

# Série Rochas e Minerais Industriais

## Simulador de desgaste de pérolas diamantadas – Modelo matemático

Luan Lamon Machado  
Leonardo Luiz Lyrio da Silveira  
Beatriz Carvalheira Moreira



# **SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS**

**Simulador de desgaste de pérolas diamantadas –  
Modelo matemático**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Luiz Inácio Lula da Silva**

Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

**Luciana Santos**

Ministra de Estado

**Luis Manuel Rebelo Fernandes**

Secretário Executivo

**Isa Assef dos Santos**

Subsecretária de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Silvia Cristina Alves França**

Diretora

**Maurício Moutinho da Silva**

Coordenador de Administração - COADM

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

**Paulo Fernando Almeida Braga**

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

**Marisa Nascimento**

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

**Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

# SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

ISSN 1518-9155

SRMI - 34

## **Simulador de desgaste de Pérolas diamantadas – Modelo matemático**

### **Luan Lamon Machado**

Engenheiro Mecânico pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Pesquisador Bolsista PCI do CETEM/MCTI.

### **Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Geólogo, D.Sc. em Geotecnia pela Universidade de São Paulo. Tecnologista Sênior do CETEM/MCTI.

### **Beatriz Carvalheira Moreira**

Geóloga, M.Sc. em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais. Pesquisadora Bolsista PCI do CETEM/MCTI.

**CETEM/MCTI**

2023

# SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

**Editor:** Luiz Carlos Bertolino

**Subeditor:** Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

**CONSELHO EDITORIAL:** Fernanda Arruda Nogueira (IQ-UFRJ), Luis Lopes (Universidade de Évora – Portugal), Raimundo Humberto Lima (UFAM), Rogério Pinto Ribeiro (USP), Thiago Motta Bolonini (UFES), Victor Salgado Campos (UFF), Werlen Holanda dos Santos (UERJ).

A Série Rochas e Minerais Industriais publica trabalhos nas áreas de rochas ornamentais, minerais industriais, agrominerais e gemologia. Tendo como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes de pesquisas desenvolvidas no CETEM e em Instituições de Pesquisas da área.

The Rocks and Industrial Minerals Serie publish works in the areas of ornamental rocks, industrial minerals, agrominerals and gemology. With the main objective of disseminating the results of technical-scientific investigations resulting from research carried out at CETEM and at Research Institutions in the area.

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

Copyright © 2023 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.  
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação de copyright (Lei 5.988)

Valéria Cristina de Souza  
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves  
Projeto Gráfico

Informações:  
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Homepage: [www.cetem.gov.br](http://www.cetem.gov.br)

CIP – Catalogação na Publicação

M149

Machado, Luan Lamon.

Simulador de desgaste de pérolas diamantadas: modelo matemático / Luan Lamon Machado, Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, Beatriz Carvalheira Moreira – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023.

38 p. - (Série Rochas e Minerais Industriais; 34).

ISBN 978-65-5919-033-1.

1. Simulador de desgaste. 2. Pérola diamantada. 3. Tribologia.  
I. Machado, Luan Lamon. II. Silveira, Leonardo Luiz Lyrio. III. Moreira, Beatriz Carvalheira. IV. Centro de Tecnologia Mineral. V. Série.

CDD 620.0046

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI  
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

## SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1   INTRODUÇÃO	9
2   MODELAGEM MATEMÁTICA	11
2.1   Modelo de Corte com o SDPD	11
2.2   Modelo de Corte Tradicional	14
3   MÉTODO DE ENSAIO NO SDPD	26
4   EXPRESSÕES DOS RESULTADOS	33
5   CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

## **RESUMO**

Na série anterior, intitulada "*Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas - Aspectos Construtivos*", foram minuciosamente investigados os aspectos tribológicos e construtivos do inovador simulador SDPD. Este equipamento, desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Mineral no Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM/NRES), desempenhará um papel de extrema relevância na análise do desgaste de fios diamantados. Contudo, a busca pelo conhecimento nessa área de estudo encontra-se em estágio inicial. Nesta nova série, será realizada uma exploração mais aprofundada desse campo fascinante, enfocando, principalmente, as aplicações práticas, com ênfase nos aspectos matemáticos envolvidos no processo de corte de rochas ornamentais utilizando teares multifios. As descobertas científicas obtidas serão aplicadas na parametrização do SDPD, proporcionando impactos significativos para a indústria.

### **Palavras-chave**

Simulador; desgaste; pérola; diamantada; tribologia.

## **ABSTRACT**

In the previous series, entitled "*Wear Simulator for Diamond Beads - Constructive Aspects*", the tribological and constructive aspects of the innovative WSDB simulator were meticulously investigated. This equipment, developed by the Mineral Technology Center at the Regional Nucleus of Espirito Santo (CETEM/NRES), will play an extremely relevant role in the analysis of diamond wire wear. However, the pursuit of knowledge in this research area is still in its early stages. In this new series, a more in-depth exploration of this fascinating field will be conducted, focusing primarily on practical applications, with an emphasis on the mathematical aspects involved in the process of cutting ornamental rocks using multi-wire saws. The scientific discoveries obtained will be applied in the parameterization of the WSDB, providing significant impacts for the industry.

### **Keywords**

Simulator; wear; bead; diamond; tribology.

## 1 | INTRODUÇÃO

Na série anterior, foram apresentados o estado da arte e as características acerca do corte de rochas ornamentais com fios de pérolas diamantadas, bem como os aspectos teóricos envolvidos nesse processo. A partir dessas informações, fica evidente que o corte de rochas ornamentais é um tema complexo e abrangente, abordando diversos parâmetros físicos, texturais, mecânicos, estruturais, ferramentais, humanos e operacionais, além dos mecanismos de desgaste abrasivo, adesivo, por fadiga e corrosivo, que atuam de forma conjunta.

Devido à dificuldade em correlacionar as variáveis do processo e os altos custos das análises experimentais na linha de produção, pesquisadores têm buscado desenvolver novas metodologias para analisar parâmetros específicos em bancadas didáticas. Alguns estudos têm investigado os efeitos de fatores físicos e mecânicos, como compressão, resistência à tração e propriedades texturais das rochas, no desgaste do fio diamantado (YILMAZKAYA, 2007; OZCELIK, 1999; POLAT, 2002). Outros pesquisadores têm analisado a capacidade de corte variando a quantidade de pérolas (OZCELIK, 2007) e partículas de diamante (OZCELIK & BAYRAM, 2001). Além disso, fatores como geometria do corte (OZCELIK, 2005), estrutura do fio (OZCELIK, 1999) e uso de aditivos químicos (ANDRISSI, 2005) são considerados importantes nesse contexto.

Ademais, pesquisas recentes têm abordado outros aspectos relevantes no processo de corte de rochas ornamentais. Estudos estão sendo conduzidos no Centro de Tecnologia Mineral do Espírito Santo (CETEM-NRES) para analisar a influência dos parâmetros de resfriamento, como vazão e tipo de fluido lubrificante, no corte das rochas. Novos materiais abrasivos e

técnicas de revestimento para as pérolas diamantadas também estão sendo investigados com o objetivo de melhorar a eficiência e prolongar a vida útil da ferramenta de corte.

Apesar dos avanços alcançados até o momento, ainda não foi possível estimar a máxima eficiência da ferramenta de corte nem obter uma configuração ideal para o corte das principais rochas comerciais. Nesse sentido, o CETEM-NRES desenvolveu o Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD), um equipamento de corte rotativo com uma única pérola diamantada. No entanto, é importante destacar que as características construtivas e operacionais desse simulador diferem do método tradicional de corte com fios de pérolas diamantadas, sendo necessária uma adaptação para garantir a sua aplicabilidade prática.

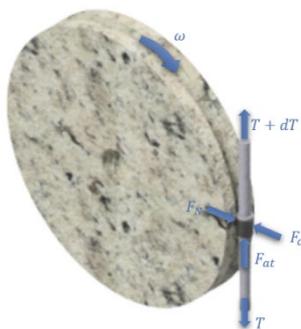
Vale ressaltar que a otimização do processo de corte de rochas ornamentais não apenas impacta economicamente, permitindo aumento da produtividade e redução de custos, mas também apresenta implicações significativas para a sustentabilidade ambiental, ao minimizar o desperdício de material e os danos causados ao ambiente durante a extração e o processamento das rochas. Portanto, o desenvolvimento de metodologias e equipamentos que contribuam para aprimorar o processo de corte é de extrema importância para o setor, buscando sempre a eficiência produtiva aliada à preservação do meio ambiente.

Assim, com o intuito de complementar a série anterior (Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas), nessa edição serão apresentados os aspectos matemáticos utilizados para determinar o esforço médio aplicado à pérola diamantada durante o corte de diferentes rochas ornamentais e correlacionar parâmetros operacionais envolvidos no processo, tais como força, velocidade e dureza. Esse estudo será a base para futuras otimizações em nível industrial.

## 2 | MODELAGEM MATEMÁTICA

### 2.1 | Modelo de Corte com o SDPD

Na Figura 1 é possível observar o diagrama de corpo livre, nele é apresentado os esforços aplicados sobre a rocha.



Fonte: Autores.

**Figura 1.** Esforços aplicados sobre a rocha.

Sendo  $T$  a tensão aplicada sobre o cabo,  $dT$  o incremento de tensão no cabo,  $\omega$  a velocidade angular,  $F_{at}$  a força de atrito,  $F_n$  a força normal,  $F_c$  a resultante entre as forças centrífugas e centrípetas do conjunto (Pérola x Rocha),  $h$  a altura da pérola e  $r_p$  o raio da pérola.

Considera-se uma condição de quase equilíbrio, conforme a equação 1. A modelagem é detalhada nas equações posteriores.

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_x = (T + dT)\text{sen}\theta + T\text{sen}\beta - F_n = 0 \quad (2)$$

$$F_n = (T + dT)\text{sen}\theta + T\text{sen}\beta \quad (3)$$

$$\sum F_y = (T + dT)\text{cos}\theta - T\text{cos}\beta - F_c + F_{at} = 0 \quad (4)$$

Tal que a força de atrito é dada por:  $F_{at} = \mu * F_n$ .

Sendo  $\mu = k + f$  tal que  $k$  é uma constante que representa o material removido e  $f$  o coeficiente de fricção.

$$(T + dT)\text{cos}\theta - T\text{cos}\beta - F_c + F_n(k + f) = 0 \quad (5)$$

$$F_n = \frac{T\text{cos}\beta + F_c - (T + dT)\text{cos}\theta}{(k + f)} \quad (6)$$

Igualando as equações, obtém-se:

$$\mu = \frac{T\text{cos}\beta + F_c - (T + dT)\text{cos}\theta}{(T + dT)\text{sen}\theta + T\text{sen}\beta} \quad (7)$$

Além da análise de esforços é possível estimar o tempo de corte para o processo sendo realizado em rotação constante ou velocidade linear constante.

2.1.1 | Processo de corte sendo realizado com rotação do fuso constante ( $n$ ), em rpm:

Para realizar a análise, o tempo gasto na aproximação da ferramenta ao corpo de prova é ignorado.

$$t_c = \frac{\text{distância percorrida pela ferramenta (mm)}}{\text{velocidade de avanço (mm/min)}} \quad (8)$$

$$t_c = \frac{\left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)}{S * n} = \frac{d_2 - d_1}{2 * S * n} \quad (9)$$

Onde  $d_1$  e  $d_2$  são respectivamente o diâmetro da pérola e do corpo de prova, ambos dados em (mm),  $S$  é o avanço (mm/rev) e  $n$  é a velocidade do fuso em (rpm).

2.1.2 | Processo sendo realizado com velocidade de corte constante:

$$\text{tempo} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade de avanço}} \quad (10)$$

Considerando uma mudança de tempo infinitesimal,  $dt$ , a mudança de comprimento do material cortado será  $dr = -dD/2$ , logo:

$$dt = \frac{-dD/2}{S * n} \quad (11)$$

Vale lembrar que o interesse é analisar o processo a uma velocidade constante  $V_c$ , tal que  $V_c = \pi Dn$ , isola-se  $n = V_c/\pi D$  e substitui na equação anterior:

$$dt = \frac{-\pi D dD}{2SV_c} \quad (12)$$

Após integração obtém-se:

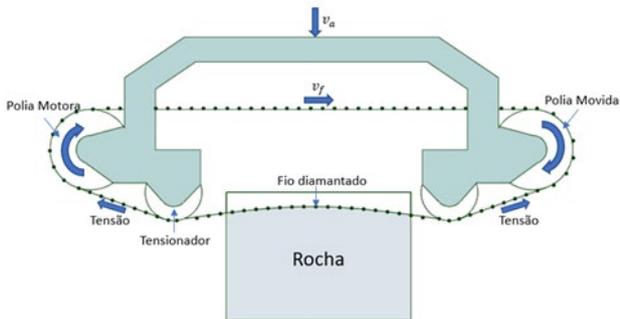
$$\int_0^{t'_c} dt = - \int_{D_2}^{D_1} \frac{\pi D}{2SV_c} dD \quad (13)$$

$$t'_c = \frac{\pi}{4SV_c} (D_2^2 - D_1^2) \quad (14)$$

## 2.2 | Modelo de Corte tradicional

As pérolas do fio diamantado são submetidas, a diferentes esforços de corte, a tensão aplicada sobre o fio e o próprio peso, de tal forma que a modelagem precisa seja algo desafiador. Por conta disso, estima-se o corte através de um modelo simplista, ilustrado no diagrama de corpo livre (Figura 3).

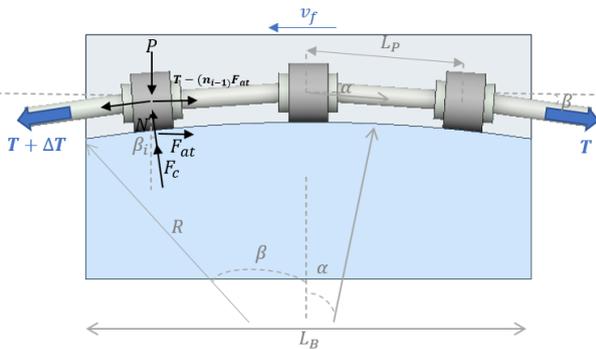
Considere um fio diamantado contendo  $n_p$  pérolas em contato com um bloco de  $L_B$  metros de comprimento. Tal problemática é apresentada na Figura 2, e leva em consideração o comum abaulamento da linha de corte conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Autores.

**Figura 2.** Representação do equipamento de corte de bloco de rocha com fio diamantado

Diagrama de corpo livre (Figura 3):



Fonte: Autores.

**Figura 3.** Detalhamento das forças desenvolvidas durante o corte com fio diamantado.

As condições de equilíbrio dinâmico foram satisfeitas conforme o equacionamento a seguir:

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0 \quad (15)$$

Análise dos componentes de força no eixo x:

$$(T + \Delta T_i) \cos \alpha - [T + (n_i - 1)F_{at}] \cos \alpha - F_{at} - P \sin \beta_i = 0 \quad (16)$$

$$\Delta T_i = \frac{F_{at}(n_i \cos \alpha - \cos \alpha + 1) + P \sin \beta_i}{\cos \alpha} \quad (17)$$

Para pequenos valores de ângulos, admite-se  $\cos \alpha \approx 1$  e  $\sin \beta \approx 0$ . Portanto, o incremento de tensão no fio será aproximadamente:

$$\Delta T_i = n_i F_{at} \quad (18)$$

Sendo  $n_i$  a  $i$ -ésima pérola,  $T$  a tensão aplicada sobre o cabo de aço e  $F_{at}$  a força de atrito existente entre a pérola e a rocha. Através da equação, é evidente que quanto maior a quantidade de pérolas em contato com a rocha, mais intensa será a força de atrito, conseqüentemente o motor necessitará de mais potência e a tensão no fio aumentará.

Para os componentes no eixo y:

$$N_i + F_C - P \cos \beta_i - (T + \Delta T_i) \sin \alpha - \quad (19)$$

$$[T + (n_i - 1)F_{at}] \sin \alpha = 0$$

$$N_i = [2T + \Delta T_i + (n_i - 1)F_{at}] \sin \alpha + P \cos \beta_i - F_C \quad (20)$$

Como aproximação, faz-se:  $P \approx \frac{m_F g}{n_p}$  e  $F_C \approx \frac{m_F v_F^2}{n_p R}$ .

Sendo  $L_B \approx 2R\beta$ , isola-se o raio de corte obtendo  $\beta \approx L_B/(2R)$ .  
Portanto:

$$F_C \approx \frac{2m_F v_F^2}{L_B n_p} \beta \quad (21)$$

Ao manipular as expressões, obtém-se:

$$N_i \approx [2(T_i + n_i F_{at}) + F_{at}] \sin \alpha + \frac{m_F g}{n_p} \cos \beta_i - \frac{2m_F v_F^2}{n_p L_B} \beta \quad (22)$$

Onde:

$$\theta_i = \begin{cases} \beta - n_i \alpha, & 0 < n_i \leq 0,5L_B n_p \\ (n_i - 0,5L_B n_p) \alpha, & n_i > 0,5L_B n_p \end{cases} \quad (23)$$

Na Figura 3, para cada  $i$ -ésima pérola, tem-se  $N$  a força normal,  $F_C$  a força centrífuga e  $P$  o peso do fio por pérola. Ao equacionar os componentes admite-se,  $m_F$  a massa do fio por unidade de comprimento,  $g$  o coeficiente gravitacional,  $n_p$  a quantidade de pérolas existente em um metro de fio, e  $v_F$  a velocidade do fio diamantado.

A partir da aplicação de conceitos trigonométricos é possível inferir que  $\sin \alpha \approx L_p/2R \approx 1/(2Rn_p)$  e  $\sin \beta \approx L_B/2R$ .

Por se tratar de pequenos valores de ângulos, são válidas as simplificações:  $\sin \alpha \approx \alpha$  e  $\sin \beta \approx \beta$ , com os valores expressos em radiano. Logo:  $\alpha \approx \frac{1}{2Rn_p}$  e  $\beta \approx \frac{L_B}{2R}$ .

Manipulando-se as expressões com o isolamento de R, obtém-se:

$$\alpha \approx \frac{\beta}{L_B n_p} \quad (24)$$

Após substituir as expressões 3 e 10 na Equação 8, aplica-se as simplificações sugeridas:

$$F_N \approx \left( 2F_T + \frac{F_{at}}{\cos \alpha} \right) \left( \frac{\beta}{L_B n_p} \right) + \frac{m_F g}{n_p} \cos \beta_i - 2m_F v_F^2 \left( \frac{\beta}{L_B n_p} \right) \quad (25)$$

Posteriormente, adota-se a seguinte relação trigonométrica:

$$\cos \alpha = \cos^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) - \operatorname{sen}^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) \approx 1 - \frac{\alpha^2}{4} \quad (26)$$

Com a substituição de  $\alpha$ , obtém-se:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\beta^2}{4L_B^2 n_p^2} \quad (27)$$

Levando em consideração as situações convencionais de corte, onde  $L_B$ ,  $n_p$  e  $\beta$  variam, respectivamente, de 2 a 3 m, 36 a 40 pérolas/m e 2 a 8 graus, é conveniente assumir  $\Delta F_T \approx F_{at}$ . O problema é que não existe um método confiável capaz de determinar a intensidade da força de atrito; portanto mensura-se, empiricamente, medindo a potência consumida pelo motor durante o corte.

Seja a potência do motor  $P_M$  expressa pela Equação 28, enquanto a potência de uma força é expressa pela quantidade de trabalho realizada em determinado tempo, que em outras palavras pode ser expresso pelo produto entre a força e velocidade.

$$P_M(w) = \sqrt{3}.V.I.\cos\varphi.n \quad (28)$$

Portanto, para calcular a potência total dissipada pela força de atrito  $P_{Fat}$  ao longo do fio, faz-se:

$$P_{Fat}(w) = F_{at}(L_B n_P) v_F \quad (29)$$

Sendo  $(L_B n_P)$  a quantidade de pérolas em contato com a rocha. Igualando as expressões, tem-se:

$$F_{at} = \frac{\sqrt{3}.V.I.\cos\varphi.n}{v_F(L_B n_P)} \quad (30)$$

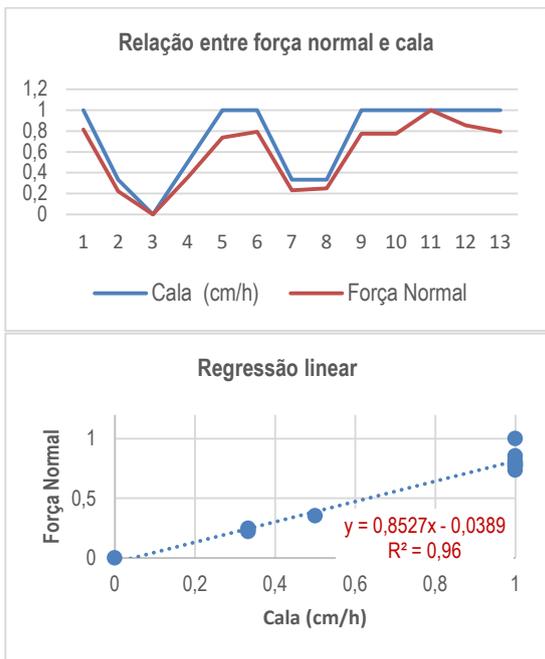
Percebe-se que a expressão considera a tensão  $V$  e a variação de corrente  $I$  da rede, para cada fio, bem como o fator de correção de potência  $\varphi$  e rendimento  $n$  do equipamento. Como  $\varphi$  e  $n$  variam de acordo com as circunstâncias operacionais, as perdas já estarão diluídas na medição da corrente ao longo do processo, logo, os dois termos podem ser negligenciados. A partir desse modelo é estimada a força de corte que deverá ser empregada no SDPD. Para tanto, foram considerados os dados coletados em uma empresa de Cachoeiro de Itapemirim/ES, e adotado um fio diamantado com  $0,15\text{kg}/\text{m}$ , de massa, tensionado por  $2450\text{ N}$  de força; cada metro de fio possui  $37$  pérolas (Tabela 1).

**Tabela 1.** Dados coletados em uma empresa do setor de rochas ornamentais em Cachoeiro de Itapemirim/ES.

Material	Horas corte	Medida bloco (m)		Total de fios	Total m <sup>2</sup> cortado	Classe de Dureza	Cala (cm/h)	Vel. Fio (m/s)	Amp Fio (A)	Ângulo estimado (°)	Força atrito (N)	Força normal (N)
		Comp.	Alt.									
Valle Nevado	12	3,000	1,900	69	393,300	3	18	30,00	1,42	6,044	0,281	4,073
Crytos	25	3,250	1,750	69	392,438	5	10	29,50	1,38	3,366	0,255	2,106
Taj Mahal	36	3,000	1,750	73	383,250	6	6	32,00	1,78	2,021	0,330	1,370
Cristallo	23	3,200	1,900	52	316,160	5	12	32,00	1,15	4,038	0,200	2,547
Roma Imperiale	14	3,200	1,800	36	207,360	5	18	30,50	1,10	6,044	0,200	3,816
Fusion Savage	13	3,050	1,800	67	367,830	4	18	31,00	1,04	6,044	0,197	3,998
Taj Mahal	27	3,200	1,600	30	161,530	6	10	30,00	1,08	3,366	0,201	2,136
Crytos	21	3,100	1,800	72	401,760	5	10	32,00	0,89	3,366	0,159	2,195
Fusion Savage	14	3,100	1,800	71	396,180	4	18	31,00	0,99	6,044	0,182	3,934
Fusion Savage	13	3,100	1,700	66	347,820	4	18	31,00	0,91	6,044	0,168	3,934
Alexandrita	15	2,600	1,700	14	61,880	6	18	31,00	1,19	6,044	0,264	4,687
Fusion Savage	14	2,900	1,800	55	287,100	4	18	31,00	1,18	6,044	0,234	4,204
Fusion Savage	16	3,050	1,750	51	272,213	4	18	31,00	1,37	6,044	0,258	3,998

Após análises estatísticas constatou-se que cada pérola desempenha um esforço normal inferior a  $5\text{ N}$ , sendo a força média empregada de aproximadamente  $3,64\text{ N}$ , enquanto a média dos ângulos de corte; amperagem da máquina e força de atrito foram, respectivamente,  $5,52^\circ$ ;  $1,19\text{ A}$  e  $0,22\text{ N}$ .

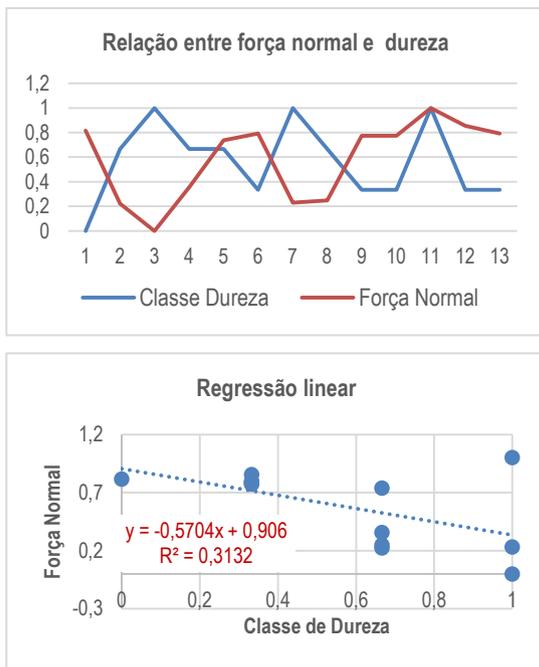
Visando a melhor correlação entre os parâmetros envolvidos na serragem, bem como uma melhor interpretação dos resultados, optou-se em normalizar as variáveis de 0 a 1, prosseguindo com a plotagem dos gráficos de tendência (Figura 4):



Fonte: Autores.

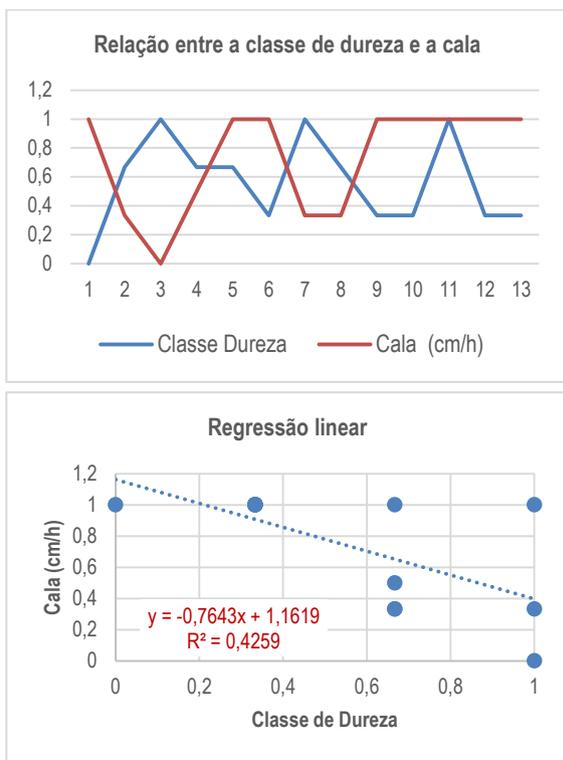
**Figura 4.** Gráfico de tendência para a condição operacional entre Força e Cala.

Após a análise da Figura 4, constata-se correlação linear positiva entre a força normal e a cala, caracterizada por um alto coeficiente de determinação  $R^2 = 0,96$ , isso significa que quanto maior a velocidade de cala, maior será o esforço realizado na pérola diamantada. Por outro lado, ao observar a Figura 5 percebe-se uma fraca correlação linear,  $R^2 = 0,31$  entre a força normal e a classe de dureza da rocha. Evidencia-se a predominância de uma relação inversa de tal forma que a força N empregada pela ferramenta tende a ser menor, quanto maior a dureza da rocha. Já na Figura 6 a correlação é negativa e moderada,  $R^2 = 0,43$ .



Fonte: Autores.

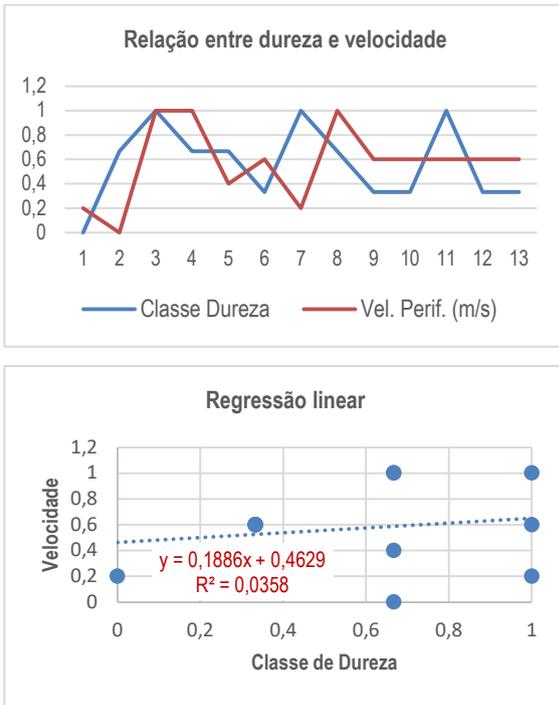
**Figura 5.** Gráfico de tendência para a condição operacional entre Força e Dureza.



Fonte: Autores.

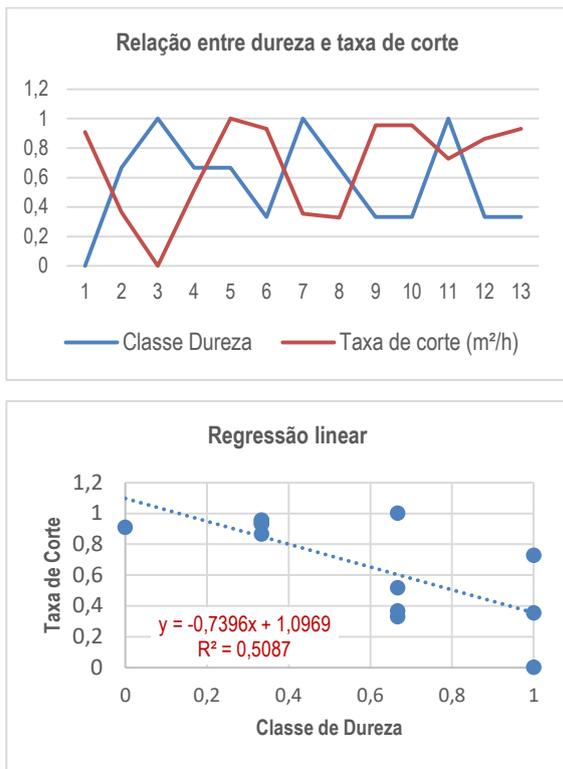
**Figura 6.** Gráfico de tendência para a condição operacional entre Dureza e Cala.

Na Figura 7 é evidente a falta de correlação entre a velocidade periférica e a classe de dureza dos materiais serrados ( $R^2 = 0,04$ ). Contudo ao analisar a influência da dureza na taxa de corte (Figura 8), é possível notar uma correlação moderada com  $R^2 = 0,51$ .



Fonte: Autores.

**Figura 7.** Gráfico de tendência para a condição operacional entre Velocidade e Dureza.



Fonte: Autores.

**Figura 8.** Gráfico de tendência para a condição operacional entre Taxa de Corte e Dureza.

Cabe agora adequar este carregamento ao SDPD, que apresenta interface de contato diferente do tradicional. Isso será realizado a partir da aplicação da teoria do contato mecânico de Hertz, bem como o emprego de simulações computacionais.

### 3 | MÉTODO DE ENSAIO NO SDPD

Neste capítulo será apresentado as diretrizes para a realização de ensaios no SDPD, incluindo os critérios de aceitação dos corpos de provas.

Para realizar ensaios no Simulador, foram selecionadas quatro rochas provenientes do estado do Espírito Santo, Brasil. Essas rochas foram escolhidas levando em consideração sua relevância e representatividade no setor de rochas ornamentais, além de serem produzidas localmente. Os nomes comerciais das rochas selecionadas são: Branco Dallas, Ocre Itabira, Preto São Gabriel e Verde Ubatuba.

O Branco Dallas, com sua cor branca predominante e veios sutis em tons de cinza e bege, é amplamente utilizado em projetos de design de interiores devido à sua elegância e sofisticação. O Ocre Itabira, por sua vez, apresenta uma cor ocre com nuances terrosas e douradas, conferindo um toque de calor e aconchego aos ambientes. Já o Preto São Gabriel, com sua tonalidade de preto intenso e brilho natural, é valorizado por sua resistência e durabilidade, sendo uma escolha popular em bancadas e revestimentos. Por fim, o Verde Ubatuba, com sua cor verde intensa e padrão granulado, é muito utilizado em bancadas e pisos, proporcionando um visual marcante e natural.

Essas rochas são originárias do Espírito Santo, um estado reconhecido como um importante centro produtor de rochas ornamentais devido às suas vastas jazidas e à expertise local na extração e beneficiamento desses materiais. A região é responsável por fornecer rochas de alta qualidade que atendem às demandas dos mercados nacional e internacional. A escolha dessas rochas para os ensaios no SDPD destaca a representatividade e relevância do setor de rochas ornamentais do Espírito Santo em âmbito nacional, uma vez que essas rochas são amplamente utilizadas em todo o país. Esses ensaios contribuem para o desenvolvimento e

aprimoramento dos processos de corte com teares de fio diamantado, buscando melhorias contínuas na qualidade e eficiência do setor.

As caracterizações tecnológicas das rochas citadas estão apresentadas nos Quadros 1 ao 4.

**Quadro 1.** Caracterização petrográfica e tecnológica do Branco Dallas.

			<b>Branco Dallas</b>		
<b>Composição Mineralógica (microscópica)</b>					
Feldspato alcalino (67%); quartzo (24%); granada (5%) e plagioclásio (4%).					
<b>Descrição Macroscópica</b>					
Coloração creme esbranquiçada, estrutura compacta, inequigranular, isotrópica, granulação média a muito grossa.					
<b>Classificação Petrográfica</b>					
Leuco álcali granito com granada					
<b>Caracterização Tecnológica</b>					
Massa específica aparente (Densidade)		2930		Kg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água		0,24		%	
Resistência mecânica à compressão uniaxial		140,81		MPa	
Desgaste por abrasão – Amsler (1000 m)		0,0035		cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup>	
Coeficiente de dilatação térmica linear		0,00031285		mm/m °C	
Porosidade aparente		0,64		%	
Resistência à tração na flexão		7,92		MPa	
Resistência mecânica à compressão uniaxial após gelo e degelo		130,22		MPa	
Resistência ao impacto de corpo duro		76		cm	
<b>Uso Recomendado</b>					
Revestimento de interiores e pisos.					

Fonte: Autores.

**Quadro 2.** Caracterização petrográfica e tecnológica do Ocre Itabira.

			<b>Ocre Itabira</b>		
<b>Composição Mineralógica (microscópica)</b>					
Microclina micropertítica (45%); plagioclásio – oligoclásio/andesina (20%); hornblenda (14%); biotita (7%); opacos (5%); quartzo (5%); titanita (4%).					
<b>Descrição Macroscópica</b>					
Rocha com granulação grossa e de cor marrom a cinza claro a médio.					
<b>Classificação Petrográfica</b>					
Hornblenda quartzo sienito					
<b>Caracterização Tecnológica</b>					
Massa específica aparente (Densidade)	2710	Kg/m <sup>3</sup>			
Absorção de água	0,22	%			
Resistência mecânica à compressão uniaxial	121	MPa			
Desgaste por abrasão – Amsler (1000 m)	0,91	cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup>			
Coefficiente de dilatação térmica linear	2	mm/m °C			
Porosidade aparente	0,61	%			
Resistência à tração na flexão	10,13	MPa			
Resistência mecânica à compressão uniaxial após gelo e degelo	ND	MPa			
Resistência ao impacto de corpo duro	ND	cm			
<b>Uso Recomendado</b>					
Revestimento de exteriores, interiores e pisos.					

Fonte: Autores.

**Quadro 1.** Caracterização petrográfica e tecnológica do Preto São Gabriel.

	<b>Preto São Gabriel</b>	
<b>Composição Mineralógica (microscópica)</b>		
Plagioclásio – andesina/labradorita (60%); hiperstênio (15%); hornblenda (5%); quartzo (5%).		
<b>Descrição Macroscópica</b>		
Rocha com estrutura compacta com granulação média e cor cinza escura.		
<b>Classificação Petrográfica</b>		
Diorito norítico		
<b>Caracterização Tecnológica</b>		
Massa específica aparente (Densidade)	2960	Kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,33	%
Resistência mecânica à compressão uniaxial	75,25	MPa
Desgaste por abrasão – Amsler (1000 m)	1,76	Cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup>
Coefficiente de dilatação térmica linear	7,8	mm/m °C
Porosidade aparente	0,96	%
Resistência à tração na flexão	14,1	MPa
Resistência mecânica à compressão uniaxial após gelo e degelo	ND	MPa
Resistência ao impacto de corpo duro	56	cm
<b>Uso Recomendado</b>		
Revestimento de exteriores, interiores e pisos.		

Fonte: Autores.

**Quadro 4.** Caracterização petrográfica e tecnológica do Verde Ubatuba.

	<b>Verde Ubatuba</b>	
<b>Composição Mineralógica (microscópica)</b>		
Plagioclásio – andesina (30%); microclima micropertítica (30%); quartzo (15%); biotita (13%); hornblenda (7%); ortopiroxênio (5%);		
<b>Descrição Macroscópica</b>		
Rocha com estrutura maciça levemente orientada, de granulação grossa e cor cinza esverdeado.		
<b>Classificação Petrográfica</b>		
Hiperstênio hornblenda biotita quartzo monzonito.		
<b>Caracterização Tecnológica</b>		
Massa específica aparente (Densidade)	2960	Kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,26	%
Resistência mecânica à compressão uniaxial	146	MPa
Desgaste por abrasão – Amsler (1000 m)	0,35	cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup>
Coefficiente de dilatação térmica linear	6,4	mm/m °C
Porosidade aparente	0,71	%
Resistência à tração na flexão	9,9	MPa
Resistência mecânica à compressão uniaxial após gelo e degelo	131,52	MPa
Resistência ao impacto de corpo duro	54	cm
<b>Uso Recomendado</b>		
Revestimento de exteriores, interiores e pisos.		

Fonte: Autores.

Os corpos de prova serão ensaiados quando apresentarem:

**Rocha:** Formato de cilindro medindo  $320_{-0,5}^{+0}$  mm de diâmetro, furo de  $40_{-0}^{+0,5}$  mm e espessura de 40 mm. Caso seja constatado vibração excessiva do corpo de prova decorrentes do desalinhamento da rocha no eixo ou qualquer outro fator que não seja possível solucionar no momento do experimento, deve-se substituir a amostra (Figura 9).



Fonte: Autores.

**Figura 9.** Representação das dimensões das faces do corpo de prova a serem ensaiadas.

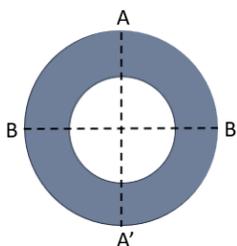
**Pérola:** Dimensões conforme apresentadas pelo fabricante.

Todas as amostras devem ser lavadas em água corrente e verificadas a fim de garantir a integridade física de cada uma. Corpos de prova contendo trincas, concentrações minerais anômalas ou em não conformidade com as dimensões requeridas serão descartadas. Posteriormente, procede-se com a medição das amostras.

Tanto a pérola diamantada, quanto a rocha devem ter suas massas “secas”, inicial ( $m_i$ ) e final ( $m_f$ ), aferidas em balança de precisão.

Recomenda-se pesar a pérola em equipamento com 0,1mg de precisão, enquanto a rocha, sugere-se o uso de uma balança com 1g de precisão.

Deve-se realizar, também, as medidas de espessura da pérola no sentido radial (antes e após o experimento), sendo duas medições perpendiculares para cada extremidade, superior e inferior, e duas para a região central da pérola (Figura 10).



Fonte: Autores.

**Figura 10.** Procedimento de como devem ser feitas as duas medições.

Concluída a identificação dos corpos de prova e suas medidas, deve-se configurar o SDPD com base na instrução operacional em função das configurações pré-definidas.

Os paramentos ensaiados serão: força, tempo e rotação. Através da modelagem matemática foi estimado a força média de corte,  $3,64\text{ N}$ , desempenhada pela pérola diamantada. Portanto, admite-se que a adoção de uma range operacional de 3 a 5 N seja uma boa estratégia de uso do SDPD. Quanto aos demais critérios, eles serão escolhidos a partir de observações empíricas, com o intuito de minimizar o desgaste prematuro da pérola.

## 4 | EXPRESSÕES DOS RESULTADOS

Calcular, separadamente, as médias dos valores de espessura, obtidas antes e após o ensaio para cada situação operacional utilizada. Para obter os valores médios de espessura inicial ( $\bar{e}_i$ ) e final ( $\bar{e}_f$ ), utilize a expressão:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x$$

Onde:

$\bar{x}$  = média aritmética do parâmetro a ser calculado ( $e_i, e_f$ );

$\sum x$  = somatória dos valores do parâmetro a ser calculado ( $e_i, e_f$ );

$n$  = número de medições.

Calcular o desvio-padrão para verificar se houve concentração de desgaste em um dos lados.

Em seguida, com base nas médias das espessuras inicial e final obtidas, calcular o percentual de desgaste da pérola ( $\epsilon_p$ ):

$$\epsilon_p = \left( \frac{\bar{e}_i - \bar{e}_f}{\bar{e}_i} \right) \times 100\%$$

O mesmo procedimento é realizado com os valores de massa inicial ( $m_i$ ) e massa final ( $m_f$ ), para calcular o percentual de desgaste da pérola ( $\delta_p$ ) e da rocha ( $\delta_r$ ) em termos de massa:

$$\delta_{p,r} = \left( \frac{\bar{m}_i - \bar{m}_f}{\bar{m}_i} \right) \times 100\%$$

Visando comparar os desempenhos de corte obtidos ao ensaiar diferentes rochas e parâmetros operacionais, emprega-se o índice de desgaste ( $i_d$ ), que é a razão entre o percentual de desgaste da pérola e espessura radial de rocha desgastada, que equivale a diferença entre o diâmetro inicial e final da rocha ( $\Delta\emptyset$ ).

$$i_d = \frac{\delta_p}{\Delta\emptyset}$$

## 5 | CONCLUSÃO

Através da presente investigação obteve-se um modelo matemático que exprime os esforços médios de corte os quais as pérolas diamantadas são submetidas durante o corte de rochas ornamentais por meio de teares multifios. Infere-se, a partir deles, que o esforço médio desenvolvido por cada pérola é de aproximadamente 3,64 N, enquanto a média dos ângulos de corte; amperagem da máquina e força de atrito foram respectivamente de, 5,52°; 1,19 A e 0,22 N.

Consequente, a partir de análises estatísticas conclui-se: a força de corte tende a ser maior, quanto maior a velocidade da cala; a força empregada pela ferramenta tende a ser menor, quanto maior a dureza da rocha; a velocidade de cala tende a ser maior, quanto menor a dureza da rocha e a velocidade linear do fio não apresenta correlação com a classe de dureza.

Entretanto, infere-se que a temática não está fechada, é necessário um controle mais rigoroso durante a investigação dos efeitos tribológicos durante o corte e isso será possível através de ensaios realizados no próprio simulador SDPD ajustando o *setup* do equipamento com a força média estimada com o modelo matemático, aqui apresentado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRISSI, G.S., LOI, G., TROIS, P., & ROSSI, G. Combining nanochemistry and innovative diamond wire saws for improving productivity in granite quarries. **Mining Engineering**, v. 57, n. 10, p. 46-52, , 2005.

OZCELIK, Y., YILMAZKAYA, E., BAYRAM, F., YASITLI, N.E., KANBIR, E. S. Investigation of effects of bead number per meter to cutting performance of diamond wire. **Proceedings of the 2nd International Industrial Diamond Conference, Rome, Italy** , April 2007. (pp. 19-20).

OZCELIK, Y. **Investigation of the working conditions of diamond wire cutting machines in marble industry**. PhD Thesis, Hacettepe University, Ankara (in Turkish): [s.n.], 1999.

OZCELIK, Y. Optimum working conditions of diamond wire cutting machines in the marble industry., 2005.

OZCELIK, Y.; BAYRAM, F. Optical investigations of bead wear in diamond wire cutting, 2001.

POLAT, E. **Investigation of the effect of textural properties on marble cutting**. Hacettepe University: [s.n.], 2002.

YILMAZKAYA, E. **Investigation of some factors affecting block production with diamond wire cutting method**. MSc Thesis, Hacettepe University, Turkey (in Turkish): [s.n.], 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 2023, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 380 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). 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 <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

### Últimos números da Série Rochas e Minerais Industriais

SRMI-33 – **Simulador de desgaste de pérolas diamantadas – Aspectos construtivos**. Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, Luan Lamon Machado, Beatriz Carvalheira Moreira, 2023.

SRMI-32 – **Planejamento de experimentos aplicado no aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais**. Rondinelli Moulin Lima, Mônica Castoldi Borlini Gadioli, Mariane Costalonga de Aguiar, Alan Dutra Pedruzzi, 2022.

SRMI-31 – **Desenvolvimento de aplicativo para especificadores de rochas ornamentais**. Bruna Xavier Faitanin, Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, Douglas Fiorio Dias, Renato José Avilla Paldês, 2022.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

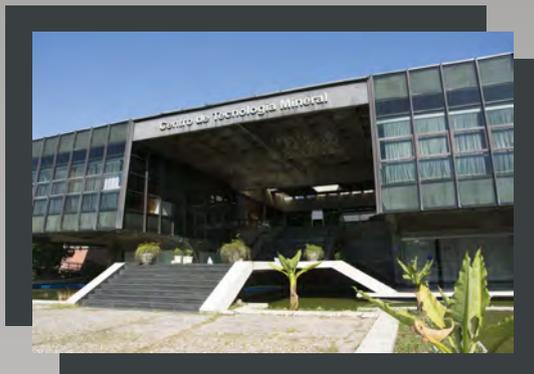
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Geral: (21) 3865-7222  
Biblioteca: (21) 3865-7218  
E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)  
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **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 e Inovação - MCTI, 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 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.**

**Durante seus 45 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.**