

Desafios e ajustes no simulador de desgaste de pérolas diamantadas

Challenges and adjustments in the diamond bead wear simulator

Luan Lamon Machado

Bolsista PCI, Eng. Mecânico

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Supervisor, Geólogo, D. Sc.

Resumo

Este artigo investiga os desafios técnicos enfrentados durante a operação do Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD) e as soluções implementadas para otimizar seu desempenho. Este equipamento permite testes, em ambiente controlado, com diversas variáveis que influem no processo de corte de rocha com fio diamantado. Foram identificados problemas no controle de rotação, alinhamento do eixo e gerenciamento do atuador pneumático. O ajuste do Controlador Lógico Programável (PLC) permitiu a simulação de rotações seguras, reduzindo o risco de vibração em um sistema de aproximadamente 20 kg. O desalinhamento do eixo principal foi corrigido, resultando em cortes mais precisos, enquanto a instalação de válvulas de fluxo unidirecional e melhorias no sistema pneumático garantiram um controle adequado da pressão e da força aplicada, possibilitando ensaios mais representativos das condições industriais do corte de rochas ornamentais

Palavras-chave: simulador; desgaste; pérola diamantada; desafios; corte de rochas ornamentais.

Abstract

This article investigates the technical challenges faced during the operation of the Diamond Pearl Wear Simulator (SDPD) and the solutions implemented to optimize its performance. This equipment allows tests, in a controlled environment, with various variables that influence the process of cutting rock with a diamond wire. Problems were identified in the control of rotation, shaft alignment and management of the pneumatic actuator. Adjusting the Programmable Logic Controller (PLC) made it possible to simulate safe rotations, reducing the risk of vibration in a system weighing approximately 20 kg. The misalignment of the main shaft was corrected, resulting in more precise cuts, while the installation of unidirectional flow valves and improvements to the pneumatic system ensured adequate control of the pressure and force applied, enabling tests that are more representative of the industrial conditions of natural stone cutting

Keywords: simulator; wear; diamond bead; challenges; stone cutting.

1. Introdução

A indústria de rochas ornamentais é fundamental para a economia brasileira, posicionando o País como um dos principais exportadores mundiais (ABIROCHAS, 2021). Com uma vasta gama de rochas de alta qualidade, a produção nacional é especialmente valorizada nos mercados internacionais de construção e revestimentos de luxo. A região de Cachoeiro de Itapemirim, no Espírito Santo, destaca-se como o principal polo produção e de beneficiamento e consolida-se como um centro estratégico para o setor.

Para manter a competitividade e atender às exigências do mercado internacional, a indústria enfrenta desafios consideráveis, entre os quais se destaca o desgaste acelerado das ferramentas de corte diamantadas, como as pérolas utilizadas em equipamentos denominados multifios. Esse desgaste, particularmente severo em rochas de alta dureza e abrasividade, como aquelas com alto teor de quartzo, impacta diretamente a produtividade e a qualidade do corte, elevando os custos operacionais e reduzindo a vida útil das ferramentas (OZCELIK e YILMAZKAYA, 2011).

A complexidade das características das rochas — envolvendo dureza, abrasividade e resistência mecânica — torna a execução de testes sistemáticos em condições industriais um desafio técnico e financeiro significativos. Além disso, os ensaios em escala industrial apresentam limitações operacionais, como custos elevados e desafios no controle de variáveis críticas, o que torna os resultados suscetíveis a interferências externas. Para enfrentar essas limitações, o Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD) foi desenvolvido como uma ferramenta experimental inovadora, permitindo a avaliação controlada do desempenho das pérolas em condições específicas de corte. Essa abordagem minimiza interferências externas e proporciona maior previsibilidade no uso das ferramentas (SILVEIRA, MACHADO e MOREIRA, 2023). Foi solicitada a proteção junto ao INPI do método desenvolvido nessa pesquisa: BR10202301382, sob o título: "*Método para especificação da força de corte empregando simulador de desgaste de pérolas diamantadas*"

Embora a literatura sobre o desgaste de ferramentas diamantadas, como nos estudos de Butler-Smith, Gryzagoridis e Davis (1999), Zhang e Wang (2004) e Turchetta, Sorrentino e Bellini (2017), aborde diversos aspectos do fenômeno, ainda existem lacunas significativas a serem exploradas na Tribologia dessa fase de beneficiamento das rochas ornamentais. Tais lacunas oferecem oportunidades para inovações que podem impulsionar a eficiência e a sustentabilidade desse setor industrial.

Nesse contexto, o SDPD tem se mostrado um equipamento essencial para ensaios, com grande potencial para otimizar o uso de fio diamantado nos processos de corte. O simulador já foi empregado em diversos estudos e projetos acadêmicos, abrangendo desde a análise da eficiência de diferentes fluidos lubrificantes até o desempenho de novas pérolas diamantadas. No entanto, o SDPD ainda apresenta algumas limitações técnicas que precisam ser resolvidas para ampliar sua aplicabilidade. Melhorias no equipamento são necessárias para que ele possa atender às exigências crescentes da indústria, permitindo a obtenção de dados mais precisos e contribuindo efetivamente para a evolução e competitividade do setor.

Portanto, neste artigo discutiremos os desafios técnicos encontrados na operação do SDPD, como problemas de desalinhamento e comportamento irregular dos componentes, que resultaram em desgaste excessivo das pérolas. Também apresentaremos as soluções implementadas para otimizar o desempenho do simulador e aprimorar a eficiência do processo de corte de rochas ornamentais. Este trabalho documenta as experiências acumuladas na utilização do SDPD e propõe direções para futuras inovações, visando aprimorar o desempenho e a eficácia deste equipamento e consolidar sua relevância na indústria de rochas ornamentais.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho e a eficiência do Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD) no corte de rochas ornamentais, identificando e solucionando limitações técnicas do equipamento. Propõe-se a adoção de aprimoramentos operacionais e metodológicos que elevem a precisão dos ensaios e minimizem o desgaste das pérolas diamantadas, visando oferecer uma solução robusta e economicamente viável para a melhoria dos processos industriais no setor de rochas ornamentais.

3. Material e Métodos

Neste estudo, foram analisados dados coletados durante a serragem de rochas ornamentais utilizando um tear multifio (Figura 1), com o objetivo de determinar as forças de corte aplicadas às pérolas diamantadas. O tear em questão é equipado com fios diamantados que possuem peso aproximado de 0,15 kg/m, tensionados a cerca de 2450 N e contendo 37 pérolas por metro.



Figura 1. Exemplo de tear multifio, modelo *Delta Wire 2*.

Para fins de cálculo foi adotado o modelo matemático (Figura 2) desenvolvido por Machado, Silveira e Moreira (2023).

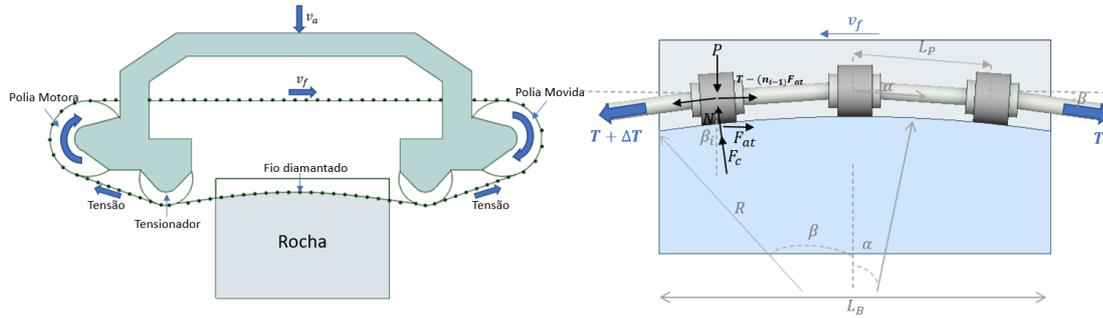


Figura 2. Esquema de modelagem.

Analisando o diagrama de corpo livre, tem-se que a força desenvolvida por cada pérola pode ser estimada pela Equações 1, enquanto a força de atrito F_{at} é representada pela Equação 2.

$$F_N \approx \left(2F_T + \frac{F_{at}}{\cos \alpha} \right) \left(\frac{\beta}{L_B n_P} \right) + \frac{m_F g}{n_P} \cos \beta_i - 2m_F v_F^2 \left(\frac{\beta}{L_B n_P} \right) \quad (1)$$

$$F_{at} = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I}{n_F v_F (L_B n_P)} \quad (2)$$

Sendo, n_F a quantidade de fios diamantados no equipamento, T a tensão aplicada sobre o fio, de massa m_F , que contém n_P pérolas e corta a uma velocidade v_F . Os ângulos de contato são representados pelas letras gregas α e β . Referente aos parâmetros operacionais do tear considera-se V e I sendo respectivamente a tensão e corrente da rede.

No estudo de Machado, Silveira e Moreira (2023) foram analisados a serrada de 13 blocos, obtendo-se uma força média de 3,64 N. Entretanto, este artigo foi conduzido na experimentação de rochas específicas identificadas comercialmente por Dallas, Ocre Itabira, Verde Ubatuba e Preto São Gabriel (TABELA 1).

Tabela 1. Dados de serragem de rochas comerciais.

Material	Horas de corte	Medidas do Bloco (m)		Total de Fios	Total m ² cortado	Classe de dureza	Cala (cm/h)	Vel. Fio (m/s)	Amp. Fio (A)	Ângulo Estimado (°)	Força atrito (N)	Força Normal (N)
		Comp.	Alt.									
Preto S. Gabriel	5,00	3,00	1,90	68	387,60	2	38	32	2,79	12,60	0,52	8,43
Verde Ubatuba	5,87	3,10	2,00	72	446,40	3	34	32	2,88	11,31	0,52	7,33
Ocre Itabira	7,88	3,20	2,00	74	473,60	3	25	32	2,96	8,37	0,51	5,26
Dallas	11,73	3,15	2,00	66	415,80	3	17	32	2,79	5,71	0,49	3,65

A análise dos dados revela que a força de corte necessária para serrar diferentes tipos de rochas varia significativamente, evidenciando a importância de um ajuste personalizado do SDPD, de acordo com as características de dureza e abrasividade de cada material. Para o granito Preto São Gabriel, a força estimada é de 8,43 N; para o Verde Ubatuba, 7,33 N; para o Ocre Itabira, 5,26 N; e para o Dallas 3,65 N.

Para aprofundar a análise, Machado e Silveira (2022) realizaram um estudo de simulação computacional para analisar o comportamento tribológico da pérola diamantada em contato com a rocha, visando ajustar os parâmetros do Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD). Os resultados mostraram que, no início

do corte, as forças aplicadas geram tensões elevadas na interface de contato devido à pequena área de atuação, resultando em desgaste localizado (Figura 3). Com o avanço do corte, a carga é distribuída entre mais grãos abrasivos, reduzindo as tensões concentradas e promovendo um desgaste uniforme. Observou-se que a matriz metálica da pérola apresenta capacidade limitada de confinamento dos grãos de diamante sob cargas elevadas, comprometendo a ancoragem dos grãos em determinadas condições. Esse comportamento é acentuado no SDPD devido à configuração específica do sistema tribológico, ressaltando a necessidade de ajustes na força aplicada, que deve ser aumentada progressivamente à medida que o corte avança, para garantir a estabilidade e eficiência da pérola.

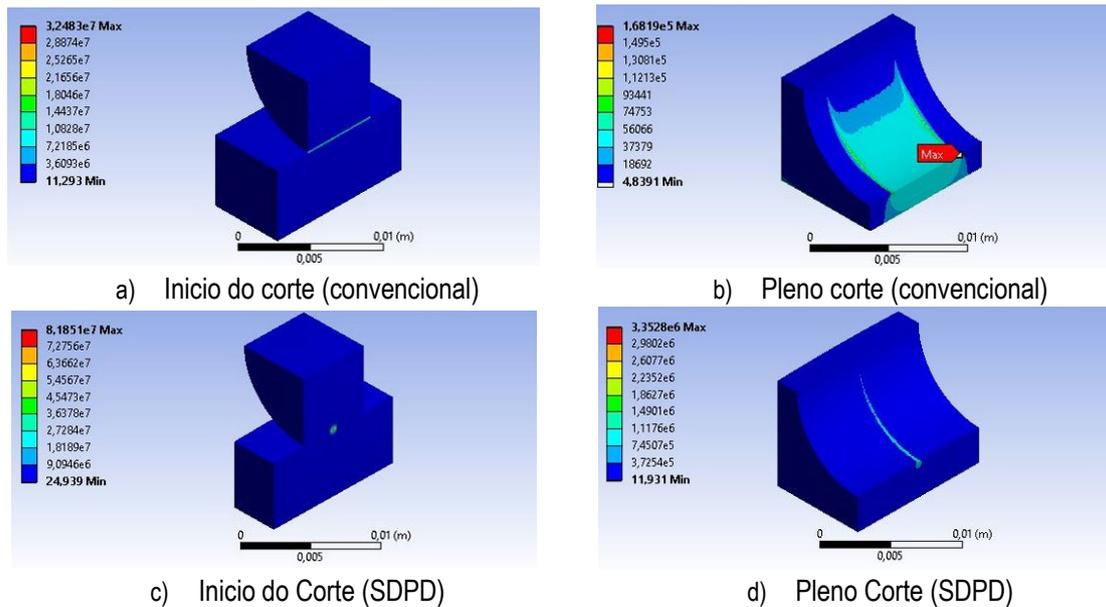
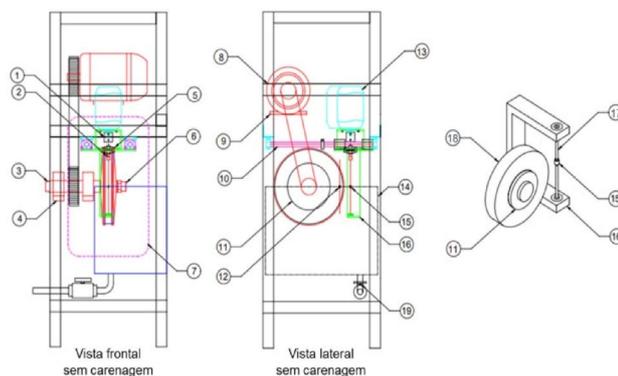


Figura 3: Distribuição de tensão no corte com pérolas diamantadas (MACHADO e SILVEIRA, 2022).

Compreendidas as forças de corte aplicáveis ao SDPD bem como os aspectos tribológicos envolvidos, iniciaram-se os experimentos no simulador. Desenvolvido pelo CETEM, o Simulador de Desgaste de Pérola Diamantada (SDPD) é um equipamento laboratorial que proporciona um ambiente controlado, seguro e parametrizável para ensaios de desgaste de pérolas diamantadas, permitindo experimentação de baixo custo. O sistema possibilita ajustes precisos de variáveis essenciais, como pressão, velocidade de rotação e vazão, viabilizando estudos detalhados sobre o desempenho das pérolas diamantadas em diferentes condições de corte.

O SDPD consiste em dois motores elétricos: um dedicado à rotação do disco de rocha e outro à rotação das pérolas diamantadas. A pressão das pérolas contra a rocha é exercida por um atuador pneumático, enquanto o processo de corte é lubrificado e refrigerado por um sistema de bombeamento de água. Os componentes do SDPD foram ilustrados na Figura 4.



- | | | |
|--|---|---|
| 1. Motor de rotação da pérola (velocidade variável); | 8. Motor de giro da rocha (velocidade variável); | 15. Pérola diamantada montada na haste; |
| 2. Pinça da haste do corpo de prova; | 9. Base esticadora da correia do motor da rocha; | 16. Base rígida de sustentação; |
| 3. Contra eixo (torque do flange); | 10. Guia do carro pneumático (pressão variável); | 17. Haste de aço temperado; |
| 4. Mancal do eixo da rocha; | 11. Flange da rocha; | 18. Rocha; |
| 5. Mancal do eixo da haste do corpo de prova; | 12. Curso máximo de avanço; | 19. Dreno. |
| 6. Porca de aperto do flange da rocha; | 13. Motor de rotação da pérola (velocidade variável); | |
| 7. Visor de proteção em policarbonato; | 14. Cuba reservatório de água; | |

Figura 4. Identificação detalhada dos componentes do SDPD.

4. Resultados e Discussão

Durante a operação do Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD), observou-se desafios técnicos no controle de rotação, alinhamento do eixo e na pressão e fluxo do atuador pneumático. Esses fatores exigiram intervenções detalhadas para adaptar o simulador a condições mais seguras e realistas de corte industrial. O controle de rotação foi o primeiro obstáculo. A simulação toma como referência a velocidade industrial do fio diamantado, de 36 m/s, o que demanda uma rotação de aproximadamente 2148 rpm para um disco de 320 mm de diâmetro e 40 mm de espessura, pesando cerca de 10 kg. Contudo, essa condição apresentou riscos consideráveis, ampliando os desafios de vibração e segurança, agravados pelo peso adicional dos flanges de fixação, totalizando cerca de 20 kg no conjunto. Inicialmente, o sistema contemplava rotações entre 1200 e 2400 rpm no disco e de 612 a 1328 rpm na pérola diamantada. Para ampliar a faixa de operação e aumentar a segurança, o PLC foi reprogramado para permitir rotações inferiores a 100 rpm até o limite máximo originalmente programado. Outro desafio crítico foi o desalinhamento do eixo, que causava vibrações e desgaste irregular das pérolas. Esse desalinhamento resultava de uma instalação inadequada do mancal, provocando desbalanceamento. Após o realinhamento, obteve-se uma rotação estável e cortes mais precisos. O controle da pressão do atuador pneumático também apresentou problemas. Este deveria ser capaz de aplicar forças inferiores a 3,6 N na pérola diamantada, mas a força mínima alcançada superava 6 N devido ao atrito excessivo nos componentes, resultando em desgaste abrupto e irregular. Além disso, a ausência de regulação na velocidade de avanço do atuador causava choques contra a rocha, comprometendo os ensaios. Para mitigar esses problemas, implementaram-se melhorias no SDPD: foram instaladas válvulas de fluxo unidirecional no atuador pneumático, substituídos os *pillow blocks* com rolamentos e acrescentou-se uma proteção estrutural

para evitar contaminação. Essas modificações aprimoraram o controle de pressão e fluxo, reduzindo impactos e promovendo um avanço controlado da pérola diamantada, permitindo ensaios mais representativos das condições reais de corte na indústria de rochas ornamentais.

5. Conclusão

O Simulador de Desgaste de Pérolas Diamantadas (SDPD) demonstrou ser uma ferramenta valiosa para a avaliação da eficiência de corte em processos industriais, evidenciando sua utilidade na simulação de condições reais. No entanto, para otimizar ainda mais seu desempenho, é essencial aprimorar os controles de pressão e a velocidade de avanço do atuador. Nesse contexto, a implementação de motores de passo é altamente recomendada, pois esses dispositivos oferecem maior precisão e controle nas variações de rotação, permitindo ajustes finos durante os ensaios. Além disso, um sistema aprimorado para regular a vazão do líquido de lubrificação e resfriamento da pérola diamantada é crucial para garantir a eficiência do corte e prolongar a vida útil das ferramentas. Essas melhorias não apenas potencializam a eficácia do SDPD, mas também contribuem para um entendimento mais aprofundado dos processos envolvidos no corte de rochas ornamentais, beneficiando a indústria como um todo.

6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida (processo nº 302171/2024-0).

7. Referências Bibliográficas

ABIROCHAS. (2021). **Informe 02/2021: O Desempenho Brasileiro no Setor de Rochas Ornamentais**. Acesso em 03 de novembro de 2024, disponível em ABIROCHAS: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Informe-02_2021-Desempenho-do-Setor-v3-1.pdf.

BUTLER-SMITH, P.W.; GRYZAGORIDIS, J.; DAVIS, P.R. A single bead test for assessing diamond wire performance. *Industrial Diamond Review*, v. 59, n. 581, 1999. p. 93.

MACHADO, L. L.; SILVEIRA, L. L. L.; Análise tribológica do processo de corte com pérolas diamantadas. In: ANAIS DO XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2022, Armação dos Búzios. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2022.

MACHADO, L. L.; SILVEIRA, L. L. L.; MOREIRA, B. C. **Simulador de desgaste de pérolas diamantadas: modelo matemático**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. (Série Rochas e Minerais Industriais, 34).

OZCELIK, Y.; YILMAZKAYA, E. The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 48, p. 626–636, 2011.

SILVEIRA, L. L. L.; MACHADO, L. L.; MOREIRA, B. C. **Simulador de desgaste de pérolas diamantadas: aspectos construtivos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. (Série Rochas e Minerais Industriais, 33).

TURCHETTA, S.; SORRENTINO, L.; BELLINI, C. A method to optimize the diamond wire cutting process. *Diamond and Related Materials*, 2017. p. 90-97.

ZHANG, J.S.; WANG, Z. Technical parameters and wear resistibility of diamond wire-saw in granite cutting. *Key Engineering Materials*, 2004. p. 122-126.