

Série Rochas e Minerais Industriais

**Modelagem cinemática do
processo de polimento de rochas
ornamentais para estudo de seus
aspectos tribológicos analisados
pelo método dos elementos
finitos**

**Rodrigo Lopes Arcanjo
Leonardo Luiz Lyrio da Silveira
Marckcilei Lima Dan
Victor Moza Ponciano
Phillipe Fernandes de Almeida
Wana Favero Gaburo Dorigo**



SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Modelagem cinemática do processo de polimento de rochas ornamentais para estudo de seus aspectos tribológicos analisados pelo método dos elementos finitos

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Jair Messias Bolsonaro

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES

Marcos Cesar Pontes

Ministro de Estado

Leonidas de Araújo Medeiros Junior

Secretário-Executivo

Darcton Policarpo Damião

Subsecretário de Unidades Vinculadas

Alexandre Mendonça Gonçalves

Coordenador-Geral de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Silvia Cristina Alves França

Diretora

Marusca Santana Custodio

Coordenadora Substituta de Administração - COADM

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Paulo Fernando Almeida Braga

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

ISSN 1518-9155

ISBN 978-65-5919-008-9

SRMI - 29

Modelagem cinemática do processo de polimento de rochas ornamentais para estudo de seus aspectos tribológicos analisados pelo método dos elementos finitos

Rodrigo Lopes Arcanjo

Engenheiro Mecânico pelo Instituto Federal do Espírito Santo,
Campus Cachoeiro de Itapemirim/ES

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Geólogo, D.Sc. pela EESC/USP em Geotecnologia, com ênfase
em Rochas Ornamentais – Núcleo Regional do Espírito Santo
CETEM/MCTI

Marckcilei Lima Dan

Engenheiro Mecânico, D.Sc. pela UFRJ – Instituto Federal do Espírito
Santo – IFES

Victor Moza Ponciano

Engenheiro de Minas pelo Instituto Federal do Espírito Santo,
Campus Cachoeiro de Itapemirim/ES

Phillipe Fernandes de Almeida

Tecnólogo em Rochas Ornamentais, M.Sc. em Geotecnologia pela
EESC/USP. D.Sc pelo IAU/USP

Wana Favero Gaburo Dorigo

Engenheira de Minas pelo Instituto Federal do Espírito Santo,
Campus Cachoeiro de Itapemirim/ES

CETEM/MCTI

2020

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Silvia Cristina Alves França

Editora

Luiz Carlos Bertolino

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Adão Benvindo da Luz (CETEM), Francisco Wilson Holanda Vidal (CETEM), Jurgen Schnellrath (CETEM), Arthur Pinto Chaves (EPUSP), Luis Lopes (Universidade de Evora), Carlos Adolpho Magalhães Baltar (UFPE), Marsis Cabral Junior (IPT).

A Série Rochas e Minerais Industriais publica trabalhos na área minerometalúrgica, com ênfase na aplicação de minerais industriais e de rochas ornamentais. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes de projetos desenvolvidos no CETEM e em parceria com outras instituições de PD&I.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Revisão

Ana Maria Silva Vieira de Sá

CRB7 3982

Catálogo na Fonte

A674 Arcanjo, Rodrigo Lopes

Modelagem cinemática do processo de polimento de rochas ornamentais para estudo de seus aspectos tribológicos analisados pelo método dos elementos finitos / Rodrigo Lopes Arcanjo [et al.]. — Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020.

47p. (Série Rochas e Minerais Industriais, 29)

1. Polimento. 2. Cinemática. 3. Rochas Ornamentais. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Silveira, Leonardo L. Lyrio da. III. Dan, Marckilei L., IV. Ponciano, Víctor M. V. Almeida, Phillipe F. VI. Dorigo, Wana F.G. VII. Título. VIII.. Série.

CDD – 621.89

SUMÁRIO

RESUMO _____	7
ABSTRACT _____	8
1 INTRODUÇÃO _____	9
2 OBJETIVO _____	13
2.1 Objetivo Geral _____	13
2.2 Objetivos Específicos _____	13
3 MODELAGEM COMPUTACIONAL _____	14
4 ASPECTOS CINEMÁTICOS DO POLIMENTO DE ROCHAS _____	16
4.1 Modelamento Cinemático de Politriz Industrial __	16
4.2 Aspectos de Desgaste _____	25
5 CONCLUSÕES _____	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	45

RESUMO

A realização do processo industrial de polimento de rochas ornamentais baseia-se no conhecimento empírico, visto que os parâmetros operacionais das máquinas politrizes variam mediante a experiência do operador em lidar com os diferentes tipos litológicos. Contudo, existe certo limite para que tal procedimento seja adotado, uma vez que, dependendo dos valores inseridos, pode-se ter uma perda de qualidade da superfície polida, um maior consumo de água, energia, abrasivo e menor eficiência do processo como um todo. O estudo desse processo é de extrema importância pois possibilita uma melhor compreensão do sistema de desgaste atuante de modo a otimizar o polimento das rochas. Assim, este estudo tem por finalidade apresentar a modelagem das equações cinemáticas em uma partícula abrasiva atuante sobre a chapa de rocha considerando os tipos de variáveis existentes que promovem o movimento no processo de polimento. Além disso, foram estudados os mecanismos de desgaste atuante na chapa de rocha e no rebolo abrasivo por meio da utilização dos Métodos dos Elementos Finitos (MEF) que possibilitaram o levantamento das tensões de contato nas interfaces de desgaste. Posteriormente, tais tensões foram inseridas na equação de Archard modificada a fim de descobrir a severidade de desgaste na chapa de rocha. Os resultados ora apresentados mostram a grande contribuição que este tipo de estudo pode dar à melhoria da qualidade do processamento industrial de rochas ornamentais e se configuram como um importante 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 accomplishment of the industrial polishing process of dimension stones is based on empirical knowledge, since the operational parameters of polishing machines vary with the experience of the operator in dealing with the various lithotypes. However, there is a boundary to apply such parameters once depending on the entered values in the machines, it has been a loss of quality of the polished surface, increase of water consumption, energy, abrasive and decrease of the efficiency of the hole process. The study of wear in this Tribosystem, namely the interaction of wear mechanisms between the rock and abrasive under certain operating conditions of the polishing machine are extremely important because they enable a better understanding of the active wear system in order to optimize this process, since in the rock the effective thinning is desired in order to minimize the profile of roughness and increase the brightness; and abrasive to maintain the roughing power and slow down the wear process. Thus, in this present study the modeling of the kinematic equations was performed on an abrasive particle acting on the rock sheet considering the types of existing variables that promote the movement in the polishing process, namely, forward speed, transverse oscillation frequency and rotation of the polishing head in order to understand the influence of such variations on the operating parameters and how they interfere with the final result. In addition, the mechanisms of wear on the rock plate and abrasive grinding wheel were studied through the use of Finite Element Methods (FEM) that allowed the contact stresses to be lifted at the wear interfaces. Subsequently, such contact stresses were inserted into the modified Archard equation in order to discover the severity of wear on the rock plate. The results presented here show the great contribution that this type of study can give to the improvement of the quality of the industrial processing of dimension stones and it is configured an important step for the real dimensioning of the variables of the machine in this wear system.

Keywords

Polishing, kinematic, simulation, wear, finite element method.

1 | INTRODUÇÃO

Com a crescente competitividade que as novas tecnologias do setor de rochas ornamentais vêm exercendo no mercado global e o avanço da indústria 4.0, faz-se necessário estudos que possibilitem uma melhor compreensão dos mecanismos de funcionamento das máquinas politrizes automáticas, a fim de promover novas formas de acompanhamento do processo de polimento, uma vez que na indústria de rochas ornamentais, o conhecimento dos parâmetros operacionais das máquinas politrizes variam mediante a experiência dos operadores.

Destaca-se ainda que a busca por novas tecnologias e a competitividade do mercado global impulsionaram o desenvolvimento da chamada indústria 4.0. Neste modelo de produção proposto, o qual também é conhecido como a Quarta Revolução Industrial, destaca-se o intenso processo de automatização das plantas industriais, principalmente no que diz respeito à presença dos sistemas ciber-físicos que são os elementos responsáveis pelo monitoramento dos processos produtivos em tempo real (HERMANN, PENTEK e OTTO, 2015). Dessa forma, por meio de um banco de dados, o próprio sistema consegue tomar algumas decisões de forma descentralizadas a fim de otimizar todo o processo.

A escassez de estudos que abordem os mecanismos de desgaste dos abrasivos utilizados no polimento de rochas ornamentais, bem como a influência dos parâmetros operacionais das máquinas politrizes na qualidade final do processo de polimento, dificultam a inserção da indústria de rochas ornamentais nos modelos produtivos previstos pela indústria 4.0. O processo de polimento fornece proteção e brilho à superfície da chapa de rocha. Contudo, do ponto de

vista técnico, trata-se de um processo de usinagem de acabamento por abrasão com pouquíssima remoção de materiais (SOUSA, 2007). Esta remoção dá-se por meio dos abrasivos que possuem granulometria e formato variáveis, de modo que deslizem sobre a superfície da chapa rochosa desprendendo assim partículas de desgaste, também conhecidas como *debris* (ROVANI, 2014).

As máquinas responsáveis pelo polimento são chamadas de politrizes, as quais, possuem uma plataforma giratória chamada de cabeçote (também conhecida como satélite). Cada cabeçote possui quatro, seis ou oito sapatas onde são encaixados os rebolos abrasivos. Estes, por sua vez, são compostos de elemento ligante, que podem ser de cimento soret, ligas de ferro e cobalto ou resina epoxídica. À essa liga soma-se o elemento de corte (carbeto de silício, alumina ou diamante sintético), que são os responsáveis por desbastar a rocha, diminuindo assim o perfil de rugosidade e conferindo brilho (ALMEIDA, 2014).

O processo de desgaste da rocha é do tipo abrasivo por deslizamento, uma vez que se tem partículas abrasivas extremamente duras fixadas no rebolo abrasivo deslizando em movimento relativo sobre a superfície da chapa (SILVEIRA, 2007). Os mecanismos de atrito e desgaste são influenciados por alguns fatores, tais como, pressão de contato aplicado pelo cabeçote de polimento sobre a chapa, trajetória das partículas abrasivas, rugosidade, temperatura da interface, reatividade química e características intrínsecas do tipo litológico, o que permite identificar esse fenômeno como um Tribossistema.

O Tribossistema é definido pela interação dos elementos que propiciam os mecanismos de desgaste, uma vez que não se

pode analisar os elementos de maneira isolada pois se perderia a noção de um sistema integrado, onde as características de uma variável influem nos resultados das demais. O Tribossistema do processo de polimento de rochas ornamentais é definido pela interação da politriz, abrasivos e tipo litológico que propiciam o desgaste, garantindo assim um maior brilho final à chapa (SILVEIRA, et al., 2017). Para a máquina politriz, deve-se levar em consideração o projeto, como por exemplo, a transmissão de carga, forma das peças, lubrificação, temperatura e ambiente, bem como, as condições operacionais, como por exemplo, quantidade de rebolos abrasivos, carga normal do cabeçote, velocidade de rotação, frequência de oscilação transversal e velocidade de avanço da esteira (CAMARGO, 2013). Para a rocha, deve-se levar em consideração a dureza mineral, tenacidade à fratura, textura, microestrutura, etc. (SILVEIRA, 2007). Para o abrasivo, o tamanho dos grãos, fator de forma, tenacidade e dureza (ALMEIDA, 2014).

Assim, este trabalho tem como escopo uma tentativa de entender os parâmetros operacionais das máquinas politrizes automáticas, na qual se destacam algumas das variáveis presentes no processo de polimento: velocidade de avanço da esteira; frequência de oscilação transversal, velocidade de rotação e a pressão de contato do cabeçote de polimento sobre a superfície da chapa. Além disso, deseja-se compreender o sistema de desgaste atuante nas interfaces rocha-abrasivo provocado pela pressão de contato a fim de descobrir a tensões normais nestas interfaces e, assim, estimar o volume desgastado por unidade de área ao longo do raio do rebolo abrasivo.

Desta forma, os estudos como abordados neste trabalho, representam a possibilidade de inserção da indústria 4.0 no setor de rochas ornamentais, de modo que o conhecimento prévio dos parâmetros operacionais e processo produtivo alimentem um banco de dados capaz de ser usado como base no processo automatizado de tomada de decisões previsto neste novo modelo produtivo.

2 | OBJETIVO

2.1 | Objetivo Geral

Analisar a influência dos parâmetros operacionais das máquinas politrizes, bem como, os mecanismos de desgaste atuantes nas interfaces de desgaste, a fim de embasar a criação de um modelo computacional que melhor represente esse sistema, a saber, a relação da máquina politriz, rebolo abrasivo e tipo de material rochoso. Desta forma, tal modelo computacional permitirá reproduzir os efeitos dos parâmetros operacionais no próprio computador, sem a necessidade de testes experimentais, o que gera uma redução tanto de tempo como também de recursos.

2.2 | Objetivos Específicos

Elaborar o equacionamento cinemático que descreva a interação das partículas abrasivas com a superfície da chapa de rocha, tais como as velocidades e acelerações associadas na cinemática da politriz industrial e a trajetória da partícula abrasiva na superfície da chapa polida.

Desenvolver uma simulação numérica que represente a interação do contato efetivo entre o rebolo abrasivo e a chapa de rocha, a fim de determinar as tensões normais presentes nesta interface. Com isto, utilizar tais tensões normais na equação de Archard modificada a fim de obter a severidade de desgaste na chapa de rocha.

3 | MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para realização da modelagem computacional da cinemática do polimento em rochas ornamentais, foi utilizado o *software Scilab 6.0.2* que permitiu a criação de funções que possibilitaram a compilação de linhas de programações em resultados gráficos. Tais funções (também conhecidas como *Script*) quando compiladas, recebem os mesmos valores dos parâmetros operacionais da politriz que o operador na indústria insere na máquina, como, por exemplo, velocidade de avanço, rotação do cabeçote, amplitude e frequência de oscilação transversal.

Para a criação dessas funções, foram realizadas deduções a partir do conceito de movimento relativo que possibilitaram o desenvolvimento de equações que descrevessem o comportamento das partículas abrasivas atuantes no processo de polimento. As características referentes à qualidade da cinemática de polimento exteriorizaram-se por meio das equações da trajetória, velocidade e aceleração da partícula abrasiva sobre a superfície da chapa, visto que é possível prever o resultado do polimento antes mesmo de se executar na prática esse processo.

Para uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste da chapa de rocha e do rebolo abrasivo no processo de polimento, foram realizadas simulações numéricas no *software ANSYS Workbench* que possibilitaram o levantamento das tensões de contato atuantes na interface de desgaste. O tipo de simulação utilizada nesse *software* foi o *Static Structural* devido à simplificação do problema se restringir a questões de elasticidade linear.

Para tal feito, foi necessária a criação das geometrias a serem analisadas, obtenção das propriedades dos materiais como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson e, por último, a imposição das condições de contorno tais como restrições, forças e momento atuantes nas geometrias.

Com objetivo de validar a simulação numérica realizada para descobrir as tensões de contato, efetuou-se o teste da convergência, que forneceu respectivas comparações dos refinamentos de malha com os resultados obtidos das tensões de contato. Conseguiu-se obter a convergência depois de cinco iterações na qual o erro relativo das tensões de contato foi de 0,1%, gerando assim na malha um total de 350.393 nós e 233.383 elementos.

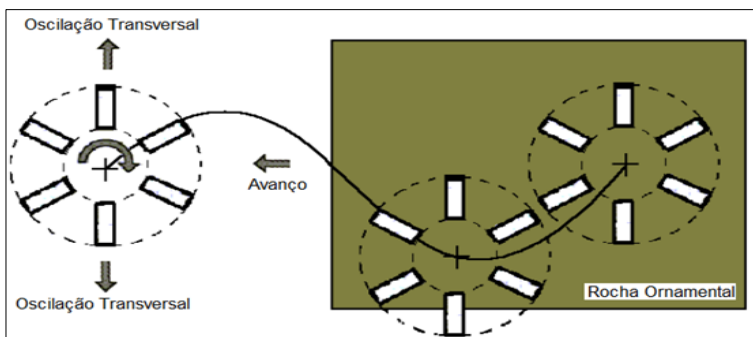
Finalmente, com as tensões de contato obtidas e a velocidade da partícula ao longo do raio anteriormente encontradas foi possível utilizar a equação de Archard modificada a fim de descobrir o volume desgastado por unidade de área ao longo do raio do rebolo abrasivo sobre a chapa de rocha, na qual representa a severidade de desgaste.

4 | ASPECTOS CINEMÁTICOS DO POLIMENTO DE ROCHAS

4.1 | Modelamento Cinemático de Politriz Industrial

Segundo Meriam (2009), cinemática é definida como o estudo do movimento dos corpos que relaciona o deslocamento, velocidade, aceleração e tempo, sem fazer referência às causas do movimento, isto é, as forças que são geradas pelo movimento. Nesta análise, a máquina politriz industrial a ser analisada é automática, na qual as variáveis adotadas como fonte de movimento são: velocidade de avanço da esteira (m/s); rotação do cabeçote de polimento (rad/s); frequência (Hz); amplitude de oscilação transversal da politriz (m) e pressão de contato do cabeçote sobre a chapa (Pa) na qual deseja-se inserir ainda, o tempo de análise do polimento, dado em segundos.

Na Figura 1, é possível ver os parâmetros cinemáticos da máquina politriz que fornece o movimento para o cabeçote de polimento.



Fonte: Modificado de Souza, 2007.

Figura 1. Esquema de polimento na indústria.

Efeitos como o movimento de suingue das sapatas do cabeçote e possíveis desalinhamento/empenamentos da chapa ou equipamento não foram considerados neste trabalho devido ao aumento da complexidade de modelagem e pelo fato de existir uma pequena região de contato do rebolo abrasivo sobre a chapa que permanece inalterada. Além disso, a quantidade de água usada no processo de polimento não foi abordada, uma vez que se pretende tratar da cinemática atuante bem como os mecanismos de desgaste atuante no rebolo abrasivo e na chapa de rocha. Foram adotados como sistema de referência no eixo x , a velocidade de avanço da esteira (componente vetorial \hat{i}) e no eixo y , a oscilação transversal (componente vetorial \hat{j}).

Dada a posição de um ponto qualquer (H) dentro do rebolo abrasivo a cada incremento de tempo, pode-se obter um vetor que é descrito como o deslocamento da partícula abrasiva \vec{r}_H conforme a Figura 2.

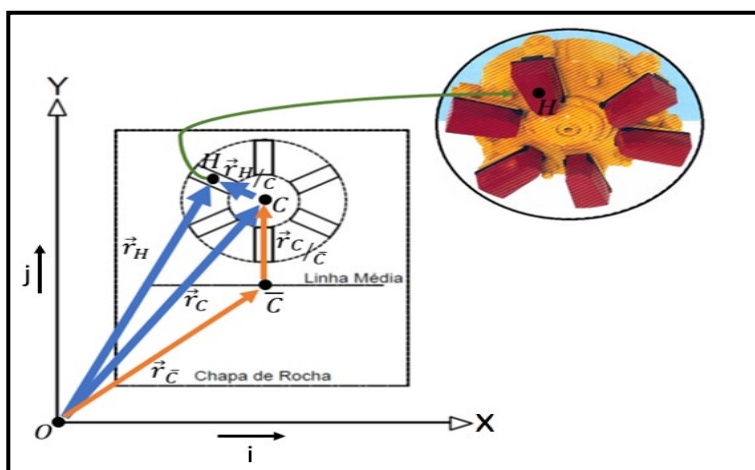


Figura 2. Componentes do vetor deslocamento.

Esse deslocamento da partícula abrasiva (também denominada de trajetória da partícula abrasiva) está em função dos parâmetros operacionais da máquina politriz e da posição relativa entre o cabeçote e o referencial de origem. Dessa forma, pode-se escrever a equação em termos vetoriais:

$$\vec{r}_H = \vec{r}_c + \vec{r}_{H/C} \quad [1]$$

Contudo, existe uma linha média que corresponde a linha de simetria por onde o cabeçote de polimento vai percorrer e que pode ser considerada como a linha de centro da chapa a ser polida. Assim, tem-se:

$$\vec{r}_c = \vec{r}_{\bar{c}} + \vec{r}_{c/\bar{c}} \quad [2]$$

A componente vetorial ($\vec{r}_{\bar{c}}$) pode ser escrita em termos da velocidade de avanço V_a do cabeçote na direção x :

$$\begin{aligned} \vec{r}_{\bar{c}} &= x(t)\hat{i} + y(const.)\hat{j} \\ \vec{r}_{\bar{c}} &= (x_0 + V_a t)\hat{i} + y_0\hat{j} \end{aligned} \quad [3]$$

Onde x_0 e y_0 são as coordenadas do local cujo cabeçote inicia o movimento.

A distância do ponto C com relação a \bar{C} pode ser obtida considerando que existe um movimento harmônico simples no cabeçote de polimento na direção \hat{j} em relação a linha média conforme a Figura 2. Uma frequência f é empregada ao movimento permitindo a movimentação do cabeçote ao longo do eixo y na seguinte forma:

$$\begin{aligned}\vec{r}_{c/\bar{c}} &= 0 \hat{i} + [A \operatorname{sen}(w t)] \hat{j} \\ \vec{r}_{c/\bar{c}} &= [A \operatorname{sen}(2\pi f t)] \hat{j}\end{aligned}\quad [4]$$

Logo, a componente vetorial (\vec{r}_c) pode ser determinado como:

$$\begin{aligned}\vec{r}_c &= \vec{f}(V_a, A, f, t) \\ &= (x_0 + V_a t) \hat{i} + [y_0 + A \operatorname{sen}(2\pi f t)] \hat{j}\end{aligned}\quad [5]$$

Para descobrir a componente vetorial $\vec{r}_{H/C}$, é necessário decompor tal vetor nas direções \hat{i} e \hat{j} conforme a Figura 3 abaixo.

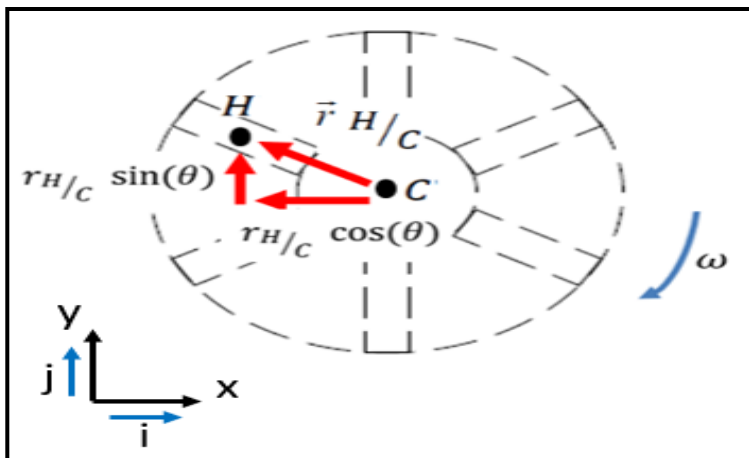


Figura 3. Decomposição do vetor deslocamento.

O ângulo teta (θ) está em função da velocidade de rotação do cabeçote e do tempo de análise, uma vez que, como a velocidade de rotação é constante no processo de polimento, a cada instante de tempo tem-se a variação do ângulo do vetor

$\vec{r}_{H/C}$ entre 0 à 2π . Assim, tal componente vetorial pode ser escrita como:

$$\vec{r}_{H/C} = r_{H/C} x \hat{i} + r_{H/C} y \hat{j} \quad [6]$$

$$\vec{r}_{H/C} = \vec{f}(r_{H/C}, \omega, t) = r_{H/C} [\cos(\omega t) \hat{i} + \text{sen}(\omega t) \hat{j}]$$

Portanto, uma vez definidas todas as componentes vetoriais propostas, encontramos a equação que descreve a trajetória da partícula abrasiva sobre a superfície da chapa de rochas ornamentais.

$$\vec{r}_H = \left\{ (x_0 + V_a t) + r_{H/C} \cos(\omega t) \right\} \hat{i} + \left\{ [y_0 + A \text{sen}(2\pi f t)] + r_{H/C} \text{sen}(\omega t) \right\} \hat{j} \quad [7]$$

Adotando os parâmetros cinemáticos da máquina politriz utilizados no setor de polimento de rochas ornamentais para polir chapas de rocha isotrópica conforme a Tabela 1 é possível calcular a integral da velocidade de riscamento das partículas abrasivas em função do tempo por meio dos aspectos cinemáticos analisados. Além disso, plotar os gráficos de riscamento como os vistos abaixo.

Tabela 1. Parâmetros operacionais da máquina politriz industrial.

Velocidade de Avanço da Esteira	0,70, 1,10 e 1,15 m/min
Rotação do Cabeçote de Polimento	400, 500 e 600 rpm
Amplitude de Oscilação Transversal	2,05 m
Frequência de Oscilação Transversal	0,3, 0,5 e 0,7 Hz

Com tal dedução realizada e compilada em *software*, é possível obter o riscamento causado pelas partículas no atrito realizado entre rebolo abrasivo e rocha. Nas Figuras 4 e 5 pode-se observar a trajetória da partícula abrasiva em duas condições distintas de processamento, variando-se apenas a velocidade de esteira em 0,7 e 1,15 m/min. Na Figura 6 é possível notar com detalhe a densidade do riscamento causado pelas partículas abrasivas nas regiões demarcadas nas figuras a seguir.

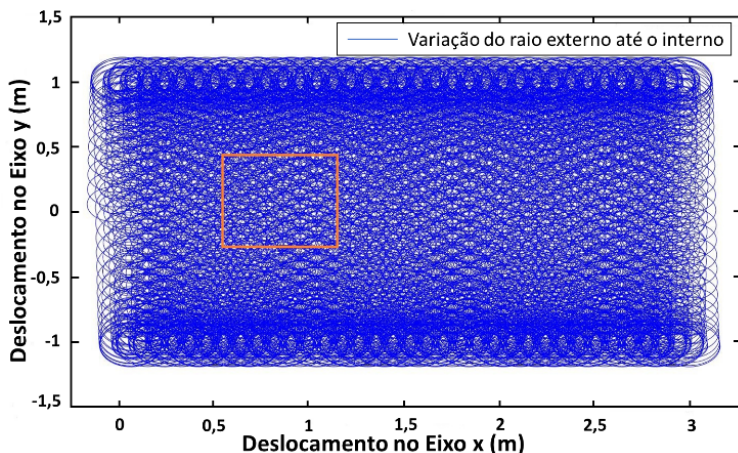


Figura 4. Trajetória da partícula abrasiva no processo industrial de acordo com a velocidade de esteira de 0,70 m/min.

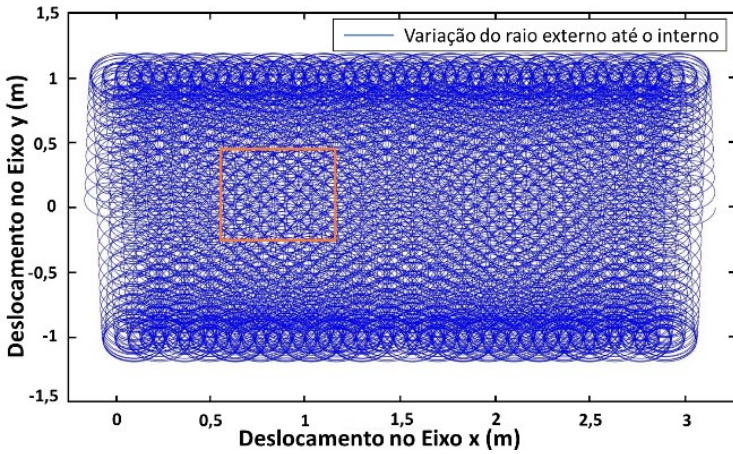


Figura 5. Trajetória da partícula abrasiva no processo industrial de acordo com a velocidade de esteira de 1,15 m/min.

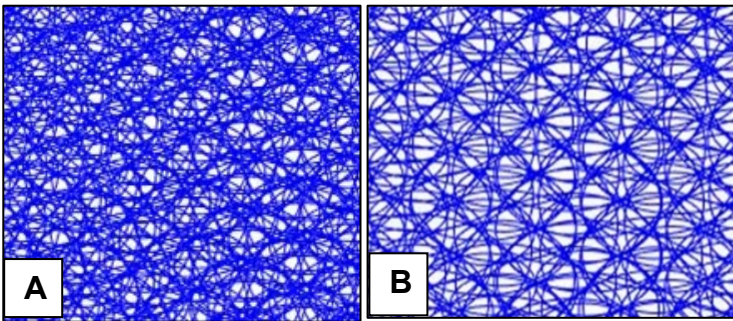


Figura 6. Detalhe da densidade do riscamento das partículas abrasivas sobre a rocha. Velocidades de 0,7 m/min (A) e de 1,15 m/min (B).

Os gráficos gerados pelo modelo possibilitam a visualização da densidade da varredura que as partículas abrasivas exercem sobre a superfície da chapa, mostrando a influência do fator tempo de polimento no contato efetivo entre partículas de corte e rocha.

A velocidade da partícula abrasiva pode ser obtida através da derivada temporal da equação (7). Desta forma, tem-se:

$$\begin{aligned}\bar{v}_H &= \dot{\vec{r}}_H = \dot{\vec{r}}_C + \dot{\vec{r}}_{H/C} \\ \bar{v}_H &= \left[V_a - r_{H/C} w \operatorname{sen}(w t) \right] \hat{i} \\ &\quad + \left[r_{H/C} w \operatorname{cos}(w t) \right. \\ &\quad \left. + \pi f A \operatorname{cos}(2\pi f t) \right] \hat{j}\end{aligned}\quad [8]$$

Como a equação (8) possui componentes nas respectivas direções \hat{i} e \hat{j} , a velocidade escalar é a magnitude do vetor velocidade, denominada velocidade de riscamento, que pode ser obtida por meio do módulo da velocidade da partícula abrasiva:

$$\begin{aligned}v_{\text{riscamento}} \\ = \sqrt{\left[V_a - r_{H/C} w \operatorname{sen}(w t) \right]^2 + \left[r_{H/C} w \operatorname{cos}(w t) + \pi f A \operatorname{cos}(2\pi f t) \right]^2}\end{aligned}\quad [9]$$

Assim sendo, a Figura 7 mostra como a velocidade de riscamento é influenciada pela oscilação transversal em função do tempo nos pontos equidistantes citados anteriormente.

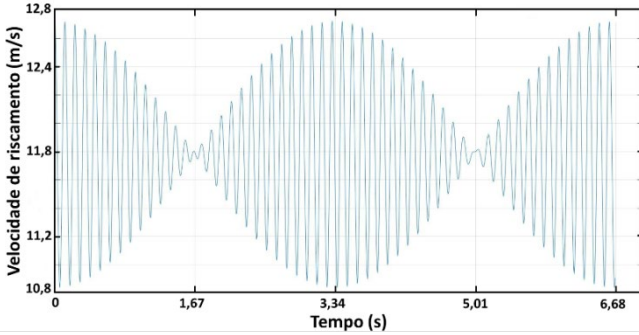


Figura 7. Velocidade de riscamento no intervalo de tempo para um ciclo de oscilação transversal.

A aceleração da partícula pode ser definida como a derivada temporal da velocidade de riscamento encontrada na equação (9). Contudo, essa velocidade é um vetor tangente a trajetória, de modo que é conveniente utilizar as coordenadas normal e tangencial devido ao caráter circular do movimento não retilíneo. Dessa forma, a aceleração da partícula abrasiva em termos de coordenadas normal e tangencial é:

$$\vec{a}_H = v_{riscamento} \dot{\theta} \hat{e}_n + \dot{v}_{riscamento} \hat{e}_t \quad [10]$$

Onde:

$$- v_{riscamento} = \begin{aligned} & (r_{H/C} w \cos(w t) - \pi f A \cos(2\pi f t)) \\ & + 2 \left(r_{H/C} w^2 \sin(w t) - 2A f^2 \pi^2 \sin(2\pi f t) \right) \\ & + \left(2r_{H/C} w^2 \cos(w t) (V_a - r_{H/C} w \sin(w t)) \right) \end{aligned}$$

$$2 * \sqrt{(r_{H/C} w \cos(w t) - \pi f A \cos(2\pi f t))^2 + (V_a - r_{H/C} w \sin(w t))^2}$$

Portanto, a aceleração efetiva da partícula abrasiva pode ser obtida através do módulo da equação (11) que representa a aceleração resultante, representada na Figura 8.

$$\begin{aligned} \bar{a}_{Efetiva} &= \sqrt{a_n^2 + a_t^2} \\ \bar{a}_{Efetiva} &= \sqrt{(v_{riscamento} \dot{\theta})^2 + (v_{riscamento})^2} \end{aligned} \quad [11]$$

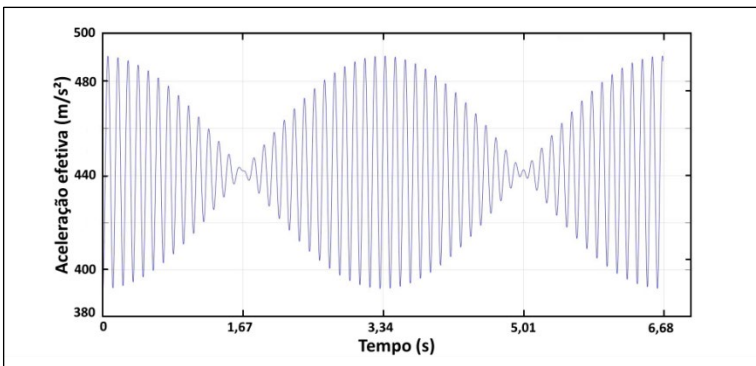


Figura 8. Aceleração efetiva da partícula abrasiva.

4.2 | Aspectos de Desgaste

O levantamento das tensões de contato que o rebolo abrasivo exerce sobre a superfície da chapa de rocha e vice-versa é de extrema importância, uma vez que a mesma promove o desgaste tanto na rocha quanto no rebolo abrasivo. Na rocha, deseja-se um desbaste uniforme de tal modo que garanta brilho; no abrasivo, deseja-se minimizar o desgaste do rebolo abrasivo sem perder o poder de lustro.

A fim de descobrir as tensões de contato na interface de desgaste chapa de rocha-rebolo abrasivo, a obtenção das medidas dos componentes da máquina poltriz foi necessária para reproduzir o modelo a ser estudado no formato CAD (*computer aided design*), que posteriormente foi exportado para o *software* Workbench ANSYS 18.2, na interface *static structural*, conforme visto na Figura 9.

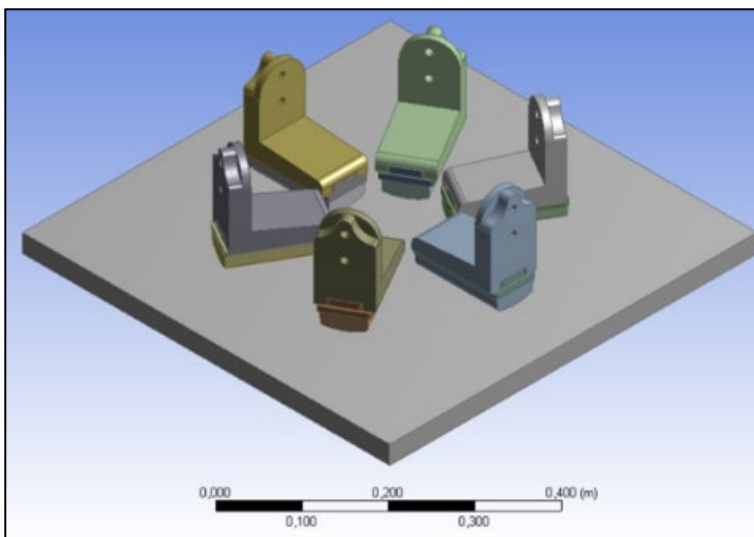


Figura 9. Modelo CAD adotado.

Posteriormente, foram inseridas as propriedades dos materiais da sapata, rebolo abrasivo e chapa de rocha, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. 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 Tração	864 MPa	25 MPa	-
Tensão Máxima de Tração	974 MPa	33 MPa	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 *Workbench ANSYS* considerando-as 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 (a) e suporte-rebolo abrasivo (b) 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, conforme a Figura 10.

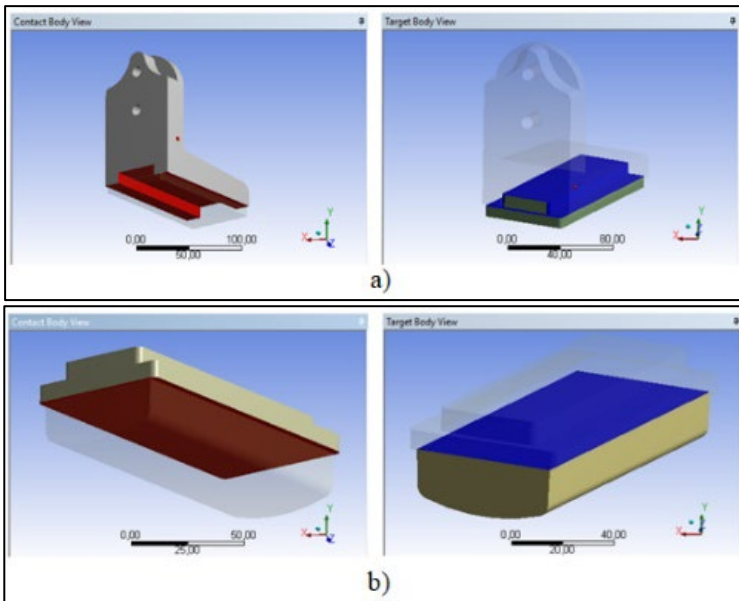


Figura10. Tipos de contato dos conjuntos sapata-suporte e suporte-rebolo abrasivo.

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, e tensões cisalhantes nas interfaces que promovem desgaste. Além disso, somente esse tipo de contato

possibilita um tratamento na interface de contato de modo a garantir as reações de contato entre a chapa e o rebolo abrasivo.

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 11 é possível ver todo o modelo discretizado em elementos finitos.

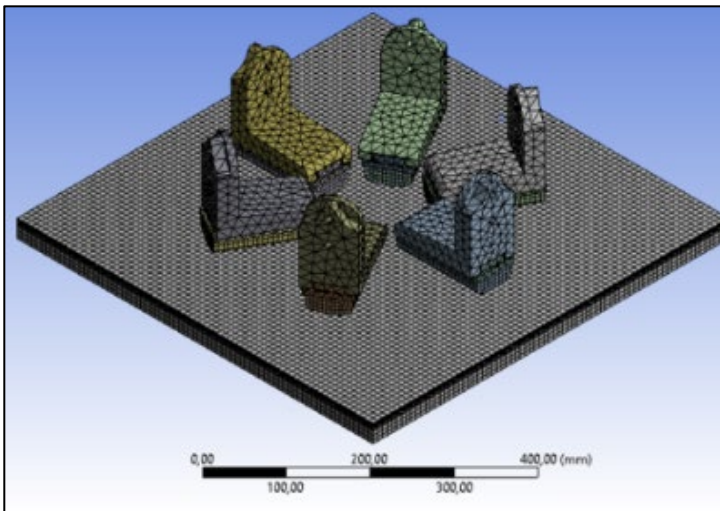


Figura 11. Geração de malha no modelo analisado.

Analisando o mecanismo da politriz responsável por fornecer a pressão normal de contato, tem-se a presença de dois atuadores. Considerando a pressão de trabalho igual à 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. Essa força total se distribui nos seis conjuntos sapata-rebolo abrasivo. Logo, a força em cada conjunto é de 335,1 N. Considerando que essa mesma força reage individualmente nos mancais de deslizamento do bloco de montagem do cabeçote de polimento, tem-se o desenho esquemático do problema conforme mostrado na Figura 12.

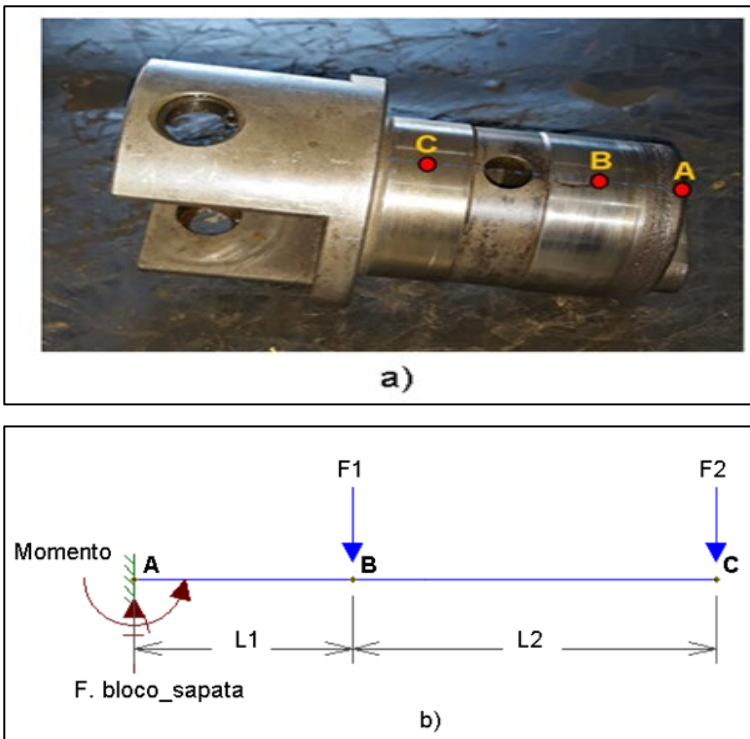


Figura 12. Aplicação das condições de contorno do modelo analisado.

Conforme pode ser visto na figura acima, as forças F_1 , F_2 e o momento em A constituem incógnitas do problema. Observa-se ainda que as equações de equilíbrio na direção x tornam-se redundantes dado que não existem esforços nessa direção. Desta forma, constata-se que a situação descrita acima trata-se de um problema de hiperestática, visto que existem mais incógnitas do que equações de equilíbrio necessárias para as determinar. Sendo assim, deve-se recorrer a métodos mais elaborados que permitam determinar todas as incógnitas presentes na modelagem descrita acima.

Partindo das equações de equilíbrio, tem-se que o somatório de forças atuantes no eixo y é:

$$\begin{aligned} F_{bloco_sapata} &= F_1 + F_2 \\ F_2 &= F_{bloco_sapata} - F_1 \end{aligned} \quad [12]$$

Fazendo o somatório de momento em torno do ponto A da Figura 12 (b), tem-se:

$$M_A = F_1 L_1 + F_2 (L_1 + L_2) \quad [13]$$

Dessa forma, como se tem três incógnitas e duas equações de equilíbrio, deve-se lançar mão de um método adicional que forneça condições para resolver tal problema. Este método considerado é conhecido como o método da superposição. Para a aplicação do método, pode-se redesenhar o diagrama de forças, de tal forma que a soma dos diagramas de forças seja igual ao apresentado anteriormente na Figura 17 (b). Logo, tem-se os respectivos diagramas de forças de forma decomposta conforme mostrado na Figura 13:

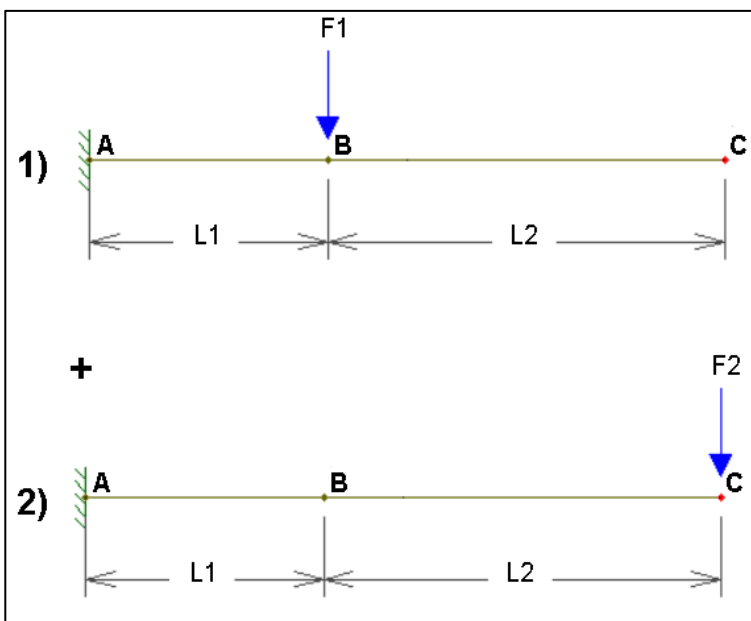


Figura 13. Aplicação das condições de contorno do modelo analisado.

Logo, desenvolvendo as equações da linha elástica na flecha máxima, isto é, no ponto C; e considerando que, em tal ponto, configura-se a folga de trabalho da peça igual a 0,193 micrômetros, tem-se a força F_1 igual a 171,4 N, a força F_2 igual a 163,7 e o momento em torno do ponto A igual a 12,54 N m.

Assim sendo, uma vez conhecidas as forças atuantes no sistema e os seus respectivos pontos de aplicação, tem-se a inserção dessas forças por meio do sistema de coordenadas criados individualmente para cada sapata da geometria por meio da força remota (Figura 14).

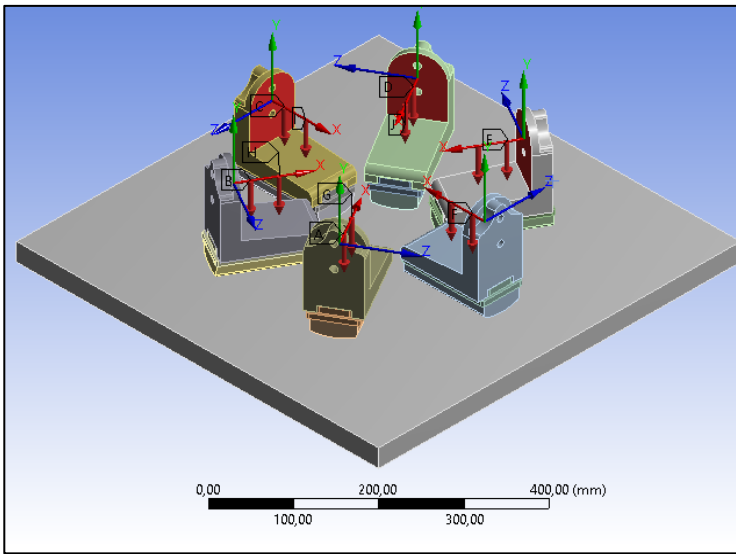


Figura 14. Aplicação das condições de contorno do modelo analisado.

Para as restrições a serem 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. A aplicação das condições de contorno, isto é, carregamentos e restrições, podem ser visualizados na Figura 15.

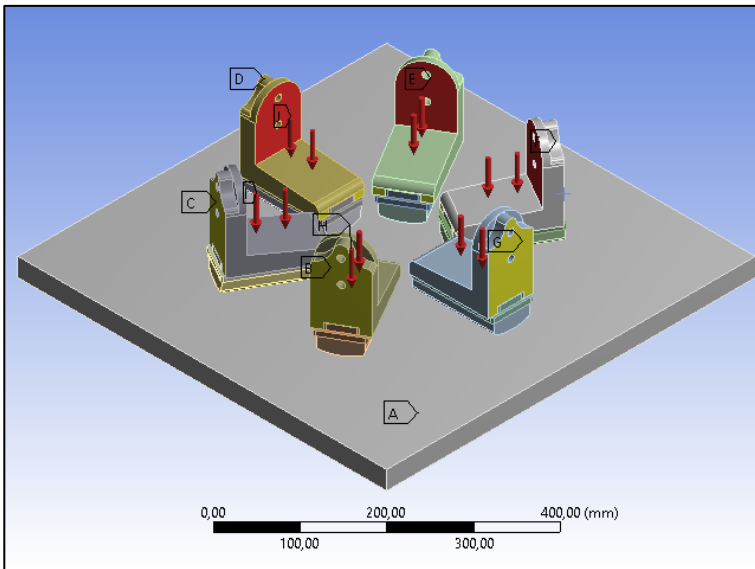


Figura 15. Aplicação das condições de contorno do modelo analisado.

Na Figura 16 é possível ver os deslocamentos atuantes no eixo y da geometria analisada. Como ferramenta de validação dos resultados foi utilizado o teste da convergência, realizado por meio da execução de sucessivos refinamentos de malha aliado a comparações dos resultados obtidos nas simulações computacionais. Na medida que se aumenta o número de nós e elementos, tem-se uma maior precisão dos resultados. Contudo, existe um certo limite, no qual, mesmo refinando a malha, o resultado converge para um determinado valor.

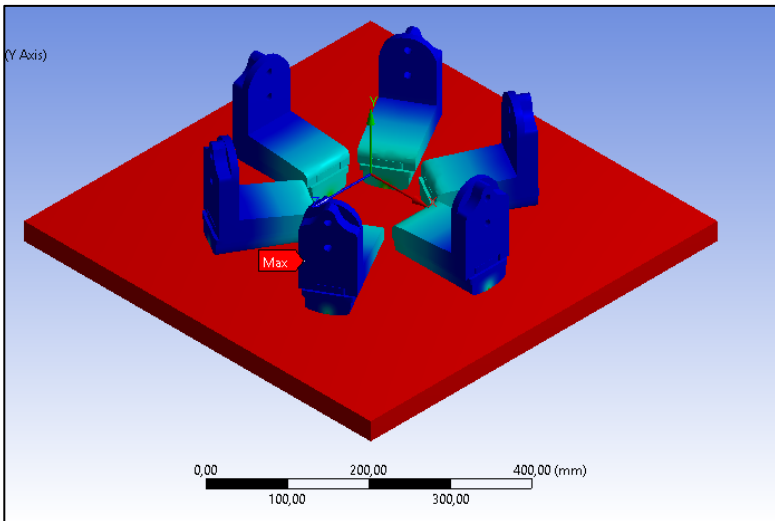


Figura 16. Deformação direcional no eixo y.

Portanto, quando é satisfeita essa condição, tem-se a validação dos resultados conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Teste da convergência.

Índice	Pressão de Contato (MPa)	Nº Nós	Nº Elementos	Erro Percentual (%)
1	0,92864	61.003	25.784	
2	2,3	68.607	38.097	59,62434783
3	3,8236	147.628	92.012	39,84726436
4	3,7617	308.312	203.722	1,645532605
5	3,7657	350.393	233.383	0,106221951

Na Figura 17, é apresentado o resultado gráfico do teste da convergência.

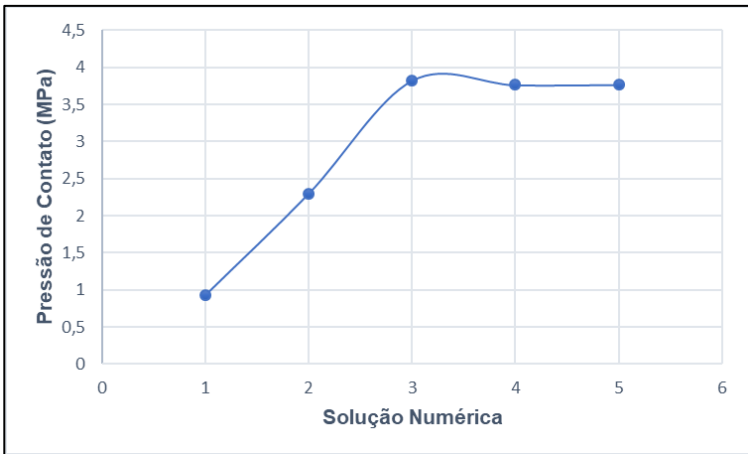
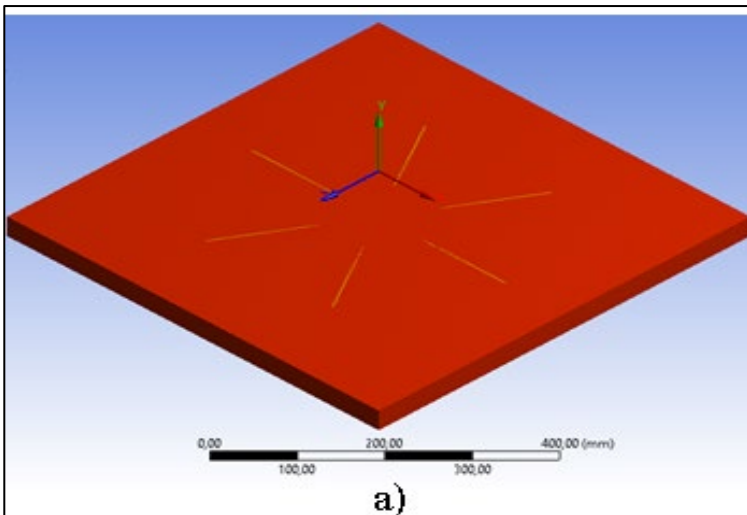


Figura 17. Pressão normal de contato na interface de desgaste.

Logo, a pressão normal de contato nas interfaces rebolo abrasivo-chapa de rocha pode ser vista na Figura 18.



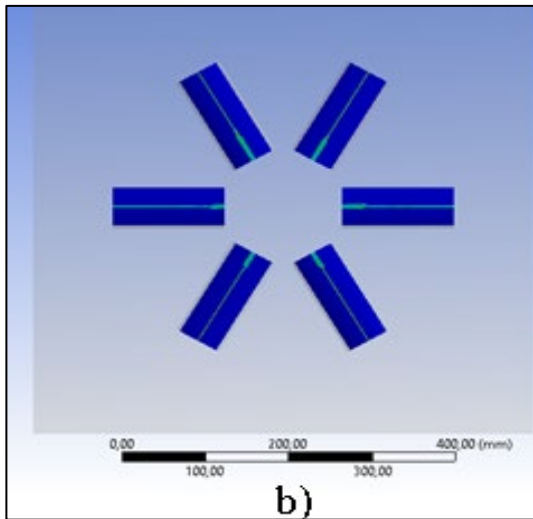


Figura 18. Pressão normal de contato na interface de desgaste: (a) vista do contato na rocha e (b) vista do contato no abrasivo.

Uma vez encontradas as tensões normais na interface chapa de rocha-rebolo abrasivo, foi adotada uma equação de desgaste conhecida na Tribologia, chamada equação de Archard, que fornece noções gerais do desgaste abrasivo. Nela, relaciona-se a taxa de desgaste (Q) em função de variáveis macroscópicas que influenciam o 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).

$$Q = \frac{V_{perdido}}{L_{destizamento}} = \frac{K W}{H} \quad [14]$$

Contudo, modificações nessa equação foram necessárias na modelagem, devido ao fato de o rebolo abrasivo possuir elementos abrasivos em sua composição. Tais elementos são

responsáveis por desbastar o perfil de rugosidade da chapa de rocha e pelo formato arredondado do rebolo abrasivo, por meio do movimento de suingue, promover o contato efetivo de uma pequena área do rebolo abrasivo sobre a chapa de rocha. Se não fosse alterada a equação Archard, estaria se considerando que a força total proveniente dos atuadores se concentraria em uma única partícula abrasiva, uma vez que não se sabe o quantitativo de partículas abrasivas que se tem no rebolo abrasivo. Tal modificação consistiu em dividir toda Equação 14 pela área efetiva, a qual representa a real zona de contato durante a execução do processo de polimento, independente do movimento de suingue. Assim, tal equação pode ser escrita em termos de tensão ao invés de força conforme a Equação 15.

$$Q^* = \frac{Q}{A_{efetiva}} = \frac{V_{perdido}}{A_{efetiva} L_{deslizamento}} = \frac{K \sigma_{efetiva}}{H} \quad [15]$$

Portanto, tem-se que o volume perdido por unidade de área efetiva, na qual representa a severidade de desgaste é:

$$V^*_{perdido} = \frac{V_{perdido}}{A_{efetiva}} = \frac{K \sigma_{efetiva}}{H} \int v_{riscamento} dt \quad [14]$$

Desta forma, uma vez que se têm 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 representa a severidade do desgaste ao longo do raio do rebolo abrasivo cujas partículas abrasivas tocam a superfície da chapa de rocha, conforme mostrado na Figura 19.

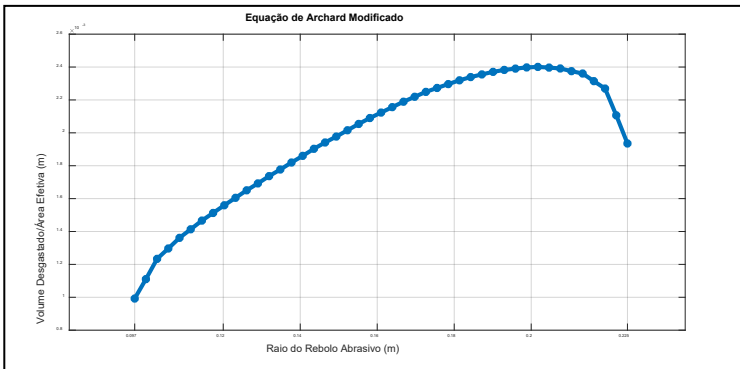


Figura 19. Severidade do desgaste ao longo do raio do rebolo abrasivo.

Embora tal estimativa precise de comprovação prática que poderá ser feita em trabalhos futuros como modo de continuidade da linha de pesquisa, a mesma fornece uma previsão dos mecanismos de desgaste.

Dessa forma, analisando a influência dos parâmetros operacionais da politriz no volume a ser desgastado por unidade de área efetiva da chapa de rocha, foi realizado a integração numérica da equação de Archard modificada em função do raio do rebolo abrasivo para cada variação destes parâmetros operacionais (Tabela 4).

Tabela 4. Desgaste da rocha em função da variação da velocidade de esteira.

Índice	Taxa de desgaste (mm)	Velocidade esteira (m/min)	Rotação (rpm)	Frequência transversal (Hz)
1	0,663	1,0	500	0,5
2	0,793	1,0	600	0,5
3	0,540	1,0	400	0,5
4	0,663	1,5	500	0,5
5	0,663	0,7	500	0,5
6	0,339	1,0	500	0,7
7	1,093	1,0	500	0,3

Onde a taxa de desgaste é resultado da integração do volume desgastado em função do raio do rebolo abrasivo. Dessa forma, foi possível quantificar o grau de influência que cada parâmetro operacional possui no processo de polimento de rochas ornamentais.

Na Figura 20, é possível ver o grau de severidade de desgaste por meio da variação das condições operacionais da máquina politriz.

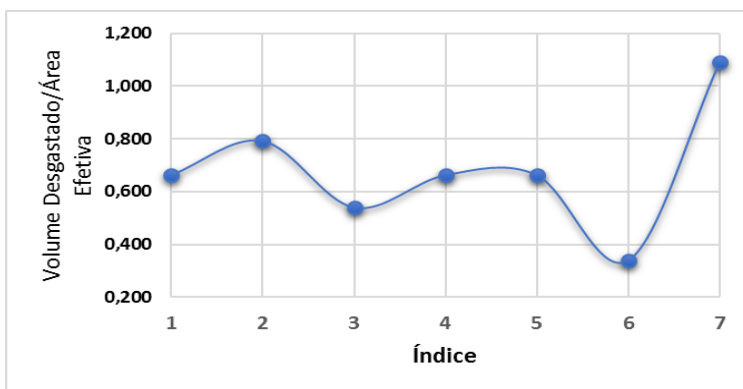


Figura 20. Severidade do desgaste da chapa de rocha mediante as condições operacionais da máquina politriz.

Assim sendo, pode-se notar que a baixas velocidades os respectivos índices 7 e 2 possuíram maiores volumes a serem desgastados por unidade de área. Isto ocorre devido ao fato de que à medida que se diminui a frequência de oscilação transversal, o cabeçote de polimento passa sobre a superfície da chapa de forma mais lenta, aumentando assim o tempo de exposição das partículas abrasivas na chapa de rocha. Para o segundo caso, tem-se que, aumentando a rotação do cabeçote, obteve-se maiores velocidades de riscamento das partículas abrasivas ao longo do raio e, por conseguinte, houve também uma maior severidade de desgaste na chapa de rocha.

Constatou-se ainda que a variação da velocidade de avanço da esteira, índices 4 e 5, não interferiram significativamente na severidade do desgaste. Isto se deve ao fato de que, além de a velocidade de avanço da esteira ser constante e na mesma direção, a variação da mesma não influenciou substancialmente a equação da velocidade de riscamento.

5 | CONCLUSÕES

O processo de polimento de rochas ornamentais é um tema recorrente que vem sendo estudado pelos centros de pesquisa, mas ainda é completamente empírico e iterativo na indústria. Se no final do processo a qualidade de polimento das chapas de rochas não forem satisfatórias, repete-se todo o processo até obter os resultados desejados, gerando assim, desperdícios de tempo e materiais, o que significa perda de competitividade no mercado global.

Este trabalho teve como objetivo investigar o funcionamento da máquina politriz no processo de polimento de rochas ornamentais. Os aspectos abordados foram as questões da cinemática atuante da máquina, que se referem à movimentação da mesma sobre a chapa de rocha, bem como os aspectos relacionados ao desgaste, que por conseguinte promovem a diminuição da rugosidade superficial da chapa e assim obtém-se o brilho final desejado.

Para os aspectos cinemáticos, foram modelados equacionamentos que descrevessem o comportamento das partículas abrasivas sobre a superfície da chapa de rocha a ser polida. Os resultados ora obtidos foram de grande valia. Alcançou-se a previsão do processo de polimento acerca de como a politriz abrangeu toda a área da chapa de rocha, as velocidades e acelerações associadas à mesma. Tais informações foram obtidas antes mesmo de ser realizado experimentalmente o processo de polimento.

Nos aspectos relacionados ao desgaste do rebolo abrasivo-chapa de rocha, o MEF mostrou-se uma excelente ferramenta computacional, uma vez que permitiu descobrir as tensões de contato na interface desgastado. A verificação dos resultados

obtidos por tal ferramenta numérica foi realizada por meio de métodos de validação reconhecidos pela literatura como, por exemplo, o teste da convergência e simetria do problema. Tais métodos mostraram-se promissores: foram alcançadas também a convergência e a simetria do problema.

Com o objetivo de prever a influência da variação dos parâmetros operacionais no comportamento de desgaste em níveis qualitativos, foi utilizado como fundamento a equação de Archard, bastante conhecida na área da Tribologia. Por meio de tal equação modificada em termos de tensão normal ao invés de força normal, e expandida, 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.

Como resultado desta modelagem, pode-se fazer previsões do grau de influência dos parâmetros operacionais da máquina politriz sobre o volume de material por unidade de área. Estas previsões mostraram que, diminuindo a frequência de oscilação transversal, obteve-se um aumento da severidade de desgaste em 64,91% em relação ao obtido com a frequência de oscilação transversal. Além disso, aumentando a rotação do cabeçote em comparação com a rotação utilizada pela indústria, obteve-se um aumento de 19,61% de severidade do desgaste. Por fim, a variação do parâmetro velocidade de avanço da esteira com relação a que é utilizada pelo setor, não se mostrou significativa em se tratando de severidade de desgaste.

Portanto, este tipo de trabalho pode contribuir para o aprimoramento do processo de polimento de rochas ornamentais por meio da melhor compreensão dos parâmetros

operacionais da máquina politriz, bem como da influência que os mesmos possuem sobre os aspectos cinemáticos e relacionados ao desgaste.

Como sugestões de trabalhos futuros, por se tratar de uma modelagem teórica, deve-se avaliar experimentalmente os parâmetros operacionais adotados neste trabalho, implementando na modelagem teórica, se necessário, possíveis modificações no modelo de desgaste adotado. Além disso, achar condições operacionais ideais para a máquina politriz para diversos tipos de materiais rochosos, utilizando ferramentas estatísticas como, por exemplo, *Simplex*, a fim de comparar com a modelagem adotada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P.F.D. Estudo comparativo do polimento de "granitos" com diferentes tipos de abrasivos. Dissertação (Dissertação em geotecnia) - USP. São Carlos, p. 120. 2014.

CAMARGO, J.L. Influência das propriedades petrográficas na qualidade do polimento de rochas ornamentais. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2013.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industries 4.0 scenarios: a literature review, 2015.

MERIAM, J.L.; KRAIGE, L.G. Mecânica para engenharia volume 2: dinâmica. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ROVANI, A.C. Estudo da transição do regime de desgaste moderado para o desgaste severo a seco e sob o regime de lubrificação limítrofe. Tese. São Paulo, p. 191. 2014.

SILVEIRA, L.L.L.D. Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. USP. São Carlos. 2007.

SILVEIRA, L.L.L. et al. Contribuição para o avanço tecnológico da fase de polimento de rochas ornamentais. Rio de Janeiro: [s.n.], Série Rochas e Minerais Industriais, nr. 22, 2017.

SOUSA, F.J.P. Análise de aspectos cinemáticos do processo industrial de polimento de porcelanatos. UFSC. Florianópolis. 2007.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2019, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 340 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Rochas e Minerais Industriais

SRMI-28 – **Estimativa da incerteza da medição para ensaios de caracterização tecnológica de rochas aglomeradas.**

Abiliane de Andrade Pazeto, Francisco Wilson Hollanda Vidal, 2020.

SRMI-27 – **Caracterização das rochas presentes nas edificações históricas da Ilha da Boa Viagem.**

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Rosana Elisa Coppêde Silva, Michelle Teixeira C. C. dos Santos, Leonardo Cesar dos Santos, Anna Gabriele Oliveira de Souza, 2019

SRMI-26 – **Silício grau solar: uma revisão das tecnologias de produção.**

João Alves Sampaio, Roberto Salgado Amado, Péricles Sávio Garcia Marques, Lívia Gonçalves Leida Soares, 2019.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

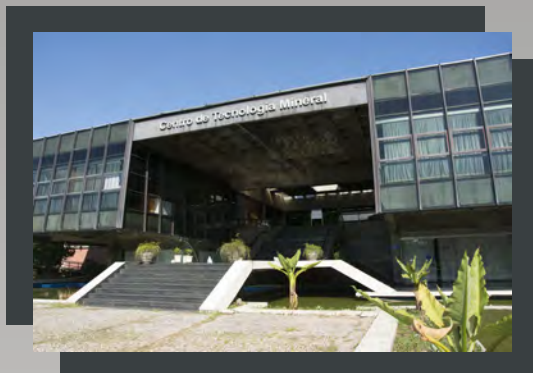
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 42 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.