

**ANÁLISE DE ASPECTOS CINEMÁTICOS DO PROCESSO INDUSTRIAL DE
POLIMENTO DE PORCELANATOS**

Fábio José Pinheiro Sousa

Florianópolis, setembro de 2007

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

**ANÁLISE DE ASPECTOS CINEMÁTICOS DO PROCESSO INDUSTRIAL DE
POLIMENTO DE PORCELANATOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais

Fábio José Pinheiro Sousa

Orientador: Prof. Orestes Estevam Alarcon

Co-orientador: Prof. Walter Lindolfo Weingaertner

Co-orientador na Alemanha: Prof. Jan Christian Aurich

Florianópolis, setembro de 2007

À minha família,

José, Juscelina, Nely e Paula.

Saber de vocês é um prazer sem talvez!

Ainda que eu falasse línguas,
Dos homens, dos anjos,
Sem amor seria como o metal que soa,
Ou como o sino que tine.
E ainda que eu [...] conhecesse todos os
Mistérios e toda a ciência,
[...] e não tivesse amor,
Nada disso me aproveitaria.

(Coríntios 13)

AGRADECIMENTOS

Muito recentemente “pesquei” uma frase que poderia vir de qualquer um dos meus sábios amigos:

“Nós nunca perdemos, só ganhamos menos”

De fato, a vida já é uma bênção do amor de Deus.

Não bastasse esta bênção, desfruto de uma família maravilhosa, amor, amigos, conforto e segurança. Assim, à Deus presto meu maior agradecimento, que sempre será ingrato.

Já quanto a minha jornada de doutoramento, quero deixar meus sinceros agradecimentos ao seguinte elenco:

A meu orientador, Prof. Orestes, pela orientação, pelos incentivos e pela paciência durante a minha escolha entre tantos temas interessantes, e ao meu coorientador, Prof. Walter Weingaerter, pelas contribuições fornecidas, e pelo encorajamento tão constante.

Aos membros da banca, Prof. Antônio Pedro Novas de Oliveira, Prof. José Octávio Armani Paschoal, Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, e ao Prof. Douglas Gouvêa, pela participação como membros da banca, e ainda ao Prof. Agenor de Noni Júnior, pelas contribuições e revisão.

Ao Prof. Alexandre Lago, pelas ofuscantes dicas experimentais, e ao Prof. Aloísio Nelmo Klein, pela disponibilidade digna de um grande líder, e pelo altruísmo aplaudível.

Às empresas Cerâmica Portobello S/A, e Ceusa, por toda infra-estrutura disponibilizada e pela confiança em mim depositada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte

financeiro concedido ao longo do doutorado e ao convênio binacional CNPq/CAPES/DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst), pela experiência ímpar de um doutorado sanduíche na Alemanha.

Já com certo saudosismo, agradeço aos colegas e amigos do Laboratório de Materiais, Davi Fusão, Roberto Marchiori, Galiotto, Pavanti, Susy, Cynthia, Viviane, Eiji, Rambo, Tridapalli, Tatiana, Gisele, Cristiano, Misleine, Patrícia, e também da UFSC, Xará Xavier, Rogério (PGMat), Paulo Bodner, Renata, Janaína, e Sr. Joaquim.

Na outrora distante Alemanha, meu muito obrigado ao Professor Jan C. Aurich, pela cordial recepção e pela coorientação. Ainda por lá, agradeço aos colegas e amigos, Rodrigo, Leonardo, Aguiar, Halil, Heinrich, Peter H., Vikke, Tina, Torsten, Asghar, Frank, Lukas, Michael, Rose, e Peter Rudel pela convivência tão agradável e proveitosa. (Herzlich Danke!)

Em Florianópolis, eu agradeço pelo companheirismo incondicional dos meus amados primos, Luiz e Marina, e ao “meu sócio”, tio João Félix (in memorian), pela acolhida paternal nos meus primeiros anos na Ilha da Magia.

Por fim, agradeço a todas as pessoas com as quais troquei dicas e visões que de algum modo me entusiasmaram colaborando direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho. Agora, repleto de alegria, e possuído de um sentimento de amor incondicional a todas as coisas, queria apenas dizer:

Muito obrigado!

RESUMO

Apesar de mais caros os revestimentos cerâmicos polidos têm tido aceitação crescente no mercado consumidor. Contudo, a operação de polimento em escala industrial ainda se baseia no empirismo, na experiência de funcionários ou até mesmo no conhecimento adquirido no polimento de outros materiais, como pedras naturais. O presente trabalho tem como objetivo principal contribuir com conhecimentos originais sobre a cinemática atuante no polimento de placas de porcelanato. Para tanto a posição de um abrasivo arbitrário durante o polimento foi equacionada em função dos seguintes parâmetros cinemáticos: velocidade de avanço da linha de produção, rotação do disco abrasivo, frequência e amplitude de oscilação lateral, e raios interno e externo do disco abrasivo. A duração do polimento para as diferentes regiões da placa pode então ser analiticamente determinada. A distribuição de tempo de polimento resultante permite a quantificação direta da uniformidade de atuação dos abrasivos, em decorrência da cinemática adotada. Com isso foram fornecidos os subsídios teóricos, ainda escassos na literatura, para uma escolha apropriada das condições de riscamento a serem adotadas em futuras investigações fenomenológicas. Numa segunda etapa foi realizado um estudo experimental sobre a distribuição de brilho ao longo da superfície de diversas placas cerâmicas. Avaliou-se um total de 21 placas de porcelanato, polidos sob diversas condições cinemáticas. O padrão de brilho superficial apresentado por cada placa avaliada foi caracterizado por meio de aproximadamente 200 medidas. Os resultados revelaram a ocorrência de um padrão de brilho superficial semelhante a um zigzag grosseiro, decorrente da própria cinemática atuante. Tais resultados permitiram a concepção de um programa de simulação de polimento, de modo a auxiliar as indústrias na seleção dos parâmetros de operação mais apropriados ao processo.

Palavras-chave: porcelanato, polimento, simulação, cinemática, brilho superficial

ABSTRACT

Nowadays the customer acceptance of polished tile has increased, in spite of their expensive prices. Nevertheless, polishing operation in industrial scale still underlies on trial and error approaches, on the expertise of employes, or even on knowledge derived from others materials, such as ornamental stones. The main goal of this work is to provide original contributions on the kinematics involved in the polishing process of porcelainized stoneware tiles. In view of this, the equation regarding the instantaneous position of an arbitrary abrasive throughout polishing was established considering the following kinematic parameters: forward speed of the production line, rotation of the abrasive disk, amplitude and frequency of the transversal oscilation motion, and inner and outer radii of the abrasive disk. In sequence, the time under which a given region on the tile surface remains under polishing was determinated analytically. As consequence, a ditrubution of polishing time was built up, so that the uniformity of such distribution could be evaluated as function of the kinematic adopted. The theoretical findings still lack in literature and are usefull to guide any further phenomenogical tests on the subject. Besides, an experimental study was carried out on the glossiness distribution over the surface of several tiles, polished under different polishing condicions. The individual glossiness pattern of 21 tiles was properly characterized by taking about 200 measures for each tile. A glossiness patter similar to a coarse zigzag was found to occur, actulally as consequece of the kinematic adopted to accomplish the polishing. Such results were then used to design a simulation software which may aid the partner industries to select the operational parameters properly.

Keywords: polishing, porcelainized stoneware tile, simulation, kinematics, glossiness

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS E TABELAS	x
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 POLIMENTO.....	20
2.2 MECANISMOS DE DESGASTE EM MATERIAIS CERÂMICOS.....	24
2.2 LINHAS INDUSTRIAIS DE POLIMENTO	26
2.3 BRILHO.....	29
3 MÉTODO	34
3.1 ANÁLISE DA CINEMÁTICA DO POLIMENTO	34
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	37
4 RESULTADOS TEÓRICOS	40
4.1 ANÁLISE DA CINEMÁTICA DO POLIMENTO	40
4.2 ANÁLISE DA MICROCINEMÁTICA ATUANTE.....	43
4.3 ANÁLISE DA MACROCINEMÁTICA ATUANTE	50
4.4 OBTENÇÃO DO LIMITE DE ALCANCE DA POLITRIZ	57
4.5 OBTENÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO EFETIVO DE POLIMENTO.....	62
4.6 SIMULAÇÕES	68
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	83
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	104
6.1 QUANTO AOS RESULTADOS TEÓRICOS	104
6.2 QUANTO AOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	106
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
7 REFERÊNCIAS	109
8 ANEXO 1	115

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Possíveis princípios de ação das partículas abrasivas.....	22
Figura 2 – Bloco abrasivo e disco da politriz	23
Figura 3 – Mecanismos admitidos: (a) micro-sulcamento (b) micro-corte (c) micro-lascamento	25
Figura 4 – Etapas de remoção de material por indentação	25
Figura 5 – Cinemática oferecida pelo primeiro tipo de politriz	26
Figura 6 – Favorecimento geométrico promovido pelo primeiro tipo de politriz (Hutchings, 2005a).....	27
Figura 7 – Cinemática oferecida pelo segundo tipo de politriz.....	28
Figura 8 – Pisos com reflexão especular parcial, à direita, e total, à esquerda	30
Figura 9 – Tipos de reflexão da luz em superfícies planas	31
Figura 10 – Critério de Rayleigh	31
Figura 11 – Princípio de funcionamento do brilhômetro.....	33
Figura 12 – Movimento de suingue do bloco abrasivo	35
Figura 13 – Mapeamento de regiões superficiais correspondentes a um pixel.....	37
Figura 14 – Detalhamento do ensaio para medidas de rugosidade superficial.....	38
Figura 15 – Componentes do vetor deslocamento para uma partícula abrasiva	40
Figura 16 – Contribuição dos sistemas de movimentação para a posição em \hat{i} (a) e \hat{j} (b) de um abrasivo	41
Figura 17 – Trajeto de um abrasivo ao longo da linha de polimento	42
Figura 18 – Possíveis trajetórias de uma partícula na periferia do disco abrasivo: (a) $f= 0,4 \text{ s}^{-1}$ e $V= 5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e (b) $V= 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, e (c) $f=1 \text{ s}^{-1}$ e (d) $V= 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	43
Figura 19 – Velocidade relativa da partícula abrasiva a cada instante.....	44
Figura 20 – Direção de riscamento para diferentes frequências de oscilação lateral	45
Figura 21 – Mudança no sistema de referência das componentes do vetor aceleração ..	46
Figura 22 – Determinação do raio de curvatura a partir do vetor $\vec{\eta}$	47
Figura 23 – Raio de curvatura do trajeto abrasivo ao longo do tempo	49
Figura 24 – Aceleração exclusivamente na direção do trajeto abrasivo ao longo tempo.....	49
Figura 25 – Trabalho requerido na oscilação lateral de uma massa unitária de politriz ...	51
Figura 26 – Sobreposição do trajeto de polimento de três politrizes adjacentes	52
Figura 27 – Interferência construtiva (a) e destrutiva (b) de trajetos de polimento	53
Figura 28 – Equacionamento da sobreposição de trajetos de polimento entre politrizes adjacentes.....	54

Figura 29 – Padrões de sobreposição de trajeto de polimento para diversas condições cinemáticas	55
Figura 30 – Limites de alcance dos abrasivos após a passagem de uma politriz.....	56
Figura 31 – Relações geométricas entre as funções f_s e f_B	57
Figura 32 – Relações geométricas entre f_s e f_C	58
Figura 33 – Trajeto de polimento e respectivos limites de alcance dos abrasivos.....	61
Figura 34 – (a) Movimento relativo entre um ponto P na superfície e a origem da linha de polimento. (b) Destaque para o trajeto de P (c). Destaque do trajeto sobre contato abrasivo.....	62
Figura 35 – Obtenção de S_T por meio de variação de área entre curvas.....	64
Figura 36 – Determinação da área comum entre as funções f_s e f_{OC}	64
Figura 37 – Erros resultantes do uso de apenas um hemisfério da função círculo.....	67
Figura 38 – Medidas de S_T com o auxílio de AutoCAD®.....	69
Figura 39 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$	71
Figura 40 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. (a) $f = 0,0 \text{ s}^{-1}$, (b) $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$	72
Figura 41 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $V = 2,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. (a) $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, (b) $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$	73
Figura 42 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $f = 0,6 \text{ s}^{-1}$. (a) $V = 2,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, (b) $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	74
Figura 43 – Interface do programa desenvolvido	76
Figura 44 – Simulação após dois segundos de polimento sob condições padrões	77
Figura 45 – Simulação após quatro segundos de polimento sob condições padrões	77
Figura 46 – Simulação após seis segundos de polimento sob condições padrões	77
Figura 47 – Comparação entre resultados analíticos e obtidos pelo algoritmo de contagem.....	78
Figura 48 – Distribuição espacial do valor médio (a) e do desvio padrão (b) do raio de curvatura ρ	79
Figura 49 – Distribuição espacial do valor médio (a) e do desvio padrão (b) da velocidade de riscamento	80
Figura 50 – Distribuição espacial do valor médio (a) e do desvio padrão (b) do ângulo de riscamento.....	81
Figura 51 – Distribuição espacial do valor médio da diferença de ângulo de riscamento entre politrizes adjacentes, com interferência destrutiva total (a), e com $\pi/4$ de defasagem de fases (b).....	82
Figura 52 – Valores de brilho medidos ao longo da superfície de três porcelanatos adjacentes	83
Figura 53 – Valores médios de brilho obtidos para cada coluna (a) e linha (b) de pixels.....	84

Figura 54 – Distribuição de E_{PT} prevista analiticamente admitindo-se $V=12 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $A=19 \text{ cm}$ e $f = 0,33 \text{ s}^{-1}$, e respectivos valores médios obtidos para cada coluna e cada linha do gráfico	85
Figura 55 – Distribuições de brilho obtidas em diferentes dias e diferentes condições de polimento. Dia 1: $V= 5,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f = 0,3 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=18,3 \text{ cm}$); Dia 2: $V= 6,0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,3 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=19,8 \text{ cm}$); Dia 3: $V= 6,0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,34 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=19,3 \text{ cm}$).....	86
Figura 56 – Valores médios de brilho obtidos para cada coluna (a) e cada linha das placas b, c e d	87
Figura 57 – Brilho médio e desvio padrão calculados para cada placa.....	88
Figura 58 – Coeficiente de variação das diversas distribuições analisadas.....	89
Figura 59 – Distribuição superficial de brilho de seis novos porcelanatos polidos em seqüência	91
Figura 60 – Valores médios de brilho obtidos para cada coluna das placas 1-6e	92
Figura 61 – Distribuição superficial de brilho acompanhando o trajeto de polimento	94
Figura 62 – Delimitação das regiões com polimento interrompido	94
Figura 63 – Trajetos centrais de três politrizes adjacentes considerando $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $A = 12 \text{ cm}$ e de 58 cm de espaçamento entre politrizes.....	95
Figura 64 – Intersecção de regiões com interrupção de polimento para três politrizes adjacentes considerando $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $A = 12 \text{ cm}$ e de 58 cm de espaçamento entre politrizes	96
Figura 65 – Distribuição superficial de brilho acompanhando a intersecção das regiões com interrupção de polimento considerando três politrizes adjacentes	96
Figura 66 – Ganho típico de brilho ao longo da linha de polimento (Sánchez, 2002).....	97
Figura 67 – Correlação entre rugosidade e brilho obtidas para placas de granito (Huang, 2002)	98
Figura 68 – Perfil de rugosidade típico obtido para o porcelanato polido (placa 1e)	99
Figura 69 – Correlação entre rugosidade R_a e brilho superficial.....	100
Figura 70 – Topografia superficial dos pontos P1-3.....	100
Figura 71 – Topografia superficial dos pontos P4-6.....	101
Figura 72 – Topografia superficial dos pontos P7-9.....	101
Figura 73 – Correlação entre brilho e rugosidade R_a obtida via interferometria de luz branca.....	102
Figura 74 – Correlação entre porosidade superficial e brilho.....	103
Tabela 1 – Comparação entre os resultados de S_T simulados e medidos por CAD	69

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SÍMBOLOS DO ALFABETO LATINO

V	Velocidade de avanço da esteira ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
w	Rotação do disco abrasivo (rpm)
f	Frequência de oscilação lateral (s^{-1})
A	Amplitude de oscilação lateral (cm)
R	Raio externo do disco abrasivo (cm)
r	Raio interno do disco abrasivo (cm)
t	Tempo após o início do polimento (s)
\hat{j}	Vetor unitário que aponta na direção transversal à direção de polimento
\hat{i}	Vetor unitário que aponta na direção do polimento
X	Variável independente representativa da distância ao longo vetor \hat{i}
Y	Variável dependente representativa da distância ao longo do vetor \hat{j}
R_a	Rugosidade média da superfície (μm)
\vec{D}	Vetor deslocamento da partícula abrasiva (cm)
\vec{a}	Vetor aceleração da partícula abrasiva ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)
W_{UOL}	Trabalho de oscilação lateral de uma massa unitária ($\text{N}\cdot\text{cm}\cdot\text{kg}^{-1}$)
L	Distância entre eixos de politrizes adjacentes (cm)
S_T	Distância efetiva de polimento (cm)
E_{PT}	Tempo efetivo de polimento experimentado por uma dada região (s)
N_{CA}	Número de contatos abrasivos
f_B	Função representativa do limite de alcance de uma politriz
f_C	Função círculo representativa do disco abrasivo
f_S	Função representativa do trajeto executado pelo centro de uma politriz

LISTA DE SÍMBOLOS DO ALFABETO GREGO

\vec{g}	Vetor velocidade da partícula abrasiva ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
φ	Ângulo de riscamento da partícula abrasiva, com referencia ao sentido de polimento ($^{\circ}$)
$\vec{\eta}$	Vetor de aceleração atuante na direção perpendicular ao riscamento
$\vec{\tau}$	Vetor de aceleração atuante na direção do riscamento
λ	Comprimento de onda do trajeto de polimento de uma politriz
ρ	Raio de curvatura do trajeto do abrasivo
ξ	Comprimento de onda da luz incidente
θ	Ângulo entre as componentes do vetor aceleração, na direção do riscamento, em dois instantes sucessivos

1 INTRODUÇÃO

Segundo Espósito et al (Espósito, 2005), o porcelanato representa o melhor produto já desenvolvido no setor de revestimentos cerâmicos. De fato, o excelente apelo estético e elevado desempenho mecânico do porcelanato são freqüentemente citados na literatura, (Tucci, 2000; Hutchings, 2004; Hutchings, 2005a; Dondi, 2005; Ibáñez, 2002).

Basicamente, trata-se de um tipo de placa cerâmica destinada a concorrer em mercado com as pedras ornamentais. A baixa absorção de água, tipicamente na ordem de 0,1% (Oliveira, 1998), elevada dureza ao risco (>11 GPa (Alarcon, 2004)) e a alta resistência à flexão (>35 MPa (Heck, 1996; Menegazzo, 2002; Rosso, 2005)), permitem o uso deste tipo de revestimento em condições severas de desgaste, mesmo sem a proteção de uma camada vitrificada geralmente empregada nos pisos comuns, conhecida como esmalte.

Contudo, a fim de melhorar as propriedades estéticas do porcelanato, tornando-os mais competitivos com as pedras naturais, em apelo estético, a etapa de polimento é geralmente acrescentada ao seu processo de fabricação. Neste caso, o brilho superficial resultante excede a grande maioria das pedras ornamentais disponíveis comercialmente (Hutchings, 2006b).

Assim, os porcelanatos podem ser então classificados em esmaltados ou técnicos, de acordo com a presença ou não da camada de esmalte, e em polidos ou “naturais”, conforme o mesmo tenha ou não sido submetido ao polimento. A NBR 13816 (ABNT, 1997) estabelece um limite máximo de 0,5 % aos porcelanatos esmaltados, e de 0,1% aos porcelanatos técnicos.

Como produto, o porcelanato tem tido uma aceitação crescente no Brasil (Menegazzo, 2000), a ponto de ter adquirido muito recentemente uma norma específica, a NBR 15463

(ABNT, 2007), sendo a pioneira no mundo para este fim (Menegazzo, 2007). De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento – ANFACER (ANFACER), a produção anual de porcelanato no Brasil em 2004 era estimada em 18 milhões de metros quadrados. Para o ano 2006, entretanto, este número cresceu para 33 milhões de metros quadrados.

O surgimento do porcelanato, por volta dos anos 70 na Itália (Oliveira, 1998), constituiu uma importante revolução para o setor cerâmico (Menegazzo, 2000). Contudo, de acordo com Heck C. (Heck, 1996), uma inovação não menos importante para o setor foi a utilização da etapa de polimento pelas indústrias, que permitiu estender a participação do porcelanato em um mercado antes de domínio das pedras naturais.

De fato, devido ao excelente efeito estético resultante, a opção por produtos polidos tem se tornado cada vez mais comum (Hutchings, 2006b; Raimondo, 2006). Entretanto, a operação de polimento do porcelanato em escala industrial ainda se baseia no empirismo (Hutchings, 2006a; Espósito, 2005), na experiência de funcionários ou até mesmo no conhecimento adquirido no polimento de outros materiais, como por exemplo nas próprias pedras naturais (Tucci, 2000; Ibáñez, 2002; Nogueira, 1998),

Muitas vezes também no polimento das pedras naturais são usados parâmetros de processo adquiridos a partir de granitos estrangeiros (Nogueira, 1998), a despeito do caráter sistêmico inerente aos processos tribológicos (KARL-HEIN, 1987; Hutchings, 1992; de Mello, 1994). Tal fato tende a invalidar qualquer tentativa de otimização sem a realização de estudos mais específicos.

A necessidade de estudos científicos e tecnológicos sobre o processo de polimento fica ainda mais evidente quando é considerado o alto custo da operação, que no caso dos porcelanatos representa de 30 a mais de 40 % do custo final (Hutchings, 2004; Hutchings,

2005a). Para as pedras naturais, o custo do produto acabado é cerca de três vezes maior que o bruto (Nogueira, 1998).

Diversos estudos (Ibáñez, 2002; Tucci, 2000; Nogueira, 1998; Espósito, 2005; Feijão, 1996) relatam sobre a grande lacuna de conhecimentos fundamentais que possibilitem a otimização de processos que requerem o desgaste abrasivo como mecanismo de alteração da superfície e/ou de conformação.

Atendo-se ao caso do porcelanato, Hutchings et al (Hutchings, 2005a) comentam haver claras oportunidades para se reduzir custos e melhorar a qualidade final do produto. Isto em função do grande consumo de água (20-40 litros/m²) e de ferramental (0,5-0,6 kg/m²), além da baixa eficiência energética e da pouca capacidade de controle de qualidade atualmente encontrada nas indústrias (Hutchings, 2004).

Em um estudo visando otimizar a seqüência de granulometria abrasiva a ser adotada em uma linha de polimento simples, Hutchings et al (Hutchings, 2006a) relataram uma possibilidade de se reduzir em um terço a quantidade de politrizes atuantes, sem perdas na produtividade bem como nas características do produto, e com grande vantagens quanto ao consumo de ferramental abrasivo, mão-de-obra e geração de resíduos.

No caso de linhas modernas, onde uma cinemática mais complexa é oferecida à indústria por meio da oscilação transversal das politrizes, um resultado semelhante pode ser esperado. Para tanto, contudo, faz-se ainda necessário um estudo específico sobre a sobreposição dos trajetos de polimento.

Assim, o processo de polimento industrial constitui o tema central do presente trabalho. Uma vez que o estado de Santa Catarina tem representatividade mundial na produção de revestimentos cerâmicos (Lira, 1997), os conhecimentos a serem adquiridos sobre este tema são de grande interesse para as indústrias deste setor.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta proposta de tese é contribuir com conhecimentos originais sobre a cinemática atuante no polimento industrial de cerâmicas de revestimento. Como consequência, pretende-se obter subsídios a fim de promover um aumento de eficiência na fabricação de revestimentos cerâmicos polidos.

Como objetivos específicos são listados:

- Equacionar o trajeto a ser percorrido pelo ferramental abrasivo sobre a superfície das placas cerâmicas;
- Obter as condições de riscamento atuantes durante o polimento;
- Determinar quantitativamente a distribuição do tempo de polimento ao longo da superfície do porcelanato, como função dos parâmetros cinemáticos atuantes, e admitindo o movimento de oscilação transversal da politriz;
- Desenvolver um programa de simulação do ganho de brilho ao longo do polimento, baseado em resultados provenientes de indústrias locais, na tentativa de auxiliar na escolha dos parâmetros cinemáticos a serem adotados por estas indústrias na linha de produção;
- Finalmente, obter e analisar extensivamente os padrões de brilho superficial conferidos por politrizes oscilantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até a etapa de processamento térmico, a fabricação do porcelanato se assemelha aos demais tipos de revestimentos cerâmicos. A primeira etapa fabril consiste na preparação das matérias-primas. Estas são dosadas e moídas, via úmida, até resultarem em uma suspensão de água com fração de sólidos de cerca de 60% em peso, cuja composição típica é 20-35% de argilas plásticas (“ball clay” e caulim), 50-60% de feldspatos, e 5-10% de quartzo (Espósito, 2005; Heck, 1996).

No interior de uma câmara, essa suspensão, chamada de barbotina, é então dispersa ao ar em pequenas gotículas, que por sua vez são subitamente secas por um fluxo ascendente de ar quente até atingir cerca de 5% de água, em peso. Com isso as partículas sólidas presentes em cada gotícula se aglomeram, formando grânulos de formato esferoidizado. Este procedimento é conhecido no meio técnico como atomização, e visa a obtenção de um material com alta escoabilidade, a fim de se ter um preenchimento rápido e uniforme das matrizes de compactação.

Na matriz de compactação, os grânulos são prensados resultando uma peça única com o formato do produto final, isto é, de uma placa. No caso dos porcelanatos são usados pressões de compactação (uniaxial) entre 35 MPa e 55 MPa (Heck, 1996; Sousa, 2006). A resistência adquirida na prensagem é suficiente apenas para manipular as peças durante o encaminhamento ao ciclo térmico, onde então são conferidas resistência e as demais características do produto final, com exceção do alto brilho. É comum o uso da locução adverbial “a verde”, nas propriedades da peça adquiridas antes do ciclo térmico.

O ciclo térmico tem duração de 40 a 70 minutos, com patamares variando tipicamente entre 1.180°C a 1.230°C (Oliveira, 1998; Heck, 1996; Hutchings, 2006b). Como resultados

são obtidos produtos cerâmicos de alta densidade (2,4-2,6 g/cm³ (Rosso, 2005)), contendo grande quantidade de fase vítrea como matriz. Envolvidos por esta matriz encontram-se pequenos cristais residuais de quartzo e de mullita, formada durante a sinterização (Espósito, 2005).

Tratando-se de porcelanato polido, depois de sinterizadas as placas cerâmicas são conduzidas a etapa de polimento. Esta etapa, por sua vez, pode ser subdividida em duas fases sucessivas: a calibração, e o polimento propriamente dito. Na calibração os produtos são submetidos a um processo de abrasão severo, feito com ferramentas diamantadas, visando padronizar as dimensões das peças. Para tanto são removidos um grande volume de material (Espósito, 2005), podendo atingir aproximadamente 10% da espessura da peça (Hutchings, 2006b; Wiggers, 2007).

A severidade do ferramental diamantado exige um grande controle do processo de calibração, pois durante essa fase podem ocorrer riscos profundos que não seriam removidos pelos processos subseqüentes. Nesses casos, para não prejudicar a imagem da indústria, pela associação do nome da empresa com produtos de qualidade inferior, peças inteiras tem de ser descartadas, apesar de todo o valor já agregado nas mesmas, via matéria-prima, energia, água, ferramental abrasivo (antes e depois do risco indesejado) e geração de resíduos. Assim, vale ressaltar que desde a fase de retificação são oferecidas oportunidades de se melhorar substancialmente o nível de eficiência atualmente associado aos revestimentos polidos (Hutchings, 2005a).

2.1 POLIMENTO

A palavra polimento é um termo comum, usado nas diversas áreas do conhecimento, sempre com a conotação de conferir brilho, ou lustre, a uma dada superfície. Porém, do ponto de vista técnico, trata-se de um processo de usinagem de acabamento com

pouquíssima remoção de material, promovida por grãos abrasivos soltos e de formato individual geometricamente não definido. Por esta razão, em tecnologia de fabricação, o polimento integra uma classe conhecida como usinagem de geometria não definida.

Um processo muito semelhante ao polimento é a lapidação. De fato, não foi encontrada na literatura uma diferenciação explícita entre ambas. Assim, tem-se muitas vezes a idéia de que o polimento está mais associado ao acabamento superficial com brilho do que como processo de usinagem propriamente dito.

Contudo, pode-se mencionar uma importante diferença entre esses processos (Weingaertner, 2004). Esta diferença está no fato de que, na lapidação, os abrasivos soltos são pressionados sobre a peça a ser usinada por meio do peso de um disco indeformável, cuja forma superficial é transferida para a peça no decorrer do processo. Já no polimento, ao invés de um disco indeformável, é usado um material mole para conduzir as partículas abrasivas, como feltro, pano ou couro, pois se pretende apenas conferir brilho à superfície, e não alterá-la.

Essa diferença de rigidez é suficiente para as partículas abrasivas rolaem ou não por sobre a peça. A rolagem dos abrasivos, predominante na lapidação, normalmente produz superfícies foscas (Wilfried, 1979?; Crichigno Filho, 1994). Já no polimento, a relativa fixação dos abrasivos promove riscos com mínima penetração na superfície da peça. São estes riscos, que devido ao tamanho tão reduzido, conferem o desejado aspecto brilhoso (Weingaertner, 2004).

Além de lapidação e de polimento, os demais processos de usinagem em ferramenta de geometria não definida são: jateamento, brunimento, tamboreamento e retificação (Wilfried, 1979?). Uma subdivisão comum em usinagem de geometria não definida provém dos princípios de ação dos abrasivos, os quais podem ser: energético, de posição, de força e de trajetória, ilustrados na Figura 1.

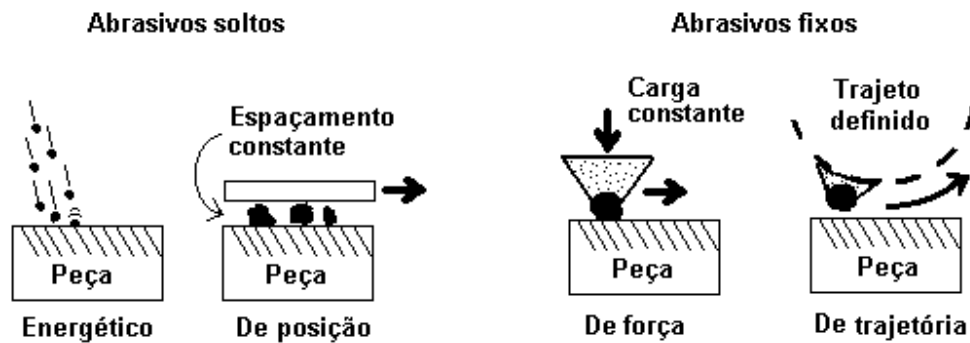


Figura 1 – Possíveis princípios de ação das partículas abrasivas

Resumidamente, o jateamento se baseia no princípio energético, uma vez que os abrasivos são lançados em alta velocidade contra a superfície da peça. Na lapidação tem-se um princípio de posição, já que o abrasivo fica restrito ao espaço entre a peça e o disco. Os processos de brunimento e tamboreamento atuam com força pré-estabelecida, enquanto que na retificação se define a trajetória a ser seguida pelos abrasivos (Wilfried, 1979?).

No caso da calibração dimensional do porcelanato, a remoção de material durante o processo se dá principalmente pela ação abrasiva de rebolos extremamente rígidos, onde a ação do abrasivo (diamante) é definida pela trajetória. Portanto, nesse caso o processo de usinagem correspondente é a retificação.

Já na fase de polimento propriamente dita, o processo de usinagem predominante é o brunimento. No brunimento, as partículas abrasivas percorrem continuamente superfície do material a ser usinado (Wilfried, 1979?), isto é, há um contato ininterrupto entre abrasivo e superfície, que só será desfeito pela evolução do desgaste de ambos.

Na fabricação de porcelanatos técnicos polidos, o polimento é considerado a etapa fabril mais importante (Hutchings, 2004). Nas indústrias este processo é feito por meio de uma série de politrizes, as quais compõem uma linha de polimento. Cada politriz possui uma plataforma giratória, onde são acoplados seis blocos abrasivos, os quais tocam

diretamente a superfície das placas. Este conjunto será daqui por diante chamado de disco abrasivo. Na Figura 2 há um esquema do bloco abrasivo e do disco da politriz.

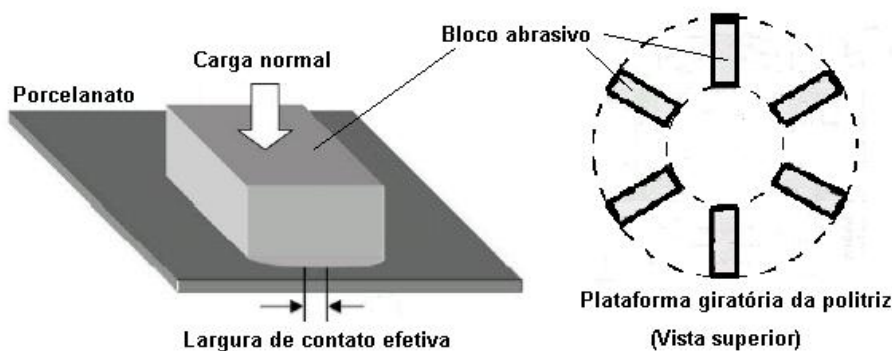


Figura 2 – Bloco abrasivo e disco da politriz

Os blocos abrasivos são geralmente compostos por uma matriz de cimento de magnésio óxi-clorídrico (Hutchings, 2005b; Espósito, 2005), dentro da qual se encontram diversas partículas de carbeto de silício, tipicamente 10% em massa (Hutchings, 2005a), destinadas a atuarem como abrasivos. A superfície ativa do bloco abrasivo possui certa curvatura de modo a se ter uma estreita faixa de contato efetivo entre bloco e superfície da peça.

A acoplagem dos blocos abrasivos ao disco é feita por um sistema de encaixe simples, que visa permitir a rápida substituição dos blocos abrasivos à medida que estes são consumidos em serviço. A vida útil de um bloco abrasivo na linha de produção pode durar de 30 minutos a vinte horas, de acordo com a granulometria abrasiva do mesmo (Benincá, 2000).

A atuação dos blocos abrasivos se dá com o uso de água como meio lubrificante, visando diminuir o atrito e remover fragmentos e calor gerados durante o polimento. Estima-se uma quantidade diária de até 2.000.000 de litros por linha de polimento (Benincá, 2000;

Rosso, 2005), o que requer das indústrias o uso de sistemas de tratamento dessa água para reutilização no processo.

2.2 MECANISMOS DE DESGASTE EM MATERIAIS CERÂMICOS

Define-se por desgaste a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo em decorrência do movimento relativo de um outro corpo sobre o mesmo (Hutchings, 1992). Contrapondo as diversas conotações negativas associadas ao desgaste, o processo de usinagem, pelo qual um corpo adquire um formato útil para dada aplicação, é um exemplo de uma faceta positiva do desgaste abrasivo.

No estudo do desgaste abrasivo são geralmente admitidas as simplificações do modelo teórico de Rabinowics, onde o fenômeno de desgaste é estudado com base na análise de um único risco na superfície de um material, promovido por uma asperidade dura, e que por sua vez é simulada na prática por um indentador de geometria e dureza conhecidas (KARL-HEIN, 1987). De acordo com as condições de fricção, a perda de matéria pode ocorrer por um dos três mecanismos a saber:

- micro-sulcamento: as partículas abrasivas, ou a ponta do indentador no caso de um ensaio, provocam deformações plásticas sem causar perda de matéria. O material deformado flui lateralmente ou acumula-se na frente da partícula;
- micro-corte; a tensão cisalhante na frente das partículas abrasivas causa um arrancamento de fragmentos na forma de micro-cavacos;
- micro-lascamento: neste processo, grandes fragmentos são subitamente arrancados da superfície da amostra devido à formação e subsequente propagação de trincas. Trata-se de um mecanismo restrito aos materiais frágeis, e que ocorre quando as tensões produzidas pelas partículas abrasivas excedem determinados valores críticos.

Os três mecanismos descritos acima estão ilustrados na Figura 3.



Figura 3 – Mecanismos admitidos: (a) micro-sulcamento (b) micro-corte (c) micro-lascamento

Nos materiais frágeis a remoção de material se dá predominantemente por fratura frágil, isto é, por lascamento. O processo fundamental de nucleação e propagação de trincas pode ser entendido a partir da Figura 4, onde são mostradas as etapas básicas de remoção de material por indentação com penetrador de ponta aguda. Cada figura da seqüência representa a mesma secção transversal da superfície.

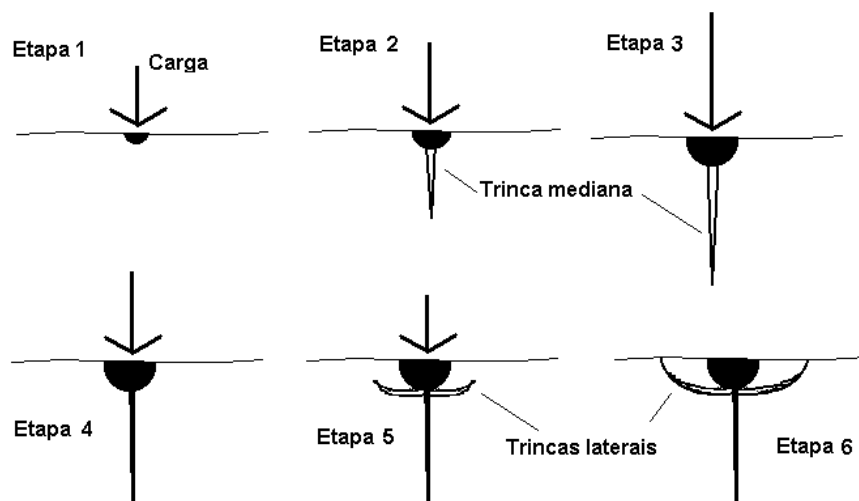


Figura 4 – Etapas de remoção de material por indentação

Nota-se na etapa 6 da Figura 4 que a remoção de material se dá pela separação de grandes regiões (lascas), delimitadas pelas trincas laterais. Estas trincas surgem apenas no descarregamento, sendo uma consequência das deformações plásticas previamente induzidas pelo indentador. Essas deformações plásticas impedem a acomodação elástica de material, o que logo conduz a formação das trincas laterais (Hutchings, 1992).

2.2 LINHAS INDUSTRIAIS DE POLIMENTO

Atualmente são usados dois tipos básicos de politrizes, a serem dispostas em série para compor a linha de polimento. A diferença entre os dois tipos de politrizes se dá então pela cinemática que cada equipamento oferece ao disco abrasivo. A Figura 5 ilustra a cinemática obtida com o uso do primeiro tipo de politriz. Entende-se por cinemática o movimento desenvolvido por um corpo, desconsiderando-se a origem da força que o produziu. Deve-se mencionar que se trata de um deslocamento relativo, e que são de fato as placas cerâmicas, apoiadas sobre uma esteira móvel, quem realmente avançam na linha de produção.

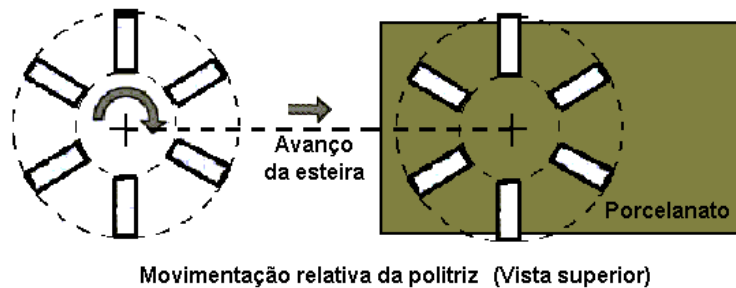


Figura 5 – Cinemática oferecida pelo primeiro tipo de politriz

A movimentação disponível tem efeito direto no processo de polimento, visto que são estabelecidas regiões mais favorecidas quanto a remoção de material. A Figura 6, obtida com base na literatura (Hutchings, 2005a; Cantavella, 2004), ilustra este favorecimento.

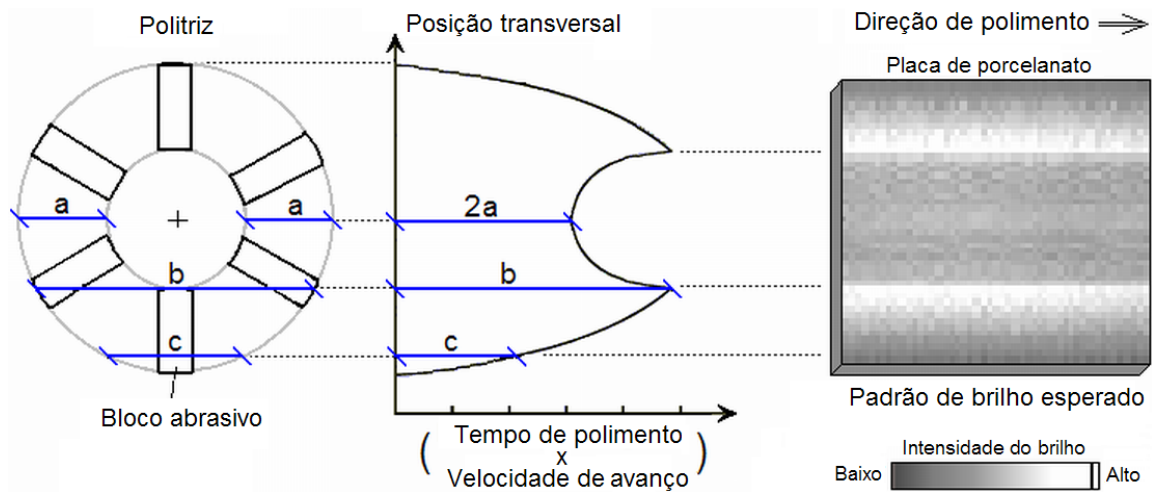


Figura 6 – Favorecimento geométrico promovido pelo primeiro tipo de politriz (Hutchings, 2005a)

Em decorrência desse favorecimento geométrico, a faixa central do piso tende a adquirir um brilho inferior às faixas longitudinais adjacentes. Uma vez que são exigidos níveis mínimos de brilho em toda a peça, esta defasagem de brilho torna-se um fator limitante para a produtividade da linha de polimento.

O número absoluto de vezes em que cada bloco abrasivo desliza sobre uma determinada região dependerá da velocidade de avanço da esteira e da rotação do disco de polimento. Tais parâmetros são definidos pelo operador do equipamento.

O segundo tipo de politriz, mais moderno que o anterior, oferece uma cinemática mais complexa para o disco abrasivo. Trata-se de um movimento de oscilação transversal conhecido na indústria por “bandejamento”, e daqui por diante chamado de oscilação lateral. Este movimento, indicado na Figura 7, é executado simultaneamente por todas as politrizes da linha de polimento, independentemente da esteira.

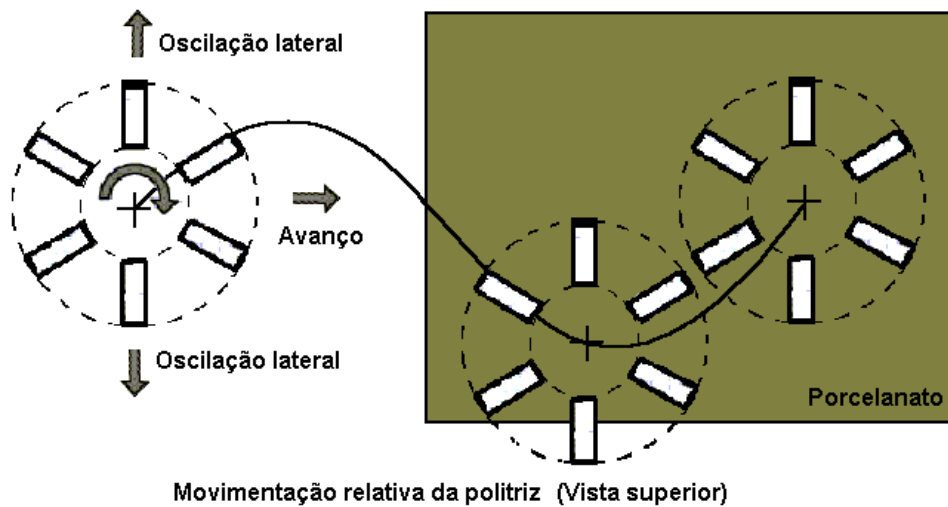


Figura 7 – Cinemática oferecida pelo segundo tipo de poltriz

Portanto, além da velocidade de avanço da esteira e da rotação do disco abrasivo, há dois novos parâmetros de processo a serem definidos pelo operador da linha de produção: a frequência e a amplitude da oscilação lateral. Contudo, ao contrário do caso de poltrizes simples, o impacto da escolha dos valores desses parâmetros na produtividade final não é mais tão evidente (Sousa, 2007a).

A diversidade de trajetórias possíveis para uma partícula abrasiva ao se admitir a oscilação lateral torna-se maior e mais sensível do que considerando apenas o avanço da esteira e a rotação do disco abrasivo. Com efeito, o acúmulo de experiência do corpo técnico da indústria se torna mais difícil.

A princípio, devido à natureza do movimento da poltriz espera-se um favorecimento geométrico não mais limitado a uma faixa constante, mas em regiões alternadas, do tipo ziguezague. Contudo, não foram encontradas na literatura os dados quanto à este favorecimento, bem como quanto ao padrão de brilho superficial esperado, conforme visto na Figura 6 para o caso de poltrizes simples.

Independentemente do tipo de politriz, o polimento se dá gradualmente, muitas vezes exigindo o uso de mais de vinte politrizes enfileiradas (Hutchings, 2004; Ibáñez, 2002; Tucci, 2000; Hutchings, 2006a), utilizando blocos abrasivos com granulometria cada vez menores para cada politriz subsequente. Pela ação dessas politrizes são removidos ao total cerca de 0,4 a 0,8 mm da camada superficial do revestimento, além da camada removida pela calibração (Dondi, 2005).

De fato, grande parte das primeiras politrizes destinam-se apenas a eliminação de trincas provenientes da etapa de calibração (Espósito, 2005). A eliminação destas trincas é feita gradualmente durante a etapa de polimento. Pequenos fragmentos superficiais delimitados pelas trincas vão sendo arrancados da superfície mediante a passagem dos blocos abrasivos. Com isto, tem-se uma produção de trincas cada vez menor, até atingir uma predominância de riscos dúcteis, responsáveis por conferir o brilho à superfície (Wang, 2003; Crichigno Filho, 1994).

Na seção seguinte são sucintamente apresentados os principais conceitos relacionados ao tema brilho.

2.3 BRILHO

No caso de uma fonte luminosa, o brilho é definido pela intensidade de luz emitida. Porém, no caso de revestimentos superficiais, que por si próprios não emitem luz, entende-se por brilho a capacidade da superfície, quando avaliada por um observador, de refletir a luz incidente predominantemente numa mesma direção, chamada direção especular (Kigle-Boecker, 1995). Esta capacidade depende de características físicas da superfície, bem como da fisiologia do observador.

Uma característica da reflexão idealmente especular é o fornecimento de informações apenas sobre a natureza da própria fonte de luz, e não sobre a superfície incidente. Este

fato é ilustrado na Figura 8. No ambiente à esquerda, a reflexão da luz sobre o piso causa uma reflexão especular total. Porém, no ambiente à direita, além da ocorrência de reflexão especular, parte da luz incidente é refletida em várias outras direções, gerando com isso outra componente de reflexão, conhecida como reflexão de difusa.

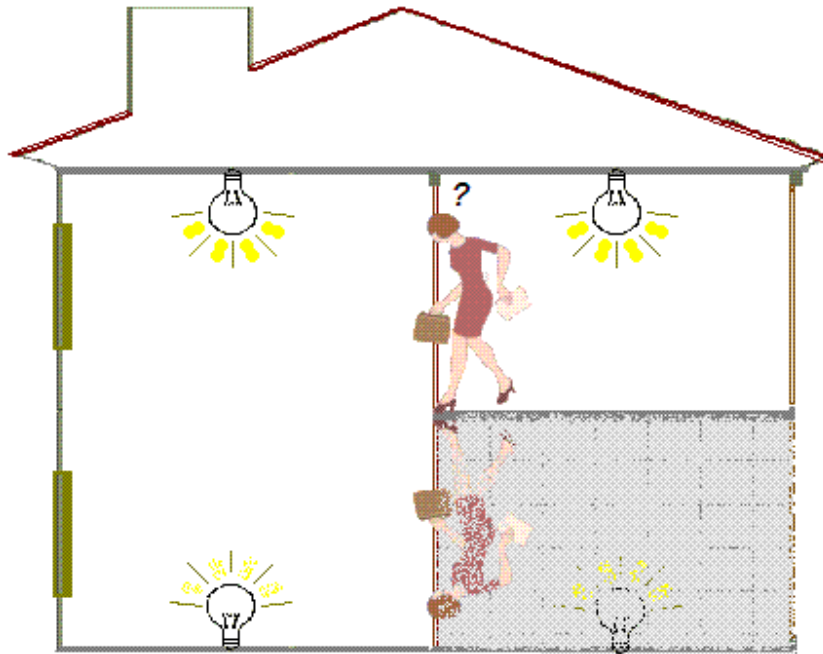


Figura 8 – Pisos com reflexão especular parcial, à direita, e total, à esquerda

Deve-se notar que em ambos os casos parte da energia luminosa emitida pela fonte de luz é absorvida pelo material, e concorre com a parcela total de luz refletida, afetando com isso o brilho máximo a ser oferecido pelo material. Nos materiais não-metálicos, como o porcelanato, esta parcela de luz absorvida é geralmente alta, e depende do índice de refração do material (Kigle-Boecker, 1995; Huang, 2002).

Do ponto de vista ótico geométrico, a reflexão da luz incidente em diversas direções, ou reflexão difusa, é esperada no caso de superfícies rugosas, enquanto uma reflexão da luz em um feixe com direção predominante, ou reflexão especular, é esperada para

superfícies lisas. Ambos os casos são ilustrados na Figura 9. As superfícies lisas e com pouca absorção de luz são consideradas formadoras de imagens (Kigle-Boecker, 1995).

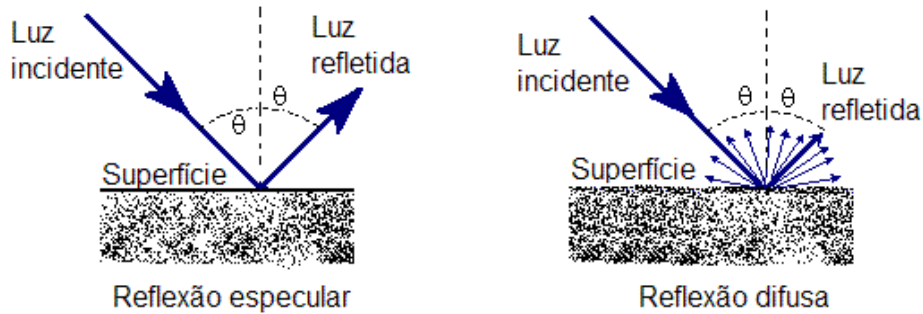


Figura 9 – Tipos de reflexão da luz em superfícies planas

O critério de Rayleigh é usualmente adotado para a classificação entre esses dois tipos de superfícies, tendo a simplicidade como grande atributo (Toigo, 1977). Resumidamente, tal critério considera que a presença de asperidades na superfície gera diferentes caminhos óticos em ondas de feixes coerentes e adjacentes, resultando com isso em uma diferença de fase entre estas ondas, como o ilustrado na Figura 10. A superfície deve então ser considerada lisa, se a altura dessas asperidades, geralmente representadas pela rugosidade media R_a , não implicar uma diferença de fase menor que $\pi/2$ (Sylvain, 2005).

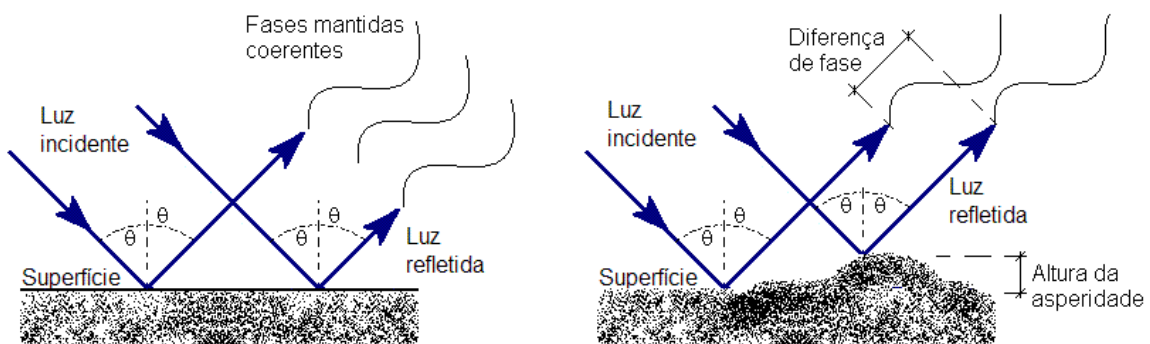


Figura 10 – Critério de Rayleigh

Com base na Figura 10, a condição de superfície lisa pode ser expressa pela seguinte Equação 1:

$$R_a \leq \frac{\xi}{8 \cdot \cos\theta_i} \quad (1)$$

Onde ξ é o comprimento de onda da luz incidente, e θ_i é o ângulo de incidência da mesma.

Assim, o processo de polimento consiste basicamente em reduzir a rugosidade superficial até um limite no qual a parcela especular da luz refletida prevaleça sobre a parcela de luz refletida de modo difuso. Para a produção do porcelanato polido, trata-se de uma redução de R_a até valores em torno de $0,24 \mu\text{m}$ (Parra, 2006; Wiggers, 2007).

Uma vez afetado pela avaliação do observador, o brilho superficial é uma impressão subjetiva, do que uma propriedade física da superfície (Kigle-Boecker, 1995; Obain, 2004). Contudo, a parte especular da impressão total do brilho pode ser objetivamente medida. Assim, visando minimizar a subjetividade nas medidas de brilho, equipamentos destinados a este fim vêm sendo utilizados desde 1930 (Kigle-Boecker, 1995).

A técnica de reflectância bidirecional (bi-directional reflectance distribution function - BRDF) fornece a intensidade da luz refletida ao longo de uma larga faixa angular ao redor do ponto de incidência do feixe de luz, e é bastante adotada atualmente (Obain, 2004; Vorburger, 1993). Trata-se contudo de uma técnica ainda muito laboriosa, o que tende a restringir essa técnica ao uso em laboratórios (Obain, 2004).

No caso das indústrias de revestimento cerâmico, um equipamento amplamente utilizado é o brilhaômetro (Kigle-Boecker, 1995; Obain, 2004), em função da praticidade e rapidez com que são fornecidos os resultados. O princípio de funcionamento do brilhaômetro pode ser visto na Figura 11. O equipamento possui uma câmara de medição, onde são

encontradas uma fonte e um detector de luz, dispostas de modo fornecer a relação entre intensidade de luz emitida e refletida de modo especular. Esta razão é então comparada com um valor padrão, obtido efetuando-se o mesmo ensaio sobre um vidro negro extremamente polido, e com índice de refração igual a 1,567, conforme relatado por (Kigle-Boecker, 1995), citando a ISO 2813 (ISO 2813, 1994).

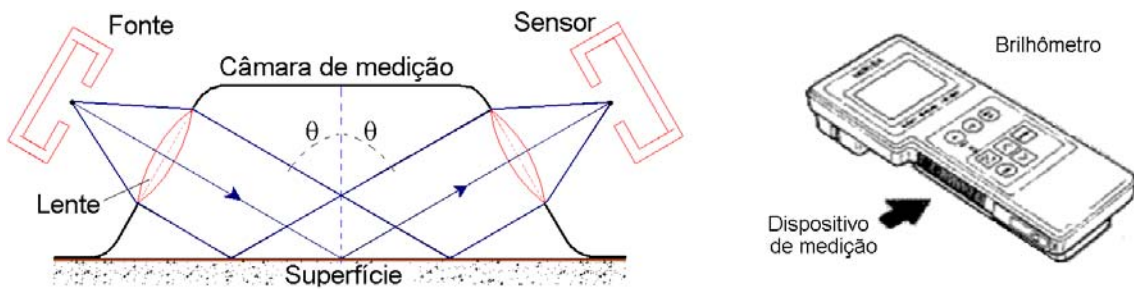


Figura 11 – Princípio de funcionamento do brilhometro

Os resultados fornecidos pelos brilhometros devem ser expressos em unidades de brilho (u.b.), sendo atribuído o valor de 100 u.b. à superfície padrão (Kigle-Boecker, 1995; HORIBA).

Em um estudo sobre a percepção do brilho, Obein et al (Obain, 2004) relatam que a partir de 30 u.b. a imagem da fonte de luz já pode ser identificada sobre a superfície da peça. Os autores registraram ainda a ocorrência de uma percepção linear do brilho entre valores de 30 a 70 u.b., acima dos quais a percepção aumenta exponencialmente. No caso dos porcelanatos, as especificações comerciais típicas requerem um brilho entre 65 e 70 unidades de brilho (Hutchings, 2005a).

3 MÉTODO

O estudo visando conhecimentos originais sobre o processo de polimento industrial foi realizado em duas etapas distintas. A primeira foi uma análise teórica da cinemática atuante no processo de polimento industrial, a partir das fontes de movimento que governam o trajeto a ser desenvolvido pelos abrasivos. Trata-se, portanto, de um estudo puramente geométrico e determinístico.

Na segunda etapa foi realizado um estudo experimental sobre a distribuição de brilho ao longo da superfície de diversas placas cerâmicas, bem como sobre a rugosidade superficial associada. Os detalhes de ambos os estudos encontram-se nos subitens a seguir.

3.1 ANÁLISE DA CINEMÁTICA DO POLIMENTO

Esta etapa do trabalho baseia-se nas equações que definem a cinemática do polimento. Os resultados aqui apresentados podem ser igualmente vistos em dois artigos específicos do autor (Sousa, 2007b; Sousa, 2007a). As variáveis admitidas como fontes de movimento das partículas abrasivas foram a rotação do disco abrasivo (w [rpm]), a velocidade de avanço da esteira (V [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$]), a frequência da oscilação lateral (f [s^{-1}]), a amplitude de oscilação lateral (A [cm]), e o raio interno (r [cm]) e externo (R [cm]) do disco abrasivo. Reservou-se a letra t para representar a variável tempo [s], ao longo do qual ocorre o polimento.

Deve ser mencionada ainda a existência de outra fonte de movimento das partículas abrasivas, conforme mostra a Figura 12. Além das fontes de movimento supracitadas, cada bloco abrasivo executa um movimento de suingue no qual a cada instante novos

abrasivos são colocados em contato com a placa. Este movimento visa manter o contato entre bloco abrasivo e superfície em uma estreita faixa, bem como causar um consumo uniforme do bloco abrasivo (Hutchings, 2005a).

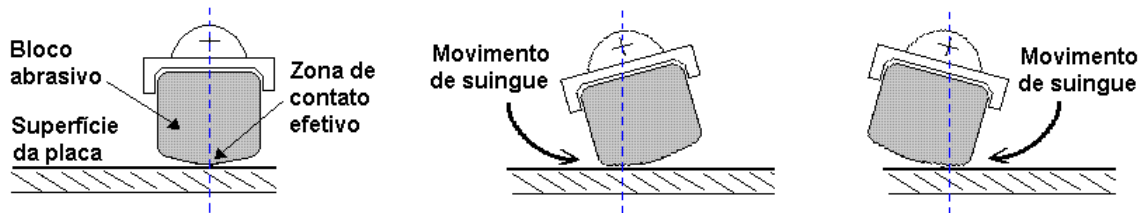


Figura 12 – Movimento de suingue do bloco abrasivo

Este movimento não foi levado em conta na análise da cinemática atuante, uma vez que a posição da estreita faixa de contato entre bloco abrasivo e superfície tende a permanecer inalterada, como indicado na mesma figura.

Além disso, devido à complexidade resultante, considerada intratável em um único estudo, diversas variáveis não foram consideradas neste trabalho. São elas: as cargas normais atuantes em cada politriz, a qualidade e a quantidade de líquido lubrificante, o desgaste do ferramental abrasivo, a variabilidade dimensional das placas cerâmicas assim como a presença de empenamento nas mesmas, e erros de horizontalidade na esteira de produção bem como nos rolos de calibração.

Como sistema de referência, admitiu-se o vetor unitário \hat{i} como coincidente ao sentido de avanço da esteira de polimento, e o vetor unitário \hat{j} como representativo da direção da oscilação lateral, sendo perpendicular e coplanar à \hat{i} .

A condição cinemática atuante no polimento é estabelecida definindo-se os valores das variáveis V , f , A e w , explicadas acima. Diversas condições cinemáticas foram consideradas neste trabalho, sendo todas devidamente indicadas junto aos resultados correspondentes. Contudo, para evitar o exagero de repetições, foram designados os

seguintes valores como padrões: $V = 7,5 \text{ cm s}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $W = 450 \text{ rpm}$, $A = 12 \text{ cm}$, $r = 11 \text{ cm}$ e $R = 23 \text{ cm}$. A opção por estes valores deu-se devido ao amplo uso nas indústrias e na literatura (Hutchings, 2004; Hutchings, 2005a). Vale mencionar que esses valores foram adquiridos pela experiência de funcionários, tal como geralmente ocorre nas indústrias do setor (Tucci, 2000; Espósito, 2005), e não por algum estudo sistemático.

A análise da cinemática atuante na linha de polimento foi ainda subdividida de acordo com a escala do corpo em movimento. Os parâmetros cinemáticos associados ao movimento de uma dada partícula abrasiva compõem microcinemática atuante, enquanto que os parâmetros referentes à movimentação dos blocos abrasivos e politrizes foram designados como macrocinemáticos. Como exemplos de parâmetros micro e macrocinemáticos podem ser citados, respectivamente, a velocidade de riscamento e a trajetória desenvolvida por uma politriz.

A obtenção e o detalhamento das equações desenvolvidas tanto para micro quanto para macrocinemática atuante constituem os resultados teóricos deste trabalho, e serão apresentadas na seção correspondente.

O programa *Mathematica*® versão 5.2 foi utilizado para a realização das devidas integrações e diferenciações necessárias. As constantes decorrentes de integração foram desconsideradas.

Os resultados de todas as simulações, realizadas a partir das equações obtidas, foram calculadas por um algoritmo feito em LabVIEW®, versão 5.1, adotando-se $dx \sim \Delta x = 0,01 \text{ cm}$, para fins de integração, e $dy \sim \Delta y = 0,001 \text{ cm}$ para fins de diferenciação.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais realizados neste trabalho foram basicamente a obtenção da distribuição do brilho apresentado por diversas placas de porcelanatos técnicos polidos, e a obtenção da rugosidade média superficial tomada em regiões com diferentes níveis de brilho.

Para o primeiro caso foi adotado o sistema de mapeamento superficial indicado na Figura 13. As superfícies das placas cerâmicas foram cuidadosamente marcadas com um lápis, de modo a delimitar pequenas regiões retangulares ao longo da superfície. A dimensão destas regiões foi definida com base no tamanho do dispositivo de medição de brilho utilizado, sendo geralmente de 2,5 x 3,5 cm².

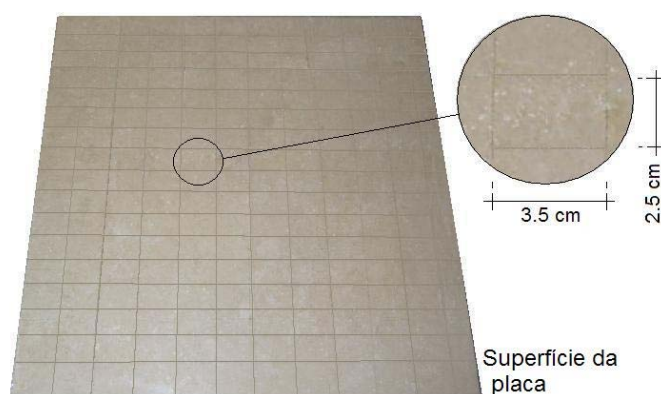


Figura 13 – Mapeamento de regiões superficiais correspondentes a um pixel

Assim, foram obtidos valores de brilho real, medidos ao longo de toda a superfície de diversas placas de porcelanato, cada uma com dimensão nominal de 45 cm x 45 cm, provenientes das empresas *Cerâmica Portobello S/A* e *Ceusa*. Para não relevar explicitamente as condições de polimento usualmente adotadas por uma ou outra empresa, a procedência específica de cada placa não foi divulgada neste trabalho.

A identificação adotada para cada placa cerâmica consiste em um número cardinal, representando a ordem de polimento da placa, seguido de uma letra, referente a condição

de polimento adotada. Por exemplo, a placa 3b foi polida imediatamente após a placa 2b, sendo ambas polidas sob a mesma condição de polimento, por sua vez diferença da condição de polimento adotada para a placa 3c. Todas as placas, porém, foram retiradas para medição de brilho apenas após ter sido atingido um regime estacionário na linha de polimento.

Para obtenção dos valores de brilho foi utilizado um brilhômetro modelo IG-320, com ângulo de incidência de 60°, marca Horiba. As medidas foram realizadas nas próprias indústrias, após uma limpeza da superfície com álcool etílico (comum). Os valores de brilho fornecidos pelo equipamento para cada uma das diversas regiões mapeadas conforme indicado acima foram então reunidos e apresentados na forma de gráficos em escala de cinza, conforme pode ser visto na Figura 14b.

Quanto à obtenção das medidas de rugosidade superficial, foram selecionados dez pixels com valores de brilho igualmente espaçados entre 68 % e 88 %, sendo todos localizados na superfície da placa 1e. Na região central de cada um desses dez pixels foram tomados oito perfis de rugosidade, com 5,6 mm de comprimento cada um.

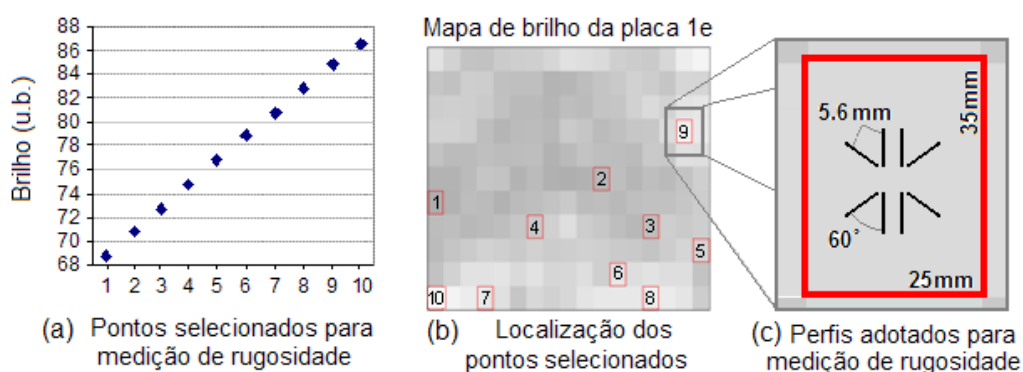


Figura 14 – Detalhamento do ensaio para medidas de rugosidade superficial

Para tanto foi utilizado um perfilômetro marca Mahr, modelo M2, com apalpador cônico de diamante (raio de ponta de 3µm e ângulo de 60°). A orientação e a localização desses

perfis podem ser vistas na Figura 14c. Esses ensaios foram realizados nas dependências do Departamento de Engenharia Mecânica (FBK) da Universidade de Kaiserslautern, na Alemanha.

A rugosidade média R_a foi calculada para cada um dos oito perfis indicados acima. Em seguida, a média aritmética destes oito valores foi tomada como representativa do valor de rugosidade média R_a da região retangular correspondente.

A fim de se confirmar os resultados de rugosidade estimados via perfilometria, foram ainda obtidas a topografia de uma região com 1,2 x 0,9 mm, centralizada em cada uma das regiões avaliadas. Para tanto foi utilizado um equipamento de interferometria de luz branca, modelo NT33, marca Wyko.

Medidas de porosidade da superfície após o polimento foram obtidas via análise das próprias imagens fornecidas nas pelo interferômetro de luz branca, com o auxílio do programa *Adobe Photoshop® CS2* versão 9.0. Essas imagens foram convertidas em preto e branco, adotando-se um fator 17 (de 0 a 255) como patamar de conversão (threshold), a fim de serem identificados os poros.

Por fim, à medida do necessário, foram feitas algumas pequenas considerações quanto a metodologia adotada. Nesses casos, os detalhes quanto aos procedimentos adotados encontram-se devidamente indicados ao longo da discussão.

4 RESULTADOS TEÓRICOS

4.1 ANÁLISE DA CINEMÁTICA DO POLIMENTO

A posição de uma dada partícula abrasiva P pode ser definida a cada instante t pelo vetor deslocamento \vec{D} . Este vetor por sua vez resulta das contribuições das seguintes fontes de movimento: avanço da esteira $\vec{D}E$, rotação do disco abrasivo $\vec{D}R$ e oscilação lateral da politriz $\vec{D}OL$, cujos respectivos vetores podem ser vistos na Figura 15.

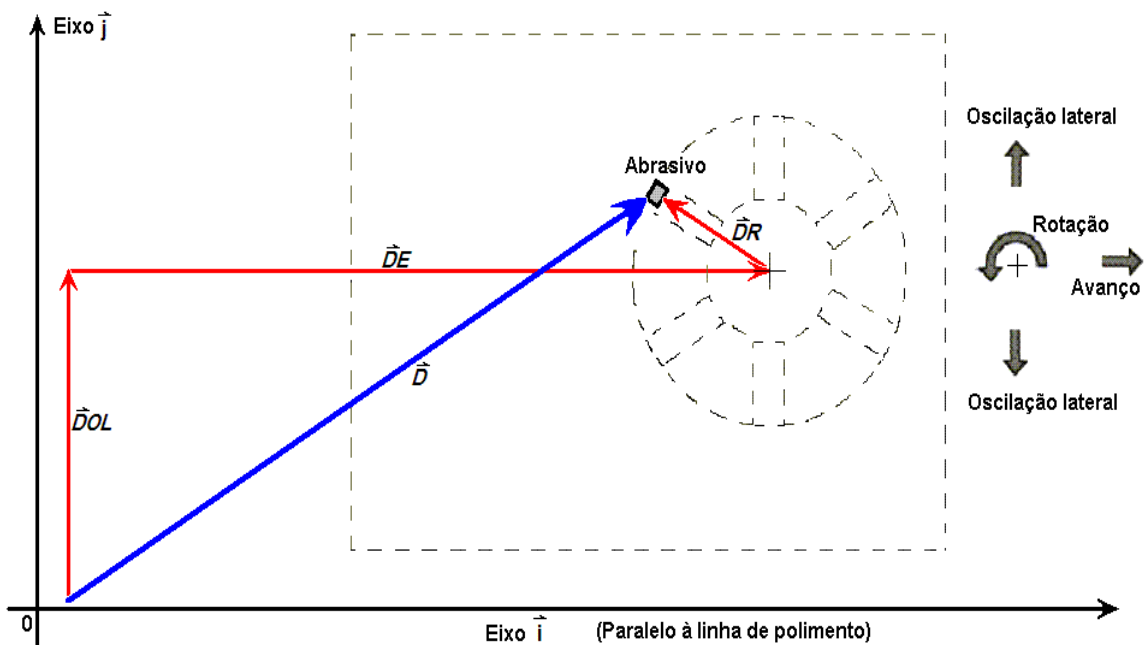


Figura 15 – Componentes do vetor deslocamento para uma partícula abrasiva

Na forma vetorial \vec{D} é expresso por:

$$\vec{D} = f(w, r, A, f, V, t) = \vec{D}E + \vec{D}R + \vec{D}OL \quad (2)$$

Onde:

$$\vec{D}E = f(V, t) = \{V \cdot t\}\hat{i} + \{0\}\hat{j} \quad (3)$$

$$\vec{D}R = f(W, r, t) = \{r \cdot \cos(w \cdot t)\}\hat{i} + \{r \cdot \sin(w \cdot t)\}\hat{j} \quad (4)$$

$$\vec{D}OL = f(A, f, t) = \{0\}\hat{i} + \left\{\frac{A}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)\right\}\hat{j} \quad (5)$$

Reunindo-se as equações acima:

$$\vec{D} = \{V \cdot t + r \cdot \cos(w \cdot t)\}\hat{i} + \left\{r \cdot \sin(w \cdot t) + \frac{A}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)\right\}\hat{j} \quad (6)$$

As Figuras 16a e 16b mostram, em termos de \hat{i} e \hat{j} respectivamente, a contribuição de \vec{D} , $\vec{D}R$ e $\vec{D}OL$ na posição instantânea de uma partícula abrasiva situada na borda interna do disco abrasivo ($r = 11$ cm). Foram usados os seguintes parâmetros: $W=450$ rpm, $V=7,5$ cm·s⁻¹, $f=0,4$ s⁻¹, e $A = 12$ cm, admitidos neste trabalho como valores padrões.

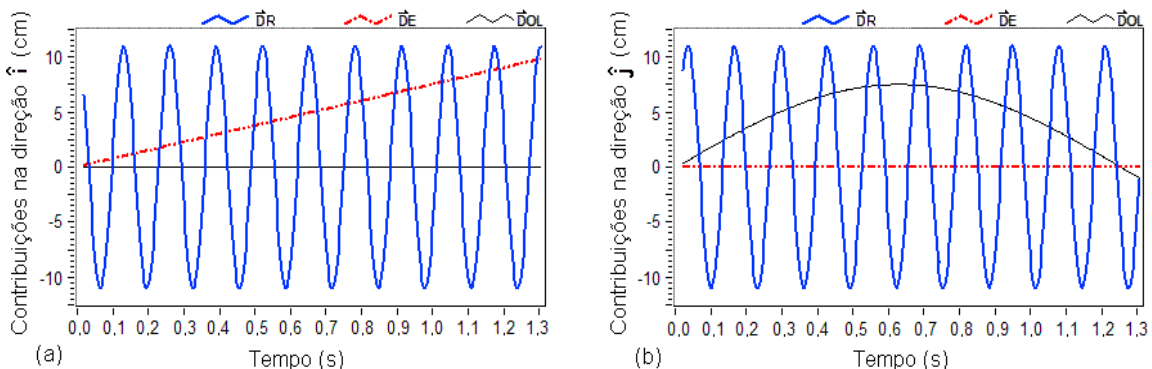


Figura 16 – Contribuição dos sistemas de movimentação para a posição em \hat{i} (a) e \hat{j} (b) de um abrasivo

Além de valores numéricos, os gráficos acima fornecem as direções de contribuição das fontes de movimento. O avanço da esteira e a oscilação lateral causam contribuições em apenas uma direção, respectivamente \hat{i} e \hat{j} , enquanto a rotação do disco abrasivo afeta o deslocamento do abrasivo em ambas as direções.

A partir das equações acima pode ser obtido o trajeto de cada um dos múltiplos riscos presentes em uma linha de polimento de porcelanato, como exemplificado na Figura 17. A

linha representa o trajeto de um ponto arbitrário do ferramental abrasivo, obtido analiticamente a partir da condição cinemática padrão. Nota-se freqüentes sobreposições de riscos, e riscos com curvaturas variáveis.

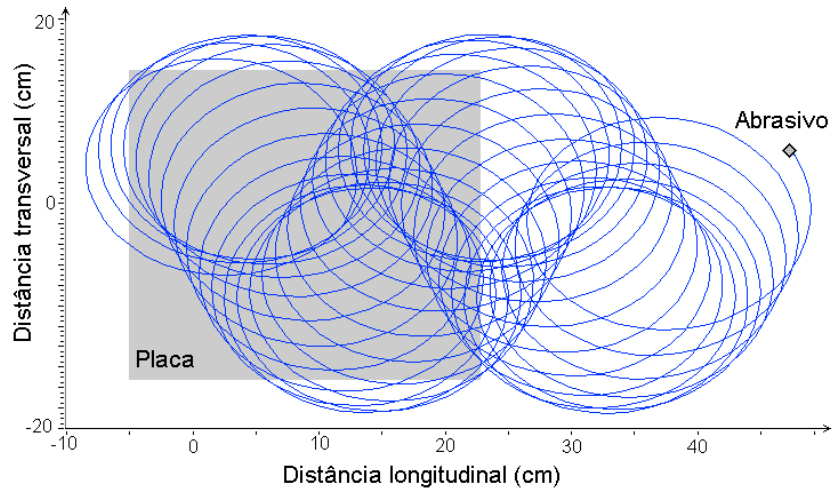
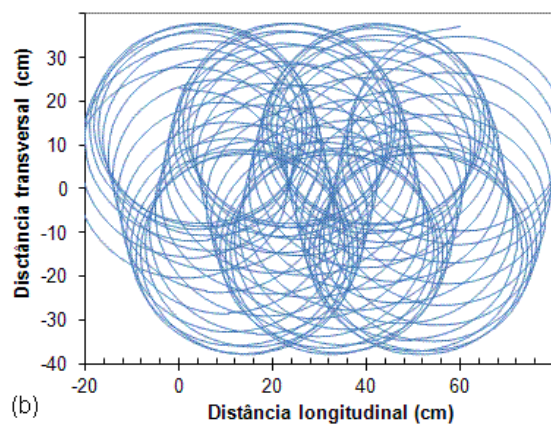
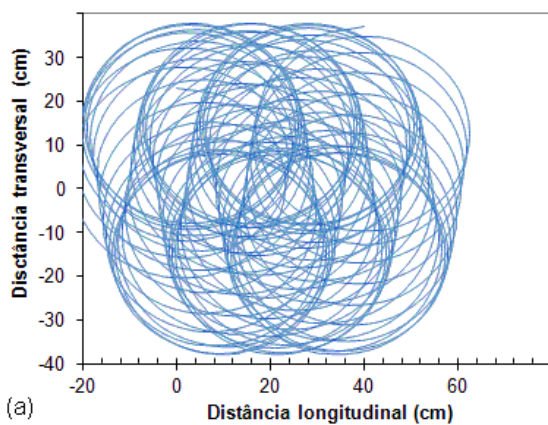


Figura 17 – Trajeto de um abrasivo ao longo da linha de polimento

As Figuras 18a-d ilustram alguns possíveis trajetos de um abrasivo periférico ($R=23$ cm) mediante alterações hipotéticas da velocidade de avanço da esteira e freqüência de oscilação lateral. Na figura foram considerados respectivamente: (a) $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$ e $V = 5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$ e $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $f = 1 \text{ s}^{-1}$ e $V = 5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $f = 1 \text{ s}^{-1}$ e $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.



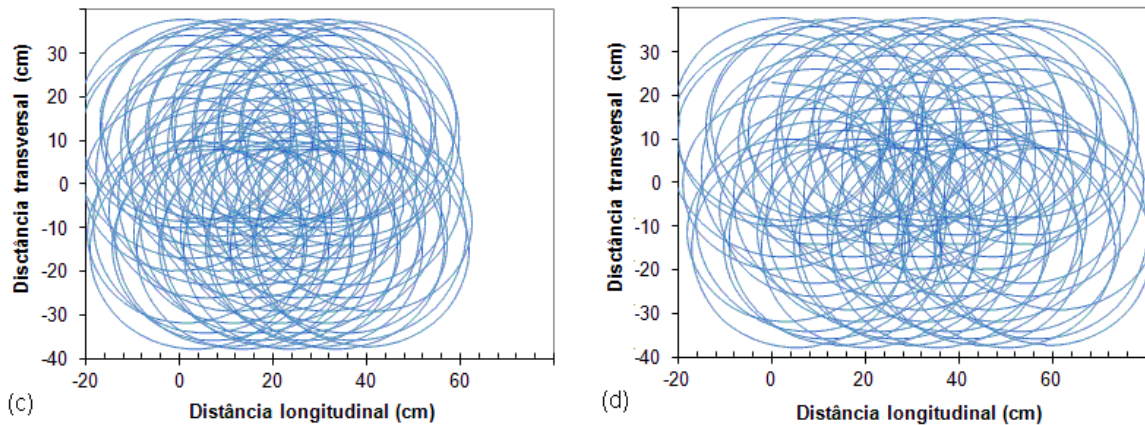


Figura 18 – Possíveis trajetórias de uma partícula na periferia do disco abrasivo: (a) $f= 0,4 \text{ s}^{-1}$ e $V= 5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e (b) $V= 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, e (c) $f=1 \text{ s}^{-1}$ e (d) $V= 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Nestas figuras logo se nota uma grande fonte de heterogeneidade de brilho na superfície da peça: o acúmulo diferenciado de contatos abrasivos. Isto pode resultar no mesmo problema de favorecimento de brilho visto no caso de politrizes simples, isto é, as “sombras de polimento”

4.2 ANÁLISE DA MICROCINEMÁTICA ATUANTE

As equações apresentadas acima permitem a obtenção dos principais parâmetros cinemáticos atribuíveis a uma dada partícula abrasiva, isto é, a determinação da microcinemática atuante.

O vetor velocidade \vec{g} , com a qual o abrasivo percorre a superfície da placa, pode ser determinado pela Equação 7, que é a derivada da equação 6 com relação ao tempo. O módulo de \vec{g} representa por sua vez a velocidade relativa v , ou velocidade de riscamento, a ser expressa pela Equação 8.

$$\vec{g} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \{V - r \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)\}\hat{i} + \{r \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) + A \cdot f \cdot \pi \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)\}\hat{j} \quad (7)$$

$$v = |\vec{g}| = \left| \{V - r \cdot w \cdot \sin(w \cdot t)\} \hat{i} + \{r \cdot w \cdot \cos(w \cdot t) + A \cdot f \cdot \pi \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)\} \hat{j} \right| \quad (8)$$

A velocidade de riscamento atingida por um abrasivo localizado na periferia do disco abrasivo ($R = 23 \text{ cm}$) é mostrada na Figura 19, admitindo-se para os demais parâmetros os valores padrões. Adicionalmente, um valor extra de frequência lateral foi adicionado ao gráfico, visando ilustrar a influência deste parâmetro na velocidade de riscamento.

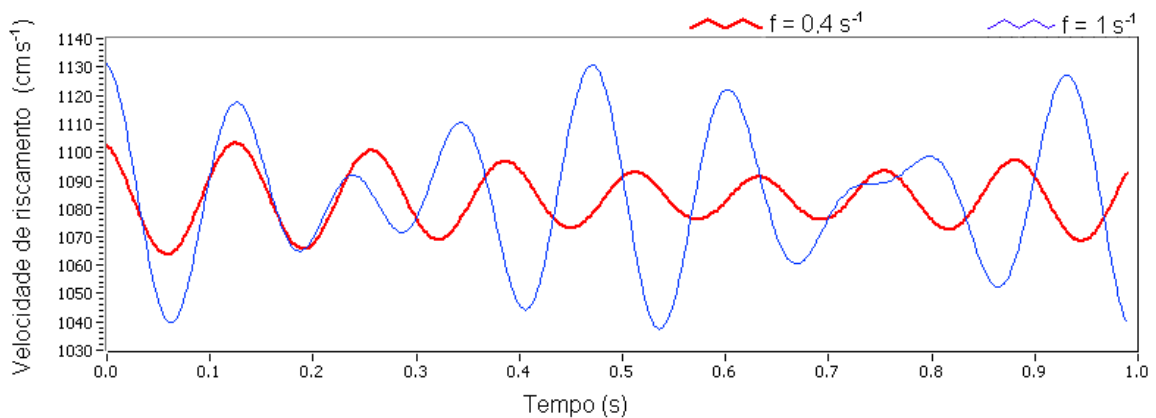


Figura 19 – Velocidade relativa da partícula abrasiva a cada instante

A oscilação lateral pode causar variações significativas na velocidade de riscamento. Na média, porém, a velocidade de riscamento é praticamente definida pelo movimento de rotação do disco abrasivo. A faixa de valores calculada acima mostrou-se ligeiramente superior a $800 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, indicado na literatura (Hutchings, 2005a).

A razão entre os termos multiplicativos dos vetores unitários \hat{i} e \hat{j} da equação 8, fornece o ângulo φ no qual se dá o riscamento. O ângulo de riscamento, expresso pela Equação 9, permite por sua vez a obtenção do ângulo de sobreposição de riscos sucessivos, feitos em uma mesma região.

$$\tan(\varphi) = \frac{\Delta y \hat{j}}{\Delta x \hat{i}} = \frac{\{r \cdot w \cdot \cos(w \cdot t) + A \cdot f \cdot \pi \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)\}}{\{V - r \cdot w \cdot \sin(w \cdot t)\}} \quad (9)$$

A Figura 20 apresenta o comportamento do ângulo de riscamento ao longo do tempo, assumindo a direção do polimento como referência. Um valor exagerado de frequência de polimento de $f = 3 \text{ s}^{-1}$ foi incluído na figura, a fim de possibilitar a visualização da pequena influência dessa variável no ângulo de riscamento. Contudo, essa pequena alteração do ângulo de riscamento está associada a uma grande modificação na trajetória abrasiva, conforme mostrado na mesma figura.

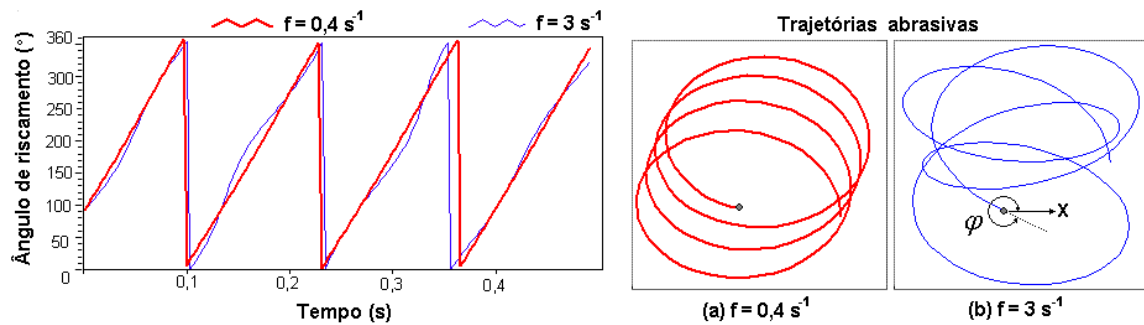


Figura 20 – Direção de riscamento para diferentes frequências de oscilação lateral

A derivada da equação 7 com relação ao tempo, por sua vez, fornece a aceleração do abrasivo durante o riscamento. Trata-se de um movimento não retilíneo, de modo que a direção do vetor \vec{a} não é a mesma que a do vetor \vec{g} . Matematicamente:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{g}}{dt} = -\left\{ r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \right\} \hat{i} - \left\{ r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 2 \cdot A \cdot f^2 \cdot \pi^2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \right\} \hat{j} \quad (10)$$

Devido ao caráter circular do movimento, o módulo desta aceleração contém, além da aceleração que atua na direção do riscamento, uma parcela preponderante de aceleração centrípeta. A obtenção dos valores de aceleração exclusivamente coincidentes à direção do riscamento está pormenorizada a seguir, em conjunto com a obtenção de outro parâmetro microcinemático: a curvatura instantânea do risco.

Para tanto, contudo, torna-se conveniente reescrever a equação 10 de um modo mais apropriado (Fowles, 1986). Como mostrado na Figura 21, o mesmo vetor \vec{a} pode ser

representado pelos vetores $\vec{\eta}$ e $\vec{\tau}$, cujo sistema de referência é variável com o tempo, e definido pelos vetores unitários $\hat{\eta}$ e $\hat{\tau}$. Ambos os vetores permanecem, porém, sempre paralelo e perpendicular à direção do riscamento, respectivamente.

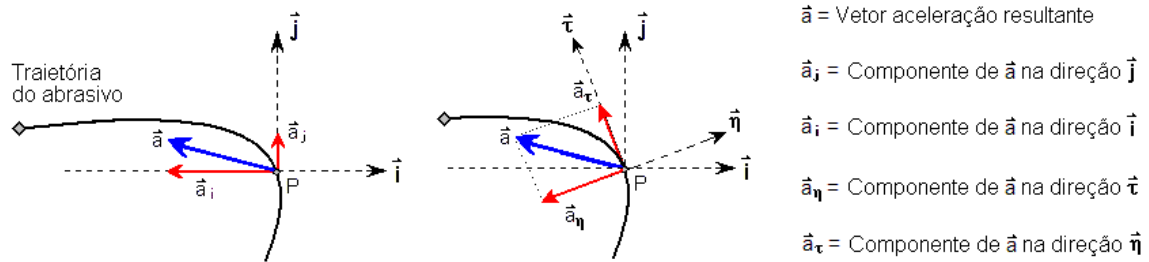


Figura 21 – Mudança no sistema de referência das componentes do vetor aceleração

Uma vez que o vetor $\vec{\tau}$ tem sempre a mesma direção que \vec{g} , pode-se escrever:

$$\vec{g} = v \cdot \hat{\tau} \quad (11)$$

Onde, de acordo com as regras de diferenciação, o vetor aceleração poderia ainda ser dado por:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{g}}{dt} = \frac{dv}{dt} \cdot \hat{\tau} + v \cdot \frac{d\hat{\tau}}{dt} \quad (12)$$

A determinação de ρ por meio da equação 12 pode ser entendida com o auxílio da Figura 22. À medida que o incremento Δt diminui, nota-se que a variação do vetor $\hat{\tau}$, isto é $\Delta \vec{\tau} = \vec{\tau}_2 - \vec{\tau}_1$, e a variação de ângulo $\Delta \theta$ diminuem simultaneamente. Além disso, $\Delta \vec{\tau}$ tende a torna-se perpendicular à $\hat{\tau}$. No limite, fazendo Δt tender a zero, a razão $\frac{d\hat{\tau}}{d\theta}$ é o próprio vetor $\hat{\eta}$. Adicionalmente, o raio de curvatura do risco, definido por ρ , pode ser escrito como a razão entre o arco de comprimento dL e ângulo $d\theta$.

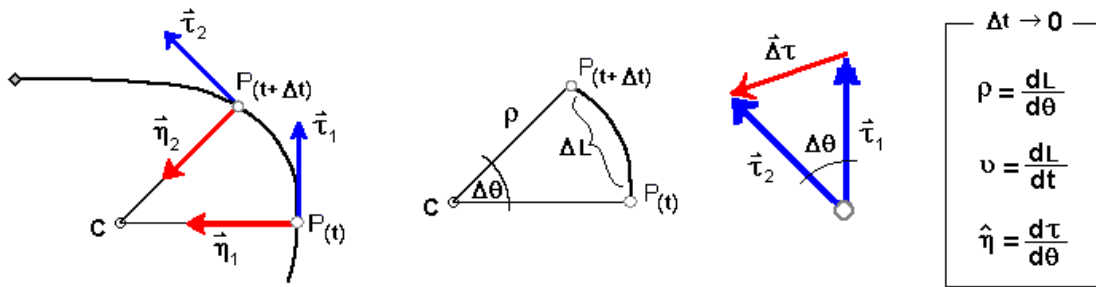


Figura 22 – Determinação do raio de curvatura a partir do vetor $\vec{\eta}$

Assim, modificando-se o ultimo termo da equação 12 por meio da regra da cadeia, a fim de deixá-lo em função de $\hat{\eta}$ e $\hat{\tau}$, tem-se:

$$\frac{d\hat{\tau}}{dt} = \frac{d\hat{\tau}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (13)$$

A razão $\frac{d\theta}{dt}$ pode ainda ser modificada aplicando-se novamente a regra da cadeia, tal

que:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dL} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (14)$$

Substituindo $\frac{d\theta}{dt}$ da equação 13 na equação 14 resulta em:

$$\frac{d\hat{\tau}}{dt} = \frac{d\hat{\tau}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dL} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (15)$$

Considerando que $\rho = \frac{dL}{d\theta}$, $\hat{\eta} = \frac{d\hat{\tau}}{d\theta}$ e $v = \frac{dL}{dt}$, pode-se escrever que:

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \cdot \hat{\tau} + \frac{v^2}{\rho} \cdot \hat{\eta} \quad (16)$$

Finalmente, após as devidas substituições das funções envolvidas no processo de polimento, o raio de curvatura ρ pode ser obtido a cada instante por meio da seguinte expressão:

$$\rho = \left\{ \frac{\alpha^3}{\beta \cdot \alpha - (\varepsilon - \gamma)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Onde:

$$\alpha = V^2 - 2 \cdot V \cdot r \cdot w \cdot \sin(w \cdot t) + r^2 \cdot w^2 + 2 \cdot r \cdot w \cdot A \cdot f \cdot \pi \cdot \cos(2 \pi \cdot f \cdot t) + [A \cdot f \cdot \pi \cdot \cos(2 \pi \cdot f \cdot t)]^2 \quad (18)$$

$$\beta = r^2 \cdot w^4 + 2 \cdot A \cdot r \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot w^2 \cdot \sin(w \cdot t) \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) + [2 \cdot A \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t)]^2 \quad (19)$$

$$\varepsilon = -V \cdot r \cdot w^2 \cdot \cos(w \cdot t) - r \cdot w^2 \cdot A \cdot f \cdot \pi \cdot \sin(w \cdot t) \cdot \cos(2 \pi \cdot t) \quad (20)$$

$$\gamma = 2 \cdot r \cdot w \cdot A \cdot f^2 \cdot \pi^2 \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(w \cdot t) + 2 \cdot A^2 \cdot f^3 \cdot \pi^3 \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2 \pi \cdot f \cdot t) \quad (21)$$

O comportamento da equação 17 pode ser visto na Figura 23, para as seguintes frequências de oscilação lateral $f=0,4$ e 1 s^{-1} . Os valores de ρ situaram-se entre 10 - 12 cm para $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$, enquanto uma faixa maior de 9 a 13,5 cm foi prevista para $f = 1 \text{ s}^{-1}$.

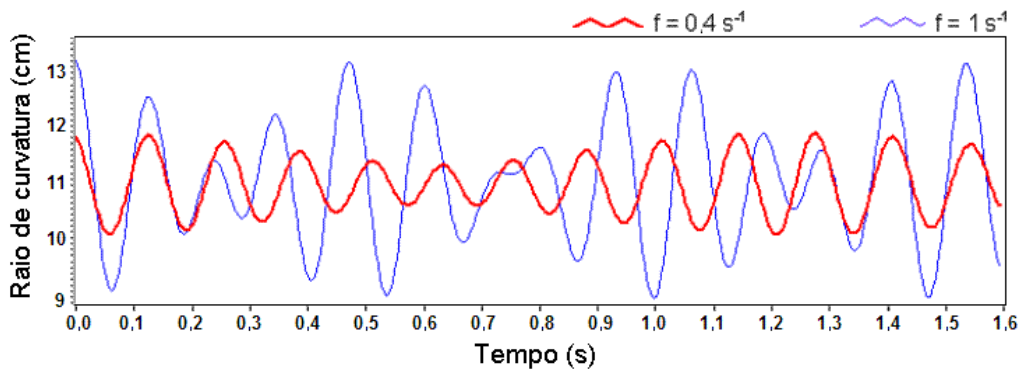


Figura 23 – Raio de curvatura do trajeto abrasivo ao longo do tempo

O termo multiplicativo de $\hat{\tau}$, isto é $\frac{dv}{dt}$, é a própria componente de aceleração, cuja direção acompanha permanentemente a direção do riscamento. Trata-se, portanto, da derivada do módulo do vetor \vec{g} , sendo dado por:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{rw^2 \cos(wt)[V - rw \cdot \text{sen}(wt)] - [A\pi f \cdot \cos(2\pi ft) + rw \cdot \cos(wt)] \cdot [2A\pi^2 f^2 \cdot \text{sen}(2\pi ft) + rw^2 \text{sen}(wt)]}{\sqrt{[A\pi f \cdot \cos(2\pi ft) + rw \cdot \cos(wt)]^2 + [V - rw \cdot \text{sen}(wt)]^2}} \quad (22)$$

A Figura 24 apresenta os valores fornecidos pela equação 22 acima, para as mesmas condições de polimento adotadas anteriormente.

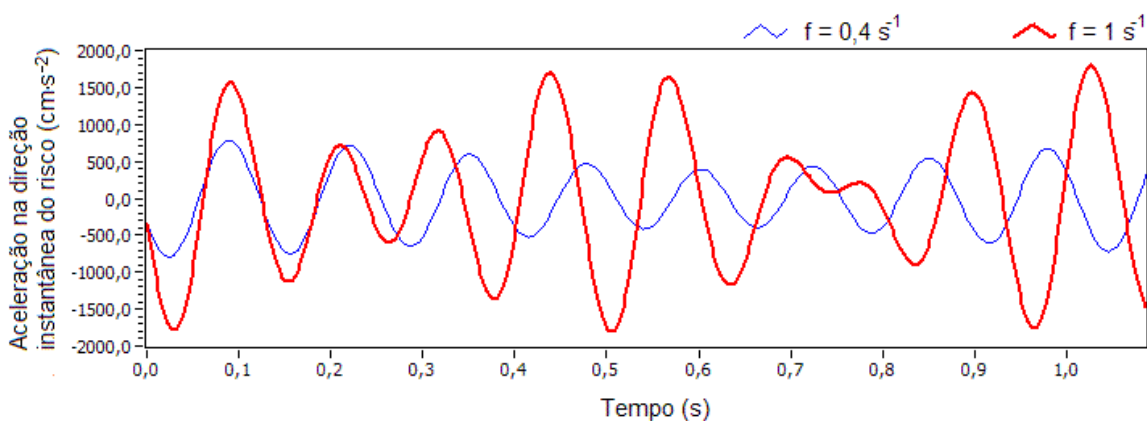


Figura 24 – Aceleração exclusivamente na direção do trajeto abrasivo ao longo tempo

Nota-se que a frequência de oscilação lateral influencia significativamente a aceleração atuante exclusivamente na direção de riscamento.

4.3 ANÁLISE DA MACROKINEMÁTICA ATUANTE

Focando-se agora no movimento realizado não por uma partícula abrasiva, mas por todo o conjunto de politrizes, a componente de aceleração a ser estudado decorre exclusivamente do movimento de oscilação lateral.

A aceleração experimentada, por cada unidade de massa oscilante, é causada pela ação de forças, as quais se deslocam ao longo da amplitude da oscilação lateral, e com isso realizando trabalho. Reservou-se aqui o símbolo W_{UOL} para representar o trabalho produzido por uma massa unitária do conjunto de politrizes, devido ao movimento de oscilação lateral.

A realização desse trabalho se dá mediante o fornecimento de uma energia equivalente a W_{UOL} , pelo equipamento. Assim, quanto maior for W_{UOL} maior será o consumo energético esperado para a linha de polimento. A determinação de W_{UOL} foi desenvolvida nas equações a seguir (Hibeler, 1985), com base na aceleração \vec{a}_{OL} , e do deslocamento infinitesimal $d\vec{l}_{OL}$, ambos exclusivamente referentes à direção da oscilação lateral.

$$dW_{UOL} = \vec{a}_{OL} \cdot d\vec{l}_{OL} \quad (23)$$

$$dW_{UOL}(t) = 2 \cdot A \cdot f^2 \pi^2 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot \frac{A}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (24)$$

$$\int_0^t dW_{UOL}(t) dt = \int_0^t 2 \cdot A \cdot f^2 \pi^2 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot \frac{A}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (25)$$

$$W_{UOL}(t) = A^2 \cdot f^2 \pi^2 \int_0^t \text{sen}^2(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (26)$$

Onde por fim, chega-se à equação abaixo:

$$W_{UOL}(t) = \frac{(A \cdot f \cdot \pi)^2}{2} \cdot \left[t - \frac{\text{sen}(4 \cdot \pi \cdot f \cdot t)}{4\pi f} \right] \quad (27)$$

Os valores de W_{UOL} previstos, mantendo-se os parâmetros anteriores, podem ser vistos na Figura 25. Deve-se ressaltar que, na equação acima, admitiram-se politrizes perfeitamente livres para se deslocarem, de modo que não foram computadas as forças atuantes na superfície da placa durante o polimento. Contudo, o gráfico permite uma avaliação da grande importância da frequência de oscilação lateral no custo energético do polimento. Deve-se ainda ressaltar que o gráfico mostra apenas os primeiros segundos, sendo esperadas durações da ordem de oito minutos para o polimento.

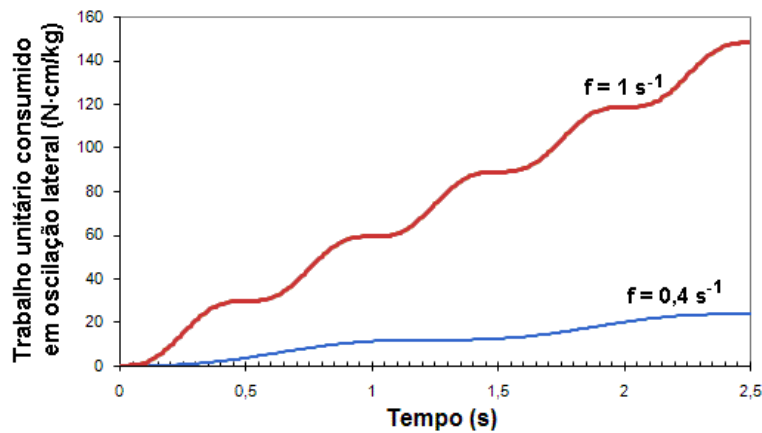


Figura 25 – Trabalho requerido na oscilação lateral de uma massa unitária de politriz

Além do fator energético, o aumento da frequência de oscilação lateral requer maiores níveis de aceleração \vec{a}_{OL} , o que significa um aumento das forças atuantes. Com isso tem-se uma maior solitação mecânica nos diversos elementos que compõe a linha de polimento, comprometendo com isso sua vida útil.

Além da aceleração, outro fator que deve ser levado em conta na seleção dos parâmetros que atuam no conjunto de politrizes é a sobreposição dos trajetos de polimento,

individualmente promovidos por cada politriz. As trajetórias de polimento de um conjunto de três politrizes adjacentes encontram-se ilustradas na Figura 26. Devido ao movimento de oscilação lateral podem-se ter regiões, ao longo da superfície, destinadas a receberem a ação de apenas uma dentre as politrizes adjacentes.

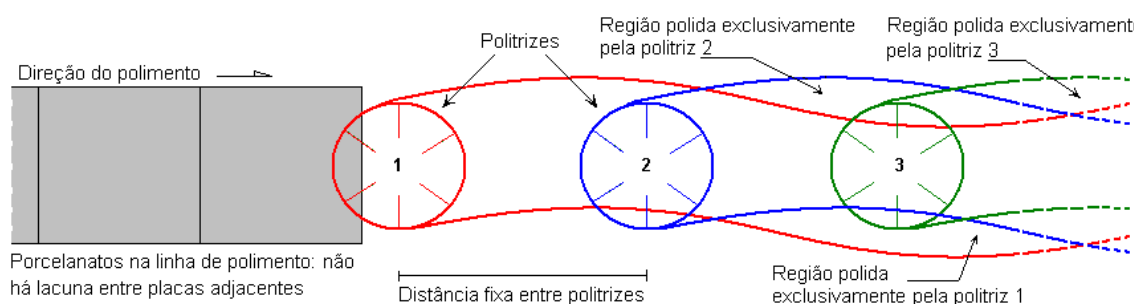


Figura 26 – Sobreposição do trajeto de polimento de três politrizes adjacentes

Esse conjunto de três politrizes adjacentes pode ser visto como uma seqüência de politrizes de mesmo tamanho de abrasivos, algo freqüentemente adotado na indústria. Desta forma, a importância de se obter uma boa sobreposição de trajetórias de polimento justifica-se pela dificuldade de uma politriz com abrasivos menores em remover os danos deixados por abrasivos maiores (Sánchez, 2002; Ibáñez, 2002; Wang, 2003; Su, 2001), possivelmente prejudicando com isto o brilho final esperado para essas regiões.

Conforme indicado na Figura 26, as distâncias entre duas politrizes adjacentes são fixas. Além disso, na linha de polimento cada placa permanece sempre em contato com ambas as placas adjacentes, de modo a não haver qualquer espaçamento entre placas. Isto é feito a fim de evitar ciclos de saída completa e posterior reentrada brusca do bloco abrasivo na superfície da placa. Uma vez perdido completamente o apoio da placa o bloco abrasivo tende a ultrapassar, mesmo que muito timidamente, o nível da superfície. Ao reentrar na superfície o bloco abrasivo ataca abruptamente a borda superior da placa, causando um possível arrancamento de fragmentos. Estes fragmento, por sua vez, acabam por invadir a superfície e causar riscos grosseiros.

Assim, considerando o fato de que todo o conjunto de politriz executa o mesmo movimento, simultaneamente, a sobreposição de trajetórias de polimento pode ser analisada como uma sobreposição de ondas de mesma frequência e amplitudes, possuindo apenas uma diferença de fase entre ondas subsequentes. Esta diferença de fase causada pela distância L entre politrizes adjacentes está esquematizada na Figura 27a e 27b.

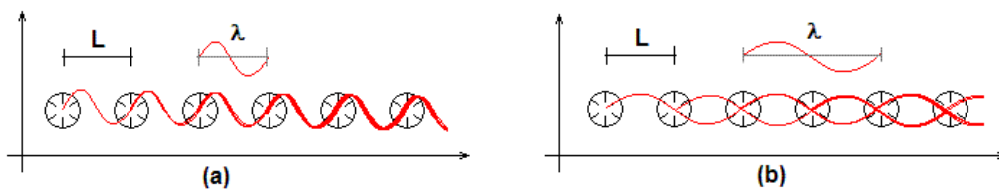


Figura 27 – Interferência construtiva (a) e destrutiva (b) de trajetórias de polimento

Conforme exemplificado na figura, pode haver interferências construtivas (a), destrutivas (b), ou ainda interferências parciais. Dependendo da relação entre L e λ , expressa nas equações 28 e 29:

(a) Interferência construtiva completa

$$L = n \cdot \lambda \quad (28)$$

(b) Interferência destrutiva completa

$$L = \lambda \cdot \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (29)$$

Onde n é um número inteiro.

No caso de interferência completamente construtiva, todas as politrizes têm o mesmo trajeto e, por consequência, executam o polimento sempre nas mesmas regiões e direções ao longo da linha de polimento. Esta condição é indesejável, uma vez que resulta em um nítido padrão de polimento por sobre a superfície, com possível formação

de textura. Em outras palavras, algumas regiões são abrasonadas ao extremo, enquanto outras são submetidas a um polimento insuficiente. No limite, certas regiões podem permanecer totalmente inalteradas mesmo após a passagem por todas as dezenas de politrizes da linha de polimento.

Tal como no caso da posição das partículas abrasivas, o modo de sobreposição dos trajetos de polimento pode ser equacionado a partir dos parâmetros cinemáticos atuantes, conforme esquematizado na Figura 28.

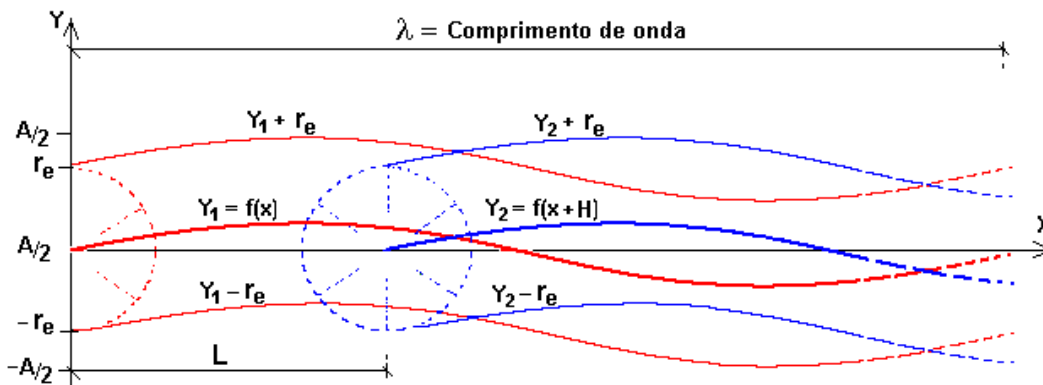


Figura 28 – Equacionamento da sobreposição de trajetos de polimento entre politrizes adjacentes

Uma vez que o tempo necessário para se completar um ciclo de oscilação é, por definição, $T=1/f$, o comprimento de onda λ pode ser obtido por:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (28)$$

Esta equação é válida para todas politrizes e, com base na Figura 28, a seguinte equação geral pode ser escrita:

$$Y_i = \frac{A}{2} \text{sen} \left[\frac{X + (i-1) \cdot L}{\lambda} \cdot 2\pi \right] \quad (29)$$

Onde i , pertencente ao conjunto dos números inteiros, representa o número da politriz, e L , conforme visto, representa a distância entre duas politrizes adjacentes, variando geralmente entre 54 e 58 cm.

Considerando a sensibilidade da função acima, o efeito da cinemática adotada na sobreposição de trajetos de politrizes adjacentes torna-se muito menos óbvio em relação ao uso de politrizes simples, especialmente por meio de tentativa e erro. O resultado de seis condições cinemáticas diferentes é mostrado na Figura 29a-f. Deve-se ressaltar que as primeiras politrizes de uma seqüência com mesma granulometria abrasiva, encontram uma superfície menos trabalhada que as politrizes subseqüentes e, portanto, requerem trocas mais freqüentes de seus blocos abrasivos.

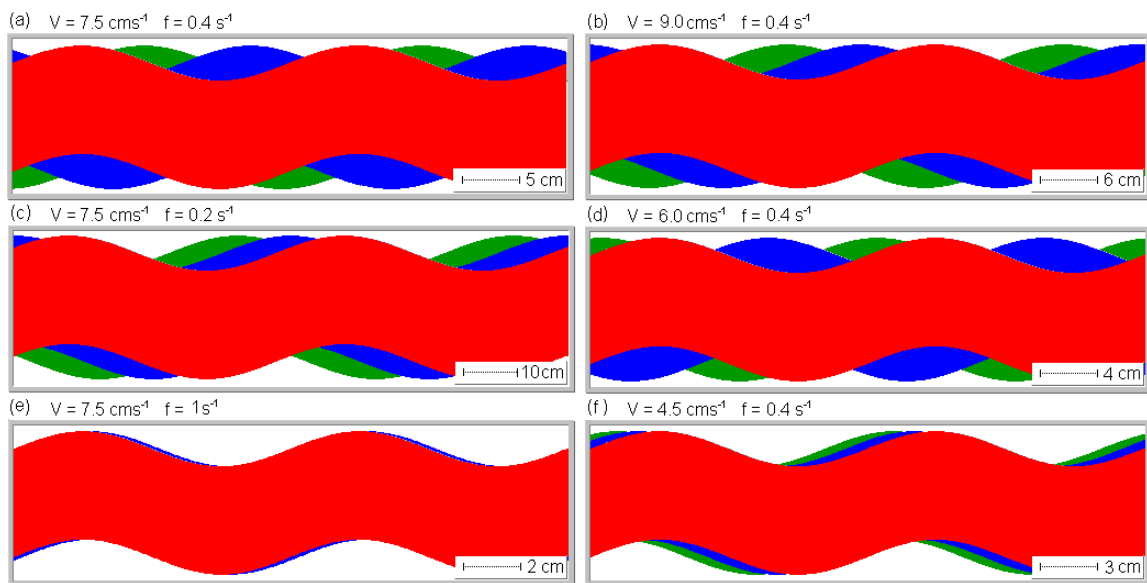


Figura 29 – Padrões de sobreposição de trajeto de polimento para diversas condições cinemáticas

Como pode ser visto na Figura 29a, a condição de polimento tipicamente adotada na literatura (Hutchings, 2004; Hutchings, 2005a), isto é, $V = 7,5 \text{ cm s}^{-1}$ e $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$, cobre bem toda a superfície das peças. Porém, fazendo-se em seguida uma comparação com a Figura 29e, nota-se que o resultado final do polimento pode ser prejudicado mediante um

aumento da frequência de oscilação lateral, mesmo quando se espera uma melhor uniformização dos riscos gerados individualmente por cada politriz. Isto devido ao polimento final levar em conta todas as politizes da linha de produção.

Da mesma maneira, e ainda um tanto contra-intuitivo, uma redução na velocidade da esteira pode também vir a prejudicar a qualidade do polimento final. Uma comparação entre as figuras 29b e 29f revela que um melhor cobrimento superficial pode ser atingido adotando-se uma velocidade de polimento duas vezes maior, como no caso da Figura 29b. Neste caso além de um polimento mais uniforme espera-se ainda o dobro de produtividade da linha de produção.

Embora os gráficos fornecidos pela Figura 29 possam permitir uma avaliação satisfatória quanto à sobreposição dos trajetos de polimento, foi admitida certa simplificação na obtenção da área de alcance máxima a ser coberta por cada politriz. Esta área total não é precisamente obtida pela simples translação de curvas paralelas ao trajeto central da politriz, a uma distância $\pm R$. Neste caso, a área achuriada na Figura 30 seria simplesmente desconsiderada.

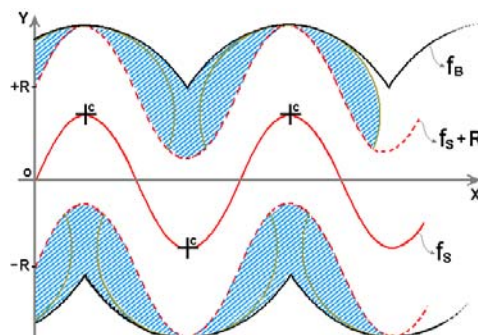


Figura 30 – Limites de alcance dos abrasivos após a passagem de uma politriz

Assim, outra função f_B , correspondente à borda da área polida conforme mostra a Figura 30, deve ser obtida a fim de se quantificar corretamente a área de cobertura de cada politriz. Um método de obtenção de f_B encontra-se detalhado no tópico a seguir.

4.4 OBTENÇÃO DO LIMITE DE ALCANCE DA POLITRIZ

A Figura 31 apresenta três pontos (t_1 , t_2 e t_3) pertencentes à mesma função f_B em três tempos distintos. Uma nova função f_C foi incluída na figura a fim de representar o círculo de alcance da politriz, definido pelo raio externo do disco abrasivo. O círculo possui um centro C que por sua vez descreve a função f_S . Como visto na figura, os pontos t_1 , t_2 e t_3 eram pertencentes, um por vez, ao círculo f_C , enquanto o mesmo esteve centrado nos pontos C_1 , C_2 e C_3 , respectivamente.

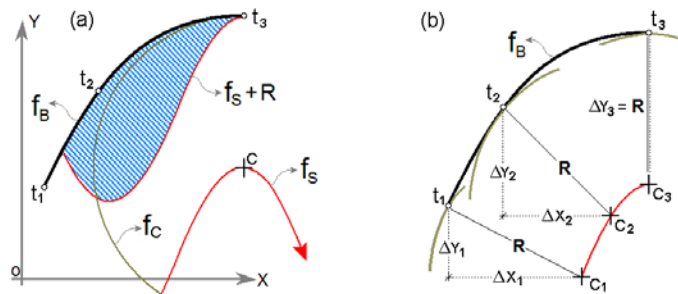


Figura 31 – Relações geométricas entre as funções f_S e f_B

A função f_B desejada pode ser obtida analisando-se as relações geométricas apresentadas na figura acima. Os pontos t_1 , t_2 e t_3 têm coordenadas ΔX e ΔY em relação ao centro do círculo. Entretanto, ambos ΔX e ΔY variam à medida que o círculo se move ao longo de f_S . Deste modo, cada um dos pontos t_1 , t_2 e t_3 tem uma posição diferente no círculo. As variações de ΔX e ΔY por sua vez podem ser determinadas com base na Figura 32.

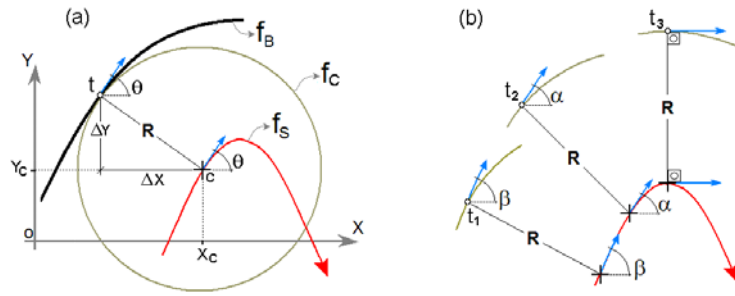


Figura 32 – Relações geométricas entre f_s e f_c

De acordo com a Figura 32, a função f_B pode ser escrita como:

$$f_{B(x)} = Y_C \pm \Delta Y \quad (30)$$

Segue-se ainda, a partir da Figura 32, que:

$$f_B(X_C \pm \Delta X) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(X_C \pm \Delta X)\right) \pm \sqrt{R^2 - \Delta X^2} \quad (31)$$

Considerando-se o movimento do centro C da poliriz em uma dada direção, intui-se que o alcance máximo do disco abrasivo deve ocorrer em um ponto pertencente ao círculo cuja inclinação é a mesma desempenhada pelo ponto C naquele instante. Em outras palavras, a inclinação instantânea da função f_s no ponto X_C deve ser igual à da função f_c no ponto $X_C \pm \Delta X$.

Assim, a equivalência entre inclinações instantâneas implica na igualdade abaixo:

$$f'_s(X_C) = f'_c \quad (32)$$

A função f_c pode ser escrita como:

$$f_c = \pm \sqrt{R^2 - (X - X_C)^2} \quad (33)$$

Cujo domínio é dado por $\{X; X_C - R \leq X \leq X_C + R\}$ e cuja inclinação instantânea em um ponto arbitrário, isto é sua derivada em relação a X, é:

$$f'_c = \pm \frac{(X - X_c)}{\sqrt{R^2 - (X - X_c)^2}} \quad (34)$$

A inclinação instantânea da função f_s no ponto X_c foi designada por K , cujo valor é dado por:

$$K = f'_s(X_c) = \frac{A\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} X_c\right) \quad (35)$$

Além disso, na equação 34 o termo $(X - X_c)$ pode ser substituído por ΔX , tal que:

$$\frac{A\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} (X_c)\right) = \mp \frac{(\Delta X)}{\sqrt{R^2 - (\Delta X)^2}} \quad (36)$$

Ao se isolar ΔX tem-se:

$$\Delta X = \pm \frac{K \cdot R}{\sqrt{K^2 + 1}} \quad (37)$$

Que é, de fato, a incógnita necessária para a obtenção da função f_B por meio da equação 34. Por fim tem-se a expressão:

$$f_B(X_c \pm \Delta X) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} (X_c)\right) \mp R \sqrt{\frac{1}{K^2 + 1}} \quad (38)$$

Em vista do sinal a ser adotado para o último termo, a função f_B pode ser subdividida em duas: f_{NB} e f_{UB} , as quais correspondem, respectivamente, as bordas superior e inferior da superfície total a ser polida pela politriz.

$$f_{\text{NB}}(X_c - \Delta X) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} (X_c)\right) + R \sqrt{\frac{1}{K^2 + 1}} \quad (39)$$

$$f_{\text{UB}}(X_c + \Delta X) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} (X_c)\right) - R \sqrt{\frac{1}{K^2 + 1}} \quad (40)$$

Vale salientar que o termo em raiz quadrada presente nas equações acima é responsável pela diferença de área destacada na Figura 30, via achúria. A ausência desse fator multiplicativo reduziria ambas as equações a igualdade $f_B = f_S \pm R$, o que representa a determinação da área polida pelo simples traçado de curvas paralelas a f_S a uma distância R .

Devido ao fator K , definido anteriormente pela equação, a importância de tal fator multiplicativo torna-se menor à medida que a amplitude da oscilação lateral diminui, ou à medida que o comprimento de onda λ é aumentado.

O gráfico da Figura 33 ilustra o trajeto a ser percorrido pelo disco abrasivo juntamente com as duas funções f_{UB} e f_{nB} correspondentes, as quais representam, respectivamente, os limites externos inferior e superior da região total polida. Adotou-se um raio externo $R=23$ cm e um raio interno $r=11$ cm. Vale ressaltar que para o raio interno r são obtidas as funções correspondentes aos limites internos inferior e superior, dentro dos quais o processo de polimento é momentaneamente interrompido devido a falta de abrasivo no centro da politriz. Os demais parâmetros cinemáticos adotados foram: $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $A = 12 \text{ cm}$ e $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$.

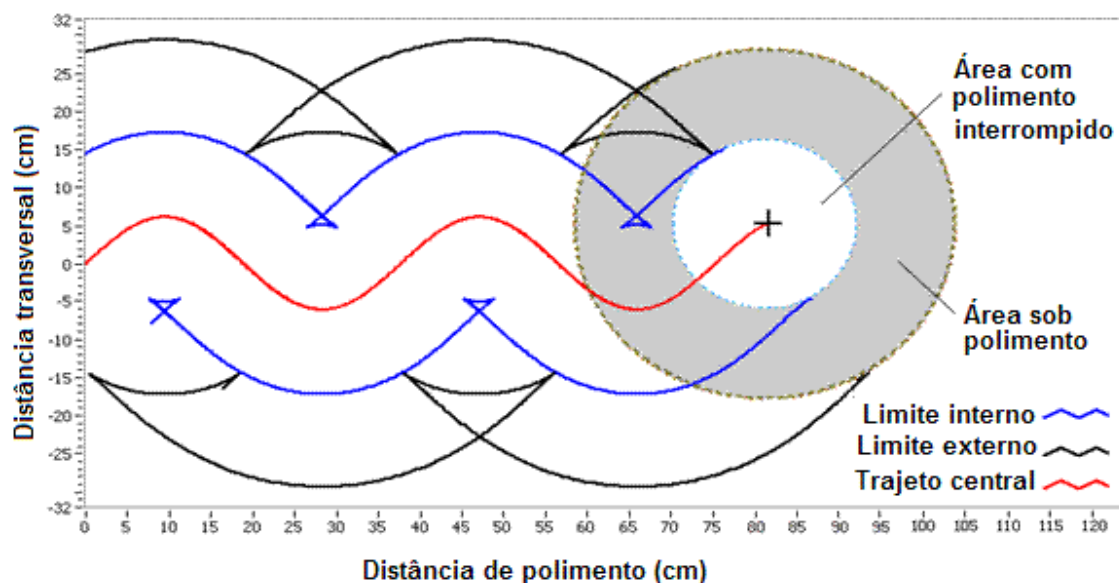


Figura 33 – Trajeto de polimento e respectivos limites de alcance dos abrasivos

As diversas regiões observadas, ao longo da superfície da placa, obtidas com base no alcance do bloco abrasivo, fornecem uma idéia qualitativa da distribuição do tempo de polimento ao se levar em conta o movimento de oscilação lateral.

Para o caso específico de $f=0$, isto é, no caso de uma politriz simples, podem ser encontradas estimativas quantitativas do tempo em que determinada área da placa permanece sob ação abrasiva. Entretanto, ao se incluir o uso de oscilação lateral, essa estimativa ainda não foi encontrada na literatura. A importância do tempo de polimento na definição do brilho final do porcelanato, contudo, foi evidenciada pelos estudos de Hutchings et al (Hutchings, 2004; Hutchings, 2005a).

Assim, um possível método de obtenção do tempo de polimento previsto para cada região superficial foi então elaborado com base nas equações até então desenvolvidas, e pode ser acompanhado em detalhes no tópico a seguir.

4.5 OBTENÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO EFETIVO DE POLIMENTO

Seja $P (X_P; Y_P)$ um ponto arbitrário da superfície a ser polida. As coordenadas P são relativas ao ponto O , admitido como origem absoluta da linha de polimento. O caminho a ser percorrido por uma politriz inicialmente centrada em O é apresentado na Figura 34a. Trata-se de uma nova função de onda, aqui denominada de f_S .

O ponto P e centro C da politriz estão em movimento relativo entre si, de modo que ao se admitir o movimento do ponto P , tem-se como resultado o trajeto f_P , apresentado na Figura 34b. Vale notar que a função f_P pode ser obtida diretamente por meio de um incremento de Y_P e um atraso de fase X_P na função f_S .

As coordenadas X_P e Y_P são referentes à origem da linha de polimento, ou seja, o ponto O , enquanto X_C e Y_C possuem origem no ponto P . Ambas coordenadas são relacionadas entre si por $(X_C; Y_C) = (-X_P; -Y_P)$. Os limites de polimento interno e externo foram representados pelas funções círculo f_{CI} e f_{CE} , respectivamente.

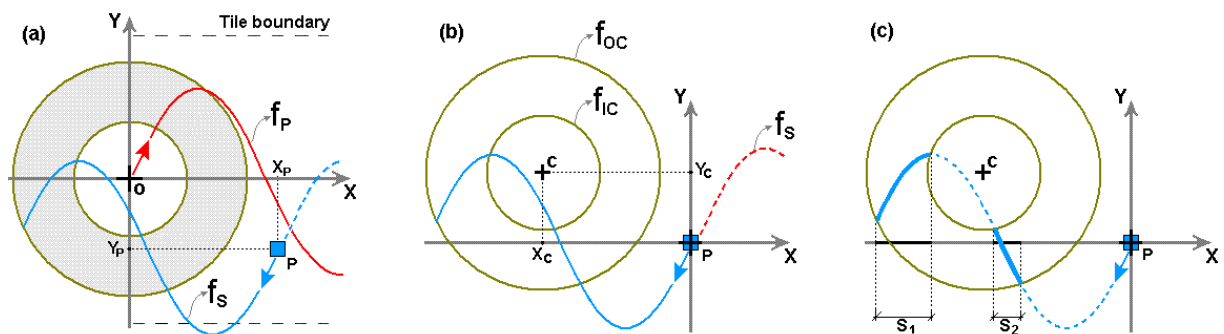


Figura 34 – (a) Movimento relativo entre um ponto P na superfície e a origem da linha de polimento. (b) Destaque para o trajeto de P (c). Destaque do trajeto sobre contato abrasivo

A Figura 34c destaca em linha grossa contínua os trechos do trajeto percorrido por P , onde ocorre de fato a ação dos blocos abrasivos. Uma vez que os componentes S_1 e S_2 têm a mesma direção da linha de polimento, o tempo de polimento efetivo acumulado pelo

ponto P equivale ao tempo necessário para a linha de polimento percorrer a distancia $S_T = \sum S_i$. Esta distância, designada como distância de polimento efetivo do ponto P, depende da coordenada de P ($X_P; Y_P$), assim como de todos os demais parâmetros de polimento detalhados anteriormente.

Vale lembrar que o tempo total em que o Ponto P permanece no interior do círculo interno (f_{CI}) refere-se a duração da interrupção do polimento, devendo portanto ser subtraído do tempo total em que P permanece no círculo externo (f_{CE}). Por conveniência, serão apresentadas a seguir apenas as equações envolvendo o círculo externo, ou seja, utilizando o raio R. Para o caso do raio interno, tem-se um raciocínio análogo.

Como primeira tentativa, a distância S_T poderia ser obtida a partir dos pontos de intersecção entre a função onda f_P e a função círculo f_{CI} e f_{CE} . Tais pontos são obtidos tomando-se a $f_{CE} = f_S$, onde:

$$f_{OC}(X) = Y_C \pm \sqrt{R^2 - (X - X_C)^2} \quad (41)$$

$$f_S(X) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} X\right) \quad (42)$$

Entretanto, a igualdade entre as equações acima conduz a uma equação transcendental, o que torna inviável a obtenção de soluções algébricas comum. Assim, decidiu-se por adotar outra estratégia, onde a obtenção exata dos pontos de intersecção não se faz necessária.

A princípio, dependendo da cinemática adotada e da posição do ponto P, podem ser obtidos inúmeros pontos de intersecção entre f_{OC} e f_S , correspondendo a passagem do ponto P inúmeras vezes pelos limites da região de polimento. Entretanto, focando-se o interesse apenas no tempo acumulado de permanência no interior da região de polimento,

a distância efetiva de polimento S_T pode ser diretamente obtida com o auxílio de diagramas de área.

Conforme exemplificado na Figura 35, uma pequena variação ΔY_C acarreta uma variação ΔA na área entre f_{OC} e f_S . Nota-se que esta variação de área é proporcional a distância S . À medida que ΔY_C tende a zero, a razão $\Delta A/\Delta Y_C$ se aproxima de S . Em outras palavras, pode-se obter S_T diretamente a partir da taxa de variação da área entre as funções f_{OC} e f_S em relação à Y_C .

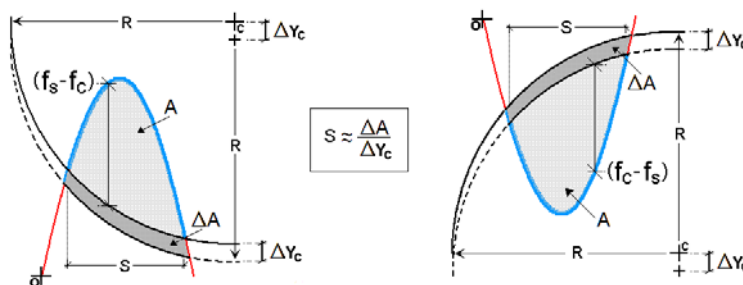


Figura 35 – Obtenção de S_T por meio de variação de área entre curvas

Nota-se na figura que ΔA deve ser obtida adotando-se $(f_S - f_C)$ ou $(f_C - f_S)$, para valores positivos e negativos de Y_C , respectivamente, a fim de manter o mesmo sinal resultante. A área entre as funções f_{OC} e f_S foi designada de A_{IntOC} ou A_{IntIC} , conforme o uso do raio interno ou externo,

O balanço de área esquematizado na Figura 36 exemplifica a obtenção de uma área interna arbitrária, admitindo-se $Y_C > 0$.

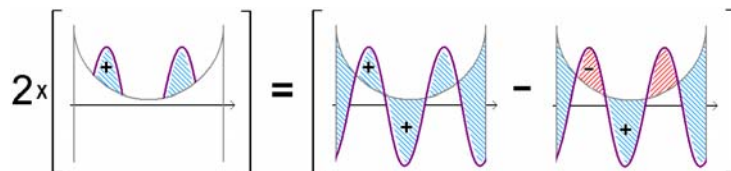


Figura 36 – Determinação da área comum entre as funções f_S e f_{OC}

O balanço de área acima pode ser matematicamente expresso pelas equações 42 e 43. A função f_c encontra-se subdividida em, f_{OCU} e $f_{OC\cap}$, representativos das bordas inferior e superior do círculo.

$$2A_{IntOC} = \int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OCU}| dx - \int_{Xc-R}^{Xc+R} (f_s - f_{OCU}) dx ; \text{ se } Y_C \geq 0 \quad (42)$$

$$2A_{IntOC} = \int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OC\cap}| dx - \int_{Xc-R}^{Xc+R} (f_{OC\cap} - f_s) dx ; \text{ se } Y_C < 0 \quad (43)$$

Em uma forma mais compacta:

$$2A_{IntOC} = \int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OC}| dx \pm A_{f.s} \mp A_{f_{oc}} \quad (44)$$

Onde $A_{f_{oc}}$ é a área do semicírculo de raio R, a ser dada por:

$$A_{f_{ocU}} = 2Y_C R - \frac{\pi R^2}{2} ; \text{ para } Y_C \geq 0 \quad (45)$$

$$A_{f_{oc\cap}} = 2Y_C R + \frac{\pi R^2}{2} ; \text{ para } Y_C < 0 \quad (46)$$

O valor da área A_{f_s} , por sua vez, é dado por:

$$A_{f_s} = \int_{Xc-R}^{Xc+R} f_s dx = \int_{Xc-R}^{Xc+R} \left[\frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} X\right) \right] dX \quad (47)$$

Ou ainda:

$$A_{f_s} = \frac{A\lambda}{4\pi} \left[\cos\left(2\pi \frac{(X_C - R)}{\lambda}\right) - \cos\left(2\pi \frac{(X_C + R)}{\lambda}\right) \right] \quad (48)$$

Finalmente, a área A_{IntOC} pode então ser escrita como:

$$A_{\text{IntOC}} = \int_{X_c-R}^{X_c+R} |f_s - f_{\text{OCU}}| \frac{dx}{2} - Y_c R + \frac{\pi R^2}{4} - \frac{A\lambda}{8\pi} \left[\cos\left(2\pi \frac{(X_c+R)}{\lambda}\right) - \cos\left(2\pi \frac{(X_c-R)}{\lambda}\right) \right] \quad (49)$$

se $Y_c \geq 0$

ou

$$A_{\text{IntOC}} = \int_{X_c-R}^{X_c+R} |f_s - f_{\text{OCN}}| \frac{dx}{2} + Y_c R + \frac{\pi R^2}{4} + \frac{A\lambda}{8\pi} \left[\cos\left(2\pi \frac{(X_c+R)}{\lambda}\right) - \cos\left(2\pi \frac{(X_c-R)}{\lambda}\right) \right] \quad (50)$$

se $Y_c < 0$

A integral do termo $|f_s - f_{\text{OC}}|$, presente na equação acima não pôde ser reduzida, e foi mantida na forma simbólica.

Conforme exposto anteriormente, a distância efetiva de polimento, S_T , para um ponto arbitrário sobre a superfície a ser polida, pode ser obtido pela Equação 51. Nota-se que a equação já considera o tempo perdido pelas interrupções de polimento sofridas pelo ponto.

$$S_T = \frac{dA_{\text{IntOC}}}{dY_c} - \frac{dA_{\text{IntIC}}}{dY_c} \quad (51)$$

De uma forma mais detalhada tem-se que:

$$S_T = \frac{d}{dY_c} \left[\int_{X_c-R}^{X_c+R} |f_s - f_{\text{OCU}}| \frac{dx}{2} \right] - \frac{d}{dY_c} \left[\int_{X_c-r}^{X_c+r} |f_s - f_{\text{ICU}}| \frac{dx}{2} \right] - (R-r); \text{ se } Y_c \geq 0 \quad (52)$$

$$S_T = \frac{d}{dY_c} \left[\int_{X_c-R}^{X_c+R} |f_s - f_{\text{OCN}}| \frac{dx}{2} \right] - \frac{d}{dY_c} \left[\int_{X_c-r}^{X_c+r} |f_s - f_{\text{ICN}}| \frac{dx}{2} \right] + (R-r); \text{ se } Y_c < 0 \quad (53)$$

Entretanto, ao ser definido o sinal de Y_c , apenas uma das duas metades do círculo são computadas nas equações acima. As distâncias tracejadas das figuras 37a e 37b não são computadas nas equações. Deste modo, a fim de evitar erros tal como o indicado por ε na

mesma figura, essas equações necessitam ainda de um termo complementar a ser definido a seguir.

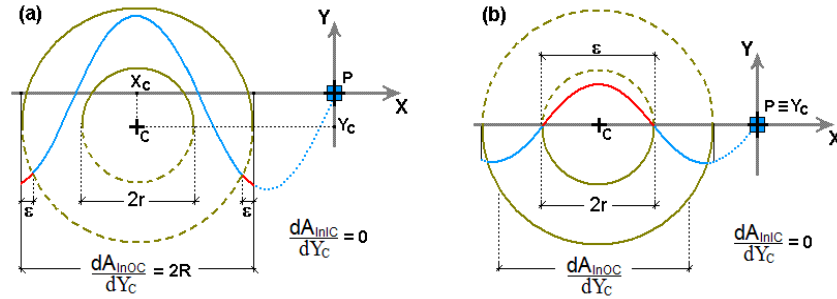


Figura 37 – Erros resultantes do uso de apenas um hemisfério da função círculo

Ao contrário de S_T , o erro é obtido considerando-se a área externa das funções f_s e f_{OC} , designadas por A_{ExtOC} . Assim, considerando-se um balanço de área similar ao da Figura 36, tem-se:

$$2A_{ExtOC} = \int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OC\cap}| dx - \int_{Xc-R}^{Xc+R} (f_{OC\cap} - f_s) dx ; \text{ se } Y_c \geq 0 \quad (54)$$

$$2A_{IntOC} = \int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OC\cup}| dx - \int_{Xc-R}^{Xc+R} (f_s - f_{OC\cup}) dx ; \text{ se } Y_c < 0 \quad (55)$$

O erro ε pode ser então obtido por:

$$\varepsilon = \frac{dA_{ExtOC}}{dY_c} + \frac{dA_{ExtIC}}{dY_c} \quad (56)$$

Ou ainda:

$$\varepsilon = \frac{d}{dY_c} \left[\int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OC\cap}| \frac{dx}{2} \right] + \frac{d}{dY_c} \left[\int_{Xc-r}^{Xc+r} |f_s - f_{IC\cap}| \frac{dx}{2} \right] - (R - r); \text{ se } Y_c \geq 0 \quad (57)$$

$$\varepsilon = \frac{d}{dY_c} \left[\int_{Xc-R}^{Xc+R} |f_s - f_{OC\cup}| \frac{dx}{2} \right] + \frac{d}{dY_c} \left[\int_{Xc-r}^{Xc+r} |f_s - f_{IC\cup}| \frac{dx}{2} \right] + (R - r); \text{ se } Y_c < 0 \quad (58)$$

A distância efetiva de polimento S_T pode finalmente ser escrita por meio das seguintes equações:

$$S_T = \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_s - f_{OCU} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_s - f_{ICU} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_s - f_{OCN} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] + \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_s - f_{ICN} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] + (R-r); \text{ se } Y_C \geq 0 \quad (59)$$

e

$$S_T = \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_s - f_{OCN} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_s - f_{ICN} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_s - f_{OCU} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] + \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_s - f_{ICU} \left| \frac{dx}{2} \right. \right] - (R-r); \text{ se } Y_C < 0 \quad (60)$$

Uma vez determinado S_T , o tempo efetivo de polimento E_{PT} para um ponto P arbitrário pode ser obtido considerando-se a velocidade da esteira durante o polimento, tal que:

$$E_{PT} (X_P, Y_P) = \frac{S_T}{V} \quad (61)$$

Os perfis de polimento obtidos considerando algumas condições típicas de polimento encontram-se nas figuras da seção subsequente. Vale lembrar que tais figuras limitam-se ao resultado de apenas uma politriz.

4.6 SIMULAÇÕES

Diferentes condições de polimento foram introduzidas as equações 59 e 60, a fim de se obter os respectivos valores de tempo efetivo de polimento para cada um dos diversos pontos da superfície da peça cerâmica. O domínio admitido para o ponto P foi limitado à superfície correspondente a três placas cerâmicas dispostas em seqüência, e polidas pela

condição padrão. Para efeito de simulação, excepcionalmente, cada placa foi representada por uma malha de 24 linhas por 36 colunas, obtendo-se então 864 retângulos idênticos, de 1,75 cm x 1,25 cm cada, distribuídos ao longo da superfície de cada placa.

Fez-se ainda uma verificação da simulação proposta por meio da comparação entre valores simulados e medidos diretamente em programa tipo CAD (*Computer Aiding Design*), para dez pontos aleatoriamente selecionados. O traçado das funções pertinentes bem como a medição de S_T foi realizado utilizando-se AutoCAD® versão R14, e podem ser vistos na Figura 38.

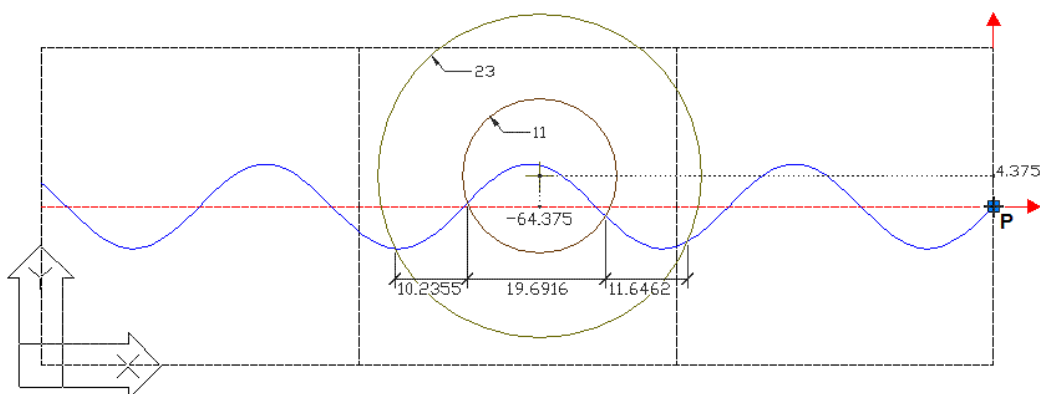


Figura 38 – Medidas de S_T com o auxílio de AutoCAD®

O resultado geral da verificação encontra-se na Tabela 1. Notam-se pequenas diferenças entre os valores simulados e de referência, como indicado na última coluna da tabela. A média dos erros devidos à simulação foi de 0,32 %, com um desvio padrão associado de 0,47 %, sendo ambos atribuíveis ao processo de integração numérica adotado na simulação.

Tabela 1 – Comparação entre os resultados de S_T simulados e medidos por CAD

Coordenada dos pontos		S_T via CAD (cm)	S_T simulado (cm)	Erro (%)
X_P (cm)	Y_P (cm)			

64,375	-4,375	21,88	21,87	0,05
106,875	-18,375	22,13	22,09	0,19
43,125	-2,625	26,25	26,10	0,57
49,375	16,625	22,06	22,12	-0,25
95,625	11,375	35,03	35,28	-0,71
26,875	-6,125	20,94	20,96	-0,10
76,875	-2,625	28,06	28,08	-0,08
69,375	9,625	42,25	41,82	1,03
29,375	20,125	19,90	19,88	0,09
66,875	0,875	23,49	23,51	-0,09

Uma vez feita a verificação do modelo proposto, os resultados simulados foram apresentados na forma de gráfico de superfície. Para tanto, seis diferentes condições de polimento foram consideradas: $V = 2,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, com $f = 0,2, 0,4 \text{ e } 0,6 \text{ s}^{-1}$, e ainda $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, adotando-se $f = 0,4, 0,6 \text{ s}^{-1}$ e sem oscilação lateral. Estes parâmetros cinemáticos implicam respectivamente nos seguintes comprimentos de onda λ : 12,5; 6,25; 4,17 cm, e 18,75; 12,5 cm e, no caso de não haver oscilação lateral, λ tende a infinito.

A Figura 39 apresenta o tempo efetivo de polimento, E_{PT} , adotando-se a mesma condição de polimento usada na verificação acima. Para uma melhor compreensão dos demais gráficos, nesta primeira simulação o gráfico de superfície foi apresentado tanto na forma de vista superior como em perspectiva. Ainda, os limites de polimento foram incluídos na figura.

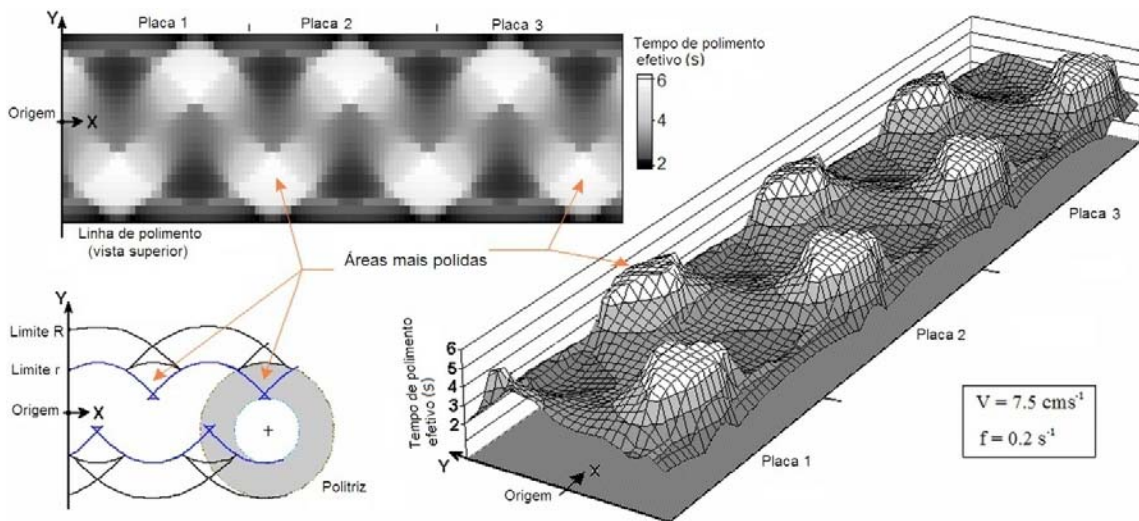


Figura 39 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $V = 7,5 \text{ cm s}^{-1}$ e $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$

Nota-se no gráfico que as regiões com maior duração de polimento ocorrem ao longo de um trajeto semelhante ao percorrido pelo centro da politriz, sendo, porém, defasado de meia onda em relação ao mesmo. Por outro lado, a região com menor duração de polimento acompanha de fato o trajeto central da politriz. Isto se deve ao fato de a duração da interrupção do polimento ser máxima nesse trajeto.

Assim, um padrão de ziguezague pode ser observado, semelhante ao apresentado na Figura 17, obtido pela ação de um único abrasivo. Em termos quantitativos, nota-se com base na escala da figura, que para as condições de polimento adotadas, algumas regiões na superfície da peça são polidas durante um tempo até três vezes maior do que outras, considerando-se a passagem da peça por uma única politriz.

Nota-se ainda na Figura 39 a existência de variações abruptas de E_{PT} . Tais variações ocorrem principalmente nas vizinhanças dos limites interno e externo de polimento, conforme esperado. Vale ressaltar a concordância obtida entre esses limites e os gráficos simulados, uma vez que as respectivas equações foram desenvolvidas independentemente.

A distribuição de E_{PT} prevista para uma politriz simples, isto é, para $f=0$, é apresentada na Figura 40. Nota-se um perfil constante de E_{PT} , compatível com o fornecido pela literatura (Hutchings, 2005a; Cantavella, 2006). Tal resultado contrasta com o padrão obtido admitindo-se $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$, incluído na mesma figura. A velocidade da esteira, em ambos os casos, é o valor padrão, isto é, $7,5 \text{ cm s}^{-1}$.

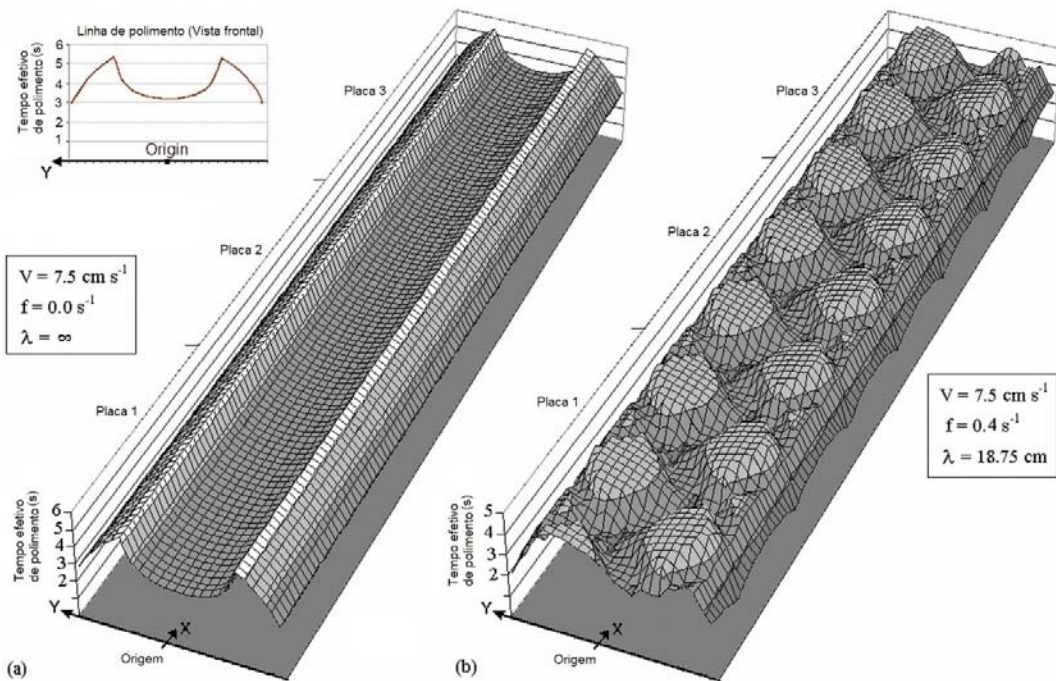


Figura 40 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $V= 7,5 \text{ cm s}^{-1}$. (a) $f = 0,0 \text{ s}^{-1}$, (b) $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$

Na seqüência, os mesmos valores de freqüência de oscilação lateral foram simulados considerando, no entanto, $V= 2,5 \text{ cm s}^{-1}$. Os resultados encontram-se na Figura 41.

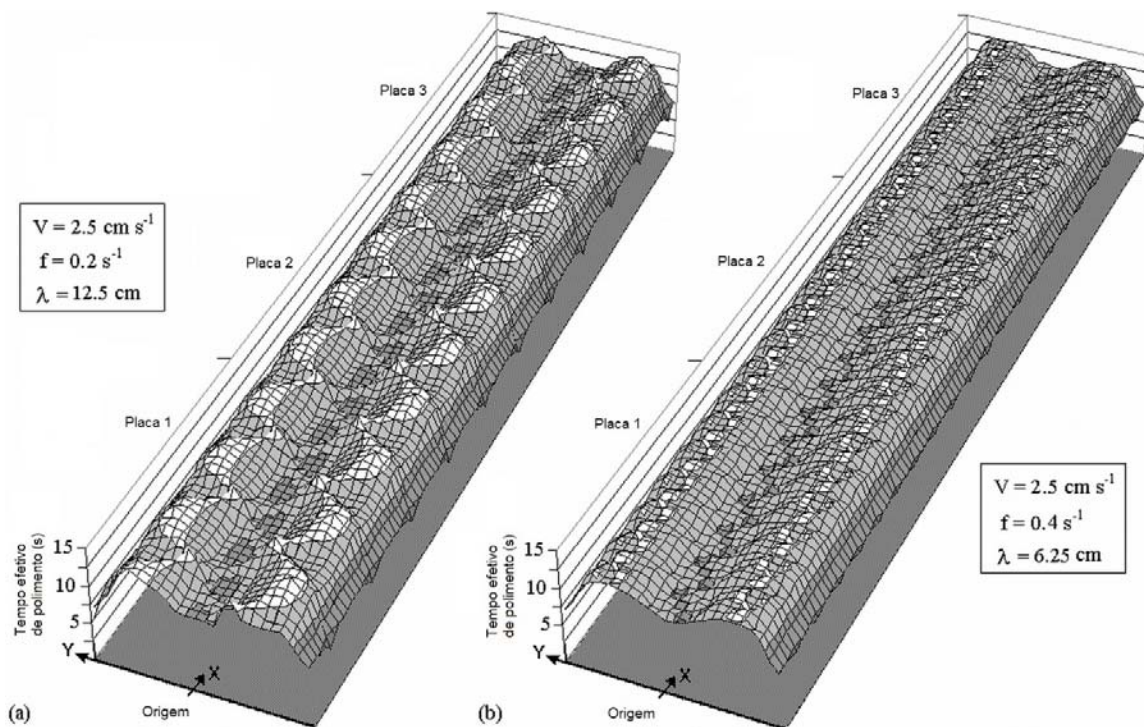


Figura 41 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $V = 2,5 \text{ cm s}^{-1}$. (a) $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, (b) $f = 0,4 \text{ s}^{-1}$

Além da grande diferença de escala com relação às figuras anteriores, consequência direta da redução de V , pode-se observar uma melhora na uniformidade da distribuição de E_{PT} à medida que λ (V/f) torna-se menor. Esta tendência pode ser vista ainda nos resultados para $f = 0,6 \text{ s}^{-1}$, apresentados na Figura 42 a seguir.

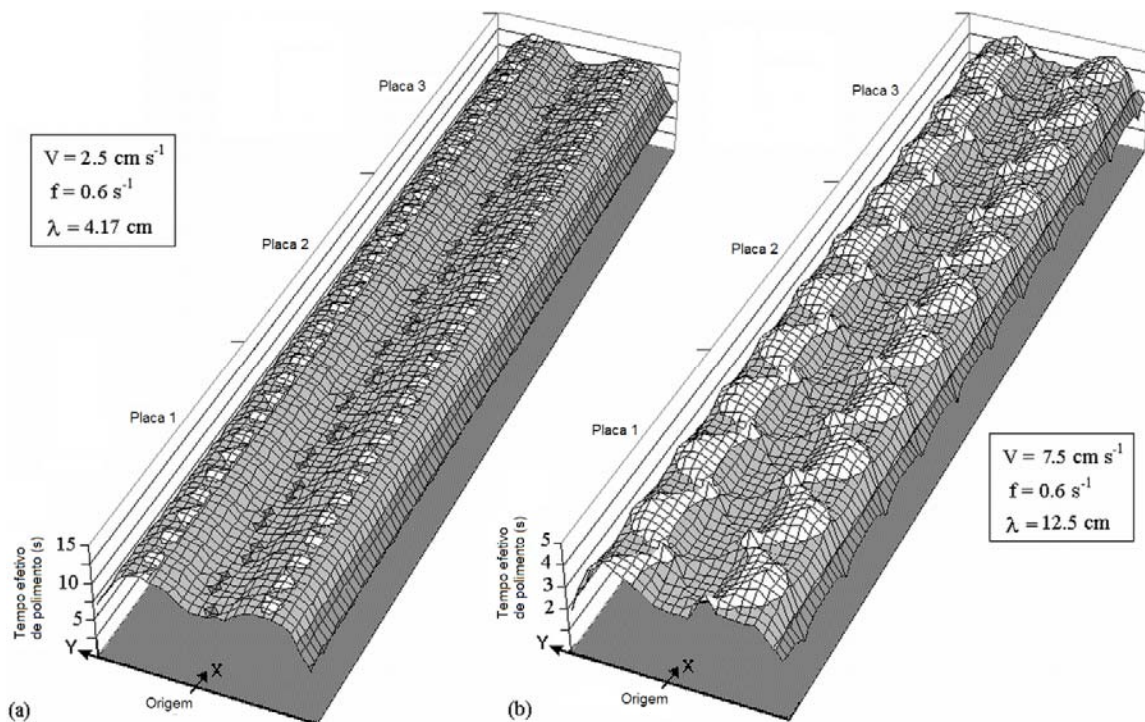


Figura 42 – Distribuição superficial de E_{PT} considerando $f=0,6 \text{ s}^{-1}$. (a) $V=2,5 \text{ cm s}^{-1}$, (b) $V=7,5 \text{ cm s}^{-1}$

Com a redução de λ , de 6,25 para 4,17 cm, observou-se ainda uma pequena melhora na distribuição de E_{PT} . Além disso, uma comparação entre as Figura 41a e 42b confirma a obtenção do mesmo padrão de distribuição de E_{PT} para diferentes condições cinemáticas de polimento cuja razão V/f permanece a mesma.

Vale ressaltar que, para determinada região superficial, um maior tempo de polimento efetivo representa um maior número de passagens de abrasivos por sobre a mesma. Estas sucessivas passagens abrasivas causam riscos e sulcos, os quais promovem de fato as alterações superficiais desejadas.

No presente caso, entende-se por passagem abrasiva cada passagem de qualquer um dos seis blocos abrasivos que compõe cada politriz, sobre qualquer uma das diversas regiões discretizadas por meio dos pixels. Assim, o número de passagens abrasivas, ou

simplesmente número de contatos abrasivos N_{CA} , pode ser estimado com base no tempo de polimento efetivo, de acordo com a equação:

$$N_{CA} = 3 \cdot W \cdot \frac{E_{PT}(X_P, Y_P)}{2\pi}$$

Que por fim representa a distribuição do número acumulado de contatos abrasivos ao longo das diversas regiões na superfície das placas.

Conforme visto, o método desenvolvido acima permite a obtenção da distribuição do tempo efetivo de polimento ao longo da superfície de placas cerâmicas sujeitas a uma dada condição de polimento durante certo tempo t . Contudo, trata-se de essencialmente um resultado final, uma vez que o comportamento da distribuição de E_{PT} em instantes anteriores ao tempo t não pode ser acessado.

Contudo, o acesso a esses resultados intermediários faz-se necessário para fins de visualização do modo como a distribuição de E_{PT} evolui durante o polimento, permitindo-se com isso uma melhor compreensão do processo.

Com este objetivo foi desenvolvido um algoritmo computacional, no qual a distribuição do número de contatos abrasivos prevista pela equação acima é obtido diretamente, e a cada instante, baseado na simples contagem de contatos abrasivos. Nesse algoritmo as posições dos blocos abrasivos são calculadas a cada instante e, para cada região da placa com coordenadas coincidentes a de um abrasivo, é adicionado uma unidade de contagem.

Para a execução do algoritmo de contagem foi concebido um programa em ambiente LabVIEW®. Assim como para as simulações anteriores, adotou-se um gráfico em escala de cinzas para a representação da contagem do número de contatos abrasivos nas diversas regiões da placa. Desta vez, contudo, pôde-se acompanhar o processo de alteração da cor de cada pixel ao longo do tempo, representado o ganho gradual de

contatos abrasivos durante o polimento. A Figura 43 apresenta a interface do programa concebido.



Figura 43 – Interface do programa desenvolvido

O gráfico central representa um trecho da linha de polimento, e podem ser vistas cinco figuras semelhantes a asteriscos, paradas, e igualmente espaçadas entre si. Cada “asterisco” representa uma politriz, e os seis respectivos traços em tom de cinza correspondem aos blocos abrasivos. A idéia geral deste gráfico é mostrar como cada região da linha de polimento vai adquirindo contatos abrasivos no decorrer do processo.

Tal como ocorre em uma situação real, após iniciado o polimento, os blocos abrasivos das politrizes começam a percorrer a superfície das placas sobre a linha de produção, desenvolvendo o movimento pré-estabelecido pelos parâmetros cinemáticos adotados. Esses parâmetros constituem as variáveis de entrada do programa, a serem inseridas nos campos indicados na parte superior da interface apresentada, seja por meio de digitação direta, ou pelo acionamento de “botões de rádio”. O mesmo gráfico central acima pode ser visto na Figura 44, após serem simulados cerca de dois segundos de ação abrasiva, sob a condição cinemática padrão ($\lambda = 18,75$ cm), e admitindo 54,5 cm de distância entre politrizes adjacentes.

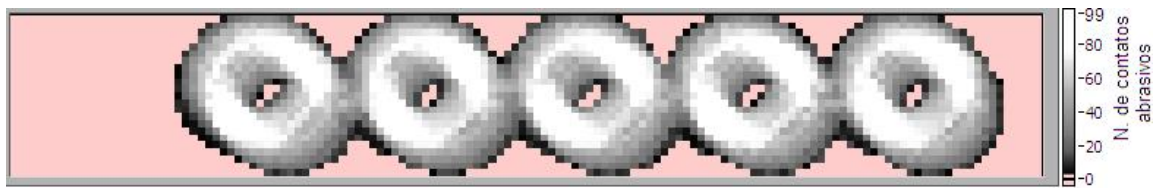


Figura 44 – Simulação após dois segundos de polimento sob condições padrões

Nota-se que durante este tempo algumas regiões acumulam mais de 90 contatos abrasivos, enquanto outras, situadas tanto na borda interna quanto externa do disco abrasivo, aproximam-se aos poucos dos primeiros vinte contatos abrasivos. A continuidade do processo pode ser vista na seqüência de Figuras 45 e 46, onde são apresentados os números de contatos abrasivos adquiridos após quatro e seis segundos de polimento, respectivamente.



Figura 45 – Simulação após quatro segundos de polimento sob condições padrões



Figura 46 – Simulação após seis segundos de polimento sob condições padrões

Passados seis segundos de polimento podem ser vistos padrões muito semelhantes ao obtido para a distribuição de tempo de polimento apresentado na Figura 39, onde foi admitida a atuação de uma única politriz. Tal fato resulta da sobreposição quase total dos trajetos abrasivos, uma vez que a distância admitida entre politrizes é muito próximo a um múltiplo inteiro de ($L/\lambda = 2,91$).

Uma comparação mais apropriada para fins de verificação do algoritmo concebido pode ser feita entre as duas regiões destacadas na Figura 47. Ambos os padrões apresentados representam a ação de uma única politriz. O padrão apresentado à esquerda refere-se, conforme visto anteriormente na Figura 39, a uma simulação via modelo analítico, enquanto o padrão da direita fornece os resultados fornecidos pelo algoritmo de contagem. Neste caso, contudo, adotou-se um tamanho de pixel de 1,25 cm x 1,75 cm, resultando em uma resolução aproximadamente duas vezes maior que a das simulações recém apresentadas acima.

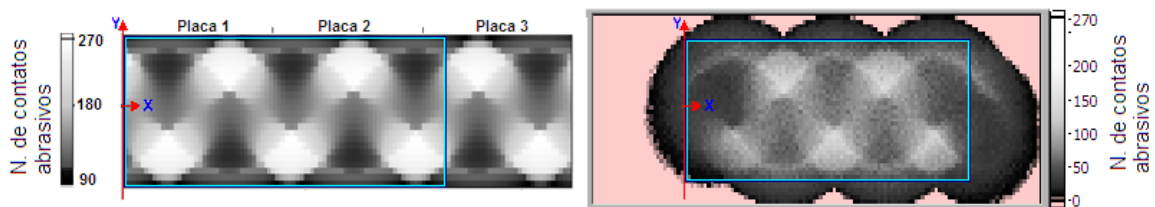


Figura 47 – Comparação entre resultados analíticos e obtidos pelo algoritmo de contagem

Além da quantidade, outro fator importante a ser analisado é o modo como os sucessivos contatos abrasivos tendem a ocorrer em cada região. Assim, depois de conferida a adequação do algoritmo de contagem, um novo algoritmo foi desenvolvido e incluído ao programa. Este algoritmo visa fornecer o valor médio e o desvio padrão dos parâmetros microcinemáticos após ocorridos todos contatos abrasivos previstos para cada pixel da superfície da placa.

Os resultados quanto ao raio de curvatura ρ podem ser vistos nos gráficos da Figura 48a e 48b. Neste caso, a intensidade de cor representa, respectivamente, a média aritmética e o desvio padrão dos valores de ρ fornecidos por todos os contatos abrasivos estabelecidos durante o polimento.

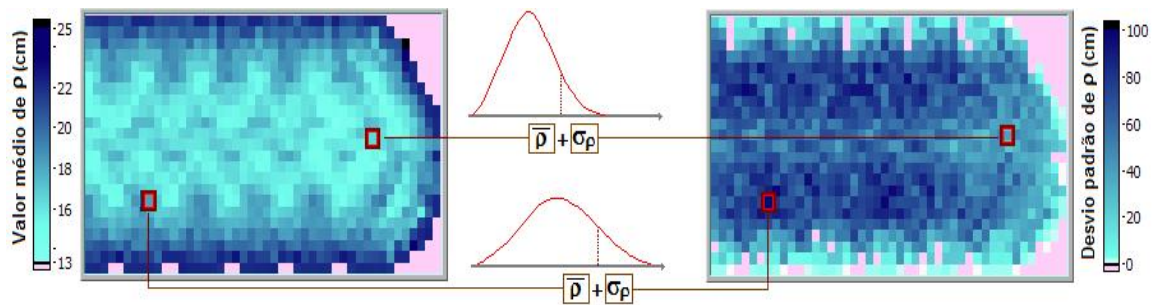


Figura 48 – Distribuição espacial do valor médio (a) e do desvio padrão (b) do raio de curvatura ρ

As dimensões do disco abrasivo ($R = 23 \text{ cm}$ e $r = 11 \text{ cm}$) sugerem um raio médio de exatos 17 cm para ρ . De fato, o valor estimado computando-se todos os contatos abrasivos foi de $17,58 \text{ cm}$. Esta ligeira diferença resulta da contribuição das demais fontes de movimento dos abrasivos, leia-se oscilação lateral e avanço da esteira de produção.

No gráfico da Figura 48b, referente ao desvio padrão do raio de curvatura, são observadas duas faixas mais escuras separadas por uma região central ligeiramente mais clara. Isto pode ser explicado considerando-se a geometria do disco abrasivo e a amplitude da oscilação lateral. Este último, tomado como 12 cm , coincide com a diferença entre raio externo e interno do disco abrasivo. ($23 \text{ cm} - 11 \text{ cm}$). O que impede os abrasivos mais externos de alcançarem a região mais central da placa.

A Figura 49 apresenta as estimativas de média e desvio padrão dos valores de velocidade de riscamento coletados a partir dos contatos abrasivos. O valor médio de velocidade de riscamento obtido foi de $827,88 \text{ cm s}^{-1}$. Este valor, conforme esperado, é ligeiramente maior do que o valor de 801 cm s^{-1} , previsto exclusivamente a partir a rotação do disco abrasivo, e para o raio médio de 17 cm .

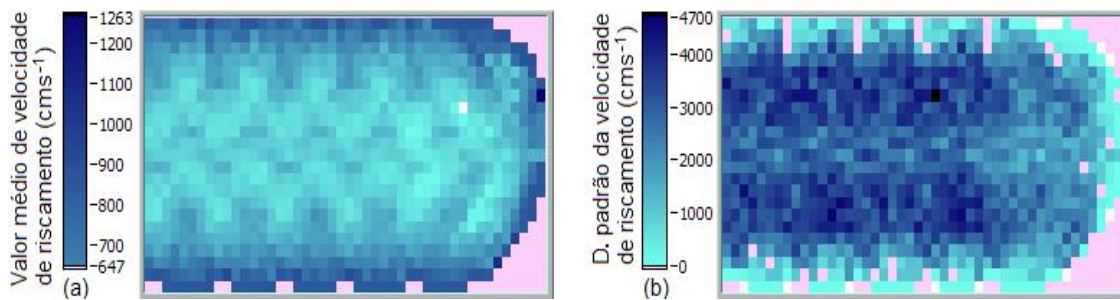


Figura 49 – Distribuição espacial do valor médio (a) e do desvio padrão (b) da velocidade de riscamento

A semelhança observada entre os padrões de curvatura e de velocidade de riscamento resulta da contribuição preponderante da rotação do disco abrasivo na velocidade do abrasivo. O riscamento proveniente de abrasivos mais afastados do centro de rotação possui inerentemente um maior raio de curvatura, e simultaneamente, esses são os mesmos abrasivos a adquirirem maiores velocidades de riscamento, devido ao movimento de rotação.

Vale ressaltar os altos valores de desvio padrão observados, tanto nos resultados de raio de curvatura quanto de velocidade de riscamento. Tal fato revela a ocorrência de grande variabilidade presente na seqüência de contatos abrasivos experimentados por uma mesma região.

Essa variabilidade desempenha um papel fundamental na atuação de outro parâmetro microcinemático de interesse: o ângulo de riscamento. Regiões com pequena dispersão de ângulo de riscamento tendem a manifestar uma textura superficial preferencial, devido à predominância de riscos em uma mesma direção.

Além disso, durante as fases de polimento com preponderância de comportamento frágil do material superficial, correspondendo tipicamente a granulometrias abaixo de $d_{50} = 17,3 \mu\text{m}$ (#400) (Huang, 2002; Hutchings, 2005a), grandes dispersões de ângulo de riscamento representam solicitações mais abruptas nas bordas deixadas pelo riscamento anterior, de

modo que maiores alterações superficiais podem ser esperadas. As médias e os desvios padrões de ângulo de riscamento estimados para o mesmo caso anterior podem ser vistos na Figura 50.

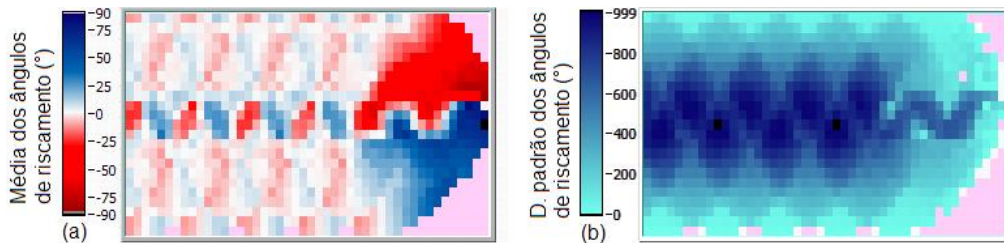


Figura 50 – Distribuição espacial do valor médio (a) e do desvio padrão (b) do ângulo de riscamento

A média geral obtida no caso do ângulo de riscamento foi zero. Contudo, a figura revela que em determinadas regiões, distribuídas ao longo de toda a superfície, o riscamento tende a ocorrer em certas direções preferenciais. Esta tendência é mais evidente na região central da placa, onde se forma um padrão de ziguezague com direções de riscamento alternantes. Conforme esperado, no padrão resultante a distância horizontal entre regiões de mesmo sinal coincide com o comprimento de onda do trajeto central da politriz, que é de $\lambda = 18,75$.

Além da sobreposição de riscos com diferentes ângulos de riscamento, porém causados por um mesmo disco abrasivo, analisou-se ainda a sobreposição de riscos provenientes de politrizes adjacentes. A diferença entre os valores médios de ângulo de riscamento obtidos para cada politriz encontra-se na Figura 51. Entretanto, neste caso, foram admitidas duas situações distintas, de acordo com a macrocinemática atuante: interferência destrutiva total e interferência parcial para um atraso de fase de $\pi/4$. Vale lembrar que uma interferência construtiva completa resultaria em valores nulos ao longo de todo o gráfico.

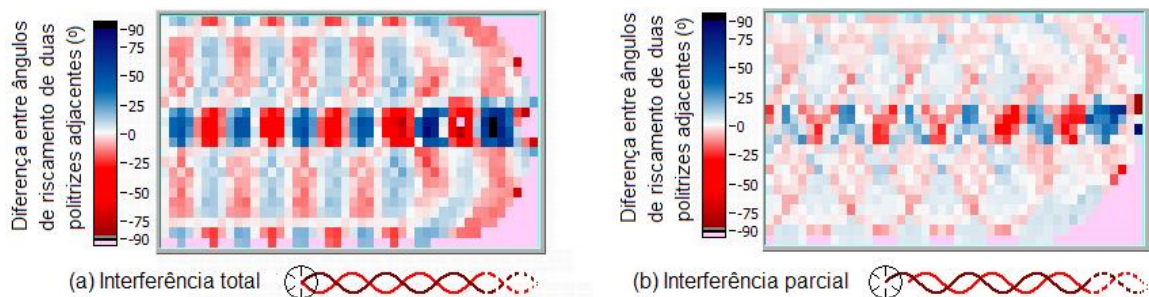


Figura 51 – Distribuição espacial do valor médio da diferença de ângulo de riscamento entre politrizes adjacentes, com interferência destrutiva total (a), e com $\pi/4$ de defasagem de fases (b)

O resultado acima revela que além de uma melhor cobertura superficial das placas ao longo da linha de produção, a interferência destrutiva tende a aumentar o ângulo de intersecção entre riscos provenientes de politrizes adjacentes.

Por fim, o programa desenvolvido foi aperfeiçoado de modo a tentar simular o próprio ganho de brilho durante polimento. Uma versão teste do programa aperfeiçoado foi fornecida às empresas colaboradoras deste estudo, *Cerâmica Portobello S.A.* e *Ceusa Ltda*, sob o nome de Polibem Versão 1.0. Os detalhes sobre a elaboração deste programa foram reunidos em um manual de utilização, sendo o mesmo incluído no pacote de instalação fornecido às empresas. Uma cópia desse manual pode ser vista no Anexo 1 do presente trabalho.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As verificações teóricas apresentadas anteriormente foram então complementadas com a obtenção de resultados experimentais. Para tanto, primeiramente foram obtidos valores de brilho medidos ao longo da superfície de três placas de porcelanato: 1a, 2a e 3a, polidas em seqüência. Os resultados estão apresentados na Figura 52. Os parâmetros cinemáticos adotados foram $V=12 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $A=19 \text{ cm}$ e $f = 0,33 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda= 36 \text{ cm}$). Vale lembrar que cada região apresentada como pixel na figura corresponde a uma área real na superfície das placas, e localizada na mesma posição.

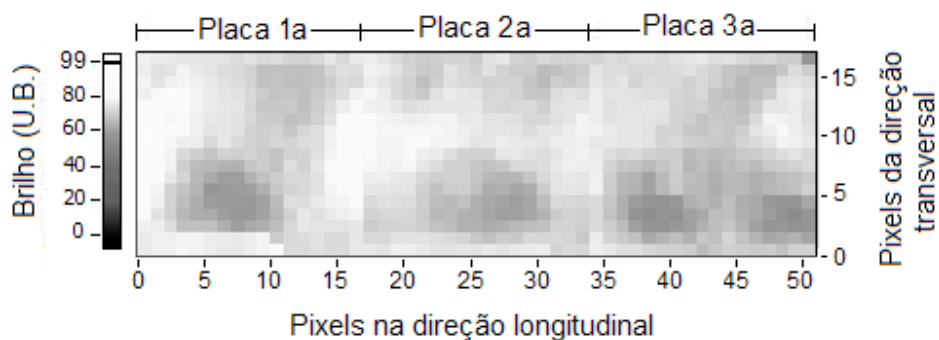


Figura 52 – Valores de brilho medidos ao longo da superfície de três porcelanatos adjacentes

Nota-se um bom contraste nas regiões próximas aos limites entre uma placa e outra, talvez em função de um possível empenamento das mesmas. De fato, a ocorrência de pequenos empenamentos nas placas de porcelanatos a ponto de afetar o comportamento das mesmas durante o polimento já foi relatada na literatura (Cantavella, 2004; Cantavella, 2006).

Quanto ao conjunto das três placas, um padrão de ziguezague grosseiro pode ser de fato observado na distribuição do brilho medido, atribuível a cinemática adotada. Contudo, a Figura 52 revelou ainda uma significativa assimetria quanto aos resultados de brilho,

incompatível com qualquer trajeto de polimento. Tomando-se uma vista transversal ao sentido de polimento, nota-se uma predominância de brilho no lado esquerdo em relação à superfície polida. O mesmo tipo de assimetria pode ser visto em alguns resultados experimentais de politrizes simples (Wiggers, 2007) e modernas (Cantavella, 2004; Cantavella, 2006) fornecidos pela literatura.

Wiggers et al (Wiggers, 2007) relatam a ocorrência de medidas assimétricas de remoção de material superficial já na etapa de calibração, atribuindo tal fato a um possível erro de alinhamento dos rolos calibradores.

Outra possível explicação para a ocorrência desse erro sistemático seria a presença de um pequeno erro de horizontalidade no mecanismo de apoio das placas cerâmicas. Neste caso seria ainda razoável supor que tal assimetria tende a ocorrer mais facilmente em linhas de politrizes modernas, em virtude das solicitações mecânicas excêntricas e alternantes provenientes do movimento de oscilação lateral.

A assimetria do padrão de brilho obtido, bem como as variações longitudinais de brilho que ocorrem na direção longitudinal das placas podem ser avaliadas com o auxílio das Figuras 53a e 53b. Nestas figuras são traçados os valores médios de brilho obtidos para cada coluna e linha de pixels, respectivamente. A quantificação da assimetria de brilho obtida pode ser vista na Figura 53b.

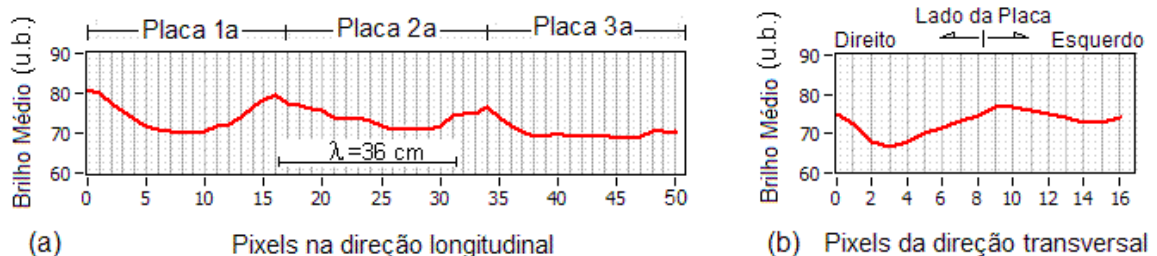


Figura 53 – Valores médios de brilho obtidos para cada coluna (a) e linha (b) de pixels

A Figura 53a sugere certa periodicidade nos valores médios de brilho ao longo da direção do polimento. Esta periodicidade, porém, coincide com a posição das bordas de cada placa, de modo que pode ser atribuída ao mesmo empenamento mencionado anteriormente.

Entretanto, conforme visto na figura, o valor de $\lambda = 36$ cm adotado é um tanto semelhante à dimensão da placa. Assim visando isolar um possível efeito da cinemática na periodicidade sugerida pela Figura 53a, foram calculados valores médios para cada linha e coluna da distribuição de E_{PT} correspondente, por sua vez simulado analiticamente. Os gráficos resultantes encontram-se na Figura 54, respectivamente rebatidos.

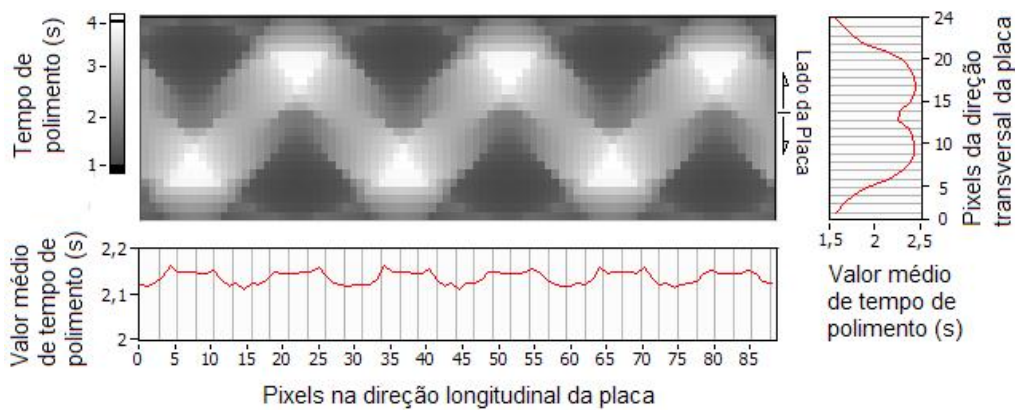


Figura 54 – Distribuição de E_{PT} prevista analiticamente admitindo-se $V=12 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $A=19 \text{ cm}$ e $f = 0,33 \text{ s}^{-1}$, e respectivos valores médios obtidos para cada coluna e cada linha do gráfico

A grosso modo, alguma semelhança pode ser vislumbrada entre ambos padrões superficiais obtidos. Entretanto, tal semelhança não se aplica às médias longitudinais e transversais das placas. A periodicidade prevista para as médias longitudinais ocorre de modo quase imperceptível, conforme indicado na escala correspondente (de 2 à 2,2 segundos). Faixas de variações ainda mais estreitas foram obtidas para cinemáticas com λ menores. Disto se conclui que as variações nas médias longitudinais registradas para o

brilho não podem ter como causa a cinemática adotada. A causa mais provável admitida permanece sendo um suficiente empenamento das placas.

Três novas coletas foram feitas, em dias e condições de polimento distintas, visando estimar a variabilidade das distribuições de brilho fornecidas por um mesmo tipo de produto, uma mesma linha de produção, e tentando-se manter uma mesma condição de polimento. Houve, contudo, pequenas diferenças a citar: Dia 1, $V= 5,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,3 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=18,3 \text{ cm}$), Dia 2, $V= 6,0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,3 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=19,8 \text{ cm}$) e Dia 3, $V= 6,0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,34 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=19,3 \text{ cm}$). Para cada dia foi coletada uma seqüência de quatro placas.

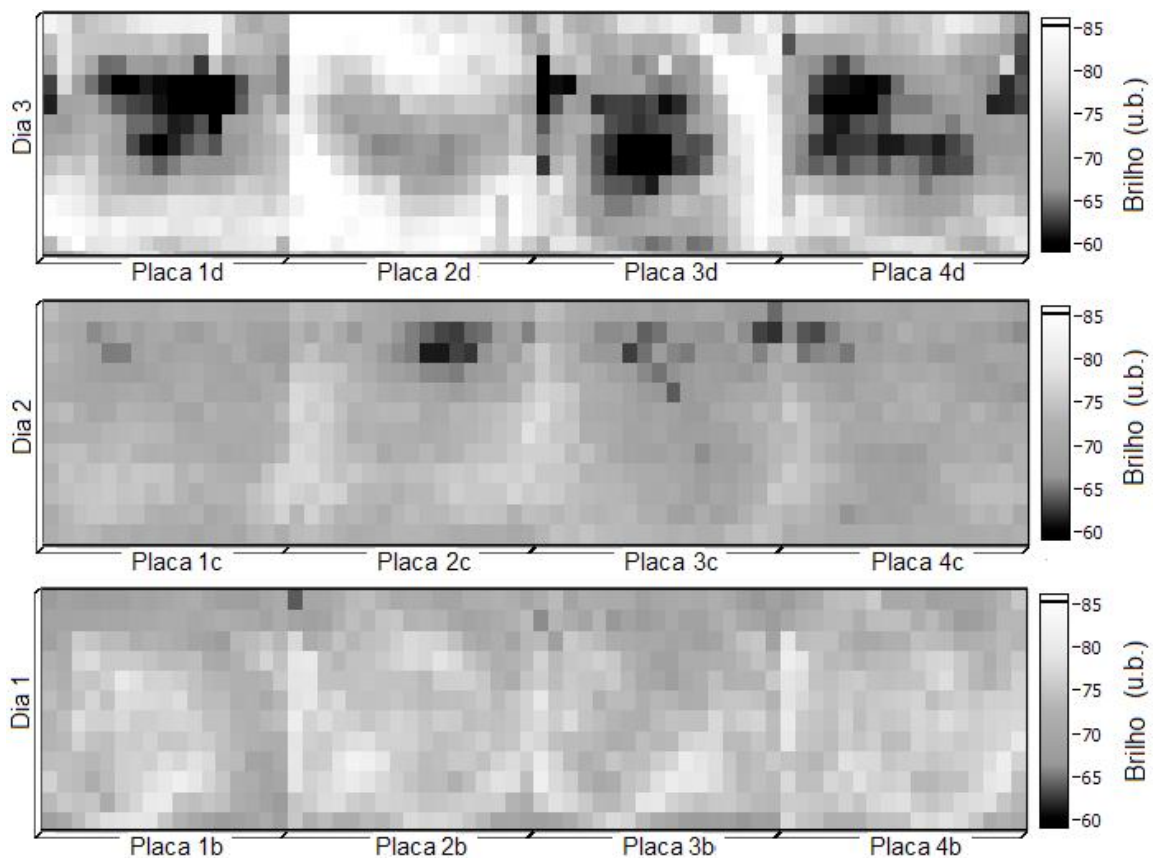


Figura 55 – Distribuições de brilho obtidas em diferentes dias e diferentes condições de polimento. Dia 1: $V= 5,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,3 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=18,3 \text{ cm}$); Dia 2: $V= 6,0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,3 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=19,8 \text{ cm}$); Dia 3: $V= 6,0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e $f= 0,34 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda=19,3 \text{ cm}$)

Uma grande variabilidade entre as distribuições de brilho obtidas pode ser prontamente observada. Contudo, um padrão de zigzague grosseiro é visto em todas as seqüências, sendo mais evidenciado nas placas 1-4d. A ocorrência de assimetria no padrão de brilho final foi novamente verificada nas seqüências de placas 1-4b e 1-4c. Ainda, o limite entre placas manteve-se nitidamente observável em todas as seqüências. A Figura 56 permite a análise do brilho médio obtido ao longo das direções longitudinais e transversais da placa, de modo análogo às Figuras 53 e 54.

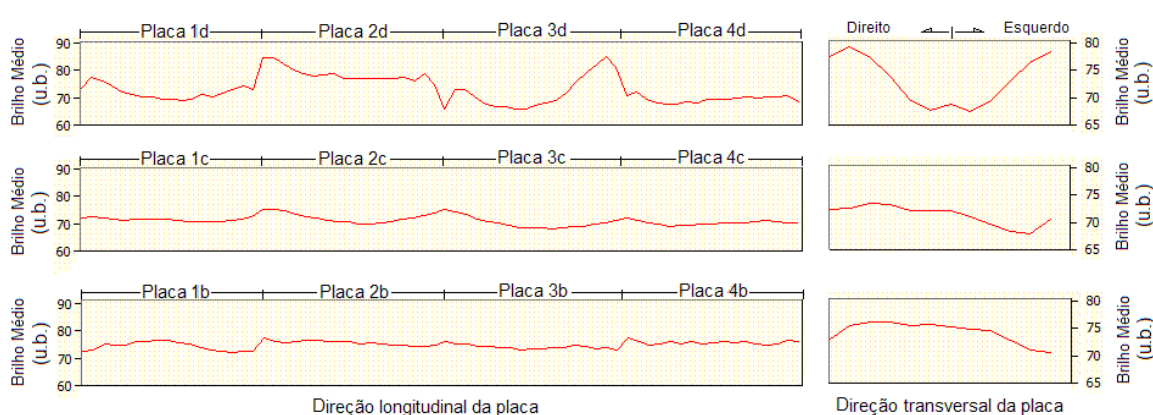


Figura 56 – Valores médios de brilho obtidos para cada coluna (a) e cada linha das placas b, c e d

Os limites entre placas adjacentes de qualquer uma das seqüências podem ser facilmente distinguíveis junto às descontinuidades localizadas nas mesmas posições em todas as seqüências.

Analisando-se as diferenças de brilho entre placas de uma mesma seqüência de polimento, pode-se notar pequenas variações nível de brilho médio entre placas adjacentes nas seqüências de placas 1-4c e 1-4b, não maiores que duas unidade de brilho. Na seqüência de placas 1-4d, contudo, diferenças de mais de cinco unidades de brilho foram obtidas, principalmente entre a placa 2d e as demais. As placas 1-4d

destacam-se ainda pela maior variabilidade de brilho dentro de uma mesma placa. A comparação feita pode ser vista nas Figuras 57a e 57b.

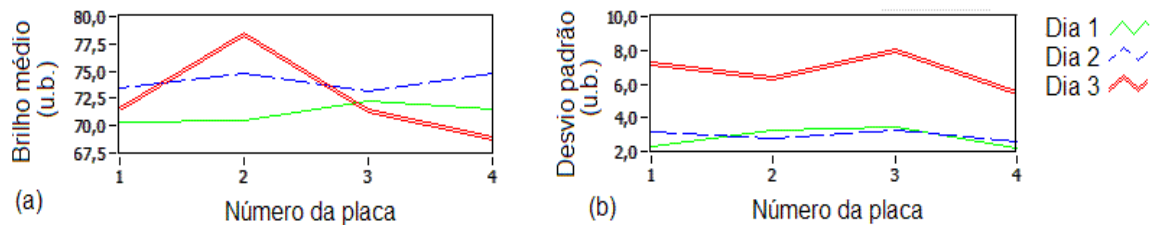


Figura 57 – Brilho médio e desvio padrão calculados para cada placa

Diversos fatores podem explicar a diferença de média obtida entre dias distintos. Hutchings et al (Hutchings, 2006b) registraram a obtenção de diferentes eficiências de polimento apresentados por placas de porcelanatos submetidas a ciclos térmicos com diferentes temperaturas máximas de patamar. Os mesmos autores apontam ainda a larga faixa de tolerância de qualidade dos blocos abrasivos como provável causa de dispersão em resultados provenientes de linhas industriais.

Os coeficientes de variação das distribuições de brilho das seqüências avaliadas acima foram calculados para fins de comparação. Além disso, calcularam-se ainda os coeficientes de variação das distribuições de E_{PT} simuladas anteriormente, visando evidenciar a relação entre a homogeneidade de cada distribuição e a condição cinemática atuante, representada por meio de λ . Todos esses resultados encontram-se reunidos na Figura 58. Vale lembrar que os dados referentes às distribuições de E_{PT} referem-se a ação de apenas uma polítriz atuante.

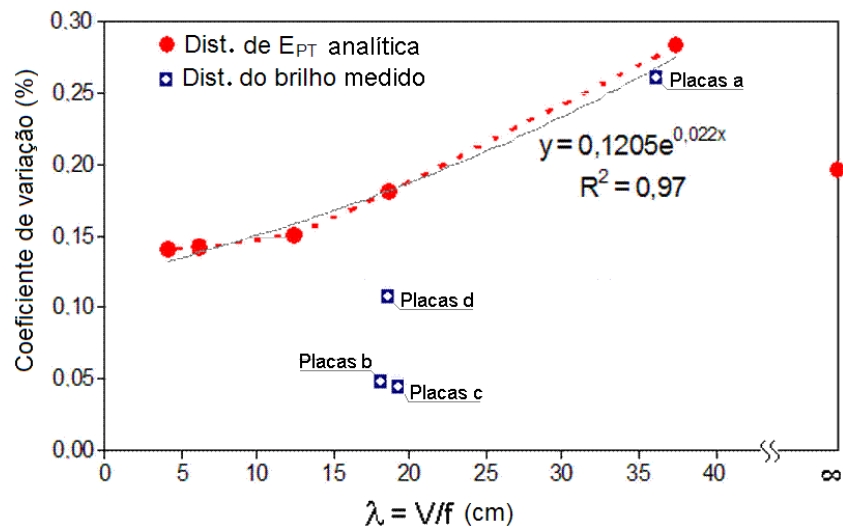


Figura 58 – Coeficiente de variação das diversas distribuições analisadas

No caso das distribuições de brilho medido, apesar de um tanto inconclusivo, o gráfico evidencia o fato de que placas cerâmicas de um mesmo tipo, submetidas a uma mesma distribuição de contato abrasivo, podem apresentar distribuições de brilho distintas. Isto provavelmente em virtude dos diversos fatores não considerados neste trabalho, como qualidade do apoio oferecido pela esteira de polimento, empenamento das placas, qualidade e quantidade da água usada como lubrificante, e os níveis de força normal aplicada, fatores estes tidos como importantes na predição do brilho final da placa (Cantavella, 2004; Cantavella, 2006; Benincá, 2000; Rosso, 2005).

No caso dos resultados simulados analiticamente, os coeficientes de variação relativos às distribuições de E_{PT} , apresentam certa correlação com a cinemática adotada, conforme o esperado. Os pontos correspondentes às condições cinemáticas com $\lambda = 12,5$ cm são de fato coincidentes. Isto confirma o fato de que condições cinemáticas diferentes podem ser equivalentes quanto à distribuição de tempo de polimento, desde que a relação V/f seja mantida. O gráfico confirma ainda a tendência de uniformização da distribuição do tempo efetivo de polimento, à medida que λ decresce.

Deve-se ressaltar que a distribuição de E_{PT} para o caso de politriz simples ($\lambda = \infty$) apresentou uma uniformidade superior a obtida com $\lambda = 37,5$ cm. Tal fato revela que o simples uso do movimento de oscilação lateral não necessariamente implica uma distribuição de tempo de polimento mais uniforme. Portanto, o uso de politriz moderna sem qualquer critério na escolha da cinemática do polimento pode causar, além de uma subutilização de equipamento, resultados ainda piores que aqueles disponíveis em uma politriz simples.

A opção por reduzir λ tende a fornecer distribuições de polimento mais uniforme ao longo da peça. Essa redução requer a diminuição de V ou o aumento de f . No primeiro caso tem-se uma redução direta da produtividade da linha de polimento. Entretanto, o último caso acarreta um consumo energético consideravelmente maior, conforme estimado anteriormente na Figura 25, bem como um comprometimento da vida útil da linha de polimento, devido ao aumento das solicitações mecânicas nos elementos estruturais do equipamento.

Portanto, com o auxílio da Figura 58 pode-se concluir que a melhora de uniformidade na distribuição de E_{PT} obtida por meio da diminuição de λ torna-se muito pouco atrativa a partir de valores inferiores a 12,5 cm. Uma conclusão mais exata exigiria, contudo, mais conhecimentos a respeito das conseqüências do uso de altos valores de freqüência de oscilação lateral na linha de polimento.

Fez-se então uma nova coleta de medidas de brilho em seis placas cerâmicas, polidas em seqüência. Todavia, foram adotados os parâmetros cinemáticos padrões, com exceção da freqüência de oscilação lateral, para a qual foi adotado o valor $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda = 37,5$ cm). Para facilitar a visualização do padrão de brilho obtido, os resultados foram igualmente divididos em dois gráficos de superfície, reunidos na Figura 59. A ordem de polimento de cada placa está indicada na legenda.

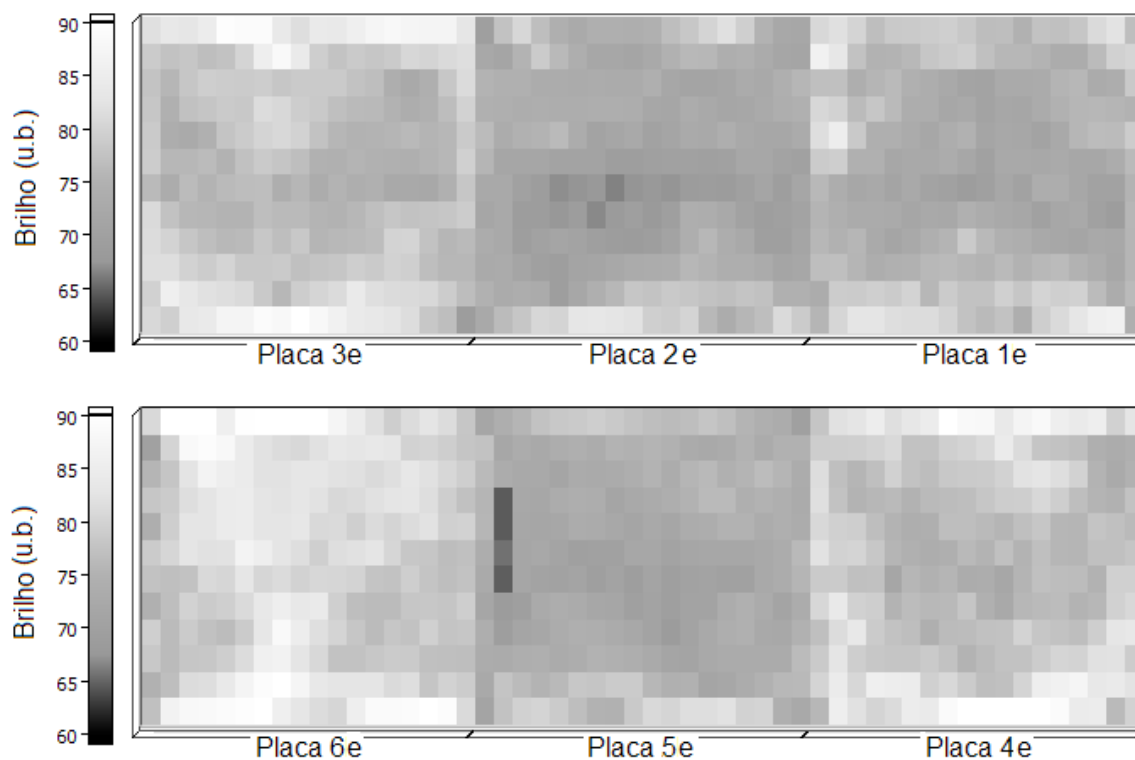


Figura 59 – Distribuição superficial de brilho de seis novos porcelanatos polidos em seqüência

Conforme visto, não foi observada uma nítida predominância sistemática de brilho em qualquer um dos lados da linha de polimento. Contudo, nota-se uma diferença de brilho entre placas, ligeiramente maior que nos casos anteriores. Em concordância, os limites entre placas apresentaram-se mais claramente distinguíveis. Os quatro pixels mais escuros verticalmente alinhados, presentes no lado esquerdo da quinta placa, foram considerados como defeitos pontuais, e portanto excluídos nos cálculos subseqüentes. Os valores médios de brilho obtidos para cada coluna de pixels são fornecidos Figura 60.

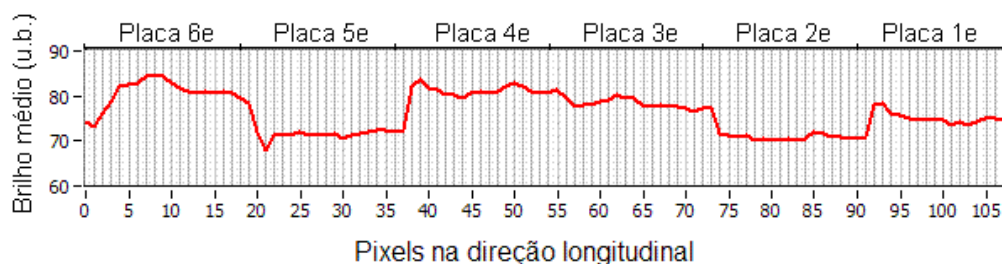


Figura 60 – Valores médios de brilho obtidos para cada coluna das placas 1-6e

As diferenças de brilho obtidas entre placas, ocorridas nas seqüências de placas 1-4d e 1-6e, podem ser explicadas considerando-se as características individuais da placa após o ciclo térmico. Diferenças dimensionais e de densidade são geradas já na conformação das placas, durante a compactação dos grânulos atomizados, e ainda são acentuadas pela existência de gradientes de temperatura no interior do forno.

Conforme visto, a etapa de polimento é precedida por uma etapa de calibração dimensional das placas, causando para tanto a exposição de poros internos (Dondi, 2005) bem como a fragilização da superfície (Wang, 2003; Tucci, 2000; Sánchez, 2002). Considerando-se a rigidez do rebolo diamantado usado na etapa de calibração, placas mais espessas são expostas a penetrações abrasivas mais profundas e severas, as quais causam um maior número de trincas. Assim, uma simples diferença de espessura entre as placas pode resultar em diferenças de porosidade e microestrutura superficial, ambas consideradas propriedades importantes na definição do brilho final da placa (Hutchings, 2005a; Tucci, 2000; Sánchez, 2002).

Além disso, o ganho de brilho está associado à predominância de pequenos riscos dúcteis na superfície (Crichigno Filho, 1994; Huang, 2002). Para isso se faz necessária a eliminação gradual das trincas geradas durante a calibração. Uma vez que uma maior parcela da linha de polimento será destinada a remoção da camada fragilizada (Dondi,

2005; Hutchings, 2006a), é razoável esperar que, dentro de certos limites, placas mais espessas apresentem um resultado de brilho final inferior.

O encaminhamento das placas, após o ciclo térmico, para a esteira da linha de polimento é feito mecanicamente. Esta mecanização, apesar de possibilitar certa sistemática na ordem de entrada das placas na linha de polimento, desconsiderando eventuais rearranjos de placas devido a problemas como quebra, não asseguram que placas com geometria e densidade semelhantes sejam polidas em seqüência.

Do mesmo modo, diferenças de brilho em regiões adjacentes ao longo da superfície de uma mesma placa podem ser decorrentes, dentre outros fatores, de pequenas variações de altura provenientes do próprio relevo da placa, bem como heterogeneidades microestruturais. Foram registradas diferenças de brilho entre pixels adjacentes de até 6% em regiões centrais, e de até 10 % nas vizinhanças mais afastadas do centro da placa.

Retornando ao padrão de brilho apresentado na Figura 60, nota-se novamente a ocorrência de um padrão de ziguezague grosseiro. Tal padrão é mais bem visualizado na Figura 61, que reúne as seis placas analisadas. Uma curva de onda estacionária foi adicionada à figura, correspondendo ao trajeto percorrido pelo centro de uma politriz quando governada pelas mesmas condições cinemáticas adotada durante o polimento ($\lambda = 37,5$ cm, e $A = 12$ cm).

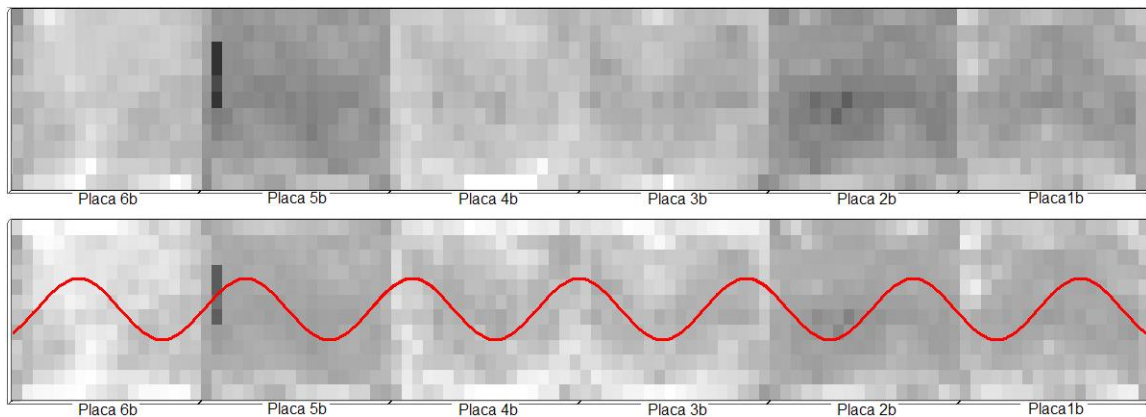


Figura 61 – Distribuição superficial de brilho acompanhando o trajeto de polimento

Desconsiderando-se diferenças de brilho individuais, nota-se a existência de uma boa relação entre a cinemática adotada e a distribuição de brilho resultante. Uma interpretação mais convincente pode ser alcançada por meio da Figura 62. As curvas em vermelho delimitam, de modo simplificado, a região central onde são esperadas interrupções do processo de polimento, devido à inexistência de abrasivo no centro da politriz.

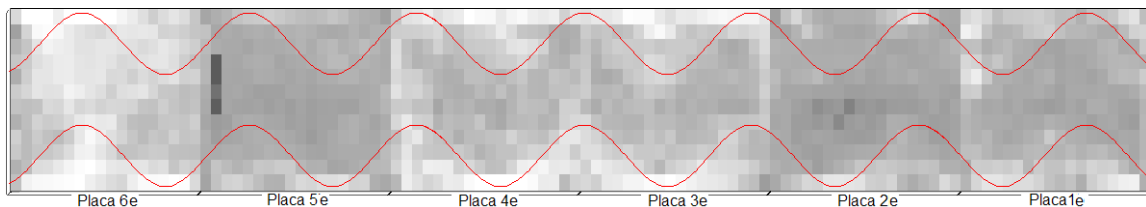


Figura 62 – Delimitação das regiões com polimento interrompido

Em concordância com o previsto nas simulações anteriores, nota-se ainda a obtenção de maiores diferenças de brilho nas proximidades das curvas que limitam regiões com e sem interrupções abrasivas, uma vez que o tempo de polimento aumenta substancialmente nessas regiões.

Na tentativa de explicar o fato recorrente de que as distribuições de brilho resultantes da ação de dezenas de politrizes assemelham-se à distribuição prevista por uma única politriz, foram admitidas algumas hipóteses corroborativas.

A primeira hipótese baseia-se na sobreposição dos trajetos de polimento, previamente detalhado na Figura 28. As trajetórias de três politrizes adjacentes estão apresentadas na Figura 63, todas sob a mesma condição cinemática admitida no polimento das placas 1-6e. A distância entre centros de duas politrizes adjacentes é de 58 cm.

A primeira vista, o significativo atraso de fase entre os trajetos descartaria a possibilidade do padrão de brilho registrado ter sido decorrente de uma interferência construtiva da atuação das diferentes politrizes.

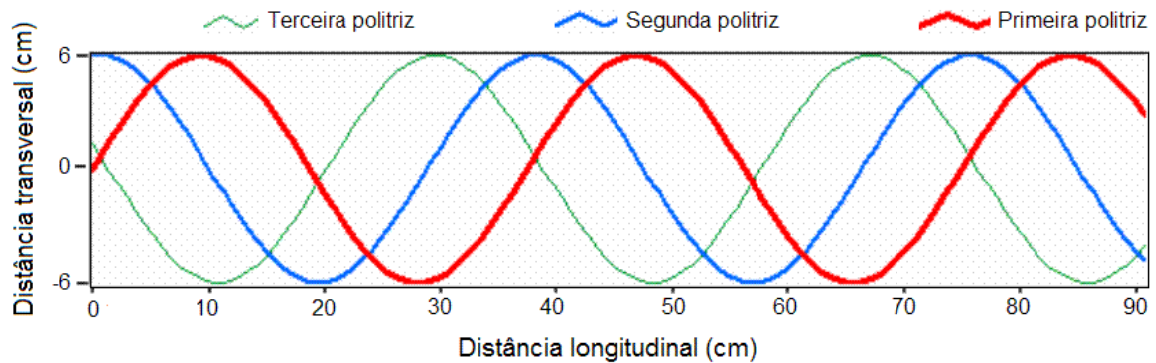


Figura 63 – Trajetos centrais de três politrizes adjacentes considerando $V = 7,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $A = 12 \text{ cm}$ e de 58 cm de espaçamento entre politrizes

Contudo, uma análise mais apropriada pode ser feita considerando-se a área em hachura no centro da Figura 64. Esta área é formada pela intersecção das regiões com interrupção de polimento, previstas para cada politriz.

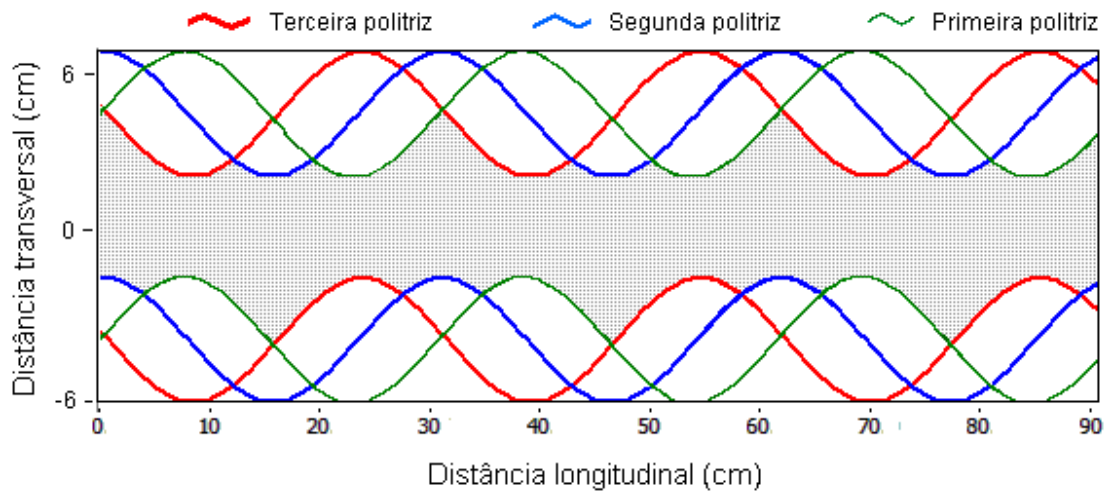


Figura 64 – Intersecção de regiões com interrupção de polimento para três politrizes adjacentes considerando $V = 7,5 \text{ cm s}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $A = 12 \text{ cm}$ e de 58 cm de espaçamento entre politrizes

Uma comparação entre a área em hachura acima e o padrão de brilho medido pode vista na Figura 65.

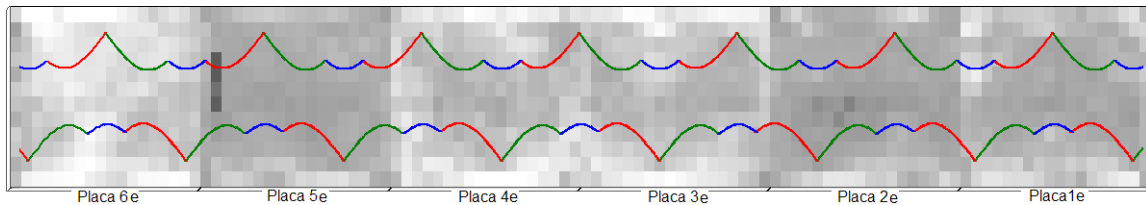


Figura 65 – Distribuição superficial de brilho acompanhando a intersecção das regiões com interrupção de polimento considerando três politrizes adjacentes

Um acordo convincente pode ser observado na sobreposição de gráficos efetuada acima, confirmando a possibilidade de se obter um padrão periódico de brilho mesmo após a atuação de três politrizes sucessivas.

Além disto, conforme mostrado na Figura 66, baseada nos resultados de Sánchez et al (Sánchez, 2002), o brilho médio da placa cerâmica cresce abruptamente após a passagem da mesma por certas politrizes. Após experimentar um rápido crescimento o

brilho superficial aproxima-se assintoticamente a um valor limite definido pela microestrutura do material (Tucci, 2000; Sánchez, 2002; Hutchings, 2005b). Wang et al (Wang, 2003) relatam que nenhuma nova substância forma-se durante todo o polimento.

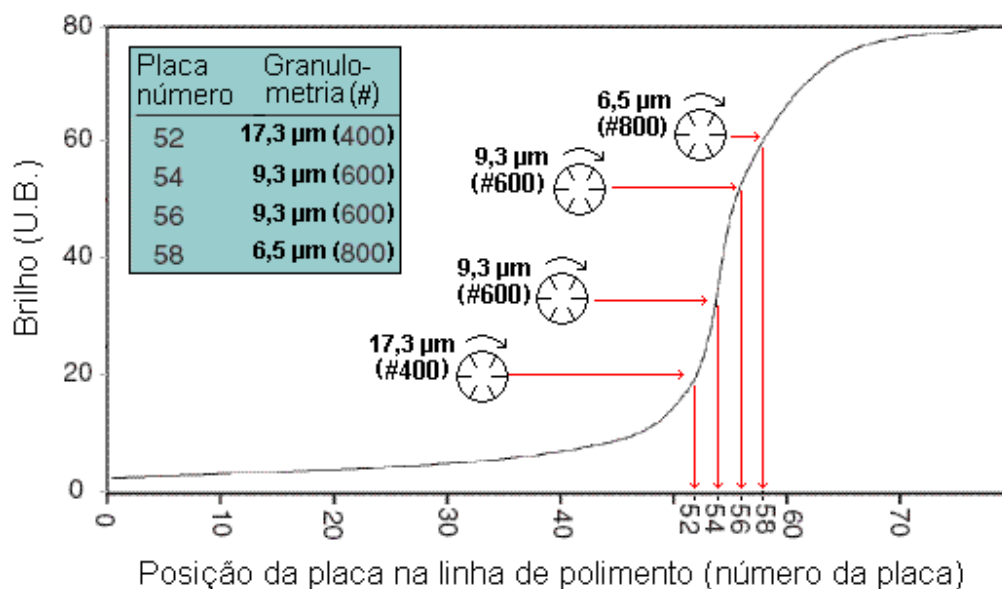


Figura 66 – Ganho típico de brilho ao longo da linha de polimento (Sánchez, 2002)

Assim, um rápido aumento de brilho fornecido pela passagem de apenas uma pequena parte da seqüência total de politrizes poderia explicar, em alguma extensão, o padrão de brilho obtido. Nesta fase crítica de ganho de brilho, uma distribuição não uniforme de E_{PT} tende a promover regiões com polimento grosseiro, assim como regiões excessivamente polidas, ambas indesejáveis ao processo. No primeiro caso tem-se um brilho aquém ao mínimo exigido pelo padrão do produto, enquanto que no segundo há um consumo extra de ferramental abrasivo.

O rápido aumento de brilho em determinada região é possibilitado pelo sensível comportamento da luz ao incidir sobre uma superfície aproximadamente lisa. Baseando-se no critério de Rayleigh, brevemente revisto, e nas informações fornecidas pelo fabricante do brilhômetro (HORIBA), (comprimento de onda principal da luz incidente de

0,880 μm , e ângulo de incidência de 60°), o valor de rugosidade média abaixo do qual a superfície deve ser classificada como lisa foi calculado em $R_a = 0,22 \mu\text{m}$.

Este valor é muito semelhante ao nível de rugosidade atingido pela superfície de placas após a passagem pela politriz de granulometria cujo diâmetro mediano d_{50} é de $17,3 \mu\text{m}$ (#400), de acordo com os diversos resultados fornecidos pela literatura (Wang, 2003; Hutchings, 2005a; Hutchings, 2005b; Hutchings, 2006b). Adicionalmente, um comportamento de ganho de brilho similar foi relatado por Huang et al (Huang, 2002), em um estudo sobre o polimento de dois tipos diferentes de granitos, mostrados na Figura 67. Na ocasião, foi adotado empiricamente o valor de $0,2 \mu\text{m}$ como limite de rugosidade abaixo do qual o brilho na superfície de ambos os granitos aumenta exponencialmente.

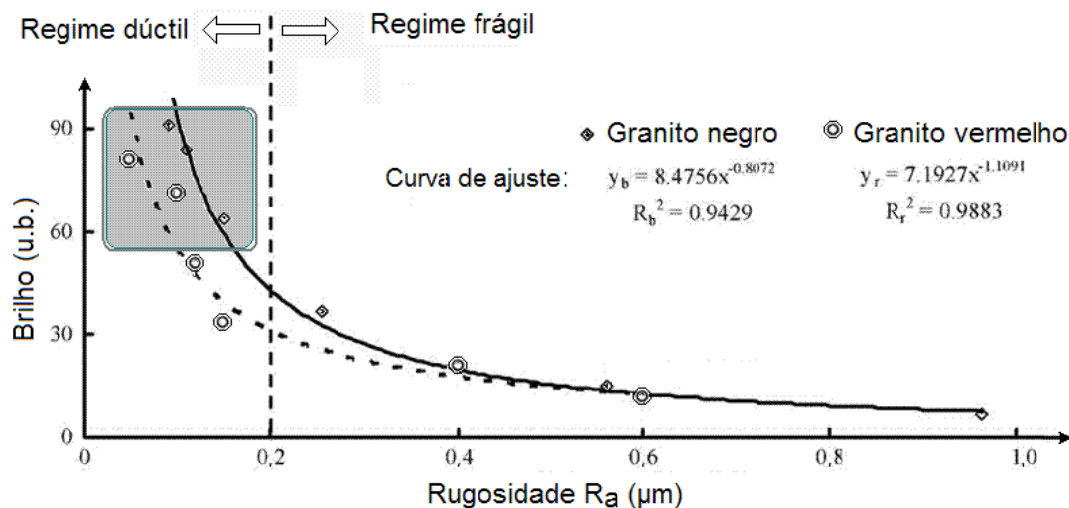


Figura 67 – Correlação entre rugosidade e brilho obtidas para placas de granito (Huang, 2002)

Nota-se que para ambos granitos os autores obtiveram uma boa correlação empírica entre rugosidade R_a e brilho superficial (Huang, 2002). Contudo, conforme destacado na mesma Figura 67, a correlação para a faixa entre 70 e 90 unidades de brilho, de grande interesse para o caso de porcelanatos polidos (Benincá, 2000; Hutchings, 2005b), a correlação empírica conta com poucos pontos de medição experimental.

Assim, visando o estabelecimento de uma correlação empírica similar para o caso do porcelanato, foram avaliadas a rugosidade superficial de dez regiões superficiais com brilho igualmente espaçados na faixa de interesse comercial do produto, de acordo com o procedimento experimental detalhado anteriormente. Um perfil típico de rugosidade obtido encontra-se disponível na Figura 68, sendo muito similar ao encontrado na literatura (Parra, 2006).

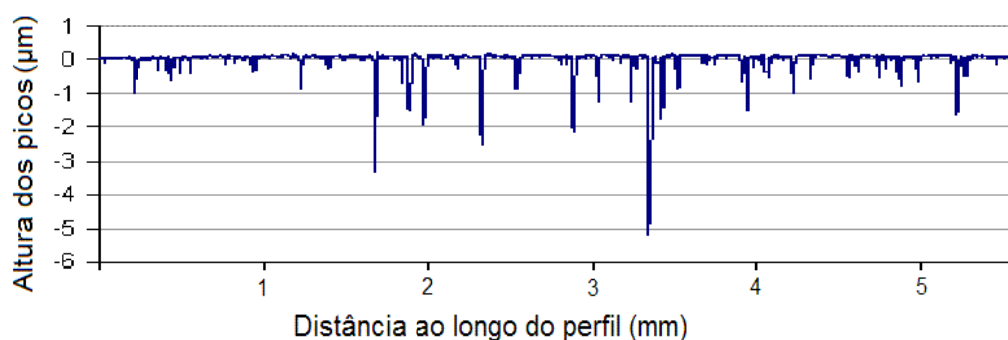


Figura 68 – Perfil de rugosidade típico obtido para o porcelanato polido (placa 1e)

Conforme mostra a figura, a superfície polida apresentou uma grande predominância de regiões extremamente suaves. Algumas poucas reentrâncias apresentaram mais de um micrometro de profundidade, e estão associados à presença de poros (Parra, 2006).

Os valores de profundidade maior que $0,8 \mu\text{m}$ foram admitidos como muito maiores que a altura crítica de $0,22 \mu\text{m}$, e por isso foram descartados dos cálculos de rugosidades médias, uma vez que estas são sensíveis a valores extremos. A Figura 69 apresenta os reúne os resultados obtidos para cada uma das dez regiões avaliadas.

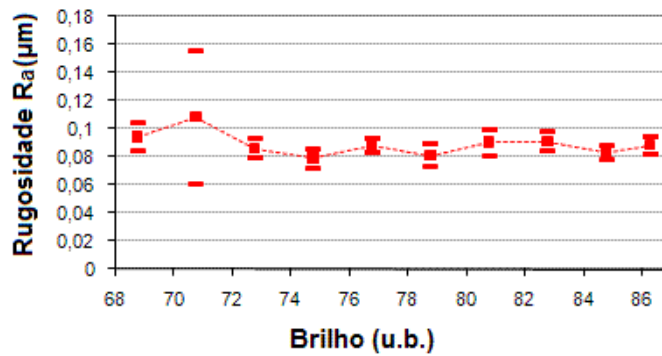


Figura 69 – Correlação entre rugosidade R_a e brilho superficial

Conforme visto no gráfico, não pode ser observada qualquer relação entre o brilho superficial e a rugosidade R_a para a faixa considerada. De fato, a relação entre brilho e rugosidade é tida como de difícil obtenção experimental (Wang, 2003).

As topografias do centro de cada uma das regiões estudadas, obtidas via interferometria de luz branca, encontram-se na seqüência de Figuras 70 a 72, disposta a seguir.

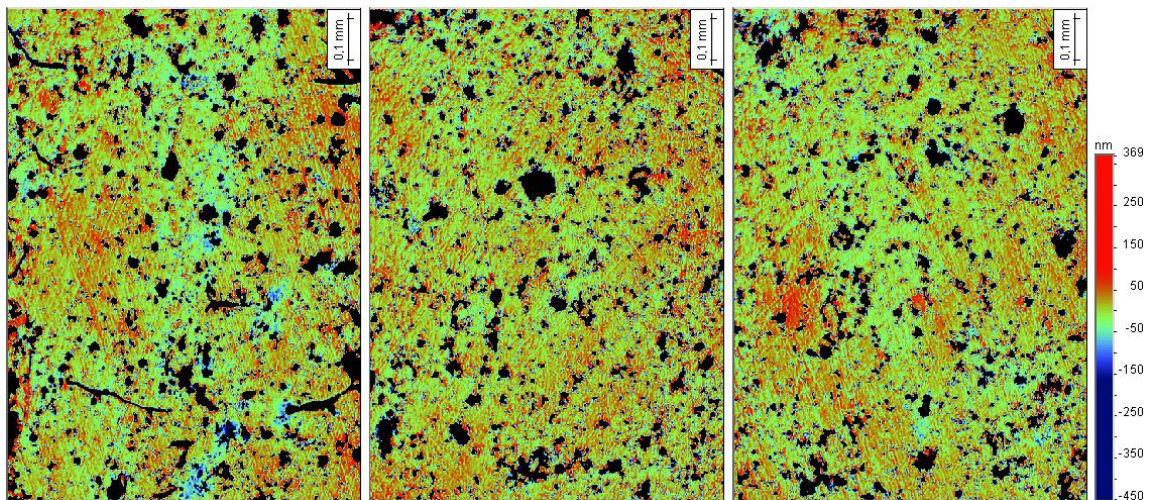


Figura 70 – Topografia superficial dos pontos P1-3

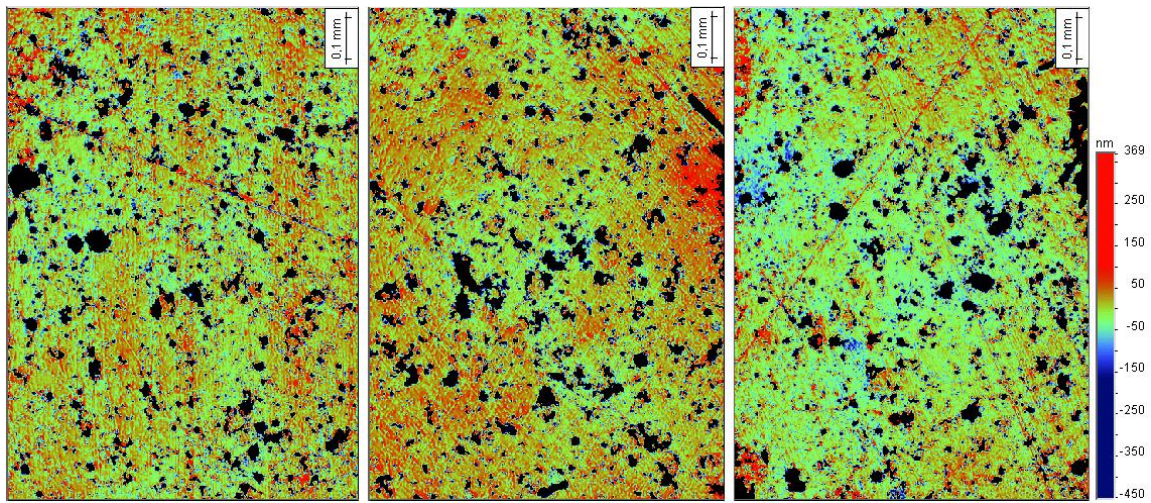


Figura 71 – Topografia superficial dos pontos P4-6

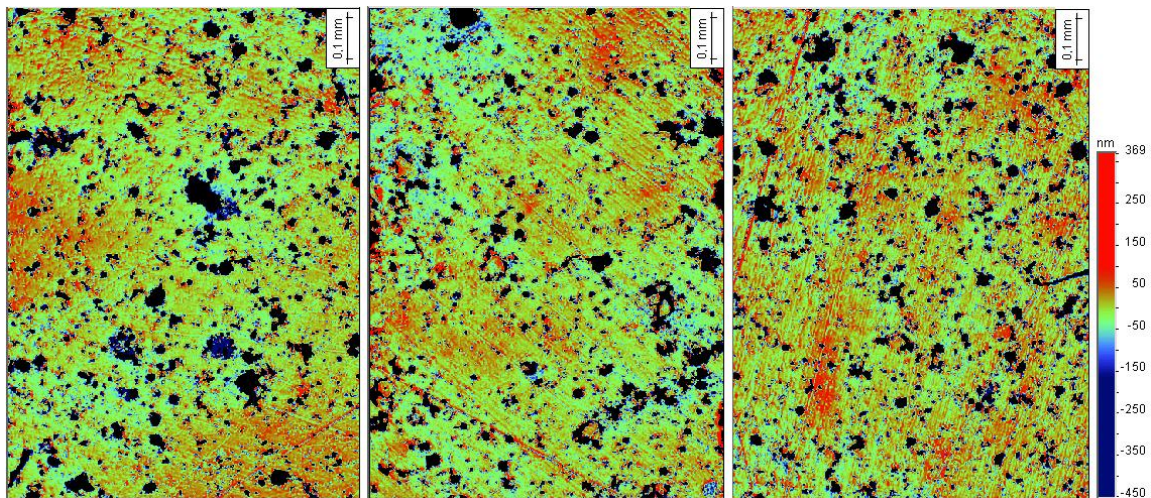


Figura 72 – Topografia superficial dos pontos P7-9

As topografias apresentadas evidenciam a grande suavidade da superfície como resultado do polimento. Conforme o esperado para o material (Wang, 2003), crateras e pequenos riscos dúcteis ainda podem vistos na microestrutura resultante, sendo a maioria em uma mesma direção preferencial.

Quanto a microestrutura, vale ainda comentar a presença de uma quantidade significativa de poros grandes ($>50 \mu\text{m}$) e de formatos irregulares. Estas características são indesejáveis ao produto, uma vez que tendem a diminuir a resistência ao manchamento (Dondi, 2005). Neste sentido seriam desejáveis poros isolados, de forma arredondada e com diâmetro máximo de $15 \mu\text{m}$ (Rosso, 2005).

Os resultados de R_a fornecidos por meio de interferometria de luz branca, correspondentes às superfícies apresentadas nas Figuras 70-72, encontram-se reunidos na Figura 73.

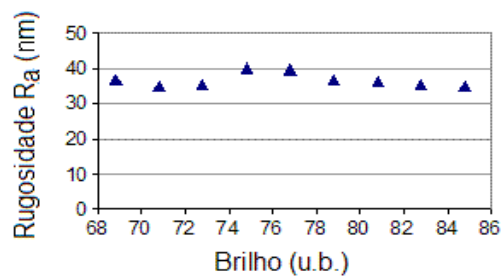


Figura 73 – Correlação entre brilho e rugosidade R_a obtida via interferometria de luz branca

Nota-se uma faixa de rugosidade pouco menor que a fornecida anteriormente, via perfilometria. Contudo, apesar da grande acuidade oferecida pela técnica de interferometria, ainda não foi possível a verificação de qualquer correlação empírica entre brilho superficial e rugosidade R_a , nesta faixa estudada.

Por fim, em virtude da presença significativa de poros irregulares revelada nas Figuras 70-72, decidiu-se ainda investigar o efeito da porosidade no brilho superficial.

As medidas de porosidade obtidas via análise das imagens apresentadas nas Figuras 70-72, podem ser vistas na Figura 74.

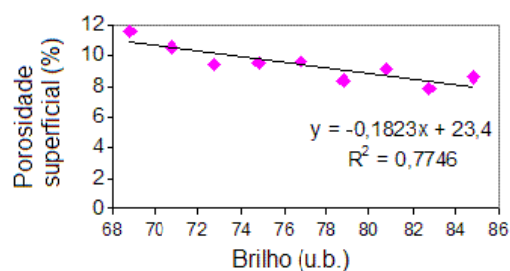


Figura 74 – Correlação entre porosidade superficial e brilho

Os valores de rugosidade encontrados foram ligeiramente maiores que a faixa de 5 a 8% sugerida pela literatura (Hutchings, 2005a; Raimondo, 2006; Oliveira, 1998). Contudo, ao contrário do obtido para a rugosidade, no caso da porosidade pode-se verificar, com um razoável nível de ajuste, uma fraca, porém importante, correlação empírica entre essa propriedade e o brilho superficial.

Assim, assumindo-se a semelhança de acabamento superficial revelada nas Figuras 69 e 73, é razoável concluir que todas as superfícies avaliadas já haviam atingidos os respectivos limites de brilho máximo. Uma vez que este limite é definido pela porosidade da superfície (Hutchings, 2005b; Tucci, 2000; Sánchez, 2002), um maior controle da porosidade do material porcelanato pode ser recomendado na expectativa de melhorar o brilho superficial do produto polido.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As conclusões resultantes do presente trabalho encontram-se subdivididas em dois grandes tópicos, de acordo com a natureza teórica ou experimental dos resultados.

6.1 QUANTO AOS RESULTADOS TEÓRICOS

O equacionamento da posição de um abrasivo arbitrário durante o processo de polimento em uma linha industrial moderna, em função da velocidade de avanço da linha de produção (V), da rotação do disco abrasivo (w), da frequência (f) e amplitude (A) de oscilação lateral, e dos raios interno (r) e externo (R) do disco abrasivo, permitiu a determinação da trajetória desenvolvida pelos abrasivos, bem como valores instantâneos da velocidade de riscamento, do raio de curvatura (ρ) e ângulo de riscamento, e da aceleração do abrasivo na direção do riscamento.

Como valores típicos desses parâmetros podem ser citados: $6000-1100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ para velocidade de riscamento; $9-12 \text{ cm}$ para ρ ; $0-700 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ para aceleração na direção do riscamento, e uma intersecção entre ângulos de riscamento, provenientes de duas politrizes adjacentes, em torno de 30° .

Estas informações fornecem os subsídios teóricos necessários, e ainda escassos na literatura, para uma escolha apropriada das condições de ensaio a serem adotadas em investigações fenomenológicas sobre o riscamento atuante.

O trajeto de riscamento obtido para um único abrasivo evidenciou as regiões superficiais onde a atuação abrasiva é favorecida, em função do maior acúmulo de contatos

abrasivos. A posição destas regiões é dependente da condição cinemática atuante, sendo dispostas seguindo um padrão ziguezague.

Com relação ao movimento realizado pelo conjunto de politrizes como um todo, observou-se que a relação V/f , ou λ , tem grande importância na seleção da cinemática a ser adotada na linha de polimento. Esta razão, quando comparada com o espaçamento L entre politrizes adjacentes, define o grau de superposição das regiões cobertas por cada politriz individualmente.

Uma condição cinemática que conduza a igualdade $L=n\lambda$, onde n é um número inteiro, representa uma situação onde cada politriz percorre exatamente a mesma região que a politriz subsequente. Tal situação tende a reforçar o favorecimento de acúmulo de contatos abrasivos, de modo que deve ser evitada. A relação entre L e λ permite ainda avaliar a utilização de um número excessivo de politrizes com mesma granulometria abrasiva.

O tempo de polimento experimentado por cada região na superfície da placa pôde ser analiticamente determinado, ainda com base no equacionamento da cinemática atuante. Como resultados puderam ser obtidas distribuições superficiais de tempo de polimento para algumas condições usuais de polimento. Em todos os casos, a ausência de partículas abrasivas no centro do disco abrasivo causa uma interrupção provisória do polimento ao longo do trajeto da politriz.

As distribuições de tempo de polimento permitem a quantificação direta da uniformidade de atuação dos abrasivos, em decorrência da cinemática adotada. Esta uniformidade mostrou-se de fato correlacionada a λ , e não apenas a valores isolados de V ou de f .

Uma significativa melhora na uniformidade da distribuição de tempo de polimento, que por sua vez está associada à qualidade da distribuição do brilho final resultante, foi obtida

mediante uma redução de λ de 37,5 cm para 12,5 cm. Maiores reduções de λ resultam em apenas pequenos ganhos de uniformidade, devendo contudo ser evitados em função da perda de produtividade da linha de produção, ou do aumento do consumo energético esperado.

Observou-se ainda que, apesar do movimento de oscilação lateral ser um recurso útil para a uniformização da distribuição do tempo de polimento durante o polimento, uma escolha inapropriada de λ pode conduzir a distribuições ainda piores que a prevista para linhas de polimento antigas, sem esse recurso. Além disto, uma vez que dois novos parâmetros são introduzidos, f e A , as politrizes modernas possuem uma cinemática mais complicada de ser otimizada puramente por tentativa e erro.

6.2 QUANTO AOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O padrão de brilho superficial do porcelanato resultante do processo industrial de polimento não é uniforme. Diferenças significativas de brilho foram obtidas tanto entre placas subseqüentemente polidas, quanto entre regiões adjacentes na superfície de uma mesma placa.

Parte dessa heterogeneidade pode ser explicada como conseqüência da própria cinemática atuante, uma vez que a mesma promove uma distribuição heterogênea de número de contatos abrasivos ao longo da superfície. Além disto, erros no sistema de apoio e eventuais empenamentos das placas ao natural podem afetar a distribuição de brilho do produto polido.

A utilização de oscilação lateral tende a conferir um padrão de ziguezague à distribuição superficial de brilho. Apesar do brilho final resultar da ação de dezenas de politrizes, o padrão obtido mostrou-se semelhante ao fornecido pela distribuição de tempo de polimento referente a uma única politriz. Este fato pode ser explicado com base na

sobreposição de trajeto de polimento de três politrizes adjacentes, e considerando-se ainda um abrupto ganho de brilho superficial após as placas adquirirem uma rugosidade próxima de um valor crítico de $0,2 \mu\text{m}$,

Quanto à rugosidade superficial, na faixa de brilho analisada, entre 70 e 86 u.b., as superfícies apresentaram um acabamento superficial semelhante. Este fato foi indicado tanto por meio de perfilometria quanto por interferometria de luz branca. Em ambos os casos foram obtidos valores de R_a muito pequenos, na faixa de 40 a 80 nm, quando desconsiderada a presença de poros.

Uma correlação empírica entre brilho e porosidade superficial foi verificada para a faixa de brilho supracitada. Tal fato sugere que todas as superfícies avaliadas já haviam atingidos os respectivos limites de brilho máximo, de modo que as diferenças de brilho obtidas foram atribuídas às variações na porosidade da superfície. Portanto, um maior controle da porosidade do material porcelanato pode ser recomendado na expectativa de melhorar o brilho superficial do produto polido.

Por fim, com base nos resultados teóricos e experimentais obtidos, foi possível o desenvolvimento de um programa para a simulação do processo de polimento. A utilização desse programa fornece às indústrias *Cerâmica Portobello S/A* e *Ceusa Ltda*, uma estimativa da distribuição do brilho superficial esperado para dada cinemática, de modo a evitar o uso de condições de polimento inapropriadas para uso em linhas de polimento reais.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme dito, os resultados teóricos alcançados neste trabalho fornecem os subsídios teóricos para a realização de estudos fenomenológicos sobre o polimento de porcelanatos. Algumas sugestões neste sentido podem ser vistas na lista a seguir:

- Considerando-se a faixa de condição de riscamento prevista para o polimento, obter as cargas mínimas para a geração de um risco, bem como a carga máxima para o início de lascamento, via ensaios esclerométricos, de modo a permitir uma opção apropriada da carga normal a ser adotadas nas politrizes;
- Para o caso de riscos com uma dada curvatura, infere-se que no lado côncavo o encontro de trincas seria mais favorecido que no lado convexo, contudo, faz-se ainda necessário um estudo experimental visando caracterizar esse efeito, bem como a obtenção de valores mínimos raio de curvatura recomendáveis para o polimento do porcelanato;
- Nos materiais vítreos, a partir de uma certa velocidade de riscamento é esperado um aumento no nível de deformação plástica da superfície (Wang, 2003). Uma vez que esta última tende a afetar positivamente o brilho resultante, uma caracterização quantitativa deste efeito no caso do polimento de porcelanato seria de grande valia;
- Tendo-se em vista a intensidade e a severidade da abrasão na etapa de calibração das placas, e cujas trincas geradas devem ser removidas na etapa de polimento subsequente, recomenda-se a realização de estudos específicos tanto cinemáticos quanto fenomenológicos sobre esta etapa;
- Repetir as investigações de Hutchins et al (Hutchings, 2005b), sobre a variação da rugosidades ao longo do tempo de polimento para diferentes granulometrias abrasivas, considerando contudo uma faixa de tempo de polimento mais refinada, e com um tempo total de polimento de no máximo 18 segundos, equivalente a passagem de três politrizes adjacentes com mesma granulometria abrasiva;
- Obter a completa distribuição de brilho superficial de todas as placas de porcelanato dispostas ao longo de uma linha de polimento sem o uso de oscilação lateral, de modo a permitir a obtenção de uma correlação empírica precisa entre o número de contatos abrasivos e o consequente ganho de brilho para cada politriz.

7 REFERÊNCIAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13816: Placas cerâmicas para revestimento - Terminologia. - Rio de Janeiro - RJ : [s.n.], 1997.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 15463 : Placas cerâmicas para revestimento - Porcelanato. - Rio de Janeiro - RJ : [s.n.], 2007.

Alarcon O., Weingaertner, W., 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. - Castelón - Espanha : Congresso Mundial de Qualidade em Revestimentos Cerâmicos - QUALICER, 2004. - p. 283-295.

ANFACER <http://www.anfacer.org.br/principal.aspx?tela=uctelaconteudos&idMenu=80> [Online] // Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. - 10 2007.

Benincá E Aspectos superficiais do produto grês polido. - Criciúma : Relatório de estágio supervisionado- Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, 2000. - 50 f..

Cantavella V., Sánchez, E., García-Ten, J., Ibañez, M. J., Sánchez, J., Soler, C., Sales, J., Mulet, F., Mor, S. Modelización de la operación industrial de pulido de baldosas cerámicas. - Castelón - Espanha : Congresso Mundial de Qualidade em Revestimentos Cerâmicos - Qualicer, 2006. - p. 111-122.

Cantavella V., Sánchez, E., Ibañez, M. J., Orts, M. J., García-Ten, J. Grinding work simulation in industrial porcelaintile polishing [Artigo] // Key Engineering Materials. - 2004. - p. 1467-1470.

Crichigno Filho J. M. Simulação numérica do processo de lapidação plana como ferramenta para otimização do processo. - Florianópolis - SC : Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. - 156 f..

de Mello J. D. B. Introdução ao estudo do desgaste. Notas de aula. - Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 1994. - 26 f..

Dondi M., Ergolani, G., Garni, G., Melandri, C., Raimondo, M., Rocha, E., Almendra, E. Tenório Cavalcante, P. M. The role of the surface microstructure on the resistance to

stains of porcelain stoneware tiles [Artigo] // Journal of the European Ceramic Society. - 2005. - p. 357-265 : Vol. 25.

Espósito L. Tucci, A., Naldi, D. The reability of polished porcelain stoneware tiles [Artigo] // Journal of the European Ceramic Society. - 2005. - 785-793.

FBK Instituto de Engenharia e Gerenciamento da Produção (Fertigungstechnik und Betriebsorganisation – FBK) // Universidade de Kaiserslautern. - Kaiserslautern, Alemanha : [s.n.].

Feijão J.F.M., Alarcon, O.E., Mello, J.D.B., Rosa, F.G., Silveira, R., Silveira, M. Estudo do mecanismo de abrasão de pavimentos cerâmicos utilizando a técnica esclerométrica [Artigo] // CERÂMICA,. - 1996. - p. 205-20 : Vols. v. 42, n. 27.

Fowles G. R. Analytical mechanics [Livro]. - [s.l.] : HOLT, RINEHART & WINSTON, 1986. - 3 ed..

Heck C. Gres Porcelanato [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 1996. - 05 : Vol. 04.

Hibeler R. C. Mecânica Dinâmica [Livro]. - Rio de Janeiro – RJ : Tradução: Antônio Donato Paulo Rosa, Campus, 1985. - vol. 2, 587 f..

HORIBA Instruments Ltda Brilhômetro (Gloss-Checker) Modelo IG-320 [Artigo] // Manual do equipamento.

Huang H., Li, Z., Shen, J. Y., Zhu, H. M., Xu, X. P. Micro-structure detection of a glossy granite surface machined by the grinding process [Artigo] // Journal of Materials Science Technology. - 2002. - p. 403-407 : Vol. 129.

Hutchings I. M. Tribology: friction and wear of engineering materials [Livro]. - London : Metallurgy & Materials Science Series, 1992. - p. 273.

Hutchings I. M., Adachi, K., Xu, Y., Sánchez, E., Ibañez, M. J. Laboratory Simulation of the industrial ceramic tile polishing process. - Castelón - Espanha : Congresso Mundial de Qualidade em Revestimentos Cerâmicos - Qualicer, 2004. - p. 19-30.

Hutchings I. M., Adachi, K., Xu, Y., Sánchez, E., Ibañez, M. J., Quereda, M. F. Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles [Artigo] // Journal of the European Ceramic Society. - 2005a. - p. 3151-3156.

Hutchings I. M., Xu, Y., Sánchez, E., García-Ten, J., Ibáñez M. J., Orts, M. J., Cantavella, V. Development of surface finish during the polishing of porcelain ceramic tiles [Artigo] // Journal of Material Science. - 2005b. - p. 37-42 : Vol. 40.

Hutchings I. M., Xu, Y., Sánchez, E., Ibáñez, M. J., Quereda, M. F. Optimización del processo de pulido para piezas de gres porcelánico. - Castellón - Espanha : Qualicer, 2006a.

Hutchings I. M., Xu, Y., Sánchez, E., Ibáñez, M. J., Quereda, M. F. Porcelain tile microstructure: implications for polishability [Artigo] // Journal of the european Ceramic Society. - 2006b. - p. 1035-1042 : Vol. 26.

Ibáñez M.J., Sánchez, E., García-Ten, J., Orts, M.j., Cantavella, V., Sánchez, J., Soler, C., Portolés, J., Sales, J. Use of a pin-on-disk tribometer for studying porcelain tile polishing. - Castellón - Espanha : Congresso Mundial de Qualidade em Revestimentos Cerâmicos - Qualicer, 2002.

ISO 2813 International Organization for Standardization - ISO 2813: Paints and varnishes - Determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20 degrees, 60 degrees and 85 degrees [Artigo]. - 1994.

KARL-HEIN GAHR, Z. Microstructure and wear of materials [Livro]. - Amsterdam – Netherlands : Elsevier Science Publishers B. V, Tribology Series 10, 1987.

Kigle-Boecker G. Measurement of gloss and reflection properties of surfaces [Artigo]. - 1995. - Vol. maio.

Lira C. Efeito de carbonatos de Ca, Mg, Lítio e do ciclo de queima na expansão por umidade de materiais cerâmicos porosos para revestimento. - Florianópolis -SC : Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. - 73 f..

Melchiales F. G., Canavesi, A., Boschi, A. O. Dimensionamento de revestimentos cerâmicos visando a maximização da produtividade (Por que os revestimentos tem os tamanhos que tem?) [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2006. - 3 : Vol. 11.

Menegazzo A. P. M. <http://www.ccb.org.br/boletim/index.php> [Online] // Centro Cerâmico do Brasil. - 2007. - Agosto de 2007.

Menegazzo A. P. M., Lemos, F. L. N., Paschoal, J. O. A., Gouvêa, D., Carvalho, J. C., Nóbrega, R. S. N. Gres porcelanato. Parte 1: uma abordagem mercadológica [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2000. - 5 : Vol. 5.

Menegazzo A.P.M., Paschoal, J.O.A.,Andrade, A.M., Carvalho, J.C.,Gouvêa, D. Avaliação da resistência mecânica e módulo de weibull de produtos tipo grês porcelanato e granito [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2002. - 1 : Vol. 7.

Nogueira R. E. F. Q., Mello, J. D. B. Avaliação do comportamento em abrasão de granitos naturais utliyando esclerometria pendular. - São Paulo-SP : IV Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste, 1998. - p. 249-261.

Obain G., Knoblauch K., Viénot F. Difference scaling of gloss: Nonlienarity, binocularity, and constancy [Artigo] // Journal of Vision. - 2004. - p. 711-720 : Vol. 4.

Oliveira A. P. N. Gres porcelanatos: aspectos tecnológicos e mercadológicos [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 1998. - 3 : Vol. 3.

Parra B. S., Gennari, R. C., Melchiades, F. G., Boschi, A. O. Rugosidade superficial de revestimentos cerâmicos [Artigo] // Cerâmica Industrial. - 2006. - p. 15-18 : Vol. v 11.

Raimondo M., Zanelli, C., Dondi, M., Guarini, G., Matteucci, F., Biasini, V., Gardini, D. Propriedades superficiais de peças de prês porcelanato: influência de diferentes recobrimentos protetores [Artigo]// Cerâmica Indsutrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2006. - 3 : Vol. 11.

Rosso J., Souza Cunha, E., Rojas-Ramírez, R. A. Características técnicas e polimento de porcellanatos [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2005. - 4 : Vol. 10.

Sánchez E., García-Ten, J., Ibañez, M. J., Orts, M. J., Cantavella, V. Polishing porcelain tile. Part 1: wear mechanism [Artigo] // American Ceramic Society Bulletin. - 2002. - p. 50-54.

Sousa F. J. P. Estudo da Viabilidade e desenvolvimento de alternativas para o aproveitamento de resíduo das indústrias de revestimentos cerâmicos [Relatório]. - Florianópolis - SC : Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. - 80 f..

Sousa F. J. P., Aurich J. C., Weingaertner, W. L., Alarconz, O. E. Analytical Determination of the Distribution of Polishing Time over the Surface of Polished Tiles [Article] // Journal of the American Ceramic Society. - 2007b. - xx xx 1–10 (2007) DOI: 10.1111/j.1551-2.

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 [Artigo] // Journal of the European Ceramic Society. - 2007a. - 10. - p. 3183-3190 : Vol. 27.

Sousa F. J. P., Oliveira, A. P. N., Alarcon, O. E. Industrial wastes used in floor tile glazes [Artigo] // American Ceramic Societz Bulletin. - 2006. - p. 9101-9107 : Vol. 85.

Su Y. T., Liu, S. H., Chen, Y. W. A preliminary study on smoothing efficiency of surface irregularities by hydrodynamic polishing process [Artigo] // Wear. - 2001. - p. 808-820 : Vol. 249.

Sylvain M. Diffuse reflection by rough surfaces: an introduction [Artigo] // Comptes Rendus Physique. - 2005. - p. 663-674 : Vol. 6.

Toigo F., Marvin, A., Celli, V., Hill, N. R. Optical properties of rough surfaces: general theory and the small roughness limit [Artigo] // Physical Review B. - 1977. - p. 5618-5626. : Vols. v. 15, N.12,.

Tucci A. Espósito, L. Polishing of porcelain stoneware tile: surface aspects [Relatório]. - Castelón - Espanha : Congresso Mundial de Qualidade em Revestimentos Cerâmicos, 2000.

Vorburger T. V., Marx, E., Lettieri, T. R. Regime of surface roughness measurable with light scattering [Artigo] // Applied Optics. - 1993. - 19. - p. 3401-3408 : Vol. 32.

Wang C. Y., Kuang, T. C., Qin, Z., Wei, X. How abrasive machining affects characteristics of vitreous ceramic tile [Artigo] // American Ceramic Society Bulletin. - 2003. - p. 9201-9208.

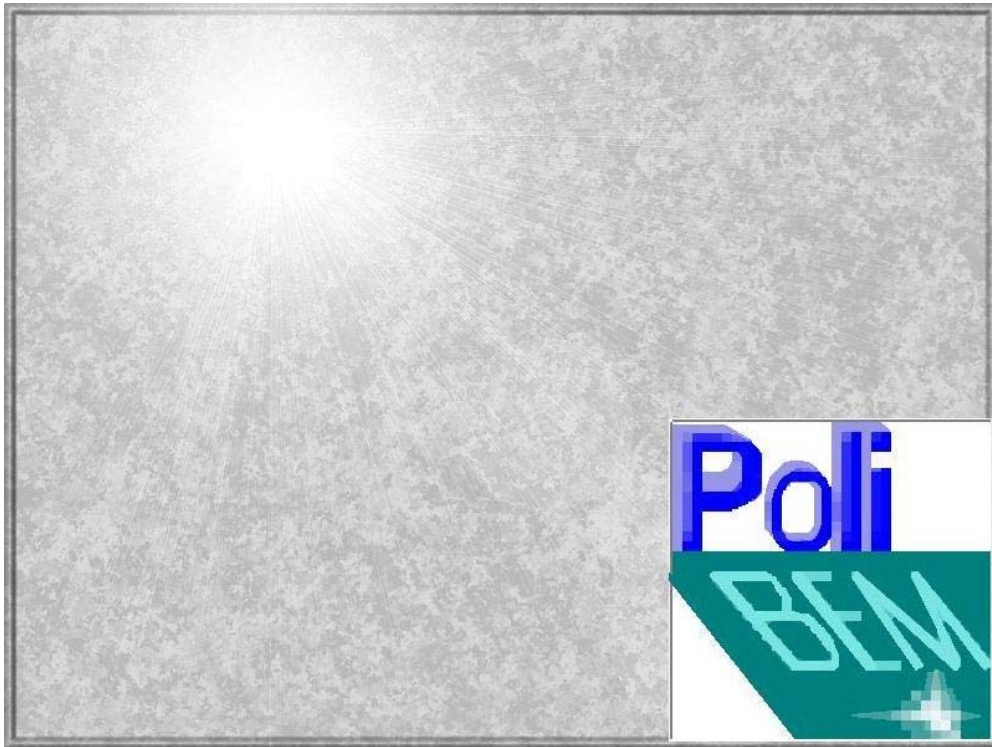
Weingaertner W. L. Entrevista concedida. - Florianópolis - SC : [s.n.], 2004. - 09 de outubro..

Wiggers W. S., Santos, R. A., Hotza, D. Evolução da superfície do porcelanato ao longo do processo de polimento [Artigo] // Cerâmica Industrial. - [s.l.] : ABC - Associação Brasileira de Cerâmica, 2007. - 1 : Vol. 12.

Wilfried K. Tecnologia de fabricação, brunimento e lapidação [Livro]. - Notas de aula :
Tradução: Walter L. Weingaertner, 1979?.

PROGRAMA POLIBEM VERSÃO 1.0

MANUAL DO USUÁRIO



Programa Polibem

Manual do usuário

Autor: Fábio José Pinheiro Sousa
Data: 01/05/06

Apresentação

O programa Polibem versão 1 é fruto de uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, e as empresas Cerâmica Portobello e CEUSA, e constitui o tema principal a ser estudado no projeto de tese do acadêmico Fábio José Pinheiro Sousa.

Trata-se de um programa que pretende simular o processo de polimento industrial de placas cerâmicas de revestimento tipo porcelanato. Para tanto foram levados em conta uma análise analítica da cinemática atuante nas linhas de polimento, e um grande número de medidas de brilho obtidas nas empresas supracitadas.

O presente manual visa auxiliar aos usuários dessas empresas que estejam interessados em usar do programa Polibem versão 1. O uso do programa é justificado uma vez que o usuário pode testar várias condições de polimento diferentes, antes de adotá-las no linha de polimento real. Assim, o programa fornece ao usuário uma estimativa do efeito de uma dada condição de operação sobre um lote de placas a serem polidas, sem haver as conseqüências de um teste em produção real, como desperdício de matérias-primas e insumos, e tempo de ocupação da linha de produção. Todos os recursos do Polibem, bem como alguns aspectos técnico-científicos serão apresentados mais adiante.

Antes de prosseguir, porém, o autor deseja ressaltar que, apesar do programa e arquivos a ele associados já terem sido extensivamente testados, detalhes sobre configurações, compatibilidade e assuntos dessa natureza transcendem ao conhecimento do autor. Para maiores detalhes sobre estes tópicos recomenda-se consultas a profissionais/especialistas da área de informática.

Assim, qualquer conflito entre programas, perdas de dados ou de desempenho, ou outros problemas que venham a ocorrer em um microcomputador após a instalação ou uso do programa corre por conta e risco do usuário.

Instalação

A instalação do programa Polibem Versão 1 se dá por meio do arquivo Polibem v1 CEUSA.exe, ou Polibem v1 Portobello.exe, conforme a cópia fornecida para a empresa, sendo ambos os arquivos com aproximadamente 33 Mb, e concedidos exclusivamente para as empresas de revestimentos cerâmicos CEUSA e Cerâmica Portobello, respectivamente. Após a ativação deste arquivo, um assistente de instalação guia o usuário através do processo de instalação, fornecendo informações sobre o espaço de disco rígido necessário (35 Mb), opções para a criação de diretório, entre outros.

A versão atual do programa Polibem requer uma plataforma LabVIEW para o seu funcionamento, de modo que após a instalação o programa ainda não deverá estar apto a ser executado pelo usuário. Assim, antes de tentar executar o Polibem logo após a sua instalação, o usuário deverá primeiramente suprir uma plataforma LabVIEW 7.1 ou superior no micro.

Essa plataforma pode ser facilmente obtida instalando-se um outro programa chamado LabVIEW Run-Time-Engine, que pode ser encontrado no mesmo diretório onde o Polibem

foi instalado, ou baixado gratuitamente na rede, via página da National Instruments. Uma cópia deste manual, em formato pdf, também está incluída no diretório do Polibem.

O quadro abaixo resume os quatro principais procedimentos para viabilizar o uso do programa Polibem em um micro. Estes procedimentos conferidos pelo autor nas plataformas Windows 2000 e Windows XP. A possibilidade do uso do Polibem em versões diferentes que estas não foi testada.

1	Clicar o arquivo de instalação: Polibem V1
2	Seguir as orientações do assistente de instalação, que criará um diretório para o Polibem
3	Localizar o diretório criado, e clicar no arquivo LVRuntimeEng.exe , ali contido
4	Finalmente, clicar no ícone do Polibem, para abrir e executar o programa

Desinstalando

Para desinstalar o Polibem do microcomputador, basta clicar no arquivo “desinstalador do Polibem”, que pode ser diretamente localizado como uma opção do Polibem na lista de programas, ou no próprio diretório onde o Polibem foi criado.

A tela principal

A utilização do programa Polibem se dá por meio de uma interface base, mostrada na Figura 1, chamada de tela principal.

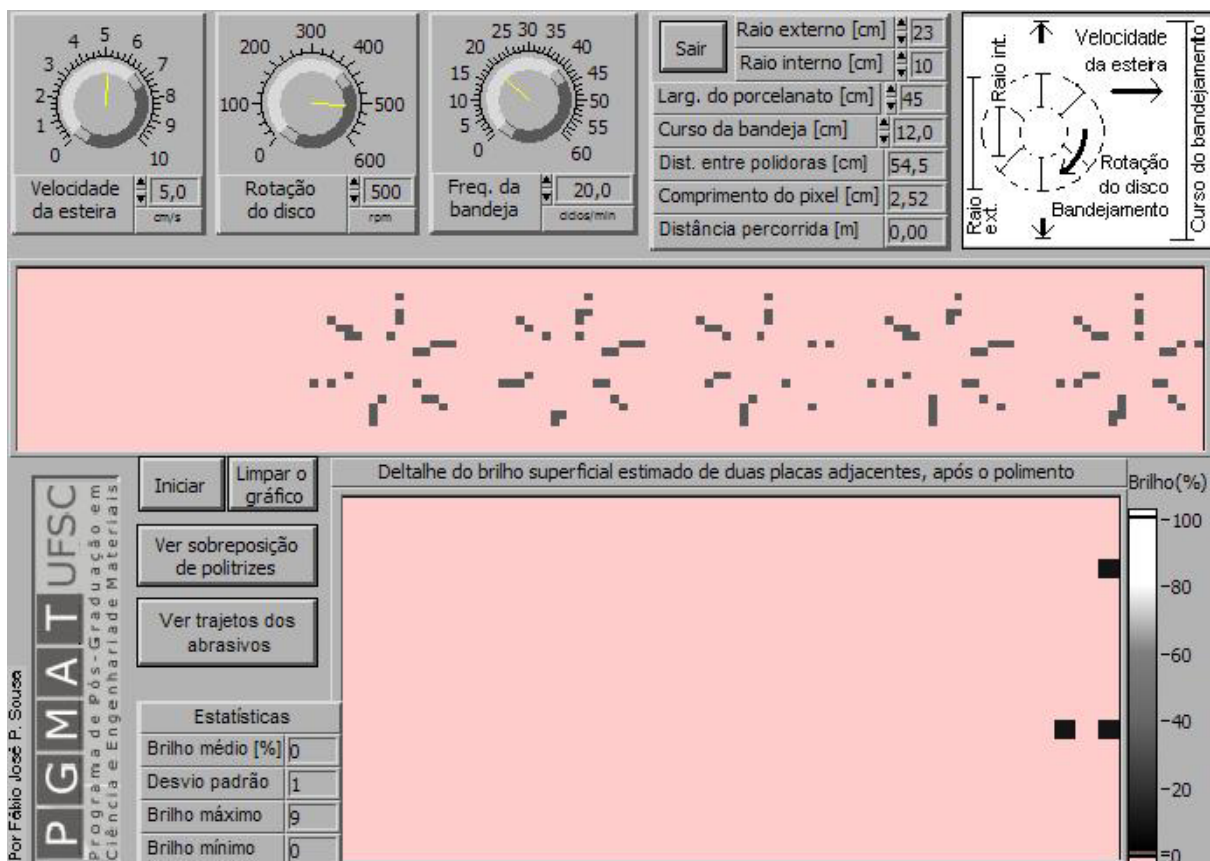


Figura 1 – Tela principal do programa Polibem

Na parte superior da tela principal, destacada na Figura 2, encontram-se todos os dados de entrada que o programa requer para funcionar. Sempre que o programa é ativado esses dados de entrada são preenchidos com valores pré-estabelecidos, podendo contudo serem alterados pelo usuário a qualquer instante.



Figura 2 – Área destinada à entrada ou alteração de dados no Polibem

Os dados podem ser alterados de três formas: (a) clicando em um das setas pretas situadas na frente da variável que se deseja alterar, (b) digitando o novo valor diretamente dentro do campo desejado, e ainda (c) clicando e arrastando o mouse de modo a girar um controle semelhante a um botão de rádio. Por requerer uma grande área da tela principal, este último modo de alteração via botão de rádio só está disponível para os dados de entrada considerados mais importantes, que estão situados na esquerda da Figura 2.

Procurou-se atribuir um nome auto explicativo para cada variável. Na tabela 1, no entanto, há uma breve descrição sobre cada uma das variáveis, juntamente com as correspondentes unidades e faixas de valores permitidas. O usuário deve estar sempre atento à unidade adotada. No canto superior da tela principal há ainda um esquema mostrando o significado da maioria das variáveis.

Variável	Descrição	Unidade adotada	Faixa de valores
Velocidade da esteira	Velocidade linear em que as placas avançam na linha de produção	cm/s	0,2 – 10
Rotação do disco	Nível de rotação do disco abrasivo	rpm	0 – 600
Frequência da bandeja	Quantos ciclos completos de vaivém as politrizes realizam a cada minuto	ciclos p/ minuto	0 – 30
Raio externo	Ver canto direito da Figura 2	cm	10 – 30
Raio interno	Ver canto direito da Figura 2	cm	0 – 20
Larg. do porcelanato	Largura da placa (transversal ao avanço)	cm	
Curso da bandeja	Curso total do movimento de vaivém das politrizes	cm	

Os campos “Distância entre polidoras”, “Comprimento do pixel” e “Distância percorrida”, são de caráter apenas informativo, e não podem ser alterados pelo usuário.

A distância percorrida representa o quanto a linha de produção já percorreu, em metros, desde que o programa começou a ser executado. A distância entre polidoras corresponde a distância medida entre duas polidoras adjacentes na linha de polimento, sendo importante para a verificação da sobreposição dos trajetos das politrizes com mesmo tamanho abrasivo, a ser explicado mais adiante.

O comprimento do pixel refere-se ao tamanho, em cm, que cada pequeno quadrado em tom de cinza (pixel) presente no gráfico da Figura 3 teria caso fosse uma região da superfície real.

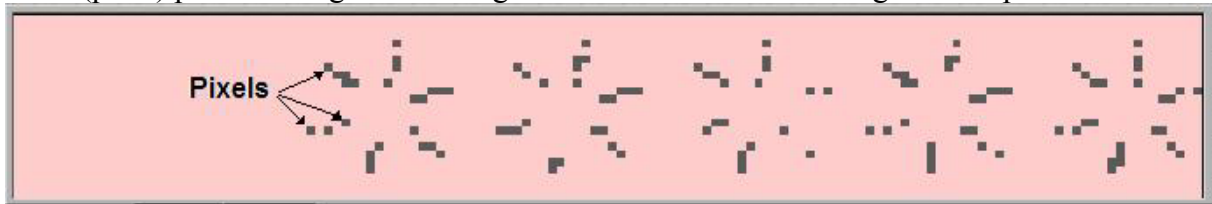


Figura 3 – Gráfico central do programa Polibem. Cada pixel no gráfico representa uma parte dos blocos abrasivos atuantes em uma linha de polimento simulada adotando-se apenas cinco politrizes

A Figura 3 mostra o gráfico existente na parte central da tela principal. Neste gráfico podem ser vistas, antes de iniciar o polimento, cinco figuras semelhantes a asteriscos paradas, e igualmente espaçadas entre si. O gráfico como um todo representa uma linha de produção simulada, e cada “asterisco” representa uma politriz. Os seis traços quadriculados, em tom de cinza, e que compõem cada politriz adotada, correspondem aos blocos abrasivos. Por problemas de arredondamento numérico, algumas vezes ocorrem lacunas em posições aleatórias na simulação dos blocos abrasivos.

A idéia geral deste gráfico é mostrar como cada região da linha de polimento vai adquirindo brilho no decorrer do processo. Tal como ocorre em uma situação real, após iniciado o polimento, os blocos abrasivos das politrizes começam a percorrer a superfície das placas sobre a linha de produção, desenvolvendo um movimento determinado pelos valores das variáveis de entrada.

O fundo rosa do gráfico central representa uma superfície de porcelanato que nunca recebeu contato abrasivo algum. Em uma situação real, à medida que o polimento avança, as diversas regiões da linha de polimento vão acumulando contatos abrasivos, e adquirindo com isso o brilho desejado.

No programa polibem esse acúmulo de contato abrasivo é contado a cada instante, para todas as regiões do gráfico. Este número total de contatos abrasivos, bem como o ganho de brilho resultante, é representado no programa por meio da alteração da cor de cada pixel ao longo do tempo, sendo os tons mais claros destinados a representar as regiões mais brilhosas. A Figura 4 ilustra o ganho de brilho causado pelo acúmulo de contatos abrasivos em diversas regiões da linha de produção.



Figura 4 – Gráfico central do Polibem, mostrando o ganho de brilho diferenciado nas diversas regiões da linha de produção. A esteira se movimenta da direita para a esquerda.

Como o programa estabelece um valor de brilho em função do número de contato abrasivo acumulado, e o motivo pelo qual foram adotados apenas cinco politrizes para representar toda a linha de polimento será apresentado na próxima seção.

A fim de permitir uma melhor avaliação visual da distribuição de brilho sobre as placas após o polimento, a tela principal inclui ainda um segundo gráfico. Este gráfico pode ser

considerado um detalhe (um zoom) do gráfico central, focando apenas as duas últimas placas que saíram da linha de polimento, como mostra a Figura 5. Vale lembrar que ao inserir novos dados no programa, é recomendado ao usuário esperar até que a alteração promovida seja totalmente computada em toda a superfície da peça. Este tempo de espera é o mesmo necessário para que o primeiro pixel da esquerda do gráfico percorra uma distância de 3,5 metros, comprimento total representado pelo gráfico.

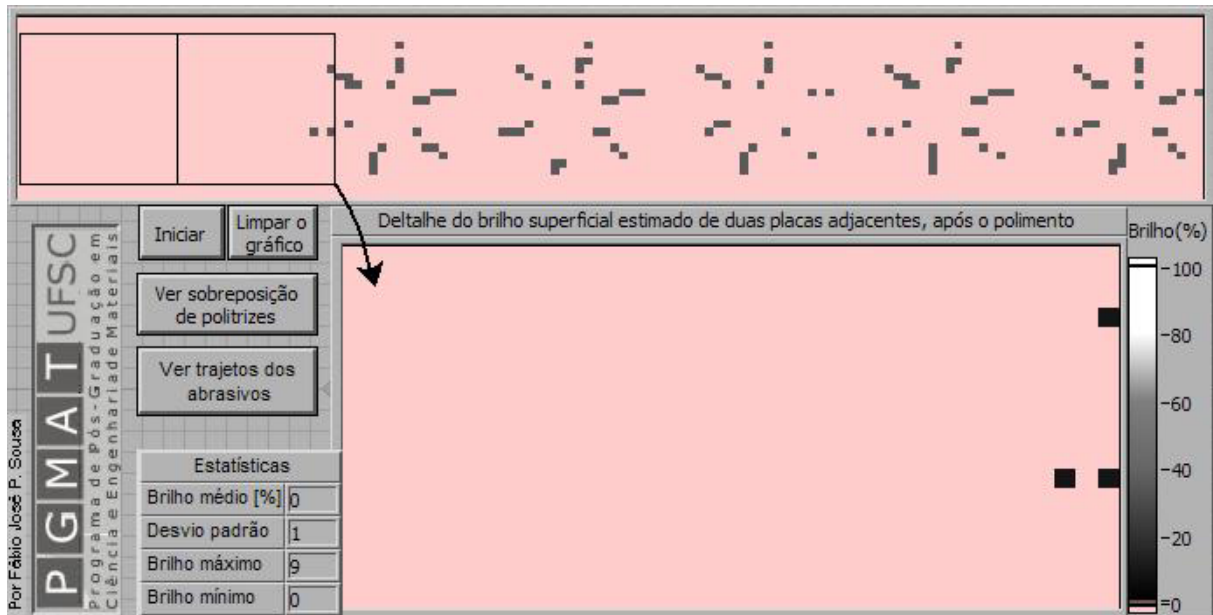


Figura 5 – Segundo gráfico da tela principal: detalhe da distribuição de brilho de duas placas adjacentes, após passarem pelo polimento.

Ainda na tela principal, o usuário encontra além dos botões de entrada de dados, mais quatro botões que podem ser vistos na Figura 5. O botão “Iniciar” libera o início do polimento, e após ser aplicado, seu nome é alterado para “pausar”, a fim de permitir que o usuário paralise o polimento sempre que desejar.

O botão “Limpar o gráfico” tem dois objetivos. O primeiro é “renovar” a superfície que estava sendo polida, a fim de que o usuário possa testar novos parâmetros, sem haver qualquer efeito de parâmetros anteriores. O segundo objetivo é permitir que o usuário escolha o instante em as politrizes devem começar a tocar a placa para a polir.

Ao primeiro clique o nome do botão “Limpar o gráfico” é alterado para “Reiniciar o polimento”. A partir deste instante as cinco politrizes aparecerão girando sobre a linha de produção, e percorrendo seu trajeto normalmente, sem, contudo, causar qualquer aumento de brilho nas placas. Esta situação, onde as politrizes parecem não “encostar” nas placas, durará até o usuário clicar uma segunda vez no botão, a fim de reiniciar o polimento.

Por fim, como mostrado na Figura 5, ao lado do segundo gráfico da tela principal há ainda alguns índices estatísticos, referentes apenas aos dados do segundo gráfico, e tendo como variável de interesse o brilho.

Os dois últimos botões da tela principal “Ver sobreposição de politrizes”, e “Ver trajeto dos abrasivos”, conduzem o usuário a outras telas, a serem devidamente explicadas após uma breve explicação sobre a metodologia adotada na concepção do programa Polibem.

Funcionamento do Programa

Como já citado anteriormente, o programa Polibem simula o polimento de placas de porcelanato a partir da contagem do número acumulado de contatos abrasivos em cada região da linha de polimento. Para tanto o programa conta com um algoritmo e uma interface gráfica realizada em ambiente LabVIEW 5.1, linguagem G, da empresa National Instruments, e licenciado para o Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

Assim, foram tomadas pequenas regiões da linha de polimento, e para cada uma delas foi destinado um elemento de figura (um pixel) nos gráficos do programa, mantendo-se sempre a mesma posição de uma dada região em relação às demais. A resolução do gráfico, bem como, em parte, a capacidade do programa de representar a realidade depende diretamente do tamanho adotado para cada pixel.

No entanto, em virtude do enorme tamanho total da linha de polimento, seriam necessários um sem número de pixels para uma simulação utilizando pixels de tamanho reduzido. Além disto, uma vez que o polimento ocorre ao longo do tempo, um outro fator de extrema importância para o desenvolvimento de programas desta natureza é o uso de pequenos incrementos de tempo, a fim de permitir o registro de variações mínimas de posição, ocorridas entre um instante e outro.

No caso do Polibem, a necessidade de um incremento de tempo pequeno foi estabelecida pela alta velocidade de rotação dos discos abrasivos, uma vez que, como mostra a Figura, um incremento de tempo que não fosse suficientemente pequeno faria com que alguns pixels fossem “pulados” na contagem do número de contatos abrasivos.

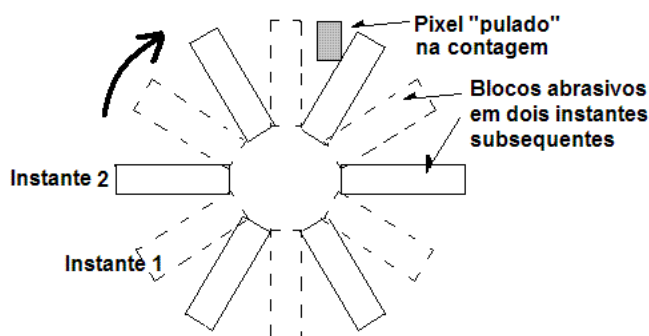


Figura 6 – Problema devido ao uso de incremento de tempos insuficientemente pequenos

No entanto, o uso de um incremento de tempo extremamente pequeno, aliado à adoção de pequenos tamanhos de pixels, exigiria para qualquer algoritmo computacional, um número extremo de cálculos a serem realizados pelo microcomputador, de modo que a simulação

resultaria em um processo tedioso, podendo levar até dias, o que inviabilizaria com isso o seu uso em qualquer empresa.

Assim, dada as barreiras recém citadas, decidiu-se por adotar uma linha de polimento simplificada, com base no gráfico de ganho de brilho apresentado na Figura 7, por sua vez extraído da literatura.

As equações analíticas que definem a posição de cada abrasivo em um dado instante pode ser obtida na seguinte literatura: SOUSA; F. J. P., Análise de aspectos tribológicos e cinemáticos do processo industrial de polimento de porcelanatos, Qualificação de tese, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PGMat, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 50 f., 2005.

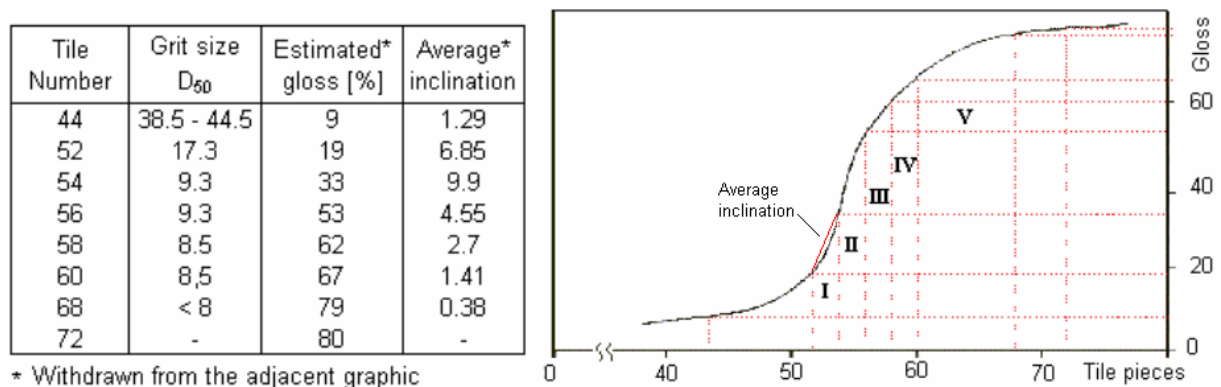


Figura 7 – Definição da linha de polimento simplificada. Fonte: SÁNCHEZ, E.; GARCIA-TEN, J.; IBÁÑEZ, M. J.; ORTS, M. J.; CANTAVELLA, V., Polishing porcelain tile. Part 1: Wear mechanism, AMERICAN SOCIETY CERAMIC BULLETIN, 2002, p. 50-54.

Nota-se na Figura 7 que o ganho de brilho se dá mais acentuadamente nas cinco regiões da linha de polimento, numeradas de I a V. Assim, essas cinco regiões principais de ganho de brilho foram representadas por cinco politrizes, onde o ganho de brilho acumulado em cada uma delas é proporcional à inclinação média de ganho de brilho de sua respectiva região no gráfico da literatura.

Esse raciocínio parece ser consistente, uma vez que leva em consideração o fato de que o cada contato abrasivo confere um incremento de brilho diferente, conforme o seu estágio de polimento. Assim, ao invés de representar 20 ou 40 politrizes, todo o brilho a ser adquirido durante o polimento simulado é gerado pelos contatos dos abrasivos dessas cinco politrizes, sendo esses contatos ponderando conforme o gráfico da Figura 7.

Uma vez que as medidas reais de brilho são geralmente obtidas por um aparelho chamado brilhaômetro, o tamanho de pixel no Polibem foi adotado com base nas dimensões consideradas por esse aparelho, para cada medida de brilho. Assim, cada pixel no gráfico representa uma área de cerca de 3 cm x 3 cm da superfície real.

Quanto ao incremento de tempo, o maior valor possível, a fim de salvar recurso computacional, e ao mesmo tempo evitar a ocorrência exagerada do problema de “pulo” de pixels na contagem de contatos abrasivos, explicado na Figura 6, foi de 0,003 segundos. Este incremento de tempo foi considerado o limite, uma vez que para rotações acima 500 rpm, o abrasivo mais externo do disco abrasivo deverá já percorrer uma distancia próxima a do tamanho do adotado para o pixel.

Vale lembrar que o incremento de tempo é adotado apenas para o cálculo das novas posições dos abrasivos, e de modo algum representa o tempo real. Este último por sua vez dependerá da capacidade do processador do microcomputador utilizado.

Verificação do programa

A verificação do correto funcionamento do programa, e de seu algoritmo de contagem, foi feita primeiramente comparando-se o resultado simulado com dados obtidos na literatura, apresentados na Figura 8(b). No entanto, este tipo de comparação só pôde ser feita para o caso de politrizes antigas, ou seja, sem a movimentação da bandeja, uma vez que não foram encontrados dados correspondentes na literatura.

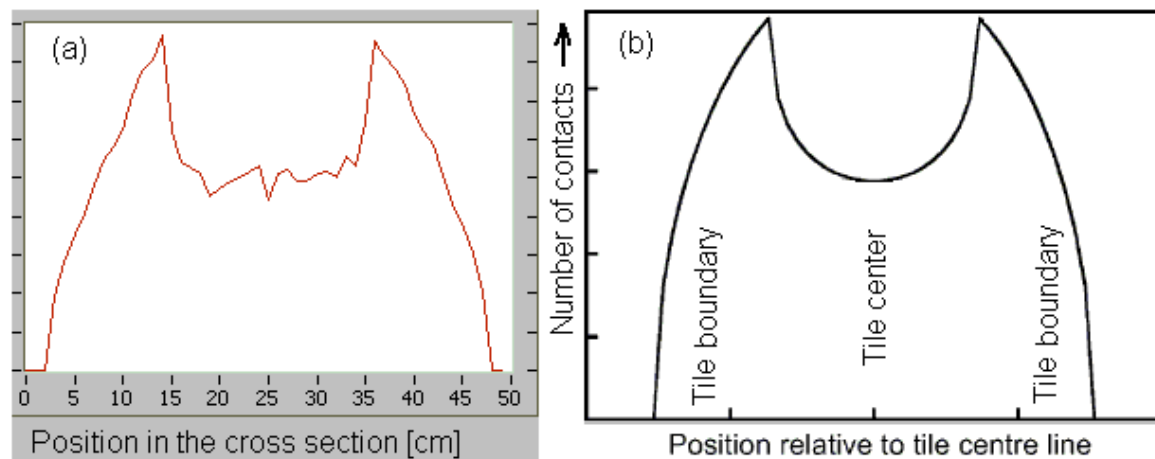


Figura 8 – Comparação entre resultado simulado e o obtido na literatura. Fonte da Figura 8(b): HUTCHINGS, I.M., ADACHI, K., XU, Y., SÁNCHEZ, E., IBÁÑEZ, M.J., QUEREDA, M.F., Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles, Journal of the European Ceramic Society. 2004. Em publicação.

Para o caso de politrizes com o efeito de bandejamento a verificação do programa foi feita comparando-se os valores de brilho simulados com valores medidos em superfícies reais, para as mesmas condições de polimento. O resultado é mostrado na Figura 9.

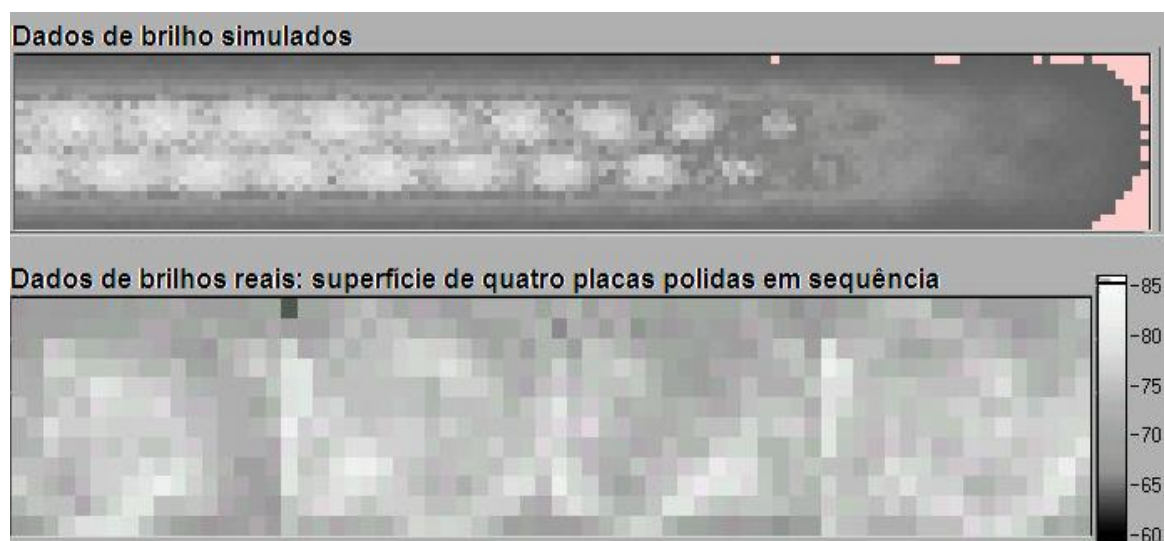


Figura 9 – Comparação entre medidas de brilho reais e dados simulados, incluindo o efeito de bandejamento

A comparação apresentada na Figura 8 indica que os resultados simulados para o polimento sem o efeito de bandejamento são satisfatórios. A região de maior brilho foi corretamente simulada, situando-se, assim como ocorre na prática, não ao centro da peça, mas sim a levemente deslocada, e em ambos os lados. Além disto, na superfície da peça simulada pode-se ver a direção do polimento. O mesmo ocorre em uma linha de polimento antiga real.

Com a presença do bandejamento, o resultado da simulação mostrou um padrão de zigzag na distribuição do brilho superficial. Tal como pode ser visto na Figura 9, o mesmo padrão foi obtido por meio dos dados de brilhos reais. Este padrão de zigzag é muitas vezes conhecido como sombra de polimento, e é uma consequência direta da interação dos movimentos de avanço da esteira e de bandejamento. Esta interação é bastante sensível, como poderá ser visto pelo usuário, na tela de “Ver sobreposição de politrizes”.

A obtenção de um modelo quantitativo para a simulação precisa do brilho durante o polimento exigiria um número muito maior de estudos fenomenológicos, além da alimentação do programa com uma variedade e número de dados muito maiores do que a feita até o momento, de modo que o valor médio de brilho indicado pelo programa é apenas qualitativo. Isto pode ser visto ainda na Figura 9, onde os dados reais obtidos apresentaram um brilho médio significativamente maior que o valor simulado.

Evidentemente há ainda muitos parâmetros que não foram computados no Polibem, tais como (a) empenamento da placa cerâmica, que pode causar um brilho maior na borda, (b) desgaste e falta de horizontalidade no apoio da esteira de produção, que pode causar brilhos assimétricos, (c) alteração das forças normais, pois se pode assim obter um outro mecanismo de abrasão, (d) alteração ou troca de fluido lubrificante, (e) alteração no processo de calibração, (f) alteração ou troca do tipo de material da placa e/ou abrasivo, (g) alteração da seqüência de abrasivos, etc. Deste modo, a existência de todas estas variáveis, incondicionalmente associadas ao processo de polimento, ressalta as limitações do Polibem, bem como a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o processo.

De fato, o próprio uso da Versão 1 do programa Polibem pelas empresas em parceria com a UFSC, constitui um estudo em si, de maneira o autor solicita à essas empresas a gentileza de participarem ao mesmo sobre qualquer impressão, comentário, opinião, críticas e sugestões sobre o uso do Programa.

Como utilizar o programa

O programa Polibem foi desenvolvido visando permitir que o usuário teste várias condições de polimento diferentes, antes de adotá-las na linha de polimento real. O objetivo principal é evitar o uso de condições de polimento indicadas como ruins pelo programa, na linha de polimento real, evitando-se com isso o desperdício de matérias-primas, insumos, e tempo de ocupação da linha de produção.

A grande utilidade do Polibem consiste no fato de que as diferenças entre condições de polimento boas ou ruins não podem ser prontamente distinguidas pelo usuário. Isto conforme visto, devido ao número de variáveis existentes, e principalmente devido às sensíveis relações entre estas variáveis. A idéia do programa seria, portanto, servir de ferramenta para auxiliar o usuário nessa classificação.

Assim, para a utilização do Polibem basta ao usuário fornecer, via dados de entrada, as condições de polimento que seriam adotadas na linha de polimento real. A indicação de que uma dada condição de polimento, inserida no programa, deve ser descartada pelo usuário, é feita considerando-se os três seguintes fatores:

- Distribuição do brilho superficial;
- Trajetos abrasivos que tendem a promover riscos grosseiros;
- Exigência excessiva de politrizes com mesma grana abrasiva, e

A distribuição de brilho superficial é apresentada nos dois gráficos presentes na tela principal do programa. O gráfico central mostra como a distribuição de brilho vai ocorrendo ao longo do tempo, enquanto que o segundo gráfico detalha o nível de distribuição atingido por duas placas adjacentes, após essas passarem por todas as cinco politrizes. A qualidade da distribuição deve ser julgada pelo próprio usuário, com base no resultado mostrado nos gráficos, bem como nos índices estatísticos fornecidos ao lado do gráfico secundário.

O trajeto do abrasivo mais externo e do abrasivo mais interno de uma politriz pode ser visto pelo usuário após um clique no botão “Ver trajeto dos abrasivos”, da tela principal. A nova tela a ser vista pelo usuário é apresentada na Figura 10.

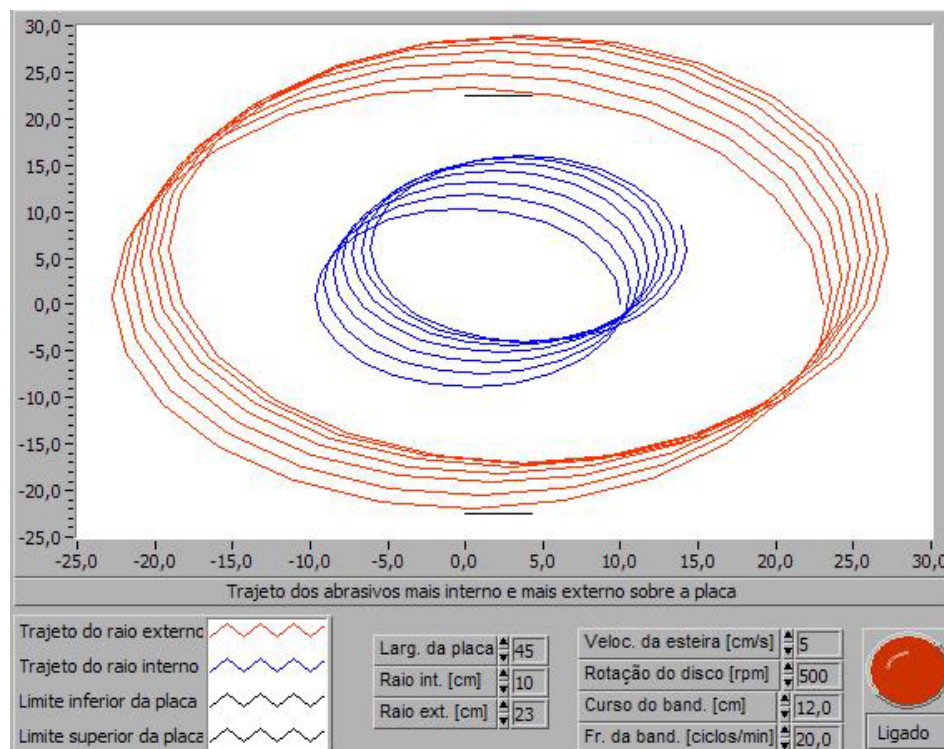


Figura 10 – Tela para a visualização do trajeto dos principais abrasivos

O objetivo desta tela é permitir ao usuário ver como estão sendo feitos os riscos durante o polimento. Uma trajetória de risco com um raio de curvatura muito pequeno teoricamente tenderia a favorecer o encontro de trincas perpendiculares ao risco, o que poderia causar a ocorrência de riscos grosseiros sobre a superfície da peça, e por consequência, o descarte da mesma após todo o processo de polimento.

Os valores mínimos de raio de curvatura mais indicados não foram obtidos na literatura, de modo que se recomenda ao próprio usuário estimar este valor, caso esteja tendo problemas com a ocorrência de riscos grosseiros.

Para sair da tela “Ver trajeto dos abrasivos”, e voltar para a tela principal do programa, basta o usuário clicar **duas vezes** no botão vermelho, localizado no canto inferior direito da tela, acima do texto indicativo “Ligado”. A simulação do polimento continuará a ser realizada quando o usuário voltar à tela principal.

O último fator importante para ao julgamento de uma dada condição de polimento é a necessidade excessiva de politrizes adjacentes com o mesmo tamanho de abrasivo. Com este objetivo foi incluído no programa a tela “Ver sobreposição de politrizes”, apresentada na Figura 11, que passa a ser ativada após o usuário clicar no botão correspondente.

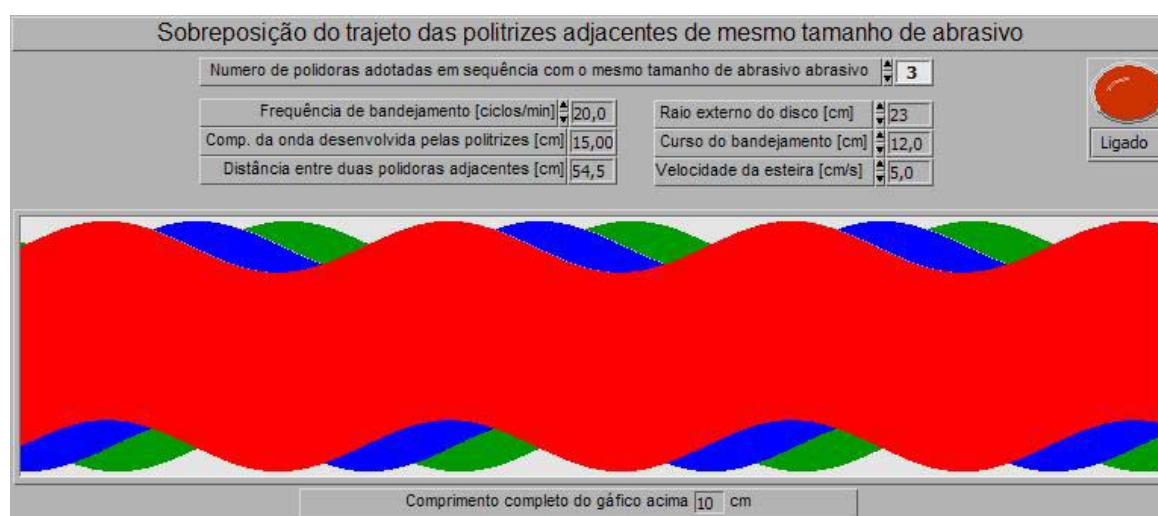


Figura 11 – Sobreposição das áreas cobertas por politrizes adjacentes

As ondas apresentadas no gráfico da Figura 11 correspondem à área que foi coberta por uma dada politriz, ao longo da linha de polimento. A situação é mais detalhada na Figura 12, onde a distância entre politrizes adjacentes é uma constante, e durante o polimento as placas cerâmicas devem se deslocar sempre mantendo contato com as placas adjacentes.

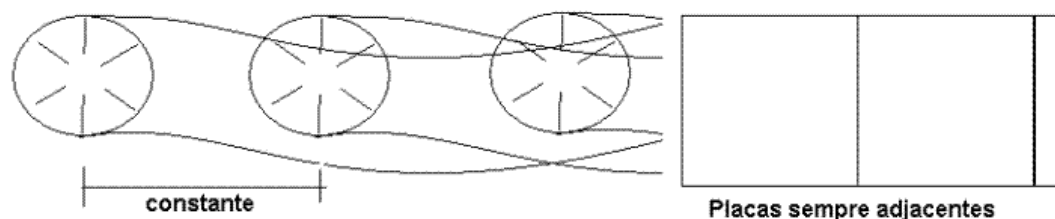


Figura 12 – Detalhe da sobreposição de áreas cobertas por cada uma das politrizes

Assim, o uso do gráfico de sobreposição de politrizes permite ao usuário verificar se a condição de polimento é tal que, por haver uma sobreposição exagerada entre as áreas cobertas por politrizes adjacentes, sejam exigidos mais politrizes na linha de produção a fim de cobrir toda a superfície das placas. A Figura 13 mostra um caso em que, com uma pequena variação das condições de polimento, apenas duas politrizes tornaram-se mais aptas a cobrir a superfície das placas cerâmicas do que as três politrizes na condição de polimento anterior.

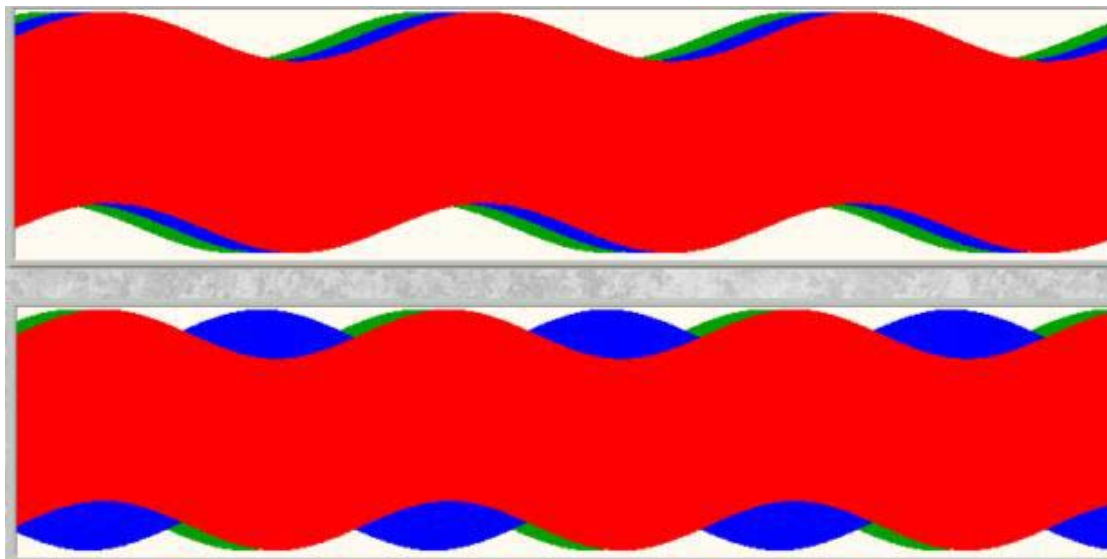


Figura 13 – Diferentes casos de sobreposições entre áreas cobertas por politrizes adjacentes

Além dos botoes referentes aos dados de entrada já contidos na tela principal, na tela “Ver sobreposição de politrizes” o usuário ainda pode alterar o número de politrizes a serem exibidos, admitindo-se que os mesmos estejam adjacentes na linha de produção real, e que possuam o mesmo tamanho de abrasivo.

Para sair da tela “Ver sobreposicao de politrizes”, e voltar para a tela principal do programa, basta o usuário clicar **duas vezes** no botão vermelho, localizado no canto inferior direito da tela.

Por fim, para sair do Polibem, fechando o aplicativo, basta o usuário clicar no botão “Sair”, situado na parte superior central da tela principal.

Agradecimentos

O autor deseja agradecer ao aluno Nério Vicente Júnior, pela valiosa ajuda na coleta dos dados usados para a alimentação do programa, ao Prof. Orestes Estevam Alarcon, pela orientação na execução do trabalho, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico - CNPq, pelo apoio financeiro, e às empresas de revestimentos cerâmicos Cerâmica Portobello e CEUSA, pela oportunidade e pelo auxílio na coleta de dados, e acima de tudo, pelo voto de confiança.