rq</i> ( $\mu\text{m}$ )	10,3	6,4	<i>Sq</i> ( $\mu\text{m}$ )	4,3	6,1
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	26,2	15,3	<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	51,0	53,3
<i>Rc</i> ( $\mu\text{m}$ )	24,7	13,9	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	58,7	60,2
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	63,4	40,1	<i>Sp</i> ( $\mu\text{m}$ )	32,7	30,0
<i>Ry</i> ( $\mu\text{m}$ )	43,6	26,5	<i>Sv</i> ( $\mu\text{m}$ )	-26,0	-30,2
<i>Rp</i> ( $\mu\text{m}$ )	43,4	23,8	<i>Sdq</i> ( $^\circ$ )	10,8	14,2
<i>Rpm</i> ( $\mu\text{m}$ )	29,2	16,3	<i>Ssk</i>	1,5	1,2
<i>Rv</i> ( $\mu\text{m}$ )	23,0	16,5	<i>Sku</i>	7,8	5,7
<i>Rvm</i> ( $\mu\text{m}$ )	14,3	10,1	<i>Sdr</i>	1,2	2,2
<i>R3z</i> ( $\mu\text{m}$ )	11,7	8,0	<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,4	14,7
<i>R3y</i> ( $\mu\text{m}$ )	20,1	12,1	<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	6,6	11,9
<i>Sm</i> ( $\mu\text{m}$ )	773	682	<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	2,8	3,5
<i>S</i> ( $\mu\text{m}$ )	491	470	<i>mr1</i> (%)	16,6	9,4
<i>Pc</i> ( $\text{cm}^{-1}$ )	16	21	<i>mr2</i> (%)	91,5	95,4
$\Delta\alpha$ ( $^\circ$ )	4,2	2,9	<i>V1</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,5	0,6
$\Delta q$ ( $^\circ$ )	6,7	4,4	<i>V2</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	0,1
$\lambda\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	665	582	<i>Asurf</i> ( $\text{mm}^2$ )	4,0	3,9
$\lambda q$ ( $\mu\text{m}$ )	531	513	<i>Alat</i> ( $\text{mm}^2$ )	3,4	3,1
<i>Ku</i>	4	28,7	<i>Index area</i>	1,15	1,24
<i>Sk</i>	1,1	1,1	<i>V</i> ( $\cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ )	59,6	69,3
<i>Lo</i> ( $\text{mm}$ )	2,52	2,5			
<i>lr</i>	1,01	1,00			
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	18,2	12,0			
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	23,5	11,6			
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	8,0	6,2			
<i>mr1</i> (%)	18,5	18,0			
<i>mr2</i> (%)	89,0	85,5			
<i>A1</i>	184,3	108,3			
<i>A2</i>	34	29,5			

	Coeficiente de atrito (a úmido)	
	ANTES	DEPOIS
<i>DS</i>	0,42	0,36
<i>BOT 3000E</i>	0,45	0,44
<i>Pêndulo</i>	0,32	0,30

Os perfis de G4 sugerem que o tráfego de pedestres tenha removido as porções elevadas dos picos produzidos pelas gotas de esmalte aplicadas sobre a amostra, o que justifica a maior suavidade ao toque observada para essa superfície após o uso. Isso se traduz na redução de parâmetros de amplitude e inclinação obtidos com o perfilômetro mecânico e, como consequência, na queda do  $\mu_d$  avaliado pelo DS e Pêndulo. Essa redução é mais sutil para o Pêndulo, mas, para o DS, é significativa a ponto de o piso passar a ser considerado inadequado para uso em áreas de risco de escorregamento.

Nas imagens pós desgaste obtidas com o perfilômetro óptico, notam-se pontos escuros não detectados pelo perfilômetro mecânico. Estes pontos seriam correspondentes a irregularidades originadas sobre a camada de esmalte aplicada sobre a amostra, que consiste em um esmalte brilhante, mais susceptível a indentações e furos. Como resultado, a rugosidade média, a amplitude e a inclinação do perfil, aumentam.

No entanto, nesse caso, os resultados do BOT, que têm se mostrado relacionados a rugosidade média obtida com o perfilômetro óptico,  $S_a$ , não foram mais elevados para a superfície após o uso. Isso pode ser devido ao menor contato efetivo entre a borracha do equipamento, durante a varredura, e as regiões baixas da superfície onde os furos teriam se originado e promovido aumento da rugosidade local. O contato mais íntimo da borracha se dá com as elevações da superfície, que tiveram sua amplitude e inclinação suavizadas pelo desgaste, o que explica a redução do  $\mu_d$  observada.

Há outro aspecto discutível sobre a medida da rugosidade de superfícies compostas por porções distintas: a influência da posição da amostra sobre a fração efetivamente varrida de cada porção. A ponta do perfilômetro mecânico, se posicionada entre as elevações da superfície, varre apenas sua região mais baixa. Para o perfilômetro óptico, que varre uma área muito pequena, isso pode ser ainda mais crítico. Muitas vezes os diferentes elementos das superfícies têm dimensões difíceis de serem englobadas na varredura de forma representativa.

A Figura 4.20 e a Tabela 4.20 apresentam os resultados da caracterização superficial de H4 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

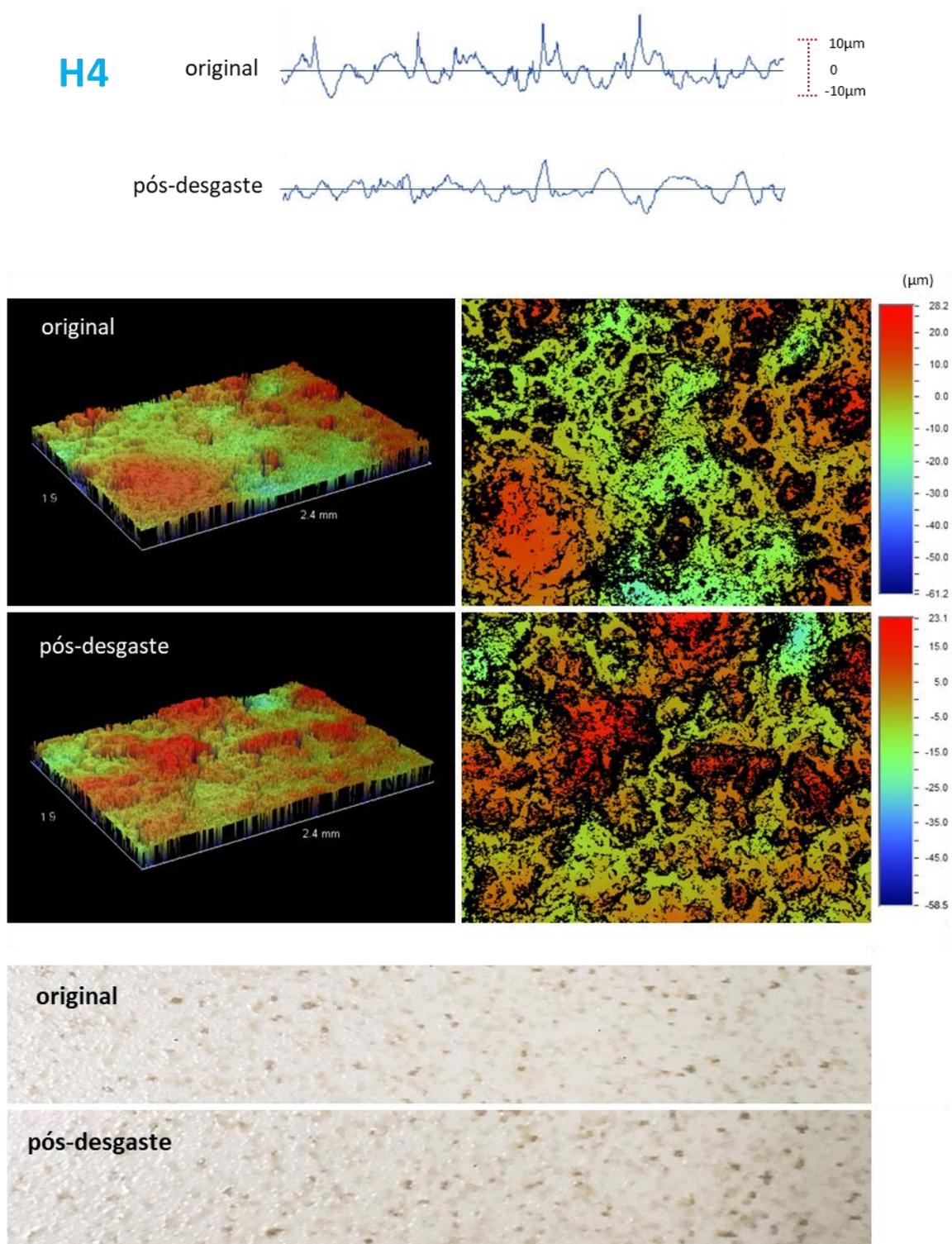


Figura 4.20 Superfície H4 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Para a superfície H4, em que foi realizada uma aplicação de granilha seca, de maneira geral, ocorre a diminuição dos parâmetros de amplitude calculados a partir dos dados coletados pelos dois perfilômetros. É notável que o desgaste removeu as partes mais pontiagudas dos picos do perfil e, como consequência, os parâmetros de amplitude específicos de picos e os de amplitude total – que contabilizam a altura dos picos no cálculo – são reduzidos.

Nota-se, como consequência, um deslocamento da linha média para baixo, em relação a sua posição original. Esse abaixamento da linha média, por sua vez, resulta na redução dos valores dos parâmetros de amplitude associados à profundidade de vales, mesmo que estes não sejam, de fato, reduzidos devido ao preenchimento por contaminações. Esse é, provavelmente, o caso dessa superfície, que não demonstrou sinais de encardimento, como já havia sido previsto pelos ensaios de manchamento. Apesar do aspecto áspero, geralmente associada ao acúmulo de sujeira, essa amostra, dentre todas avaliadas, havia apresentado o melhor desempenho nos testes de limpabilidade.

Em relação a esse aspecto mais áspero da superfície, notou-se sua suavização após o uso da amostra pelo período do experimento, devido à remoção das porções pontiagudas dos picos do perfil. Isso, para superfícies como H4, pode trazer prejuízos significativos para o desenvolvimento de mecanismos de atrito. Como consequência, uma queda significativa na resistência ao escorregamento, avaliada com os três métodos considerados no estudo, foi observada. No caso do BOT, a superfície mostra-se segura antes da instalação e, mesmo após o uso, o  $\mu_d$  atinge o valor limite mínimo necessário para utilização em áreas críticas. No caso da avaliação com o DS e o Pêndulo, a superfície experimenta uma queda expressiva na sua resistência ao escorregamento, a ponto de deixar de ser considerada segura após o uso.

A Figura 4.21 e a Tabela 4.21 apresentam os resultados da caracterização superficial de I2 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

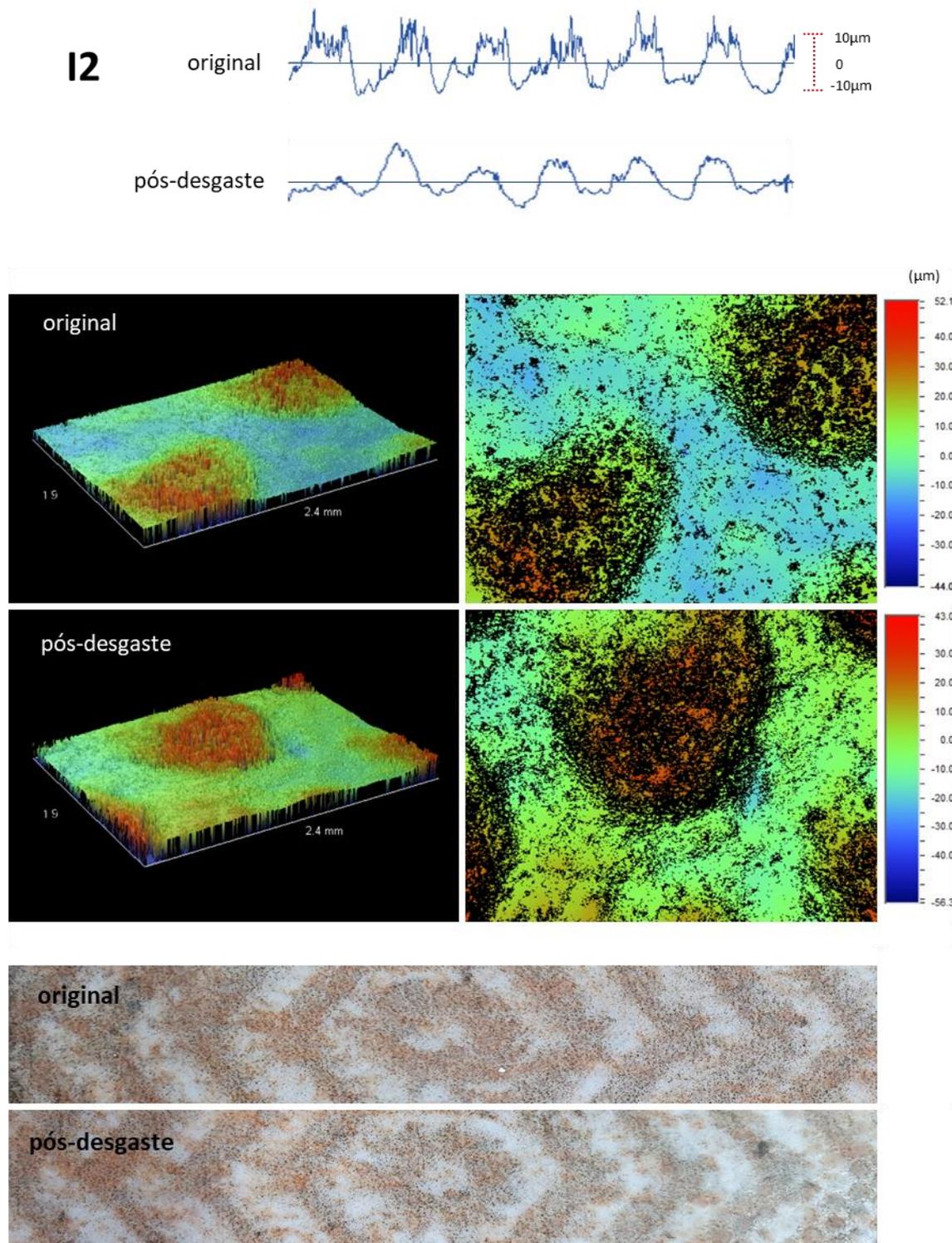


Figura 4.21 Superfície I2 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



A superfície I2 é bastante alterada devido à exposição aos pedestres, como se conclui pela observação de seus perfis bidimensionais. Os picos numerosos e agudos, concentrados nos pontos mais elevados e ásperos da peça, são bastante desbastados com o uso. Por conseguinte, nota-se o decréscimo na rugosidade média, índice de rugosidade, inclinação e amplitude, em especial, dos picos do perfil.

Para a superfície nova, esses grupos de picos nos pontos elevados da textura ABS promovem efeitos de ancoramento e contribuem com mecanismos de atrito pelo efeito *plowing*, penetrando a superfície da sola dos calçados do pedestre. Além disso, nas regiões baixas, mais suaves, entre os pontos elevados da textura, é possível a acomodação de líquidos para que se evite a formação de filmes lubrificantes. Como, após o uso, a altura desses pontos é reduzida e os picos sobre os mesmos são desgastados, todos os mecanismos de atrito são significativamente prejudicados. Assim, para os três métodos de medida, nota-se uma queda na resistência ao escorregamento de I2.

Para o DS e o Pêndulo, essa propriedade é reduzida para níveis abaixo da metade do valor inicial. Apesar disso, devido à configuração da superfície I2, com vários atributos que promovem mecanismos de atrito de forma combinada, mesmo após o uso, o  $\mu_d$  avaliado pelos deslizadores motorizados, se mantém acima do valor mínimo para utilização em áreas críticas.

A suavização da textura da superfície foi perceptível a olho nu e ao tato, mas não se observou encardimento. Para a amostra não instalada, nota-se que o perfil de rugosidade local, nos topos das elevações, poderia ser favorável ao acúmulo de sujeira. No entanto, esses picos de rugosidade afiados, com vales estreitos entre eles, foram removidos durante o uso, o que pode ter, apesar dos prejuízos de desempenho associados, evitado o encardimento.

A Figura 4.22 e a Tabela 4.22 apresentam os resultados da caracterização superficial de J6 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

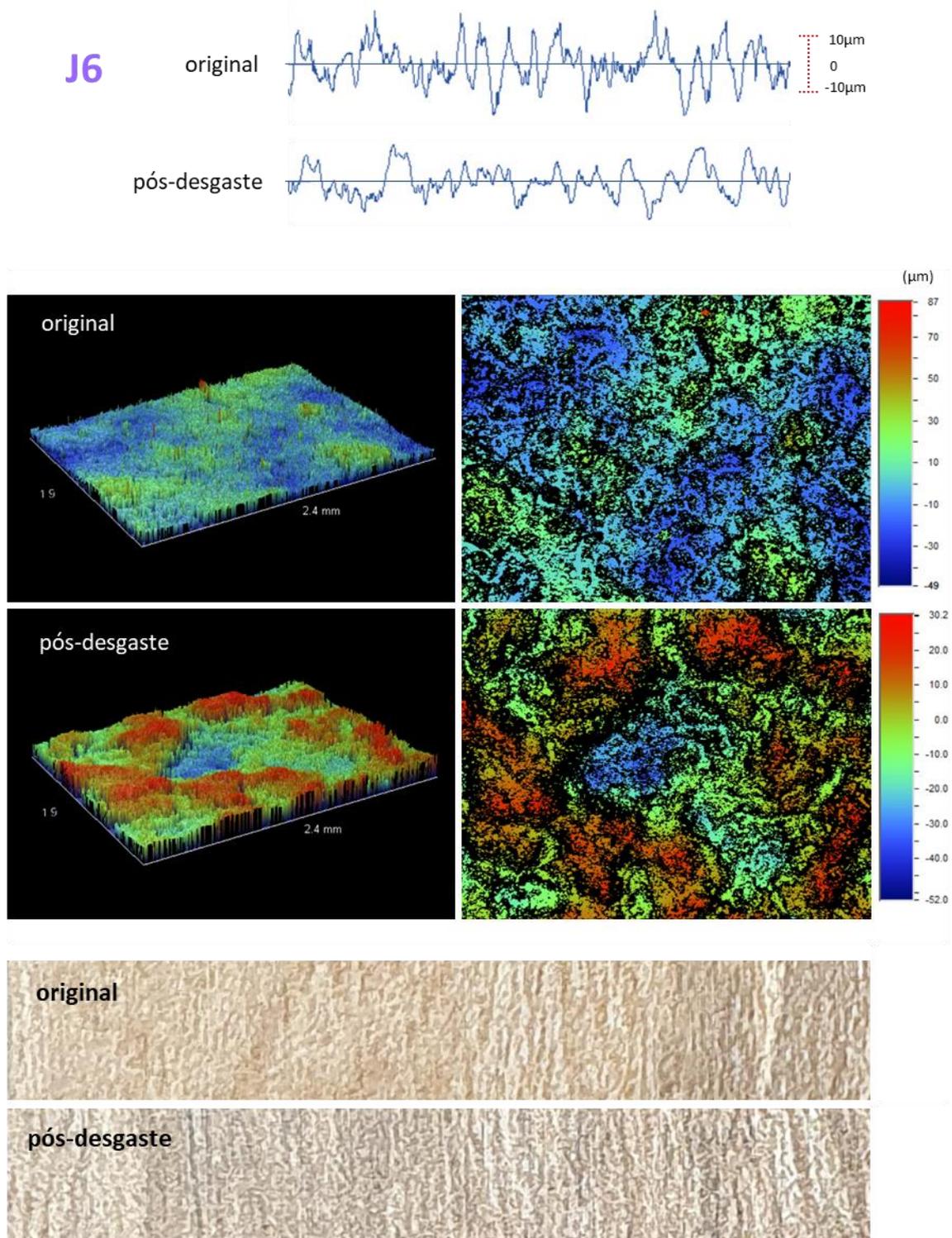


Figura 4.22 Superfície J6 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Observando-se o perfil de J6 antes da instalação, notam-se alguns picos isolados e pontiagudos que foram desgastados com o uso. Como resultado, a superfície se tornou menos áspera ao toque e houve uma queda em todos os parâmetros de amplitude – mais significativa para os específicos de picos ( $R_p$ ,  $R_{pm}$ ,  $S_p$ ) que os de vales – e na inclinação do perfil ( $\Delta a$ ,  $\Delta q$  e  $S_{dq}$ ), enquanto o comprimento de onda foi incrementado.

Apesar dessas mudanças, a superfície não apresentou encardimento expressivo, o que é condizente com seu ótimo desempenho nos testes de manchamento. No entanto, deve-se mencionar que a coloração marrom e a estampa da superfície podem ter contribuído para mascarar um possível encardimento sofrido.

Como resultado das alterações da superfície J6, sua resistência ao escorregamento é reduzida. Os resultados obtidos com o DS e o Pêndulo decaem consideravelmente, para níveis abaixo do requisito mínimo de segurança para uso do piso, embora antes do uso apresentassem bom desempenho. O comportamento dos resultados, para esses equipamentos, mais uma vez, se mostra bastante associado à amplitude do perfil traçado pelo perfilômetro mecânico, que, como mencionado, sofreu um decréscimo.

Para o BOT, a queda no coeficiente de atrito é mais suave. Com o uso, a superfície apresentou um aumento em sua rugosidade média avaliada com o perfilômetro óptico,  $S_a$ , parâmetro que tem se mostrado relevante na determinação dos resultados de  $\mu_d$  por esse deslizador motorizado. Assim, apesar da redução no coeficiente devido ao desgaste dos picos, para esse equipamento, em relação ao DS e o Pêndulo, a queda é menos expressiva.

A Figura 4.23 e a Tabela 4.23 apresentam os resultados da caracterização superficial de L13 antes e após 6 meses de uso no Restaurante Universitário.

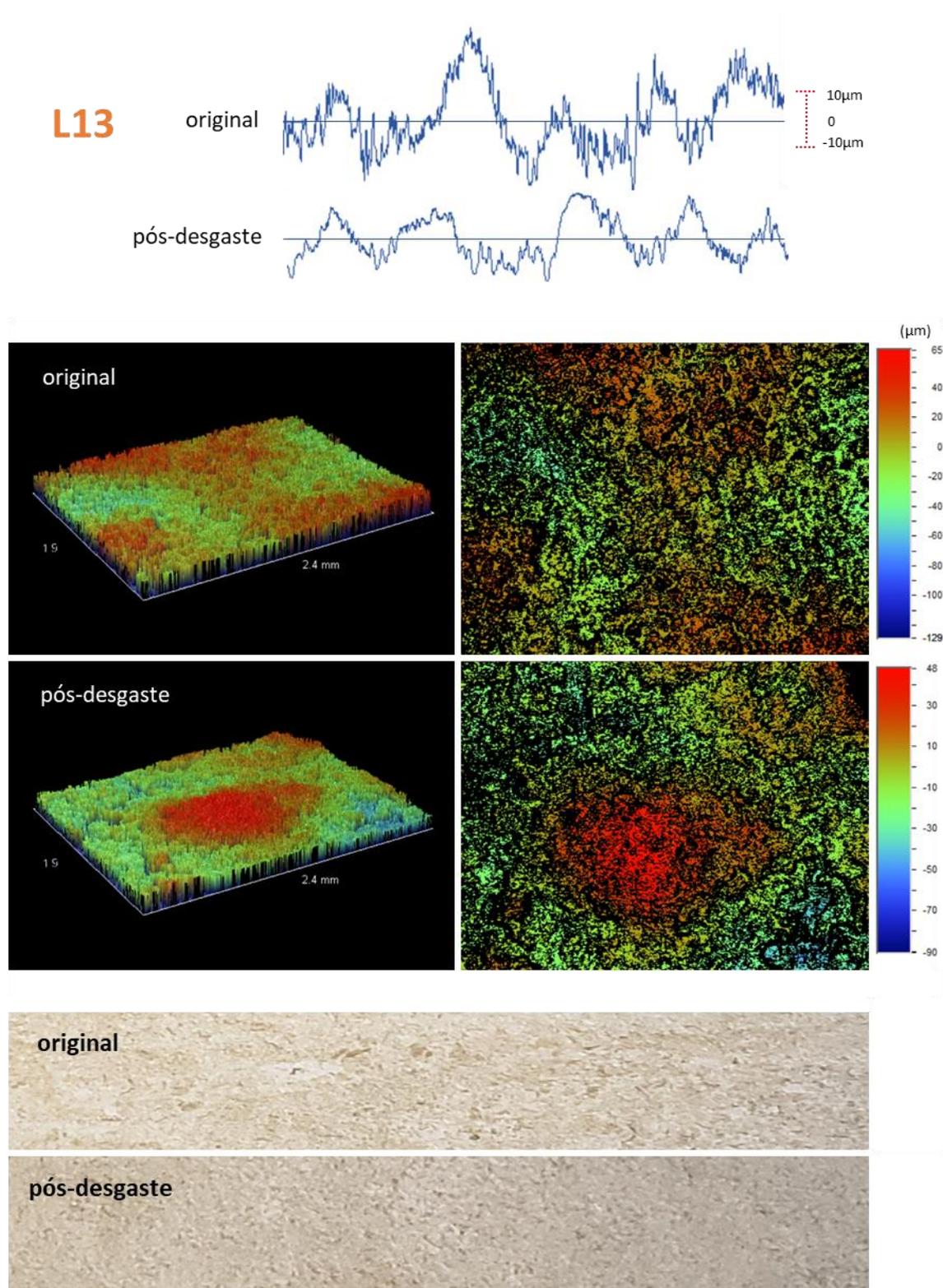


Figura 4.23 Superfície L13 antes e após 6 meses de uso intensivo: perfil bidimensional, visão lateral (esquerda) e superior (direita) da topografia e fotografia superior em escala macroscópica.



Após a exposição aos pedestres, para L13, também se observa o desgaste dos picos mais afiados do perfil, com conseqüente redução em parâmetros de amplitude e de inclinação. Além disso, percebe-se o encardimento dessa superfície, esperado devido a seu desempenho ruim nos testes de resistência ao manchamento. Sendo assim, o acúmulo de sujeira entre as irregularidades atua como um fator adicional ao desgaste no que se refere à suavização das irregularidades superficiais, percebida, inclusive, através do tato. Provavelmente devido ao efeito, tanto do desgaste, como do acúmulo de sujeira, a redução na resistência ao escorregamento observada é mais expressiva do que ocorreu para J6, por exemplo.

Como é possível observar nos perfis bidimensionais da amostra, as irregularidades mais alteradas pelo uso são as microscópicas – ou seja, a rugosidade sobreposta às ondulações percebidas a olho nu. A ondulação, menos afetada, continua atuando como mecanismo de ancoramento e facilitando a acomodação de líquido para que sejam evitados filmes lubrificantes na interface. Dessa forma, apesar das quedas consideráveis na resistência ao escorregamento de L13 para os três métodos de medida, os valores finais do  $\mu_d$  permanecem em níveis de segurança satisfatórios.

Vale mencionar que, mais uma vez, a rugosidade média avaliada com o perfilômetro óptico,  $S_a$ , não segue a mesma tendência de queda desse parâmetro calculado pelo perfilômetro mecânico e, quando a superfície é avaliada com o BOT, a queda do  $\mu_d$  devido ao uso é menos intensa em comparação com o DS e Pêndulo.

As discussões a respeito da variação, com o uso, do desempenho das doze amostras, permitem a compreensão, para cada uma das tipologias estudadas, das relações entre suas características superficiais, a forma como se alteram com o tempo e o efeito disso sobre propriedades técnicas e estéticas do produto. No entanto, é importante analisar as tendências gerais de variação, com o uso, de características relevantes para a resistência ao escorregamento confrontando-se o comportamento dos doze pisos em relação a cada variável. As discussões a seguir enfocam nessa comparação, não da variação de diferentes aspectos superficiais para uma mesma amostra, mas na forma com

que um mesmo aspecto relacionado ao desempenho dos produtos é alterado, para as diferentes tipologias estudadas, devido às suas peculiaridades.

#### **4.3.3 Manutenção das características relevantes para o desempenho das superfícies durante sua utilização**

A Tabela 4.24 apresenta os resultados dos parâmetros determinados pelo perfilômetro mecânico, após a exposição das amostras ao tráfego de pedestres. Da mesma forma, a Tabela 4.25, apresenta os resultados obtidos pelo perfilômetro óptico.

Tabela 4.24 Parâmetros de rugosidade obtidos pelo perfilômetro mecânico para as amostras avaliadas após 6 meses assentadas em área de tráfego intenso no Restaurante Universitário da UFSCar.

	<b>A3</b>	<b>C2</b>	<b>E2</b>	<b>E5</b>	<b>F3</b>	<b>F7</b>	<b>G1</b>	<b>G4</b>	<b>H4</b>	<b>I2</b>	<b>J6</b>	<b>L13</b>
	Polida	Natural	Brilhante (polida)	Brilhante	Satinada	Satinada	Gotejada brilhante	Gotejada brilhante	Mate granilha	Textura ABS	Textura madeira	Textura pedra
<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	3,8	0,3	1,1	2,2	2,2	10,2	5,1	4,4	7,1	6,7	8,9
<i>Rq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,8	4,6	0,6	1,3	2,7	2,8	11,8	6,4	5,4	8,5	8,1	10,7
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	3,8	10,3	3,0	2,7	5,9	8,7	37,8	15,3	12,4	18,1	18,8	24,7
<i>Rc</i> ( $\mu\text{m}$ )	1,3	7,2	0,9	1,9	3,9	4,7	33,7	13,9	10,8	15,1	14,9	17,2
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	10,7	25,5	11,0	7,9	16,9	19,7	71,4	40,1	32,4	44,7	45,7	65,6
<i>Ry</i> ( $\mu\text{m}$ )	6,1	19,7	5,5	5,2	11,6	14,2	43,5	26,5	22,6	33,1	34,6	45,8
<i>Rp</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,8	12,0	1,6	3,6	8,3	7,1	35,9	23,8	15,2	23,3	22,1	31,6
<i>Rpm</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	9,5	0,6	2,4	5,8	5,4	21,8	16,3	11,1	17,4	16,8	22,1
<i>Rv</i> ( $\mu\text{m}$ )	10,0	13,4	9,4	4,3	8,6	12,6	35,5	16,5	17,2	21,4	23,6	34,0
<i>Rvm</i> ( $\mu\text{m}$ )	5,7	10,2	4,9	2,8	5,8	8,8	21,6	10,1	11,5	15,7	18,3	23,7
<i>R3z</i> ( $\mu\text{m}$ )	3,3	7,7	2,5	1,1	3,7	8,2	3,5	8,0	7,8	6,0	15,9	15,6
<i>R3y</i> ( $\mu\text{m}$ )	4,4	10,7	3,9	1,7	5,3	10,1	3,9	12,1	10,6	9,2	21,2	19,7
<i>Sm</i> ( $\mu\text{m}$ )	86	371	81	533	375	225	1596	682	582	692	428	366
<i>S</i> ( $\mu\text{m}$ )	124	220	182	320	220	163	478	470	345	346	268	198
<i>Pc</i> ( $\text{cm}^{-1}$ )	123	36	179	77	39	52	11	21	27	38	53	42
$\Delta\alpha$ ( $^\circ$ )	2,2	4,4	1,6	1,0	2,3	3,9	2,4	2,9	3,2	4,8	5,9	9,2
$\Delta q$ ( $^\circ$ )	5,0	6,1	3,7	1,5	3,2	5,4	3,2	4,4	4,4	6,8	7,8	12,1
$\lambda\alpha$ ( $\mu\text{m}$ )	62	297	51	417	343	205	1520	582	504	546	408	356
$\lambda q$ ( $\mu\text{m}$ )	55	269	50	349	308	185	1345	513	443	461	390	329
<i>Ku</i>	25,4	2,5	48,5	2,5	2,5	3,7	2,2	28,7	2,6	2,3	2,5	2,6
<i>Sk</i>	-4,4	0,0	-5,6	0,0	0,1	-0,6	0,0	1,1	0,0	0,1	-0,1	0,0
<i>Lo</i> (mm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6
<i>lr</i>	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,4	12,4	0,4	3,3	7,0	6,8	31,4	12,0	13,7	23,2	22,2	28,7
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,2	4,0	0,6	1,3	2,9	2,0	13,8	11,6	5,0	7,9	6,8	9,9
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	2,4	4,3	1,9	1,4	2,8	3,8	12,2	6,2	6,1	6,6	7,8	12,2
<i>mr1</i> (%)	12,2	8,4	10,3	10,1	10,7	7,5	8,7	18,0	9,2	11,9	8,3	8,7
<i>mr2</i> (%)	83,5	89,1	86,3	90,2	90,9	86,5	87,8	85,5	88,3	92,6	90,0	90,5
<i>A1</i>	1,6	17,7	4,6	6,7	16,4	7,4	64,3	108,3	24,6	49,7	28,6	49,2
<i>A2</i>	19,1	24,1	12,4	7,0	13,1	26,4	77,5	29,5	35,5	22,2	41,1	62,2

Tabela 4.25 Parâmetros de rugosidade tridimensionais fornecidos pelo perfilômetro óptico para as amostras avaliadas após 6 meses assentadas em área de tráfego intenso no Restaurante Universitário da UFSCar.

	<b>A3</b>	<b>C2</b>	<b>E2</b>	<b>E5</b>	<b>F3</b>	<b>F7</b>	<b>G1</b>	<b>G4</b>	<b>H4</b>	<b>I2</b>	<b>J6</b>	<b>L13</b>
	Polida	Natural	Brilhante (polida)	Brilhante	Satinada	Satinada	Gotejada brilhante	Gotejada brilhante	Mate granilha	Textura ABS	Textura madeira	Textura pedra
<i>Sa</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	5,4	0,1	1,9	3,3	2,3	13,5	4,7	6,5	7,1	9,9	14,4
<i>Sq</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,3	6,7	0,3	2,3	4,3	3,0	16,8	6,1	7,9	8,9	12,0	18,3
<i>Rz</i> ( $\mu\text{m}$ )	7,8	46,1	11,6	13,0	39,3	46,8	83,6	53,3	63,7	68,5	73,1	117,6
<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	13,3	52,4	32,6	16,5	47,6	56,8	92,4	60,2	83,8	99,3	82,2	138,5
<i>Sp</i> ( $\mu\text{m}$ )	2,8	19,1	1,8	7,0	11,8	15,4	36,2	30,0	27,2	43,0	30,2	48,1
<i>Sv</i> ( $\mu\text{m}$ )	-10,5	-33,3	-30,8	-9,5	-35,8	-41,4	-56,2	-30,2	-56,5	-56,3	-52,0	-90,4
<i>Sdq</i> ( $^{\circ}$ )	2,1	9,9	3,0	2,4	8,5	12,3	7,0	14,2	22,2	25,6	41,9	55,9
<i>Ssk</i>	-10,1	-0,3	-13,3	0,7	-0,4	-0,2	0,2	1,2	0,1	0,8	-0,4	0,5
<i>Sku</i>	152,2	2,7	992,6	2,0	3,9	5,5	2,6	5,7	2,5	3,3	2,7	2,9
<i>Sdr</i>	0,1	16,4	0,1	0,1	0,8	1,8	0,6	2,2	5,4	7,4	24,0	61,0
<i>Rk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	5,3	0,3	5,2	9,9	6,9	43,8	14,7	22,3	19,9	34,5	41,0
<i>Rpk</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,5	7,1	0,2	3,5	4,0	3,6	16,5	11,9	7,6	14,0	4,5	26,0
<i>Rvk</i> ( $\mu\text{m}$ )	9,7	7,9	0,6	1,7	6,3	3,8	15,5	3,5	4,6	4,3	13,1	14,8
<i>mr1</i> (%)	82,6	84,9	10,0	18,2	11,1	12,0	13,8	9,4	6,6	16,6	4,8	16,8
<i>mr2</i> (%)	0,0	0,2	84,8	95,6	88,6	89,6	95,1	95,4	91,6	94,0	90,9	92,6
<i>V1</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,0	0,5	0,0	0,3	0,2	0,2	1,1	0,6	0,3	1,2	0,1	2,2
<i>V2</i> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	1,0	0,0	0,0	0,4	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1	0,6	0,5
<i>A<sub>surf</sub></i> ( $\text{mm}^2$ )	4,2	3,0	4,3	4,5	3,9	3,6	2,7	3,9	3,5	4,8	5,2	7,1
<i>A<sub>lat</sub></i> ( $\text{mm}^2$ )	4,2	2,5	4,2	4,5	3,4	2,8	2,4	3,1	2,1	2,5	1,7	1,4
<i>Index area</i>	1,0	1,2	1,0	1,0	1,1	1,3	1,1	1,2	1,6	1,9	3,2	5,0
<i>V</i> ( $\cdot 10^6 \mu\text{m}^3$ )	0,2	31,2	0,3	24,6	26,0	16,4	79,9	69,3	33,1	55,3	32,0	57,2

Gráficos foram traçados para facilitar a interpretação dos resultados dos novos parâmetros de rugosidade. Para observação da forma com que esses parâmetros foram alterados com o uso para as diferentes superfícies, seus valores anteriores e posteriores à exposição aos pedestres foram confrontados para as doze amostras. São apresentados apenas alguns parâmetros que representam bem os mais diversos aspectos superficiais dos pisos, em especial aqueles para os quais se identificaram boas correlações com a resistência ao escorregamento (diretamente, para o subgrupo de amostras simétricas, e/ou em

combinação com outros parâmetros, nas expressões validadas para o conjunto todo). Em casos em que dois ou mais parâmetros quantificam um mesmo aspecto das superfícies e apresentam tendências de variação similares, o gráfico de apenas um deles foi apresentado.

Inicialmente, são apresentadas as tendências de variação de parâmetros que quantificam a rugosidade de forma mais genérica, não atrelados, de forma específica, ao formato, amplitude, espaçamento, simetria ou quantidade de irregularidades. A Figura 4.24 ilustra a variação da rugosidade média aritmética determinada pelo perfilômetro mecânico, Ra, e óptico, Sa, para as superfícies estudadas após sua exposição aos pedestres no Restaurante Universitário.

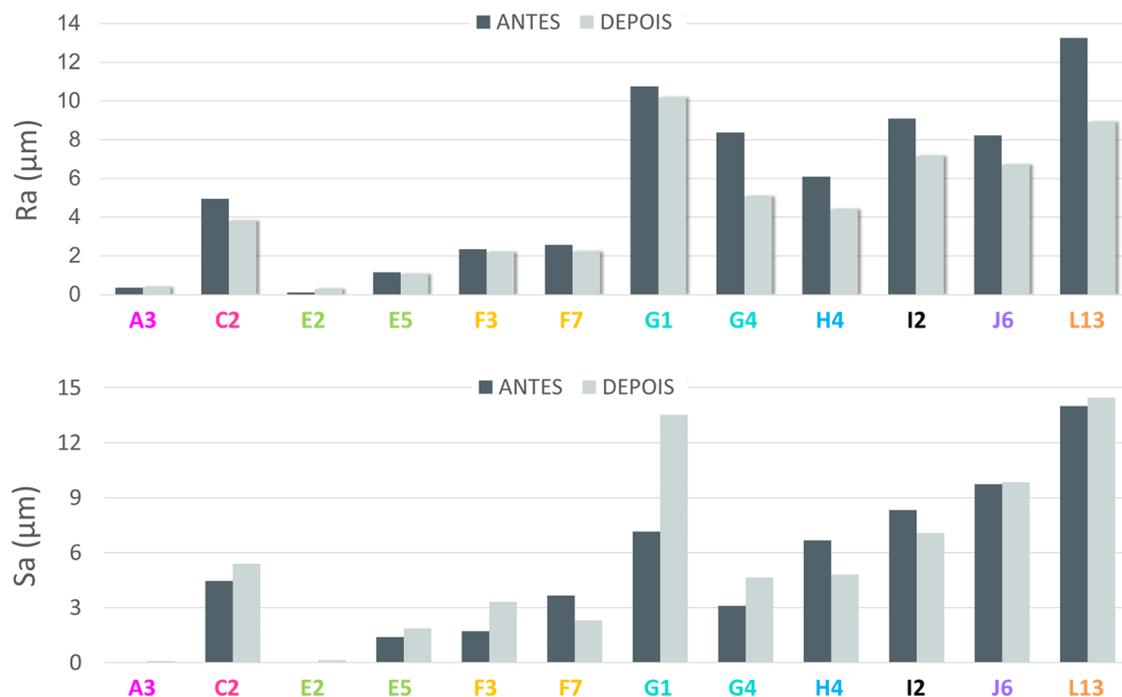


Figura 4.24 Rugosidade média obtida pelo perfilômetro mecânico, Ra, e óptico, Sa, para as amostras avaliadas antes e a após 6 meses de uso.

A rugosidade média, Ra, determinada com o perfilômetro mecânico, é reduzida para todas as superfícies, com exceção das polidas, A3 e E2. No caso dessas amostras, com acabamento superficial muito refinado, o valor inicial medido para Ra é extremamente baixo, em comparação com os valores encontrados para as outras tipologias avaliadas. Assim, na contramão do que

ocorre para as amostras com rugosidade média inicial elevada, para esses pisos, o surgimento de riscos e outras irregularidades em sua superfície promove um aumento de Ra.

Entretanto, a rugosidade média, Sa, calculada a partir das medições realizadas com o perfilômetro óptico, aumenta com o uso não apenas para as amostras polidas. Na realidade, o parâmetro só é reduzido para três superfícies - F7, uma das esmaltadas satinadas, H4, mate com granilha, e I2, com textura ABS - além de se manter praticamente inalterado para a superfície J6, com textura de madeira. Algo em comum entre tais superfícies é que todas consistem em produtos revestidos com esmaltes mates, de maior dureza e, portanto, menos susceptíveis ao riscamento ou perfurações por contaminações sólidas, como pedras e areia aderidas às solas de sapato. Para as outras superfícies, o perfilômetro óptico, mais sensível que o mecânico, detecta irregularidades como riscos e pontos que possam ter se originado durante o uso do piso e, como consequência, há um incremento na sua rugosidade média.

Isso já foi observado na apresentação dos resultados individuais das amostras e, também, mencionou-se que essas irregularidades, refletidas no aumento de Sa, tem um papel relevante na manutenção do  $\mu_d$  quando este é avaliado pelo BOT. No caso do DS, com borracha com menores dimensões, e do Pêndulo, em que a borracha tangencia a superfície executando um movimento pendular, devido às menores áreas de contato com as superfícies durante a varredura, os resultados teriam sido menos afetados pelo surgimentos dessas irregularidades pontuais.

O gráfico dos parâmetros Rq e Sq, rugosidades médias quadráticas, obtidas, respectivamente, pelos perfilômetros mecânico e óptico, foram omitidos devido à semelhança do comportamento com o já observado para Ra e Sa. Semelhanças também foram percebidas entre o gráfico de Ra e o do parâmetro Rk, a rugosidade central da superfície, determinada a partir da curva de Abbott-Firestone para os dados obtidos pelo perfilômetro de contato. O gráfico desse parâmetro é apresentado na Figura 4.25, a seguir.

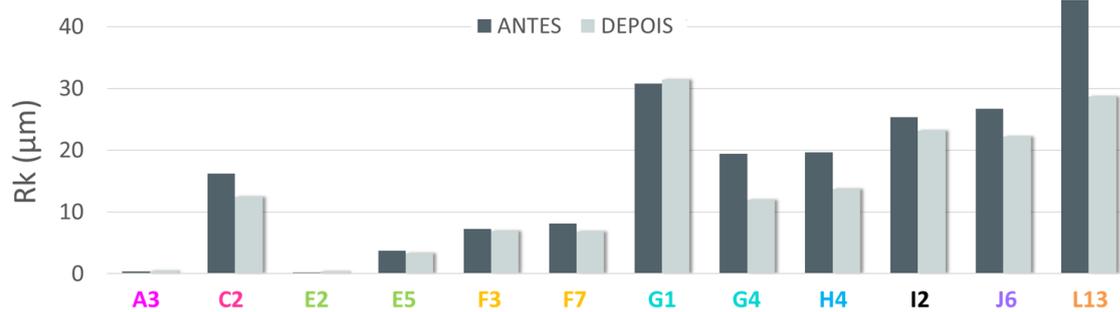


Figura 4.25 Altura da zona central da rugosidade obtida com o perfilômetro mecânico, Rk, antes e após 6 meses de uso das amostras.

Para as amostras não instaladas, a rugosidade central, Rk, varia de forma muito similar à Ra, entre superfícies de diferentes tipologias. Além disso, nota-se que, com uso, as alterações sofridas por estes parâmetros são similares.

Os menores valores de Ra e Rk são encontrados para as superfícies polidas e para as lisas esmaltadas, brilhantes ou satinadas. Por outro lado, os maiores valores estão associados a superfícies texturizadas e com granilhas. No caso das amostras polidas e esmaltadas brilhantes, não há redução expressiva de Ra e Rk, com o uso, dado que, desde o início, seus valores são muito baixos. Também não há redução dos parâmetros no caso de G1, gotejada brilhante, que, na realidade, apresenta elevados valores iniciais de Ra e Rk, mas associados à sua ondulação, não alterada significativamente durante o uso.

Para todas as outras amostras, Ra e Rk sofrem uma queda. Apesar de determinados de formas distintas, os parâmetros exercem função análoga nas expressões desenvolvidas para previsão da resistência ao escorregamento apresentadas na etapa anterior, aparecendo no numerador de várias delas. Portanto, amostras com uma resistência ao escorregamento inicial satisfatória, relacionada a elevados valores de Ra e Rk, com a redução desses parâmetros, durante o uso, tendem a ter seu  $\mu_d$  reduzido de forma atrelada.

O índice de rugosidade, Ir, também quantifica a rugosidade das superfícies de forma mais genérica, não associada a um aspecto específico do perfil, e é utilizado no numerador de algumas das expressões apresentadas na etapa anterior. Sua variação, com o uso, é ilustrada na Figura 4.26.



Figura 4.26 Índice de rugosidade obtido pelo perfilômetro mecânico,  $I_r$ , antes e após 6 meses de uso das amostras.

O índice de rugosidade é a razão entre comprimento do perfil da superfície, como se o mesmo fosse uma linha esticada, em relação ao comprimento varrido. Para as doze amostras estudadas, de forma unânime, o parâmetro é reduzido após sua utilização devido à suavização, arredondamento e atenuação, de forma geral, das irregularidades da superfície. Alterações superficiais como estas, sejam relacionadas a reduções na amplitude, formato ou número de irregularidades no perfil, levam ao encurtamento do seu comprimento total desenvolvido.

Pela definição dos parâmetros bidimensionais  $R_a$  e  $I_r$ , pode-se imaginar que as tendências exibidas por seus resultados sejam, de certa forma, similares. Nesse sentido, verifica-se que, para  $I_r$ , apenas duas amostras exibiram tendências diferentes do observado para  $R_a$ , a saber, as superfícies polidas, A3 e E2. O surgimento de riscos nessas superfícies, inicialmente muito planas, acabou sendo responsável pelo aumento da sua rugosidade média. Por outro lado, o índice de rugosidade mostrou-se afetado, predominantemente, pela redução da profundidade e arredondamento dos vales e, como consequência, foi diminuído.

Apesar de não ilustrado, como poderia se esperar, o comportamento de  $S_{dr}$ , espécie de parâmetro análogo tridimensional do índice de rugosidade, é condizente com o que se observa para  $I_r$ , para as doze amostras avaliadas. Outro parâmetro que apresenta as mesmas tendências de variação com o uso – e há sentido que assim seja – é o índice de área, dado pela razão entre a área superficial da amostra e sua área lateral, medidas pelo perfilômetro ótico. Esses

parâmetros, assim como a rugosidade média e central da amostra, são reduzidos com o uso, contribuindo para a queda na sua resistência ao escorregamento.

Em relação ao encardimento observado em algumas superfícies, não se pode associar o grau com que este se desenvolveu a esses parâmetros discutidos nessa seção. Nem todas as amostras com elevada rugosidade média e índices de rugosidade e área apresentaram acúmulo de sujeira, assim como outras superfícies, apesar de pouco irregulares, sofreram encardimento.

Para os três métodos de avaliação da resistência ao escorregamento, foram encontradas correlações ótimas entre o  $\mu_d$  medido para as superfícies não instaladas e os parâmetros de amplitude das mesmas. Entretanto, de maneira geral, estes parâmetros são reduzidos durante o uso dos produtos, assim como os outros parâmetros já comentados nessa seção. A Figura 4.27 apresenta as variações do parâmetro  $R_t$ , amplitude total do perfil, medida pelo perfilômetro mecânico, para as amostras estudadas.

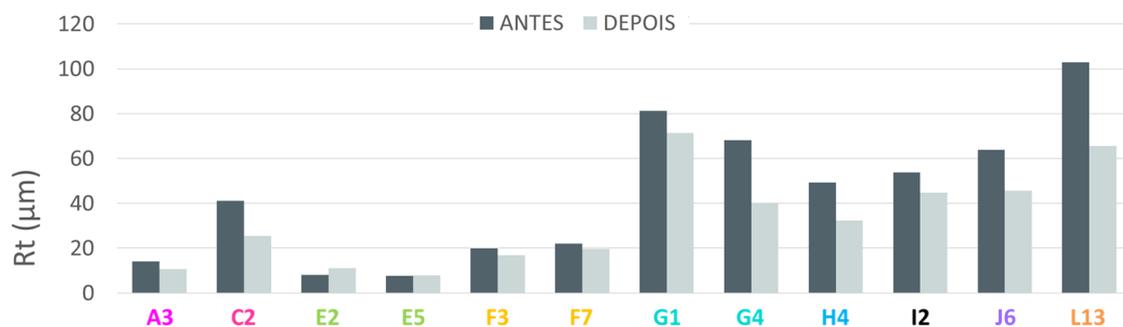


Figura 4.27 Amplitude total do perfil obtida pelo perfilômetro mecânico,  $R_t$ , antes e após 6 meses de uso das amostras.

O parâmetro  $R_t$  (e  $St$ , análogo tridimensional), correspondente à amplitude total do perfil analisado, é reduzido com o uso para praticamente todas as amostras. A distância entre a extremidade do maior pico e a do vale mais profundo diminui, seja devido ao desgaste dos picos, ao preenchimento de vales por sujidades ou aos dois fatores conjuntos. A única exceção ocorre para a amostra polida E2, para a qual  $R_t$  aumenta devido ao surgimento, já mencionado, de novas irregularidades durante o uso.

O parâmetro bidimensional Rz (e Sz, obtido pelo perfilômetro óptico) é associado à amplitude das irregularidades distribuídas ao longo do perfil, calculado pela média da altura dos 5 picos mais elevados e os 5 vales mais profundos da superfície. Boas correlações entre este parâmetro e a resistência ao escorregamento, já previamente anunciadas pela literatura, foram, também, observadas para os resultados da etapa anterior deste trabalho. A variação de Rz devido à exposição das amostras aos pedestres é ilustrada na Figura 4.28.

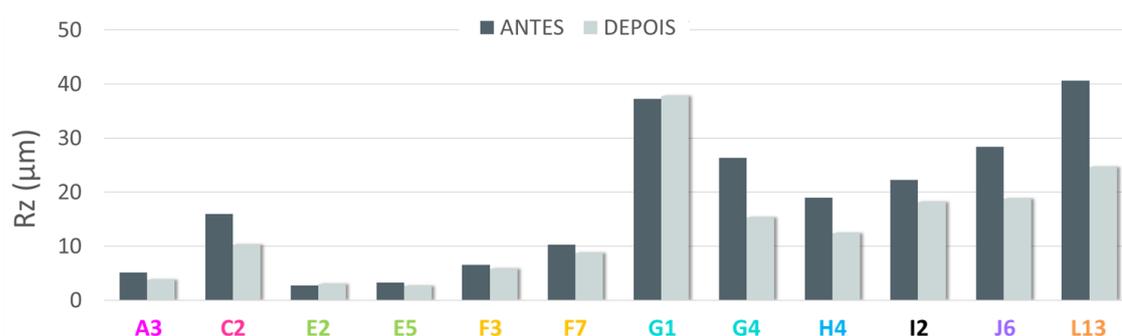


Figura 4.28 Parâmetro Rz obtido pelo perfilômetro mecânico, antes e após 6 meses de uso das amostras.

Assim como para a amplitude total do perfil, a altura média das maiores irregularidades da superfície também é reduzida pelo tráfego de pedestres. A variação de Rz, com o uso, só ocorre de forma diferente do observado para Rt para a superfície G1. Como observa-se nos perfis e nas topografias dessa amostra, surgem reentrâncias após o uso que, se localizadas nas regiões mais baixas da ondulação, podem ser interpretadas como um dos 5 vales mais profundos do perfil, elevando, ligeiramente, o parâmetro Rz.

Todos os outros parâmetros de amplitude não específicos de picos ou de vales apresentaram as mesmas tendências observadas acima, inclusive os tridimensionais. O valor absoluto dos parâmetros bi e tridimensionais diferem entre si, como já comentado, mas a variação relativa de muitos pares de parâmetros análogos determinados com perfilômetros diferentes ocorre de forma praticamente igual.

Nota-se, pela observação dos gráficos já apresentados até o momento, que a forma como Rz varia entre as diferentes tipologias, assim como a forma

com que esse parâmetro é alterado pelo uso, é semelhante ao que se observou, anteriormente, para Ra e Rk.

Por sua vez, o formato do gráfico da amplitude total do perfil, Rt, apresentado na figura anterior ao gráfico de Rz, é mais próximo do que se observa para parâmetros quantificadores específicos de picos, como o Rpm e Rpk, ilustrados na Figura 4.29, a seguir.

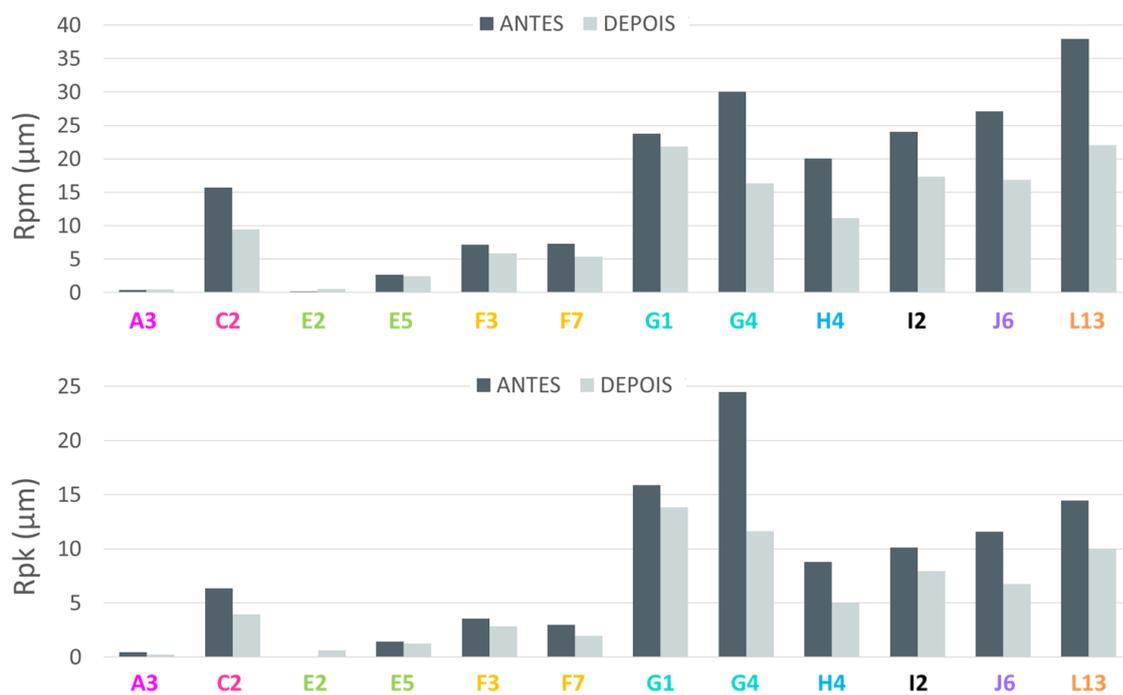


Figura 4.29 Altura média de picos, Rpm, e altura da zona de picos na curva de razão de material, Rpk, ambos obtidos com o perfilômetro mecânico, antes e após 6 meses de uso das amostras.

A literatura específica sobre o tema já havia mencionado boas correlações entre a resistência ao escorregamento e o parâmetro Rpm. Nesse trabalho, tais correlações se confirmaram e se observaram, também, valores de  $R^2$  similares para o parâmetro Rpk. Pela observação dos gráficos acima, nota-se, ainda, que estes dois parâmetros de amplitude de picos variam de forma similar com o uso.

Ao contrário do que ocorre com Ra, Rk e Rz, há uma queda nos parâmetros Rt, Rpm e Rpk, com o uso, mesmo para algumas amostras para as quais estes valores já eram muito pequenos antes da instalação. O cálculo

desses parâmetros é mais afetado pela presença de picos elevados e isolados, facilmente removíveis devido ao desgaste, e, portanto, seus valores são mais susceptíveis à queda, devido ao uso.

Tendências de comportamento similares a Rpm e Rpk são observadas para o parâmetro bidimensional Rp. Entretanto, o parâmetro Sp, obtido pelo perfilômetro óptico, além de aumentar para as amostras polidas, aumenta para as amostras F3 e F7. Isso pode ser devido ao cálculo do valor desse parâmetro, que não é um parâmetro médio, ser mais susceptível à influência de incrustações isoladas, por exemplo. Estas podem ser irrelevantes para os cálculos de parâmetros de rugosidade de amostras com superfícies mais complexas e com texturas, mas afetar, significativamente, os resultados dos parâmetros para as amostras mais lisas, sejam elas brilhantes ou não.

As tendências de queda observadas, com o tempo de uso das superfícies, para os parâmetros quantificadores da amplitude de picos, também são notadas para os parâmetros bidimensionais Rv e Rvm, relacionados à profundidade de vales. Entretanto, o parâmetro Sv, obtido com o perfilômetro óptico, que pode fornecer dados mais precisos a respeito de profundidade de vales, apresentou comportamento mais distinto e, portanto, é ilustrados na Figura 4.30.



Figura 4.30 Profundidade do maior vale da superfície, Sv, obtida pelo perfilômetro óptico, antes e após 6 meses de uso das amostras.

O que se acredita, nesse caso, é que, o perfilômetro óptico, com capacidade de varrer vales mais estreitos até sua profundidade máxima, forneceria uma imagem da topografia da superfície com a linha média deslocada mais abaixo, em relação à linha média do perfil bidimensional.

Consequentemente, os valores dos parâmetros de amplitude de vales e picos seriam afetados.

Nota-se um aumento significativo de  $S_v$  para E2, pelo surgimento de vales no perfil da superfície devido ao riscamento e, além disso, o parâmetro aumenta para amostras como I2 e G4, o que pode ser um forte indício de que, nas regiões mais baixas dessas superfícies, entre as elevações da textura, tenham surgido irregularidades/riscos como ocorre para E2.

O aumento sutil de  $S_v$ , com o uso, para E5 e J6, pode, na realidade, ser apenas devido a variações normais de amplitude de vales ao longo das peças. A área varrida pelo perfilômetro óptico é pequena e pouco representativa para algumas superfícies mais heterogêneas ou compostas por elementos de maiores dimensões. No caso de  $S_v$ , que não é um parâmetro médio, seu cálculo pode ser facilmente influenciado pelo posicionamento da amostra para a varredura, que determina a área exata a ser analisada.

A varredura de uma região menos representativa da amostra, realizada pelo perfilômetro óptico, é um fator, já apontado por esse trabalho, como responsável pelos valores mais baixos de  $R^2$  encontrados para as correlações entre os parâmetros de superfícies determinados pelo perfilômetro óptico e a resistência ao escorregamento, em relação aos determinados pelo perfilômetro mecânico. É verdade que o perfilômetro mecânico tem limitações em relação à varredura de vales estreitos, que, portanto, seriam contabilizados, apenas, no cálculo dos parâmetros de rugosidade do perfilômetro óptico. No entanto, vales com essas características não contribuem com o desenvolvimento de mecanismos intensos de atrito e, tampouco, com o aumento da capacidade de acomodação de líquidos para prevenção da formação de filmes lubrificantes, o que sugere que sua consideração nos cálculos dos parâmetros de rugosidade para previsão do  $\mu_d$ , não seja, de fato, muito relevante.

A capacidade de acomodação de líquidos de uma superfície, por sua vez, é relacionada ao seu volume natural, quantificado pelo software integrado ao perfilômetro óptico. A variação desse parâmetro é ilustrada na Figura 4.31.

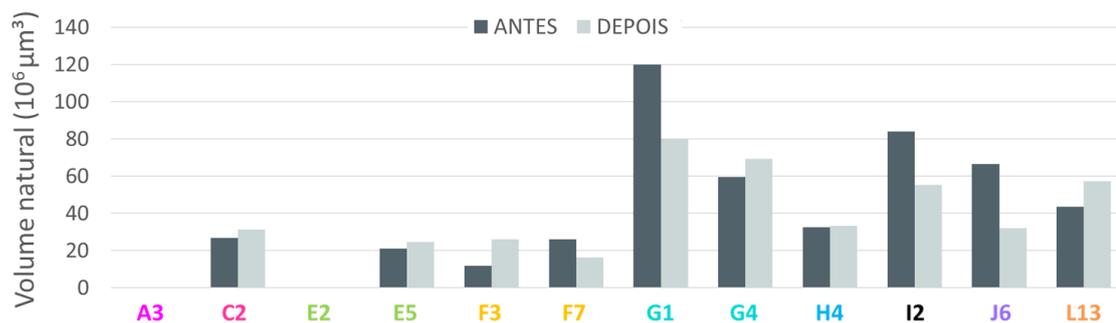


Figura 4.31 Volume de líquido mínimo para o recobrimento das superfícies das amostras, antes e após 6 meses de uso.

Obviamente, a diminuição do volume necessário para cobrir uma superfície até seu ponto mais alto está intimamente ligada à amplitude de um perfil. Dessa forma, o comportamento do volume natural e dos parâmetros de amplitude estão intimamente ligados e, com o uso, há uma tendência de que o volume natural também seja reduzido. A presença de picos elevados mostra-se relevante, portanto, não apenas pela contribuição com o desenvolvimento de mecanismos de atrito, mas, também, com o aumento na capacidade do perfil de acomodar líquidos para que a formação de filmes lubrificantes seja evitada.

Apesar disso, nota-se que, para algumas amostras, o volume natural é incrementado com o uso. Nesses casos, o aumento do volume de líquido acomodado pela superfície pode ser atribuído à diminuição do número de irregularidades compondo o perfil, devido ao arrancamento de picos pelo desgaste e consequente afastamento entre essas saliências.

Da mesma forma, o parâmetro A2 (área entre a curva de Abbott-Firestone e a linha limite entre a zona central e a dos vales) e o parâmetro V2, seu análogo tridimensional, têm sua variação, com o uso, associada, simultaneamente, à amplitude e ao espaçamento das irregularidades do perfil. Isso explica por que esses parâmetros, assim como o volume natural, são utilizados no denominador de várias das equações propostas na etapa anterior, como fatores de correção para a previsão da resistência ao escorregamento de superfícies.

Outro parâmetro que não se correlaciona bem, diretamente, com a resistência ao escorregamento, mas que está presente nas equações propostas na etapa anterior e tem um significado físico facilmente visualizável, no caso,

relacionado à distância entre irregularidades do perfil, é o comprimento de onda médio. Sua variação com o uso é apresentada na Figura 4.32

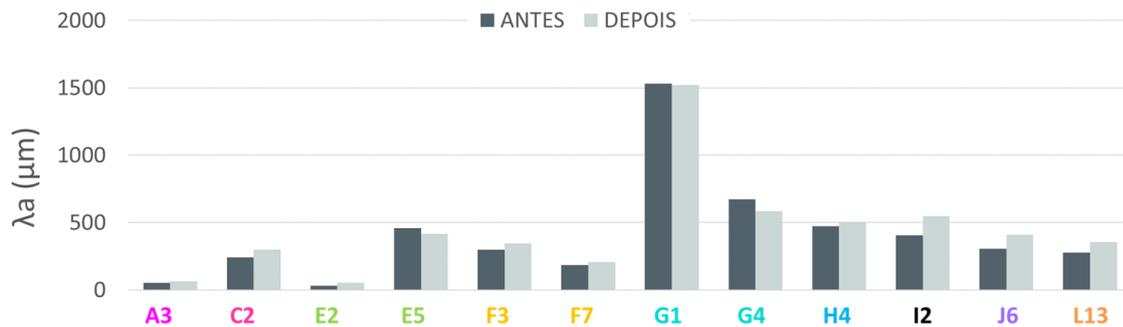


Figura 4.32 Comprimento de onda médio dos perfis das amostras, antes e após 6 meses de uso.

Nota-se um aumento geral de  $\lambda_a$  com o uso das superfícies. Com o desgaste de picos e preenchimento de vales, essas regularidades se tornam mais escassas e espaçadas, o que faz com que o comprimento de onda do perfil aumente. Mesmo no caso das amostras como as polidas, para as quais houve surgimento de irregularidades na superfície,  $\lambda_a$  aumenta com o uso.

O parâmetro diminui apenas para E5 e G4. Pela observação do perfil bidimensional das mesmas, nota-se que alguns picos sofrem um lascamento devido às solicitações durante o uso e assumem um formato que pode ser interpretado, não como um pico, mas como duas irregularidades distintas. Assim, ainda que a amplitude e largura das irregularidades seja reduzida, há um aumento na quantidade das mesmas distribuídas sobre a superfície, o que promove a redução do comprimento de onda de seu perfil.

As tendências observadas no gráfico são praticamente iguais às do gráfico de  $S_m$ , distância média entre picos adjacentes. Esta representa a distância entre um ponto, na linha média, onde um pico se inicia até o ponto onde o vale adjacente termina. De certo modo, esse parâmetro acaba sendo muito similar ao comprimento de onda, que também é definido por um ciclo completo de um pico e um vale. Como resultado, as tendências de variação dos dois parâmetros para as amostras avaliadas são muito próximas.

A única diferença ocorre para a amostra G1. Nesse caso, as irregularidades contabilizadas como picos e vales do perfil são parte da sua ondulação. Assim, a dimensão dessas irregularidades é de ordem próxima à dimensão da pequena área varrida pelo perfilômetro, insuficiente para descrever essa superfície de forma representativa. Portanto, a variação no espaçamento entre as ondulações da peça antes e após o uso podem se referir apenas a variações normais desse aspecto da superfície ao longo da mesma.

O parâmetro  $S$  avalia a distância entre irregularidades de forma distinta dos dois parâmetros já discutidos,  $\lambda_a$  e  $S_m$ . O cálculo de  $S$  considera a distância entre picos locais ao longo do perfil, independentemente se ocorre um ciclo de um pico e um vale ou se essa irregularidade está acima ou abaixo da linha média. Um pico local é qualquer porção convexa do perfil para a qual a distância entre o ponto mais elevado e os mais baixos – o lado esquerdo e o direito da sua base – sejam de no mínimo equivalentes a 10% do valor de  $R_y$ . Além disso, se dois picos com essas características estão muito próximos, separados por uma distância inferior a 1% do comprimento do perfil, apenas o maior deles é considerado um pico local, efetivamente. O número total de picos locais contabilizados para uma superfície é expresso pelo parâmetro  $P_c$  (peak count). A Figura 4.33 ilustra a variação, com o uso, dos parâmetros  $S$  e  $P_c$ .

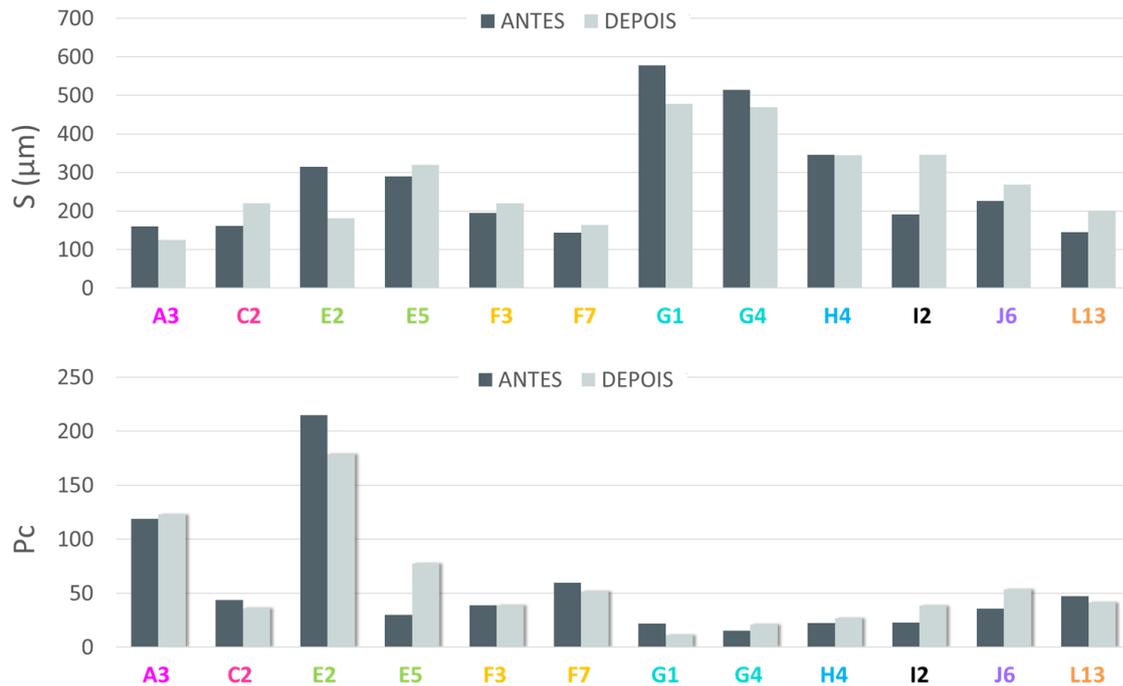


Figura 4.33 Espaçamento entre picos locais,  $S$ , e número total de picos locais no perfil,  $P_c$ , antes e após 6 meses de uso das amostras.

Por definição, portanto, o parâmetro  $S$ , em relação ao comprimento de onda do perfil ( $\lambda_a$ ) e o espaçamento entre irregularidades ( $S_m$ ), de forma geral, assume valores absolutos inferiores. Isso ocorre porque o parâmetro se refere a irregularidades de menor escala dimensional, geralmente, sobrepostas aos picos e vales definidos de forma convencional a partir da linha média, considerados nos cálculos de  $\lambda_a$  e  $S_m$ . Assim, o parâmetro é relacionado ao formato do perfil, mas, mais especificamente, com a forma como pequenas irregularidades são distribuídas ao longo do mesmo.

Para as amostras mais ásperas, com granilhas secas, por exemplo, o espaçamento entre esses pequenos picos da superfície aumentou. No caso das amostras mais brilhantes e lisas, o surgimento de riscos e endentações em algumas delas acabou por diminuir essa distância entre as irregularidades.

Outro fator que pode ter contribuído para a redução no número de picos locais e distanciamento entre os mesmos, após o uso, é o encardimento. Devido ao formato das irregularidades do perfil que cumprem os requisitos para serem consideradas picos locais, entre duas destas, forma-se uma cavidade estreita

favorável ao depósito de sujeira, de difícil acesso por mecanismos de limpeza. Poderia se esperar, então, maior encardimento da superfície com o aumento no número desses picos locais e com a diminuição da distância entre eles. A razão entre o número de picos totais contabilizados ( $P_c$ ) e a média da distância entre eles ( $S$ ), em picos/micrômetros, fornece um indicativo médio da concentração de picos no comprimento analisado. O gráfico dos valores desse novo índice, calculado pela razão entre  $P_c$  e  $S$ , é ilustrado na Figura 4.34.

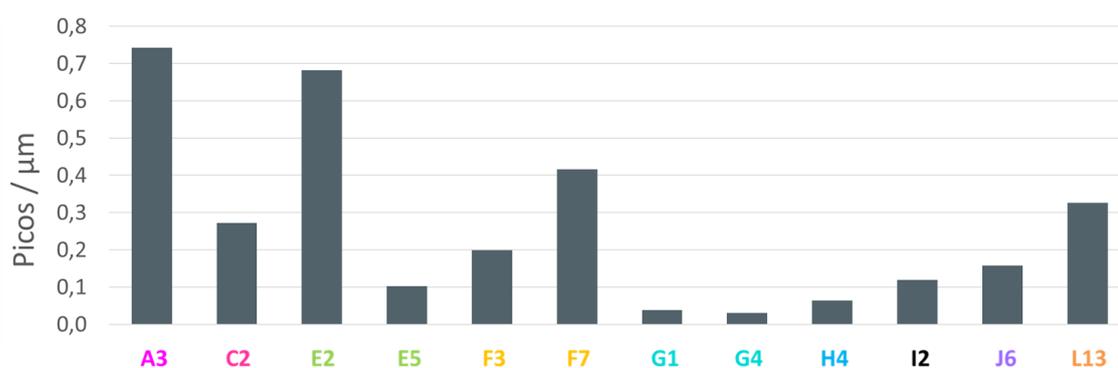


Figura 4.34 Densidade de picos locais no perfil das amostras analisadas, antes de serem expostas ao tráfego de pedestres.

Confrontando-se o gráfico acima com o encardimento observado para as superfícies na etapa 2 do trabalho, percebe-se uma associação entre estes resultados. De modo geral, amostras que apresentaram elevado valor para o índice calculado ( $P_c/S$ ) também apresentaram níveis de encardimento significativos. Por outro lado, amostras com menor número de picos locais por micrômetro do perfil, mesmo algumas com elevada amplitude de irregularidades e rugosidade média, não apresentaram níveis de encardimento críticos. Portanto, esse índice,  $P_c/S$ , será abordado à frente, em discussões à cerca da previsão do manchamento a partir de parâmetros de rugosidade, como realizado na etapa 2, em relação à resistência ao escorregamento.

Naquela ocasião, a inclinação média do perfil,  $\Delta a$ , fora identificada com uma variável importante a ser considerada na previsão da resistência ao escorregamento, em combinação com um, dois ou mais parâmetros atuantes como fatores de correção. Para observação, a variação desse parâmetro, com o uso, é ilustrada na Figura 4.35.

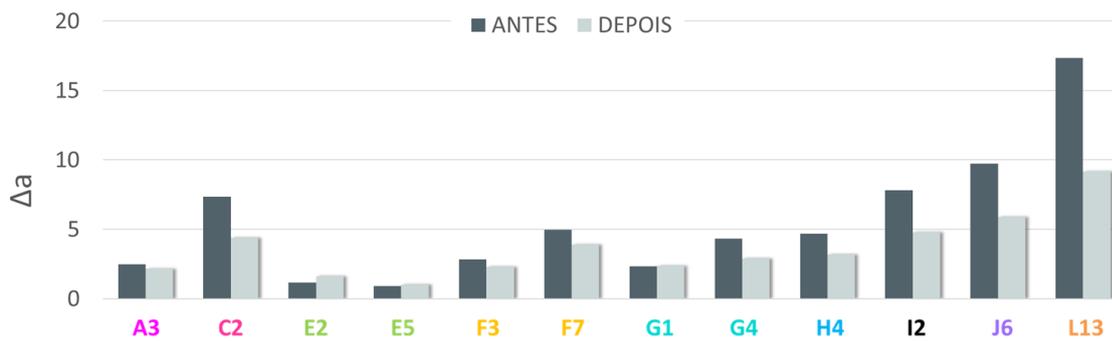


Figura 4.35 – Inclinação média do perfil das amostras, antes e após 6 meses de uso, avaliada pelo perfilômetro mecânico.

Sendo a inclinação média do perfil um parâmetro relacionado com a altura e espaçamento das irregularidades superficiais, afetados pelo desgaste e encardimento das superfícies avaliadas, já era esperado que o parâmetro  $\Delta a$  fosse, também, alterado pelo uso. De fato, pode-se observar sua queda, de modo geral, para as amostras avaliadas, o que, macroscopicamente, se reflete na suavização da sensação ao toque das superfícies mais ásperas antes de utilizadas.

Uma superfície que diverge dessa tendência é a da amostra E2 que, com sua utilização, acaba tendo a inclinação média do seu perfil incrementada devido ao surgimento de novas irregularidades. No caso do porcelanato A3, com perfil similar, a redução da inclinação dos vales devido ao seu preenchimento com sujeira predominou e, assim como a maioria das amostras, sua inclinação média é reduzida. Um aumento sutil do parâmetro  $\Delta a$  devido ao surgimento de novas irregularidades também foi observado para a superfície G1.

O que se percebe é que as amostras que apresentam o aumento da inclinação do perfil com o uso, são amostras com resistência ao escorregamento muito baixas antes de instaladas. Assim, ainda que o aumento da inclinação do perfil contribua positivamente para a resistência ao escorregamento da superfície, esse aumento não é expressivo a ponto de fazer com que a amostra passe a apresentar um desempenho muito melhor para ser recomendável para áreas de risco.

Já para as amostras que apresentam bons desempenhos iniciais associados a elevados valores de  $\Delta a$ , o parâmetro é reduzido, assim como

ocorrido para parâmetros de amplitude e rugosidade média, por exemplo, afetando negativamente seu desempenho. Conclui-se, portanto, que, de modo geral, as mudanças nas características das superfícies mais interessantes para aplicações em locais de risco, vão, todas, na direção desfavorável à resistência ao escorregamento. Como resultado, o  $\mu_d$  de superfícies inicialmente classificadas como recomendáveis para áreas críticas pode ser reduzido a ponto de estas passarem a ser inadequadas para esse tipo de aplicação, aumentando-se, seriamente, os riscos de acidentes no local.

Nesse sentido, vale lembrar, ainda, que, a classificação de uma amostra como recomendável para áreas de risco por um dos métodos, não implica que esta seja aprovada, também, quando avaliada pelos outros. Isso ocorre porque as tendências de variação da resistência ao escorregamento são diferentes entre os métodos, dadas as diferenças entre os princípios de operação e condições de medida utilizados na avaliação.

Essas tendências de variação da resistência ao escorregamento com o uso das superfícies, são apresentadas, na Figura 4.36, para as doze amostras, avaliadas pelos três métodos de medida considerados no estudo. Uma linha foi adicionada nos gráficos para indicar o valor mínimo do coeficiente de atrito necessário para que os produtos sejam aprovados pelas normas vigentes que utilizam esses dispositivos.

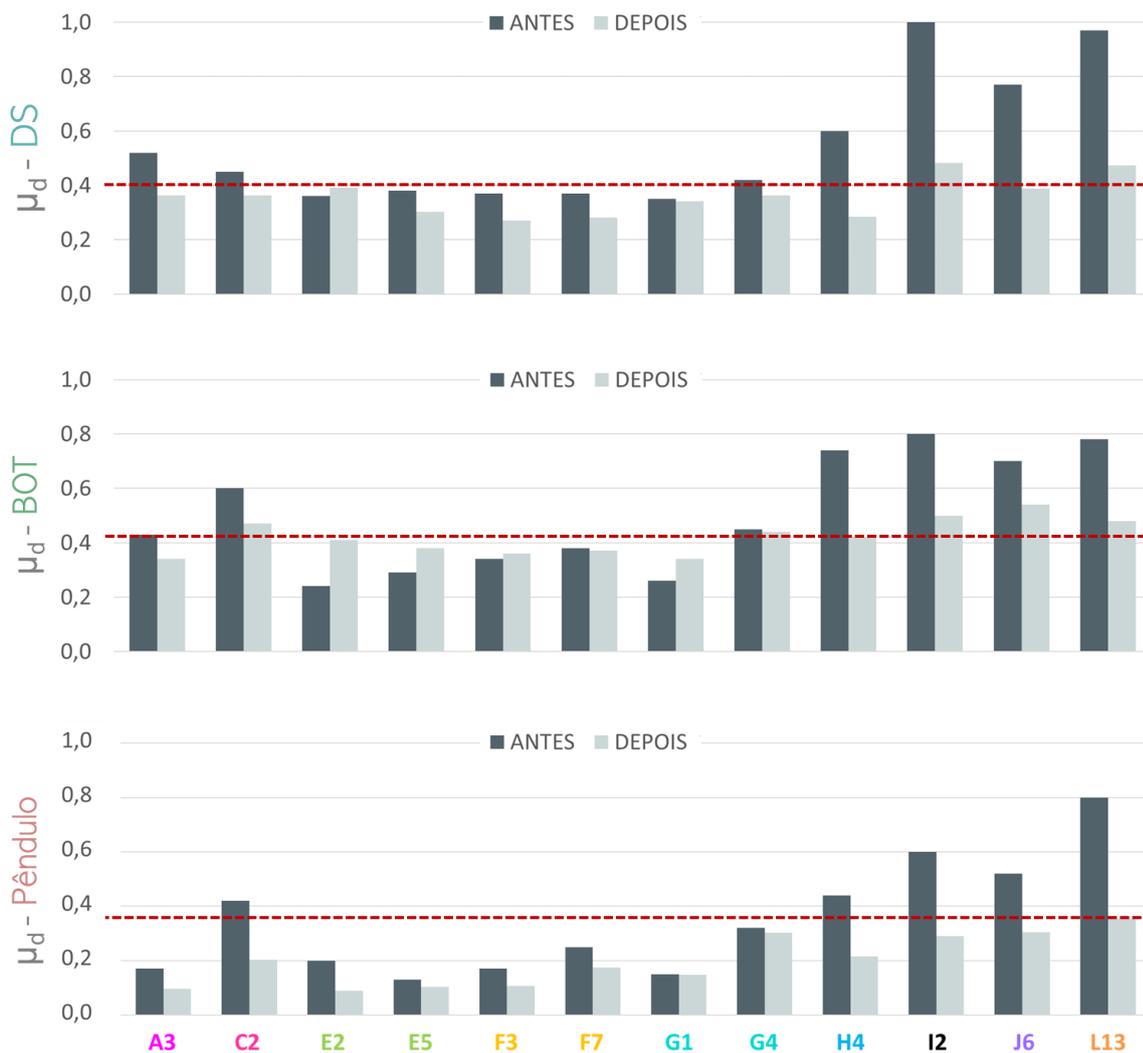


Figura 4.36 Resistência ao escorregamento, antes e após 6 meses de uso das amostras, avaliada, a úmido, pelo DS, BOT-3000E e Pêndulo Britânico.

São notáveis as diferenças entre as variações da resistência ao escorregamento para uma mesma amostra quando esta é analisada com cada um dos três métodos de medida utilizados. Para o Pêndulo, nenhuma amostra, após 6 meses de uso, atinge  $\mu_d$  mínimo de 0,36, critério de segurança das normativas que adotam esse equipamento como método de avaliação da resistência ao escorregamento de pisos cerâmicos. De acordo com esse resultado, todas as tipologias de superfície, ainda que apresentem desempenho satisfatório antes de serem instaladas, ao longo do tempo em que são utilizadas, se tornam inadequadas para ambientes onde há riscos de escorregamento.

Como já observado na primeira etapa do trabalho, os deslizadores motorizados tendem a retornar valores de coeficiente de atrito mais elevados do que os obtidos com o Pêndulo. Após o uso, o mesmo é observado para o conjunto de amostras. No caso desses dispositivos, o critério para recomendação de superfícies para áreas de risco é que estas apresentem coeficiente de atrito de no mínimo 0,40, quando avaliadas com o DS, e de 0,42, quando avaliadas com o BOT, valores mais elevados do que o exigido na normativa que prevê a utilização do Pêndulo. Entretanto, pelo fato de os resultados de  $\mu_d$  para o DS e o BOT terem se mantido mais elevados após o uso, há, sim, amostras que seguem cumprindo com os requisitos de segurança exigido pelas normas.

Apesar de o BOT retornar valores de  $\mu_d$  mais baixos que o DS para as superfícies antes da instalação, após as alterações sofridas pelas mesmas, para algumas, essa situação se inverte. Com o uso, uma mesma amostra apresenta menor perda de suas propriedades anti escorregamento segundo leitura e avaliação feita pelo BOT, em comparação com o DS. Essas diferenças, provavelmente, estão relacionadas com o efeito positivo que o aumento da rugosidade média em regiões inicialmente mais lisas das peças tem sobre os valores de  $\mu_d$  medidos pelo BOT. Para o DS e Pêndulo, o efeito da perda de amplitude e suavização de irregularidades devido, principalmente ao desgaste, predomina, provocando a queda na resistência ao escorregamento dos pisos.

Por razões mais bem detalhadas nas discussões individuais das alterações sofridas pelas superfícies, as amostras que apresentaram melhor resistência ao escorregamento antes do uso, C2, H4, I2, J6 e L13, tiveram seu desempenho negativamente afetados durante o uso. Isto pode estar relacionado a uma parte significativa do número de acidentes de escorregamento de pedestres envolvendo pisos cerâmicos. Superfícies inicialmente reprovadas para áreas de risco, serão utilizadas em ambientes e condições razoáveis, que oferecem maior segurança na caminhada. No entanto, essas amostras mencionadas, que apresentaram  $\mu_d$  inicial elevado, podem ser instaladas em ambientes onde há maiores riscos de escorregamento, na presença de líquidos e contaminantes. Justamente nesses casos, se o piso não mantém, ao longo do

seu tempo de uso, sua resistência ao escorregamento satisfatória inicial, a probabilidade de acidentes é significativamente aumentada. Portanto, a queda na resistência ao escorregamento das superfícies, devido ao desgaste de picos da sua rugosidade, deve ser uma questão primordial a ser considerada no desenvolvimento de novos produtos pelos fabricantes cerâmicos.

Outro parâmetro alterado durante o uso dos pisos, que exerce influência em suas propriedades de fricção, é a assimetria do perfil. Como já discutido, amostras assimétricas podem apresentar resistência ao escorregamento muito acima ou muito abaixo do esperado de acordo com parâmetros quantificadores de aspectos da sua rugosidade, como rugosidade média, amplitude e inclinação do perfil. A atuação do desgaste e acúmulo de sujeira sobre a superfície faz com que as características da rugosidade da superfície tendam a variar em direção às características de um perfil mais natural, mais simétrico. Esses efeitos são, por exemplo, responsáveis pela queda abrupta do parâmetro  $S_k$ ,  $K_u$  para as amostras polidas que, inicialmente apresentam a maior assimetria do conjunto. Para essas amostras, os vales têm sua profundidade reduzida devido ao acúmulo de sujeira, enquanto as superfícies, inicialmente, sem saliências, quase perfeitamente planas, se tornam mais irregulares.

Enquanto  $K_u$  assumem valores relevantes apenas para A3 e E2 (tanto antes, quanto após o uso das amostras), o parâmetro  $S_k$  também é significativo para outras superfícies do conjunto e, inclusive, assume valores negativos, ao contrário do que se observa para as amostras polidas. A redução do módulo desse parâmetro, para as doze amostras estudadas, é ilustrada na Figura 4.37

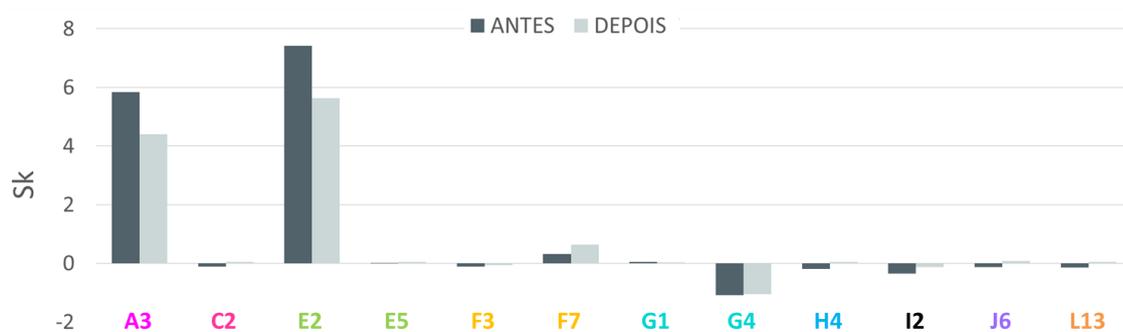


Figura 4.37 Assimetria do perfil avaliada com o perfilômetro mecânico,  $S_k$ , antes e após 6 meses de uso das amostras.

Como se observa, as amostras G4, H4, e I2, com um grau inicial de assimetria, também se tornam mais simétricas com o uso. Para essas amostras, por exemplo, os artifícios utilizados para promover mecanismos de atrito estão, justamente, associados às irregularidades que não estão distribuídas simetricamente em relação à linha média. Ou seja, há uma predominância de picos afiados nos perfis, intencionalmente produzida para aumentar o  $\mu_d$  das superfícies. A atuação do desgaste sobre esses picos promove a redução da assimetria do perfil e, conseqüentemente, os mecanismos de atrito vão tendo sua eficácia diminuída ao longo do tempo.

Assim, se o elevado  $\mu_d$  de um produto se deve a uma configuração assimétrica do seu perfil, com predominância intencional de picos, por exemplo, dificilmente seu desempenho será mantido durante o uso. Esse é o tipo de informação que não pode ser negligenciada pela indústria no projeto de pisos com resistência ao escorregamento elevada e durável ao longo da sua utilização.

#### **4.3.4 Previsão realista do encardimento das superfícies**

Não se encontrou nenhuma correlação direta entre um dos parâmetros de rugosidade medidos e os resultados de resistência ao manchamento, determinados em laboratórios e apresentados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4. Também se sabe que esses resultados de manchamento não se correlacionam com os níveis reais de encardimento sofridos pelo piso. Por esse motivo, uma nova abordagem foi adotada para quantificar o encardimento das superfícies.

Notas foram atribuídas por 12 voluntários, consultados individualmente, a respeito do aspecto visual das superfícies quanto ao seu encardimento. A escala utilizada foi de 1 a 5, assim como para a quantificação da limpabilidade através dos ensaios de manchamento. A nota 1 equivale ao pior desempenho possível, no caso de amostras que sofreram alterações de cor evidentes. A nota 5 foi atribuída aos produtos para os quais não foram perceptíveis prejuízos em seus aspectos estéticos devido ao acúmulo de sujeira. A partir dos dados dessa avaliação, calculou-se a média aritmética das notas, apresentadas na Tabela

4.26. Esses resultados estão confrontados com os resultados retomados de resistência ao manchamento para os agentes da norma NBR e ASTM. Também foi calculada a média desses dois resultados de classe de limpabilidade e uma média aritmética dos resultados individuais de limpabilidade obtidos nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, considerando-se os nove agentes manchantes utilizados.

Tabela 4.26. Notas atribuídas à limpabilidade das amostras estudadas por observação visual e classificação segundo procedimento previsto pela NBR - para agentes manchantes recomendados por esta norma e ASTM.

	Observação Visual	Classe de limpabilidade. Agentes NBR	Classe de limpabilidade. Agentes ASTM	Média dos dois testes	Média dos resultados para os 9 agentes
A1	1,3	3	2	2,5	3,3
C2	2,1	5	2	3,5	4,1
E2	1,7	5	3	4,0	4,3
E5	3,2	5	3	4,0	4
F3	3,9	5	2	3,5	4,3
F7	2,9	5	2	3,5	3,9
G1	4,7	5	2	3,5	3,9
G4	4,6	5	2	3,5	3,9
H4	5,0	5	3	4,0	4,6
I2	3,3	5	2	3,5	3,9
J6	3,8	5	2	3,5	4,4
L13	1,0	4	2	3,0	3,7

Os resultados da classificação realizada para os agentes manchantes da norma NBR e ASTM, além de divergirem entre si, não se correlacionam com o comportamento real das superfícies na presença de sujeira.

Para os agentes recomendados pela NBR, por exemplo, apenas duas amostras apresentaram uma limpabilidade inferior, enquanto todo o restante atinge seu nível máximo, a classe 5. No entanto, na prática, se observaram resultados muito mais variados entre si do que previsto por essa análise. Há,

também, amostras que, para os agentes manchantes da norma ASTM, apresentam desempenho bastante insatisfatório, quando, na realidade, praticamente não se observam alterações em sua superfície.

Uma média das duas classificações foi calculada, e, também, não se observa uma similaridade dos resultados com os valores atribuídos visualmente às amostras. O mesmo se observa para a média dos resultados da classificação individual dos testes, realizados com cada um dos nove agentes manchantes. O cálculo dessas duas médias é apenas ilustrativo para que fique evidente que nenhum dos ensaios de laboratório prevê adequadamente o encardimento de superfícies. No entanto, além dessas duas combinações de resultados mais simplistas, outras mais elaboradas foram testadas. Não se encontrou uma expressão, em função dos resultados de resistência ao manchamento já realizados, que retornasse resultados próximos do comportamento de limpabilidade real observado.

Uma das possíveis razões para a dificuldade em se encontrarem correlações entre os resultados laboratoriais e a situação de uso prática, é a diferença entre os agentes manchantes utilizados nos ensaios e as contaminações às quais os pisos estão, de fato, sujeitos durante o uso. Nesse sentido, considerar todos os resultados obtidos para os nove agentes e, inclusive, incorporar, aos testes, outros manchantes que possam representar bem as condições de uso dos produtos, parece uma abordagem mais correta.

Outra razão que dificulta a correlação entre os resultados dos testes e a realidade está associada à classificação das amostras baseada na remoção de manchas após tentativas de limpeza com métodos cada vez mais intensos. No entanto, alguns desses métodos não são utilizados, na prática, para limpeza de ambientes onde os pisos são aplicados. A segunda etapa utilizada para tentativa de limpeza nos ensaios, com esponja macia e sabão, já não é uma representação realista das ações de limpeza adotadas pelos usuários do piso. Na prática, as superfícies costumam ser limpas com vassoura, ou mesmo rodos e panos, que não alcançam cavidades estreitas e profundas acessíveis à uma esponja macia. Assim, contaminantes que, em laboratório, só são removidos das superfícies com esponja macia ou outros métodos de limpeza mais intensivos

(classe de limpabilidade 4 ou inferior), seriam acumulados entre irregularidades em condições reais de uso. Em outras palavras, apenas as superfícies com classe de limpabilidade 5 não apresentariam, na prática, tendência ao acúmulo de sujeira. Na

Tabela 4.27, sumariza-se o número de agentes manchantes para os quais cada superfície alcança classe 5 de limpabilidade nos testes realizados.

Tabela 4.27 Limpabilidade das superfícies, de 1 a 5, em relação a 9 agentes manchantes, recomendados pela ISO 10545-14 e ASTM C1378.

	A1	C2	E2	E5	F3	F7	G1	G4	H4	I2	J6	L13
<i>Azeite de oliva</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
<i>Óxido de cromo em óleo leve</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
<i>Iodo em solução alcóolica</i>	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Negro de fumo</i>	5	5	4	5	5	4	5	4	5	4	4	3
<i>Rejunte contrastante</i>	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4
<i>Tinta lavável</i>	2	5	5	3	5	2	4	4	5	5	5	4
<i>Tinta preta insolúvel em água</i>	2	4	5	3	5	5	3	4	5	2	5	4
<i>Solução de azul de metileno</i>	2	2	3	3	2	2	2	2	4	2	4	3
<i>Solução de permanganato de potássio</i>	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	2	2
<i>Nº de agentes removidos das amostras apenas com enxágue em água quente (classe 5 de limpabilidade)</i>	3	5	5	4	6	5	4	3	6	4	6	1

Seja  $n_5$  o número de agentes manchantes removidos das superfícies apenas com água corrente, ou seja, aqueles para os quais a superfície atinge classe de limpabilidade 5. Percebeu-se certa correlação entre esses valores, apresentados na última linha da tabela acima, e a limpeza mantida pelas superfícies durante o uso, de acordo com a percepção visual dos voluntários. Foi, portanto, investigada, uma forma de considerar os resultados obtidos pelos testes de limpabilidade a partir de um ponto de vista, mais realista, em conjunto

com parâmetros de rugosidade indicativos da tendência ao manchamento das superfícies.

A razão entre o número de picos locais ( $P_c$ ) e a distância entre estes ( $S$ ) apresentou um grande potencial, nesse sentido. Algumas amostras, como E2, por exemplo, sofreram encardimento muito mais evidente do que se poderia prever com os resultados de resistência ao manchamento, ao passo que, pela observação do gráfico de  $P_c/S$ , na Figura 4.34, já se esperaria que a superfície fosse afetada pelo acúmulo de sujeira. Por essa razão, maior atenção foi dispensada à análise desses resultados em busca de um novo procedimento para estimar a limpabilidade das superfícies de forma mais condizente com o que se observa na prática.

Nessa perspectiva, considerando-se que o encardimento já se mostrou diretamente proporcional à razão  $P_c/S$ , pode-se afirmar que a limpabilidade é proporcional ao inverso dessa razão, ou seja, proporcional à  $S/P_c$ .

Após uma busca por combinações de parâmetros, chegou-se a uma expressão para um novo valor de limpabilidade, definido como índice de limpabilidade,  $I_L$ , em função dessa razão  $S/P_c$  e do número de agentes manchantes removidos das superfícies apenas com água,  $n_5$ . O cálculo do parâmetro é efetuado de acordo com a Equação 1.

$$I_L = n_5 \cdot \sqrt{\frac{S}{P_c}} \quad (\text{Equação 1})$$

Os resultados de  $I_L$ , calculados para as doze amostras estudadas, são ilustrados na Figura 4.38. Os valores de limpabilidade avaliada por observação visual também são apresentados para a comparação direta entre os comportamentos observados.

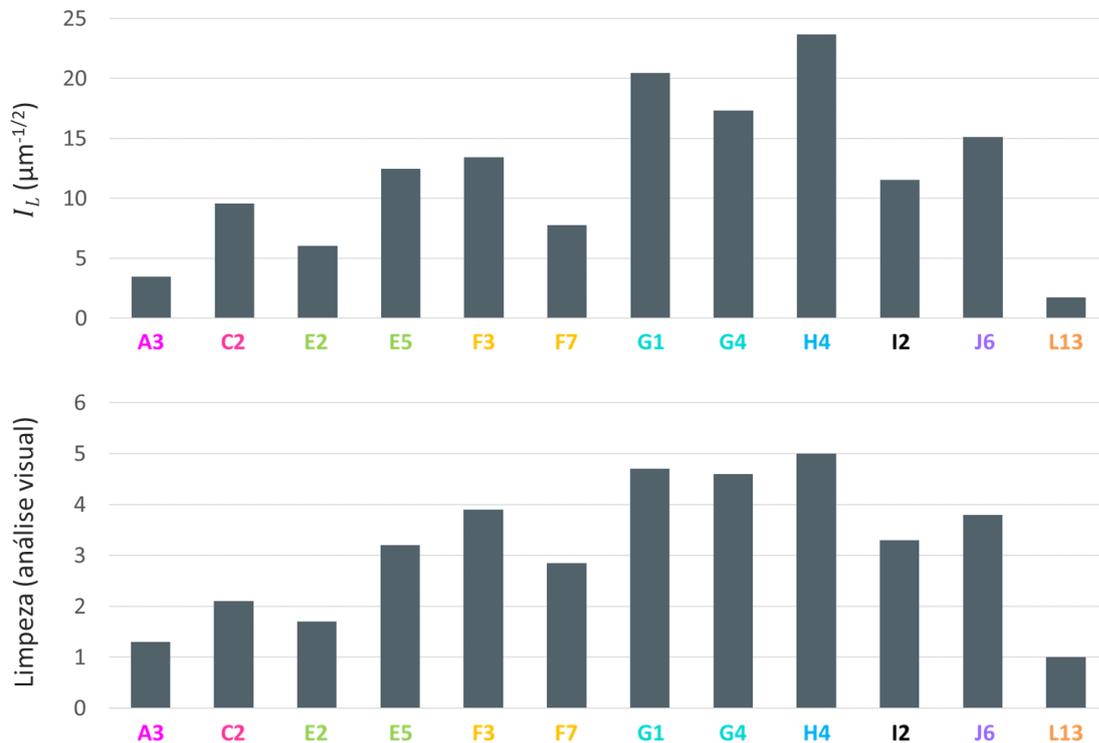


Figura 4.38 Novo índice de limpabilidade,  $I_L$ , estimado e manutenção da limpeza após o uso de acordo com análise visual por observadores voluntários.

É notável a semelhança entre os comportamentos das amostras nos gráficos da limpabilidade real e o do novo índice de limpabilidade,  $I_L$ , proposto. Buscou-se uma correlação linear entre os valores da limpabilidade avaliada visualmente e o índice calculado, obtendo-se um valor de  $R^2 = 0,93$ .

A expressão para o cálculo do índice sugerido contempla, simultaneamente, resultados experimentais obtidos em testes de resistência ao manchamento e aspectos da rugosidade das superfícies, também passíveis de serem quantificados em laboratório, por perfilômetros. Na prática, portanto, esse novo índice mostra-se como uma ferramenta alternativa para a previsão do comportamento de um piso, em relação ao acúmulo de sujeira em sua superfície, de maneira mais precisa do que métodos utilizados atualmente para tal finalidade.

#### 4.3.5 Conclusões parciais

A avaliação comparativa das superfícies antes e após exposição ao tráfego de pedestres permitiu um entendimento mais profundo do papel dos aspectos de cada uma que influenciam sua resistência ao escorregamento e, também, as tendências de cada tipologia ao acúmulo de sujeira, desgaste e riscamento.

Uma das principais vantagens associadas ao uso de pisos com superfícies mais lisas e brilhantes é a praticidade, usualmente, envolvida na sua limpeza. Entretanto, o nível considerável de encardimento observado em algumas das amostras com essas características revela que essa não é uma verdade absoluta. Da mesma forma, nem sempre superfícies ásperas, mates e com granilhas secas, por exemplo, são susceptíveis a um elevado grau de encardimento. O acúmulo de sujeira apresentou melhor correlação com o número de picos locais do perfil do que com o número de picos definidos de forma convencional (porções acima da linha média). Isso é explicado pelo fato de que, entre picos locais, devido ao formato dos mesmos, formam-se cavidades estreitas dificilmente acessíveis pelos métodos de limpeza, favoráveis, portanto, ao acúmulo de sujidades.

Constatou-se, ainda, que os resultados de resistência ao manchamento obtidos em laboratório não se correlacionam bem com os níveis reais de encardimento observado pelas superfícies após o uso. Entretanto, a análise desses resultados, de forma crítica, em conjunto com parâmetros de rugosidade - como o número de picos locais presentes na superfície,  $P_c$ , e a distância entre eles,  $S$  - pode permitir a previsão mais fidedigna do acúmulo de sujeira real apresentado pelas superfícies em uso.

O estudo da forma como variam os diferentes aspectos da rugosidade das superfícies ao longo do seu tempo de uso revelou quais características superficiais são duráveis e quais tendem a ser alteradas, como ocorrem essas alterações e qual o efeito no desempenho do produto. A resposta da resistência ao escorregamento às mudanças observadas permitiu identificar, para cada tipologia, que características exercem efeito predominante na definição das suas

propriedades de atrito, em relação ao efeito de outros aspectos. Como os métodos de avaliação da resistência ao escorregamento retornam valores discordantes entre si, variáveis diferentes da superfície de uma mesma tipologia podem exercer papéis mais ou menos relevantes para os resultados de desempenho avaliados com cada um dos dispositivos de medida.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho, como pretendido, trouxe novas contribuições para o tema estudado, no que se refere à identificação das variáveis determinantes e das menos relevantes para a resistência ao escorregamento e outros aspectos do desempenho de pisos cerâmicos.

Constatou-se uma forte influência da ondulação e de diversos aspectos da rugosidade das superfícies na sua resistência ao escorregamento. O comportamento de atrito das amostras avaliadas variou significativamente entre superfícies de diferentes tipologias e entre amostras de uma mesma tipologia, mas com características distintas. Superfícies mais planas e brilhantes não são recomendáveis para uso em locais onde há riscos de escorregamento. Dentre as que apresentaram desempenhos mais satisfatórios, estão as texturizadas e as que receberam aplicação de granilhas secas e esmaltes mate. Microscopicamente, identificou-se a presença de picos elevados e íngremes nas superfícies dessas amostras, responsáveis pelo aspecto mais áspero das mesmas e pelo desenvolvimento de mecanismos de atrito mais eficazes na interface com o pé do pedestre. Além disso, devido à contribuição, não apenas com o desenvolvimento de mecanismos de atrito, mas, também, com a prevenção de filmes lubrificantes, desempenhos excelentes foram encontrados para pisos com rugosidade com características como as mencionadas acima sobrepostas a algum tipo de ondulação.

No entanto, há divergências significativas entre resultados de resistência ao escorregamento obtidos com métodos de avaliação distintos, devido aos diferentes princípios e condições de operação dos mesmos, que interferem nos mecanismos de atrito desenvolvidos na interface com o piso de várias formas, a depender das suas características superficiais. De modo geral, os resultados obtidos com o Pêndulo são inferiores aos dos deslizadores motorizados.

Parâmetros quantificadores de aspectos superficiais das amostras foram determinados por perfilômetros e correlacionados com sua resistência ao escorregamento. Observou-se à dificuldade de se prever o comportamento de atrito dos produtos cerâmicos com base em parâmetros que quantificam apenas

uma característica da sua superfície, visto que mais de uma variável afeta, simultaneamente, seu desempenho. Para isso, foram propostas equações desenvolvidas a partir da combinação de parâmetros identificados como relevantes para definição da resistência ao escorregamento das superfícies. Nesse sentido, equações mais complexas, obtidas da combinação de um maior número de parâmetros, mostraram-se mais adequadas para guiar a produção de superfícies cerâmicas com coeficiente de atrito elevado quando avaliadas pelos três métodos de medida, ao mesmo tempo.

Observou-se que, com o tempo de uso, aspectos das superfícies tipicamente favoráveis à sua resistência ao escorregamento são alterados devido ao desgaste e encardimento do produto, culminando na redução do seu coeficiente de atrito. Isso evidencia a necessidade de uma maior preocupação, por parte dos fabricantes, com a manutenção das propriedades técnicas dos pisos cerâmicos ao longo da sua vida útil, visando-se a redução dos riscos de acidente. Além disso, deve-se dar atenção para a manutenção das propriedades estéticas dos pisos, também significativamente alteradas com o uso para algumas amostras estudadas. Foram observadas mudanças de cor, alterações no brilho e surgimento de pontos escuros e riscos nas superfícies.

A resistência ao manchamento das amostras foi avaliada em laboratório para diversos agentes manchantes, mas o encardimento real observado para algumas das superfícies discorda dos resultados dos ensaios. No entanto, foi observada uma forte influência da presença de picos locais no nível de acúmulo de sujeira dessas superfícies. Assim, parâmetros de rugosidade relacionados aos picos locais foram associados aos resultados dos testes de manchamento e um novo índice foi desenvolvido para a previsão do comportamento de limpabilidade dos produtos.

As expressões matemáticas apresentadas neste estudo podem guiar o desenvolvimento de novos pisos na indústria cerâmica, com características específicas almejadas pelos fabricantes e desempenhos otimizados, em termos de resistência ao escorregamento, limpabilidade e durabilidade.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros relevantes para o tema estudado, sugerem-se:

- O desenvolvimento de novas superfícies cerâmicas com desempenho otimizado, guiado pelas contribuições do presente trabalho.
- O estudo do uso de materiais ou elementos superficiais que aumentem a resistência ao desgaste das superfícies cerâmicas.
- A coleta de parâmetros de rugosidade e resistência ao escorregamento de maior número de amostras de pisos cerâmicos para construção de banco de dados ainda mais abrangente, visando-se ao aprimoramento das expressões para previsão e controle do desempenho das superfícies.
- O desenvolvimento de softwares de simulação que utilizem expressões matemáticas (como as propostas neste estudo ou novas expressões aprimoradas) para projeto de superfícies cerâmicas com elevada resistência ao escorregamento e limpabilidade através da otimização de aspectos da sua rugosidade.
- O estudo de superfícies de pisos de outras naturezas com abordagem similar à do presente trabalho.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANFACER, WEBSITE. Disponível em <https://www.anfacer.org.br/mundial>. Acesso em julho de 2020.
- [2] MENEGAZZO, A. P. M., *et al.* Resistências ao Ataque Químico e ao Manchamento: Comparação dos Procedimentos e Resultados dos Ensaios das Normas ISO e ASTM, *Cerâmica Industrial*, 11 (2) Março/Abril, p. 19-32, 2006.
- [3] LI, K.W., *et al.* Floor slipperiness measurement: friction coefficient, roughness of floors, and subjective perception under spillage conditions. *Safety Science*. v. 42, p. 547-565, 2004.
- [4] GOVERNO DO BRASIL – SAÚDE, WEBSITE. Disponível em <http://www.brasil.gov.br/saude/2012/04/quedas>. Acesso em julho de 2020.
- [5] FONG, D.T. *et al.* Greater toe grip and gentler heel strike are the strategies to adapt to slippery surface. *Journal of Biomechanics*, v. 41, p. 838–844, 2008.
- [6] SILVA, G., BELTRÁN, A., MUÑOZ, A., ESCRIG, I., LLOBELL, C., SANCHÍS, M., LILLO, G., *Combinaciones Optimizadas de Pavimento Cerámico y Calzado para Entornos Laborales – Anais do Qualicer 2018, Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico, Castellón de la Plana, Espanha, 2018.*
- [7] WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO global report on falls prevention in older age. Geneva , 2007.
- [8] NASCIMENTO B.N., DUARTE B.V., ANTONINI DG, BORGES SM. Risco para quedas em idosos da comunidade: relação entre tendência referida e susceptibilidade para quedas com o uso do teste clínico de interação sensorial e equilíbrio. *Rev Soc Bras Clin Méd*, 7:95-9, 2009.
- [9] MONTEIRO, C.R., FARO, A. C. M., Avaliação funcional de idoso vítima de fraturas na hospitalização e no domicílio. *Rev Esc Enferm USP*; 443:719-24, 2010.
- [10] MEIRELES, A.E., PEREIRA, L.M.S., DE OLIVEIRA, T.G., CHRISTOFOLETTI, G., FONSECA, A. L., Alterações neurológicas fisiológicas ao envelhecimento afetam o sistema mantenedor do equilíbrio. *Rev Neurocienc*; 181:103-8, 2010.

- [11] NATIONAL FLOOR SAFETY INSTITUTE, WEBSITE Disponível em <https://nfsi.org/nfsi-research/quick-facts/>. Acesso em julho de 2020.
- [12] OBSERVATÓRIO DIGITAL DE SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO, WEBSITE. Disponível em <https://observatoriosst.mpt.mp.br/>. Acesso em junho de 2020.
- [13] GOVERNO DO BRASIL - ECONOMIA E EMPREGO, WEBSITE. Disponível em <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/07/numero-de-acidentes-de-trabalho-no-brasil-cai-14>. Acesso em julho de 2020.
- [14] SACHER, A. – “Slip Resistance and the James Machineo. 5. Static Coefficient of Friction-Sine QuaNon.” AFTM Standardization New, v.22, n.8, p. 52-59, 1993.
- [15] LOCKHART, T. An integrated approach towards identifying age-related mechanisms of slip initiated falls. J. Electromyogr. Kinesiol, v.18, n.2 , p.205–217, 2008.
- [16] BHUSHAN B. Introduction to Tribology. Wiley-Interscience: Toronto-Ontario, 2002.
- [17] SIEGMUND, G.P. *et al.* Utilized friction when entering and exiting a dry and wet bathtub, Gait Posture, v. 31 n. 4, p. 473–478, 2010.
- [18] KLEINER, A. F. R., Coeficiente de Atrito Requerido durante a Marcha Normal e Patológica, Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- [19] BARNETT, L. R., “Slip and Fall” Theory—Extreme Order Statistics, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, VOL. 8, NO. 2, 135–158, 2002.
- [20] LLOYD, D. G., Stevenson, M. G. - Investigation of floor surface profile characteristics that will reduce the incidence of slips and falls - IEAust. Transactions of Mechanical Engineering. 17. 99-105., 1992.
- [21] FAB CENTRAL DO MIT'S CENTER FOR BITS AND ATOMS, WEBSITE. Disponível em <http://fab.cba.mit.edu/classes/4.140/EECS/people/bubblz15/FinalProject/index.html>. Acesso em julho de 2020.

- [22] BLAU, P. J., - Friction Science and Technology - From Concepts to Applications, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [23] ANDERSON, C., & SENNE J., Walkway surfaces: Measurement of slip resistance, (Publication No. ASTM STP 649, pp. 71–87). Philadelphia, USA, American Society, for Testing and Materials (ASTM), 1978.
- [24] LEARNMECH - TRIBOLOGY, FRICTION MECHANISMS AND THEORIES, WEBSITE Disponível em <http://learnmech.com/tribology-2-friction-mechanisms-and/>. Acesso em julho de 2020.
- [25] CLARKE, J. D., HALLAS, K., LEWIS R., THORPE, S., HUNWIN, G., CARRÉ, M. J., Understanding the friction measured by standardised test methodologies used to assess shoe-surface slip risk. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(4), 723-734, 2015.
- [26] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física Vol. 1 – Mecânica. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13.006. Ceramic tiles – Definitions, classification, characteristics and marking. Genebra, Suíça, 2018. 2018.
- [28] ANFACER, WEBSITE. Disponível em <http://www.anfacer.org.br/#!/historia-ceramica/c207w>. Acesso em julho de 2020.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.817. Placas cerâmicas para revestimento: classificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.463. Placas cerâmicas para revestimento - Porcelanato. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- [31] ZAUBERAS, R. T.; GOMES, P. L. S.; DINIZ, C. A. R., BOSCHI, A. O. Planejamento estatístico de experimentos aplicado ao desenvolvimento de formulações para revestimentos cerâmicos. *Cerâmica [online]*, vol.50, n.313, 2004
- [32] INMETRO, WEBSITE. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/ produtos/revestimentos.asp>. Acesso em julho de 2020.
- [33] ANFACER, WEBSITE. Disponível em <http://www.anfacer.org.br/#!/vantagens/c2j>. Acesso em julho de 2020.

- [34] ALVES, H. J., Efeito da Porosidade Sobre o Manchamento de Porcelanato Polido. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- [35] ANNO J.N., WALOWTI, J.A., ALLEN, C.M., Micro Asperity Lubrication, J. Tribol. 90, 351-355, 1968.
- [36] ANNO J.N., WALOWTI, J.A., ALLEN, C.M., Load Support and Leak Age from Micro Asperity Lubricated Face Seals, Trans. ASMEJ. Lubr. Technol. 726-731, 1969.
- [37] WHITEHOUSE, D. J. Handbook of Surface Metrology. Philadelphia Institute of Physics Publishing, 1994.
- [38] SHEPHERD, M. *et al.* Injury Bulletin: Bathroom Injuries in Queensland. Queensland Injury Surveillance Unity. Queensland, n.91. mai. 2006.
- [39] MULLICK, A. Bathing for Older People with Disabilities. Buffalo, NY: State University of New York at Buffalo, 1999.
- [40] MAO, S.J. *et al.* Injuries associated with bathtubs and showers among children in the United States. Pediatrics. 124, (2), 541-547, 2009.
- [41] GRÖNQVIST, R. *et al.* Slip resistance versus surface roughness of deck and other underfoot surfaces in ships. Journal of Occupational Accidents, v. 13, p. 291-302, 1990.
- [42] SARIISIK, A. Safety analysis of slipping barefoot on marble covered wet areas. Safety Science, v. 47, p. 1417-1428, 2009.
- [43] INSTITUT DE PROMOCIÓ CERÀMICA, WEBSITE. Physico-Chemical Characteristics – Slip Resistance Test Methods. Disponível em <http://www.ipc.org.es>. Acesso em julho de 2020.
- [44] BESCHORNER, K. E., *et al.* Modeling Mixed-Lubrication of a Shoe-Floor Interface Applied to a Pin-on-Disk Apparatus. Tribology Transactions, v.52, n.4, p.560-568, 2019.
- [45] BESCHORNER, K. E., SINGH, G., A Novel Method for Evaluating the Effectiveness of Show-Tread Designs Relevant to Slip and Fall Accidents. Proceeding of The Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, v.56, n.1, p.2388-2392, 2012.

- [46] ROBINSON, J., ZHOU, Y., BHATTACHARYA, P. *et al.* Probing the molecular design of hyper-branched aryl polyesters towards lubricant applications. *Sci Rep* 6, 18624 (2016).
- [47] CHEN, C. *et al.* The Slip-resistance Effect Evaluation of Floor Roughness Under Different Liquid Viscosity. *Procedia Manufacturing*, v.3, p.5007-5012, 2015.
- [48] LI K.W., HSU Y.W., CHANG W.R., LIN C.H. Friction measurements on three commonly used floors on a college campus under dry, wet, and sand-covered conditions. *Saf Sci.* 45(9):980–92, 2007.
- [49] PARRA, B. S. *et al.* Rugosidade superficial de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 15-18, mar./abr. 2006.
- [50] ENGELS, M., Novas Possibilidades de Testes Práticos para Determinação da Resistência ao Escorregamento e Limpabilidade, *Cerâmica Industrial*, 20 (5/6) set/dez, 2016.
- [51] SAFETY DIRECT AMERICA, WEBSITE. Disponível em <https://safetydirectamerica.com/sliptestinstruments/>. Acesso em julho de 2020.
- [52] UNITED KINGDOM SLIP RESISTANCE GROUP (UKSRG). The Measurement of Floor Slip Resistance - Guidelines Recommended by the UK Slip Resistance Group, v.2, 2000.
- [53] ENGELS, M., Correlación de la Resistencia al deslizamiento y la Durabilidad con la Topografía Superficial, *Anais Qualicer* 2018.
- [54] HALLAS, K., *et al.* Comparison of site-based friction measurements and slip potential. in *Contemporary Ergonomics 2008: Proceedings of the International Conference on Contemporary Ergonomics (CE2008)*. Loughborough University, UK: Taylor and Francis. 2008.
- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818, Placas Cerâmicas – Especificações e Métodos de Ensaio, ABNT, 1997.
- [56] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI, B101.3 - Test Method for Measuring Wet DCOF of Common Hard-Surface Floor Materials, 2012.

- [57] HARRIS, G.W. AND SHAW, S.R., 1988. Slip resistance of floors: user's opinions, Tortus instrument readings and roughness measurement. *Journal of Occupational Accidents*, v.9, p. 287-298, 1987.
- [58] SOLUS CERAMICS ANTI-SLIP BROCHURE / RIBA PRODUCTS SELECTOR WEBSITE. Disponível em <https://www.ribaproductselector.com/solus-ceramics-anti-slip-brochure/17401/col765696/download.aspx>. Acesso em julho de 2020.
- [59] GLOBAL SAFE AU, CANAL YOUTUBE - disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=0x4tM83mBqg>. Acesso em 25/09/2020.
- [60] GERMAN NATIONAL STANDARD. DIN EN 51097, Testing of floor coverings; determination of the anti-slip properties; wet-loaded barefoot areas; walking method; ramp test. 1992.
- [61] GERMAN NATIONAL STANDARD. DIN 51130. Testing of floor coverings; determination of the anti-slip properties; workrooms and fields of activities with slip danger; walking method; ramp test. 2004.
- [62] KIM, I., NAGATA, H., Research on Slip Resistance Measurements - A New Challenge, *Industrial Health*, 46, 66–76. 2008.
- [63] BOWMAN, R. - Slip Resistance Testing - Zones of Uncertainty, QUALICER 2010.
- [64] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287:2002; Especificação Geométrica do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT. 2002.
- [65] DAGNALL, M. A., Exploring surface texture, Leicester, England, Ed. Rank Tylor Hobson Limited, 178p.1986.
- [66] WEST, P.E. Introduction to Atomic Force Microscopy - Theory / Practice / Application. 159p.
- [67] CARPINETTI, L. C. R.; GONÇALVES FILHO, E. V.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G., Rugosidade Superficial: Conceitos e Princípios de Medição. São Carlos: Apostila, pp. 51, Seção de Publicações da EESC-USP, 1996.

- [68] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6405:1988; Rugosidade das Superfícies. Rio de Janeiro, ABNT. 1988.
- [69] WEBSITE Olympus Scientific Solutions Americas Corp. Disponível em <https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>. Acesso em julho de 2020.
- [70] SKF, WEBSITE. Disponível em <https://www.skf.com/us/products/seals/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information/specifications-for-effective-sealing-systems/counter-surface-finish-properties/index.html>. Acesso em julho de 2020
- [71] BARTOLO, P. *et al.* Laser micromachining for mould manufacturing: I. The influence of operating parameters. *Assembly Automation* 26(3):227-234, Jun 2016.
- [72] CHANG, W. Preferred surface microscopic geometric features on floors as potential interventions for slip and fall accidents on liquid contaminated surfaces *Journal of Safety Research*, v. 35, n. 1, p. 71-79, 2004.
- [73] ZYGO, WEBSITE. Disponível em <https://www.zygo.com/library/papers/SurfText.pdf>. Acesso em julho de 2020.
- [74] WYKO, Manual Perfilômetros Wyko, 9800\_9300 Surface Profiler Setup and Operation Guide.
- [75] HUTCHINGS, I. M., - *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 1st edition, London, Edward Arnould, 1992.
- [76] WHITEHOUSE, D. *Surfaces and their measurement*, Kogan Page Science, London, 2004.
- [77] SOUZA, T. S. G., *Efeito da Rugosidade no Desgaste de Punções de Conformação a Frio*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 103p. 2016.
- [78] WYKO, Manual Perfilômetros Wyko - Wyko Profilers Advanced Analysis Package.
- [79] STEVENSON, M. G., HOANG, K., BUNTERNGCHIT, Y., LLOYD, D. – Measurement of slip resistance of shoes on floor surfaces, Part 1: Methods. *Journal of Occupational Health and Safety, Australia and NZ*. 5. p. 115-120.

- [80] CHANG, W. *et al.* Linear regression models of floor surface parameters on friction between Neolite and Quarry tiles. *Applied Ergonomics*, v41, n1, p.27-33, 2010.
- [81] SHAW, R.; LEMON, P.; THORPE, P. Development of a more accurate assessment of roughness parameters for flooring. Health and Safety Executive, Research Report 732, 2009.
- [82] UK SLIP RESISTANCE GROUP – The assessment of Floor Slip Resistance, The UK Slip Resistance Group Guidelines, 5ª edição, Reino Unido, 36p. 2016.
- [83] LEACH R., *Characterisation of Areal Surface Texture*, ISBN 978-3-642-36457-0, Springer-Verlag Berlín Heidelberg, 2013.
- [84] TARI G., BRASSINGTON K., TENAGLIA A., THORPE S., ENGELS M., “SlipSTD Publicly Available Specification (SlipSTD PAS)- Classification of hard floor coverings according to their contribution to reduce the risk of pedestrian slipping”, autorizado por el SlipSTD Steering Committee, 2009.
- [85] MUÑOZ, A., SILVA, G., DOMINGUEZ, R., GILABERT, J., LÓPEZ, M., SEGURA, M.C., “Analysis of the life span of flooring slip resistance performance”. *Anais do Qualicer*. 2014.
- [86] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. Método para la determinación del valor de la resistencia al deslizamiento/resbalamiento de los pavimentos pulidos y sin pulir. UNE ENV 12633. Madrid, España, 2003.
- [87] INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *Ceramic Tiles: Determination of chemical resistance*, ISO 10545-1. Genebra, Suíça 1995.
- [88] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS, ASTM. *Standard Test Method for Determination of Resistance of Ceramic Tile to Chemical Substances: ASTM C 650*. United States, 2004.
- [89] ENCYCLOPEDIA BRITANNICA WEBSITE. Disponível em <https://www.britannica.com/science/coefficient-of-determination>. Acesso em julho de 2020.