

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

Rafael Santiago Floriani Pereira

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES MECÂNICAS E FÍSICO-  
QUÍMICAS NO PROCESSO DE BRUNIMENTO PLANO  
ROTATIVO DE PLACAS DE PORCELANATO**

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

Florianópolis  
2012

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

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca Central.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

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

Rafael Santiago Floriani Pereira

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES MECÂNICAS E FÍSICO-  
QUÍMICAS NO PROCESSO DE BRUNIMENTO PLANO  
ROTATIVO DE PLACAS DE PORCELANATO**

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

Florianópolis, 12 de novembro de 2012.

---

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

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Eng. Hazim Ali Al-Qureshi  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

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

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, especialmente minha mãe, Anna Santiago Floriani Pereira e minha irmã Anna Carlina Floriani Pereira, pelo apoio e motivação que têm me dado durante toda a vida.

Também fica a gratidão aos meus avós, meu pai e familiares por contribuírem, por vezes, apenas por estarem presentes.

Ao meu orientador e professor, Márcio Celso Fredel, pela orientação, confiança e oportunidade dadas a mim desde a graduação.

Ao meu co-orientador e amigo professor Fábio José Pinheiro Sousa, pelo companheirismo, auxílio e confiança durante minha estadia em Kaiserslautern.

Ao meu amigo Ahryman S. B. S. Nascimento, por toda ajuda fornecida com ensaios realizados na Technische Universität Kaiserslautern.

Ao meu amigo Guilherme D'Aquino Pinho, pelo companheirismo e ajuda, principalmente nos tempos de Alemanha.

Aos brasileiros, e meus amigos, em Kaiserslautern, Mateus Gomes, Raphael Guerra, Rodrigo Coelho, Tatiana Bartholazzi e Thiago Dal Pai, pelo companheirismo e por amenizarem a saudade de casa.

Aos meus amigos, Gustavo Siebert, Joao Gustavo da Silva, Ramon Angelo Mezzari, David S. Machado, André B. Cabral, Mateus Vinicius Petry e Rui Acácio Lima Neto, pelo bom convívio e esclarecimentos prestados durante todo o mestrado.

A César A. Casagrande, Rafael Gonçalves de Sousa, Anatolij Olemburg, Rafaela do Vale Pereira, José Rabelo, Marcela Moura, Jefferson Schmidt e Cauê C. da Silva, pelo companheirismo durante estes 2 anos.

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

Ao CNPQ e CAPES pelo auxílio financeiro no Brasil e na Alemanha.

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

Não tentes ser bem sucedido,  
tentas antes ser um homem de valor.

Albert Einstein

## RESUMO

Apesar dos avanços tecnológicos e mercadológicos nos processos produtivos de placas de porcelanato, os fenômenos físico-químicos e mecânicos que ocorrem durante a etapa de “polimento” deste produto ainda necessitam de maiores investigações. O presente trabalho tem como objetivo investigar a influência de alterações mecânicas e químicas no processo de “polimento de placas de porcelanato”. Em caráter químico, foram investigadas possíveis mudanças do coeficiente de atrito atuante durante o processamento, bem como do brilho final deste produto, oriundos da variação do pH de soluções utilizadas como fluido de corte para o processamento. Os ensaios foram conduzidos em uma máquina universal para este tipo de teste, que apresenta um cabeçote giratório e liberdade de movimento em três eixos. Foram utilizados diferentes quantidades de ciclos de “polimento”, a fim de verificar a evolução do brilho com o decorrer dos ensaios. Foi verificada também a variação do pH da água utilizada como fluido de corte no processo. Para o estudo dos fenômenos mecânicos envolvidos, foi aperfeiçoado um esclerômetro a fim de que através de ensaios de riscamento pudessem ser estipulados os micro-mecanismos de corte atuantes durante o processo de “polimento de porcelanatos”. Os resultados do ensaio de riscamento podem ser utilizados como uma aproximação do que ocorre durante o processo de usinagem com blocos abrasivos, viabilizando maior controle deste. Para que haja um melhor conhecimento da dispersão de abrasivos nos blocos, foram mapeadas algumas amostras. Os resultados dos riscos mostram que para a variação de carga ocorrida, o sistema de remoção de material apresenta característica frágil e um controle de força deve ser adotado no esclerômetro para investigações futuras. Os testes com fluido de corte mostraram a existência de variação do pH da água utilizada no processo. Quando modificado o fluido, mudanças nas respostas em brilho e coeficiente de atrito foram observadas, sendo que a solução empregada com pH 7, apresentou tendência aos maiores valores das duas propriedades.

**Palavras-chave:** Polimento, brunimento, porcelanato, pH, brilho, esclerometria, riscamento.

## **ABSTRACT**

Despite technological advances in porcelain stoneware tiles production processes, physicochemical and mechanical phenomenon that occur during the "polishing" stage, still require further investigation. This work aims to investigate the influence of mechanical and chemical changes in the porcelain stoneware tile polishing process. In chemical side were investigated presumable changes in the friction coefficient during the process and the final gloss of this product, from the pH variation of solutions used as lubricant. Tests were made on a universal wear machine that has a rotary head and three axis movements, with a number of different polishing cycles, to observe the gloss gain during the experiment. A pH variation was verified in the water used as lubricant during the process. For the mechanical phenomena study, was improved a sclerometer so that by a scratch test could be stipulated the operating micro-mechanism of wear during the porcelain stoneware tile polishing process. The scratching test results can be used as an approximation of what occurs during the wear process using abrasive blocks, producing most controlled results of this. To have knowledge of the abrasive dispersion in the blocks, some samples were mapped. The scratching test results have shown, for the load variation applied, a brittle mechanism of wear and a strenght control system must to be implemented in the sclerometer to further investigations. The tests with lubricant have shown a pH variation in the water used on the process. When the fluid changed, changes in brightness and coefficient of friction was observed, and the used solution at pH 7 showed a tendency to higher values of the two properties.

**Keywords:** Polishing, honing, porcelain stoneware tiles, pH, gloss, scratch test, sclerometry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Maiores produtores de cerâmica de revestimento do mundo (ANFACER).....	15
Figura 2 - Produção de cerâmica de revestimento por tipo de produto (ANFACER).....	16
Figura 3 - Crescimento da produção de cerâmica de revestimento no Brasil (ANFACER, 2012). ....	21
Figura 4 - Moinho de bolas (Ribeiro, 2001). ....	23
Figura 5 - Atomizador (Negre, 2000). ....	24
Figura 6 - Prensa utilizada no processo produtivo. (Albaro, 2001).....	25
Figura 7 - Estágios de sinterização. (Adaptado de Richerson, 1992).....	27
Figura 8 - Composição de alguns materiais cerâmicos (De Noni, 2007). ....	29
Figura 9 - Processo de retificação. ....	31
Figura 10 - Processo de brunimento (Marinescu, 2004). ....	32
Figura 11 - Processo de lapidação. ....	32
Figura 12 - Processo de polimento.....	33
Figura 13 - Cinemática do processo de polimento de porcelanato (Adaptado de Sousa, 2007) .....	35
Figura 14 – Sombras de polimento em processo de porcelanato (Sousa, 2007) 35	
Figura 15 – Evolução do brilho no decorrer do processo de polimento de porcelanato (Huchings, 2004).....	36
Figura 16 - Princípio de Rayleigh (Sousa, 2007).....	37
Figura 17 - Evolução do brilho e rugosidade com a redução do tamanho médio de partícula abrasiva (Vázquez, 2008). ....	38
Figura 18 - Influência do pH sobre a dureza superficial da alumina (McColm, 1990). ....	41
Figura 19 - Imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura do risco causado por um indentador de diamante em teste de risco com 2 N de carga normal (Zum Ghar, 1987). ....	43
Figura 20 - Imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura do metal amorfo 40Fe-38Ni-4Mo-18B ensaiado em teste de risco com indentador de diamante com carga de 5 N (Zum Ghar, 1987). ....	44



Figura 21 - Microscopia eletrônica de varredura do ferro fundido cinzento lamelar após ser submetido a teste de risco com indentador de diamante e carga normal de 2 N (Zum Gahr, 1987). .....	45
Figura 22 - Aspecto geral esclerômetro UFSC .....	59
Figura 23 - Sensor com acoplamentos e indentador. ....	60
Figura 24 – Interface do controle manual do software desenvolvido para o esclerômetro.....	62
Figura 25 – Interface de ensaio do software desenvolvido para o esclerômetro. ....	63
Figura 26 - Força aplicada em uma partícula em movimento circular uniforme .....	48
Figura 27 - Carga atuante sobre corpos em movimento circular uniforme .....	49
Figura 28 - Máquina universal para ensaios tribológicos.....	52
Figura 29 - Ferramenta abrasiva utilizada nos ensaios .....	53
Figura 30 - Cinemática do processo em vista lateral. ....	55
Figura 31 - Cinemática do processo em vista superior. ....	55
Figura 32 - Zoneamento das medições de brilho e desgaste .....	57
Figura 33 - Direção dos cortes de blocos abrasivos. ....	58
Figura 34 - Distância entre partículas abrasivas .....	58
Figura 35 - Esclerômetro com relógio comparador para determinação de planos em amostras. ....	65
Figura 36 - Evolução do pH do fluido de corte com o tempo de processamento .....	67
Figura 37 - Influência da variação do pH na potência elétrica consumida.....	68
Figura 38 - Influência do pH do fluido de corte na potência elétrica consumida. ....	69
Figura 39 - Influência do número de ciclos na potência média consumida pelo motor elétrico.....	70
Figura 40 - Relação entre a potência consumida e o sistema de alimentação de fluido de corte.....	71
Figura 41 - Superfície gerada com os valores de brilho.....	72
Figura 42 - Influencia do pH no brilho medido a 60° de reflexão. ....	73
Figura 43 - Evolução do brilho em diferentes composições de água. ....	74

Figura 44 - Influência do pH no brilho medido a 20° de reflexão. ....	75
Figura 45 - Evolução do brilho em diferentes composições de água. ....	75
Figura 46 – Evolução do brilho com o número de ciclos.....	76
Figura 47 – Evolução do brilho para diferentes ciclos.....	77
Figura 48 - Desgaste da superfície.....	78
Figura 49 – Livre caminho médio entre partículas em bloco abrasivo de 36 Mesh. ....	80
Figura 50 - Livre caminho médio entre partículas em bloco abrasivo de 100 Mesh. ....	80
Figura 51 – Livre caminho médio entre partículas em bloco abrasivo de 200 Mesh. ....	81
Figura 52 - Força normal em ensaio de riscamento a 0,01 mm/s.....	82
Figura 53 - Força normal em ensaio de riscamento a 0,01 mm/s.....	83
Figura 54 – Ensaio de riscamento com velocidade de 0,01 mm/s com ampliação de 16x. ....	84
Figura 55 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,1 mm/s com ampliação de 16x. ....	85
Figura 56 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,01 mm/s com ampliação de 50x. ....	86
Figura 57 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,1 mm/s com ampliação de 50x. ....	87
Figura 58 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,01 mm/s com ampliação de 100x. ....	88
Figura 59 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,1 mm/s com ampliação de 100x. ....	88

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Classificação de materiais cerâmicos de acordo com seu processamento.....	22
Tabela 2 - Classificação de cerâmicas de acordo com a absorção de água .	28
Tabela 3 - Influência da vazão de água em aspectos superficiais de placas de porcelanato (Bittencourt, 2002) .....	39
Tabela 4 - Força normal durante riscamento.....	83
Tabela 5 - Largura dos riscos .....	86

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1.	OBJETIVOS .....	18
1.1.1.	Objetivo Geral .....	18
1.1.2.	Objetivos Específicos .....	19
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
2.1.	CERÂMICA DE REVESTIMENTO .....	21
2.1.1.	Matérias-primas .....	22
2.1.2.	Moagem e homogeneização. ....	22
2.1.3.	Atomização.....	23
2.1.4.	Prensagem.....	25
2.1.5.	Secagem.....	25
2.1.6.	Queima .....	26
2.1.7.	“Polimento” .....	27
2.2.	PORCELANATO.....	28
2.3.	USINAGEM COM FERRAMENTA DE GEOMETRIA NÃO DEFINIDA .....	30
2.3.1.	Retificação.....	30
2.3.2.	Brunimento .....	31
2.3.3.	Lapidação.....	32
2.3.4.	Polimento .....	32
2.4.	PROCESSO DE “POLIMENTO DE PORCELANATO” .....	33
2.4.1.	Brilho.....	36
2.4.2.	Fluido de corte .....	38
2.5.	DESGASTE E DUREZA EM MATERIAIS CERÂMICOS .....	39
2.6.	MECANISMOS DE REMOÇÃO DE MATERIAL .....	42
2.6.1.	Microsulcamento .....	42
2.6.2.	Micro-Corte .....	43
2.6.3.	Micro-Lascamento .....	44

2.7.	RELAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM GEOMETRIA DEFINIDA E GEOMETRIA NÃO DEFINIDA. ....	46
2.7.1.	<b>Esclerometria</b> .....	47
2.8.	RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA CONSUMIDA E COEFICIENTE DE ATRITO. ....	47
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
3.1.	ENSAIOS COM GEOMETRIA NÃO DEFINIDA .....	51
3.2.	LIVRE CAMINHO MÉDIO EM BLOCOS ABRASIVOS.....	57
3.3.	ENSAIO DE RISCAMENTO .....	58
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>67</b>
4.1.	ENSAIOS COM FLUIDO DE CORTE .....	67
4.1.1.	<b>Resultados</b> .....	67
4.1.2.	<b>Discussões</b> .....	78
4.2.	LIVRE CAMINHO MÉDIO EM BLOCOS ABRASIVOS.....	79
4.3.	ENSAIO DE RISCAMENTO .....	81
4.3.1.	<b>Resultados</b> .....	81
4.3.2.	<b>Discussões</b> .....	89
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>95</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Após o desenvolvimento da queima rápida (biqueima e monoqueima), que caracterizou o final dos anos 70 e boa parte dos anos 80, a segunda grande revolução no setor cerâmico deu-se com a concepção do grés porcelanato (Heck, 1996).

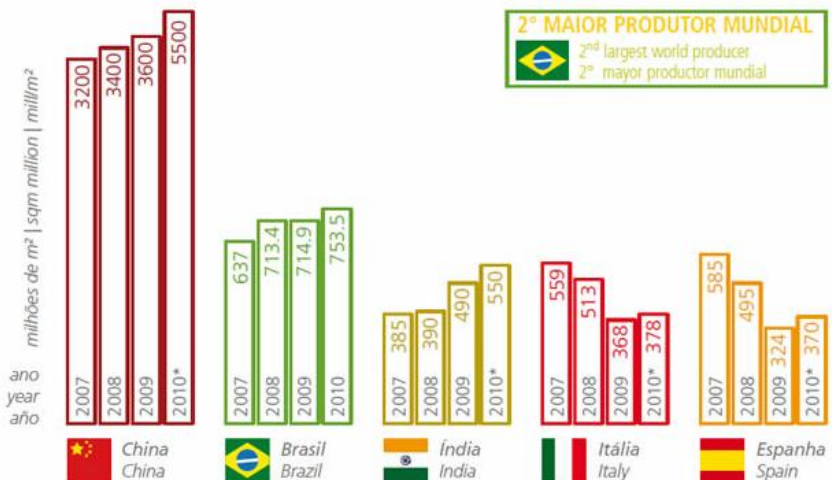
O porcelanato foi introduzido ao mercado no fim dos anos 80 por Fiandre, uma das principais fabricantes italianas de revestimento cerâmico (Abadir, 2002).

A produtividade da indústria cerâmica Brasileira vem crescendo, como pode ser observado na Figura 1, extraída do website da ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento), tendo o país alcançado a marca de segundo maior produtor do mundo.

### Principais produtores mundiais 2007–2010

Top manufacturing countries 2007-2010

Principales productores mundiales 2007-2010



\*Estimativa (considerando somente a produção em território nacional).

\*Estimate (considering only production in national territory).

\*Cálculo (considerándose solamente la producción en el territorio nacional).

Figura 1 - Maiores produtores de cerâmica de revestimento do mundo (ANFACER)

Um dos produtos nacionais de destaque no mercado de cerâmicas de revestimento é o porcelanato, que, seguindo a tendência do setor, vem crescendo em produção ano após ano. Este crescimento aliado a novas tecnologias e maior valor agregado do produto, torna a produção de porcelanatos ainda mais atraente para o setor ceramista.

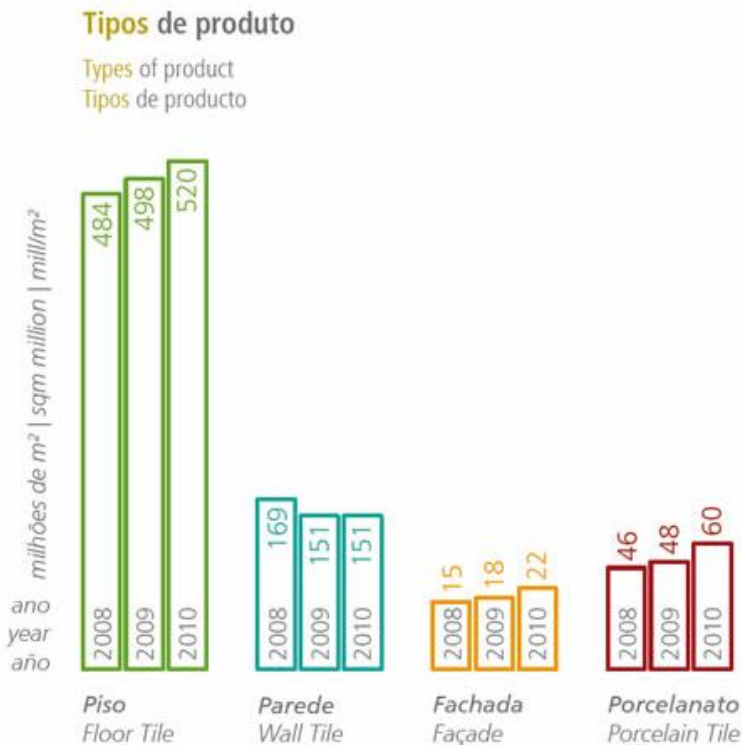


Figura 2 - Produção de cerâmica de revestimento por tipo de produto (ANFACER)

Mesmo com inovações tecnológicas a indústria cerâmica tipicamente consome uma grande quantidade de materiais e energia para a produção de porcelanato, gerando ainda resíduos líquidos e sólidos (Kutzt, 2010).



Por ser uma das principais características do porcelanato, o brilho recebe atenção especial durante o processo de fabricação deste tipo de cerâmica, sendo uma das etapas produtivas dedicada à obtenção desta propriedade, que por vezes é responsável pelo descarte do produto final.

Segundo Hutchings (2004), são gastos, por metro quadrado, de 20 a 40 litros de água e de 0,5 a 0,6 kg de ferramental, durante o processo de “polimento de porcelanatos”, que contribuem para que esta etapa de manufatura corresponda a 40% do custo final do produto.

Parte destes gastos é inerente ao processo, porém uma grande contribuição também é dada pela falta de conhecimento do mesmo, facilmente perceptível pelo empirismo empregado na indústria e a escassez de publicações sobre o assunto.

Em um dos estudos para melhor compreensão da energia consumida no processo de “polimento de porcelanatos”, Cantavella (2004), mostrou que o coeficiente de atrito possui uma influência direta na potência consumida pelo processo, abrindo mais lacunas de conhecimento sobre o processo.

Bittencourt (2002) mostrou que existe, até certo ponto, uma influência benéfica no aumento da vazão de água, utilizada como fluido lubrificante, durante o processamento de placas de porcelanato. No mesmo trabalho, realizado na indústria, resultados mostram que a renovação da água utilizada no processo de “polimento” causa efeito benéfico na superfície final do porcelanato. Com base nisto foram realizados estudos, relacionado a dureza da água (quantidade de íons de carbono e magnésio em solução aquosa) com a qualidade final da superfície do produto, porém os resultados não mostraram-se satisfatórios, deixando outras variáveis como possíveis causadoras desta melhora.

No entanto, McCollm (1990), demonstrou haver relação entre o pH de um fluido adsorvido na superfície de dado material cerâmico e a dureza deste.

Por sua vez, Sousa (2006 – 2011) tem estudado a influência da cinemática do processo no brilho final dos produtos através de simulações com dados extraídos das indústrias.

Com isto foi verificada a necessidade do estudo de fatores que influenciam a obtenção de uma importante característica do porcelanato, o brilho, que pode sofrer alterações tanto por motivos mecânicos quanto por motivos físico-químicos.

Com base na necessidade de novas tecnologias e maior conhecimento do processo de “polimento de porcelanato”, o governo brasileiro, através da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), aprovou um projeto em cooperação com a Alemanha, denominado BRAGECRIM (Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology), que visa a troca de conhecimento entre os países envolvidos, bem como o desenvolvimento da indústria nacional.

O presente trabalho recebeu suporte financeiro do referido projeto, sendo parte dos experimentos realizados no Departamento de Engenharia Mecânica (Maschinenbau) da Technische Universität Kaiserslautern, na Alemanha.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Obter informações acerca da variação de parâmetros físico-químicos inerentes ao processo de “polimento de porcelanato”, para que, através destas, possa ser otimizado o ganho de brilho neste, com auxílio de instrumentos desenvolvidos para a execução de ensaios envolvendo desgaste abrasivo.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Investigar a variação do pH da água utilizada no processo de “polimento de porcelanato”.
- Registrar em brilho, potência consumida e desgaste as possíveis alterações causadas pela variação do pH do fluido de corte utilizado no processo.
- Montar e instrumentar um novo sistema de aquisição de sinais para o esclerômetro disponível na UFSC.
- Verificar, através de esclerometria, a pressão de contato necessária para alterar o micromecanismo de remoção de material em placas de porcelanato.
- Mapear a distribuição de partículas abrasivas em blocos abrasivos utilizados no processo de “polimento de porcelanatos”.
- Correlacionar os resultados obtidos via esclerometria, com a distribuição de partícula dos blocos abrasivos.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. CERÂMICA DE REVESTIMENTO

A cerâmica de revestimento, ou placa cerâmica, é um material de construção civil utilizado para cobrir e dar acabamento em paredes e pavimentos, em ambientes residenciais, comerciais e industriais, e em locais públicos (Cabral, 2010).

Sua composição é, em sua maioria, argilosa, podendo conter ainda, feldspatos, silicatos, resíduos orgânicos, entre uma série de outros materiais ou impurezas, dependendo das exigências do produto.

A indústria de revestimentos, como o segmento mais dinâmico do setor cerâmico brasileiro, experimentou um crescimento robusto a partir dos anos 1990. (Cabral, 2010), como mostram os dados retirados do site da ANFACER, Figura 3.

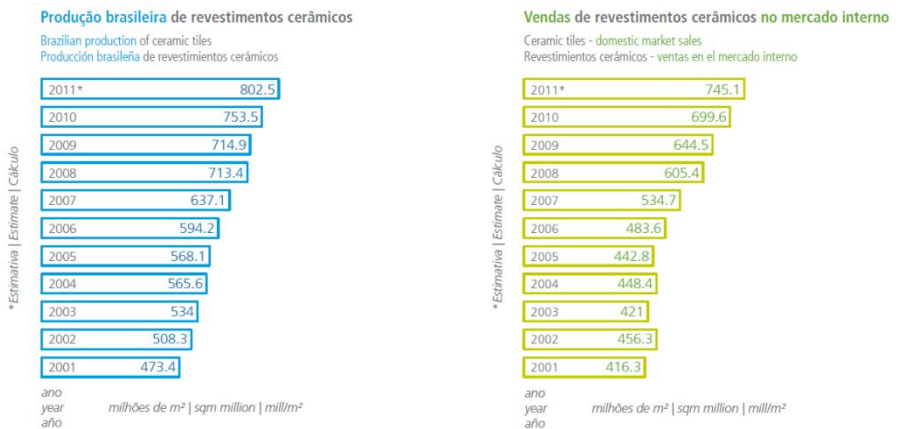


Figura 3 - Crescimento da produção de cerâmica de revestimento no Brasil (ANFACER, 2012)

Com o crescimento destacado da produção de cerâmicas de revestimento, o Brasil deve investir em novas tecnologias e estudos no setor, assim como uma normatização

mais rigorosa e que garanta a qualidade dos produtos nacionais.

As cerâmicas são classificadas, segundo a ABNT, de acordo com seu processo de fabricação, como mostra a tabela.

Tabela 1 - Classificação de materiais cerâmicos de acordo com seu processamento

Métodos de fabricação		
Extrudado	Prensado	Outros
A	B	C

As cerâmicas de revestimento são comumente fabricadas por processos de prensagem, seguindo, para via úmida, as seguintes etapas:

### 2.1.1. Matérias-primas

As matérias-primas são normalmente classificadas em três grupos para as cerâmicas de revestimento: As argilas, responsáveis por conferir plasticidade a verde, os feldspatos, que atuam como fundentes, e o quartzo, responsável pela estabilidade térmica e dimensional do produto.

### 2.1.2. Moagem e homogeneização.

O objetivo de qualquer processo de moagem é a diminuição do tamanho das partículas de um material sólido, tendo em vista o aumento da superfície específica para melhorar a velocidade de reação de determinada matéria-prima (por exemplo, durante a queima), misturar de um modo mais uniforme vários materiais (durante o processo de preparação de uma pasta) e permitir a obtenção de um pó com as características ideais de utilização (Ribeiro e Abrantes, 2001).

Para este processo são utilizados moinhos de bolas, que são cilindros ocos, onde são adicionadas as matérias primas, defloculantes e água, além de bolas de alumina ou ágata. Este cilindro é apoiado por um eixo em posição horizontal, como mostra a Figura 4, e nele é aplicado torque através de um

motor elétrico, fazendo-o rotacionar e agitando a mistura em seu interior.

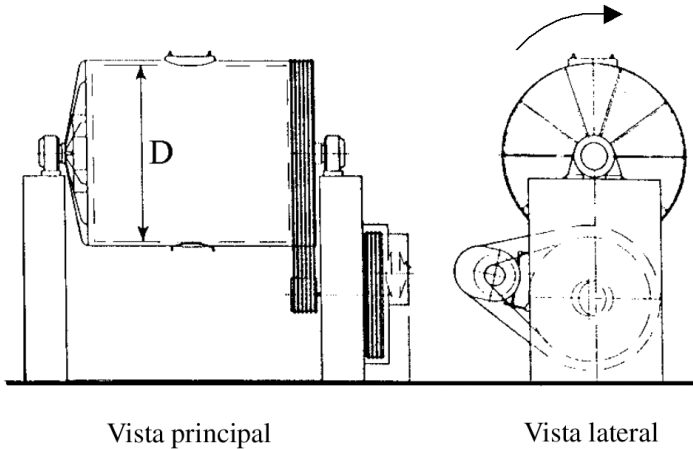


Figura 4 - Moinho de bolas (Ribeiro, 2001)

### 2.1.3. Atomização

A suspensão resultante da moagem, conhecida como barbotina, é aspergida em presença de um fluxo de ar quente, para secagem e formação de aglomerados, chamados industrialmente de pó atomizado (Esposito, 2005). Este processo é realizado em um equipamento conhecido como atomizador, que possui o aspecto da Figura 5.

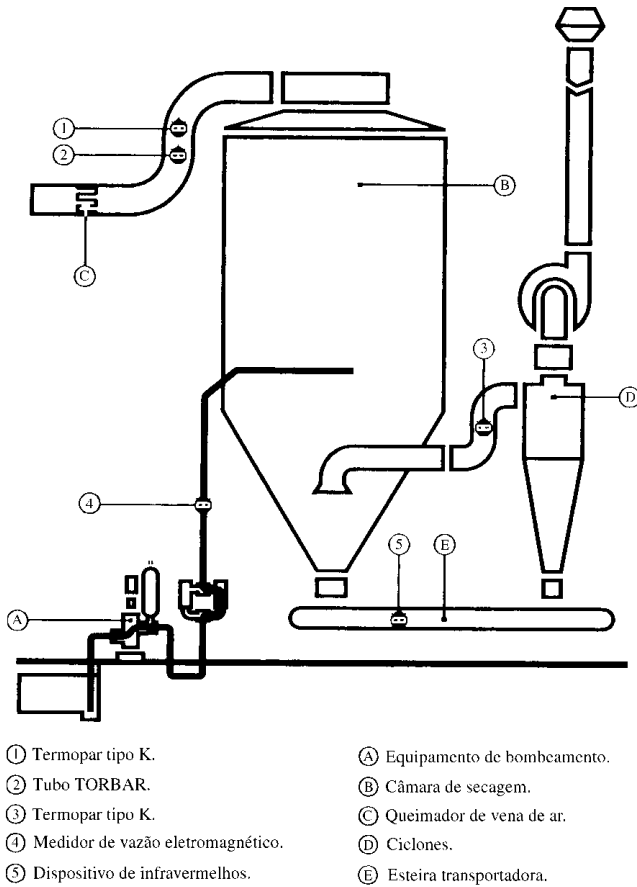


Figura 5 - Atomizador (Negre, 2000)

A atomização é utilizada comumente no processamento de materiais cerâmicos para que se atinja um pó uniforme e com bom escoamento (Richerson, 1992).



### 2.1.4. Prensagem

A prensagem é atingida pela alocação do pó atomizado em uma matriz e aplicação de pressão para alcançar a compactação (Richerson, 1992).

Nesta etapa é dada forma ao produto final, sendo que deve ser considerada a contração sofrida nos processos subsequentes.

A etapa de prensagem pode ser dividida em cinco etapas, como descreve Albaro (2001), em: preenchimento do molde, primeira prensagem, desaeração, segunda prensagem e extração da peça.

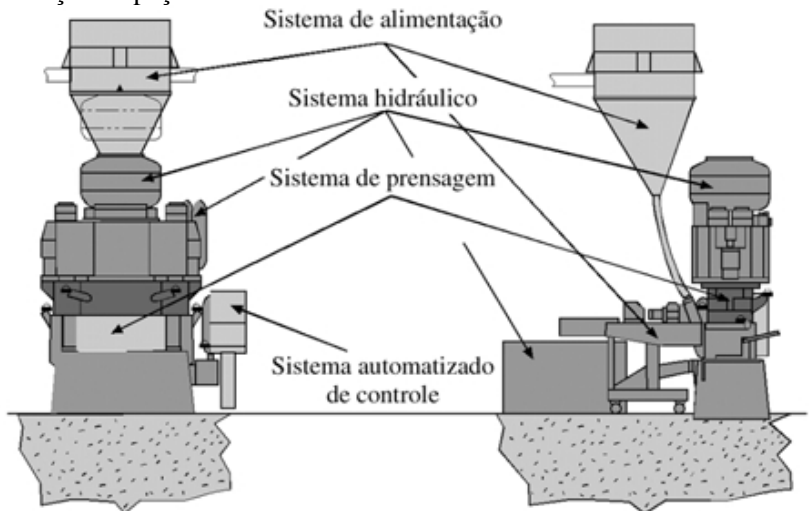


Figura 6 - Prensa utilizada no processo produtivo. (Albaro, 2001)

### 2.1.5. Secagem

Após a prensagem a peça cerâmica encontra-se com um teor de umidade de aproximadamente 6%, sendo necessário que a peça conformada passe por uma estufa para que sua umidade seja reduzida, aumentando sua resistência mecânica e evitando defeitos futuros devido à evaporação abrupta da água presente na peça.

### 2.1.6. Queima

Nesta etapa a placa cerâmica passa por um forno contínuo de rolos. O ciclo de queima nestes fornos oscila usualmente de 35 a 70 minutos, dependendo do tipo de produto e tamanho da placa. O pico de temperatura está entre 1100 e 1200 °C, para cerâmicas esmaltadas, e depende principalmente do tipo de produto. (Vázquez, 2008).

A densificação de um compactado cerâmico particulado é tecnicamente chamada de sinterização. É essencialmente a remoção dos poros entre as partículas iniciais (acompanhada da contração do componente), combinada com o crescimento e criação de ligações fortes entre partículas adjacentes (Richerson, 1992).

Para que ocorra sinterização é necessário que ocorra transporte de massa. Existem dois mecanismos para que isto ocorra, a difusão e o fluxo viscoso, sendo que muitas vezes estes acontecem simultaneamente.

Nas cerâmicas de revestimento em geral, especialmente nos porcelanatos devido à sua composição, o fluxo viscoso exerce forte influência sobre a densificação e microestrutura final da peça. Neste mecanismo, a fase líquida formada molha a fase sólida na temperatura de sinterização.

Durante o processo, enquanto a temperatura aumenta a formação de fase líquida também aumenta (iniciando em aproximadamente 900 °C), fazendo com que as partículas se unam, baixando a porosidade total e alterando o formato e tamanho dos poros. Temperaturas suficientemente altas (acima de 1180 °C) fecham os poros e reduzem a densidade aparente. Entretanto, temperaturas excessivamente altas aumentam a pressão dos gases acima da pressão capilar no interior dos poros, levando ao aumento destes (Shu, 2012).

A Figura 7 mostra os estágios da sinterização em um particulado poroso.

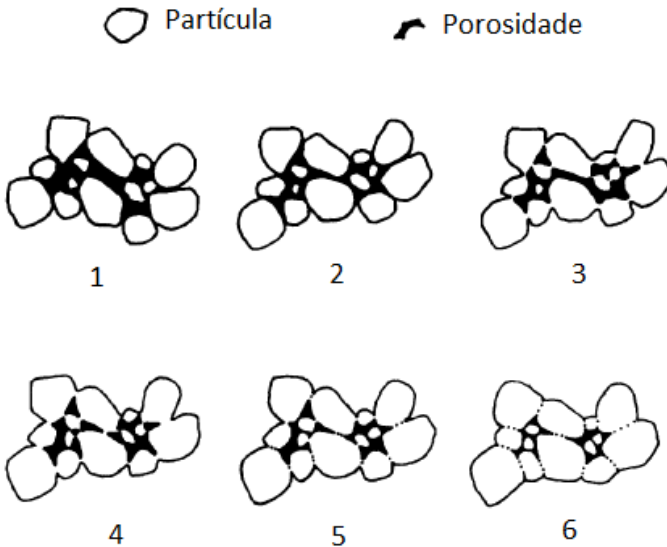


Figura 7 - Estágios de sinterização. (Adaptado de Richerson, 1992)

O primeiro estágio corresponde ao estado inicial pós-compactação. No segundo ocorre um rearranjo das partículas, seguido da formação de contatos entre as partículas, chamados pescoços. O quarto estágio é marcado pela contração linear e crescimento dos pescoços. No quinto ocorre o aumento das ligações entre partículas, sendo o ciclo finalizado com a continuidade no crescimento destas e também dos pescoços, retração volumétrica e crescimento de grão.

Após a queima o produto encontra-se com sua microestrutura final e suas propriedades mecânicas são fortemente dependentes desta etapa do processamento.

### 2.1.7. “Polimento”

Esta etapa é aplicada majoritariamente na classe dos porcelanatos não esmaltados, sendo que para os outros produtos não é corriqueira sua utilização.

Neste processo a placa cerâmica é submetida a operações de desbaste superficial para a obtenção de uma superfície com maior brilho.

Por sua vez os revestimentos cerâmicos estão classificados, segundo a ABNT (Tabela 2), de acordo com sua absorção de água, sendo que, o grupo Ia corresponde aos porcelanatos.

Tabela 2 - Classificação de cerâmicas de acordo com a absorção de água

Grupo	Absorção de água
Ia	$0,0 < x \leq 0,5$
Ib	$0,5 < x \leq 3,0$
IIa	$3,0 < x \leq 6,0$
IIb	$6,0 < x \leq 10,0$
III	$x > 10$

## 2.2. PORCELANATO

O porcelanato é um produto cerâmico declarado pela Norma ISO 13006/NBR13818 com especificação B1a significando material prensado com absorção de água menor ou igual a 0,5% (Tabela 2) (Rosso, 2005).

Como mostra a Figura 8, o porcelanato possui uma composição triaxial de argila ou caulim, quartzo e feldspato. A fração de argila é responsável pela confecção de plasticidade à mistura a seco. O feldspato é o fundente, responsável pela formação da fase vítrea reduzindo a porosidade aberta à quase zero. Por fim o quartzo promove a estabilidade térmica e dimensional graças ao seu alto ponto de fusão (Sánchez, 2010) (Manfredini, 1995).

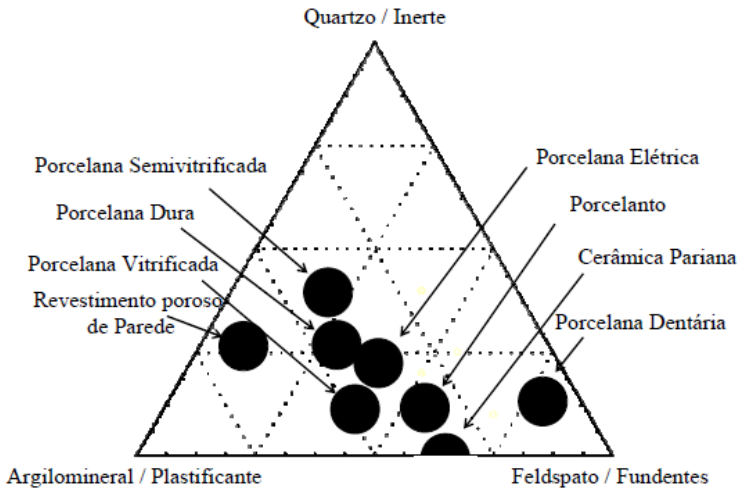


Figura 8 - Composição de alguns materiais cerâmicos (De Noni, 2007)

Dentro da classe dos porcelanatos, ainda existem duas diferentes classificações, que são: técnico e esmaltado, sendo que para o primeiro grupo a tolerância máxima de absorção de água é de 0,1%, enquanto para o segundo a tolerância é de 0,1% a 0,5% de absorção d'água, estipulados pela norma ABNT NBR 15.463.

Esposito (2005) classifica o porcelanato como o melhor produto desenvolvido no setor de cerâmica de revestimento.

Tal afirmação tem como base as características de seu alto brilho e resistência superior às pedras naturais (Sánchez, 2003), sendo muitas vezes utilizado para substituí-las.

Sánchez (2010) ainda define o porcelanato como um produto muito compacto, completamente vitrificado e com porosidade extremamente baixa. Esta baixa porosidade é uma característica essencial, que fornece um material com excelentes propriedades mecânicas e químicas, tornando-se resistente a baixas temperaturas e, portanto, extremamente útil para o revestimento exterior e revestimento de paredes em climas frios. É também altamente resistente a substâncias químicas e agentes de limpeza. É resistente à abrasão e tem

um limite de ruptura elevado, tornando-o ideal para áreas altamente trafegadas e industriais, além de ser fácil de limpar, sendo utilizado em áreas de pavimentação onde a higiene é de importância primordial.

Uma matriz vítrea abundante, aproximadamente entre 50 a 65%, com partículas dispersas além de uma porosidade total entre 3 a 7%, caracteriza tecnicamente uma placa de porcelanato. As partículas citadas como dispersas são cristalinas, sendo constituídas comumente por feldspatos não fundidos (0-10%), mulita (< 10%), quartzo (10 – 25%) e, utilizados como opacificantes, óxido de alumínio ou silicato de zircônio (0 – 10%). Dos elementos constituintes de uma placa de porcelanato, nem os feldspatos nem o quartzo agregam plasticidade em presença da umidade. Correspondendo às partículas de maiores dimensões na mistura (63µm), facilitam a saída de água durante a secagem das peças, bem como o empacotamento de partículas durante o processo de compactação. As partículas cristalinas obtidas durante a queima ou provenientes desses materiais possuem um papel considerado importante, agindo como reforço microestrutural. Em função dos materiais que compõem o porcelanato ele pode ser enquadrado na classe dos materiais cerâmicos triaxiais.

### 2.3. USINAGEM COM FERRAMENTA DE GEOMETRIA NÃO DEFINIDA

Processos de usinagem de geometria não definida são técnicas que empregam partículas granulares muito duras, e sem formato individualmente definido, para usinagem, abrasão ou polimento para modificar a forma e a textura superficial de peças fabricadas (Marinescu, 2004).

#### 2.3.1. Retificação

Neste processo, é empregado um disco abrasivo, ou rebolo, que gira em altas velocidades (Marinescu, 2004).

A Figura 9 mostra o processo de retificação. Através desta é possível concluir que as partículas abrasivas, presente

em todo o disco, não se encontram em constante contato com a superfície a ser usinada.

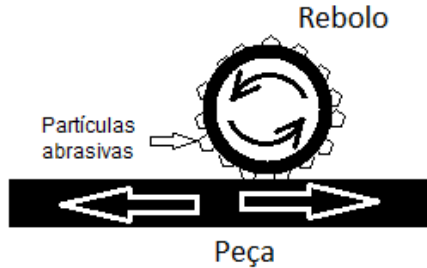


Figura 9 - Processo de retificação

### 2.3.2. Brunimento

O brunimento, assim como a retificação, utiliza partículas fixadas em uma matriz ligada. Este processo é amplamente utilizado para alcançar superfícies no interior de cilindros (como, por exemplo, a “retificação” de motores de combustão interna). Normalmente as velocidades utilizadas são de 0,2 a 2 m/s (Marinescu, 2004).

Na Figura 10 é possível ver um corte transversal de uma peça em processamento. Diferentemente da retificação, é possível perceber que as partículas abrasivas estão em constante contato com a peça. Esta é uma importante característica para que se possa classificar o processo comumente conhecido como “polimento de porcelanato”, que será discutido adiante.

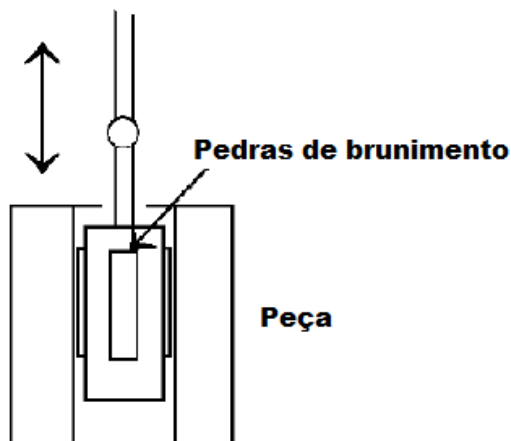


Figura 10 - Processo de brunimento (Marinescu, 2004)

### 2.3.3. Lapidação

Nesta técnica, abrasivos soltos são colocados entre uma superfície rígida e a peça a ser usinada. As superfícies experimentam deslocamento relativo entre elas, promovendo o movimento das partículas. Este movimento deve ser observado com atenção, pois as formas de desgaste variam muito de acordo com o mesmo. A Figura 11 demonstra o aspecto geral do processo de lapidação (Marinescu, 2004).

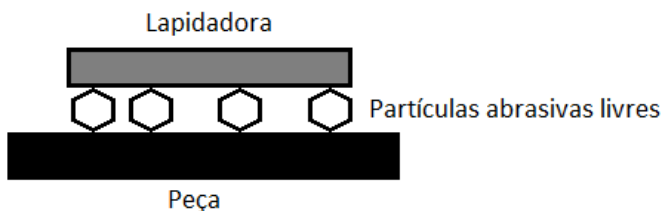


Figura 11 - Processo de lapidação

### 2.3.4. Polimento

O polimento, assim como a lapidação, também emprega abrasivos livres. Neste caso, a pressão é aplicada no abrasivo através de um pano macio, ou uma superfície



conformável, como mostra a Figura 12. Por ser maleável, o pano de polimento, faz com que os abrasivos tomem a forma da superfície, reduzindo a penetração dos mesmos, e causando ganho de brilho na peça a ser usinada (Marinescu, 2004).

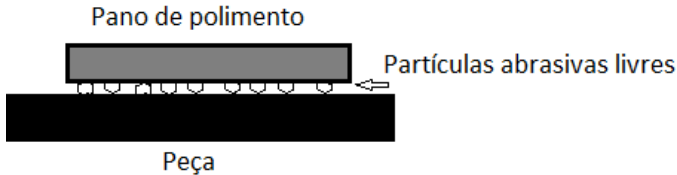


Figura 12 - Processo de polimento

#### 2.4. PROCESSO DE “POLIMENTO DE PORCELANATO”

Por tratar-se de um material que sofre um processo de amolecimento, o porcelanato, após sua queima, sai de sua faixa de tolerância dimensional, bem como seu acabamento superficial, fazendo com que seja necessária a utilização de processos de acabamento superficial (Alves, 2010).

Inicialmente a placa de porcelanato é submetida a uma retificação a fim de ajustar suas dimensões laterais. Por ser uma etapa do processamento que visa meramente o desbaste, este não será avaliado neste trabalho.

Posteriormente a placa é submetida a um processo conhecido industrialmente como polimento, pois visa à obtenção de brilho às peças. Especificações comerciais típicas requerem um nível de brilho final de 65 a 70% (Hutchings, 2004). Durante o processamento, as placas de porcelanato são desgastadas em mais de 10% de sua espessura, a fim de alcançar os valores de brilho estipulados pela indústria (Hutchings, 2006).

O processo de “polimento de porcelanatos” é realizado em um equipamento, conhecido como linha de polimento, dotado de várias cabeças polidoras onde são montados blocos abrasivos, constituídos majoritariamente de matriz cimentícia de oxiclreto de magnésio e partículas duras de carbetto de silício (Sousa, 2007), que em contato com as peças em rotação

alta, velocidade controlada e presença de água definem o acabamento superficial das placas de porcelanato (Bittencourt e Benicá, 2002).

Vale observar que, como descrito no item anterior, o processo de polimento é realizado por partículas livres, enquanto o processo de “polimento de porcelanatos” é realizado com blocos abrasivos. Outra característica importante é o fato da ferramenta abrasiva estar completamente em contato com a placa durante o processo, o que é uma característica do processo de brunimento. Sendo assim, o processo tratado em questão pode ser definido para a área técnica como um processo de brunimento plano rotativo, porém, como o brilho é o resultado esperado do processo de “polimento de porcelanatos”, adotou-se industrialmente esta denominação para o mesmo e esta será utilizada neste trabalho.

Os materiais abrasivos são utilizados no processo em uma ordem decrescente de tamanho médio de partícula (Sousa, 2007) (Wiggers, 2007) (Bittencourt, 2002). Comumente as indústrias cerâmicas contam com mais de vinte cabeças polidoras por linha de “polimento” (Sousa, 2007).

Como descrito por Sousa (2007), Figura 13, usualmente uma linha de “polimento” é constituída por três movimentos: rotação dos cabeçotes de “polimento”, oscilação lateral e movimento axial (escoamento da produção).

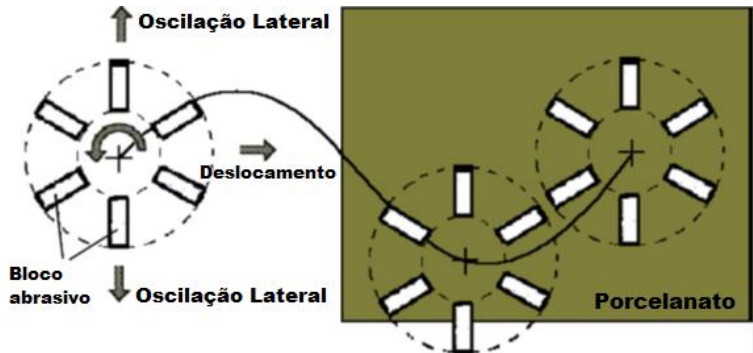


Figura 13 - Cinemática do processo de “polimento” de porcelanato (Adaptado de Sousa, 2007)

A cinemática descrita gera, como observado por Sousa (2007), defeitos nos porcelanatos conhecidos como sombras de “polimento”, que são áreas com diferentes valores de brilho, causadas pelo número diferenciado de contatos entre abrasivos e placa cerâmica durante o processamento.

Equipamentos de “polimentos” antigos não possuem o movimento de oscilação lateral, acentuando ainda mais o tipo de defeito descrito, como mostra a Figura 14, onde Sousa (2007) mostrou, através de simulação, que a área de maior brilho (região mais clara da figura) corresponde à de maior número de contatos abrasivos com a placa de porcelanato.

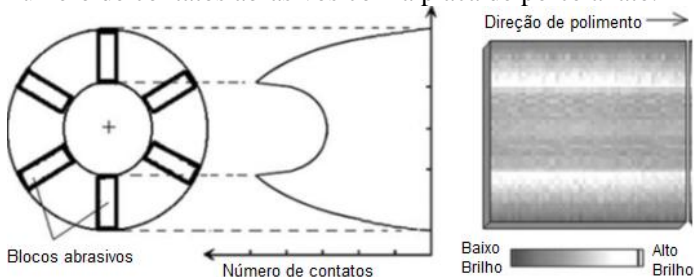


Figura 14 – Sombras de “polimento” em processo de porcelanato (Sousa, 2007)

Para que o brilho seja obtido de maneira mais efetiva, a granulometria empregada nas partículas abrasivas diminui

com o avanço da peça no processo, que é assim projetado para que em seu início ocorra maior remoção de material, associada ao refinamento das asperidades da superfície, sem muito ganho de brilho, e ao final ocorra um maior ganho dessa propriedade.

A Figura 15 mostra a relação entre o tamanho da partícula do abrasivo e o brilho obtido no “polimento” do porcelanato, verificado por Hutchings (2004).

É possível perceber que para tamanhos de partículas de aproximadamente 300 a 1000 mesh, existe um ganho substancial de brilho, evidenciando uma provável alteração envolvida nos mecanismos de remoção de material, que antes de 300 mesh, mostram-se pouco eficientes no aumento desta propriedade, assim como após 1000 mesh.

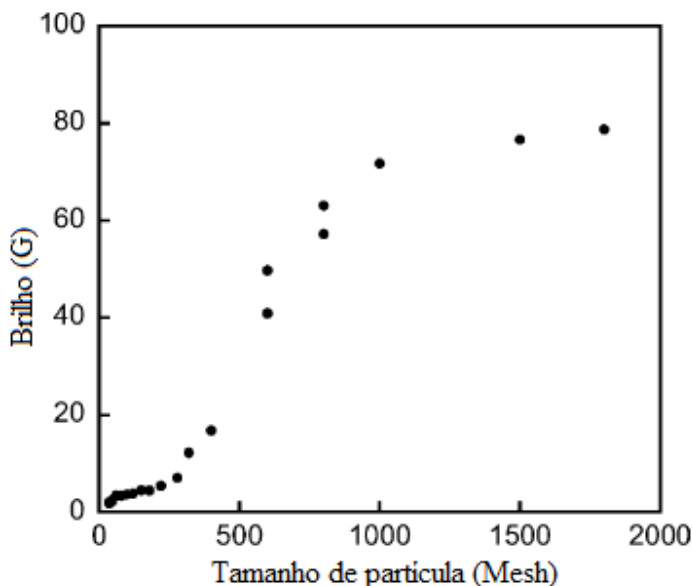


Figura 15 – Evolução do brilho no decorrer do processo de “polimento de porcelanato” (Huchings, 2004)

#### 2.4.1. Brilho

O principal objetivo do processo de “polimento” é a obtenção de uma superfície lisa e especular (Wiggers, 2007). Estas características são necessárias para que se obtenha superfícies com brilho requerido pela indústria.

Esta propriedade, por sua vez, é caracterizada pela capacidade de uma superfície, quando avaliada por um observador, de refletir a luz incidente predominantemente em uma mesma direção, chamada direção especular (Sousa, 2007).

Porém, superfícies rugosas não refletem a luz apenas na direção especular, mas refletem difusamente em outras direções, reduzindo sua capacidade em refletir um objeto (Kigle-Boecker, 1995).

Para avaliar se a reflexão da luz ocorre de forma difusa ou especular, é comumente adotado o critério de Rayleigh, que considera que a presença de asperidades na superfície gera diferentes caminhos óticos em ondas de feixes coerentes e adjacentes, resultando em uma diferença de fases entre estas ondas, Figura 16. A superfície deve então ser considerada lisa se a altura destas asperidades, geralmente representadas pela rugosidade medida  $R_a$  não implicar uma diferença de fase menor que  $\frac{\pi}{2}$  (Sousa, 2007).

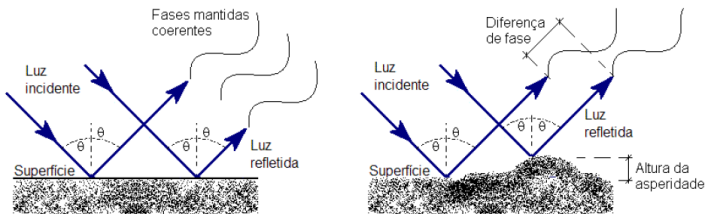


Figura 16 - Princípio de Rayleigh (Sousa, 2007)

Com isto o processo de “polimento de porcelanatos” consiste na redução das asperidades da superfície (rugosidade) em níveis onde exista a predominância de reflexão especular.

Vázquez (2008) correlacionou a rugosidade e o brilho final com a redução do tamanho médio de partículas abrasivas

empregadas durante o processo de “polimento de placas de porcelanato”, como mostra a Figura 17.

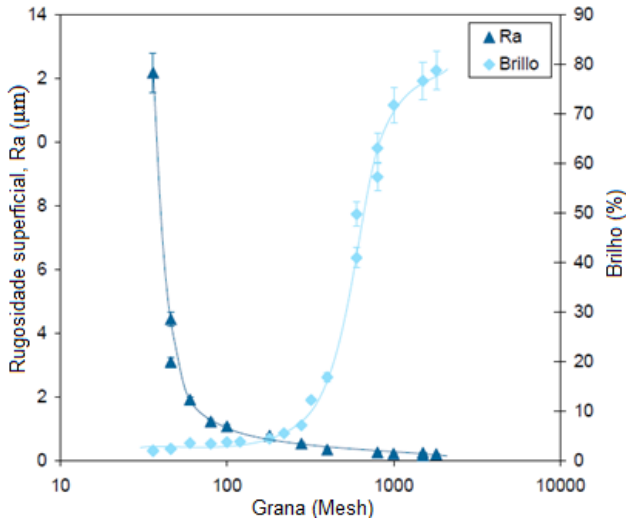


Figura 17 - Evolução do brilho e rugosidade com a redução do tamanho médio de partícula abrasiva (Vázquez, 2008)

#### 2.4.2. Fluido de corte

O primeiro objetivo na lubrificação é a redução da severidade tanto da tensão normal quanto da tensão cisalhante em uma superfície de contato sólida (Ludema, 1996).

Porém, a água utilizada no processo de “polimento de porcelanatos” não pode ser considerada apenas um lubrificante, mas sim um fluido de corte, uma vez que este possui também as funções de resfriamento e limpeza dos cavacos formados durante o processo (Marinescu, 2004).

Sendo assim, a vazão de água deve ser controlada para que se obtenha um bom escoamento do cavaco produzido, além de um resfriamento adequado da superfície.

Bittencourt (2002) demonstrou, através de testes variando a vazão de água em uma linha de “polimento”, que um aumento desta produz uma melhora sensível no brilho das peças, ao mesmo tempo em que reduz consideravelmente os

riscos causados por abrasivos soltos entre o bloco abrasivo e as placas de porcelanato, Tabela 3.

Tabela 3 - Influência da vazão de água em aspectos superficiais de placas de porcelanato (Bittencourt, 2002)

<b>Vazão [L/min]</b>	<b>Brilho [%]</b>	<b>Riscos [n<sup>o</sup>]</b>
10,1	91,9	8
15,0	92,7	5
17,3	93,7	5
18,8	94,3	4
20,2	94,8	1

## 2.5. DESGASTE E DUREZA EM MATERIAIS CERÂMICOS

Materiais cerâmicos são conhecidos por sua elevada dureza e fragilidade. Esta afirmação tem como base, além dos aspectos experimentais, a natureza de suas ligações, com forte predominância iônica ou covalente, que não permite o movimento de discordâncias responsável pela redução da energia interna dos materiais quando deformados.

Porém, nem sempre a dureza dos materiais está apenas associada à natureza de suas ligações, uma vez que, o movimento de discordâncias ou planos cristalográficos pode ser dificultado ou facilitado de acordo com o meio externo.

Estas interações entre material e ambiente, não são suficientemente fortes a ponto de que o material cerâmico seja considerado dúctil, tão pouco são atingidas alterações substanciais na dureza de camadas mais internas dos mesmos, porém, mudanças nos aspectos superficiais merecem ser observadas.

Fatores externos também podem influenciar o escoamento plástico em muitas cerâmicas, afetando a mobilidade de discordâncias próximas à superfície. Este exemplo de efeito mecanoquímico também é conhecido como Efeito Rebinder (Hutchings, 1992).

Com isso mecanismos de desgaste por deslizamento entre cerâmicas podem envolver fratura, efeitos triboquímicos e escoamento plástico (Hutchings, 1992).

Dentro deste escopo existem três maneiras importantes que o ambiente pode influenciar na dureza de materiais cerâmicos (efeitos mecanoquímicos), causando algum escoamento plástico em sua superfície:

- Quando uma carga superficial é produzida em um material cerâmico, um excesso de vacâncias de cargas opostas é criado em uma sub-superfície garantindo a neutralidade do corpo, ou seja, a superfície macroscópica funciona como um dipolo. Este dipolo produz um potencial eletroestático no corpo capaz de equalizar a diferença na energia de formações de vacâncias para cátions e ânions. Isto também produz um potencial na superfície que pode influenciar a energia necessária para movimentar uma discordância (McColm, 1990).

- Se um fônon (vibração mecânica) de alta energia é formado em condições mecanoquímicas específicas, as condições de tensão e ambiente combinadas podem levar a cerâmica ao cisalhamento. A transmissão de fônons de alta energia é mais comum em cerâmicas covalentes (McColm, 1990).

- A propagação de trincas pode ser alterada devido a condições químicas do ambiente (McColm, 1990).

Entretanto, o escoamento plástico é muito menos importante em cerâmicas, e efeitos triboquímicos são correspondentemente mais significativos do que em metais (Hutchings, 1992).

Reações triboquímicas podem modificar a interface de deslizamento através da formação de um filme adsorvido entre as superfícies (Hutchings, 1992). Com isto, observado que o coeficiente de atrito de um sistema, que é função da dureza dos materiais envolvidos, pode ser alterado por ação de um fluido. Brokes e Atkins (1964) mostraram, através de indentações Vickers, que o coeficiente de atrito pode ser



alterado por adsorção e que tal mudança pode alterar a distribuição de tensões em torno do indentador.

Alguns experimentos tentam explicar a mudança da dureza superficial em cerâmicas em meios aquosos, ou soluções líquidas. Um deles, relatado por McColm (1990), diz que a maior dureza, e menor taxa de desgaste, é alcançada por um pH que conduza o potencial zeta da superfície ao ponto isoelétrico, ou seja, zero. A Figura 18 mostra uma curva relacionando o pH com a dureza Knoop de uma amostra de alumina.

Espécies adsorvidas quimicamente ou fracamente adsorvidas fisicamente conduzem a diferentes efeitos. Por exemplo, ácido láurico fracamente adsorvido, com pH 9, não altera o potencial zeta, enquanto ácido oleico é fortemente adsorvido alterando o ponto isoelétrico para o pH 7,5 (McColm, 1990).

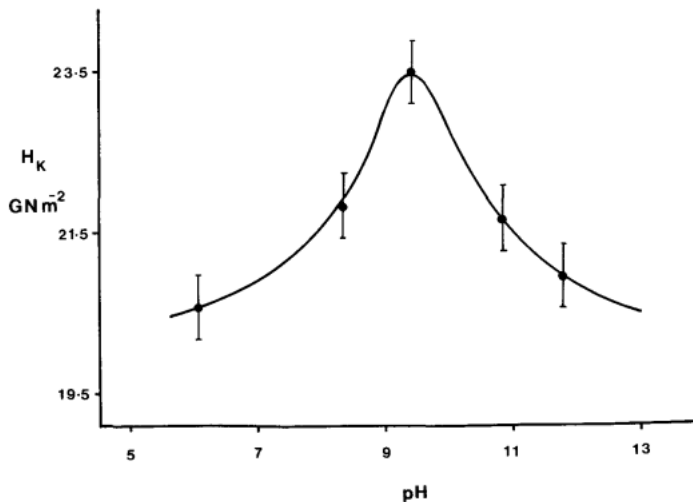


Figura 18 - Influência do pH sobre a dureza superficial da alumina (McColm, 1990)

## 2.6. MECANISMOS DE REMOÇÃO DE MATERIAL

Desgaste por abrasão é definido como o desgaste causado pela penetração de partículas duras, ou asperidades de uma superfície dura, em uma superfície sólida em movimento relativo.

A resistência à abrasão não é uma propriedade intrínseca do material, mas do sistema tribológico (Zum Gahr, 1987).

O desgaste pode ser definido como a remoção progressiva de material da superfície de um corpo pela ação de movimento relativo de outro corpo sobre o mesmo (Hutchings, 1992).

Durante o processo de usinagem, ocorre o desgaste da superfície da peça com conseqüente remoção de material da mesma. Esta remoção possui características diferentes de acordo com o material em processamento e também com os parâmetros do processo.

Para materiais frágeis, conhecer o mecanismo atuante durante a remoção de material é fundamental, pois as características finais da superfície da peça dependem diretamente do mesmo.

Os materiais podem ser removidos de acordo com os seguintes mecanismos:

### 2.6.1. Microsulcamento

Neste mecanismo, o material é deslocado para as adjacências do risco, sem causar remoção de material. Se realizada uma aferição do volume de material deslocado, será constatado que é igual ao volume do risco. A Figura 19 mostra o aspecto deste tipo de mecanismo

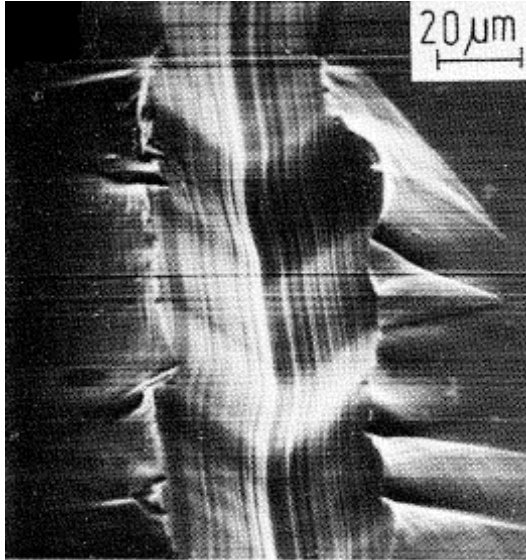


Figura 19 - Imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura do risco causado por um indentedor de diamante em teste de risco com 2 N de carga normal (Zum Ghar, 1987).

### 2.6.2. Micro-Corte

A tensão cisalhante causada pelo abrasivo excede a tensão de escoamento do material, causando remoção de micro-cavacos de forma dúctil. Este mecanismo é comumente observado em materiais dúcteis, mas dependendo do estado de tensões causado pela ação do processo de usinagem, pode ser observado em materiais frágeis.

A Figura 20 mostra um cavaco removido em condição de micro-corte. É possível observar que aparentemente o volume de material removido é igual ao volume do risco.

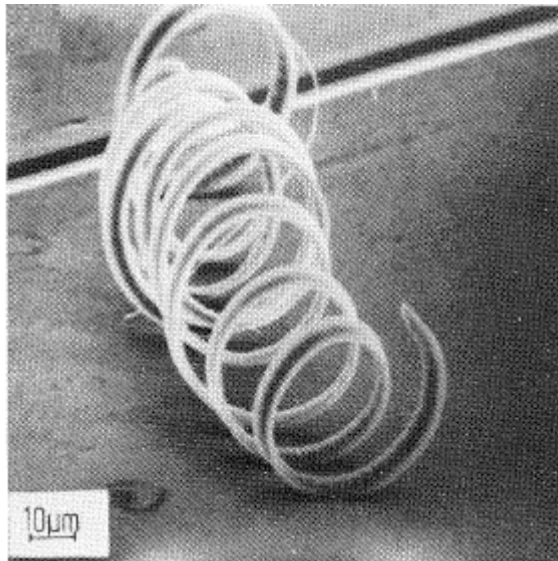


Figura 20 - Imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura do metal amorfo 40Fe-38Ni-4Mo-18B ensaiado em teste de risco com indetador de diamante com carga de 5 N (Zum Ghar, 1987)

### 2.6.3. Micro-Lascamento

Este é o mecanismo preponderante em materiais frágeis. Quando um abrasivo, ou uma ferramenta de corte exerce certa força sobre um material, são geradas tensões em diversas direções e sentidos. Para os materiais frágeis, é comum que as tensões normais e radiais geradas ultrapassem o limite de resistência, promovendo crescimento de trincas. Com isto, o desgaste passa a ser não uniforme e grandes placas de material podem ser arrancadas, gerando superfícies não controladas, como mostrado na Figura 21. Para evitar que este mecanismo ocorra, é necessário que a espessura de usinagem possua valores menores que o raio da ferramenta ou partícula abrasiva utilizada (Schroeter, 1997). Isto pode ser explicado, pois ferramentas com geometrias agudas tendem a formar tensões radiais no material, enquanto geometrias mais esferoidizadas tendem a formar tensões de compressão no ponto de contato, minimizando o crescimento de trincas.

É importante salientar que os mecanismos citados, salvo em ocasiões especiais, não ocorrem isoladamente, sendo dependentes do estado de tensões gerado em cada ponto da superfície do material, que por sua vez será determinado por variáveis como, força aplicada, geometrias da ferramenta, orientação cristalográfica do material a ser usinado, entre outros parâmetros.

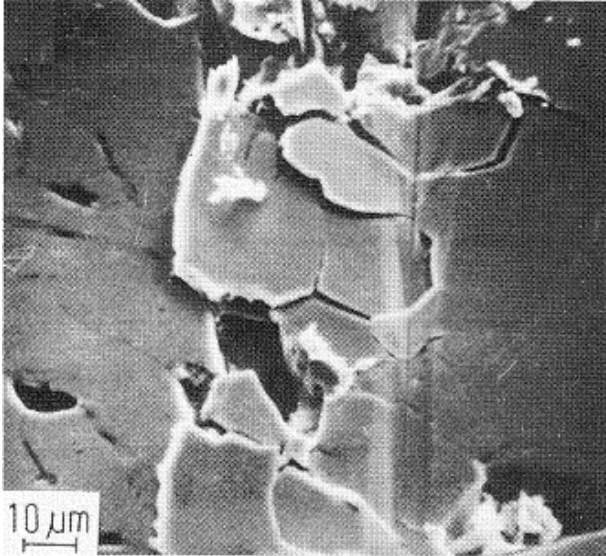


Figura 21 - Microscopia eletrônica de varredura do ferro fundido cinzento lamelar após ser submetido a teste de risco com indentador de diamante e carga normal de 2 N (Zum Gahr, 1987)

Uma maneira de identificar qual o mecanismo atuante é o fator  $f_{ab}$  que relaciona o volume de material removido na forma de cavaco com o volume de um risco realizado em um ensaio de riscamento, este fator pode ser descrito pela seguinte equação:

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v}$$

Onde  $A_v$  é a área do sulco gerado, medido através de um corte transversal e  $A_1$  e  $A_2$  são as áreas relativas ao volume de material deslocado para a lateral do sulco.

Quando  $F_{ab}$  é igual a zero, deduz-se que não houve perda de massa durante o processamento e logo, o mecanismo que atuou foi o de micro-sulcamento. Quando  $F_{ab} = 1$ , significa que todo o material removido é referente a largura do risco, evidenciando o micro-mecanismo de micro-corte. Já quando o fator é maior que 1 significa que foi removido mais material do que a largura do risco, mostrando a ação de trincas e eventual “desplacamento”, indicando a ação do mecanismo de micro-lascamento (Zum Gahr, K. H. 1987).

## 2.7. RELAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM GEOMETRIA DEFINIDA E GEOMETRIA NÃO DEFINIDA.

Uma partícula abrasiva é idealizada na forma de um indentador duro e com geometria simples e conhecida. Tal modelo, ainda que distanciado da realidade, facilita enormemente a compreensão dos fatores fundamentais atuantes no processo (Zum Gahr, 1981).

A base para compreender o processo de retificação é a ação de diversos pontos afiados, e um modelo pode ser elaborado pelo fenômeno causado por um único ponto (Hockey, 1979).

Por este modelo, uma partícula abrasiva pode ser assumida como um indentador duro e com geometria definida. Tal modelo, ainda que distanciado da realidade, facilita a compreensão das variáveis mais relevantes atuantes durante o processo (Zum Ghar, 1981).

Como visto anteriormente, o processo de “polimento de porcelanatos” é similar a um processo de retificação (utilizando partículas abrasivas dispersas em uma matriz rígida), permitindo que testes com riscamento utilizando apenas um ponto sejam utilizados para extrapolação dos fenômenos envolvidos.

Sendo assim, pode-se assumir que um bloco de abrasivos utilizado no processo de “polimento de

porcelanatos”, é constituído por diversos indentadores distribuídos aleatoriamente no corpo. Estes, durante o processamento, realizam movimentos curvilíneos e sobrepostos, como descrito por Sousa (2004).

O processo de “polimento de porcelanatos”, como descrito anteriormente, é composto por uma sequência de cabeçotes e estes possuem diferentes tamanhos médios de abrasivos neles instalados. Com isso, existe a possibilidade de que haja um diferente número de partículas abrasivas para cada diferente tamanho médio de abrasivos, criando diferentes números de contatos abrasivos com a placa a ser usinada.

### **2.7.1. Esclerometria**

A esclerometria, ou ensaio de riscamento, consiste em riscar a superfície de uma amostra, conhecendo-se a carga aplicada, velocidade de riscamento e a geometria do indentador. Os resultados são obtidos baseados na morfologia do risco e nas forças normal e tangencial aplicadas no ensaio (Sousa, 2006).

Em 1999, Gonçalves et. al. apresentaram a técnica esclerométrica como forma de substituir a aferição de dureza de placas cerâmicas, realizada através da escala Mohs.

Para a realização deste tipo de ensaio, é utilizado um equipamento denominado esclerômetro.

## **2.8. RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA CONSUMIDA E COEFICIENTE DE ATRITO.**

Em um sistema movimentado por um motor elétrico, existe uma potência elétrica associada ao mesmo que é dada por:

$$P_{(Watt)} = i \cdot V \quad (1)$$

Onde,  $i$  é a corrente elétrica e  $V$  a diferença de potencial aplicada no motor.

A potência também pode ter origem mecânica, sendo o trabalho realizado por unidade de tempo. Sendo assim, em um sistema mecânico movido por um motor elétrico, considerando uma situação ideal, a potência mecânica necessária deve ser igual à potência elétrica gasta pelo motor.

Estas grandezas podem ser relacionadas com parâmetros mecânicos para um sistema alimentado por um motor elétrico segundo a seguinte equação:

$$P_{(Watt)} = \frac{T \cdot 2\pi \cdot \omega}{60} \quad (2)$$

Onde, T é o torque gerado no motor e  $\omega$  é a velocidade angular do motor em RPM.

Por sua vez, o torque (T) pode ser definido como um momento, ou seja, uma força aplicada em um braço de alavanca, segundo a seguinte equação:

$$T = F \cdot r \quad (3)$$

Onde, F é a força aplicada e r é a distância entre o ponto de apoio e a força aplicada.

Se uma partícula é arrastada por uma superfície através de um braço de alavanca, como mostra a Figura 22, a força atuante responsável pela criação de um torque é igual à força de atrito na partícula.

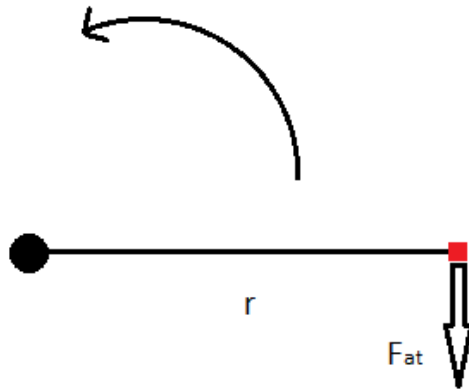


Figura 22 - Força aplicada em uma partícula em movimento circular uniforme

Assim, o torque pode ser calculado como:

$$T = F_{at} \cdot r \quad (4)$$



Porém, nem sempre o sistema a ser analisado possui uma força pontual. Diversas vezes os componentes interagem através de cargas distribuídas. Na Figura 23 a partícula em movimento da Figura 22 foi substituída por dois corpos e a força de atrito, que antes era concentrada, agora é vista em forma de carregamento ( $q_{at}$ ).

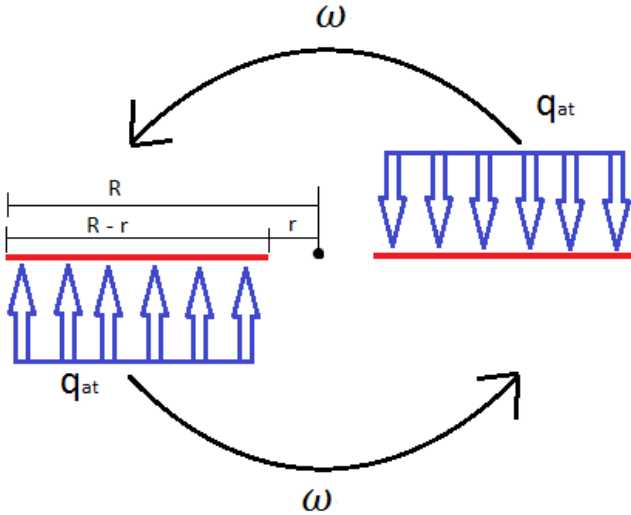


Figura 23 - Carga atuante sobre corpos em movimento circular uniforme

A carga distribuída em atrito pode ser definida como:

$$q_{at} = q_n \cdot \mu \quad (5)$$

Onde  $q_n$  é a carga distribuída normal aplicada e  $\mu$  é o coeficiente de atrito do sistema.

Substituindo as equações 4 e 5 na equação 2 tem-se:

$$P = \frac{q_n \cdot \mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot \omega}{60} \quad (6)$$

Por fim, isolando o coeficiente de atrito, chega-se a uma relação direta entre a potência e o mesmo, sob a seguinte equação:

$$\mu = \frac{60 \cdot P}{q_n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \omega} \quad (7)$$

A equação 7 demonstra que o coeficiente de atrito é diretamente proporcional à potência consumida pelo motor elétrico. Porém, é importante ressaltar que para esta afirmação considera-se o coeficiente de atrito constante na área de contato entre as superfícies envolvidas, o que trata-se de uma simplificação, uma vez que, a velocidade angular imprimida no interior do círculo formado pela ferramenta abrasiva é menor que a velocidade em sua porção mais externa.

Como o presente estudo não visa quantificar propriamente o coeficiente de atrito e sim analisar possíveis variações neste, causadas pela mudança no fluido de corte, foi adotada a simplificação proposta anteriormente.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. ENSAIOS COM GEOMETRIA NÃO DEFINIDA**

Inicialmente foram realizados testes para verificar o agente causador da alteração do pH da água utilizada no processo de “polimento de placas de porcelanato”, bem como a amplitude da mesma. Para tal foram moídos, manualmente, blocos abrasivos e placas cerâmicas e os mesmos foram adicionados em béqueres com água de pH 6,5, bem como partículas abrasivas de carbetto de silício.

Durante o ensaio foram adicionadas progressivamente, a cada béquer de água, porções de 1 g do material a ser investigado, a fim de se estabelecer qual o material responsável pela mudança de pH da suspensão bem como qual a maior alteração de pH possível para o sistema.

Para os ensaios de desgaste, foi utilizada uma máquina de ensaio universal tribológica, exibida na Figura 24, desenvolvida na Technische Universität Kaiserslautern. Esta máquina opera com sistema CNC, com mobilidade nos três eixos, o que possibilita a elaboração de diferentes trajetórias durante os ensaios. O equipamento também possui sistema de lubrificação, possibilitando o uso de fluido de corte durante a execução dos mesmos.



Figura 24 - Máquina universal para ensaios tribológicos.

Para os ensaios foi utilizada uma ferramenta contendo dois blocos abrasivos de 30 mm x 10 mm, Figura 25. Porém, a espessura real de contato entre a ferramenta e a placa de porcelanato é de 0,02 mm, a mesma utilizada na linha de “polimento de placas de porcelanato”, sendo que a mesma é mantida devido a um sistema de autoafiação da ferramenta (movimento este também realizado no equipamento em questão).

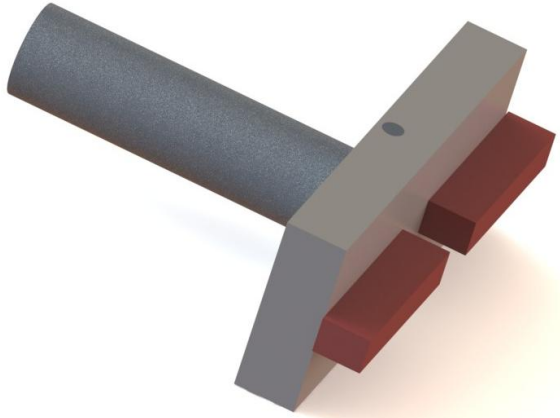


Figura 25 - Ferramenta abrasiva utilizada nos ensaios

Quando iniciado o presente trabalho, a máquina dispunha de um sistema aberto de circulação de fluido de corte, neste caso água advinda de uma torneira comum, e o escoamento desta era desenvolvido lateralmente à ferramenta abrasiva.

Devido à necessidade da variação do pH do fluido lubrificante, do dispêndio relacionado à aquisição do mesmo e as normas para seu descarte, foi necessário desenvolver um sistema fechado de lubrificação para a máquina. Foi observada a necessidade de reprojeter a posição do escoamento do fluido de corte, visto que, lateralmente, este causava erosão desigual no bloco abrasivo. Com isto, decidiu-se utilizar o mesmo sistema adotado nas linhas de “polimento”, com o fluido escoando através do centro do cabeçote de “polimento”.

Para os primeiros testes com a máquina, foram realizados experimentos para verificação da variação do pH do fluido de corte durante o processo de “polimento de porcelanatos”. Este ensaio foi realizado utilizando um sistema fechado para circulação de fluido de corte (água) e o equipamento citado no parágrafo anterior. A variação do pH foi verificada com a utilização de um pHmêtro da marca

Greisinger, modelo GpH014. O tempo adotado foi o necessário para que não fosse mais observada variação nos valores de pH.

Nos ensaios posteriores foram utilizados sistemas de lubrificação aquosos, bem como abrasivos empregados na indústria (com exceção das dimensões) e placas de porcelanato comerciais.

A fim de verificar a influência do pH do fluido de corte no coeficiente de atrito do sistema, foram realizados testes com cinco diferentes soluções-tampão nos pHs, 3 (ácido cítrico/soda cáustica/cloreto de sódio), 5 (ácido cítrico/soda cáustica) , 7 (solução de fosfato), 9 (ácido bórico/soda cáustica/cloreto de potássio) e 11 (glicina/soda cáustica/cloreto de sódio), utilizando sistema aberto de circulação de fluido de corte. Também foi instalado um sistema em tempo real para captação da potência utilizada pelo motor responsável pela rotação da ferramenta de corte. Com os dados de potência é possível indicar se existe variação do coeficiente de atrito do sistema, como foi visto no item 2.8 deste trabalho. O equipamento instalado possui um ruído especificado em 0,01%, enquanto a placa de aquisição possui 0,005%. Considerando ainda o ruído dos conectores e fios, o erro total foi estipulado em 0,1%.

Nos testes acima referidos, foi utilizado um tempo de ensaio de trinta minutos por amostra, resultando em cento e seis mil cento e sessenta dados por experimento. A trajetória da ferramenta sobre a amostra foi realizada em forma de círculo, estando a primeira em contato constante com a segunda durante todo o processo. Placas de porcelanato polido foram cortadas e utilizadas na execução dos ensaios.

Como último ensaio na máquina universal, placas de porcelanato polido foram submetidas a um processo de jateamento de areia para redução do brilho. Após isto foram cortados vinte e um corpos-de-prova de porcelanato nas dimensões 250 x 100 mm, com isto, cada amostra foi utilizada em uma única condição específica de ensaio.

Foi desenvolvida uma cinemática baseada em ciclos, sendo a ferramenta abrasiva, em rotação, submetida a movimentos em apenas um eixo, como mostrado nas Figura 26 e 31.

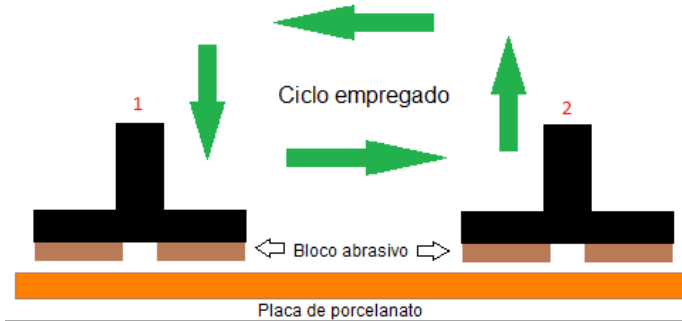


Figura 26 - Cinemática do processo em vista lateral

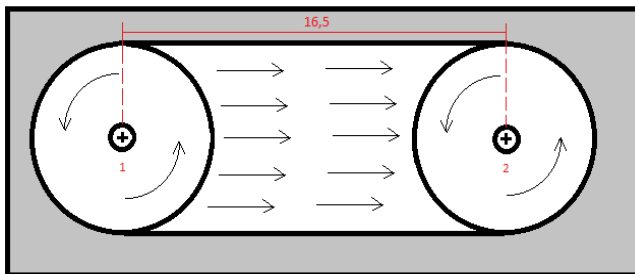


Figura 27 - Cinemática do processo em vista superior

Foram realizados ensaios alterando o pH do fluido de corte nos valores: 3, 5, 7, 9 e 11, além de ensaios com água destilada em sistema aberto e água destilada em sistema fechado, com a presença de detritos do processo. Para controle do pH foram utilizadas as mesmas soluções tampão do ensaio anterior, porém em sistema fechado de circulação.

Para uma avaliação da influência da evolução do brilho durante o processo, considerando apenas um tamanho de partículas abrasivas, foram estipulados testes com 5, 15 e 45 ciclos, para uma melhor visualização das alterações de superfície.

Os parâmetros de entrada do processo foram:

- Velocidade de rotação: 1.200 RPM
- Velocidade de avanço: 2,5 cm/s
- Força normal: 102 N
- Vazão do fluido de corte: 0,3 L/s
- Tamanho médio de partícula abrasiva: 600 mesh.

Os parâmetros de saída medidos foram:

- Potência elétrica consumida pelo motor.
- Desgaste.
- Brilho.

A aquisição da potência foi feita diretamente no motor responsável pela rotação do cabeçote, sendo calculada e exportada com auxílio do programa LabView, através da variação da corrente (i) e da tensão (V) instantâneas durante os ensaios.

A medição do brilho foi realizada após o término dos ensaios utilizando um brilhaômetro da marca Zehntner, modelo ZGM 1120, acoplado ao equipamento responsável pela execução dos ensaios. O equipamento realizou aferições nas posições 20° e 60°.

O desgaste foi estipulado através de interferometria a laser.

Os corpos-de-prova foram divididos em áreas, conforme mostra a Figura 28, para obtenção de valores de brilho e desgaste. Os círculos presentes na figura representam os locais de início e fim de curso para cada ciclo, sendo estes descartados por apresentarem uma cinemática diferente do restante do trajeto.



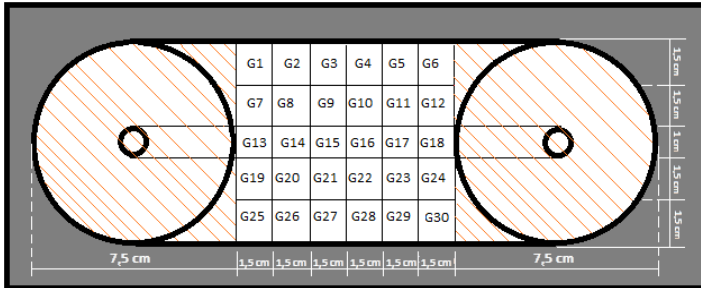


Figura 28 - Zoneamento das medições de brilho e desgaste

As áreas foram divididas com base na resolução dos equipamentos de medição e tempo necessário para realização dos ensaios, visto que resoluções muito grandes deixam os resultados bastante complexos sem fornecer uma contribuição efetiva.

### 3.2. LIVRE CAMINHO MÉDIO EM BLOCOS ABRASIVOS.

Como visto anteriormente, um bloco de abrasivos pode ser visto, de forma geral, como diversos indentadores de geometria definida, atuando em conjunto durante processo de desgaste.

Para que esta afirmação seja possível é necessário conhecer, a geometria dos abrasivos, o tamanho dos mesmos e a força atuante em cada um.

Em uma linha de “polimento de porcelanatos”, como visto anteriormente, os blocos são separados por tamanho médio de partícula, fazendo com que esta seja uma variável conhecida.

A fim de melhor compreender a distribuição dos abrasivos em suas matrizes, foi desenvolvida uma metodologia para a caracterização do livre caminho médio entre partículas em um bloco abrasivo.

Para tanto foram utilizados os blocos de 36, 100 e 200 mesh, os mesmos foram cortados nas direções axial e transversal, conforme mostra a Figura 29. Para aferição do livre caminho médio entre partículas abrasivas foi realizada análise de imagens a qual consistiu traçar linhas sobre a

fotomicrografia e medir a distância de uma partícula e outra ao longo da linha traçada, representada na Figura 30 por  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$ .

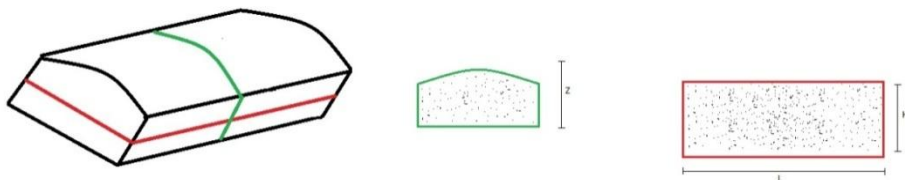


Figura 29 - Direção dos cortes de blocos abrasivos.

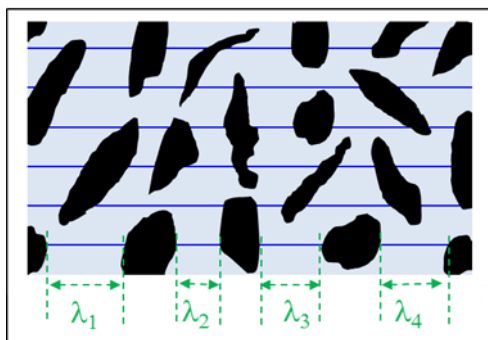


Figura 30 - Distância entre partículas abrasivas

### 3.3. ENSAIO DE RISCAMENTO

No presente estudo foi utilizado um equipamento desenvolvido em meados de 1996 (Sousa, 2006) que conta com duas mesas, controladas eletronicamente, responsáveis pelos movimentos axial e normal do sistema. Em sua concepção o sistema também possui um fuso manual para que seja feita a movimentação em um terceiro eixo, perpendicular aos dois primeiros.

A aquisição de sinal era inicialmente feita através de dois sensores piezométricos instalados a fim de mensurar as forças normal e tangencial ao movimento realizado durante o ensaio.

Com o passar dos anos o sistema responsável pela captação de sinais (sensores, fios, amplificadores e filtros), sofreram processo de degradação, aumentando o nível de ruído em valores que inviabilizavam a utilização dos dados obtidos.

Foi feita então a aquisição de um novo sistema, principalmente de um novo sensor, mais moderno e com a captação, em apenas uma peça, de forças em três eixos, além de seus respectivos torques, da marca ATI Industrial Automation, modelo Nano 17.

Para a instalação do mesmo, foi necessário o desenvolvimento, não apenas de novos componentes mecânicos, mas também de um novo software, uma vez que a captação do sinal passou a ter seis saídas.

A Figura 31 apresenta o equipamento após a instalação dos novos componentes. É possível ver à direita, os controladores dos motores das três mesas (A), a placa de aquisição de sinais, sob esta o amplificador de sinais (B) e à esquerda o equipamento em si (C).

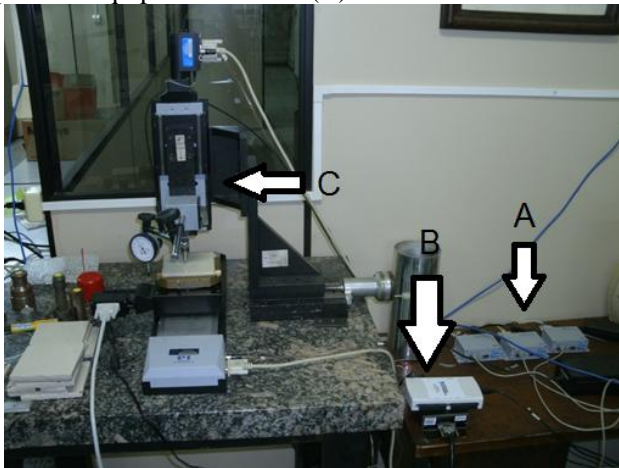


Figura 31 - Aspecto geral esclerômetro UFSC

Para a instalação mecânica do sensor, foi necessário projetar dois acopladores. Um deles para conectar este ao tribômetro e o segundo para o acoplamento dos indentadores.

Na Figura 32 observa-se o sensor com maior detalhamento. O cilindro metálico na parte inferior corresponde ao indentador Vickers utilizado durante os ensaios. Logo acima tem-se um dos acoplamentos utilizados, seguido do sensor propriamente dito, os dois em formatos cilíndricos. Por último o acoplamento à máquina que foi feito através de uma peça em “L” e com uma furação específica correspondente aos zeros do sensor.



Figura 32 - Sensor com acoplamentos e indentador

Por ter sido montado na UFSC, o esclerômetro possui uma programação própria em LabView, sendo necessário um novo software para o seu funcionamento.

Como não se trata de um dispositivo de riscamento via peso morto, e sim via posição da mesa, a programação é feita de maneira que o deslocamento desta provoca um aumento da força resultante no sensor, quando em contato com a amostra, e o risco é iniciado quando o deslocamento causa uma força maior ou igual à desejada.

Outro aspecto a ser levado em consideração para o desenvolvimento do software é a velocidade de aproximação do indentador com a amostra. Para que a força resultante não seja muito maior que a força de interesse, a aproximação deve ser lenta, causando um aumento lento da força. Porém, antes do contato entre indentador e amostra é interessante que a velocidade relativa entre o par seja maior, reduzindo o tempo de ensaio.

Para contornar este problema, foi desenvolvido um controle manual do posicionamento da mesa vertical. Este controle é feito em uma interface específica para o controle manual, como mostra a Figura 33.

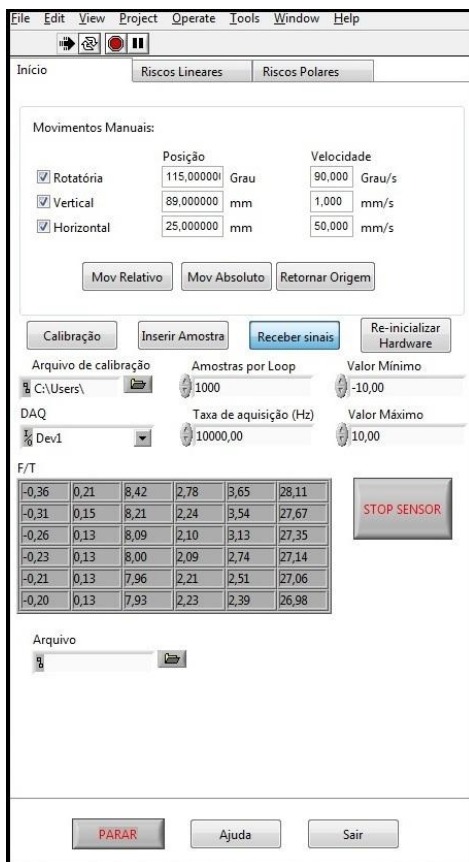


Figura 33 – Interface do controle manual do software desenvolvido para o esclerômetro

Como demonstrado, é possível escolher as posições, absoluta e relativa, para as três mesas disponíveis, bem como a respectiva velocidade de movimentação. Ainda neste quadro encontra-se a tabela com as forças e torques para os três eixos, a frequência de leitura de sinais (escrita como taxa de aquisição), a quantidade de sinais recebidos em cada leitura, os valores máximo e mínimo de força para que o sensor pare de operar e o caminho de entrada e saída de arquivos.

A interface do ensaio propriamente dito, Figura 34, não sofreu alterações, apenas a sua programação.

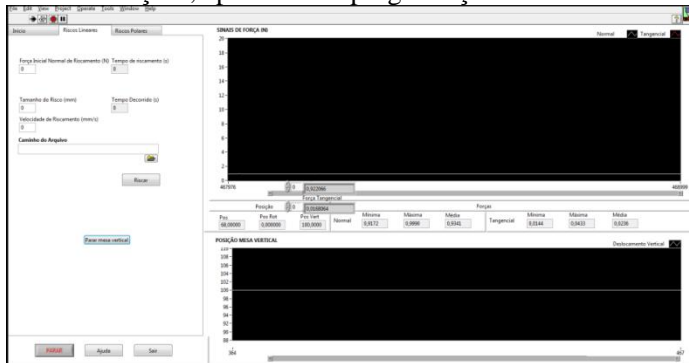


Figura 34 – Interface de ensaio do software desenvolvido para o esclerômetro

Esta interface é bastante simples, contendo, na esquerda da imagem, os parâmetros de entrada: força normal de riscamento (que é a força a ser atingida para que se inicie o risco), tamanho do risco e velocidade de riscamento. Ao lado direito encontra-se o gráfico indicador da força instantânea, na parte superior e na parte inferior encontra-se o gráfico com a evolução da posição vertical do indentador. Entre os dois gráficos encontram-se indicadores de força e posição.

Também foi implementado na programação um controle de força para que a mesma pudesse permanecer constante durante o ensaio. Porém devido à baixa velocidade de resposta da mesa disponível, tal controle tornou-se ineficiente, prejudicando os ensaios. Com isto foi optado por desligar este mecanismo.

Por ter sido optado pelo desligamento do controle de forças, o sistema ficou susceptível não somente aos defeitos de superfície intrínsecos das amostras, mas também à inclinação de sua superfície em relação à trajetória do indentador, o que causa um aumento substancial na força medida. Por tratar-se de um processo complexo, a obtenção de duas faces paralelas em uma peça de porcelanato foi descartada para o presente trabalho. A solução encontrada foi

mensurar a inclinação do plano formado entre a superfície da amostra e da trajetória do indentador. Para tal foi instalado um relógio comparador no suporte deste, Figura 35, e utilizando-se da mesa rotatória, foi feita uma varredura circular na amostra apontando os pontos de máximo e mínimo na superfície da mesma. Com isto foi possível identificar em qual direção deveriam ser realizados os testes de riscamento, ou seja, perpendicularmente aos pontos de máximo e mínimo da amostra, encontrando-se em posições suplementares.

Os ensaios foram realizados com indentador Vickers, em duas velocidades: 0,1 mm/s e 0,001 mm/s. O sensor para captação de forças utilizado, como descrito anteriormente, é fabricado pela indústria ATI Industrial Automation e seu modelo é denominado Nano 17.





Figura 35 - Esclerômetro com relógio comparador para determinação de planos em amostras



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ENSAIOS COM FLUIDO DE CORTE

#### 4.1.1. Resultados

Os primeiros testes realizados durante o trabalho, diluindo pó dos blocos abrasivos em béqueres com água, confirmaram que o pH desta, utilizada como fluido de corte, tende a formar um meio com considerável alcalinidade, próxima ao pH 10,5, como é mostrado na Figura 36, contrastando com o pH próximo a 7.

Separando os componentes constituintes do processo em pó de porcelanato, carbeto de silício e bloco abrasivo moído em béqueres com água, foi observado que apenas no último ocorreu mudança de pH, concluindo-se que esta ocorre devido à dissolução do cimento de magnésio utilizado na composição da ferramenta abrasiva.

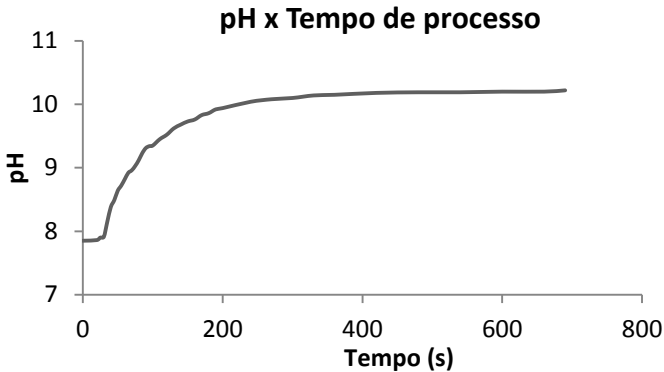


Figura 36 - Evolução do pH do fluido de corte com o tempo de processamento

Após comprovada a significativa mudança do pH do fluido de corte, foram conduzidos os ensaios de desgaste propriamente ditos, ou seja, contemplando o monitoramento de outros parâmetros.

Os primeiros testes, utilizando solução tampão como fluido de corte em sistema aberto, foram realizados a fim de

mensurar a potência consumida pelo sistema, a fim analisar se há ou não variação no coeficiente de atrito.

Vale salientar que neste primeiro ensaio foram testados três corpos-de-prova para cada pH, porém, as condições cinéticas eram bastante diferentes dos ensaios realizados posteriormente.

Os resultados são apresentados na Figura 37.

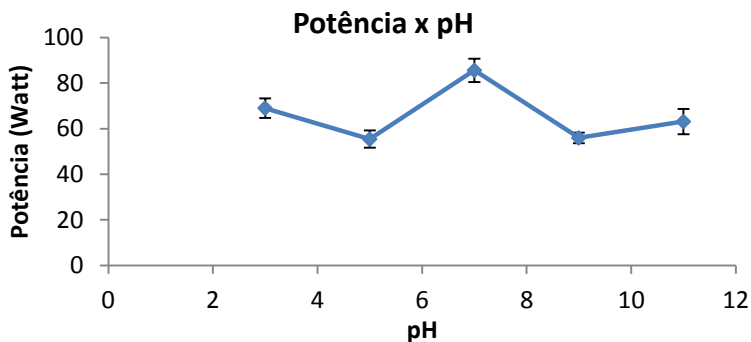


Figura 37 - Influência da variação do pH na potência elétrica consumida

Segundo os resultados obtidos no gráfico acima e tendo observado as proporcionalidades nas equações do item 2.3, observa-se que no pH 7, ponto de maior potência consumida, é encontrado o maior coeficiente de atrito do sistema.

Após estes ensaios preliminares foram realizados os testes descritos no item anterior. Os resultados reforçaram o que já havia sido observado, ou seja, quando o fluido de corte está com o pH por volta de 7, a potência, e por consequência o coeficiente de atrito, atinge seu valor máximo, como observado na Figura 38.

Observa-se também que ao aumentar o número de ciclos a potência média consumida pelo sistema tende a diminuir. Este efeito pode ser associado à redução da rugosidade inicial da peça, o que para poucos ciclos representa um estado de maior potência consumida durante todo o ensaio, enquanto para ciclos maiores a superfície tende a ficar

com a rugosidade na ordem do tamanho do abrasivo utilizado, diluindo os maiores valores obtidos no início do processo.

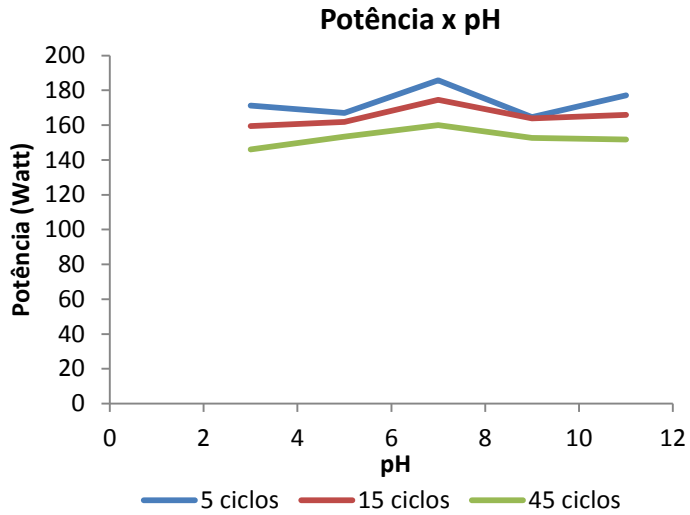


Figura 38 - Influência do pH do fluido de corte na potência elétrica consumida

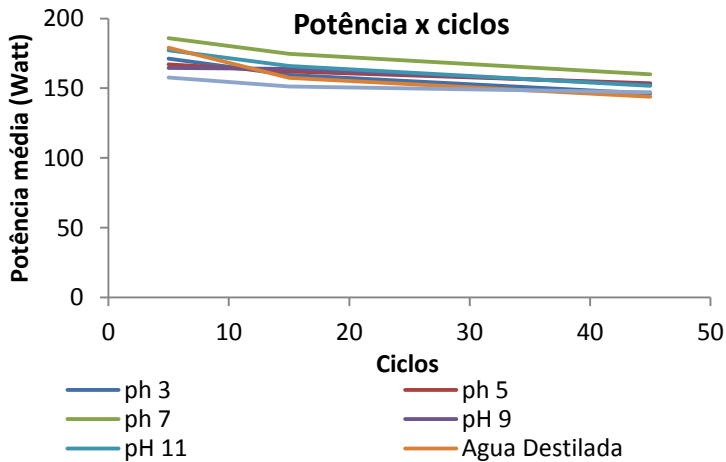


Figura 39 - Influência do número de ciclos na potência média consumida pelo motor elétrico

Também foram geradas curvas para o processamento com água destilada em sistema aberto, ou seja, sem contato com os detritos provenientes do desgaste do conjunto porcelanato/ferramenta e fechado, com os produtos do desgaste “contaminando” a água.

Os resultados mostrados na Figura 40 relacionam a potência média consumida com o tipo de água (sistema aberto ou fechado).

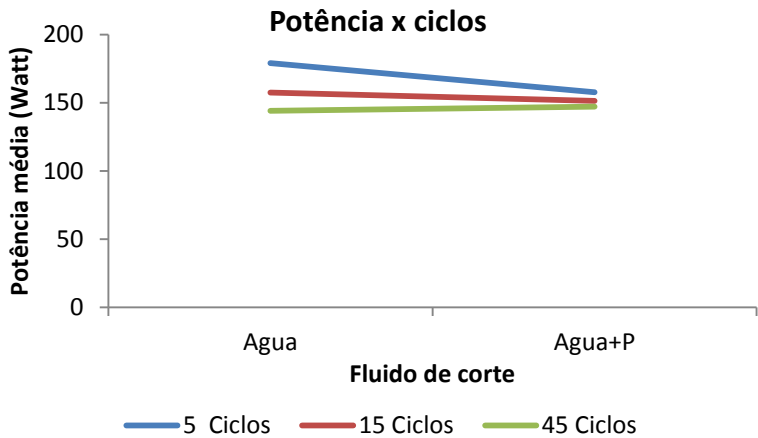


Figura 40 - Relação entre a potência consumida e o sistema de alimentação de fluido de corte

Depois de ensaiadas, foram realizadas medições de brilho nas amostras e os resultados relacionados com o pH, ou o tipo de fluido de corte utilizado.

Cada condição de análise (pH e número de ciclos), gerou uma superfície de valores de brilho, como mostra a Figura 41.

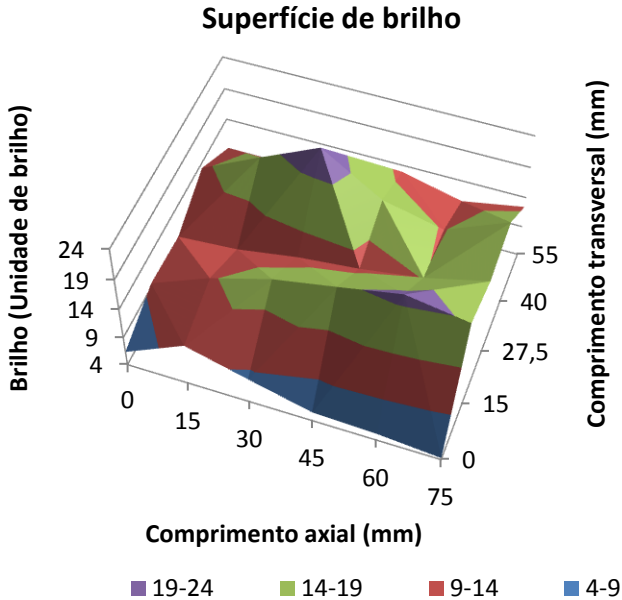


Figura 41 - Superfície gerada com os valores de brilho

A Figura 42 apresenta os resultados para medidas realizadas em  $60^\circ$  em função do pH do fluido de corte. É possível observar que assim como nos resultados de potência, existe um pico no pH 7. Isto significa que nesta condição existe uma maior reflexão da luz incidida, ou seja, um maior brilho.



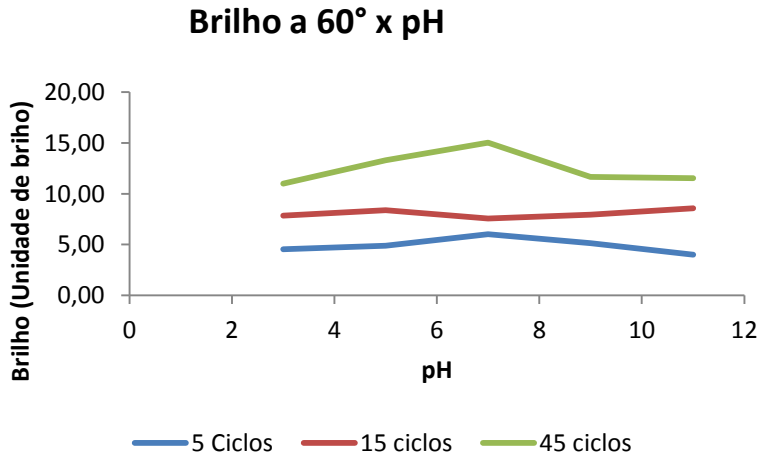


Figura 42 - Influência do pH no brilho medido a 60° de reflexão

Também foi verificada a diferença do brilho a 60° para a água destilada e para a água com a presença de partículas oriundas do processo de desgaste da ferramenta.

A Figura 43 mostra o brilho medido nas condições acima citadas. É possível perceber um sensível aumento do brilho neste ensaio, na ordem de 0,6 unidades de brilho (alteração que não é perceptível ao olho humano).

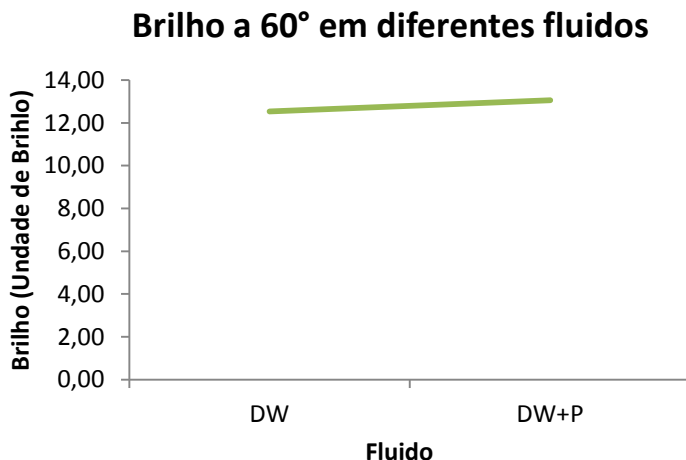


Figura 43 - Evolução do brilho em diferentes composições de água

Medições também foram realizadas em reflexão de 20°, como mostram as figuras 42 e 43.

É possível observar que o comportamento não é alterado nestas condições de aferição, continuando o pH 7 como o meio onde foram obtidos os melhores resultados quanto ao brilho final.

Outro aspecto interessante de ser observado nos gráficos contendo diferentes pHs, é o pequeno ganho de brilho obtido com os ensaios a 5 e a 15 ciclos.

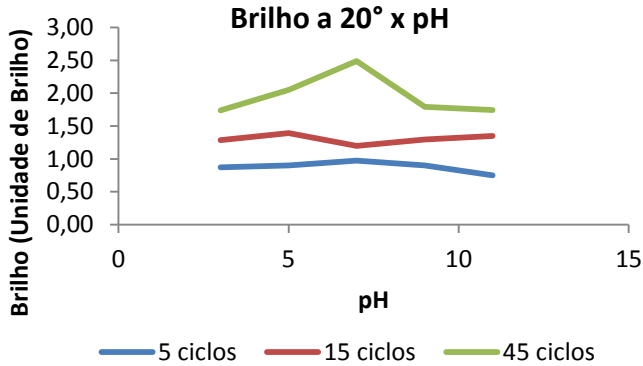


Figura 44 - Influência do pH no brilho medido a 20° de reflexão

Ensaios com reflexão a 20° também foram realizados para o sistema contendo água destilada em sistema de alimentação fechado e aberto, como mostra a Figura 45.

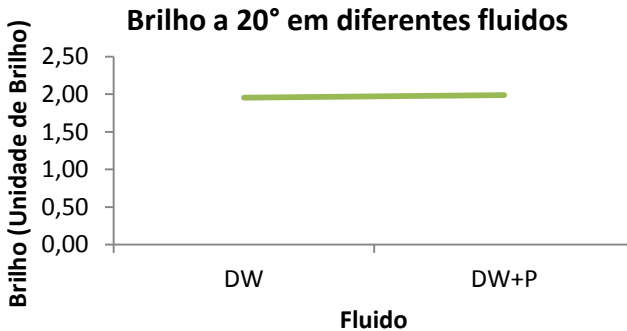


Figura 45 - Evolução do brilho em diferentes composições de água

Curvas da evolução do brilho de acordo com o número de ciclos também foram traçadas. Infelizmente o brilho é um parâmetro que não pode ser controlado *in loco*, fazendo-se necessária a interrupção do processo para a aferição do mesmo. Sendo assim, foram adquiridos os brilhos para cada condição de fluido lubrificante, no ensaio em 5, 15 e 45 ciclos.

A Figura 46 mostra a evolução do brilho para as condições utilizando as soluções tampão. É possível perceber que o pH 7 foi o que obteve maior aumento no brilho de 15 para 45 ciclos.

É importante ressaltar que o ensaio foi realizado utilizando apenas uma granulometria de abrasivos (600 mesh), e que segundo a Figura 15, apresentada no início deste trabalho, esta granulometria encontra-se na região onde se obtém o maior ganho de brilho, porém, no estudo realizado por Hutchings são utilizados diversos abrasivos para a preparação prévia da superfície, até que se chegue ao respectivo tamanho médio de partícula. Sem esta preparação muitos ciclos são consumidos para que o brilho comece a se estabilizar para a condição em estudo.

Com isto, pode-se dizer que os dados obtidos para 5 e 15 ciclos são irrelevantes, uma vez que nestas condições a superfície ainda se encontrava com a rugosidade próxima da inicial.

É interessante observar, na Figura 46, que para o pH 7 o brilho obteve um súbito aumento, mostrando uma tendência a evoluir mais rapidamente que para as outras condições.

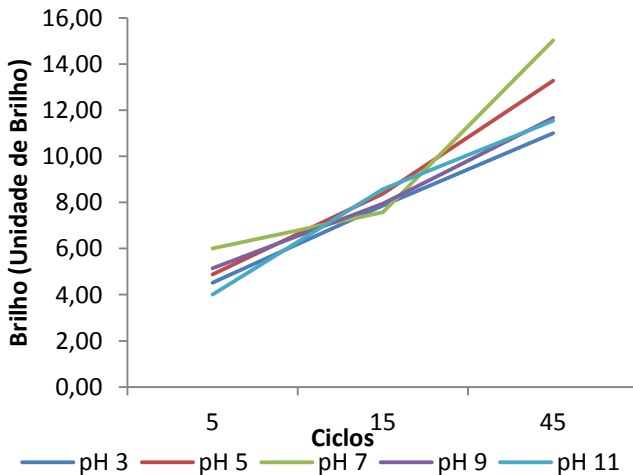


Figura 46 – Evolução do brilho com o número de ciclos

Também foi observada a evolução para os dois diferentes meios aquosos ensaiados, Figura 47, sendo que, a água com partículas do bloco abrasivo aparenta um ganho de brilho sensivelmente mais acelerado.

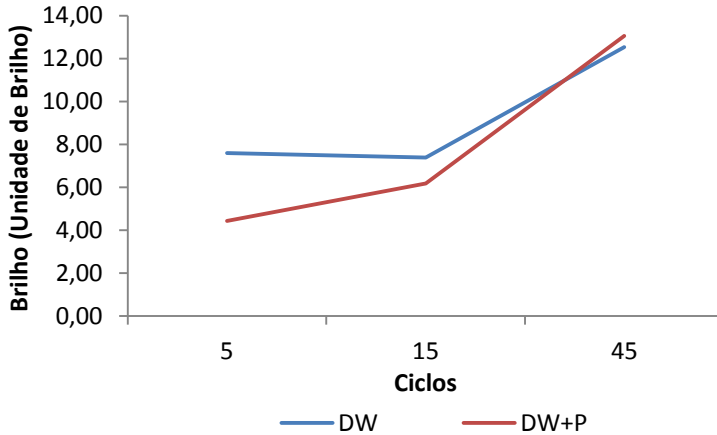


Figura 47 – Evolução do brilho para diferentes ciclos

Nestas condições ensaios com mais ciclos podem confirmar se o comportamento realmente tende a manter-se como apresentado, uma vez que, como exposto, o abrasivo utilizado necessita de alguns ciclos até que a superfície seja homogeneizada com a rugosidade das partículas aplicadas.

Os resultados de desgaste foram plotados em topografia de linhas perpendiculares à trajetória da ferramenta abrasiva, como mostra a Figura 48.

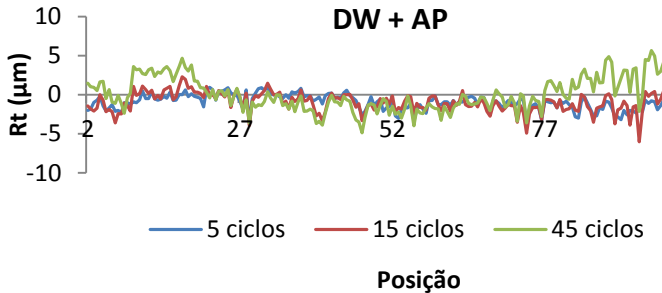


Figura 48 - Desgaste da superfície

#### 4.1.2. Discussões

Os resultados exibidos anteriormente mostram a influência que a variação do fluido lubrificante exerce sobre as propriedades de brilho e potência consumida pelo motor elétrico responsável pelo movimento rotacional da ferramenta de corte.

A Figura 41, exibe o brilho distribuído na superfície da amostra. Como relatado por Sousa (2007), em linhas de “polimento” onde não existe o movimento de “bandejamento” (oscilação lateral) o brilho tende a ser mais forte nas duas regiões entre o centro do percurso do cabeçote e a lateral da peça. Este comportamento pode ser visto na figura citada, assim como para todas as amostras ensaiadas.

Os primeiros testes realizados variando o pH do fluido lubrificante, Figura 37, mostraram prováveis alterações no processo variando a condição citada. Os ensaios posteriores, Figura 38, continuaram exibindo o pH 7 como a condição onde foi consumida a maior potência durante o ensaio, evidenciando o maior coeficiente de atrito atuante no sistema.

Os testes utilizando a potência elétrica (associada com o coeficiente de atrito) como variável de saída, foram reforçados quando mensurados os valores de brilho das peças. As figuras 42 e 44 exibem o ápice do brilho final quando os corpos-de-prova foram submetidos ao fluido de corte de pH 7, evidenciando que neste pH ocorre uma tendência ao favorecimento de ganho de brilho.

O desgaste resultante dos ensaios, não pôde ser devidamente avaliado, pois seu erro apresentou-se maior que os resultados obtidos. Isto demonstra, como esperado para a granulometria de abrasivos adotada, que não houve remoção substancial de material, evidenciando que o processamento encontra-se em uma faixa de maior obtenção de brilho.

Por fim, os testes variando apenas a condição da água, e não mais variando o fluido lubrificante como forma de variação do pH, não demonstraram grande discrepância entre os resultados com água destilada em sistema aberto e água destilada em sistema fechado (alterando o pH conforme a Figura 36).

Este último teste leva a crer que a alteração de pH inerente ao processo não causa grande influência no processamento, porém as soluções utilizadas para produzirem variação no pH possuem características diferentes da solução formada naturalmente pelo processo, causando, provavelmente, um deslocamento mais acentuado no ponto isoelétrico da superfície das placas de porcelanato, alterando a adsorção do fluido de corte utilizado, que por sua vez causa alteração no desgaste entre as superfícies, culminado com a diferenciação das características de processamento.

#### 4.2. LIVRE CAMINHO MÉDIO EM BLOCOS ABRASIVOS.

Visando caracterizar melhor o livre caminho médio entre partículas abrasivas em um bloco abrasivo para “polimento de porcelanatos”, foi realizada uma caracterização destes no Núcleo de Materiais Cerâmicos (CERMAT) da UFSC, resultando nas curvas de distribuição a seguir:

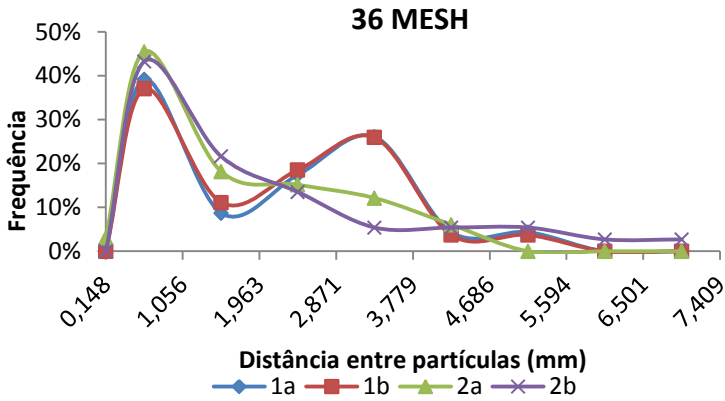


Figura 49 – Livre caminho médio entre partículas em bloco abrasivo de 36 mesh

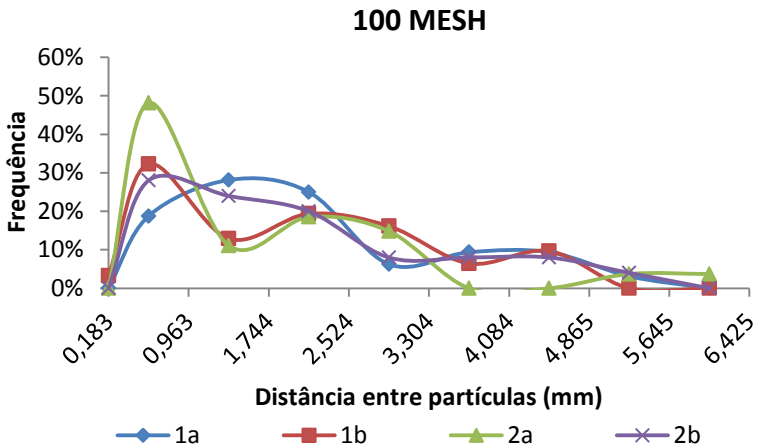


Figura 50 - Livre caminho médio entre partículas em bloco abrasivo de 100 mesh



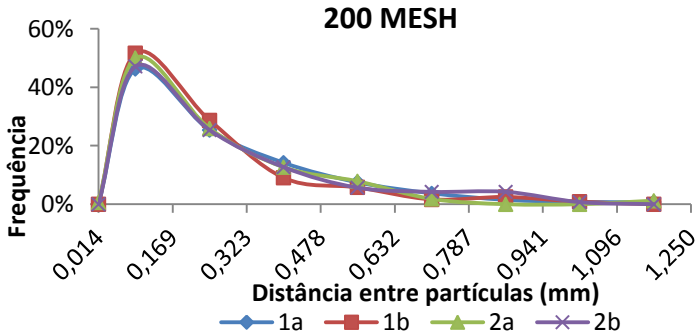


Figura 51 – Livre caminho médio entre partículas em bloco abrasivo de 200 mesh

Como visto a distância entre partícula (livre caminho médio) diminui conforme o tamanho médio de partícula é reduzido.

Observando cada partícula como um único indentador, pode-se admitir que para granulometrias maiores a força atuante é distribuída em menos pontos, aumentando o dano causado por cada partícula abrasiva. Por sua vez, em distribuições menores de partícula, a força atuante é mais distribuída, reduzindo os danos.

#### 4.3. ENSAIO DE RISCAMENTO

##### 4.3.1. Resultados

Após concluída a programação e adaptação do novo sensor, foram feitos diversos testes para a calibração de todo o sistema que compõe o esclerômetro.

Devido à desativação do sistema de controle de força, foram feitos riscos com uma carga inicial de 2 N. Durante o riscamento, devido à superfície irregular das placas de porcelanato a força normal atuante sofreu oscilação, conforme mostra a Figura 52, onde foi realizado um ensaio de riscamento em velocidade de 0,01 mm/s.

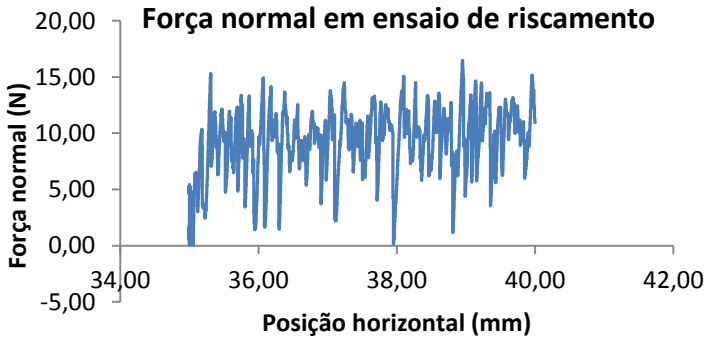


Figura 52 - Força normal em ensaio de riscamento a 0,01 mm/s

Na figura acima é possível perceber que existem pontos de pico de força e pontos em que a força normal atuante chega a valores inferiores ao indicado antes do ensaio, 2 N. Também é possível perceber que a oscilação é bastante forte e não ocorre em torno de um valor médio.

A Figura 53 exibe o comportamento da força normal para um ensaio em velocidade dez vezes superior ao mencionado anteriormente, ou seja, 0,1 mm/s. Por ter sido limitado em 5 mm, este ensaio apresenta dez vezes menos valores que o discutido acima.

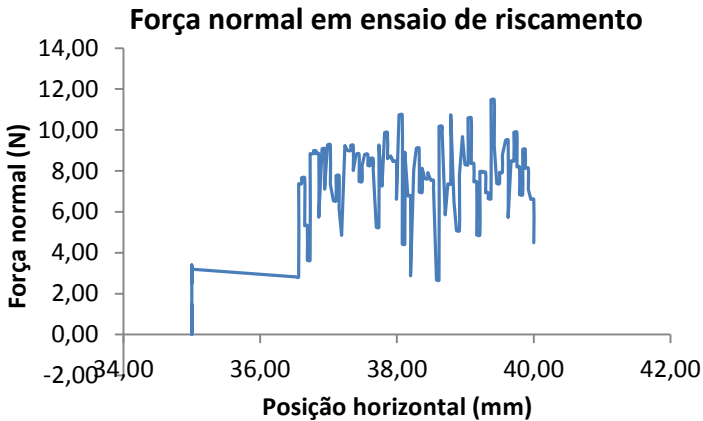


Figura 53 - Força normal em ensaio de riscamento a 0,01 mm/s

Calculando o desvio padrão para cada ensaio é possível perceber que os riscamentos realizados em velocidade menor apresentam ligeiramente maior oscilação da força normal, como mostra a Tabela 4. É importante ressaltar que para os ensaios em maior velocidade foram obtidos aproximadamente 6000 dados.

Tabela 4 - Força normal durante riscamento

	0,01 mm/s			0,1 mm/s		
	1	2	3	1	2	3
Média	9,62	9,13	9,57	6,87	6,12	8,61
DesvPad	3,02	3,05	3,02	2,76	2,76	3,96

Também foram realizadas fotomicrografias dos riscos. A figura abaixo mostra o aspecto geral de um risco realizado com velocidade de 0,01 mm/s. Percebe-se um risco homogêneo e sem trincas aparentes.

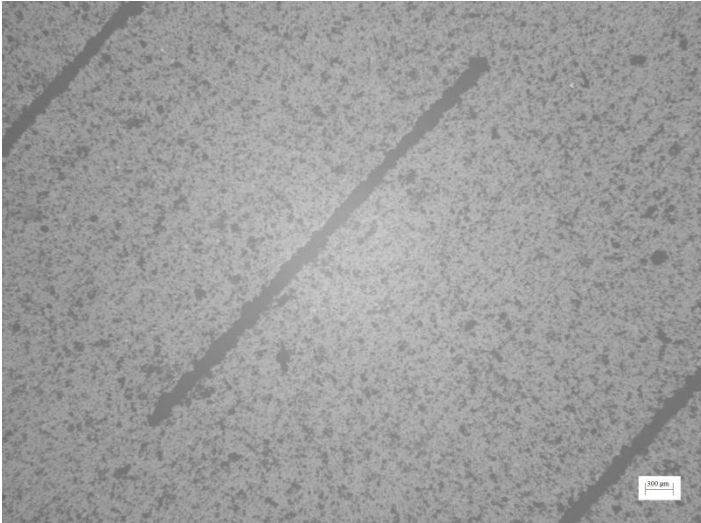


Figura 54 – Ensaio de riscamento com velocidade de 0,01 mm/s com ampliação de 16x

Na Figura 55 é exibido um risco com a mesma ampliação da anterior, 16x, porém com velocidade de riscamento de 0,1 mm/s e assim como anteriormente, não são vistas trincas e o risco apresenta um aspecto homogêneo.

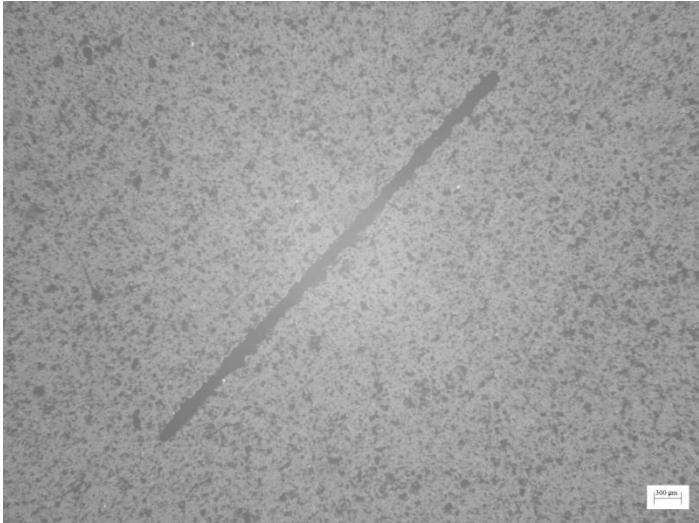


Figura 55 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,1 mm/s com ampliação de 16x

Em uma ampliação maior, 50x, a heterogeneidade microestrutural do porcelanato torna-se evidente. São vistos diversos poros, alguns com as dimensões comparáveis a largura do risco.

Com esta ampliação foi possível, através do software ImageJ, correlacionar os dados obtidos de força com a micrografia.

Esta relação demonstrou que os picos de força nos gráficos ocorrem nas áreas de maior largura do risco, evidenciando que a heterogeneidade do material afeta o processo de desgaste abrasivo.

Os picos e os vales no gráfico podem ser relacionados ao processo de carregamento e descarregamento do indentedor. Quando este atinge uma partícula dura a força normal resultante tende a aumentar, porém, quando a partícula é lascada ou ocorre o deslocamento da mesma, há um alívio da tensão no indentedor, fazendo com que a força resultante atue em sentido contrário à anterior. Quando ocorre a intersecção do risco com o poro, o processo é o inverso,

primeiro ocorrendo um descarregamento, seguido por um carregamento abrupto. Este fenômeno é também conhecido como *stick-slip*.

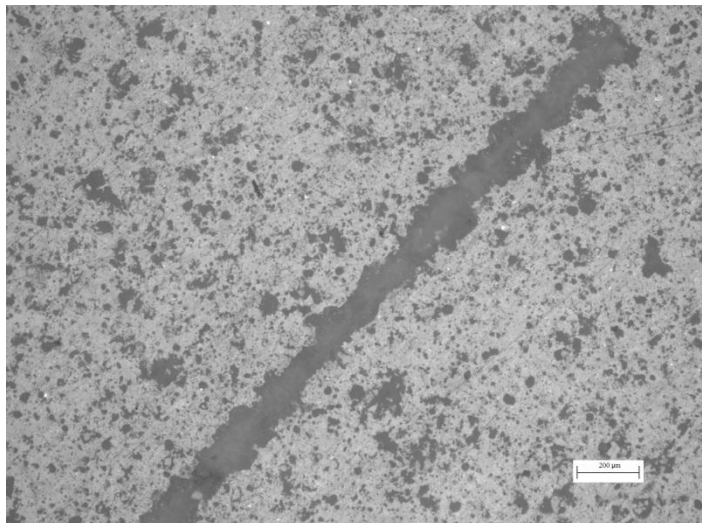


Figura 56 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,01 mm/s com ampliação de 50x

Novamente não são vistas trincas na periferia dos riscos. As figuras 56 e 57 exibem riscos similares, novamente diferenciados pela velocidade de riscamento.

Também foram realizadas, para esta ampliação, medições da largura dos riscos, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Largura dos riscos

Velocidade	0,01 mm/s			0,1 mm/s		
Amostra	1	2	3	1	2	3
Média	99,89	219,47	197,12	197,10	180,05	224,55
Desv. Pad.	27,81	62,40	57,74	51,21	35,78	48,99
Mín.	72,94	148,74	143,32	128,44	125,15	150,24
Máx	156,10	428,40	396,8	333,84	233,82	318,94

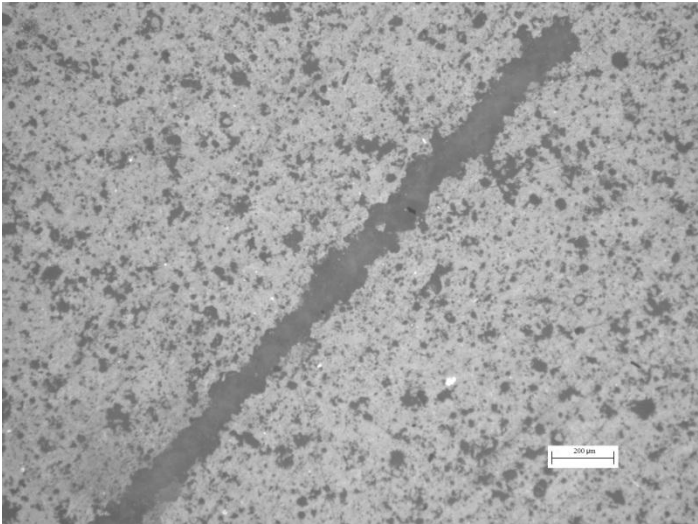


Figura 57 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,1 mm/s com ampliação de 50x

A Figura 58 proporciona uma melhor observação das adjacências do risco, onde é possível perceber a influência dos poros. Porém, também é possível perceber áreas que apresentam contornos retilíneos, onde provavelmente ocorreu a propagação de uma trinca seguida pelo deslocamento de parte da amostra. Outra possibilidade é a remoção de uma partícula dura inteira.

A Figura 59 apresenta praticamente o mesmo aspecto da anterior, porém com maior incidência de poros adjacentes ao risco, mostrando que para esta diferença de velocidade o riscamento praticamente não sofre alterações.

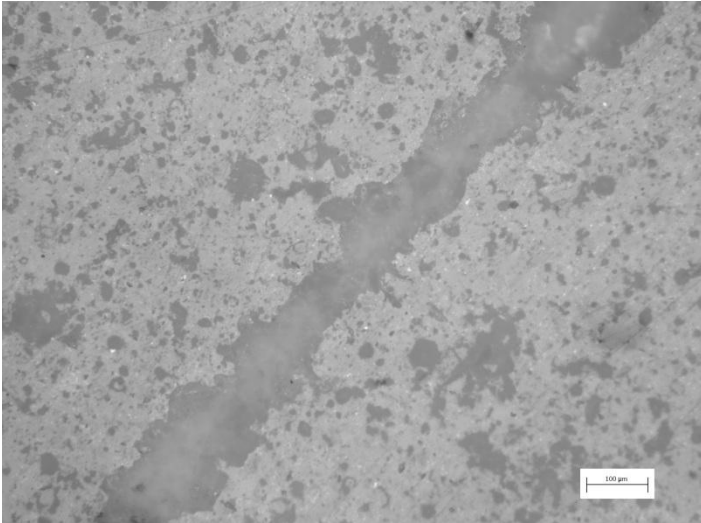


Figura 58 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,01 mm/s com ampliação de 100x

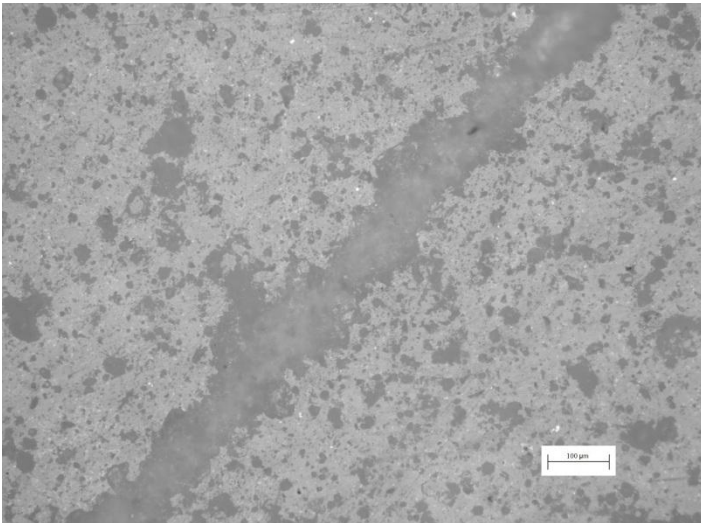


Figura 59 - Ensaio de riscamento com velocidade de 0,1 mm/s com ampliação de 100x



#### 4.3.2. Discussões

A impossibilidade do controle das forças através do deslocamento da mesa vertical, fez com que estas sofressem grande variação durante os ensaios de riscamento, impossibilitando a observação de uma mudança de mecanismo de remoção de material. A variação de força pode ser associada à heterogeneidade microestrutural do porcelanato, como descrito no item 2.2 deste trabalho.

Por ser um material formado por partículas duras imersas em uma matriz vítrea, durante o riscamento o indentador recebe diferentes respostas à força normal aplicada. Quando em contato com a matriz vítrea, este tenda a causar maiores danos e recebe um menor carregamento resultante. Porém quando em contato com partículas de maior dureza, este carregamento tende a ser intensificado, pois a posição relativa entre o indentador e a amostra é constante.

É possível, através da dispersão de valores da Tabela 5 observar o caráter frágil do riscamento. Sistemas de caráter dúctil tendem a apresentar menores dispersões no volume de material removido durante o processo abrasivo, como descrito no item 2.6.

A ausência de trincas nas imagens com ampliação de 100 x pode ser atribuída à microestrutura do porcelanato. Por possuir muitos poros e fases dispersas, a energia das trincas geradas na matriz vítrea é reduzida, fazendo com que seu crescimento seja freado. Por outro lado, as trincas adjacentes ao risco são nucleadas e crescem em torno do risco, causando deslocamentos laterais e deixando-o com diferentes larguras em sua extensão.

As alterações de velocidade não causaram efeitos perceptíveis durante a realização dos riscos, apresentando aspectos micrográficos e larguras de riscos similares.

No entanto, o aumento da velocidade, quando comparada apenas a indentação ou mesmo às duas velocidades empregadas, gera maiores forças resultantes, que só não causam maiores danos na placa, pois esta já

experimenta um estado de tensões, em sua superfície, maior do que sua tenacidade à fratura.

## 5. CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi possível verificar a existência de variação do pH da água utilizada como fluido de corte no processo de “polimento de placas de porcelanato”.

Também foi possível estabelecer uma relação entre a potência utilizada por um motor elétrico para rotacionar um sistema tribológico, e o coeficiente de atrito envolvido.

Com base na relação mencionada acima, foram obtidos gráficos relacionando diferentes soluções, utilizadas como fluido de corte para o processo de “polimento de porcelanato”, e a potência consumida pelo motor elétrico responsável pelo processamento. Com isto foi possível fazer uma estimativa de como o coeficiente de atrito se comporta para as diferentes soluções apresentadas, dando indícios que, para o pH 7, provavelmente existe uma maior adsorção de moléculas da solução tampão na superfície do porcelanato.

Os experimentos realizados para a água em diferentes sistemas de alimentação não apresentaram grande variação de resultados, não comprovando alterações significativas no processo.

A relação entre o brilho da placa ensaiada e o pH das soluções empregadas apresentou resultado semelhante aos experimentos realizados para a potência, sendo que para o pH 7, o ganho de brilho apresenta uma tendência de ser mais intenso que para as outras soluções.

Novamente os resultados com os dois diferentes sistemas de água não apresentaram uma diferença substancial.

É importante salientar que a realização de ensaios com apenas uma granulometria restringe a relevância quantitativa dos resultados, uma vez que as etapas de preparação da superfície são importantes para a redução do número de ciclos necessários para que se atinja um ganho efetivo no brilho do material. Mesmo a granulometria de 600 mesh, escolhida para os ensaios, necessita de alguns ciclos para que se atinja a rugosidade corresponde a mesma, e mesmo após atingida esta rugosidade o ganho de brilho não alcança valores elevados. Para se alcançarem valores de brilho mais elevados é

necessário reduzir-se o tamanho médio de partículas abrasivas e isto, para ensaios com apenas uma granulometria, custa muito tempo.

Foi possível, durante o trabalho, a instalação e instrumentação de um novo sensor de forças no tribômetro disponível na UFSC, porém devido à velocidade de resposta de mesa responsável pelo movimento vertical da amostra, não foi possível implementar um controle para que seja mantida uma força constante durante os ensaios, fazendo com que seja necessário prever o possível plano formado entre a amostra e a trajetória do risco.

Diante do exposto, não foi possível mensurar a pressão de contato necessária para que seja observada mudança no micromecanismo de remoção de material nas placas de porcelanato.

Foram realizados testes de riscamento utilizando o equipamento em questão, utilizando uma força normal inicial de 2 N, com variações entre aproximadamente 1 e 17 N e com velocidade de riscamento preestabelecidas em 0,1 e 0,01 mm/s. Nestes ensaios não foram detectadas grandes alterações causadas pela mudança de velocidade e também não foram registradas trincas. Porém a irregularidade lateral dos riscos mostra o caráter frágil da amostra durante o ensaio.

Foram mapeadas distribuições de partículas para as granulometrias de 36, 100 e 200 mesh, sendo que o livre caminho médio entre estas decresce com a redução de seu tamanho médio.

Não foi possível correlacionar os resultados do mapeamento dos blocos abrasivos com o ensaio de esclerometria, uma vez que não foi possível, com o último, detectar a pressão na qual ocorre a transição dos mecanismos de remoção de material em placas de porcelanatos.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar o potencial zeta do porcelanato para as soluções utilizadas.
- Determinar o valor de  $K_{Ic}$  do porcelanato na presença das soluções utilizadas no presente trabalho.
- Alterar o sistema de aplicação de força do esclerômetro utilizado, fazendo-o operar em sistema de peso morto.



## REFERÊNCIAS

ABADIR, M. F. et al. Preparation of porcelain tiles from Egyptian raw materials. **Ceramics International**, v. 28, n 3, p 303-310, 2002.

ALVES, H. J. et al. Polimento em peças de porcelanato: Avaliação da porosidade final e da resistência ao manchamento. **Cerâmica Industrial**, v. 15, n. 2, p. 23-29, mar. 2010.

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

ANFACER. Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Louças Sanitárias e Congêneres. Disponível em: [www.anfacer.org.br](http://www.anfacer.org.br). Acesso em: 16 de janeiro de 2012.

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

CANTAVELLA, V. et al., Grinding Work Simulation in Industrial Porcelain Tile Polishing. **Key Engineering Materials**, v. 264-268, p. 1467-1470, 2004.

CABRAL, M. et al., Panorama e perspectivas da indústria de revestimento cerâmicos no Brasil. **Cerâmica Industrial**, v. 15, n. 3, p. 7-18, mai/jun. 2010.

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

ESPOSITO, L. et al. The reliability of polished porcelain stoneware tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n. 9, p. 1487-1498, jun 2005.

GONÇALVES, R. A. et. al. Determinação da dureza através da técnica esclerométrica – Um método comparativo ao ensaio de dureza mohs. Anais do XLIII Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 26201-26211, jun. 1999.

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

HOCKEY, B. J. et al. **The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II**. National Bureau of Standards. 1979. 535 p.

HUTCHINGS, I. M. et al. Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n. 13, 3151-3156, ago. 2005.

HUTCHINGS, I. M. et al. Porcelain tile microstructure: implications for polishability. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 6, p. 1035-1042, 2006.

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



KIGLE-BOECKER G. Measurement of gloss and reflection properties of surfaces. **Tappi Journal**, v. 79, n. 9, mai. 1995.

KUHTZ, S. et al. Energy use in two Italian and Chinese tile manufacturers: A comparison using an enterprise input–output model, **Energy**, v 35, p. 364-374, n 1, jan. 2010.

LUDEMA, Kenneth. C. **Friction, wear, lubrication: A textbook in tribology**. Boca Raton: CRC Press, 1996. 272 p.

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

MCCOLM, I. J. **Ceramic hardness**. New York: Plenum. 1990. 324 p.

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

REED, James S. **Principles of Ceramics Processing**. 2. Ed. John Wiley & Sons. 1995. 658 p.

RIBEIRO, M. J. P. M. ABRANTES, J. C. C. Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 7-11 mar/abr. 2012.

RICHERSON, David W. **Modern ceramic engineering**. 2. Ed. New York: Marcel Dekker. 1992. 860 p.

ROSSO, J. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n 4, p. 11-14, jul/ago. 2005.

SÁNCHEZ, E. et al. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**, 36, p. 831-845, nov. 2009.

SOUSA, F. J. P. et al. Kinematics of a single abrasive particle during the industrial polishing process of porcelain stoneware tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n 10, p. 3183-3190, 2007.

SOUSA, F. J. P. et. al. Evaluation of measurement uncertainties for a scratching tester, **Measurement**, v. 39, n. 7, p. 594-604, ago. 2006.

SOUSA, F. J. P. et al. Glossiness distribution over the surface of stoneware floor tiles due to the polishing process. **Journal of Material Science**, v 42, n 24, p. 10124-10132, 2007.

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

SHU, Z. et al. Cleaner production of porcelain tile powders. Fired compact properties, **Ceramics International**, v. 38, n. 2, p. 1479-1487. mar. 2012.

VÁZQUEZ, F. Q. **La operación de pulido del gres porcelánico**: Estudio de la influencia de las variables del proceso y de las características de los materiales. 2008. 218 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Superior de Tecnologia e Ciências Experimentais, Universitat Haume I de Castelló. Castellón, Espanha, 2008.

WIGGERS, W. S. et al. Evolução da superfície do porcelanato ao longo do processo de polimento. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. ½, jan/abr. 2007.

ZUM GAHR, K. H. Formation of wear debris due to abrasion. III International Conference on Wear of Materials, ASME, Dearborn, USA, p. 396-405, 1981.

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