

O ESTUDO DA CINEMÁTICA E DOS ASPECTOS TRIBOLÓGICOS DO PROCESSO DE POLIMENTO EM ROCHAS ORNAMENTAIS

THE STUDY OF THE CINEMATICS AND TRIBOLOGICAL ASPECTS OF POLISHING PROCESS ON DIMENSION STONES

Rodrigo Lopes Arcanjo

Aluno de Graduação da Engenharia Mecânica do 10º período, IFES
Período PIBIC/CETEM: fevereiro a julho de 2019,
rlopesarcanjo@gmail.com

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Orientador, Geólogo, D.Sc.
leolysil@cetem.gov.br

Marckcilei Lima Dan

Coorientador, Engenheiro Mecânico, D.Sc.
dan@ifes.edu.br

RESUMO

O estudo do desgaste no Tribossistema encontrado no processo de polimento de rochas ornamentais se caracteriza pela interação dos mecanismos de desgaste entre a chapa de rocha e o rebolo abrasivo sob determinadas condições operacionais da máquina politriz. Tal enfoque possibilita uma melhor compreensão do sistema de desgaste atuante de modo a otimizar este processo, uma vez que, na chapa de rocha deseja-se o desbaste efetivo a fim de minimizar o perfil de rugosidade e aumentar o brilho, ao passo que no rebolo abrasivo se pretende manter o poder de desbaste e retardar o processo de desgaste. Assim, neste presente trabalho, foram estudados os mecanismos de desgaste atuantes na rocha e no rebolo abrasivo através da utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) e da equação de Archard modificada, que possibilitaram, respectivamente, o levantamento das tensões de contato nas interfaces de desgaste e a severidade do desgaste na chapa de rocha por meio. Os resultados ora apresentados visam contribuir para que este tipo de estudo possa dar a melhoria da qualidade do processamento industrial de rochas ornamentais e ser mais um passo para o real dimensionamento das variáveis da máquina nesse sistema de desgaste.

Palavras chave: polimento, cinemática, modelagem, desgaste, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

The study of wear in the Tribosystem found in the polishing process of dimension stones is characterized by the interaction of the wear mechanisms between the stone slab and the grinding wheel under certain operating conditions of the polishing machine. This approach is fundamental because allow a better understanding of the active wear system in order to optimize this process, since in the stone slab it is desired the effective thinning in order to minimize the roughness profile and increase the brightness; and abrasive grinding wheel to maintain the roughing power and slow down the wear process. Thus, in this present work, the mechanisms of wear on the stone and abrasive grinding wheel were studied through the use of the Finite Element Method (MEF) and the modified Archard equation that enabled, respectively, the lifting of contact stresses at the interfaces wear and the severity of the wear on the stone slab by means of. The results presented here aim to contribute to the improvement of the quality of the industrial processing of dimension stones and to be a step towards the real dimensioning of the machine variables in this wear system.

Keywords: polishing, cinematic, simulation, wear, finite element method.

1. INTRODUÇÃO

O setor de rochas ornamentais no Espírito Santo está em pleno desenvolvimento e possui grande relevância na economia do estado e do País. Segundo dados da ABIROCHAS (2019), as exportações de rochas ornamentais e seus diversos produtos somaram cerca de US\$ 992,5 milhões com um quantitativo de 2,2 milhões toneladas em 2018. O processo de beneficiamento de rochas ornamentais é responsável por conceder o devido tratamento à rocha, desde a etapa de lavra até o produto final ou semiacabado. Desta forma, na etapa de lavra, os blocos são extraídos das pedreiras, no beneficiamento primário, compreende a fase de desdobramento do bloco em chapas de espessuras variáveis, e o beneficiamento secundário, é responsável por atribuir acabamento superficial a chapa de rocha (SILVEIRA, VIDAL e SOUZA, 2014). Nesta última etapa, devido à ação dos elementos abrasivos combinados com a cinemática das máquinas politrizes, o acabamento superficial é alcançado por meio da diminuição gradativa da rugosidade, bem como pelo fechamento dos poros dos minerais (SILVEIRA, 2007). Contudo, a compreensão dos parâmetros operacionais das máquinas politrizes e a qualidade final do polimento funcionam de maneira empírica, de modo que no final do processo de polimento, se o resultado não for satisfatório, repete-se esta etapa até atingir o resultado esperado. Dessa forma, além de gerar maiores custos operacionais, há uma diminuição na competitividade da indústria brasileira no mercado internacional.

2. OBJETIVOS

Desenvolver simulação numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos que represente a interação do contato efetivo entre o rebolo abrasivo e a chapa de rocha a fim de definir as tensões normais presentes nestas interfaces. Com isto, utilizar a equação de Archard para modelar o desgaste e a influência dos parâmetros operacionais da máquina politriz na severidade de desgaste na chapa de rocha.

3. METODOLOGIA

Para definir a tensão de contato nas superfícies de desgaste nas interfaces chapa de rocha-rebolo abrasivo, foi utilizado o programa *Workbench ANSYS 18.2*, que permitiu a realização da simulação numérica. Para isto, foi necessário criar as geometrias em um programa CAD (*computer aided design*), inserir as propriedades dos materiais envolvidos, discretizar as geometrias por meio da geração de malhas, aplicar as devidas condições de contorno tais como restrições e carregamentos, e por último, obter e validar os resultados. Para validação dos resultados foi realizado o teste da convergência, que consistiu em comparar os resultados obtidos em consecutivos refinamentos da malha até obter a convergência dos resultados. Por conseguinte, relacionaram-se os resultados obtidos no estudo dos aspectos cinemática da máquina politriz, de acordo com Arcanjo e Silveira (2018) com o presente trabalho, por meio da equação de Archard. Com isto, foi possível descobrir a severidade de desgaste na chapa de rocha, analisando a influência da variação dos parâmetros operacionais da máquina politriz na mesma.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento das tensões de contato que os rebolos abrasivos exercem sobre a superfície da chapa de rocha e vice-versa é fundamental, uma vez que, a mesma promove o desgaste tanto na rocha quanto nos rebolos abrasivos. Na rocha deseja-se um desgaste uniforme de tal modo que garanta o brilho, no abrasivo deseja-se minimizar o desgaste do rebolo abrasivo sem perder o poder de corte.

A fim de obter as tensões de contato na interface de desgaste chapa de rocha/rebolo abrasivo, a obtenção das medidas dos componentes da máquina politriz foi necessária a fim de reproduzir o modelo a ser estudado no formato CAD (*computer aided design*), que posteriormente fora exportando para o *software Workbench ANSYS 18.2*, na interface *static structural*.

Posteriormente, foram inseridas as propriedades dos materiais da sapata, rebolo abrasivo e chapa de rocha conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedade mecânicas dos materiais.

Propriedades Mecânicas	Sapata	Rebolo Abrasivo	Chapa de Rocha
Densidade	7,85 g/cm ³	1,48 g/cm ³	2,6 g/cm ³
Módulo de Elasticidade	185 GPa	3 GPa	100 GPa
Coefficiente de Poisson	0,28	0,42	0,08
Tensão de Escoamento a Tração	864 MPa	25MPa	-
Tensão Máxima de Tração	974 MPa	33MPa	30 MPa
Tensão de Escoamento a Compressão	864 MPa	-	-
Tensão Máxima de Compressão	-	-	200 MPa

Tais propriedades mecânicas foram inseridas no programa de simulação numérica, considerando que as mesmas são isotrópicas, ou seja, as propriedades não variam ao longo das direções das geometrias analisadas. Sistemas de coordenadas foram adotados de tal modo a direcionar a aplicação dos carregamentos. Além disso, tipos de contatos foram subdivididos em três grupos mediante as respectivas interações entre os componentes, a saber, sapata/suporte, suporte-rebolo abrasivo e rebolo abrasivo-chapa de rocha. O tipo de contato dos conjuntos sapata/suporte e suporte-rebolo abrasivo foram definidos como regiões coladas (*bonded*) uma vez que, na prática, as mesmas são fixadas e, portanto, não há movimento relativo entre os componentes durante o processo de polimento. Para o conjunto rebolo abrasivo/chapa de rocha, o tipo de contato foi definido como “friccional” (*frictional*), visto que, na prática, existe movimento relativo entre o rebolo abrasivo e a chapa de rocha. Para discretização do modelo adotado em elementos finitos, foram utilizados métodos de controle de malha que permitiram escolher o tipo de elemento desejado e definir o tamanho dos elementos de cada componente, totalizando um valor de 350.393 nós e 233.383 elementos empregados na simulação numérica. Na Figura 1 é possível ver todo o modelo discretizado em elementos finitos.

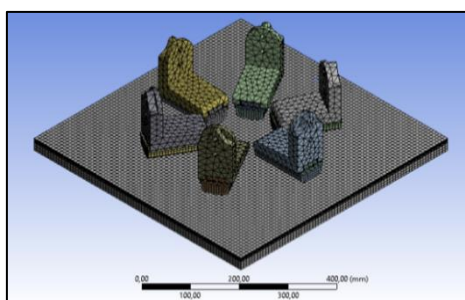


Figura 1: Geração de malha no modelo analisado.

Analisando os componentes da máquina politriz responsável por fornecer a pressão normal de contato, tem-se a presença de dois atuadores. Considerando a pressão de trabalho igual a adotada pelo setor de polimento de rochas ornamentais, que é 2 bar e diâmetro interno dos atuadores de 80 mm, tem-se a força total responsável por fornecer a pressão normal igual a 2010,62 N. Esta força total se distribui nos seis conjunto sapata-rebolo abrasivo. Logo, a força em cada conjunto é de 335,1 N. A força encontrada em cada conjunto sapata/rebolo abrasivo é descarregada em dois mancais de deslizamento presentes nos componentes do cabeçote de polimento com respectivas larguras de 18,46 mm e 17,63 mm. Desta forma, as forças presentes em cada mancal é de 171,4 N e 163,7 N, que posteriormente foram inseridas nos sistemas de

coordenadas do modelo estudado. Para as restrições que foram impostas nas geometrias, a fim de garantir o equilíbrio estático do modelo, a chapa de rocha foi engastada e nos conjuntos sapata/rebolo abrasivos foi permitido movimento somente no eixo y, que é a direção do movimento da pressão normal. Como ferramenta de validação dos resultados foi realizado o teste da convergência, que consistiu na execução de sucessivos refinamentos de malha aliados a comparações dos resultados obtidos nas simulações computacionais. Portanto, a pressão normal de contato nas interfaces rebolo abrasivo/chapa de rocha pode ser visto na Figura 2.

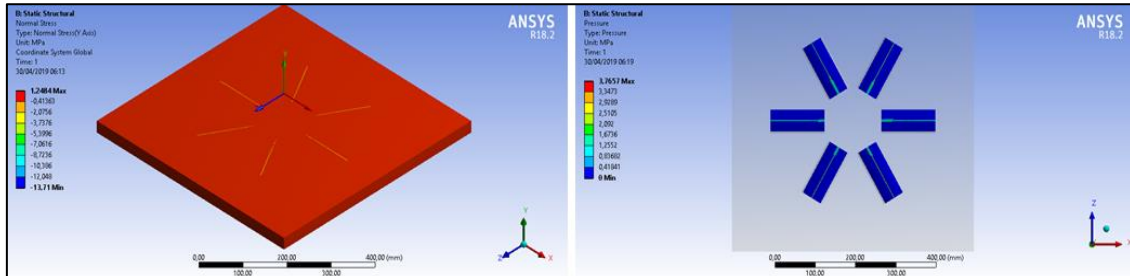


Figura 2: Pressão normal de contato na interface de desgaste.

Uma vez encontrada as tensões normais na interface chapa de rocha/rebolo abrasivo, foi adotado uma equação de desgaste bem conhecida por Tribologistas, chamada equação de Archard, que fornece noções gerais do desgaste abrasivo, na qual relaciona a taxa de desgaste (Q) em função de variáveis macroscópicas que interferem no desgaste, tais como, carga normal (W), dureza do material mais macio (H) e coeficiente de desgaste (K) que é um termo adimensional sempre menor que uma unidade (HUTCHINGS, 1992).

$$Q = \frac{V_{perdido}}{L_{deslizamento}} = \frac{K W}{H} \quad (1)$$

Contudo, para esta modelagem, foram necessárias modificações nessa equação devido os rebolos abrasivos possuírem incontáveis elementos abrasivos em sua composição que são responsáveis por desbastar o perfil de rugosidade da chapa de rocha. Além disso, o formato arredondado do rebolo abrasivo, através do movimento de suingue, promove o contato efetivo de uma pequena área do rebolo abrasivo sobre a chapa de rocha. Dessa forma, se não alterássemos a equação Archard, estaríamos considerando que a força total proveniente dos atuadores estariam concentradas em uma única partícula abrasiva, uma vez que não se sabe o quantitativo de partículas abrasivas que se tem nos rebolos abrasivos. Assim sendo, tal modificação consistiu em dividir toda Equação 1 pela área efetiva, na qual representa a real zona de contato durante a execução do processo de polimento, independentemente do movimento de suingue. Portanto, tem-se que o volume perdido por unidade de área efetiva, na qual representa a severidade de desgaste.

$$V_{perdido}^* = \frac{V_{perdido}}{A_{efetiva}} = \frac{K \sigma_{efetiva}}{H} \int v_{riscamento} dt \quad (2)$$

Adotando os parâmetros cinemáticos da máquina politriz utilizados no setor de polimento de rochas ornamentais para polir chapas de rocha quartzito conforme a Tabela 2 é possível calcular a integral da velocidade de riscamento das partículas abrasivas em função do tempo através do trabalho desenvolvido por Arcanjo e Silveira (2018).

Tabela 2: Parâmetros operacionais da máquina poltriz.

Velocidade de Avanço da Esteira	1,10 m/min = 0,0183 m/s
Rotação do Cabeçote de Polimento	500 rpm
Amplitude de Oscilação Transversal	2,05 m
Frequência de Oscilação Transversal	30 ciclos/min = 0,5 Hz
Pressão do Cabeçote Sobre a Chapa de Rocha	2 bar = $2 \cdot 10^5$ Pa

Desta forma, uma vez que tem-se os valores das tensões efetivas de contato nas interfaces rebolo abrasivo/chapa de rocha e as velocidades de riscamento das partículas abrasivas, foi possível calcular o volume desgastado por unidade de área utilizando a equação de Archard modificada, na qual representou a severidade do desgaste ao longo do raio do rebolo abrasivo cujo as partículas abrasivas tocam a superfície da chapa de rocha. Na Figura 3 é possível ver a severidade de desgaste na chapa de rocha em função das partículas abrasivas que estão ao longo do raio do rebolo abrasivo.

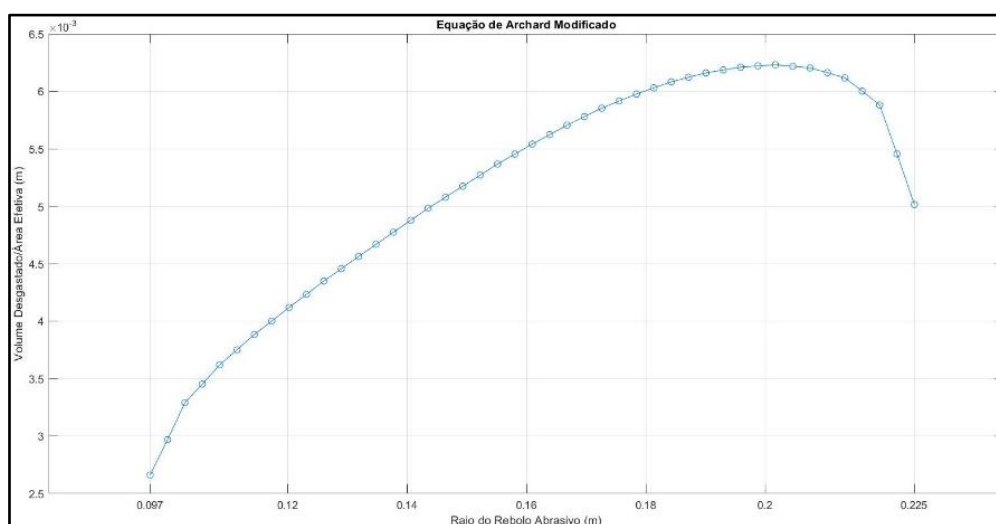


Figura 3: Severidade do desgaste ao longo do raio do rebolo abrasivo.

5. CONCLUSÕES

Nos aspectos relacionados ao desgaste do rebolo abrasivo-chapa de rocha, o MEF se mostrou uma excelente ferramenta computacional, uma vez que permitiu descobrir as tensões de contato na interface desgastada. A verificação dos resultados obtidos por tal ferramenta numérica foi realizada através do teste da convergência. Tal método se mostrou eficaz neste trabalho uma vez que a convergência foi alcançada e, portanto, a validação dos resultados também.

Através da equação de Archard modificada em termos de tensão normal, foi possível associar os aspectos cinemáticos e de desgaste. Desta forma, obteve-se o volume perdido de material por unidade de área na chapa de rocha, o que representou a severidade de desgaste do sistema.

Portanto, este tipo de trabalho pode contribuir para o aprimoramento do processo de polimento de rochas ornamentais através da melhor compreensão dos parâmetros operacionais da máquina poltriz, bem como da influência que os mesmos possuem sobre os aspectos cinemáticos e relacionados ao desgaste.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida (proc.: 164130/2018-7), ao CETEM na figura do meu orientador Leonardo Lyrio da Silveira, ao meu professor coorientador Marckcilei Lima Dan e a professora Karla Dubberstein Tozeti do IFES do *campus* de Cachoeiro de Itapemirim.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS. **Balço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2018**. Brasília: [s.n.], 01/2019.

ARCANJO, L.; SILVEIRA, L.L.D. **Contribuição ao estudo da cinemática do processo de polimento de rochas ornamentais com auxílio de ferramenta computacional**. Cachoeiro de Itapemirim, 2018.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Butterworth-Heinemann, Londres, 1992.

SILVEIRA, L.L.L.D. **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVEIRA, L.L.L.; VIDAL, F.W.H.; SOUZA, J.C. **Beneficiamento de rochas ornamentais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap.7, p.329-398.