

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Ramom Angelo Mezari

**MECANISMOS DE REMOÇÃO NO PROCESSO DE
BRUNIMENTO PLANO ROTATIVO DE PORCELANATOS.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr.-Ing. Márcio Celso Fredel
Co-orientador: Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingartner

Florianópolis
2013

Catlogação na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca Central.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

<http://www.bu.ufsc.br/design/Catalogacao.html>

Ramom Angelo Mezari

MECANISMOS DE REMOÇÃO NO PROCESSO DE BRUNIMENTO PLANO ROTATIVO DE PORCELANATOS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 02 de dezembro de 2013.

Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr.-Ing. Márcio Celso Fredel
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr.-Ing. Walter L. Weingaertner
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr.Eng. Joel Martins Crichigno Filho
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Orestes Estevam Alarcon
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Adriano Michael Bernardin
Universidade do Extremo Sul Catarinense

*“Se eu perguntasse o que eles
queriam, teriam dito: um cavalo mais rápido”*

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família. A meus pais Angelo Mezari e Marlene S. Mezari, e irmãos, Gislane Mezari e Willian Mezari, por serem os responsáveis pela pessoa e o profissional que sou.

À minha noiva Joana Egger Dembogurski pelo apoio, compreensão e por ser um ombro no qual pude apoiar-me durante estes anos de mestrado.

Ao meu orientador e Professor, Márcio Celso Fredel, pela orientação, confiança e oportunidade.

Aos Professores Walter L. Weingartner e Fábio J. P. Sousa, pelo suporte técnico e ensinamentos, os quais foram primordiais no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e companheiros de pesquisa Rafael F. S. Pereira, David Souza Machado, André Cabral e Pablo Lia Fook, Fernando Peixoto, por todo auxílio e pelas longas e produtivas horas de discussões.

Aos estudantes graduandos Cátia Chiamulera, Henrique Tajiri, Arthur Santos pelo auxílio na realização dos experimentos.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão, LMP pela disponibilização de sua estrutura, principalmente ao técnico Helio e ao Prof. Dr. Rolf Bertrand Schroeter.

Aos Professores da UDESC, Dr. Fernando Lafratta e Dr. Ricardo Zanon, por contribuírem também ao disponibilizar seus equipamentos.

Aos meus amigos em geral, por me apoiarem e ajudarem em todos os momentos.

Às empresas parceiras, Cecrisa S.A., na pessoa de Wenceslau Neves, e Fabrás Abrasivos.

Ao CNPQ e CAPES pelo fornecimento da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

As propriedades estéticas e mecânicas diferenciadas do porcelanato possibilitaram sua ascensão no mercado de revestimentos cerâmicos. Contudo, a sua principal etapa produtiva e responsável pelo ganho de brilho, o brunimento plano rotativo, se baseia em conhecimentos empíricos, culminando em um elevado custo de processo que representa até 40% do total gasto na produção. A necessidade de informações técnicas e científicas que possam ser úteis para aumento na eficiência do processo motivou a realização deste trabalho. Buscou-se então descrever os fenômenos presentes no brunimento plano-rotativo de porcelanatos. O processo industrial foi reproduzido em escala laboratorial através de um tribômetro capaz de simular integralmente a sua cinemática, sendo monitoradas as mudanças na rugosidade que levam ao aumento de brilho da superfície. Tal monitoramento avaliou além da rugosidade média R_a , parâmetros que descrevem de maneira mais eficiente as características das asperidades, como o coeficiente de assimetria R_{sk} e a curtose R_k da distribuição de alturas dos picos e vales. Os parâmetros R_{sk} e R_k , quando relacionados em um gráfico, geraram o espaço morfológico do processo, descrevendo a morfologia das asperidades e permitindo identificar o predomínio de vales em relação ao número de picos no perfil, além de indicar a existência de uma mudança no mecanismo de desgaste em abrasivos com granulometria a partir de 600mesh. Esta transição de mecanismo explica a maior influência da granulometria abrasiva nos valores de brilho e rugosidade com o uso de abrasivos entre 600 e 1500 mesh. Ainda nesta faixa de granulometria, os resultados obtidos foram correlacionados com o modelo matemático de Hutchings que descreve o ganho de brilho em função do tempo de brunimento, permitindo o cálculo do número de contatos entre abrasivos e porcelanato necessários para que se atinjam valores próximos à saturação do brilho (235 contatos para 600mesh até 650 contatos para 1500mesh). A partir destes dados foi proposta uma otimização do processo que resultou em brilho final muito próximo ao obtido em um processo prolongado que atinge a saturação do brilho (66,7G e 69,4G, respectivamente). Testes excluindo granulometrias da sequência de brunimento demonstraram que abrasivos mais finos tem maior influência no brilho final e, conseqüentemente, no surgimento dos defeitos chamados de “sombras de polimento”. Dada à importância da transição de desgaste dúctil-frágil nas propriedades morfológicas da superfície, também foi realizado um mapeamento dos mecanismos de desgaste por meio de testes de riscamento. Este estudo revelou que a carga normal onde ocorre a transição se manteve constante

até velocidades de 35mm/s, acima deste valor, pressões cada vez menores são suficientes para que haja nucleação e propagação de trincas causadoras de lascamentos.

Palavras-chaves: polimento; brunimento plano rotativo; porcelanato; mecanismo de desgaste; rugosidade; espaço morfológico.

ABSTRACT

Distinct aesthetic and mechanical properties of porcelain stoneware granted its rise in the ceramic tiles market. However, the main production step and responsible for gloss development, which is honing, accounts for up to 40% of total manufacturing cost. That fact, in addition to paucity of technical acknowledgement and scientific information, are the motivation of this work, which aims to expand knowledge in this field, regarding phenomena present in plan-rotating porcelain honing. The industrial process has been reproduced in laboratory scale using a tribometer able to simulate the fully kinematics used in industry. Changes in roughness that led to increased surface glossiness were tracked. This monitoring evaluated the average roughness R_a and parameters that efficiently characterize the asperities, such as skewness R_{sk} and kurtosis R_k from the distribution curve of peaks and valleys heights. Plotting R_{sk} versus R_k in a chart, the morphological space of the process is generated, describing the asperities morphology, what allowed identifying the predominance of valleys over peaks on the surface profile, as well as indicated a wear mechanism transition for abrasives sizes smaller than 600mesh. This mechanisms switch-over was the reason for the increasing influence of abrasive granulometry on glossiness and roughness value using abrasives between 600 and 1500 mesh. Yet in this range of particle size, the results were correlated with the Hutchings mathematical model that describes the brightness gain versus honing time. It enabled to calculate the number of contacts between abrasives and tile required to reach glossiness near its saturation (235 contacts for 600mesh to 650 contacts for 1500 mesh). From these data, it was proposed a process optimization that obtained glossiness quite close to the one achieved in a longstanding process for gloss saturation (66,7G and 69,4G, respectively). Tests have shown that the finer abrasives has a greater influence on the final glossiness and, hence, on the appearance of the so called “polishing shadows” defect. Given the importance of the ductile-brittle wear transition on the surface morphology, it has been performed a mapping of wear mechanisms by means of scratching tests. This experiment revealed that normal load for wear mechanism transition remains constant for scratch speeds up to 35mm/s, for higher velocities, declining pressures are enough to promote nucleation and propagation of cracks that cause chipping.

Keywords: polishing; honing; porcelain; wear mechanisms; roughness; morphological space.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais produtores mundiais no mercado de revestimentos cerâmicos	19
Figura 2 - Proporção dos minerais básicos em diferentes materiais cerâmicos.	22
Figura 3 - Prensagem uniaxial a) simples efeito; b) duplo efeito	24
Figura 4 - Comparação entre a os gradientes de densidade aparente após a compactação com efeito simples (esq.)e duplo efeito (dir.).....	24
Figura 5 - Variação da pressão de compactação no molde devido ao atrito entre partículas.....	25
Figura 6 - Esquema demonstrando a remoção de material na retificação.	28
Figura 7 - Diferentes processos de retificação para diferentes aplicações.	28
Figura 8 - Dinâmica do processo de lapidação em materiais frágeis.	29
Figura 9 - Linha industrial de brunimento plano rotativo de porcelanatos.	31
Figura 10 - a) Representação da geometria dos cabeçotes; b) geometria dos blocos abrasivos.....	31
Figura 11 - Influência do carregamento no desenvolvimento de brilho em função do tempo de brunimento.	33
Figura 12 - Efeito das asperidades no caminho ótico da luz.	35
Figura 13 - Efeito da diminuição do tamanho do abrasivo na rugosidade R_a e no brilho em porcelanatos.....	36
Figura 14 - Influência do tempo de brunimento a) no brilho; e b) na rugosidade.	37
Figura 15 - Sombras de polimento.....	38
Figura 16 - Perfil de brunimento e brilho provocado pela geometria do cabeçote no brunimento plano rotativo.....	39
Figura 17 - Cinemática do brunimento plano rotativo de porcelanato; a) Deslocamento do porcelanato, oscilação e rotação do cabeçote; b) movimento de oscilação angular do abrasivo (<i>swing</i>).	39
Figura 18 - Esquema demonstrando a sobreposição das trilhas de brunimento.	40
Figura 19 - Trajetória de uma única partícula abrasiva no processo de brunimento plano-rotativo.	41
Figura 20 - a) Padrão de brilho medido na indústria e b) simulação de tempo de brunimento.....	41
Figura 21 - Padrões de brunimento simulados para diferentes condições cinemáticas.	42
Figura 22 - Mapeamento do efeito das condições cinemáticas na distribuição do tempo de brunimento.	42
Figura 23 - Deformação permanente dos cristais por a) escorregamento de cristais e b) maclação.....	44
Figura 24 - Nucleação e propagação de trincas causadas por endentação em materiais cerâmicos.	46
Figura 25 - Fenômeno de remoção de material frágil devido ao movimento relativo entre abrasivo e superfície.	47
Figura 26 - Mecanismos de desgaste.	49

Figura 27 - Definição dos parâmetros necessários para o cálculo do fator f_{ab} .	49
Figura 28 - Regimes de desgaste em alumina a) sem lubrificante e b) com lubrificação.	50
Figura 29 - Características e camadas típicas de uma superfície.	52
Figura 30 - Descrição da textura de uma superfície.	53
Figura 31 - Esquema do funcionamento de rugosímetro apalpador.	54
Figura 32 - Efeito da compressão horizontal na medição de rugosidade. a) perfil real e b) leitura do apalpador.	55
Figura 33 - Efeito de filtro mecânico de apalpadores.	55
Figura 34 - Esquema mostrando o funcionamento de interferômetros para análise de superfícies.	56
Figura 35 - a) esquema descrevendo microscópio confocal; b) construção de imagens.	57
Figura 36 - Definição conceitual do parâmetro R_a .	58
Figura 37 - Definição geométrica dos parâmetros R_t , R_p , R_v e R_z .	59
Figura 38 - Superfícies com o mesmo valor de R_a , porém com características completamente distintas.	60
Figura 39 - Representação da relação entre coeficiente de assimetria R_{sk} , distribuição, e o perfil de rugosidade em superfícies.	63
Figura 40 - Representação da relação entre curtose R_{ku} , distribuição, e perfil de rugosidade em superfícies.	64
Figura 41 - Espaços morfológicos típicos para vários processos.	65
Figura 42 - Características da superfície de acordo com a região no espaço morfológico.	65
Figura 43 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando poros, cristais de quartzo e mulita na microestrutura do porcelanato.	70
Figura 44 - Tribômetro desenvolvido no LMP/UFSC e sua cinemática.	71
Figura 45 - Dispositivo desenvolvido por Olenburg para conferir o movimento de <i>swing</i> ao tribômetro no instituto FBK-Kaiserslautern.	73
Figura 46 - Característica mecânica que permite o movimento de afiação do abrasivo.	73
Figura 47 - Perfil de brunimento e brilho provocado pela geometria do cabeçote de brunimento.	75
Figura 48 - Separação dos porcelanatos em amostras com diferentes números de contatos. Ex. 46mesh.	77
Figura 49 - Princípio de medida do brilhômetro.	79
Figura 50 - Dano causado pelo movimento relativo entre a superfície do porcelanato e o indentador.	80
Figura 51 - Esclerômetro utilizado para os testes de riscamento.	81
Figura 52 - Efeito da granulometria do abrasivo na rugosidade e no brilho.	82
Figura 53 - Efeito da diminuição do tamanho do abrasivo na rugosidade R_a e no brilho em porcelanatos obtidos por Hutchings (2005a).	83
Figura 54 - Efeito do diâmetro do abrasivo na rugosidade e no brilho.	84
Figura 55 - Comparação entre modelo da taxa de remoção apresentado por Hutchings e os resultados obtidos no tribômetro.	85

Figura 56 - Diminuição da rugosidade em função do número de contatos para diferentes granulometrias (mesh): a) Etapas de preparação da superfície (36 a 400mesh) e b) Etapa de ganho de brilho (600 a 1500mesh).	87
Figura 57 – Ganho de brilho em função do número de contatos para a) etapas de preparação da superfície (36 a 400mesh) e b) etapa de ganho de brilho (600 a 1500mesh) correlacionadas ao modelo proposto por Hutchings (linhas tracejadas)	89
Figura 58 - Influência da eliminação de granas na sequência de brunimento plano rotativo.	91
Figura 59 - Espaço morfológico do processo de brunimento plano rotativo de porcelanato. Dados separados segundo a separação de etapas proposta por Bittencourt (Bittencourt, 2002).	93
Figura 60. Variação dos parâmetros a) coeficiente de assimetria e b) curtose em função da diminuição do tamanho de abrasivo.	94
Figura 61 Variação dos parâmetros a) coeficiente de assimetria beta e b) curtose beta em função da diminuição do tamanho de abrasivo.	95
Figura 62 - Microscopia confocal de risco realizado na superfície do porcelanato. Indentador Vickers; 50mm/s; 1N.	96
Figura 63 - Evolução do coeficiente de assimetria Rsk com o número de contatos Nc.	97
Figura 64 - Hipótese que explicaria o comportamento da curva mostrada na Figura 64.	98
Figura 65 - Morfologia dos riscos causados por indentador Vickers, 50mm/s: a) 4,5N, b) 3,0N, c) 2,0N, d) 1,0N.	99
Figura 66 - Mapeamento dos mecanismos de desgaste em porcelanatos	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos tipos de revestimento cerâmicos, em relação à absorção de água, de acordo com a ISO13006/NBR131818.	20
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos porcelanatos.	70
Tabela 3 - Condições cinemáticas do brunimento plano rotativo.	76
Tabela 4 - Condições de contato empregadas no brunimento plano rotativo....	76
Tabela 5 – Número de contatos Nc a que cada amostra foi submetida.	78
Tabela 6 - Parâmetros utilizados nos testes de riscamento.	81
Tabela 7. Número de contatos em cada granulometria, para brunimento plano rotativo baseado nos experimentos mostrados na Figura 58b.	90

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

A	Área de contato abrasivo/superfície	[m ²]
A ₁	Material removido para a lateral do sulco.	[m ²]
A ₂	Material removido para a lateral do sulco.	[m ²]
A _v	Material removido do sulco.	[m ²]
Aa	Absorção de água	[%]
b	½ comprimento do contato elástico de Hertz.	[m]
D	Diâmetro externo do cabeçote.	[m]
d	Diâmetro interno do cabeçote.	[m]
E ₁	Módulo de elasticidade da pedra abrasiva	[MPa]
E ₂	Módulo de elasticidade do porcelanato	[MPa]
e	Espessura da pedra abrasiva	[m]
F	Frequência de rotação do cabeçote	[s ⁻¹]
<i>f_{ab}</i>	Relação entre material removido e deslocado plasticamente.	
G	Brilho	[G]
G ₀	Brilho Inicial	[G]
G _∞	Brilho infinito	[G]
HV	Dureza Vickers	[GPa]
K _{IC}	Tenacidade à fratura	[MPa.m ^{1/2}]
K _β	Curtose beta	
L	Comprimento da pedra abrasiva	[m]
l	Comprimento da medição	[m]
N	Número de partículas em contato com a superfície	
N _c	Número de contatos entre abrasivo e um ponto específico superfície	
m	Coefficiente de confiabilidade de Weibull	
m _n ^c	Momento central de ordem “n”	
n _{abr}	Número de abrasivos no cabeçote	
P ₁	Pressão linear	[N.m ⁻¹]
p	Pressão de máxima de contato efetiva	[MPa]
p()	Função densidade de probabilidade	
P()	Distribuição cumulativa	
Q	Volume de material removido	[m ³]
P _c	Pressão de capilaridade	[Pa]
P _g	Pressão do gás no interior dos poros	[Pa]
R	Raio de curvatura da pedra abrasiva	[m]
R _a	Rugosidade média	[μm]
R _{ku}	Curtose da distribuição de altura das asperidades	
R _p	Maior pico do perfil.	[μm]
R _q	Desvio padrão das asperidades	[μm]

R_{sk}	Coeficiente de assimetria	
R_t	Maior distância pico - vale	[μm]
R_v	Maior vale	[μm]
$R(t)$	Rugosidade em função do tempo	[μm]
R_0	Rugosidade inicial	[μm]
R_∞	Rugosidade infinita.	[μm]
$S_{k\beta}$	Coeficiente de assimetria beta	
t	Tempo	[s]
t_p	Coeficiente de escoramento	[%]
v_{abr}	Velocidade de corte do abrasivo	[m.s^{-1}]
v_c	Velocidade de corte	[m.s^{-1}]
v_{desl}	Velocidade de deslocamento do porcelanato	[m.s^{-1}]
W	Carga normal aplicada	[N]
w^*	Carga crítica para nucleação de trincas	[N]
z	Altura da asperidades	[μm]

Alfabeto Grego

α_1	Constante relacionada à geometria do abrasivo	
α_2	Constante relacionada à geometria do abrasivo	
α_2	Constante relacionada à geometria do abrasivo	
α	Ângulo de inclinação do porta-amostra abrasivo	[°]
β	Função Beta	
β_1	Coeficiente de Pearson	
σ_0	Resistência à flexão característica (análise de Weibull)	[MPa]
σ	Desvio padrão	
ε	Porosidade	
η_s	Viscosidade efetiva do sistema	[N.s/m^2]
ν_1	Coeficiente de Poisson da pedra abrasiva	
ν_2	Coeficiente de Poisson do porcelanato	
λ	Comprimento de onda.	
Υ_2	Coeficiente de Fischer	[m]
θ	Ângulo de incidência.	[°]
τ_1	Tempo característico de redução da rugosidade	[s]
τ_2	Tempo característico do ganho de brilho	[s]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	OBJETIVOS.....	16
1.1.1.	Objetivo Geral	16
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1.	PORCELANATO TÉCNICO	19
2.1.1.	Aspectos mercadológicos.....	19
2.1.2.	Características técnicas.....	20
2.1.3.	Processo de produção do porcelanato	21
2.2.	PROCESSO DE USINAGEM E GANHO DE BRILHO EM PORCELANATOS.....	27
2.2.1.	Usinagem com ferramenta de geometria não definida.....	27
2.2.2.	O processo de brunimento plano rotativo em placas de porcelanato.....	31
2.2.3.	Brilho.....	34
2.3.	CINEMÁTICA DO PROCESSO DE BRUNIMENTO PLANO ROTATIVO DE PORCELANATOS.....	38
2.4.	MECANISMOS DE REMOÇÃO	43
2.4.1.	Plasticidade em materiais cerâmicos e vítreos	44
2.4.2.	Remoção por nucleação e propagação de trincas	45
2.4.3.	Identificação dos mecanismos de remoção por abrasão.....	48
2.5.	ANÁLISE DE SUPERFÍCIES	51
2.5.1.	Introdução ao conceito de superfícies	51
2.5.2.	Rugosidade e parâmetros estatísticos	53
2.5.3.	Medição da rugosidade.....	54
2.5.4.	Estatística aplicada à descrição da rugosidade	57
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	69

3.1.	CARACTERIZAÇÃO DO PORCELANATO	69
3.2.	TRIBÔMETRO – BANCADA PARA O BRUNIMENTO PLANO ROTATIVO.....	71
3.2.1.	Blocos abrasivos	74
3.2.2.	Parâmetros de ensaio e planejamento para simulação do processo.	74
3.2.3.	Planejamento do experimento.....	77
3.2.4.	Medição dos resultados	78
3.3.	TESTES DE RISCAMENTO – MAPEAMENTO DE MECANISMOS DE DESGASTE.	80
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1.	EVOLUÇÃO DA SUPERFÍCIE NO PROCESSO DE BRUNIMENTO DE PORCELANATOS.	82
4.1.1.	Reprodução do processo em escala laboratorial.	82
4.1.2.	Influência do número de contatos abrasivo-porcelanato.	86
4.1.3.	Influência da granulometria abrasiva nos defeitos de sombra	91
4.1.4.	Espaço morfológico do processo.	92
4.1.5.	Mudança da morfologia das asperidades em função do número de contatos.....	97
4.2.	TRANSIÇÃO DO MECANISMO DE REMOÇÃO EM PORCELANATOS - MAPEAMENTO.....	99
5.	CONCLUSÕES	102
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
7.	REFERÊNCIAS.....	106

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do porcelanato técnico no final década de 80 foi a maior revolução do setor de revestimentos cerâmicos desde a introdução da monoqueima (Heck, 1996), sendo inclusive considerado por Espósito (2005) como o melhor produto já desenvolvido no setor.

Desde então os porcelanatos vêm ganhando mercado, principalmente em substituição às pedras ornamentais, aplicação para a qual o alto brilho desenvolvido na etapa de acabamento (denominada de polimento no meio industrial) confere um apelo estético (Hutchings, 2006).

Apesar de ser um produto com grau tecnológico superior aos demais revestimentos cerâmicos e com recentes, embora poucos, trabalhos científicos (Hutchings, 2005a, Orts, 2001) a etapa de acabamento do porcelanato ainda se baseia na aplicação de conhecimentos empíricos ou trazidos de outros materiais (pedras ornamentais e vidros) e na experiência dos funcionários (Hutchings, 2006; Ibáñez, 2002; Tucci, 2000).

Neste contexto fica clara a existência de grande oportunidade para desenvolvimento de conhecimentos técnico-científicos que propiciem uma otimização do processo, principalmente quando levado em consideração o fato de que apenas a etapa de polimento seja responsável por até 40% do custo total de produção (Hutchings, 2005a).

Dentre os fatores que elevam o custo do processo podem ser citados, por exemplo, o alto consumo ferramental (0,5 – 0,6 kg de abrasivo para cada m^2 de porcelanato produzido) (Hutchings, 2005a), o desgaste de até 10% da espessura da placa cerâmica (Orts, 2001), o dispêndio de 20 a 40 litros de água por m^2 , além de também não conformidades, como quebras, manchas e riscos.

Estudos vêm sendo realizados para contornar a lacuna de conhecimentos da área. Hutchings (Hutchings, 2005a, 2005b, 2006), simulou o processo em escala laboratorial e estudou a relação tamanho de abrasivo versus rugosidade R_a versus brilho, levantando possibilidades de otimização da sequência de granulometrias abrasivas. Contudo, utilizou uma cinemática que não contemplava as mesmas movimentações encontradas na indústria e, ainda, a rugosidade foi expressa apenas em termos da rugosidade média R_a , o que segundo alguns autores (Thomas, 1999; Whitehouse, 2011) não fornece informações suficientes para uma completa descrição da superfície.

Com intuito de melhorar a compreensão sobre o tema e criar ferramentas para otimização do processo de acabamento de

porcelanatos, foi criado, no escopo do programa BRAGECRIM (Brazil-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology), uma parceria entre Universidade Federal de Santa Catarina e a *Technische Universität Kaiserslautern* que vem sistematicamente desenvolvendo estudos nesta área.

Um dos frutos desta parceria foi a simulação computacional do brunimento plano rotativo de porcelanatos desenvolvida por Sousa (2007abcd; 2008; 2009). Com ela é possível prever o tempo de brunimento em cada região da superfície, através de modelos que levam em conta os parâmetros cinemáticos do processo, e assim atenuar a dispersão de brilho na superfície das placas cerâmica (defeito conhecido como “sombas de polimento”).

Paralelamente, outros estudos estão sendo realizados abordando características ferramentais e de lubrificação (Pereira, 2013), cujos resultados poderão ser diretamente utilizados no aperfeiçoamento dos modelos, ou então mostrar caminhos a serem seguidos para um aumento da eficiência do processo. No presente trabalho serão estudadas as mudanças ocorridas na superfície as quais culminam no ganho de brilho do porcelanato durante a produção.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho visa um melhor entendimento do comportamento da rugosidade durante o processo de brunimento plano rotativo de porcelanato e suas influências nas propriedades de brilho da placa cerâmica. Busca-se então descrever o processo de mudança nas características das asperidades durante o brunimento plano rotativo e levantar informações que possam vir a serem usadas em futuras otimizações, principalmente através da simulação computacional.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Reproduzir processo industrial em escala laboratorial.
- Descrever mais detalhadamente a evolução da superfície do porcelanato durante as etapas de acabamento através da adição de

parâmetros estatísticos à caracterização da rugosidade, como a curtose e coeficiente de assimetria.

- Verificar a influência e contribuição do tamanho de abrasivo no aparecimento dos defeitos de sombra através eliminação de granulometrias na sequência de brunimento.

- Identificar a influência dos mecanismos de remoção na morfologia da superfície e realizar o mapeamento da transição destes mecanismos.

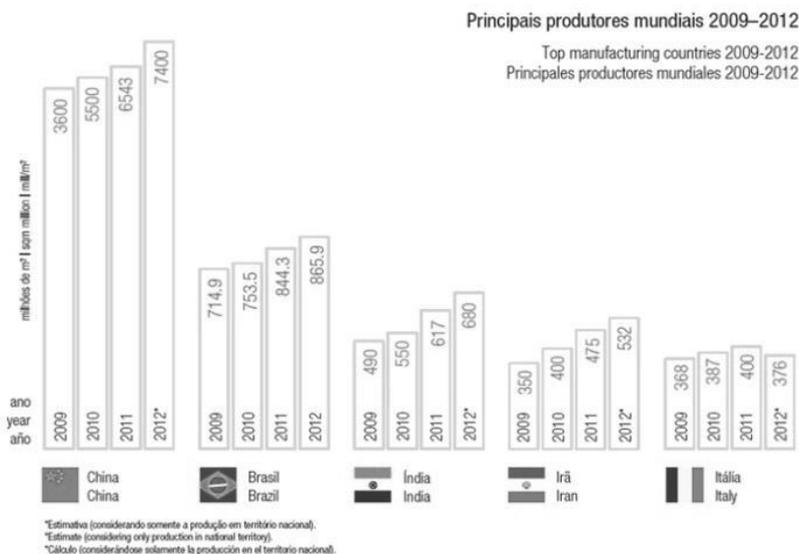
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PORCELANATO TÉCNICO

2.1.1. Aspectos mercadológicos

Nos últimos anos o Brasil se tornou o segundo maior produtor (865,9 milhões de m²) e o segundo maior mercado consumidor (803 milhões de m²) de revestimentos cerâmicos, como mostra a Figura 1, ficando apenas atrás da gigantesca produção chinesa (7,4 bilhões m²) (Anfacer, 2013).

Figura 1 - Principais produtores mundiais no mercado de revestimentos cerâmicos



Fonte: Anfacer, 2013.

Contudo, neste mesmo período ocorreu uma queda nas exportações, passando de 102 milhões de m² em 2007 para 58 milhões em 2012 (Anfacer, 2013). Apesar desta queda no volume de exportações, o faturamento praticamente se manteve, devido a um

aumento no valor do produto e o comércio de produtos de maior valor agregado (Anfacer, 2013), a exemplo do porcelanato técnico (Hutchings, 2006), que se diferencia do porcelanato comum (esmaltado) por não possuir camadas vítreas decorativas, e sim uma superfície brunida.

2.1.2. Características técnicas.

O alto valor agregado do porcelanato técnico em relação aos demais revestimentos cerâmicos é justificado por suas características técnicas (Oliveira, 1998; Rosso, 2005; Wiggers, 2007; Sánchez, 2009).

Primeiramente, este tipo de produto se destaca por sua baixa absorção de água, sendo assim definido como BIA pela norma ISO13006/NBR131818 (Tabela 1), ou seja, sua conformação é via prensagem e tem absorção de água, Aa, menor que 0,5%. Na prática, o mercado é mais exigente, sendo assim definido que a absorção seja menor que 0,1% (Anfacer, 2013; Rosso, 2005).

Tabela 1 - Classificação dos tipos de revestimentos cerâmicos, em relação à absorção de água, de acordo com a ISO13006/NBR131818.

Tipologia de Produto	Absorção de Água Aa(%)	Classificação por Absorção
Porcelanato	até 0,5	BIa
Grês	0,5 a 3,0	BIb
Semi-grês	3,0a 6,0	BIa
Semi-porosa	6,0 a 10,0	BIb
Poroso	> 10,0	BIII

Aliada à baixa absorção de água, o porcelanato conta ainda com elevada resistência mecânica, sendo sua tensão característica de ruptura em ensaios de flexão σ_0 entre 70 – 90 MPa, e módulo elástico E em torno de 60 – 65 GPa (Espósito, 2005).

O fato de possuir alta dureza (Espósito, 2005) contribui para o alcance de excelente resistência à abrasão, uma característica crucial, haja vista a função de revestimento para chão, usado amplamente em ambientes com alto tráfego de pedestres.

Esta alta resistência mecânica é atingida devido à presença de cristais duros em sua microestrutura, como quartzo e mulita, que se cristaliza em formato de agulhas, formando uma espécie de esqueleto na cerâmica (Rosso, 2005; Espósito, 2005; Carty, 1998).

Contribui ainda diretamente para as propriedades diferenciadas do porcelanato a sua baixa porosidade global menor que 10% (Sánchez, 2009). Já a porosidade aberta inferior à 0,5%, confere boa resistência ao manchamento ao produto.

Apesar das características mecânicas, o principal atrativo deste revestimento cerâmico é seu apelo estético, podendo facilmente substituir pedras naturais, ainda mais quando brunido, processo que o faz apresentar alto brilho e fácil limpeza (Hutchings, 2006; Oliveira, 1998; Sánchez, 2009).

Qualidades como as citadas acima somente são possíveis devido ao uso de matérias-primas diferenciadas e também a um processo de produção tecnologicamente mais apurado.

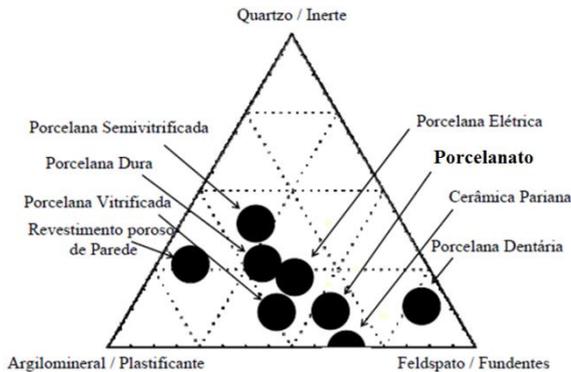
2.1.3. Processo de produção do porcelanato

Apesar de o acabamento ser a etapa produtiva que confere brilho à superfície, os processamentos anteriores também exercem influência, principalmente aqueles que afetam a densificação e a porosidade não só da superfície, mas também interna, já que durante o desgaste, poros internos são expostos. Hutchings (2006) demonstrou que a porosidade é um fator limitante para o ganho de brilho, afinal, os poros não refletem a luz incidente.

Matérias-primas

Porcelanatos são basicamente compostos por três grupos de materiais: argilas, fundentes e refratários, em uma proporção 25-35%, 50-60% e 5-10%, respectivamente (Oliveira, 1998; Espósito, 2005), como visto na Figura 2.

Figura 2 - Proporção dos minerais básicos em diferentes materiais cerâmicos.



Fonte. De Nonni, 2007.

Argilas: ílíticas caulínicas, as quais têm função de conferir plasticidade, aumentando a resistência a verde e também a conformabilidade na etapa de prensagem (Oliveira, 1998). Ao final da queima, também contribuem para a cristalização mulita (Sánchez, 2009).

Fundentes: alumino-silicatos como feldspato e talco, possuem baixa temperatura de fusão, favorecendo a formação de fase líquida durante a queima, o que é primordial para uma alta densificação e diminuição da porosidade. (Rosso, 2005).

Refratários: Estes minerais, quartzo e quartzitos, são responsáveis pela estabilidade térmica e dimensional, podendo ser incorporados à rede vítrea ou permanecer na forma de cristais (Sanchez, 2009).

Como este tipo de revestimento não recebe uma camada vítrea decorativa, são utilizadas três técnicas para tal finalidade: mistura de pós coloridos na massa, duplo carregamento de pós coloridos ou aplicação de sais solúveis de íons cromóforos (Bresciani, 1998).

Moagem

A moagem tem como objetivo primário a obtenção de partículas mais finas, desta forma aumentando a área superficial específica, e, conseqüentemente, elevando a reatividade do pó durante a queima

(Richerson, 2005). Após a cominuição, o diâmetro médio do pó é de 15 – 20 μm (Oliveira, 1998).

Alguns cuidados devem ser tomados durante a moagem, pois, caso ela seja excessiva pode prejudicar não somente a compactação do pó, devido a uma baixa escoabilidade, como também causar retração demasiada durante a sinterização (Rosso, 2005).

Esta etapa é também a responsável pela homogeneização das matérias-primas (Richerson, 2005).

Atomização

A barbotina resultante da moagem não pode ser secada e conformada diretamente, suas partículas são muito finas, o que às confere baixa escoabilidade. Para contornar esta característica, é realizado o processo de atomização, onde, dentro do atomizador, a suspensão é aspergida na presença de um fluxo de ar quente, causando ao mesmo tempo a eliminação da água (reduz a umidade para 6-10%) e o aglomeração das partículas, agindo assim como uma granulação (Negre, 2002; Richerson, 2005).

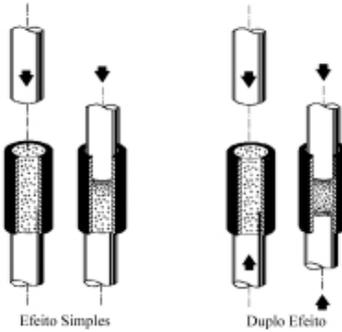
Prensagem

A prensagem é etapa onde ocorre, além da conformação, a diminuição da porosidade interna da placa cerâmica (Heck, 1996). Nela o pó granulado é compactado no interior de uma matriz rígida através da aplicação de pressão (Amorós; 2000ab; 2001abc) que gira em torno de 35-45 MPa (Rosso, 2005).

Devido à alta produtividade, facilidade de automação e a simplicidade geométrica dos revestimentos cerâmicos, a prensagem uniaxial (efeito simples ou duplo efeito, esquematizados na Figura 3) é o processo mais utilizado (Amorós, 2000ab).

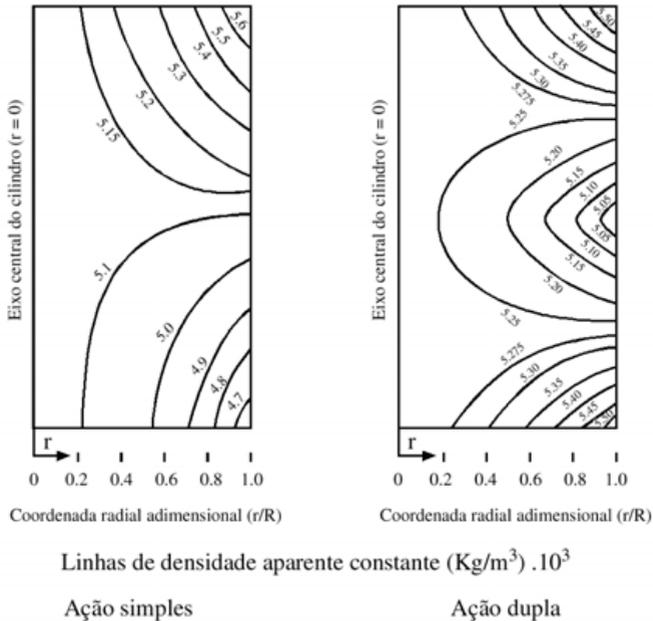
Na compactação de efeito simples a pressão é aplicada somente pelo punção superior, já na de duplo efeito tanto o punção superior quanto o inferior aplicam pressão no pó. A compactação com duplo efeito tem a vantagem de gerar menor gradiente de densidade no compactado, como mostra figura 4 (Richerson, 2005; Amorós, 2000a).

Figura 3 - Prensagem uniaxial a) simples efeito; b) duplo efeito.



Fonte: Amorós, 2001c

Figura 4 - Comparação entre a os gradientes de densidade aparente após a compactação com efeito simples (esq.) e duplo efeito (dir.).

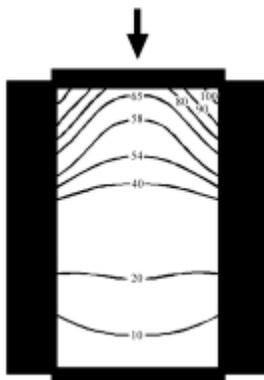


Fonte: Thompson, 1981.

O gradiente de densidade é prejudicial, pois pode resultar em empenamentos durante a queima (Richerson, 2005; Thompson, 1981) e gradiente de porosidade. Este problema é causado pela variação da

pressão de compactação (perda de carga) nas diferentes regiões do molde, Figura 5, que por sua vez é decorrente do atrito entre partícula/partícula e partícula/molde (Richerson, 2005; Amorós, 2001a).

Figura 5 - Variação da pressão de compactação no molde devido ao atrito entre partículas.



Fonte: Amorós, 2000a.

Com intuito de diminuir os efeitos deste fenômeno a granulometria do pó deve ser rigorosamente controlada (partículas menores têm maior área superficial, gerando mais atrito), assim como a umidade residual deve ser de 6-10%. (Richerson, 2005; Amorós 2001a).

Sinterização

Após a sua conformação, a placa cerâmica passa pelo processo de secagem, onde ocorre a diminuição da umidade e aumento da resistência a verde, para então ser submetida à etapa de sinterização (Oliveira, 1998).

A queima é realizada em fornos contínuos, nos quais os porcelanatos são submetidos à temperaturas de 1180°C a 1220°C por períodos de 35 a 70 minutos (Wang, 2003).

Durante a sinterização ocorre a densificação da peça pela eliminação da porosidade. Este fenômeno tem a redução da energia superficial do pó como força motriz. As partículas se unem umas as outras, diminuindo a energia livre do sistema com a redução da área superficial específica (Motta, 1998).

Para que haja redução drástica da porosidade, é necessário que ocorra fenômenos de transporte de massa. Dentre os diferentes mecanismos de sinterização, fluxo viscoso é o que produz maior efeito. Em porcelanatos a sinterização via fase líquida é favorecida pelo alto teor de fundentes (feldspatos) (Sanchez, 2009; De Nonni, 2007).

Durante a queima, uma quantidade considerável de fase líquida se forma, circundando as partículas, que por pressão de capilaridade, são aproximadas, aumentando a densificação. Os poros são então isolados, fazendo a pressão do ar em seu interior aumentar, se impondo contra a densificação (Sanchez, 2009).

Inicialmente ocorre um rearranjo das partículas, seguido pela formação de pescoços, conhecidas como *necks*, entre as mesmas. Estas ligações então crescem e a porosidade diminui. Ao final há aproximação das partículas e os poros são isolados (Richerson, 2005).

A microestrutura final é definida durante a queima, a qual resulta em 50 a 65% de uma matriz vítrea, com partículas dispersas, além de uma porosidade total entre 3 a 7% (Sanchez, 2009; Wang, 2003).

Calibração e Acabamento

Por não haver aplicação de camadas vítreas decorativas, é preciso conferir ao porcelanato um acabamento de superfície que lhe proporcione qualidades estéticas atrativas. Esta característica é conferida pelo processo amplamente conhecido no meio industrial como polimento (Wiggers, 2007), apesar de possuir características mais próximas ao brunimento plano-rotativo (Sousa, 2007d), como será abordado no capítulo a seguir.

Antes de ser submetido ao acabamento, o porcelanato precisa ser retificado, pois ao sair do forno ele pode apresentar empenamentos, ou ainda variações dimensionais que ocasionariam a quebra da peça ao entrar em contato com as cabeças brunidoras, daí então o termo calibração (Hutchings, 2006).

A calibração é realizada através de ferramentas diamantadas que produzem uma abrasão severa na superfície, chegando a remover 10% da espessura da peça. (Hutchings, 2006).

Conferida a planicidade necessária, as peças cerâmicas seguem para o processo de ganho de brilho, onde entram em contato com vários cabeçotes de brunimento, os quais giram em alta velocidade e possuem abrasivos cuja granulometria decresce gradativamente à medida que a peça segue no processo (Rosso, 2005).

2.2. PROCESSO DE USINAGEM E GANHO DE BRILHO EM PORCELANATOS.

As placas de grés porcelanato, depois da queima (sinterização) são usinadas, com o objetivo de corrigir as imperfeições de forma inerentes aos processos anteriores e conferir um acabamento brilhante às superfícies de interesse. A usinagem se compõe de duas etapas. Na primeira etapa as ondulações das placas são removidas por retificação de desbaste e retificação fina, empregando rebolos diamantados. As etapas seguintes são etapas de brunimento plano rotativo, distinguindo-se a etapa de brunimento plano rotativo de desbaste (regime frágil) e a etapa de brunimento plano rotativo de acabamento (dominantemente no regime dúctil).

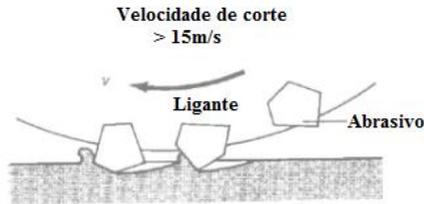
O termo polimento é amplamente utilizado na indústria de revestimentos cerâmicos, porém, do ponto de vista técnico esta não é uma nomenclatura apropriada (Sousa, 2007d). Se forem observadas outras tecnologias de usinagem com ferramentas de geometria não definida, notar-se-á que o processo a que o porcelanato é submetido não se adequa totalmente a nenhuma delas. Pela última etapa de acabamento ter como objetivo o aumento do brilho na peça, o termo polimento foi o que se tornou popular no setor (Sousa, 2007d).

2.2.1. Usinagem com ferramenta de geometria não definida.

A tecnologia de fabricação conhecida por usinagem com ferramenta de geometria não definida engloba basicamente quatro processos: retificação, lapidação, brunimento, polimento e jateamento. O polimento ocupa uma posição especial, nestes processos. Quando a taxa de remoção destes processos de usinagem passa ao regime dúctil, empregando granulometrias extremamente finas como abrasivo, as ranhuras produzidas sobre as superfícies se tornam tão pequenas e tão próximas entre si, que não refratam mais a luz, levando a característica de superfície brilhante para o espectro visível (Weingaertner, 2013). Em situações extremas, o polimento pode não remover mais material e apenas ocorrer uma deformação dúctil da camada limite da superfície do objeto submetido a este processo. Salvo esta condição extrema, todos eles envolvem remoção de material ou modificação da superfície através da abrasão por partículas de alta dureza, as quais possuem formas e tamanhos independentes umas das outras (Marinescu, 2004).

Retificação: Partículas abrasivas duras com gumes afiados são ligadas entre si. Estes materiais podem perfazer o corpo inteiro ou apenas parte do rebolo. O rebolo gira, em aplicações industriais abrangendo velocidades periféricas de 15 a 140 m/s (Marinescu, 2004;1999). Ao entrar em contato com a peça, estas partículas penetram e removem material na forma de cavaco (Figura 6). A retificação pode ser realizada a seco, porém geralmente conta com lubrificação, o que resulta em melhora na qualidade superficial e menor gasto energético devido à diminuição do atrito (Marinescu, 2004;1999).

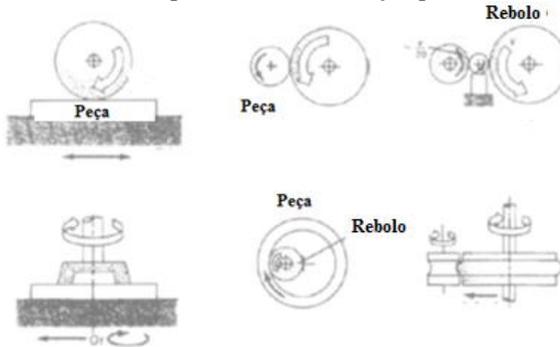
Figura 6 - Esquema demonstrando a remoção de material na retificação.



Fonte: Marinescu, 2004.

Pode-se ainda contar com cinemáticas variadas, como observado na Figura 7, para uma maior aplicabilidade do processo de acordo com a geometria e especificações da peça (Marinescu, 1999; Klocke, 2009).

Figura 7 - Diferentes processos de retificação para diferentes aplicações.

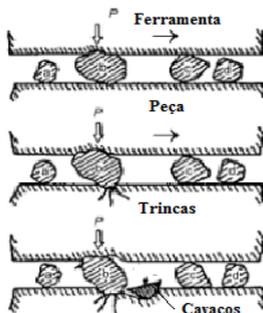


Fonte: Marinescu, 1999.

Apesar das diferentes cinemáticas, percebe-se que o contato das partículas abrasivas com a peça é intermitente.

Lapidação: Segundo a DIN8589, é um processo de usinagem com abrasivos soltos, suspensos em líquido ou pastas, introduzidos entre a ferramenta de lapidação (uma superfície rígida) e a peça a ser usinada (Figura 9). Por meio da movimentação relativa aleatória, material é removido dando a forma da ferramenta à superfície usinada (Marinescu, 2004; Klocke, 2009).

Figura 8 - Dinâmica do processo de lapidação em materiais frágeis.



Fonte: Marinescu, 2004.

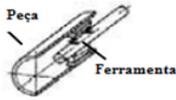
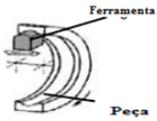
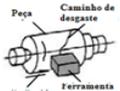
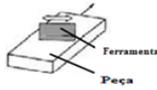
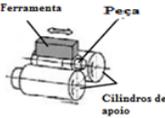
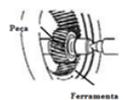
Apesar de diminuir a rugosidade, a principal função da lapidação é a remoção de material e modificação do formato da peça, conferindo precisão em aspectos como planeza ou esfericidade (Marinescu, 2004).

Brunimento: a ferramenta conta com abrasivos fixados a uma matriz, assim como na retificação, porém sua finalidade é conferir acabamento adequado (Marinescu, 2004) e eventualmente modificação de forma ou medidas (Klocke, 2009).

Duas grandes diferenças em relação à retificação são: a velocidade periférica, que neste caso está entre 0,2 e 2m/s, e o fato de que há certa flexibilidade no alinhamento da ferramenta, fazendo com que os abrasivos sejam pressionados contra as paredes internas, mantendo-os constantemente em contato com a superfície usinada (na retificação o contato é intermitente) (Marinescu, 2004; Klocke, 2009).

Quanto a sua cinemática, existem diferentes técnicas de brunimento, descritas por Klocke (2009) no Quadro 1, cada qual com suas vantagens e desvantagens, tornando-as ideais para aplicações específicas.

Quadro1. Variações do processo de brunimento e suas respectivas aplicações.

Método	Aplicação	Método	Aplicação
Brunimento de curso longo 	Furos em bielas, camisas de cilindros, tambores de freio, etc.	Brunimento de perfis 	Superfícies e rolamentos
Brunimento de curso longo entre pontas 	Virabrequins, eixos de rotor, rolos de laminação, etc.	Brunimento de sup. Planas. 	Guais de máquinas, ferramentas, réguas, engrenagens, vedação e assento de válvulas
Center-less de mergulho 	Eixos de rotores, comando de válvulas, etc.	Brunimento de engrenagens 	Acabamento de engrenagens

Fonte: Adaptado de Klocke, 2009.

Polimento: Assim como na lapidação, os abrasivos encontram-se soltos, entretanto a pressão é aplicada por uma superfície flexível. A pasta de abrasivos (partículas muito finas) aplicada em um feltro, por exemplo, permite uma pressão de contato muito pequena entre o abrasivo e a peça, resultando em remoção no regime dúctil. Por formarem ranhuras pequenas e muito próximas, garante-se uma melhora na textura e no brilho da superfície (Marinescu, 2004;1999).

Como mencionado anteriormente, o termo polimento não é corretamente aplicado ao processo de ganho de brilho em porcelanatos, pois neste caso, as partículas não estão soltas, mas sim ligadas à ferramenta (pedras abrasivas chamadas de *fickert*).

No processo de acabamento de porcelanatos as pedras abrasivas, são montadas frontalmente em cabeçotes rotativos, os quais são pressionados sobre a peça cerâmica e permanecem em contato com ela constantemente. Assim, devido a estas características conclui-se que o termo polimento não é o mais adequado sendo que “brunimento plano-rotativo” seria o mais correto. No caso da usinagem do revestimento cerâmico as velocidades de corte são superiores às do brunimento comum, 10m/s (Olenburg, 2013) contra 0,2 a 2 m/s respectivamente (Marinescu, 2004;1999).

2.2.2. O processo de brunimento plano rotativo em placas de porcelanato.

Segundo Hutchings (2004), o brunimento plano rotativo do porcelanato é etapa fabril mais importante de sua produção, afinal, é nela que se alcança a propriedade mais almejada, o brilho (Wang, 2003).

Industrialmente o processo se dá no que é chamada de linha de “polimento”. Este equipamento, mostrado na Figura 9, consiste numa série de cabeçotes, onde são acoplados seis blocos abrasivos, cujo tamanho de partícula decresce gradativamente à medida que a placa avança (Hutchings, 2004; Wang; 2003). A Figura 10 esquematiza o cabeçote e a pedra abrasiva com as respectivas dimensões.

Figura 9 - Linha industrial de brunimento plano rotativo de porcelanatos.

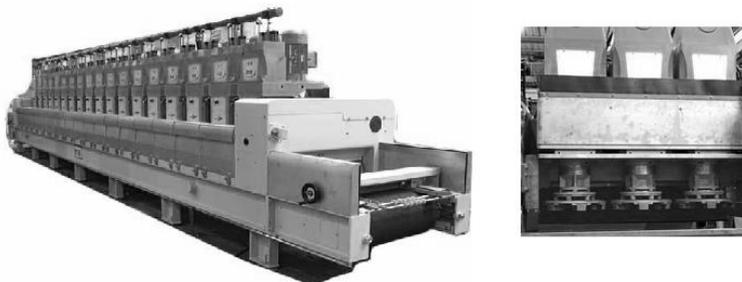
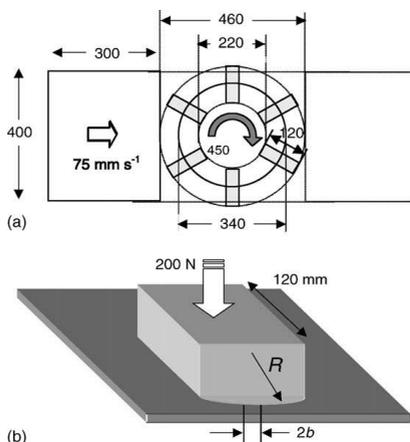


Figura 10 - a) Representação da geometria dos cabeçotes; b) geometria dos blocos abrasivos.



Fonte: Hutchings, 2005a.

De acordo com Bittencourt (2002) o processo de brunimento plano rotativo pode ser dividido em três etapas, de acordo com suas funções:

1- Na primeira parte (36*mesh* a 180*mesh*) ocorre o desgaste acentuado da peça, conferindo mais planicidade e removendo as ranhuras profundas da retificação.

2- A segunda etapa é responsável por realizar a preparação da peça. Cada cabeçote tem a finalidade de apagar os riscos (ranhuras) deixados pelos cabeçotes anteriores e deixar a peça totalmente uniforme (plana). As granas utilizadas são de 240*mesh* a 600*mesh*

3- O ganho de brilho efetivo somente ocorre na terceira etapa, onde não existem mais riscos visíveis. Para isso são utilizadas granas de 800 a 3000*mesh*.

Os blocos abrasivos são, na sua maioria, compostos basicamente por partículas de carbetto de silício SiC (10% em massa) embebidas em matriz de cimento de magnésio óxi-clorídrico (Sanchez, 2002; Hutchings, 2005b). Wang (2002) demonstrou que se tem um aumento da eficiência na obtenção de brilho quando são adicionados aditivos, como alumina, sulfeto de bário e estearato de magnésio.

Devido a cinemática descrita por cada fikert no cabeçote, a parte frontal deste desenvolve uma forma curva, com raio de curvatura R de aproximadamente 100 mm (Olenburg, 2013). Este formato leva a um contato com a peça na forma de uma linha e com comprimento da pedra abrasiva. Para uma análise mais aprofundada, a região de contato deve ser considerada como uma superfície, limitando a pressão de contato efetiva.

Assumindo que o contato bloco / porcelanato é elástico, tanto a largura de contato (distância 2b na Figura 11) quanto a pressão de contato efetiva “p” podem ser estimadas a partir das equações padrões de Hertz (Hutchings, 1992; 2005a) :

$$b^2 = \frac{4PR}{\pi E} \quad \text{Eq. 1}$$

onde

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad \text{Eq. 2}$$

e,

$$P = W/L \quad \text{Eq. 3}$$

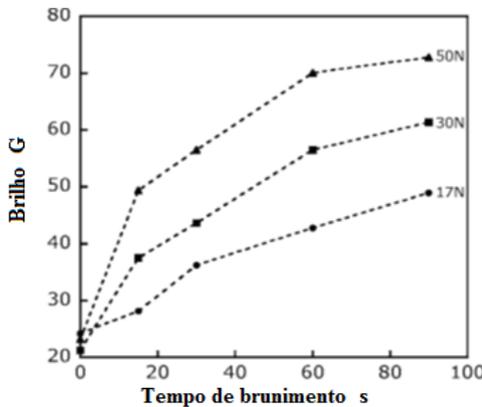
Sendo, W a carga aplicada; L o comprimento do bloco abrasivo; e ν_1 , E_1 , ν_2 e E_2 o coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade respectivamente do abrasivo e do porcelanato. A máxima pressão de contato “ p ” fica então (Hutchings, 2005a),

$$p = \frac{2P}{\pi b} \quad \text{Eq. 4}$$

Em condições industriais a pressão de contato varia de 10 a 15MPa (Hutchings, 2005a),.

Segundo Bittencourt (2002) e Hutchings (2005b) a pressão de contato exerce grande influência na evolução do brilho, como demonstrado na Figura 11, onde se percebe que quanto maior o carregamento, maior será o ganho do brilho (medido em unidade de brilho G, do inglês *gloss*). Contudo deve-se atentar ao fato de que o aumento da força normal resulta num maior desgaste da ferramenta e da peça.

Figura 11 - Influência do carregamento no desenvolvimento de brilho em função do tempo de brunimento.



Fonte: Hutchings, 2005b.

Outro parâmetro fundamental para o desenvolvimento da característica estética é a lubrificação (Bittencourt, 2002; Wang, 2003). Para esta finalidade utiliza-se água em abundância, com função de diminuir o atrito, refrigerar, e retirar os resíduos que poderiam causar riscos profundos na superfície.

Bittencourt (2002) estudou a influência da vazão, concentração de sólidos e dureza da água (concentração de CaCO_3). O aumento da vazão se mostrou benéfico, tendo como valores ideais quantidades acima de 18 l/min/cabeça. Tanto a concentração de sólidos como a de CaCO_3 devem ser mantidas o mais baixo possível, preferencialmente abaixo de 500 mg/l e 350 mg/l respectivamente para melhores resultados.

Pereira (2012) avaliou a eficiência energética do processo em função do pH da água, mostrando que apesar de não apresentar uma clara tendência, a acidez, ou basicidade, modificam a potência requerida no processo (pela alteração do atrito oriunda das mudanças no cisalhamento do fluido) e também o brilho atingido.

Uma lubrificação ineficiente pode gerar um dos defeitos mais comuns na produção do porcelanato, que é a presença de riscos profundos, causados por partículas soltas durante o brunimento plano rotativo, e que não são possíveis de serem removidos posteriormente (Bittencourt, 2002).

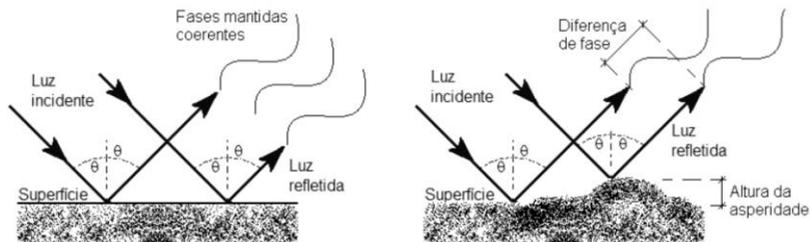
2.2.3. Brilho

O brilho é o principal parâmetro de controle de qualidade na produção de porcelanatos brunidos (Wang, 2003). Esta propriedade é caracterizada pela capacidade de uma superfície refletir um feixe de luz predominantemente em uma direção simétrica ao ângulo de incidência, fenômeno conhecido como reflexão especular (Sousa, 2007b). Quando isto não ocorre, a luz incidente é espalhada em varias direções e não há presença de brilho. Neste caso diz-se que a reflexão é difusa (Sousa, 2007b).

A predominância de um ou outro fenômeno é determinada pela geometria da superfície (Sousa, 2007b). Um dos modelos mais simples para avaliar a influência da rugosidade no tipo de reflexão é o critério de Rayleigh (Toigo, 1977). De acordo com este critério, a presença de asperezas provoca diferentes caminhos óticos para ondas adjacentes,

causando assim uma defasagem entre elas (Figura 12). Se esta diferença de fase for menor que $\pi/2$ a reflexão será especular.

Figura 12 - Efeito das asperidades no caminho óptico da luz.



Fonte: Sousa, 2007b.

Como a rugosidade é usualmente expressa através do parâmetro R_a , determina-se matematicamente que para reflexão especular a seguinte equação deve ser satisfeita (Sousa, 2007b);

$$R_a \leq \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad \text{Eq.5}$$

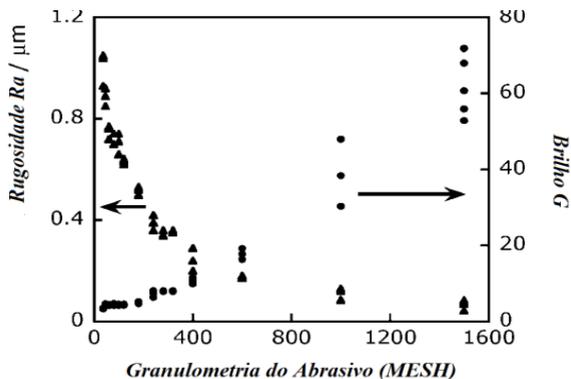
onde λ é o comprimento de onda.

Se a eq.5 for aplicada aos parâmetros usados nos equipamentos de medição de brilho (brilhômetros) disponíveis na indústria, tem-se que para um comprimento de luz de $\lambda=0.88\mu\text{m}$ e ângulo de incidência $\theta=60^\circ$ a rugosidade R_a deve ser menor que $0.22\mu\text{m}$.

Hutchings (2005a) e Wang (2002) estudaram a influência do tamanho do abrasivo na rugosidade e no brilho da superfície de porcelanatos. Seus resultados (Figura 13) mostram que a diminuição sequencial do abrasivo reduz a rugosidade R_a , por produzir sulcos cada vez menos profundos, razão pela qual também se obtém aumento do brilho (Hutchings, 2005b).

Hutchings (2005ab) ainda afirma que as partículas mais grosseiras são as responsáveis pelo maior efeito na redução da rugosidade, enquanto as partículas finas exercem pouco efeito na rugosidade e maior influência no ganho de brilho.

Figura 13 - Efeito da diminuição do tamanho do abrasivo na rugosidade R_a e no brilho em porcelanatos.



Fonte: Hutchings, 2005a.

Entretanto, é importante mencionar que o limite de ganho de brilho é definido pela microestrutura do porcelanato, pois, tanto os cristais de alta dureza presentes, quanto os poros atuarão como asperezas que não podem ser removidas, atuando como dispersantes dos feixes de luz (Bittencourt, 2002).

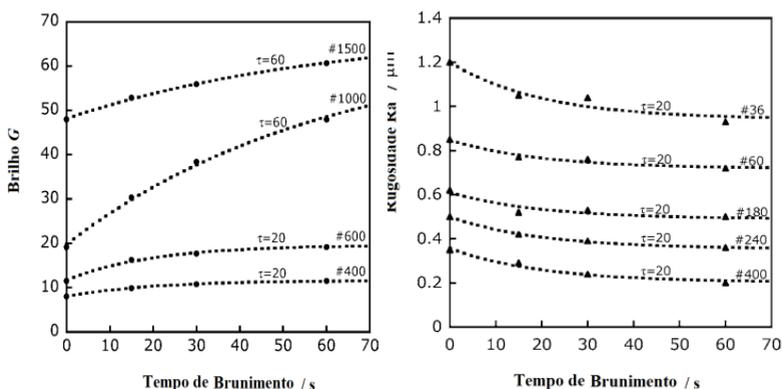
Tanto Hutchings (2005b) quanto Wang (2002) demonstram que além do tamanho do abrasivo, o tempo de brunimento também determina o aumento de brilho. Na Figura 14a nota-se que nos primeiros momentos, para uma determinada granulometria abrasiva, há um rápido ganho de brilho, seguido por uma posterior saturação. Já para a rugosidade existe inicialmente uma grande queda, seguida pela estabilização.

Hutchings (2005b) propôs modelos matemáticos que descrevem o comportamento destas curvas. Para isso, foi assumido que quando uma superfície com rugosidade inicial R_0 é brunida, a sua rugosidade diminui com o tempo t até alcançar um valor assintótico R_∞ . O tempo necessário para que isto ocorra é chamado tempo característico τ_1 . Da mesma forma, um porcelanato atinge o valor assintótico de brilho G_∞ , partindo de um valor inicial G_0 , com um tempo característico τ_2 .

$$R(t) = R_\infty + (R_0 - R_\infty)\exp(-t/\tau_1) \quad \text{Eq.6}$$

$$G(t) = G_\infty - (G_0 - G_\infty)\exp(-t/\tau_2) \quad \text{Eq.7}$$

Figura 14 - Influência do tempo de brunimento a) no brilho; e b) na rugosidade.



Fonte: Hutchings, 2005b.

Pode ser observado que os tempos característicos dos modelos de Hutchings, τ_1 e τ_2 , são na verdade o tempo necessário para que ocorra 64,2% do ganho máximo possível de brilho e da diminuição da rugosidade para um determinado abrasivo. Por exemplo, se um determinado abrasivo fosse capaz de aumentar o brilho de 50G para 60G, após um prolongado período de brunimento, no tempo característico o brilho seria de 56,3G.

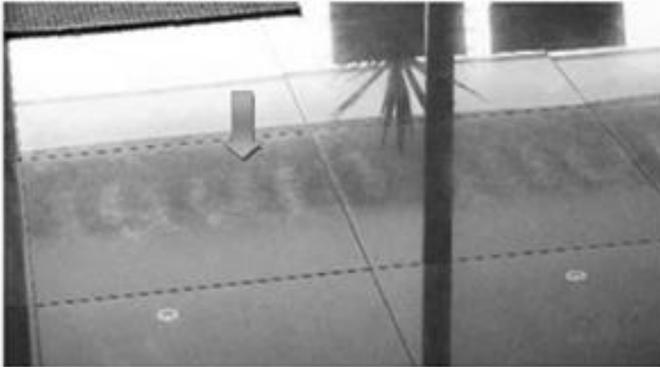
Wang (2002) afirma ainda que superfícies com diferentes condições iniciais de brilho, dificilmente atingirão um valor de brilho comum se submetidos às mesmas condições de processo, mesmo com tempos de brunimento elevados.

Esta característica explica a aparição dos defeitos chamados de “sombas”, que são na verdade regiões com diferentes níveis de brilho em uma mesma superfície. Esta não conformidade, uma das mais frequentes e danosas na produção de porcelanato, aparece devido à cinemática do processo proporcionar históricos de brunimento distintos para diferentes áreas da placa cerâmica, ou seja, algumas regiões são mais brunidas que outras (Sousa, 2007abcd; 2009).

2.3. CINEMÁTICA DO PROCESSO DE BRUNIMENTO PLANO ROTATIVO DE PORCELANATOS

A cinemática do processo aliada à própria geometria da ferramenta são fatores críticos para o aparecimento das “sombras de polimento” mostradas na Figura 15 (Sousa 2007bc).

Figura 15 - Sombras de polimento.



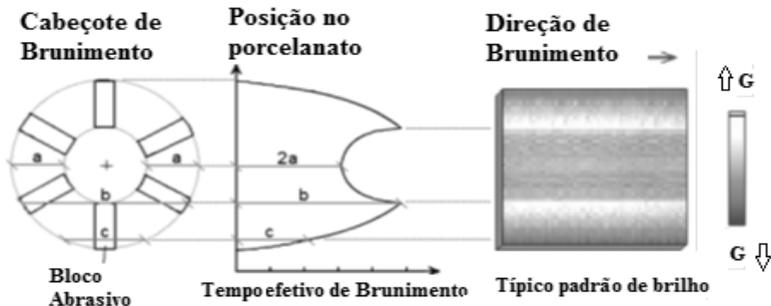
Hutchings (2005a) demonstrou que o formato da ferramenta por si só já é fonte de heterogeneidade no brunimento planorotativo, pois o núcleo não contém *fickert*, levando o centro do porcelanato a ter um número de contatos menor com o abrasivo do que as áreas adjacentes. Esta característica gera o perfil de brunimento e padrão de brilho irregular mostrado na Figura 16 (Sousa 2007bc).

O cálculo do número de contatos entre porcelanato e bloco abrasivo, N_c , pode ser feito ao se relacionar o tempo em que um ponto específico da superfície permanece sob a rota dos abrasivos e a frequência de rotação do cabeçote. No caso da região central, este tempo é determinado pela relação da velocidade do porcelanato v_{desl} e a distância $2a$ na Figura 17, assim,

$$N_c = \frac{(D-d).n_{abr}.f}{v_{desl}} \quad \text{Eq.8}$$

onde, D e d são respectivamente os diâmetros externo e interno do cabeçote, e n_{abr} o número de blocos abrasivos acoplados.

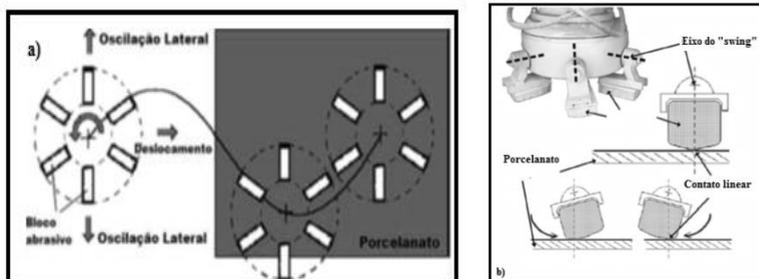
Figura 16 - Perfil de brunimento e brilho provocado pela geometria do cabeçote no brunimento plano rotativo.



Fonte: Sousa 2007c.

Com intuito de diminuir este defeito, novos maquinários incluíram um movimento de oscilação lateral ao cabeçote de brunimento (Sousa 2007bc). Desta forma o processo passou a contar com quatro movimentações (Figura 17): deslocamento do porcelanato na linha, rotação dos cabeçotes, oscilação lateral dos cabeçotes, e a oscilação angular do bloco abrasivo que mantém o contato linear.

Figura 17 - Cinemática do brunimento plano rotativo de porcelanato; a) Deslocamento do porcelanato, oscilação e rotação do cabeçote; b) movimento de oscilação angular do abrasivo (*swing*).

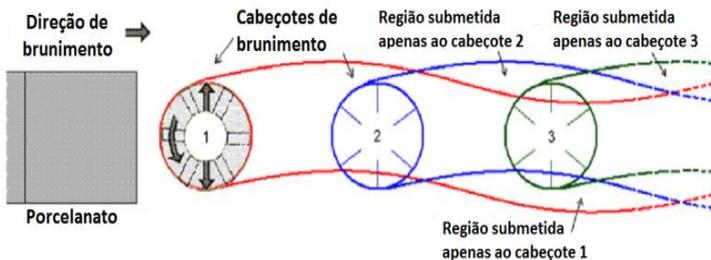


Fonte: Adaptado de Sousa, 2008 e Olenburg, 2013.

Entretanto, a adição do movimento oscilatório lateral não solucionou completamente o problema, pois mesmo com esta modificação as manchas continuaram a aparecer. Sousa (2007a) explica que a ocorrência das sombras neste caso se deve também à sobreposição ou não dos “rastros” de brunimento de cada cabeçote.

Na Figura 18 pode ser visualizado que existem algumas áreas submetidas a um cabeçote e não ao cabeçote subsequente, de forma que estas regiões podem ser brunidas por um abrasivo menor sem antes terem sido devidamente desgastadas pelos anteriores mais grosseiros.

Figura 18 - Esquema demonstrando a sobreposição das trilhas de brunimento.

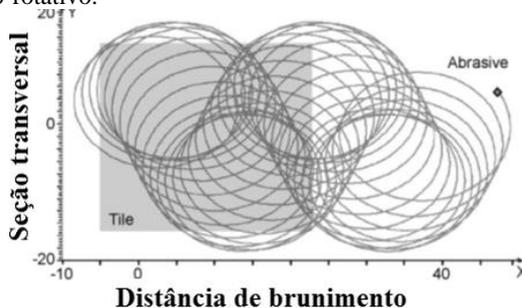


Fonte: (Sousa, 2007a).

Como explicado na seção 2.2.3, segundo Wang (2002) e Hutchings (2005b), o brilho de uma superfície ao final do brunimento plano rotativo depende da rugosidade/brilho inicial e da quantidade de tempo em processo. Se algumas regiões são mais brunidas que outras, e ainda com supressão de alguns abrasivos, ficam claras as razões do aparecimento do defeito de “sombras”.

Sousa (2007abc) desenvolveu modelos matemáticos que descrevem a trajetória de forma muito mais complexa e fiel a realidade do que a Figura 18 pode sugerir. Deve-se ter em mente que os cabeçotes se tratam de seis blocos abrasivos com uma região central vazia, e não de um bloco maciço como apresenta a Figura 18. Pode-se ter ideia da complexidade desta cinemática ao se analisar na Figura 19 a trajetória de uma única partícula de SiC dentro de um *fickert*.

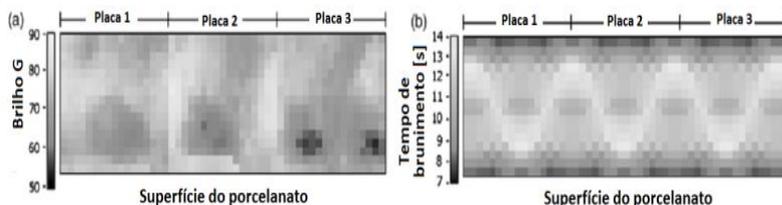
Figura 19 - Trajetória de uma única partícula abrasiva no processo de brunimento plano-rotativo.



Fonte: Sousa, 2007b.

Estes modelos serviram para alimentar um software de simulação do processo. Com ele é possível prever a quantidade de contatos porcelanato/abrasivo ao longo da superfície de uma placa cerâmica, obtendo resultados, como o da Figura 20b, que apresenta padrões ondulatórios de heterogeneidade similares aos encontrados na indústria (Fig. 20a).

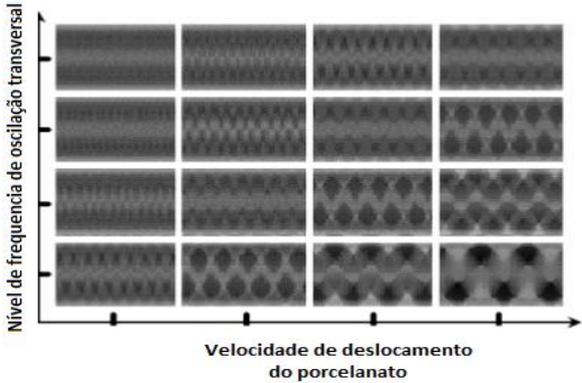
Figura 20 - a) Padrão de brilho medido na indústria e b) simulação de tempo de brunimento.



Fonte : Sousa 2007c.

Nos trabalhos de Sousa (2007abc; 2008) são apresentados diferentes padrões de distribuição de tempo de brunimento para diferentes velocidades de deslocamento do porcelanato e frequência de oscilação do cabeçote (Figura 21). Neles percebe-se que a adição da oscilação resultou numa melhor distribuição de brilho, porém o simples aumento da frequência não leva necessariamente a melhora do processo.

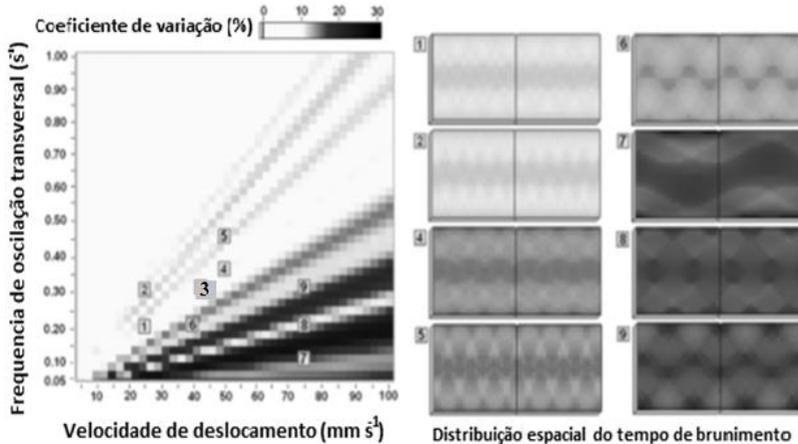
Figura 21 - Padrões de brunimento simulados para diferentes condições cinemáticas.



Fonte: Sousa, 2007a.

Com estes resultados Sousa (2009) produziu um mapeamento da dispersão do brilho em função dos parâmetros de processo. No mapa da Figura 22, as faixas com coloração mais escuras representam condições que resultam em maior heterogeneidade em uma mesma placa cerâmica. Consequentemente as regiões claras são os parâmetros que proporcionam menor surgimento do defeito.

Figura 22 - Mapeamento do efeito das condições cinemáticas na distribuição do tempo de brunimento.



Fonte: Sousa, 2009.

É interessante notar, neste mapeamento, que existem faixas de condições ótimas, nas quais as indústrias, coincidentemente operam, como o ponto 3. Entretanto, estes dados abrem novas possibilidades, pois o consenso existente no meio industrial é que quando surgem os defeitos de sombras, se torna necessária a redução da velocidade de deslocamento do porcelanato (o que resulta em queda na produção). No entanto, de acordo com a Figura 22, é possível sair de uma condição ruim aumentando esta velocidade (condição 2 para 3, por exemplo), consequentemente aumentando a produção.

Apesar dos notáveis resultados de Sousa (2007abc; 2009), é fundamental salientar que esta simulação prevê a quantidade de tempo de brunimento (ou número de contatos abrasivo-porcelanato) para cada região, e não o valor exato de brilho final.

O brilho é uma propriedade que depende da rugosidade, que por sua vez é reduzida através do desgaste abrasivo da superfície gerado pelo brunimento, torna-se evidente então a necessidade de se explorar como ocorre este fenômeno tribológico em porcelanatos.

2.4. MECANISMOS DE REMOÇÃO

Durante processo de brunimento plano rotativo, a modificação da superfície ocorre devido ao fenômeno de abrasão (Marinescu, 2004; Kloche, 2009). Segundo Zum Gahr (1987), considera-se desgaste abrasivo a remoção de material de uma superfície devido à presença de partículas de alta dureza, que por sua vez, podem fazer parte de uma das superfícies (caso do *fickert*) ou estarem aprisionadas entre elas, na presença de movimento relativo.

Devido a sua elevada dureza, estabilidade química e térmica, os cerâmicos costumam ser considerados materiais com elevada resistência ao desgaste. Porém esta propriedade deve ser tratada como sistêmica, ou seja, depende também, além dos materiais envolvidos, do ambiente (temperatura, lubrificação), e dos parâmetros de processo (ex.: carga, velocidade de corte) (Zum Gahr, 1987). Assim, uma cerâmica pode ser desgastada mais facilmente que muitos metais, dependendo do mecanismo de remoção de material presente gerado pelas condições citadas (Zum Gahr, 1987; Hokkirigawa, 1991).

Apesar de materiais cerâmicos serem reconhecidamente frágeis, sua usinagem pode envolver mecanismos de deformação plástica (Hokkirigawa, 1991; Green, 1998; Watchman, 2009). Na maioria dos

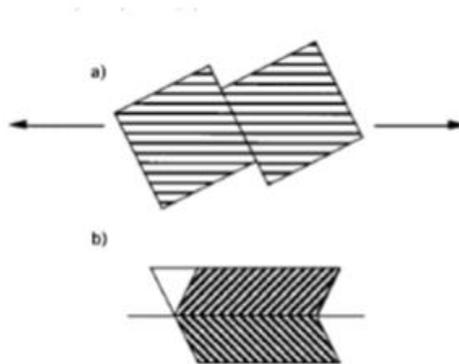
casos ocorrem tanto deformação quanto propagação de trincas, sendo a segunda a forma predominante (Zum Gahr, 1987; Watchman, 2009).

2.4.1. Plasticidade em materiais cerâmicos e vítreos

A plasticidade em cerâmicas ocorre de maneira diferente a dos metais, já que a movimentação de discordâncias não é o principal mecanismo responsável, apesar de ser possível principalmente em óxidos com estruturas do tipo sal de rocha como MgO (Zum Gahr, 1987). Para Watchman (Watchman, 2009) existem dois motivos para isto: a) a tensão necessária para o deslocamento destas discordâncias é superior à tensão de fratura em temperaturas moderadas; b) ocorrem interações entre as discordâncias e elementos microestruturais que causam a fratura já em pequenas deformações (Watchman, 2009).

Nos cerâmicos a maior parte da plasticidade se deve ao escorregamento de planos basais (Zum Gahr, 1987; Hutchings, 1992), escorregamento de cristais inteiros (Green, 1998) ou ainda à maclação, que consiste no traslado de parte do cristal para uma posição diferente, formando assim uma imagem espelhada (Watchman, 2009; Ajayi, 1988), como visto na Figura 23b.

Figura 23 - Deformação permanente dos cristais por a) escorregamento de cristais e b) maclação.



Fonte: Green, 1998.

Já em materiais vítreos como o porcelanato (50% de fase vítrea), o a plasticidade é na verdade resultado do fluxo viscoso do material.

Marsh (1964) explica que a maior evidencia de plasticidade em vidros (além do deslocamento de material gerado por indentações) é o fato que a energia requerida para fratura de materiais completamente frágeis seria igual a energia necessária para formação das duas superfícies. Porém a energia absorvido na fratura de materiais vítreos é muito maior que isto, dando uma clara evidencia que esta dissipação extra é consequência da plasticidade.

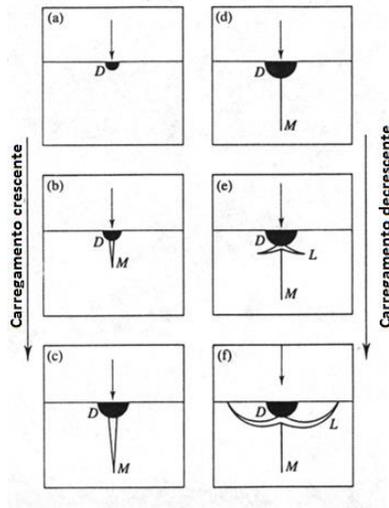
Segundo Evans (2003) o deslocamento plástico ocorre pelo amolecimento do material devido a um grande aquecimento por atrito no local de contato com abrasivo.

Komanduri (1996) afirma ainda que além do aumento da local da temperatura, que pode até ultrapassar a temperatura de transição vítrea, as elevadas pressões de contato podem gerar estados de tensões hidrostáticas que facilitam o fluxo viscoso.

2.4.2. Remoção por nucleação e propagação de trincas

No ponto inicial de contato entre a superfície e a partícula abrasiva/indentador, surgem tensões elevadas, pois a ponta da partícula/identador, se perfeitamente afiada, tem raio tendendo a zero. Estas tensões provocam mudanças nas cercanias da indentação, como deformações plásticas e densificação (zona D indicada na Figura 24) (Hutchings, 1992; Lawn, 1975). Quando a carga é aumentada até um determinado valor crítico abre-se uma trinca mediana (M), a qual continua crescendo com aumento da pressão. No momento em que é feito o descarregamento, esta trinca M se fecha, porém, a deformação plástica D impede que ocorra a devida relaxação das tensões elásticas residuais, dando início às trincas laterais L, que se propagam até atingir a superfície, que resulta no lascamento do material

Figura 24 - Nucleação e propagação de trincas causadas por endentação em materiais cerâmicos.



Fonte: Lawn, 1975.

Em um riscamento, a remoção ocorre porque após a partícula abrasiva passar por uma determinada região, acontece o mesmo que um descarregamento. Entretanto, segundo Hutchings (1992), a força tangencial causada pelo deslocamento do abrasivo modifica a distribuição de tensões, diminuindo drasticamente a força normal necessária para início da fratura.

De acordo com Hutchings (1992) as trincas laterais só terão início se o carregamento atingir um valor crítico w^* , o qual depende de K_{IC} e da dureza H .

$$w^* \propto \left(\frac{K_{IC}}{H}\right)^3 K_{IC} \quad \text{Eq. 9}$$

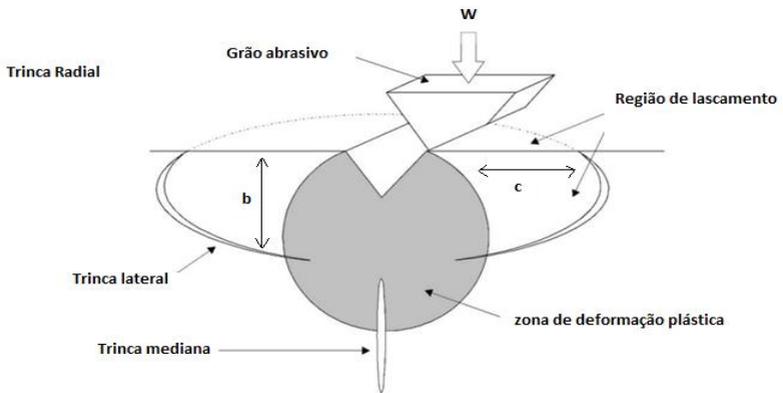
Modelos matemáticos (Hutchings, 1992) podem ser usados para estimar a dimensão dos riscos, sendo b e c profundidade de início da trinca lateral e o tamanho de sua propagação respectivamente (Figura 25),

$$c = \alpha_1 \frac{(E/H)^{3/5} W^{5/8}}{K_{IC}^{1/2} H^{1/8}} \quad \text{Eq. 10}$$

$$b = \alpha_2 \left(\frac{E}{H}\right)^{2/5} \left(\frac{W}{H}\right)^{1/2} \quad \text{Eq. 11}$$

onde α_1 e α_2 são constantes relacionadas a geometria do abrasivo.

Figura 25 - Fenômeno de remoção de material frágil devido ao movimento relativo entre abrasivo e superfície.



Fonte: Pihtili, 2013.

Se for considerado que o limite superior de volume removido por partícula por distância percorrida seja $2bc$, e que existam N partículas em contato, o volume de material removido Q fica,

$$Q = \alpha_3 N \frac{(E/H) w^{9/8}}{K_{IC}^{1/2} H^{5/8}} \quad \text{Eq. 12}$$

Nota-se a presença constante dos parâmetros E , K_{IC} e H , os quais são considerados por Zum Gahr (1987) e Lambropoulos (2005) como

os mais importantes para determinação do mecanismo de remoção e fragilidade de um material.

É interessante observar que a formação destas trincas afetam também a resistência mecânica da peça, Tucci (2000) mostra que durante o brunimento plano rotativo, há uma queda inicial da resistência mecânica, resultado da formação de trincas pelos abrasivos de maior tamanho, seguida pelo aumento da mesma ao serem utilizados abrasivos cada vez menores, chegando a valores próximos aos encontrado em peças apenas sinterizadas.

2.4.3. Identificação dos mecanismos de remoção por abrasão.

Devido à influência dos mecanismos de remoção nas propriedades mecânicas e características da superfície (Zum Gahr, 1987; Hokkirigawa, 1991; Tucci, 2000), é de fundamental importância à determinação do fenômeno atuante.

Para tal finalidade, geralmente são admitidos modelos simplificados, onde o fenômeno de remoção é estudado tendo em consideração apenas um único risco feito por uma partícula dura (Zum Gahr, 1987). Zum Gahr define que podem ocorrer três diferentes tipos de mecanismos de desgaste (Figura 26):

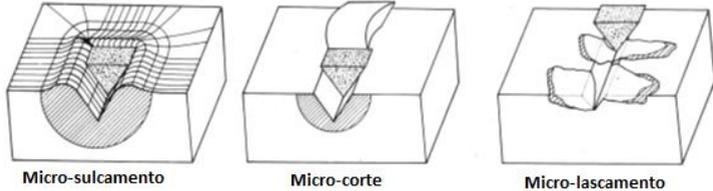
1- Micro-sulcamento: este mecanismo é dominado pela deformação plástica ou fluxo viscoso. O material é apenas deslocado para as laterais do risco, sem causar nenhuma remoção de material (Zum Gahr, 1987).

2- Micro-corte: ocorre quando a tensão cisalhante excede a tensão de escoamento, causando a remoção de cavaco de forma dúctil (Zum Gahr, 1987).

3- Micro-Lascamento: Fenômeno predominante em materiais frágeis, no qual a nucleação e propagação de trincas, explicadas na seção 2.4.2, são responsáveis pela remoção de material. Neste caso o desgaste é não uniforme, sendo que grandes placas de material são arrancadas, fazendo

com que o risco tenha largura e profundidade maiores que o indentedor (Zum Gahr, 1987).

Figura 26 - Mecanismos de desgaste.

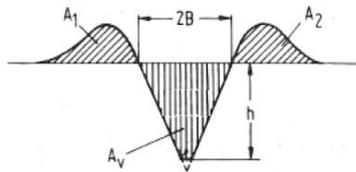


Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

Ainda de acordo com Zum Gahr (1987) pode-se identificar o mecanismo atuante através do fator f_{ab} , o qual expressa a relação do volume de material removido A_v , com o volume de material deslocado para as laterais do risco (A_1+A_2), como esquematizado na Figura 27.

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \quad \text{Eq. 13}$$

Figura 27 - Definição dos parâmetros necessários para o cálculo do fator f_{ab} .



Fonte: Zum Gahr, 1987.

A interpretação do fator f_{ab} deve ser feita conforme explicado por Zum Gahr(1987):

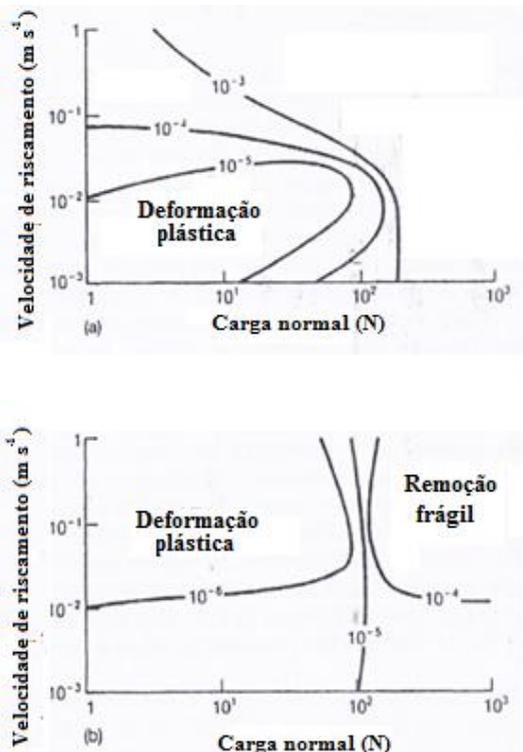
Se $f_{ab} = 0$, significa que $A_1+A_2 = A_v$, ou seja todo material foi na verdade deslocado plasticamente para as adjacências do sulco e não há perda de massa;

Se $f_{ab} = 1$, o volume do sulco é equivalente às dimensões do indentador, evidenciando micro-corte

Se $f_{ab} > 1$, há existência de propagação de trincas gerando riscos maiores que o indentador, logo se tem o mecanismo de micro-lascamento

Diversos autores (Ajayi, 1988; Kato, 1992,2002; Adachi, 1997; Hsu, 1996) realizaram estudos com intuito de identificar a transição de mecanismos de desgaste em função de parâmetros de processos, criando mapeamentos como o da Figura 28, nos quais é possível verificar os fenômenos atuantes para condições específicas.

Figura 28 - Regimes de desgaste em alumina a) sem lubrificante e b) com lubrificação.



Fonte: Adaptado de Hutchings, 1992.

A Figura 28a mostra que é possível identificar a influência de determinados parâmetros no mecanismo de abrasão. Percebe-se, por

exemplo, que velocidades de riscamento e cargas baixas são propícias para existência de deformação plástica (Hutchings, 1992). A lubrificação também tem grande efeito (Fig. 28b), ela permite a existência de plasticidade em cargas e velocidade maiores do que quando a abrasão é feita a seco (Ajayi, 1998). De fato Hsu (1996) mostrou que no caso de uma lubrificação otimizada, o efeito da velocidade de riscamento é eliminado.

É importante salientar que estes mapas, construídos através de parâmetros específicos, possuem validade exclusivamente para aquele sistema tribológico específico, servindo apenas como indicativos para comportamento de outros sistemas, afinal, outros parâmetros microestruturais como poros, trincas e partículas de segunda fase, além da temperatura também são determinantes (Zum Gahr, 1987). Entretanto, Kato (1992; 2002) e Adachi (1997) propuseram mapeamentos através de parâmetros adimensionais, calculados através da relação entre tenacidade, dureza, atrito e pressão, obtendo resultados aplicáveis a diferentes tipos de cerâmicas avançadas.

O mecanismo de desgaste também exerce papel fundamental nas propriedades de brilho dos porcelanatos. Sanchez (2002), por exemplo, demonstrou que a partir do abrasivo 600mesh, etapa na qual o ganho de brilho passa a aumentar consideravelmente, a morfologia dos riscos presentes indica a presença predominante de micro-sulcamento.

2.5. ANÁLISE DE SUPERFÍCIES

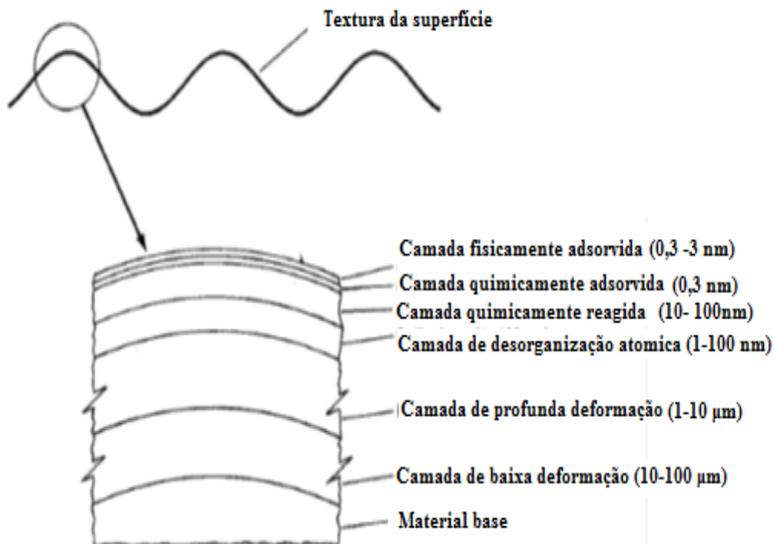
Haja vista que as propriedades mais importantes buscadas com o processo de brunimento plano rotativo de porcelanatos são dependentes de características da superfície, é importante saber como a análise e interpretação dos parâmetros que a descrevem pode ser efetuada de maneira adequada.

2.5.1. Introdução ao conceito de superfícies

A superfície de materiais sólidos tem um papel crucial em suas propriedades tribológicas, afinal, tribologia é o estudo dos fenômenos que ocorrem quando duas superfícies estão em contato e em movimento relativo (Stachowiak, 2005). Contudo, esta região apresenta características e estruturas complexas. Podem ser composta por várias camadas, composições e estados de deformação diferentes do material

base (Figura 29), mesmo em sólidos frágeis e inertes como as cerâmicas, pois estas também possuem zonas de deformação (Zum Gahr, 1987) e há a possibilidade de adsorção e formação de filmes, mudando completamente a natureza do sistema (Bhushan, 2000).

Figura 29 - Características e camadas típicas de uma superfície.



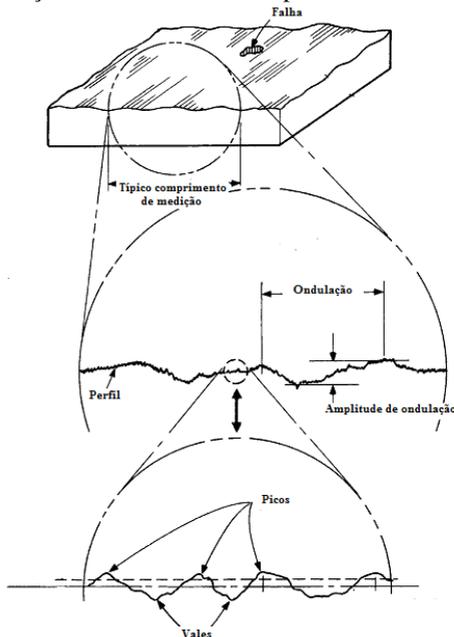
Fonte: Adaptado de Bhushan, 2000.

Além desta complexidade estrutural, toda superfície, produzida por todo e qualquer método de fabricação, apresenta desvios de sua forma pretendida. Por mais que uma peça pareça ser plana, ela possui irregularidades, e, mesmo em superfícies muito polidas, no limite de planicidade, o relevo dos átomos se apresentará como asperidades. Na prática, até em casos extremos como o da clivagem de planos cristalográficos da mica, que apresenta planicidade a nível molecular por alguns centímetros quadrados, a escala das irregularidades é muito maior que a atômica (Hutchings, 1992; Bhushan, 2000).

A textura da superfície é constituída de desvios repetitivos ou aleatórios da geometria nominal. São exemplos as falhas, ondulações e a rugosidade (Figura 30) (Bhushan,2000), sendo a última, a característica

de maior importância neste trabalho, pois dela depende a propriedade de brilho e a resistência a abrasão (Parra, 2006).

Figura 30 - Descrição da textura de uma superfície.



Fonte: Adaptado de Bhushan, 2000.

2.5.2. Rugosidade e parâmetros estatísticos

A rugosidade de uma superfície pode ser compreendida como o conjunto de desvio das alturas (saliências e reentrâncias) em relação a um plano de referência, o qual é representado pela linha imaginária que separa o perfil de forma que a área dos picos acima dela seja igual a área dos vales abaixo, ou seja, a linha média. (Parra, 2006).

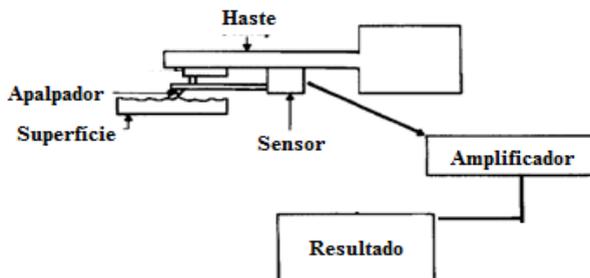
Considerando que as superfícies sempre têm um relevo, fica claro que o contato entre dois sólidos se dá apenas por alguns pontos, e não por um plano completo (Stachowiak, 2005). Assim, o conhecimento e a medição das características da rugosidade se tornam essenciais em várias aplicações de engenharia, como desgaste, fricção, transferência de calor e até condução elétrica (Gadelmawla 2002, Whitehouse, 2011).

2.5.3. Medição da rugosidade.

Muitos são os métodos possíveis para mensurar as características da rugosidade, dentre eles pode-se citar diferentes tipos de microscopia (confocal, eletrônica, força atômica), interferometria, através do contato de um pequeno apalpador, ou ainda por medições térmicas /elétrica e escoamento de líquidos. Aqui serão rapidamente descritos os mais comumente usados segundo Hutchings (1992).

Apalpador (Perthometer): Pode ser considerado o mais comum. Tem o mesmo princípio que os “toca-discos” onde uma agulha fina percorre o relevo do disco e o movimento vibratório causado é transformado em som e ampliado (Thomas, 1999). No caso do perfilômetro, esquematizado na Figura 31, um apalpador (normalmente de diamante) preso a uma haste percorre a superfície em análise por uma distância l e velocidade constante. O movimento de subida e descida causado pelas asperidades é registrado por sensores e então ampliado, para assim gerar uma curva de deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal (Hutchings, 1992).

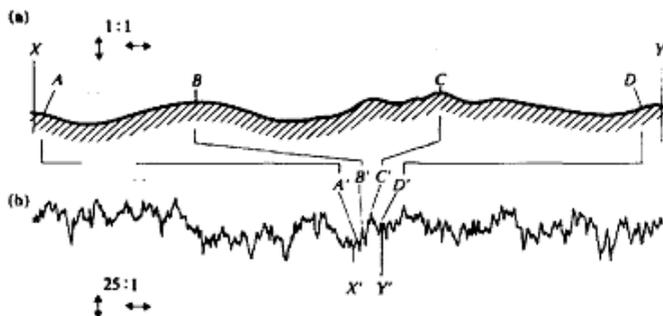
Figura 31 - Esquema do funcionamento de rugosímetro apalpador.



Fonte: Adaptado de Hutchings, 1992.

Este gráfico, porém, pode ser mal interpretado, pois não se trata de uma representação fiel do real perfil da superfície. Para facilitar a visualização ocorre compactação dos resultados, que causa uma anamorfose, ou seja, os eixos dos deslocamentos vertical e horizontal são apresentados em escalas diferentes, fazendo com que os picos e vales pareçam muito mais proeminentes, como pode ser observado na Figura 32.

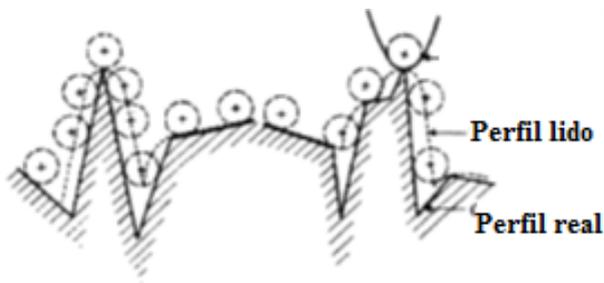
Figura 32 - Efeito da compressão horizontal na medição de rugosidade. a) perfil real e b) leitura do apalpador.



Fonte: Thomas, 1999.

A técnica possui algumas limitações, dentre elas um de “filtro mecânico” inerente à medição. Devido a geometria do apalpador, cones ou pirâmides com ângulos em torno de 60° com raio de ponta finito (1 a $2,5 \mu\text{m}$), ele pode não penetrar completamente em vales profundos ou muito agudos, deixando também os picos com aspecto mais arredondado (Fig. 33) (Hutchings, 1992, Bhushan, 2000).

Figura 33 - Efeito de filtro mecânico de apalpadores.



Fonte: Adaptado de Bhushan, 2000.

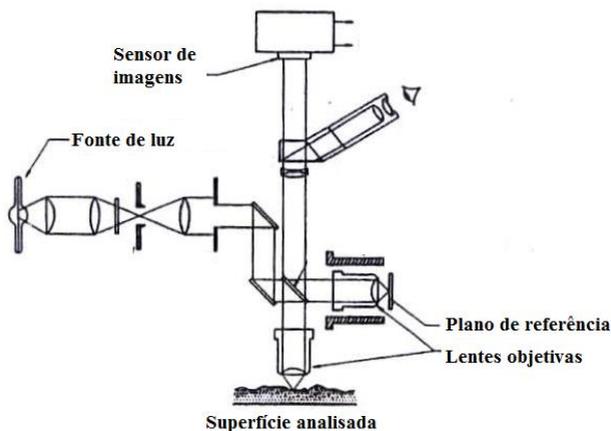
O simples fato de ser uma medição com contato já deixa evidente que é possível que se cause alterações na superfície em estudo. Mesmo que a carga normal aplicada no apalpador seja baixa ($0,75 \text{ mN}$), deve-se ter em mente que a área de contato real é tão pequena que faz com que a pressão possa ser grande o suficiente para causar deformações plásticas (Hutchings, 1992).

Existe ainda o fato de este método ser uma medida linear, ou seja, mede-se em uma direção específica. Assim, em processos que podem gerar superfícies com defeitos direcionais, os valores medidos podem variar de acordo com a direção de varredura. Torna-se necessária então a realização de várias medições para se alcançar um resultado confiável (Bhushan, 2000; Whitehouse, 2011).

Interferometria Ótica: Existem métodos de análise de topografia onde não existe contato físico com a amostra, evitando danos e distorções. Um dos princípios usados é a interferometria.

Como mostra a Figura 34, a interferência entre dois feixes de luz refletidos pela superfície da amostra e por um plano de referência gera padrões de “franjas” que são lidos pelo computador através de fotodiodos. Pequenos movimentos do plano de referência geram mudanças nos padrões de franja, possibilitando a interpretação da rugosidade da amostra. (Hutchings, 1992).

Figura 34 - Esquema mostrando o funcionamento de interferômetros para análise de superfícies

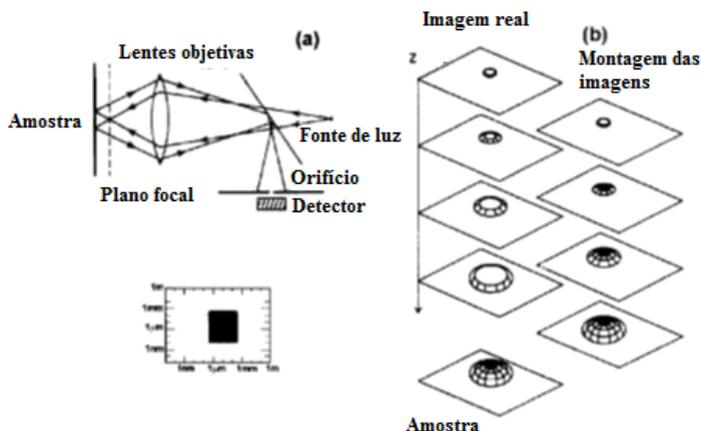


Fonte: Hutchings, 1992.

Em interferometria ótica, filmes com diferentes propriedades óticas podem apresentar resultados distintos embora tenham as mesmas características topográficas (Whitehouse, 2011).

Microscópio Confocal: Este tipo de microscópio (descrito na Figura 35) atua como um “detector de alturas de foco”. Um pequeno orifício é interposto entre a amostra e um sensor para que a região de foco mais nítida se torne também a região de maior intensidade de luz. A distância entre a superfície e amostra é então variada e a cada posição é feita uma varredura. As posições com maior intensidade são gravadas e usadas para montar uma imagem tridimensional. Este tipo de microscópio não foi desenvolvido para medição de rugosidade, porém com o tempo foi adaptado para tal uso (Thomas, 1999).

Figura 35 - a) esquema descrevendo microscópio confocal; b) construção de imagens.



Fonte: Adaptado de Thomas, 1999.

Whitehouse (2011) indica que a medição seja feita com o equipamento que melhor imita a aplicação, por exemplo: engrenagens, rolamentos que tem contato envolvido, se possível devem ser analisadas por apalpador, já quando a propriedade a ser avaliada é ótica deve-se utilizar métodos óticos (à exemplo do brilho).

2.5.4. Estatística aplicada à descrição da rugosidade

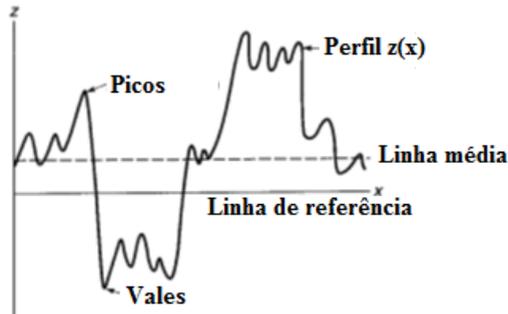
Apesar do fornecimento de imagens, perfis e representações confiáveis por parte dos equipamentos, a interpretação destes dados é

complexa e de difícil visualização. Para transformar estas informações em dados quantitativos, podem ser utilizadas ferramentas estatísticas as quais fornecem, em valores absolutos, uma breve e prática caracterização da rugosidade (Whitehouse, 2011).

Os parâmetros mais comumente usados para descrição de superfícies são rugosidade média e desvio padrão da distribuição de alturas, R_a e R_q respectivamente.

Rugosidade média R_a é definida a partir da média aritmética dos desvios da superfície em relação a uma linha imaginária, chamada linha média, a qual corta o perfil separando igualmente as áreas/volumes dos picos e dos vales como na Figura 36 (Bhushan, 2000; Gadelmawla, 2002).

Figura 36 - Definição conceitual do parâmetro R_a



Fonte: Bhushan, 2000.

Matematicamente R_a pode ser descrito por:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z - m| dx \quad \text{Eq.14}$$

onde l é o comprimento de medição e,

$$m = \frac{1}{l} \int_0^l z dx \quad \text{Eq.15}$$

Com o cálculo da variância σ^2 dos desvios, tem-se:

$$\sigma^2 = \frac{1}{l} \int_0^l (z - m)^2 dx = R_q^2 - m^2 \quad \text{Eq.16}$$

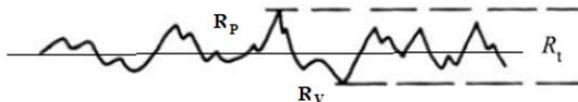
ou seja, quando $m = 0$; $R_q =$ desvio padrão σ .

$$R_q^2 = \frac{1}{l} \int_0^l (z)^2 dx \quad \text{Eq.17}$$

Em curvas de distribuição gaussiana de rugosidade, $R_a = 1.25 R_q$.

Existem ainda outros parâmetros descritivos de superfície menos comuns (Gadelmawla, (2002) descreve mais de 50), porém não menos importantes, pois cada um deles é mais sensível a uma determinada característica da rugosidade, sendo assim, mais adequados a casos específicos de aplicação. Como exemplos (Fig. 38) podem-se citar o maior desvio de pico R_p , maior desvio de vale R_v e a diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo R_t ($R_t = R_p + R_v$). Estes parâmetros são sensíveis a picos isolados ou arranhões (Gadelmawla, 2002).

Figura 37 - Definição geométrica dos parâmetros R_t , R_p , R_v e R_z .



Fonte: Gadelmawla, 2002.

Estes fatores, apesar de amplamente utilizados, não fornecem informações suficientes para descrever inteiramente um perfil, pois são medidas exclusivamente de suas variações verticais. Não fornecem, por exemplo, dados a respeito da frequência, largura ou formato das asperidades, consequentemente, superfícies com morfologia completamente diferentes, como as da Figura 38, seriam caracterizadas como iguais se levado em consideração apenas R_a (Thomas, 1999).

Segundo Thomas (1999), em processos de polimento e brunimento o uso exclusivo de R_a é ineficaz, pois os picos são mais facilmente removidos.

Figura 38 - Superfícies com o mesmo valor de R_a , porém com características completamente distintas.



Fonte: Thomas, 1999.

Cada superfície apresentada na Figura 38 seria perfeita para uma determinada aplicação. Um perfil com características platô-vale (superior direita), por exemplo, seria ideal para camisas de pistão, pois as depressões tem capacidade de armazenar lubrificantes enquanto a maior parte do material serve de escoramento. Isto já não ocorre no perfil contrário, platô-pico, que seria mais aconselhado a materiais de corte.

Com um aprofundamento na área de análise estatística, é possível obter outros parâmetros de rugosidade, os quais embora pouco usados, são considerados bons complementos descritivos quando apresentados em complemento ao R_a (Whitehouse, 2011; De Mello, 1985; 1986).

Um dos conceitos básicos em estatística é a probabilidade, que é a medida das chances de um evento ocorrer em determinado valor ou ocasião (Montgomery, 2010). Se as alturas das asperidades (perfil) forem encaradas como uma variável aleatória, pode-se então obter uma curva de distribuição cumulativa de probabilidade, ou seja, a probabilidade que a superfície $z(x)$ esteja a uma altura abaixo de determinado valor “h”. Esta curva é descrita por uma função $P(h)$ (Bhushan, 2000).

$$P(h) = Prob(z \leq h)$$

Eq. 18

Contudo, é comum descrever a probabilidade de eventos aleatórios em função da inclinação desta curva, o que é obtido através da sua derivada:

$$p(z) = \frac{dP(z)}{dz} \quad \text{Eq. 19}$$

onde $p(z)$ é chamada função de densidade de probabilidade.

Observa-se também que é possível retornar à curva cumulativa ao integrar $p(z)$,

$$P(z \leq h) = \int_{-\infty}^h p(z) dz = P(h) \quad \text{Eq. 20}$$

$$P(h_1 \leq z \leq h_2) = \int_{h_1}^{h_2} p(z) dz = P(h_2) - P(h_1) \quad \text{Eq. 21}$$

Dos conceitos estatísticos, sabe-se que a distribuição densidade de probabilidade de eventos aleatórios tende a se apresentar na forma de distribuição normal, ou função Gaussiana (Bhushan, 2000):

$$p(z) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(z-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{Eq. 22}$$

onde σ é o desvio padrão e m a média.

Para fim de praticidade pode ser considerado:

$$z^* = (z - m)/\sigma \quad \text{Eq. 23}$$

Aqui, z^* tem média igual a zero e desvio padrão unitário. Substituindo Eq.23 em Eq.22 tem-se:

$$p(z^*) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(z^*)^2}{2}\right] \quad \text{Eq. 24}$$

O retorno de $p(z^*)$ para $P(z^*)$ não pode ser efetuado através de sua integral, então este cálculo deve ser realizado utilizando a função erro, cujo valor é facilmente encontrado na literatura (Montgomery, 2010).

$$\text{erf}(h) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_0^h \exp\left[-\frac{(z^*)^2}{2}\right] dz \quad \text{Eq. 25}$$

Com o domínio destes conhecimentos pode-se agora gerar curvas de distribuição de probabilidades e curvas cumulativas com os dados obtidos de uma medição de rugosidade.

Através do cálculo dos momentos centrais destas distribuições é possível chegar a valores que descrevem quantitativamente o formato de suas curvas. Estes parâmetros podem ser interpretados de maneira a indicar mais características das asperidades além do tamanho médio. (Gadelmawla, 2002).

Momentos de ordem “n”, m_n , são usados em estatística para caracterizar uma curva de distribuição de probabilidade (Bhushan, 2000).

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} z^n p(z) dz \quad \text{Eq. 26}$$

Momentos que levam em consideração a média são chamados de momentos centrais, m_n^c ,

$$m_n^c = \int_{-\infty}^{\infty} (z - m)^n p(z) dz \quad \text{Eq. 27}$$

O momento zero é igual 1 e o primeiro momento é igual a média da função $z(x)$. Note nas equação 15 e 29 que $m_1^c = R_a$.

$$m_1^c = \int_{-\infty}^{\infty} (z - m) p(z) dz = R_a \quad \text{Eq. 28}$$

O segundo momento descreve a variância:

$$m_2^c = \int_{-\infty}^{\infty} (z - m)^2 p(z) dz = \sigma^2 = R_q^2, \text{ se } m = 0 \quad \text{Eq. 29}$$

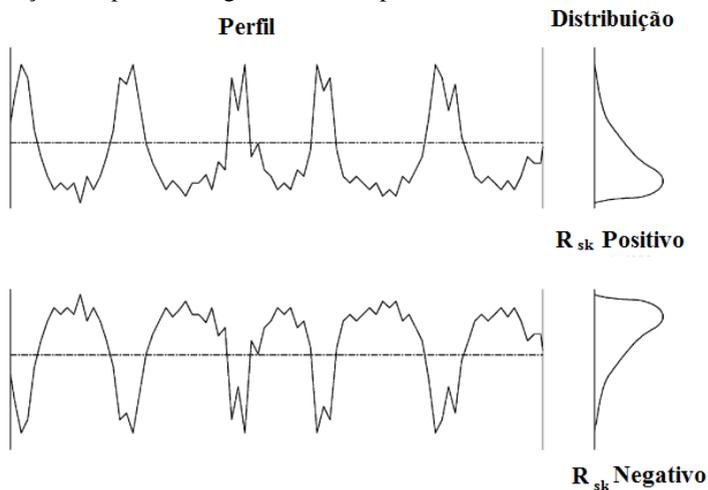
O terceiro e momento central descreve a assimetria da distribuição, e é chamado de coeficiente de assimetria, *skewness* ou em tribologia, R_{sk} . Este parâmetro demonstra a relação da quantidade de eventos abaixo e acima da média, ou, de picos e vales (Fig.39). Perfis com picos em quantidades similares ao de vales apresentam $R_{sk}=0$. Já

perfis que tenham os picos removidos ou predominância de sulcos possuem coeficientes de assimetria negativos. Quando os vales estão preenchidos formando padrão platô-pico, R_{sk} tem valor positivo (Bhushan, 2000, Gadelmawla 2002).

$$R_{sk} = m_n^3 = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (z - m)^3 p(z) dz \quad \text{Eq. 30}$$

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} (z)^3 p(z) dz$$

Figura 39 - Representação da relação entre coeficiente de assimetria R_{sk} , distribuição, e o perfil de rugosidade em superfícies.



Fonte: Gadelmawla, 2002.

O quarto momento central é chamado de curtose (R_{ku}), e descreve o quão fina ou alongada é a distribuição de probabilidade. Quando $R_{ku} = 3$, a curva assume forma similar à gaussiana; se $R_{ku} < 3$ a curva é dita leptocúrtica e apresenta forma delgada; já quando $R_{ku} > 3$, a distribuição é abaulada, ou platicúrtica.

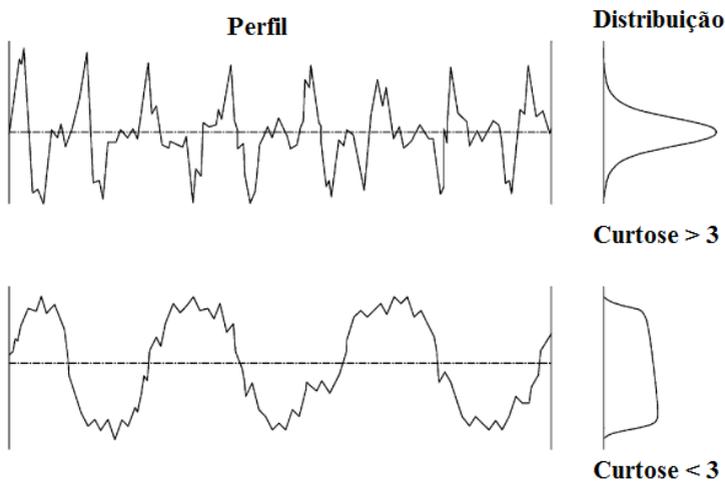
Fisicamente, R_{ku} , dá indicação quanto ao formato das asperidades, isto é, se os picos e vales são poucos e largos ou muitos e agudos. Valores abaixo de três indicam presença de poucos picos baixos

e vales altos, valores maiores indicam muitos picos altos e vales profundos Figura 40. Novamente normalizando, tem-se R_{ku} descrito matematicamente como (Bhushan 2000; Whitehouse, 2011),

$$R_{ku} = m_n^4 = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} (z - m)^4 p(z) dz \quad \text{Eq. 31}$$

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} (z)^4 p(z) dz$$

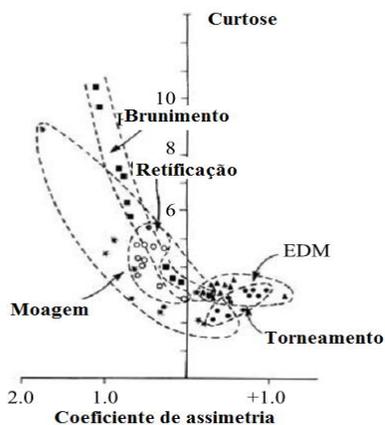
Figura 40 - Representação da relação entre curtose R_{ku} , distribuição, e perfil de rugosidade em superfícies.



Fonte: Gadelmawla, 2002

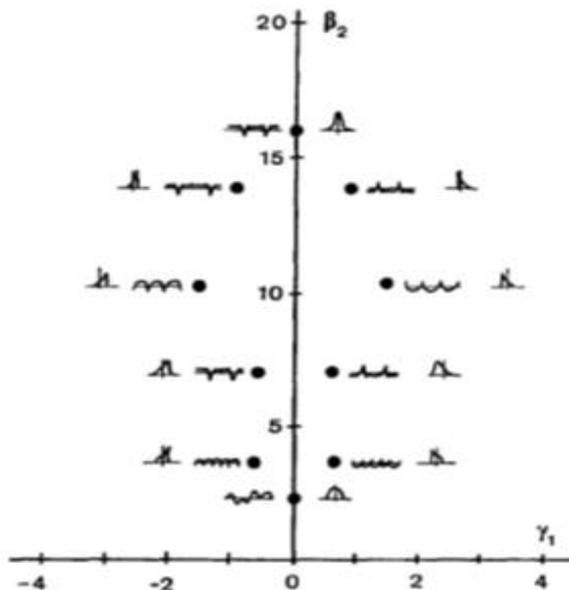
Estes dois parâmetros, (R_{sk} e R_{ku}) são tão importantes que, ao se traçar um gráfico contendo em seus eixos curtose x coeficiente de assimetria, cria-se o chamado “espaço morfológico” (Figura 41 e 42). Neste diagrama é de fácil visualização a evolução da superfície durante um processo, podendo ser distinguidos diferentes tipos de fabricação ou até identificar mudanças nos mecanismos de remoção. (Whitehouse 2011; De Mello, 1985, 1986).

Figura 41 - Espaços morfológicos típicos para vários processos.



Fonte: Whitehouse, 2011.

Figura 42 - Características da superfície de acordo com a região no espaço morfológico.



Fonte: De Mello, 1986.

Na Figura 42 nota-se que são usados coeficientes de Pearson β_1 e de Fischer Y_2 , os quais são relacionados ao terceiro e quarto momentos centrais de uma distribuição de probabilidades.

Whitehouse (2011) afirma que a recente proposta para adição de R_{sk} e R_{ku} aos parâmetros R_a e R_q é uma tentativa válida para aprofundar a caracterização de superfícies. Entretanto em alguns casos são encontradas dificuldades, pois os dois não são independentes entre si, sendo ambos relacionados à variância da distribuição.

Com o intuito de torná-las menos dependentes, Whitehouse (2011) propôs a utilização da função beta (Eq. 32), introduzindo novos parâmetros que dão pesos diferentes aos picos e vales.

A função beta (β) é uma função definida dentro do intervalo entre 0 e 1, e calculada em termos das variáveis a e b (Whitehouse, 2011),

$$\beta(a, b) = \int_0^1 z^{a-1}(1-z)^{b-1} dz \quad \text{Eq. 32}$$

Esta equação pode ser ainda expressa em termos de uma probabilidade de densidade $p_\beta(a, b, z)$:

$$p_\beta(a, b, z) = \frac{1}{\beta(a, b)} z^{a-1}(1-z)^{b-1} \quad \text{Eq. 33}$$

Sendo $\beta(a, b)$ um fator de normalização.

Desta maneira, os parâmetros comuns de uma distribuição podem ser determinados em função de a e b . Para tal, Whitehouse faz uso das identidades das funções gama.

$$\beta(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} = \Gamma(a+1) = a\Gamma(a) \quad \text{Eq. 34}$$

Assim, a média desta distribuição fica sendo:

$$z_m = \frac{1}{\beta(a, b)} \int_0^1 z z^{a-1}(1-z)^{b-1} dz = \frac{\beta(a+1, b)}{\beta(a, b)} = \frac{a}{a+b} \quad \text{Eq. 35}$$

a variância:

$$\sigma^2 = \frac{ab}{(a+b+1)(a+b)} \quad \text{Eq. 36}$$

o coeficiente de assimetria:

$$S_{k\beta} = \frac{1(b-a)}{a+b-2} \left(\frac{a+b+1}{ab} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 37}$$

E, finalmente, a curtose:

$$K_{\beta} = \frac{6[(a-b)^2(a+b-1)-ab(a+b+2)]}{ab(a+b+3)(a+b+2)} \quad \text{Eq. 38}$$

Segundo Whitehouse (2011), qualquer curva de distribuição pode ser aproximada pela equação beta. Deste modo, as funções têm dois parâmetros independentes (a e b), os quais são calculados através dos parâmetros de rugosidade R_q , maior valor de pico R_p , maior valor de vale R_v e maior distância entre pico e vale R_t . Na Eq. 39 pode ser visto que a é mais influenciado pelos vales (R_v) enquanto b pelos picos (R_p)

$$a = \frac{R_v(R_v R_p - R_q^2)}{R_t R_q^2} \quad \text{e} \quad b = \frac{R_p(R_v R_p - R_q^2)}{R_t R_q^2} \quad \text{Eq. 39}$$

O fato de picos e vales “estranhos” estarem elevados apenas à primeira potência ainda sugere que seja conferida uma maior estabilidade à distribuição (Whitehouse, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram realizados experimentos tribológicos nos quais buscou-se um melhor entendimento da evolução da superfície de porcelanatos durante o processo de ganho de brilho. Para isto foram utilizados equipamentos que executaram a usinagem do porcelanato por brunimento plano rotativo em uma bancada laboratorial e a interação de uma única partícula abrasiva com a placa cerâmica.

Primeiramente foram acompanhadas detalhadamente as mudanças ocorridas na superfície do porcelanato durante a reprodução do brunimento plano rotativo. As peças foram usinadas sequencialmente por 16 granulometrias abrasiva diferentes, tendo suas superfícies averiguadas durante e após cada um dos *fickert*.

Posteriormente foram realizados ensaios de riscamento, com uma vasta gama de velocidades e cargas normais. Os riscos seguiram para análise via microscopia eletrônica visando identificar os mecanismos de remoção atuantes.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO PORCELANATO

Para os experimentos foram adquiridos placas cerâmicas da empresa parceira (CECRISA S.A.), sendo que pertenciam a um mesmo lote e já estavam no estado final de produção. Para eliminar o brilho e estabelecer uma condição inicial padrão, as placas foram submetidas ao brunimento plano rotativo com abrasivos de granulometria 36mesh, por 15 min, ou 1650 contatos, à uma pressão efetiva “*p*” de 12,5MPa. Este tempo e pressão de contato foram estabelecidos com base em estudos de Olenburg (2013) e Hutchings (2004), para que se alcançasse a saturação de rugosidade R_{∞} e brilho G_{∞} para o abrasivo 36mesh.

As propriedades mecânicas do porcelanato foram medidas, e o resultado encontra-se na tabela 2.

A dureza foi medida com microdurômetro BUEHLER (0,5kg), em 10 amostras, com 5 pontos de medição cada, adotando a média dos valores como a dureza do porcelanato.

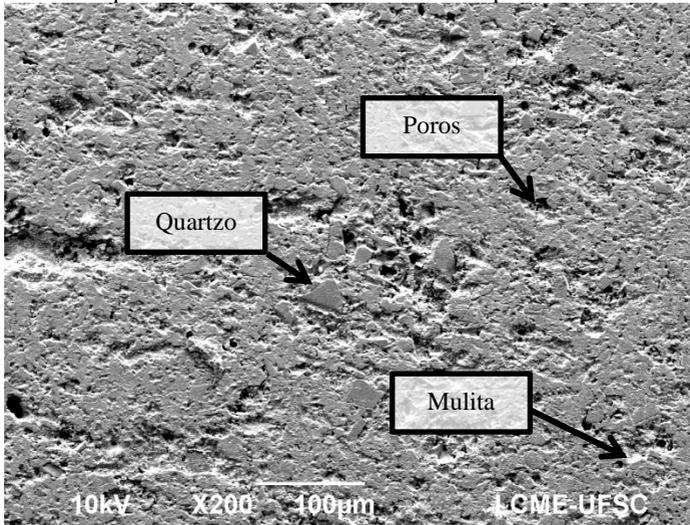
Já as propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios de flexão 4 pontos em 74 corpos de prova (70mm x 20mm x 7,5mm). Um equipamento Universal EMIC 2000 foi utilizado. Os resultados foram então analisados pela distribuição de Weibull, chegando então à resistência característica e coeficiente de confiabilidade apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos porcelanatos.

Dureza Vickers (HV)	Módulo de elasticidade (E)	Resistência à Flexão (σ_0)	Coef. De confiabilidade (m)
MPa	GPa	MPa	*
639	72	61	7

Foram caracterizadas também a microestrutura, Figura 43. Uma amostra, já com acabamento final (1500mesh), foi atacada com solução de ácido fluorídrico por 10 minutos, passando também por um recobrimento (ouro) e então analisada via microscopia eletrônica. O equipamento utilizado, modelo JEOL JSM-6390LV, foi disponibilizado pelo Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME).

Figura 43 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando poros, cristais de quartzo e mulita na microestrutura do porcelanato.



A Figura 43 mostra a microestrutura do porcelanato apresentando uma matriz vítrea, na qual se localizam poros, e partículas cristalinas, constituídas por quartzo e mulita.

3.2. TRIBÔMETRO – BANCADA PARA O BRUNIMENTO PLANO ROTATIVO

Neste trabalho foi utilizado um equipamento (Figura 44) desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP da Universidade Federal de Santa Catarina. O tribômetro em questão possui capacidade de reproduzir todos os quatro movimentos que compõem uma linha de brunimento plano rotativo de porcelanatos.

Figura 44 - Tribômetro desenvolvido no LMP/UFSC e sua cinemática.



A Figura 44 mostra a bancada experimental para o brunimento plano rotativo que permite três dos quatro movimentos utilizados na indústria:

1 – O porta-amostras rotativo permite a fixação de uma amostra cerâmica e é acionado pelo motor 1. O porta-amostra equivale a esteira de alimentação de uma máquina industrial, a qual leva o porcelanato até os cabeçotes de brunimento plano rotativo.

2 – O suporte dos blocos abrasivos é acionado pelo motor 2 e faz o papel de cabeçote de brunimento.

3 – O acoplamento do motor2/cabeçote à um braço movimentado por excêntrico faz com que haja um deslocamento oscilatório do cabeçote, que pode ter sua frequência controlada pelo motor 3, e amplitude de oscilação ajustada através do excêntrico.

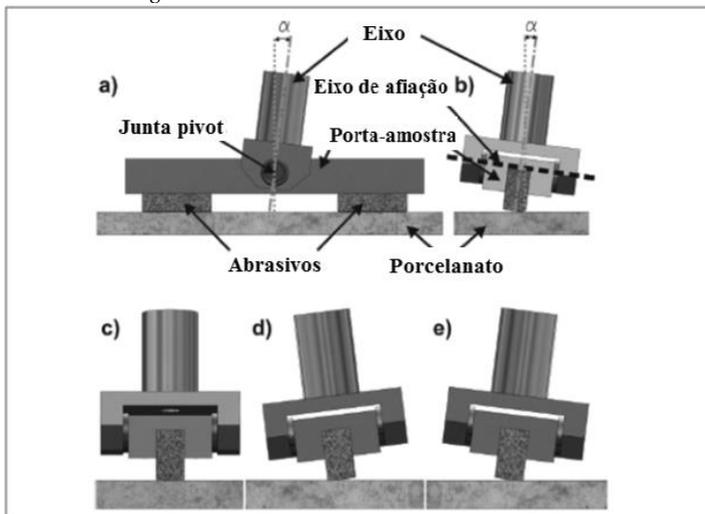
Pela inclinação do eixo do motor 2 e pelo acoplamento cardan entre o motor 2 e o porta bloco abrasivo se obtém a oscilação angular do bloco abrasivo (uma oscilação por rotação) (Figura 45). A inclinação do motor e a posição do cardan definem o raio de curvatura do bloco abrasivo. O mecanismo de funcionamento deste dispositivo foi baseado no projeto desenvolvido por Olenburg (2013).

O quarto movimento, comumente chamado de swing ,também garante a afiação do bloco abrasivo (decorrente da pressão elevada).

Este dispositivo consiste em um suporte para amostras acoplado a um eixo através de um pivô. Na Figura 45b pode-se perceber que as duas peças são unidas transversalmente, isto confere uma característica chave, pois desta forma, o porta abrasivo pode girar livremente somente em um dos eixos, como visto na Figura 46.

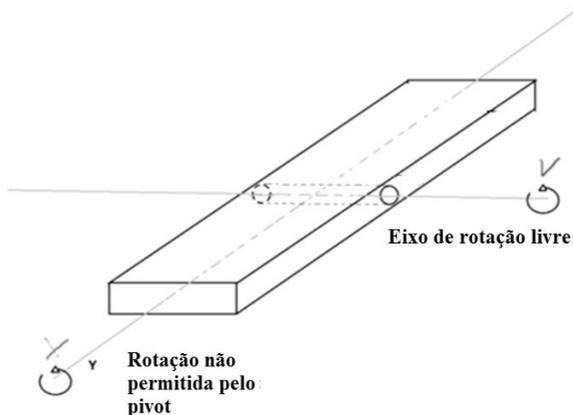
Quando este eixo é inclinado a um ângulo α em relação à cerâmica, a sua rotação causará uma migração cíclica do contato porcelanato/abrasivo de uma lateral a outra do abrasivo. Isto ocorre porque, num primeiro momento, Fig. 46a/46c, o pivô permite que o abrasivo se acomode com sua parte central em contato com o porcelanato (Fig. 46c); quando o eixo gira em 90° , a inclinação α obriga os *fickerts* inclinarem-se também a um ângulo α (Fig. 46d), pois o tipo de junção pivô não permite a compensação deste ângulo. Neste momento, o contato se encontra em uma das laterais do abrasivo. Com o giro do eixo em mais 90° o pivô novamente permite a acomodação das partes centrais do abrasivo (Fig. 46c); ao completar mais 90° , o porta-abrasivo se inclina novamente e a segunda lateral do abrasivo entra em contato com o porcelanato (Fig. 46e), fechando assim um ciclo.

Figura 45 - Dispositivo desenvolvido por Olenburg para conferir o movimento de *swing* ao tribômetro no instituto FBK-Kaiserslautern.



Fonte: Olenburg, 2013.

Figura 46 - Característica mecânica que permite o movimento de afiação do abrasivo.



O resultado da migração da região de contato experimentada pelo abrasivo é a criação de uma curvatura em sua superfície, cujo raio “ R ” pode ser controlado pelo ângulo de inclinação α do eixo e pela espessura das pedras abrasivas “ e ”, de acordo com a equação:

$$R = \frac{1/2 e}{\cos(\alpha) \cdot \tan(\alpha)} \quad \text{Eq. 41}$$

Neste caso foram estabelecidos um ângulo de inclinação $\alpha = 3^\circ$ e espessura de abrasivo $e = 0.014\text{m}$, que resultam em um raio de curvatura do bloco abrasivo $R = 0.133\text{m}$. Este valor de R é ligeiramente maior que o encontrado na indústria e literatura ($0.100 < R < 0.130\text{m}$) (Olenburg, 2013; Hutchings, 2005a), porém foi estabelecido visando manter similar a pressão de contato efetiva “ p ”, calculada pela equação de Hertz (Eq. 4).

3.2.1. Blocos abrasivos

Os blocos abrasivos utilizados foram fornecidos pela empresa FABRAS. Produziu-se blocos abrasivos já na dimensão exata para o acoplamento no tribometro (175mm x 140mm x 200mm), sendo suas composições fiéis às utilizadas na indústria, sendo a formulação de caráter confidencial.

3.2.2. Parâmetros de ensaio e planejamento para simulação do processo.

Parâmetros de brunimento

Com intuito de averiguar a evolução da superfície do porcelanato no decorrer do processo de brunimento plano rotativo, foram monitoradas as mudanças ocorridas durante e após o uso de cada abrasivo.

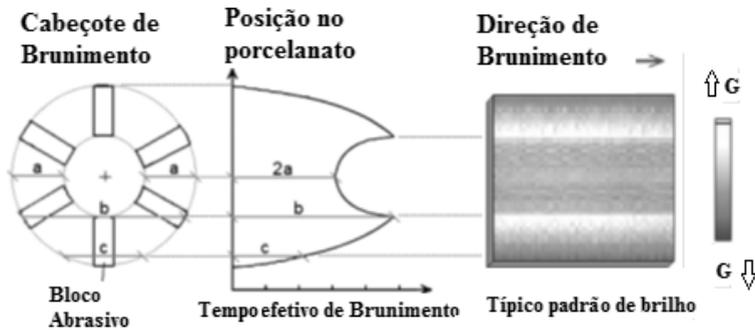
Para que este estudo seja mais representativo, o parâmetro tempo foi substituído pelo “número de contato da superfície do porcelanato com a pedra abrasiva” N_c . Isto é justificado ao ser considerado que futuros estudos podem ser realizados em equipamentos de diferentes configurações, então esta medida facilitaria comparações. Por exemplo: o uso de um cabeçote com diâmetro maior requer menor rotação para que seja mantida velocidade de corte equivalente, conseqüentemente, a diminuição da frequência do cabeçote levaria à um menor número de contato abrasivo/porcelanato por tempo.

Como mostrado nos trabalhos de Sousa (2007abcd), a cinemática presente em uma linha industrial gera complexos padrões de

brunimento, tornando demasiadamente complicada a determinação do número exato de contatos em uma região específica do porcelanato. Por isso foi escolhido eliminar o movimento de oscilação lateral do cabeçote, levando ao perfil de brunimento encontrado na Figura 47, onde N_c para a região central pode facilmente ser calculado pela equação 9.

$$N_c = \frac{(D - d) \cdot n_{abr} \cdot f}{v_{desl}}$$

Figura 47 - Perfil de brunimento e brilho provocado pela geometria do cabeçote de brunimento.



Fonte: Sousa 2007c.

Com esta configuração, cria-se uma trilha de brunimento circular na amostra cerâmica (Fig. 48). Foi assumido então que a velocidade tangencial no centro desta trilha seja equivalente à velocidade de deslocamento do porcelanato v_{desl} dentro da linha de brunimento. O diâmetro central da área desgastada é de 303mm e a rotação do porta amostra cerâmica é 2 RPM, o que resulta em $v_{desl} = 0,032$ m/s.

A velocidade de corte v_{abr} foi definida como a velocidade tangencial no ponto central do abrasivo, de onde se calcula que, para uma frequência de 1500 RPM, se atinja $v_{abr} = 7,65$ m/s. Este valor encontra-se dentro da faixa utilizada pela indústria (Olenburg, 2013) que é de 5,6 m/s na região interna do cabeçote a 12,7 m/s no lado externo.

Um resumo das condições cinemáticas utilizadas está apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Condições cinemáticas do brunimento plano rotativo.

Frequência Cabeçote f	1500 RPM (25 1/s)
Frequência Mesa	2 RPM
Velocidade Mesa v_{desl}	0,032 m/s
Diâmetro Mesa	0,350 m
Número de abrasivos	2
Diâmetro Externo Cabeçote D	0,115m
Diâmetro Interno Cabeçote d	0,080m
Velocidade de Corte v_{abr}	7,65 m/s
Número de contatos por passagem N_c	55

As condições de contato foram ajustadas para serem as mais semelhantes possíveis às encontradas no meio industrial de acordo com Olenburg (2013) e Hutchings (2005ab). A carga normal W de 70N resultou em pressão de contato efetiva $p = 12,5$ MPa, dentro dos 10 – 15 MPa relatados por Hutchings (2005ab). Na tabela 4 encontram-se os parâmetros empregados no cálculo de p , segundo a equação para contatos elásticos de Hertz (eq.4). As propriedades mecânicas (módulo de Young) foram medida através do equipamento SONIELASTIC, em uma média de 4 medições

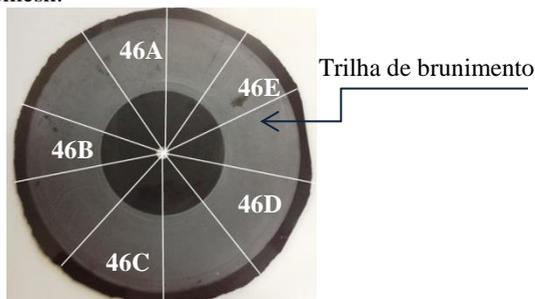
Tabela 4 - Condições de contato empregadas no brunimento plano rotativo.

Raio Abrasivo	R	0,133 m
Carga	W	70 N
Comprimento do fickert	L	0,0175 m
Espessura do fickert	e	0,0140 m
Young fickert	E_1	21 GPa
Poisson Fickert	ν_1	0,2
Young Porcelanato	E_2	72 GPa
Poisson Porcelanato	ν_2	0,2
Pressão Linear (N/m)	P_1	4000 N/m
Comprimento de contato	$2b$	0.0002 m
Pressão de contato efetivo	p	12,5 MPa

3.2.3. Planejamento do experimento.

Foram empregadas 16 placas de porcelanato, uma para cada tamanho de abrasivo, partindo de 46mesh até 1500mesh. Todas as amostras foram submetidas à granulometria 36mesh, para perder o aspecto bruido de fábrica, e então divididas (marcações) em cinco partes para que cada uma delas fosse submetida a um número de contatos diferente (Figura 48).

Figura 48 - Separação dos porcelanatos em amostras com diferentes números de contatos. Ex. 46mesh.



Posteriormente, foram estabelecidos cinco valores de N_c para cada granulometria, identificadas por uma letra (a,b,c,d,e), a qual, em ordem alfabética, representa o número de contatos abrasivo/porcelanato. As condições estão apresentadas na Tabela 5.

Segundo Hutchings (2004) e Wang (2002), quanto menor o tamanho de abrasivo, maior o tempo necessário para se chegar à saturação do brilho; por isso nota-se na Tabela 6 que tamanhos menores de abrasivo (maior mesh) possuem maior número de contatos.

Tabela 5 – Número de contatos Nc a que cada amostra foi submetida.

	a	b	c	d	e
46	55	165	385	825	1650
60	55	165	385	825	1650
80	55	165	385	825	1650
100	55	165	385	825	1650
120	55	165	385	825	1650
180	55	165	385	825	1650
220	55	165	385	825	1650
180	55	165	385	825	1650
320	55	165	385	825	1650
360	55	165	385	825	1650
400	55	165	385	825	1650
600	55	165	385	825	1650
800	55	165	385	825	1650
1000	110	275	550	1100	2200
1200	110	275	550	1375	2475
1500	110	440	880	1760	3300

É necessário salientar que todas as amostras foram submetidas previamente às condições “e” das granulometrias anteriores. Desta forma, por exemplo, a amostra 180c foi submetida aos seguintes brunimentos: 46e, 60e, 80e, 100e, 120e e por fim 180c. Esta medida foi tomada com intuito de que se atinja a saturação da rugosidade e brilho antes da mudança de granulometria. A visão geral deste planejamento se encontra no Apêndice 1.

3.2.4. Medição dos resultados

3.2.3.1 – Medição da rugosidade.

Após o brunimento plano rotativo, as amostras foram analisadas através do equipamento disponibilizado pelo Laboratório de Ótica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, um microscópio confocal modelo LEICA 3DCM. Apesar do equipamento possuir

interferometria, neste trabalho foram utilizados apenas os recursos do confocal e as medições foram todas realizadas com lente objetiva de 10 vezes.

A vantagem deste equipamento, em relação a medições com contato, como apalpadores, é que há possibilidade de analisar uma área completa (1,2mm x 0,9mm), não apenas o perfil de uma linha. Esta característica confere maior confiabilidade ao resultado, pois a cinemática empregada torna o brunimento plano rotativo um processo direcional, fazendo com que a rugosidade paralela e perpendicular à direção dos sulcos criados pelo abrasivo seja diferente.

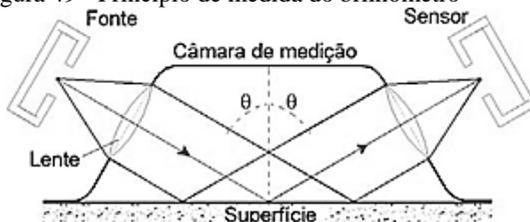
Em todas as amostras foram efetuadas medidas em cinco locais aleatórios no diâmetro central da trilha de brunimento, região onde o número de contato pode ser facilmente calculado.

3.2.3.2 – Medição de brilho

Assim como a rugosidade, o brilho também foi medido na região central da amostra. Um brilharômetro modelo HORIBA IG-320 foi utilizado.

Este tipo de equipamento tem seu funcionamento esquematizado na Figura 49. Nele existe uma câmara onde estão dispostos uma fonte e um detector de luz, ambos posicionados a um mesmo ângulo $\theta = 60^\circ$ em relação ao plano normal da superfície avaliada. Um feixe de luz é então emitido pela fonte, atinge a superfície do porcelanato e a luz refletida é contabilizada pelo sensor. O resultado desta medição é uma relação entre luz emitida e luz refletida de maneira especular, que é expressa em valores entre 0 e 100 unidades de brilho (ou G, do inglês *gloss*)(Sousa, 2007d).

Figura 49 - Princípio de medida do brilharômetro



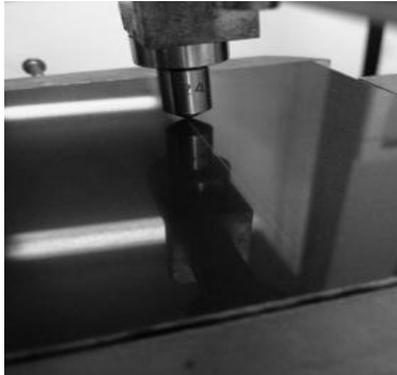
Fonte: Sousa, 2007d.

3.3. TESTES DE RISCAMENTO – MAPEAMENTO DE MECANISMOS DE DESGASTE.

Este tipo de ensaio tem como objetivo a simulação do desgaste causado por uma única partícula abrasiva na superfície da amostra. Para tal finalidade foi utilizado o equipamento chamado esclerômetro, também desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC (Alarcon, 2004).

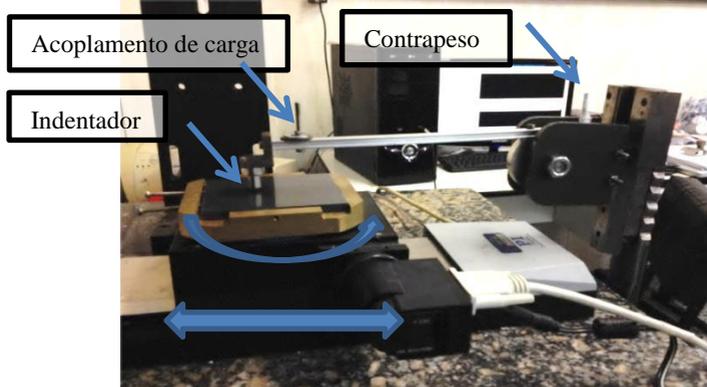
Um esclerômetro consiste basicamente de um indentedor o qual é pressionado contra a superfície a ser estudada, e então é realizado um movimento relativo entre ambos, causando um dano (risco, Figura 50) na amostra cerâmica.

Figura 50 - Dano causado pelo movimento relativo entre a superfície do porcelanato e o indentedor.



No equipamento utilizado, o movimento relativo é realizado mantendo o indentedor fixo e deslocando a amostra de porcelanato. A fim de evitar variações de carga causadas pela não planicidade do porcelanato, um indentedor Vickers foi acoplado a uma haste metálica com movimentação vertical livre e a aplicação da carga normal feita por peso-morto, como esquematizado na Figura 51.

Figura 51 - Esclerômetro utilizado para os testes de riscamento.



Os parâmetros empregados para realização dos riscos, listados na tabela 6, foram baseados em literaturas que abordam mapeamentos de mecanismos de remoção em materiais frágeis, como Hsu (1996), Sanchez (2002) e Wang (2002). Entretanto, foi levado em consideração o fato de os trabalhos supracitados terem sido focados em materiais com microestrutura homogênea (vidros, alumina e carbeto de silício, por exemplo) nos quais é esperada uma fragilidade muito menor do que em porcelanatos com sua microestrutura heterogênea e com grande presença de poros.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados nos testes de riscamento.

Velocidade (mm/s)							
1	5	15	25	35	50	75	100

Cargas (N)												
0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,3

Após a realização dos riscos, as amostras foram analisadas através microscopia eletrônica de varredura, realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC com um equipamento modelo JEOL JSM-6390LV.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. EVOLUÇÃO DA SUPERFÍCIE NO PROCESSO DE BRUNIMENTO DE PORCELANATOS.

4.1.1. Reprodução do processo em escala laboratorial.

Primeiramente os dados da simulação foram organizados visando verificar a influência da granulometria do abrasivo nas características da superfície do porcelanato.

A *priori* pode-se afirmar que tanto o tribômetro, quanto os parâmetros de brunimento utilizados são válidos para a reprodução do processo industrial, haja vista a similaridade entre as curvas de ganho de brilho e redução da rugosidade obtidas neste estudo (Figura 52) e as de outros autores como Wang (2002) e Hutchings (Hutchings, 2005ab), mostradas na Figura 53.

O gráfico mostrado na Figura 52 foi montado utilizando as amostras das condições “e” de cada granulometria. Esta medida foi tomada para garantir que os pontos fossem representados por superfícies que já atingiram estabilidade de brilho (G_{∞}) e rugosidade (R_{∞}).

Figura 52 - Efeito da granulometria do abrasivo na rugosidade e no brilho.

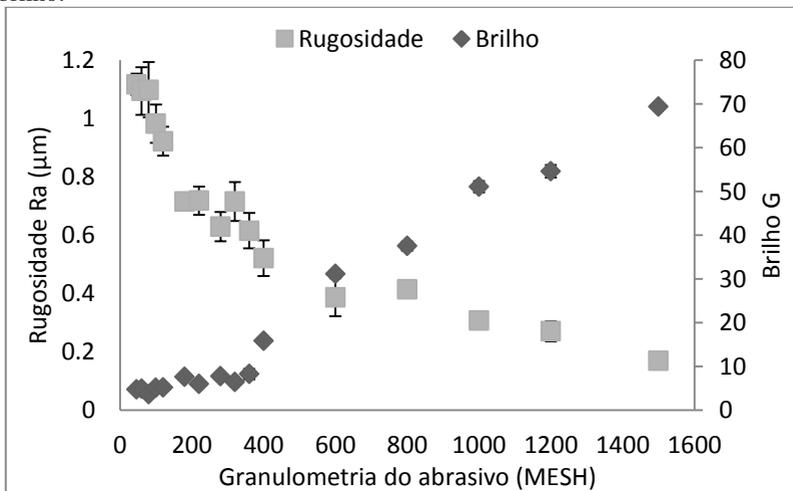
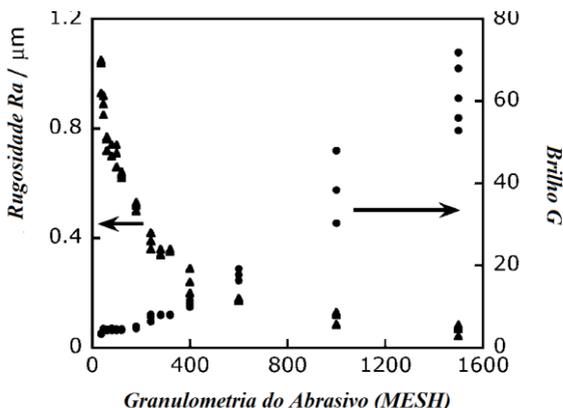


Figura 53 - Efeito da diminuição do tamanho do abrasivo na rugosidade R_a e no brilho em porcelanatos obtidos por Hutchings (2005a).



Fonte: Hutchings, 2005a.

Os resultados mostram que há uma clara relação entre a diminuição da granulometria com a redução da rugosidade e o ganho de brilho. Inicialmente, com o uso dos primeiros *fickerts* (46 a 400 mesh), ocorre uma grande queda da rugosidade, a qual aparenta estabilizar e decrescer mais lentamente para os abrasivos de maior mesh. Já o brilho apresenta comportamento contrário, tendo seu valor praticamente estável até a granulometria 400mesh, a partir da qual a superfície experimenta grande ganho de brilho até chegar ao valor de 69,4G após 1500mesh.

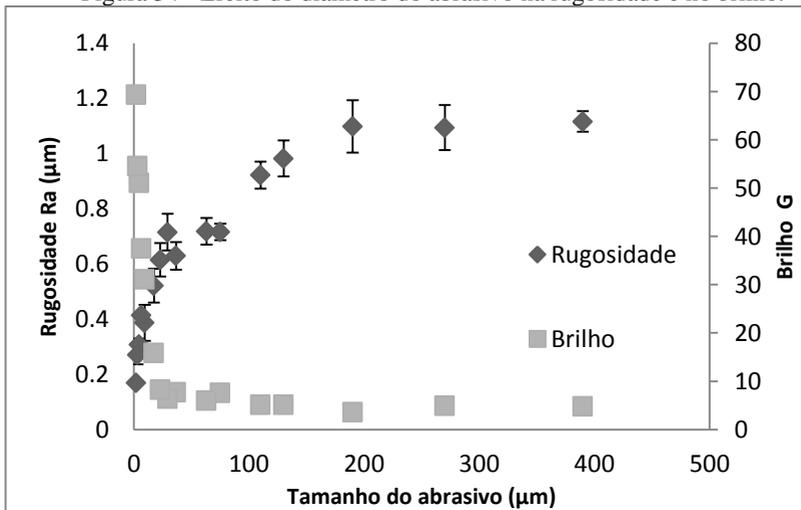
Estas informações são coerentes com a literatura (Hutchings, 2005ab; Sanches, 2002). Delas pode-se inferir que os abrasivos mais grosseiros têm maior influência na diminuição da rugosidade do que os mais finos e que estes, porém, são responsáveis pelo aumento do brilho.

Entretanto, esta interpretação dos resultados deixa pouco clara a relação rugosidade/brilho, pois se observa na Figura 52, que na região onde há grande redução da rugosidade (46 à 400 mesh), o brilho permanece estável, e na região em que há grande aumento no valor do brilho (600 a 1500 mesh) existe menor ganho em termos de rugosidade.

Para contornar esta incoerência, propõe-se aqui que os dados passem a ser apresentados em função do tamanho real dos abrasivos, ou diâmetro médio, não em categorias mesh. A Figura 54 apresenta exatamente os mesmos resultados da Figura 52, porém com a mudança

no eixo relacionado à dimensão do abrasivo, onde foi utilizado o diâmetro médio esperado para cada granulometria.

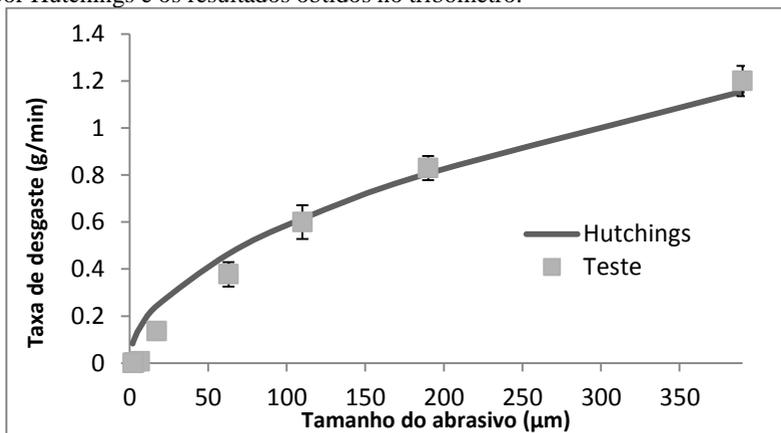
Figura 54 - Efeito do diâmetro do abrasivo na rugosidade e no brilho.



rugosidade, há também grande aumento do brilho. Este comportamento pode ser atrelado a maior participação dos mecanismos de deformação plástica (micro-sulcamento) com o uso de abrasivos menores, pois como não ocorrem nucleação e propagação de trincas, o sulco formado pelo abrasivo tende a ser proporcional ao seu tamanho, daí uma maior redução da rugosidade. Esta característica vai ao encontro das conclusões de Sanchez (2002) cujos estudos revelam que o aumento de brilho ocorre quando os riscos na superfície passam a ter características dúcteis.

Uma verificação na taxa de remoção do porcelanato para diferentes abrasivos (Fig. 56) também indica que para a usinagem com abrasivos de pequenos tamanhos ($<6.5 \mu\text{m}$, ou 800 mesh) não há remoção de material aparente, mesmo em testes que duraram períodos maiores que 1 hora. Portanto para estes abrasivos existe grande modificação nas características de rugosidade e brilho (Fig. 55), porém sem remoção de material. Isto confirma que o mecanismo de micro-sulcamento é dominante, já que, de acordo com Zum Gahr (1987), neste caso o material é apenas deslocado plasticamente para as laterais do sulco.

Figura 55 - Comparação entre modelo da taxa de remoção apresentado por Hutchings e os resultados obtidos no tribômetro.



Ainda na Figura 55 está apresentado o modelo de desgaste desenvolvido por Hutchings (Hutchings, 2005) Eq. 42, onde percebe-se grande correlação entre o modelo e os valores dos testes.

$$Q = \alpha \frac{W^{5/4} d^{1/2}}{A^{1/4} K_{IC}^{3/4} H^{1/2}} \quad \text{Eq. 42}$$

onde Q é a taxa de remoção; d, o diâmetro das partículas abrasivas; α , uma constante de proporcionalidade; W a carga aplicada; A a área de contato; K_{IC} a tenacidade a fratura do porcelanato e H a dureza do porcelanato.

A diferença nestas interpretações se dá por que a unidade mesh não tem relação linear com o tamanho real de partícula. Assim, por exemplo, a diferença entre mesh 46 e 36 que parece ser pequena, é de mais de 100 μ m (~390 e 270 μ m, respectivamente), enquanto a diferença entre #1000 e #1500 é de apenas 2,5 μ m (4,5 e 2 μ m).

Apesar das considerações feitas relativas ao uso da unidade mesh, no restante do trabalho ela será utilizada com intuito de possibilitar comparações com as demais fontes de pesquisa.

4.1.2. Influência do número de contatos abrasivo-porcelanato.

Os gráficos apresentados na Figura 56 mostram as curvas de redução da rugosidade para alguns dos abrasivos utilizados. Para facilitar a visualização este resultado foi dividido em duas partes, seguindo as etapas estabelecidas por Bittencourt (2002): a) Etapas de preparação da superfície (36 a 400mesh) e b) Etapa de ganho de brilho (600 a 1500mesh).

Observa-se, na Figura 56a, que abrasivos mais grossos, 46 a 400 mesh, não apresentaram uma clara tendência, pois o aumento do número de contatos não necessariamente resultou em redução da rugosidade. Algumas granulometrias inclusive aumentaram a rugosidade em relação ao abrasivo anterior (teoricamente mais grosseiro), 80 e 46 mesh, por exemplo. Todavia, em média, a redução do tamanho do abrasivo conferiu redução da rugosidade.

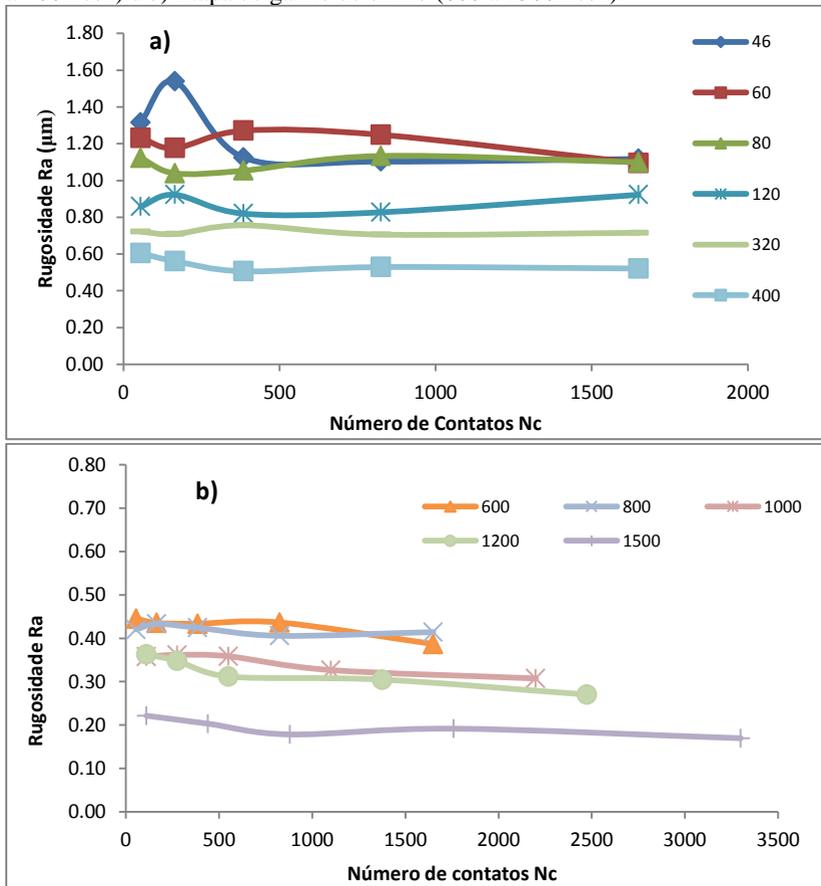
Este comportamento, pode ser entendido quando levados em consideração dois fatores: O primeiro deles diz respeito a classificação do tamanho de abrasivos, já o segundo remete ao mecanismo de desgaste envolvido.

A classificação das partículas em unidade mesh não significa que, para uma determinada granulometria, todas as partículas abrasivas possuam exatamente o mesmo diâmetro. Na verdade trata-se de uma

distribuição de tamanhos, que pode inclusive se sobrepor a distribuição do abrasivo subsequente, ou seja, tanto o abrasivo 60 mesh ($270\mu\text{m}$) quanto o abrasivo 80 mesh ($190\mu\text{m}$) possuem um determinado percentual de partículas com $230\mu\text{m}$

O segundo fator a ser considerado é novamente o mecanismo de desgaste, que, para tamanhos grandes de abrasivo (#46 a #400), é o micro-lascamento (Sanchez, 2002; Hutchings 1992) e como mencionado anteriormente, os riscos gerados desta forma crescem pela propagação instável de trincas.

Figura 56 - Diminuição da rugosidade em função do número de contatos para diferentes granulometrias (mesh): a) Etapas de preparação da superfície (36 a 400mesh) e b) Etapa de ganho de brilho (600 a 1500mesh).



Já no brunimento plano rotativo com granulometrias mais finas, a partir de 600 mesh, onde de acordo com Sanchez (Sanchez, 2002), passa a predominar o mecanismo de micro-sulcamento, pode-se observar certa tendência à diminuição da rugosidade com o aumento do número de contatos e também com a redução do tamanho do abrasivo. Este resultado apresenta similaridade com os obtidos por Wang (Wang 2002) e por Hutchings (2005b) (Fig. 15), porém aqui estão apresentados em função do número de contatos N_c ao em vez do tempo de brunimento.

Da mesma forma não foram possíveis de serem observadas tendências claras quanto ao ganho de brilho nas granulometrias mais grosseiras, 46 a 400 mesh (Fig. 57a). Entretanto, para os abrasivos 600 a 1500 mesh (Figura 57b), foi verificada uma compatibilidade considerável com modelo proposto por Hutchings (2005b) (Eq. 7), quando nele é substituído o parâmetro tempo t pelo número de contatos N_c .

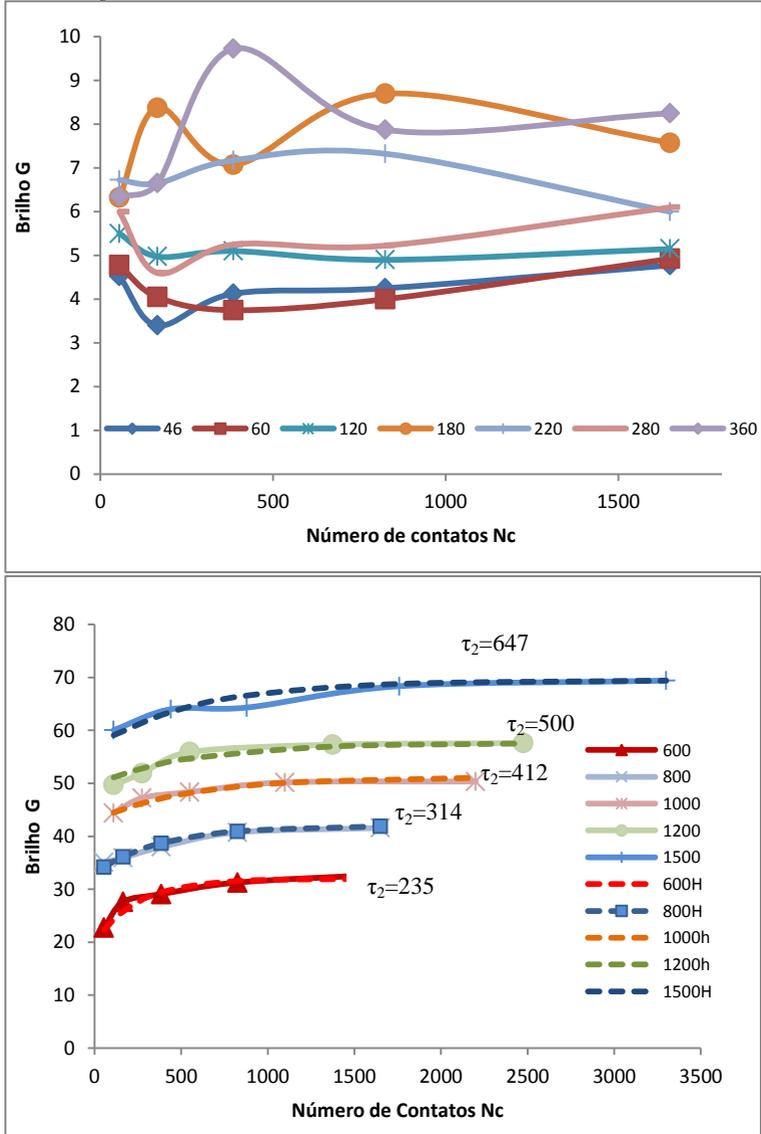
$$G(t) = G_{\infty} - (G_0 - G_{\infty})\exp(-Nc/\tau_2) \quad \text{Eq. 43}$$

Nota-se, na Figura 57b, que há um grande aumento do brilho durante os primeiros contatos, seguido por sua estabilização com o decorrer do processo.

Desta forma, a partir dos resultados dos testes, pode-se calcular, isolando τ_2 na Eq. 43, a quantidade de contatos na qual o brilho atinge 64,2% do valor máximo G_{∞} para determinada granulometria. Este valor foi assumido como o ideal, pois períodos cada vez mais longos de brunimento são necessários para ganhos cada vez menores de brilho.

Ainda na Figura 57b, nota-se que τ_2 decresce com o aumento do tamanho de partícula. Esta tendência ocorre pela capacidade de maiores abrasivos modificarem mais rapidamente as características da superfície. Vale ressaltar que apesar de a mudança ser mais rápida ela não é obrigatoriamente mais significativa.

Figura 57 – Ganho de brilho em função do número de contatos para a) etapas de preparação da superfície (36 a 400mesh) e b) etapa de ganho de brilho (600 a 1500mesh) correlacionadas ao modelo proposto por Hutchings (linhas tracejadas).



Um processo de usinagem extra foi realizado com base nos resultados de τ_2 da Fig. 58b. A intenção foi analisar a possibilidade de aumento na eficiência do brunimento plano rotativo. Como as curvas abaixo 400 mesh não possibilitaram o cálculo do número de contato característico, para estas foi mantido $N_c=220$, resultando na carta de processo mostrada na tabela 7.

Tabela 7. Número de contatos em cada granulometria, para brunimento plano rotativo baseado nos experimentos mostrados na Figura 57b.

Granulometria MESH	Número de contatos N_c
#46	220
#60	220
#80	220
#100	220
#120	220
#180	220
#220	220
#260	220
#320	220
#360	220
#400	220
#600	275
#800	330
#1000	440
#1200	550
#1500	660

Este experimento resultou em brilho médio de 66,7 G com número de contatos somados a partir de 600 mesh, igual a 2255, um valor alto quando comparado ao 69,4 G obtido no estudo de saturação do brilho, onde foram utilizados um total de 11275 contatos para a mesma faixa de granulometria. Isto significa que se alcançou 96% do brilho, com 20% do número de contatos. Esta resposta mostra que um estudo prévio do processo pode aumentar consideravelmente a eficiência do brunimento plano rotativo (menor consumo de ferramenta e porcelanato e menor tempo de produção), ainda mais em conjunto ao uso de simulações como a feita por Sousa (2007abcd; 2009). Seria

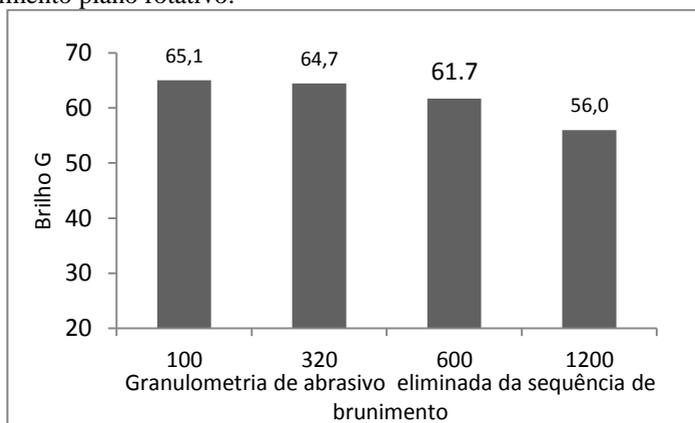
possível, por exemplo, garantir que toda superfície tivesse números de contatos acima de τ_2 , ou outro valor de critério, a partir do qual não é possível notar grandes mudanças do brilho mesmo com N_c muito distintos (próximos à saturação).

4.1.3. Influência da granulometria abrasiva nos defeitos de sombra

Este estudo foi desenvolvido após verificar-se, na Figura 54, que as granulometrias mais grosseiras pouco incrementam o brilho da superfície e, além disto, o número de contatos para se atingir estabilização do brilho, τ_2 (Fig.57b), tende a diminuir com o aumento do tamanho de partícula. Este dois resultados levantaram questionamentos sobre a importância das etapas iniciais (46 a 400mesh) quando estudados o defeitos de sombras, pois nesta faixa não há grandes mudanças na superfície e as pequenas alterações de brilho e rugosidade acontecem rapidamente (baixos N_c).

Como já explicado anteriormente este defeito é gerado pela dispersão do número de contatos do abrasivo ao longo da superfície do porcelanato. Portanto, foram brunidas quatro amostras de porcelanato com as mesmas condições da tabela 8, porém, para cada uma delas, uma das seguintes granulometrias foi excluída da sequência de brunimento: 100, 320, 600 e 1200 mesh. O brilho final foi então medido e está apresentado na Figura 58.

Figura 58 - Influência da eliminação de granas na sequência de brunimento plano rotativo.



É possível observar que o fato de o porcelanato não ser devidamente brunido por uma das granulometrias mais grosseiras estudadas teve pouca influência no brilho final. Já a eliminação de uma das granulometrias mais finas levou à redução considerável do brilho final, de 66,7G com a sequência completa, caindo para 56,0G com a ausência da granulometria 1200 mesh.

Este resultado indica que dispersão do número de contatos abrasivo/porcelanato é mais prejudicial quando ocorre durante o uso dos últimos abrasivos (partículas mais finas). Pode se assumir então que em simulações computacionais, como as feitas por Sousa (2007abcd; 2009), seria mais eficiente dar pesos distintos às granulometrias.

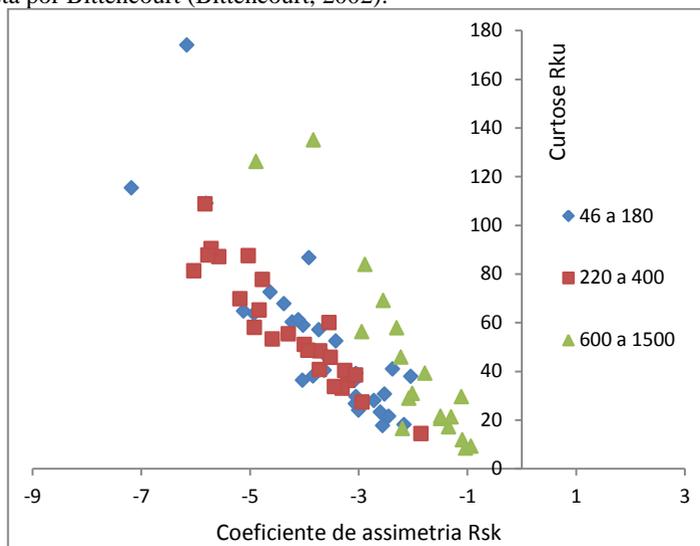
O mesmo pode ser aplicado em linhas industriais quando a ocorrência das “sombras de polimento” estiver comprometendo a produção. Poderiam aumentar o número de abrasivos com granas finas (em detrimento às granulometrias grosseiras), levando toda a superfície a atingir valores próximos ao de saturação de brilho G_{∞} .

Entretanto, é importante se considerar que os primeiros abrasivos (46 a400 mesh) são responsáveis pela eliminação dos profundos danos causados na etapa de retificação, que não são removidos pelas granulometrias mais finas (Bittencourt; 2002). Desta forma, deve-se balancear a quantidade de cabeçotes com abrasivos grosseiros e finos (quanto mais cabeçotes, maior o número de contatos N_c) com base no defeito que se encontra comprometendo a produção, se sombras ou riscos.

4.1.4. Espaço morfológico do processo.

Inicialmente, ao ser construído o gráfico com os valores de curtose R_{ku} em função do coeficiente de assimetria R_{sk} (Figura 59) já é possível observar que todos os pontos medidos se encontram no quadrante negativo de R_{sk} . Isto significa que a superfície tem por característica a predominância de vales em relação a picos, o que, segundo Whitehouse (2011), é característico de processos como brunimento, retificação, e polimento.

Figura 59 - Espaço morfológico do processo de brunimento plano rotativo de porcelanato. Dados separados segundo a separação de etapas proposta por Bittencourt (Bittencourt, 2002).

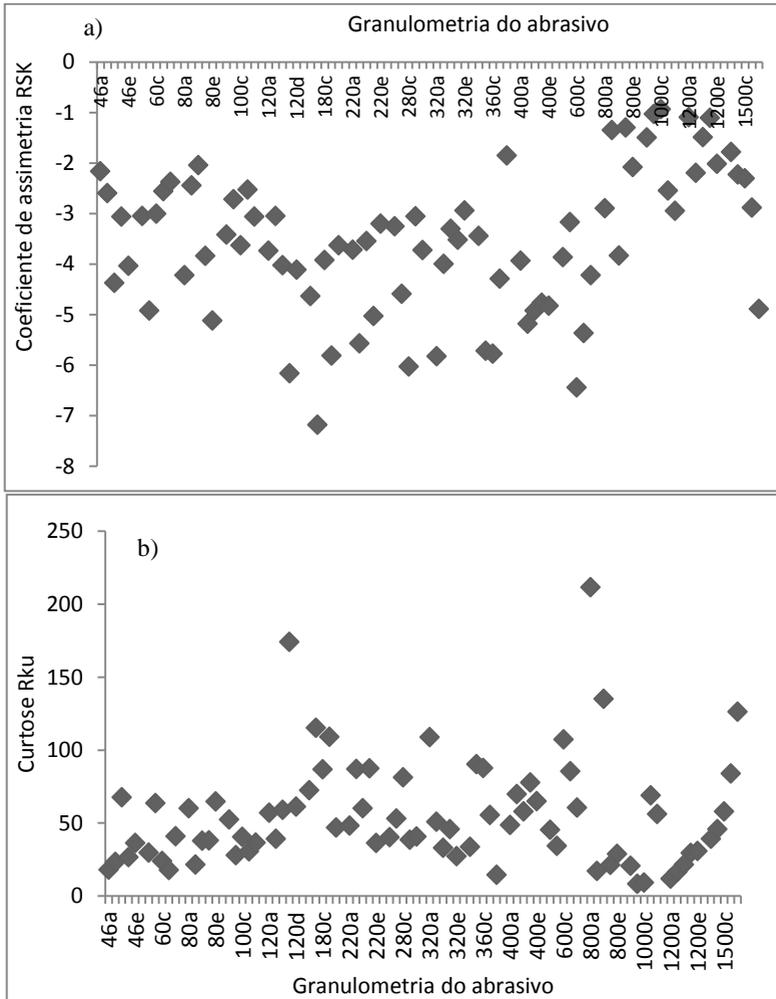


Se os dados forem então separados, de acordo com as diferentes etapas propostas por Bittencourt (2002)(seção 2.2.2), nota-se que as duas primeiras etapas produzem superfícies cujos espaços morfológicos não são possíveis de serem distinguidos entre si. Contudo, a terceira etapa, onde acontece o ganho de brilho (acima de 600 mesh), ocupa uma posição distinta, mais próxima ao eixo de $Rsk = 0$.

Este tipo de disposição, segundo De Mello (1985; 1986) indica mudanças no mecanismo de remoção, o que, de acordo com Sanchez (2002), faz pleno sentido, pois a partir do abrasivo 600 mesh o mecanismo de micro-sulcamento começa a prevalecer. O mesmo é afirmado por Sousa (2014) quanto ao ganho de brilho somente ser possível com o deslocamento plástico das asperidades.

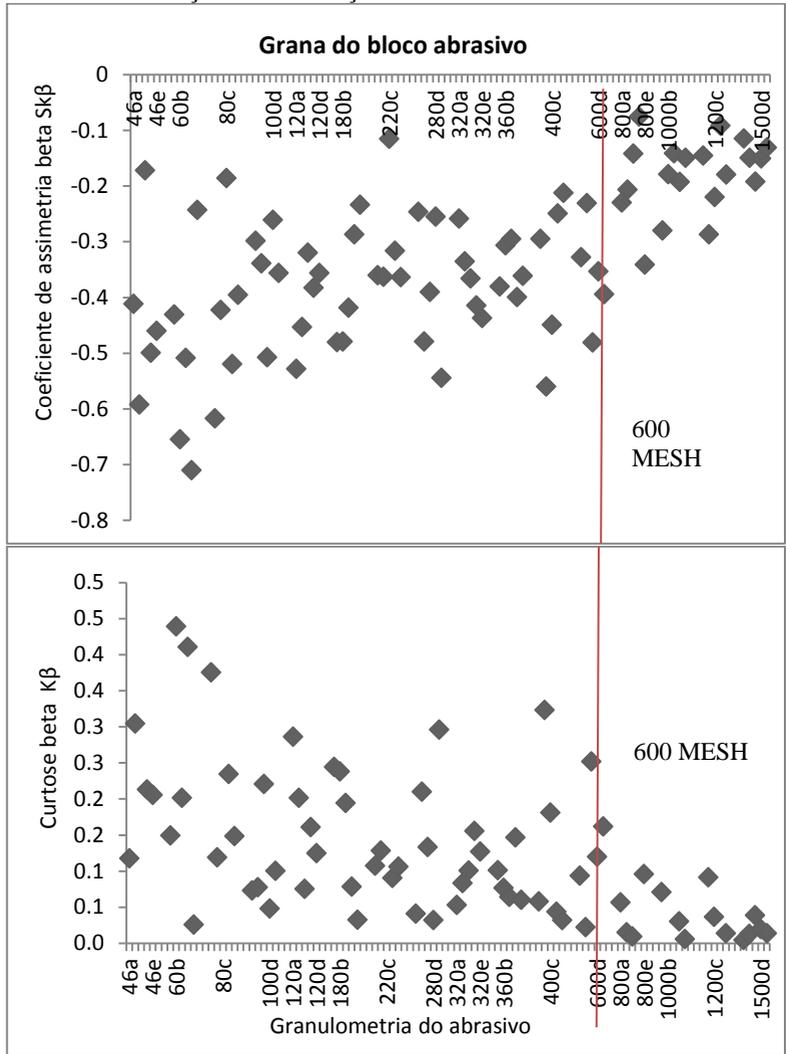
Contudo, esta análise traz consigo uma elevada dispersão dos resultados aliada à uma interdependência dos parâmetros (Whitehouse, 2011). Isto não possibilita afirmar nem que o coeficiente de assimetria tende a se aproximar de zero (Fig.60a), nem que a curtose tende a aumentar (Fig. 60b) com a diminuição do tamanho de abrasivo.

Figura 60. Variação dos parâmetros a) coeficiente de assimetria e b) curtose em função da diminuição do tamanho de abrasivo.



Com intuito de estabilizar e tornar os parâmetros R_{sk} e R_{ku} independentes, a função beta de Whitehouse (2011) foi aplicada. Os resultados foram gráficos com tendências mais claras, expressos agora como Sk_{β} (coeficiente de assimetria beta) e K_{β} (curtose beta) na Figura 61.

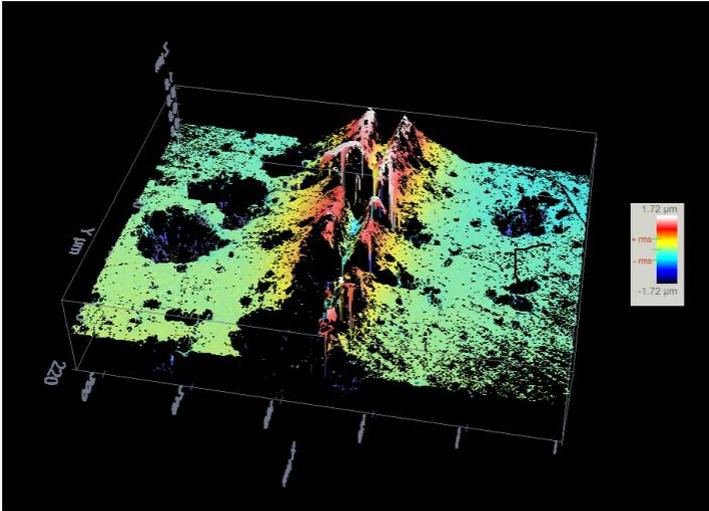
Figura 61 Variação dos parâmetros a) coeficiente de assimetria beta Sk_β e b) curtose beta K_β em função da diminuição do tamanho de abrasivo.



Após a aplicação da função beta nos dados estatísticos percebe-se claramente um aumento do valor de Sk_β e queda no valor de K_β , além de uma menor dispersão dos dados a partir da granulometria 600 mesh. Isto significa que partículas menores diminuem a predominância dos

vales em relação aos picos (aproximação de K_β ao valor zero). Esta “diminuição da quantidade de vales” na verdade pode ser causada pelo deslocamento plástico de material, que se movimenta e acaba preenchendo os vales, como estabeleceu Sousa (2014) para processo de polimento. Outra possibilidade é o deslocamento plástico de material do sulco para as laterais, como explicado por Zum Gahr (Zum Gahr, 1987), gerando picos e diminuindo a predominância dos vales (ver Figura 26 na seção 2.4.3). Este deslocamento plástico não só é possível, como foi comprovado a partir de uma análise de topografia de superfície (Figura 62) feita com microscópio confocal na superfície de um porcelanato submetido ao teste de riscamento.

Figura 62 - Microscopia confocal de risco realizado na superfície do porcelanato. Indentador Vickers; 50mm/s; 1N.



A imagem de um risco na Figura 62 mostra que nas adjacências do sulco formaram-se elevações, caracterizando a existência do mecanismo de micro-sulcamento. É necessário salientar que nesta microscopia também existe anamorfose, ou seja, os relevos são supervalorizados.

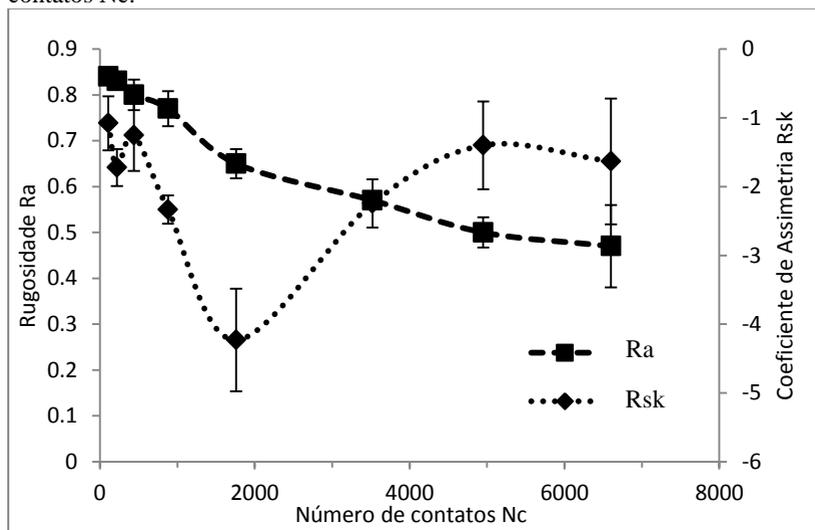
4.1.5. Mudança da morfologia das asperidades em função do número de contatos.

Não foi possível verificar padrões de comportamento para as curvas que descrevem a evolução do coeficiente de assimetria R_{sk} em função do número de contatos.

Duas possíveis explicações para a grande dispersão de resultados são: 1) No regime de micro-lascamento as mudanças na superfície ocorrem muito rapidamente, além de contar com a propagação aleatória das trincas; 2) A diferença de tamanho de partícula é muito pequena nos abrasivos que geram micro-sulcamento.

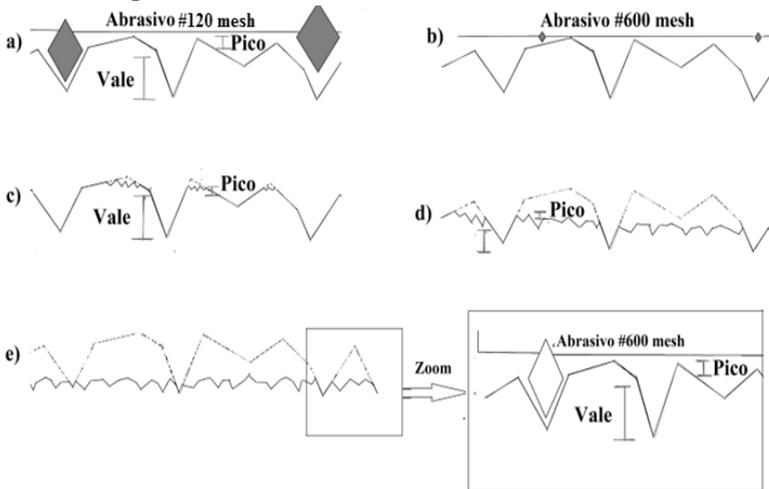
Visando então verificar uma possível relação R_{sk} em função de N_c , foram realizados brunimentos plano rotativos de forma que as alterações na rugosidade ocorressem durante períodos longos. Para isso, um porcelanato brunido até a condição 120e foi submetido diretamente ao abrasivo 600 mesh (Fig. 63). Outros testes similares foram feitos e apresentaram o mesmo comportamento. Inicialmente há uma redução no valor do coeficiente de assimetria R_{sk} , o qual atinge um mínimo e posteriormente retorna a valores próximos aos iniciais.

Figura 63 - Evolução do coeficiente de assimetria R_{sk} com o número de contatos N_c .



As afirmações de Bhusham (2000) e Whitehouse (2011) de que em processos como o brunimento os abrasivos removem preferencialmente os picos, serviram de base para propor a seguinte hipótese: a mudança brusca de abrasivo faz com que as partículas subsequentes (muito menores) alcancem de fato somente os picos. Assim não ocorre o aprofundamento dos vales (Fig. 64c), embora os picos sejam reduzidos. Isto aumenta a predominância de vales em relação aos picos e conseqüentemente torna o valor de R_{sk} mais negativo. Posteriormente, as partículas alcançam as adjacências dos vales (Fig. 64d), fazendo com que estes se tornem menos profundos, pois a linha média de desloca para baixo, e aumentando então o valor de R_{sk} , até que se alcance uma relação pico/vale similar à condição inicial (Fig.64e).

Figura 64 - Hipótese que explicaria o comportamento da curva mostrada na Figura 64



No ponto onde R_{sk} retorna a valores mais próximos de zero é esperado que se tenha uma estabilização na rugosidade. Este comportamento é de fato observado na Figura 63, onde se percebe que tanto a rugosidade R_a quanto o coeficiente de assimetria R_{sk} parecem se estabilizar em valores de número de contatos N_c próximos a 5000.

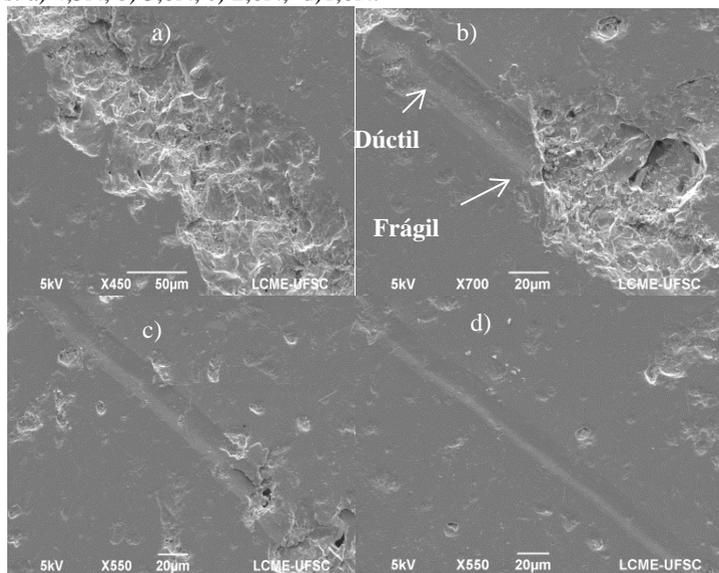
4.2. TRANSIÇÃO DO MECANISMO DE REMOÇÃO EM PORCELANATOS - MAPEAMENTO.

Como visto no decorrer deste trabalho os mecanismos de desgaste atuantes em um processo de abrasão têm fundamental importância nas características finais da superfície (Sanchez, 2002; Hutchings, 1992).

Desta forma fica evidente a necessidade de um mapeamento, verificando os parâmetros que levam a transição de remoção dúctil-frágil.

A figura 65 mostra exemplos de riscos estudados e como foram caracterizados estes mecanismos.

Figura 65 - Morfologia dos riscos causados por indentador Vickers, 50mm/s: a) 4,5N, b) 3,0N, c) 2,0N, d) 1,0N.



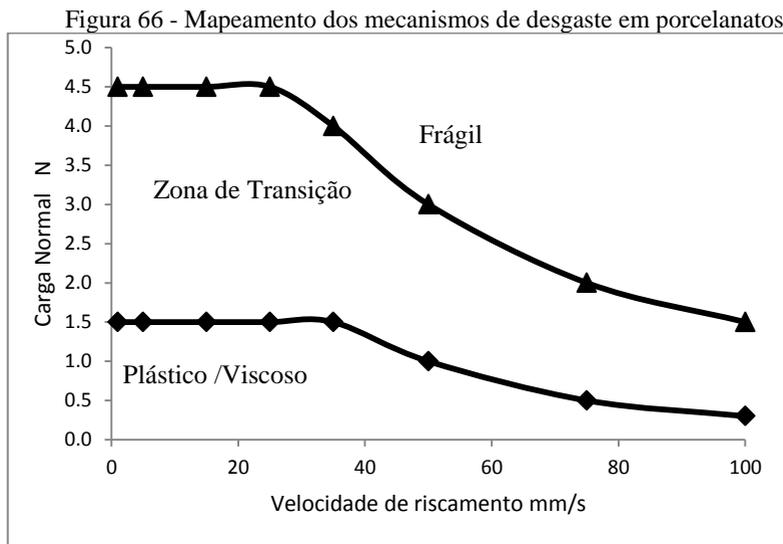
A Figura 65a mostra que a aplicação de uma carga de 4,5N e velocidade de 50mm/s no teste de riscamento resultam na nucleação e propagação de trincas, caracterizando o micro-lascamento.

Na Figura 65b percebe-se que em algumas regiões começam a surgir sulcos formados apenas pelo fluxo plástico/viscoso. Foi considerado então que a transição de mecanismo tem início com carregamentos de 3,0N em riscos realizados a 50mm/s.

A ocorrência de micro-lascamento apenas nas regiões próximas a poros (Fig.65b) demonstra o papel da micro-estrutura do porcelanato no seu ganho de brilho, pois além de não contribuírem com a reflexão especular, os poros facilitam os mecanismos de remoção frágeis.

Com cargas menores que 1,0N cessou completamente o micro-lascamento. Todo material removido do risco escoou para as laterais, caracterizando domínio completo do micro-sulcamento.

A partir de uma análise como esta foi então construído o mapeamento da transição de mecanismos de desgaste (Figura 66).



No mapeamento desenvolvido, foi observado que a carga onde ocorre a transição não muda para velocidades de riscamento de até 35mm/s, permanecendo em uma faixa estável entre 1,5N e 4,5N. Com o aumento da velocidade, o mecanismo de micro-lascamento passou existir em cargas cada vez mais baixas, sendo que para riscos efetuados a 100mm/s a faixa de transição está entre 0,3N e 1,5N.

Este resultado é consistente com os trabalhos de Hsu (1996). O aumento da carga faz com que se atinja a tensão limite para nucleação da trincas.

Já o aumento da velocidade torna a abrasão mais severa, aumentando os esforços tangenciais que facilitam o início da trinca (Hutchings, 1992).

A partir de mapeamentos como este, as condições de contato e as ferramentas podem ser otimizadas buscando favorecer o microsulcamento, afinal, como foi demonstrado, o maior ganho no brilho da superfície ocorre com este mecanismo.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho verificou-se que o equipamento desenvolvido no laboratório LMP é capaz de simular o processo de brunimento plano rotativo industrial. As curvas de ganho de brilho e de redução de rugosidade apresentaram comportamento similar às encontradas na indústria e em outras literaturas (Hutchings, 2005; Wang, 2002). Este resultado valida os estudos que foram realizados neste trabalho, além de incentivar futuros trabalhos na área, pois a necessidade utilizar as linhas industriais para experimentos leva ao desinteresse por parte de empresas, que não querem ter sua produção diminuída.

Foi também proposto que estudos relacionados à influência da granulometria abrasiva nas características da superfície sejam apresentadas em função do tamanho de partículas (substituindo a classificação mesh). Esta medida pode alterar a interpretação de resultados, e neste caso explica melhor a relação brilho versus rugosidade. Com a modificação de unidades (mesh para μm) fica evidente que tanto o maior ganho de brilho quanto a maior redução da rugosidade acontecem na região correspondente aos abrasivos mais finos, em decorrência da mudança no mecanismo de remoção após 600mesh, ou $<9,3\mu\text{m}$.

Em decorrência da predominância do micro-lascamento com o uso de abrasivos entre 46 e 400 mesh, não foi possível observar comportamentos estáveis nas curvas de ganho de brilho $G(N_c)$ e redução da rugosidade $R_a(N_c)$.

Já o brunimento plano rotativo com abrasivos entre 600 e 1500 mesh resultou em curvas de ganho de brilho que apresentaram boa correlação com o modelo proposto por Hutchings (2005).

A partir deste modelo foram calculados os números de contatos característicos de ganho de brilho com o uso de abrasivos a partir de 600 mesh. Foi assumido então que estes valores seriam ideais para a realização de um processo otimizado. Esta otimização resultou, com um número de contatos 80% menor, em um brilho muito próximo ao obtido em processos prolongados que visaram a saturação de brilho, 66,7G e 69,4G, respectivamente.

Devido à distinção apresentada no comportamento da superfície em relação ao uso de abrasivos grosseiros e finos, foi estudada a influência da granulometria no aparecimento dos defeitos de sombras. Verificou-se que a eliminação dos primeiros abrasivos (mais grosseiros) tem menor interferência no brilho final. Ao evitar a granulometria 100 mesh o brilho resultante foi de 65,1G, enquanto a falta do abrasivo

1200mesh resultou em 56,0G. Isto indica que os defeitos de sombras são resultados principalmente da dispersão de número de contatos durante o brunimento plano rotativo com as partículas mais finas.

A averiguação dos parâmetros coeficiente de assimetria R_{sk} e curtose R_k se mostrou de grande utilidade ao fornecer mais informações a respeito das asperidades, à exemplo da predominância de vales em relação a picos. Através da construção do espaço morfológico foi possível inclusive identificar a transição de mecanismos de desgaste durante o brunimento plano rotativo, que ocorreu a partir da granulometria 600mesh.

Considerando a importância que a transição de mecanismo de desgaste apresentou no processo de brunimento plano rotativo de porcelanatos, foi desenvolvido um mapeamento, no qual se verificou que o tipo de desgaste depende da carga normal aplicada, e também, para valores acima de 35mm/s, da velocidade de riscamento.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência isolada dos parâmetros R_{sk} e R_{ku} no brilho, através da produção de superfícies com o mesmo valor de R_a , porém com morfologias diferentes.
- Verificar mais amplamente a influência da granulometria no aparecimento do defeito de sombras, para assim conferir pesos diferentes na simulação computacional do processo.
- A partir da caracterização da distribuição e quantificação de abrasivos em contato com a superfície do porcelanato, verificar a carga individual a que cada uma delas é submetida, e comparar os riscos gerados com estes abrasivos, com o mapeamento do mecanismo de transição. Isto poderia permitir que fossem desenvolvidas ferramentas que facilitariam a remoção plástica.

7. REFERÊNCIAS

ADACHI, K.; KATO, K.; CHEN, N. Wear Map of Ceramics. **Wear**, v. 203-204, p. 291-301, 1997.

AJAYI, O. O.; LUDEMA, K. C. Surface Damage Of Structural Ceramics: Implications For Wear Modeling. **Wear**, v. 124,p. 237-257,1988.

ALARCON, O.; WEINGAERTNER, W. L.; ROMAN, H.; SOUSA, F. J. P.; PEREIRA, M.; SPILLER, A.; TRIDAPALLI, D. Design and Development of an Apparatus for Measuring the Scratch Hardness of Ceramic Tiles. **Qualicer VIII**, p. 283-295, 2004.

AMORÓS, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 5, p. 23-28 set/out. 2000a.

AMORÓS, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte II: A Compactação. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 6, p. 14-20, nov/dez. 2000b.

AMORÓS, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte III: Variáveis do Processo de Compactação. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 1, p. 15-23, jan/fev. 2001a.

AMORÓS, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte IV: Extração da Peça e Resistência Mecânica a Verde. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 46-50, abr/mai. 2001b.

AMORÓS, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte V: Descrição da Etapa de Prensagem. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 3, p. 26-32, mai/jun. 2001c.

ANFACER. Associação Nacional dos Fabricantes de Ceramica para Revestimento, Louças Sanitárias e Congêneres. Disponível em: www.anfacer.org.br. Acesso em: 15 de julho de 2013.

BITTENCOURT, E. L. BENINCÁ, E. Aspectos superficiais do produto grês polido. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 4, p. 40-46, jul/ago. 2002.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook v.1**. CRC Press, 2000. 1760 p.

BRESCIANI, A.; BRUSA, A.; FEDERICI, M. Pastas de Gres Porcelânico Decoradas con Sales Solubles. Indicaciones Para Optimizar la Composición. **Qualicer V**, P. GI, p 251 – 264, 1998.

CARTY, W. M.; SENAPATI, U. Porcelain-Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 81, n 1, p. 3-20, 1998.

DE MELLO, J. D. B.; DURAND-CHARRE, M. Abrasion Mechanisms of White Cast Iron I: Influence of the Metallurgical Structure of Molybdenum White Cast Irons. **Materials Science and Engineering**, v. 73, p. 203-213, 1985.

DE MELLO, J. D. B.; DURAND-CHARRE, M. Abrasion Mechanisms of White Cast Iron II: Influence of the Metallurgical Structure of V-Cr White Cast Irons. **Materials Science and Engineering**, v. 78, p. 127-134, 1986.

De NONI, A. Estudo das propriedades mecânicas de porcelanato através da avaliação de tensões residuais microscópicas e macroscópicas originadas durante a etapa de resfriamento do ciclo de queima. 2007. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ESPOSITO, L.; TUCCI, A; NALDI, D. The reliability of porcelain stoneware tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. v.25, n.9. p.1487-1498, jun. 2005.

EVANS, C.J.; PAUL, E.; DORNFELD, D.; LUCCA, D. A.; BYRNE, G.; TRICARD, M.; KLOCKE, F. Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing. **CIRP Annals – Manufacturing Process**, v.52, n2, p.611-633, 2003

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v.123, p.133-145, 2002.

GREEN, D. J. **An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics**. Cambridge University Press, 1998. 336p

HECK, C. Grés Porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v. 1, n. 04/05, p. 21-24, ago/dez. 1996.

HOKKIRIGAWA, K. Wear Mode Map of Ceramics. **Wear**, v 151,n.2, p. 219-228, 1991.

HSU, S.M.; SHEN, M.C. Ceramic Wear Map. **Wear**, v.200, n.1-2, p. 154-175, 1996.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. Oxford: Elsevier Science, 1992. 272 p.

HUTCHINGS, I. M.; ADACHI, K.; XU, Y.; SÁNCHEZ, E.; IBÁÑES, M. J. Laboratory Simulation of the industrial ceramic tile polishing process. **Qualicer VIII**, - p. 19-30. 2004.

HUTCHINGS, I. M.; ADACHI, K.; SÁNCHEZ, E.; IBAÑES, M.J.; QUEREDA, M. F. Analysis and laboratory simulation of na industrial polishingprocess for porcelain ceramic tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n 13, p. 3151-3156, ago. 2005a.

HUTCHINGS, I. M.; XU. Y.; SÁNCHEZ, E.; IBÁÑES, M. J., ORTS, M. J., CANTAVELLA, V. Development of surface finish during the polishing of porcelain ceramic tiles. **Journal of Material Science**, v. 40, p. 37-42, 2005b.

HUTCHINGS, I. M.; XU. Y.; SÁNCHEZ, E.; IBÁÑES, M. J., QUEREDA M. F. Porcelain tile microstructure: implications for polishability. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 6, p. 1035-1042, 2006.

IBÁÑES, M.J.; SÁCHEZ, E.; GARCÍA-TEN, J.; ORTS, M.J.; CANTEVELLA, V.; SÁCHEZ. J.; SOLER, C.; PORTOLÉS, J.; SALES, J.; Use of a pin-on-disk tribometer for studying porcelain tile polishing. **VII Qualicer**, Anais, ITC, p. 401-416, 2002.

LOLLI, L.; NASSETI, G.; MARINO, L.F.B. A Preparação a Seco de Massas Cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.2. p.23-27, 2000.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping**. Springer. 2009. 457 p.

KATO, K. Micro-mechanisms of Wear – Wear Modes. **Wear**, v.153, p.277-295, 1992.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear of Advanced Ceramics. **Wear**, v. 253, p.1097-1104. 2002.

KOMANDURI, R. On Material Removal Mechanisms in Finishing of Advanced Ceramics and Glasses. **CIRP Annals**, v. 45, p. 509-514, 1996.

LAWN, B. R.; SWAIN, M.V. Microfracture Beneath Point Indentation in Brittle Solids. **Journal of Material Science**, v.10, p. 113- 122, 1975.

LAMBROPOULOS, J. C.; JACOBS, S. D.; GILLMAN, B. E.; STEVENS, H. J. Deterministic Microgrinding , Lapping, and Polishing of Glass-Ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v.88, n.5, p.1127-1123, 2005.

MARINESCU, Ioan D. **Tribology of abrasive machining processes**. New York: Willian Andrew. 2004. 751 p.

MARINESCU, I. D.; TONSHOF, H.K.; INASKI. I. **Handbook of Ceramic Grinding & Polshing**. Elsevier Science. 1999. 498 p.

MARSH, D.M. Plastic Flow in Glass. **Proc. R. Soc. Lond.** V. 279, n.1378, p.420-435, 1964.

MENEGAZZO, A.P.M; LEMOS, F.L.N; PASCHOAL, J.O.A.; Grés Porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n.5, p. 7-10, set/out. 2000.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5 Ed. Wiley. 2010. 784 p

MOTTA, J.F.M.; JUNIOR, M.C.; TANNO, L. C. Panorama das Matérias Primas Utilizadas na Indústria de Revestimentos Cerâmicos:

Desafios do Setor Produtivo. *Cerâmica Industrial*, v.2, n.4-6, p.30-38, jul/dez. 1998.

NEGRE, F. et al. Estudo da Operação de Secagem por Atomização de Pós Cerâmicos em Escala Industrial: Seu Controle e Automatização. ***Cerâmica Industrial***, v. 5, n. 2, p. 47-52, mar/abr. 2002.

OLENBURG, A.; SOUSA, F.J.P.; AURICH, J. C. Polishing of Porcelain Tiles in Industrial – and Laboratory-scale. ***CFI – Ceramic Forum International*** 90, v. 3: S. E39-E43. 2013.

OLIVEIRA, A. P. N. Gres porcelanatos: aspectos tecnológicos e mercadológicos. ***Cerâmica Industrial***, v.3, n.3, p. 34-41, jun. 1998.

ORTS. M.J.; SÁNCHEZ, E.; GARCÍA-TEN, J.; IBÁÑES, M.J.; SANCHEZ. J.; SOLER, C.; PORTOLES, J. Comportamiento del gres porcelánico durante la operación de pulido. ***Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio***, v.40, n. 6, p.447-455, 2001

PARRA, B. S.; GENNARI, R. C.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos. ***Cerâmica Industrial***, v.11, n.2, p.15-18, mar/abr. 2006.

PEREIRA, R. S. F. Influência das Condições Mecânicas e Físico-Químicas no Processo de Brunimento Plano Rotativo de Placas de Porcelanato. 2012. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012

PIHTILI, H. ***Tribology in Engineering***. InTech, 2013. 240p.

RICHERSON, D. W. ***Modern Ceramic Engineering***. 3. Ed. CRC Press. 2005. 728 p

ROSSO, J.; CUNHA, E.; ROJAS-RAMIREZ, R.A. Características técnicas e polimento de porcelanatos. ***Cerâmica Industrial***, v. 10, n.4, p. 11-14, jul/ago. 2005.

SANCHÉZ, E.; GARCIA-TEN, J.; IBÁÑES, M. J.; ORTS, M.J.; CANTAVELLA, V. Polishing porcelain tile. Part 1: wear mechanism, ***American Ceramic Society Bulletin***,v.81, p.50–54, 2002.

SÁNCHEZ, E.; GARCIA-TEN, J.; SANZ, V.; MORENO, A. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**, 36, p. 831-845, nov. 2009

SOUSA, F. J. P.; AURICH, J. C.; WEINGAERTNER, W. L., ALARCON, O. E. Kinematics of a single abrasive particle during the industrial polishing process of porcelain stoneware tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n 10, p. 3183-3190, 2007a.

SOUSA, F. J. P.; JÚNIOR, N. V.; WEINGAERTNER, W. L.; ALARCON, O. E. Glossiness distribution over the surface of stoneware floor tiles due to the polishing process. **Journal of Material Science**, v 42, n 24, p. 10124-10132, 2007b.

SOUSA, F. J. P.; AURICH, J. C.; WEINGAERTNER, W. L., ALARCON, O. E. Analytical Determination of the Distribution of Polishing Time over the Surface of Polished Tiles. **Journal of the American Ceramic Society**, v 90, n 11, p. 3468-3477, 2007c.

SOUSA, F. J. P. Análise de aspectos cinemáticos do processo industrial de polimento de porcelanatos. 2007. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais)–Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007d.

SOUSA, F. J. P.; WEINGAERTNER, W. L., ALARCON, O. E. Computational Simulation of the Polishing Process of Porcelain Stoneware Tiles. **Qualicer X**, PB.C, p 359 – 367, 2008

SOUSA, F. J. P.; AURICH, J. C.; WEINGAERTNER, W. L., ALARCON, O. E. Optimization of the Kinematics Available in the Polishing Process of Ceramic Tiles by Computational Simulations. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 92, n. 1, p.41-48, 2009.

SOUSA, F. J. P. Polishing. CIRP, International Academy for production Engineering Research (ed.) Encyclopedia of Production Engineering. DOI 10.1007/978-3-642-20617-7, CIRP 2014.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, 3 Ed. Butterworth-Heinemann, 2005. 801 p.

THOMAS, T. R. **Rough Surfaces**. 2. Ed. Imperial College Press. 1999. 278 p.

THOMPSON, R. A. Mechanisms of Powder Pressing: Model for Powder Densification. **Journal of The American Ceramic Society**, v. 60, n.2, p. 237-243, 1981.

TOIGO, F., MARVIN, A.; CELLI, V., HILL, N. R. Optical Properties of Rough Surfaces: General Theory and the Small Roughness Limit. **Physical Review**, B15, p. 5618-5626, 1977.

TUCCI, A.; ESPÓSITO, L. Polishing of porcelain stoneware tile: surface aspects. **VI Qualicer**, P.GI., p. 127-136, 2000.

WANG, C.Y.; WEI, X.; YUAN, H. Polishing of Ceramic Tiles. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 17, n.3, p. 401-413, 2002.

WANG, C. Y.; KUANG, Z. Q.; WEI, X. How Abrasive Machining Affects Surface Characteristics of Vitreous Ceramic Tile. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 82, n.10, p. 9201-9208, 2003.

WATCHMAN, J. B.; CANNON, W. R.; MATTHEWSON, M. J. **Mechanical properties of Ceramics**. John Wiley & Sons, 2009. 550p.

WEINGAERTNER, W. L. Entrevista concedida. - Florianópolis - SC : [s.n.],. – 30/11 2013 outubro.

WIGGERS, W. S.; SANTOS, R. A.; HOTZA, D. Evolução da superfície do porcelanato ao longo do processo de polimento. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. ½, jan/abr. 2007.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface and nanometrology**. 2 Ed. CRC Press. 2011. 978 p.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. **Microstructure and wear of materials**. New York: Elsevier Science Publishing Company, 1987. 560 p.