



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAS EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Henrique Rafael Pereira da Silva

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA ATRAVÉS DA ESCLEROMETRIA
PENDULAR EM CABOS DE ENERGIA DE AEROGERADORES**

CARAÚBAS - RN

2025

Henrique Rafael Pereira da Silva

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA ATRAVÉS DA ESCLEROMETRIA PENDULAR EM CABOS DE ENERGIA DE AEROGERADORES

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em ciências e tecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Ricardo de Souza

CARAÚBAS - RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S587a Silva, Henrique Rafael Pereira da.
AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA ATRAVÉS DA ESCLEROMETRIA
PENDULAR EM CABOS DE ENERGIA DE AEROGERADORES /
Henrique Rafael Pereira da Silva. - 2025.
34 f. : il.

Orientador: Juliana Ricardo de Souza .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Tribologia. 2. Esclerometria Pendular. 3.
Energia de Corte. 4. Fios Condutores. 5.
Aerogeradores. I. Souza , Juliana Ricardo de,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a). Biblioteca
Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Henrique Rafael Pereira da Silva

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA ATRAVÉS DA ESCLEROMETRIA PENDULAR EM CABOS DE ENERGIA DE AEROGERADORES

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em ciências e tecnologia.

Defendida em: 01 / 12 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Juliana Ricardo de Souza (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho (UFERSA)
Membro Examinador

Profa. Ms. Ingrid Pamilly Ribeiro Araujo de Oliveira (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICO!

*Á minha mãe, Lucia Pereira de Freitas
por todo amor e apoio, de modo que
minhas vitórias sejam os seus sonhos.*

OFERECO!

*Á minha Avó, pelas diversas orações
feitas ao meu favor com verdadeiro amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sabedoria, força e proteção que me sustentaram durante toda esta caminhada acadêmica.

Agradeço à minha mãe pelo apoio incondicional, amor diário e por nunca permitir que eu desistisse dos meus objetivos.

Agradeço à minha avó pelo cuidado, pelas orações e por ser um exemplo de sabedoria na minha vida.

Agradeço à minha orientadora, pela paciência e pelas contribuições valiosas que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos pela companhia e incentivo nos momentos de maior dificuldade.

GRATIDÃO!

"Porque Deus não nos deu espírito de covardia, mas de poder, de amor e de equilíbrio."

2 Timóteo 1:7

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise comparativa da resistência ao riscamento de fios condutores de eletricidade, comercialmente utilizados em aerogeradores, revestidos com PVC e HEPR, em diferentes diâmetros, através do uso de um tribômetro de esclerometria pendular. Foram avaliadas a energia inicial do sistema e a energia de contato, aquela suficiente para provocar o riscamento, além da verificação visual da morfologia dos sulcos gerados pela indentação, após os ensaios. Os resultados indicaram uma boa repetibilidade do equipamento para a avaliação da resistência ao risco abrasivo entre os materiais ensaiados, com melhor desempenho em resistência verificado para os fios com revestimento de HEPR e diâmetros maiores. Assim como, a caracterização microscópica confirmou o percurso do riscamento e comportamento mecânico identificado nos ensaios, demonstrando também a eficácia do método proposto para a avaliação comparativa de cabos condutores elétricos.

Palavras-chave: Tribologia, Esclerometria Pendular; Energia de Corte; Fios Condutores; Aerogeradores.

ABSTRACT

This work presents a comparative analysis of the scratch resistance of commercially used electrical conductor wires in wind turbines, coated with PVC and HEPR, in different diameters, using a pendulum tribometer. The initial energy of the system and the contact energy, that sufficient to cause the scratch, were evaluated, in addition to the visual verification of the morphology of the grooves generated by the indentation after the tests. The results indicated good repeatability of the equipment for evaluating abrasive scratch resistance among the tested materials, with better performance in selected resistance for wires with HEPR coating and larger diameters. Likewise, microscopic characterization confirmed the scratch path and mechanical behavior identified in the tests, also demonstrating the effectiveness of the proposed method for the comparative evaluation of electrical conductor cables.

Keywords: Tribology, Pendulum Sclerometry; Shear Energy; Conductor Wires; Wind Turbines.

LISTA DE ABREVIATURAS/ SIGLAS/ SÍMBOLOS

li	Lançamento com indentador
Ec	Energia no corte
PVC	Cloreto de Polivinila
HEPR	Borracha etileno-propileno
Desvpad	Desvio padrão
°	Graus

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Tribologia e Mecanismos de Desgaste	14
3.2 Esclerometria como Ensaio de Riscamento	15
3.3 Instrumentação Eletrônica e Aquisição de Dados	15
3.4 Revestimentos Poliméricos.....	16
3.5 Comportamento Mecânico e Integridade de Cabos Condutores em Ambientes de Alta Exigência	17
4. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	17
4.1 Materiais Utilizados.....	17
4.2 Esclerometria Pendular.....	18
4.3 Aquisição de Dados	20
4.4 Microscopia óptica	22
5. Resultados e Discussão	23
5.1 Ensaios Esclerométricos.....	23
5.2 Microscopia Óptica	29
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas empregadas na tribologia para estudar o desgaste de superfícies, a esclerometria se destaca por sua capacidade de simular o contato abrasivo de forma controlada (BHUSHAN, 2013; WANG *et al.*, 2001). Então, o esclerômetro pendular, um instrumento baseado na oscilação de um pêndulo com ponta indentadora, permite realizar riscos padronizados sobre a superfície do material, a partir dos quais é possível estimar a energia de deformação associada ao impacto (ABRAHÃO, 1999). Essa energia pode, por sua vez, ser correlacionada com a resistência ao desgaste abrasivo do material ensaiado (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009).

Além disso, a escassez de estudos voltados especificamente para fios e cabos metálicos, especialmente considerando diferentes diâmetros e geometrias, representa uma lacuna tanto na literatura científica quanto no desenvolvimento de metodologias aplicáveis à engenharia de materiais, mecânica e ao setor elétrico (SILVA *et al.*, 2022; SOUZA; ALMEIDA, 2020). A ausência de um equipamento acessível, moderno e dedicado a esse tipo de ensaio dificulta a padronização e a avaliação comparativa de materiais submetidos a condições abrasivas reais.

A eletricidade é gerada no gerador (localizado na nacele, no topo da torre) e desce por cabos verticais especiais, projetados para suportar flexão e torção devido ao movimento de rotação da nacele para se alinhar com o vento (LISERRE; SAUTER; HUNG, 2011), mesmo assim exigem manuseio cuidadoso para evitar danos à isolação. Não é um evento normal ou esperado que durante o manuseio e instalação eles possam sofrer desgaste abrasivo, possibilitando o desencape dos fios e causando assim acidentes de descarga elétrica. No entanto, se os procedimentos de segurança e as melhores práticas de instalação não forem seguidos corretamente é possível de acontecer.

O desgaste e os danos aos cabos são geralmente o resultado de falhas de procedimento, uso de equipamentos inadequados, ou falta de atenção aos detalhes durante o processo de instalação e manutenção (NR 10, 2019; ABNT NBR 5410, 2020). A prevenção de tais danos é um foco principal dos rígidos

padrões de segurança (como a NR 10 no Brasil, que trata de riscos elétricos) e das rotinas de manutenção preventiva na indústria eólica (EPE, 2023; ANEEL, 2022).

A avaliação do comportamento mecânico de materiais poliméricos é essencial para compreender os mecanismos envolvidos na dissipação de energia durante o impacto do esclerômetro pendular. Souza (2015) analisou compósitos com elevado desempenho tribológico e demonstrou que materiais com maior rigidez superficial e estrutura interna compacta demandam mais energia para iniciar processos de deformação e fratura.

Estudos apontam que os cabos de energia instalados em aerogeradores estão sujeitos a condições severas de operação, como torção, vibração contínua e contato mecânico entre condutores no interior da torre. Nesse contexto, Alexander (2015) destaca que danos por abrasão, falhas no isolamento e degradação prematura dos cabos são problemas recorrentes na indústria eólica, muitas vezes subestimados durante o processo de projeto e manutenção. A autora enfatiza que o gerenciamento inadequado dos cabos no “loop” da nacelle e a ausência de inspeções sistemáticas podem acelerar processos de desgaste e comprometer a confiabilidade do sistema elétrico. Assim, compreender os mecanismos de deterioração e propor metodologias de avaliação mais rigorosas torna-se fundamental para aumentar a vida útil desses componentes.

Zhou *et al.* (2024) destacam que fatores ambientais, como movimentação do fundo marinho e variações hidrodinâmicas, influenciam diretamente as propriedades mecânicas e aceleram a deterioração desses cabos, reforçando a necessidade de avaliações mais robustas de integridade. Evidenciando que os cabos utilizados em parques eólicos offshore sofrem degradação significativa devido à ação combinada de abrasão, fadiga por flexão e carregamentos dinâmicos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Utilizar a esclerometria pendular para ensaios de desgaste abrasivo em cabos condutores elétricos, incorporando instrumentação eletrônica com sensores de medição angular, sistema automatizado de aquisição de dados e análise da superfície dos sulcos por meio de a microscopia óptica.

2.2 Objetivos Específicos

- Adequar o esclerômetro pendular com estrutura ajustável para porta amostra que permita aplicação em fios condutores, comumente utilizados em aerogeradores com diferentes diâmetros;
- Integrar sensores de ângulo rotativo ao sistema mecânico para mensurar com precisão os ângulos de entrada e saída do pêndulo, possibilitando o cálculo da energia de deformação durante o risco;
- Implementar um sistema de aquisição e registro de dados utilizando microcontrolador Arduino, permitindo automação do ensaio e maior reprodutibilidade das medições;
- Realizar ensaios experimentais em cabos condutores elétricos com diferentes diâmetros, avaliando o comportamento ao riscamento sob condições padronizadas;
- Analisar e registra a morfologia superficial resultante do riscamento nos sulcos gerados nos ensaios por meio da microscopia óptica.
- Correlacionar os dados obtidos de energia de deformação com os parâmetros geométricos dos sulcos, visando identificar o mecanismo de desgaste predominante e a resistência relativa entre os materiais ensaiados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Tribologia e Mecanismos de Desgaste

A tribologia é uma área da engenharia que trata do atrito, desgaste e lubrificação entre superfícies em contato. O entendimento desses fenômenos é essencial para o desenvolvimento de materiais resistentes a ambientes de atrito constante, como fios e cabos condutores elétricos utilizados em linhas de transmissão, turbinas eólicas e equipamentos industriais (BHUSHAN, 2013).

Entre os mecanismos de desgaste, o riscamento abrasivo é um dos mais relevantes. De acordo com Wang *et al.* (2001), o desgaste pode ser classificado como simples, quando uma partícula abrasiva atua sozinha sobre a superfície, ou composto, quando há interação combinada entre múltiplas partículas. Esses processos geram cortes, deformações plásticas ou fraturas, resultando na perda progressiva de material.

3.2 Esclerometria como Ensaio de Riscamento

A esclerometria é uma técnica clássica utilizada na tribologia para avaliar a resistência ao desgaste por risco. Nesse método, uma ponta dura é pressionada contra a superfície do material, gerando sulcos sob condições controladas. O esclerômetro pendular, uma variação do ensaio, utiliza um pêndulo com uma ponta indentadora, que oscila em um movimento controlado e risca a amostra com energia previamente determinada (ABRAHÃO, 1999).

A partir dos ângulos de entrada e saída do pêndulo, é possível calcular a energia de deformação absorvida durante o impacto, utilizando a Equação 1:

$$E = M \times G \times H \quad (1)$$

(Energia potencial gravitacional). Essa energia pode ser ligada à resistência ao desgaste do material. Quanto maior a energia absorvida sem perda significativa por riscamento, maior a resistência do material à abrasão.

3.3 Instrumentação Eletrônica e Aquisição de Dados

A evolução da microeletrônica e dos sistemas embarcados possibilitou a modernização de equipamentos por meio da automação. Permitindo medir com alta precisão o ângulo de oscilação do pêndulo, fornecendo dados fundamentais para o cálculo da energia de deformação (CUI DEVICES, 2022).

Esses sensores podem ser integrados a microcontroladores como o Arduino, que atua como unidade de aquisição e registro dos dados experimentais. Segundo *National Instruments* (2020), o uso de plataformas abertas para coleta de dados permite o desenvolvimento de sistemas de

medição mais acessíveis, reproduzíveis e facilmente integráveis a softwares de análise.

3.4 Revestimentos Poliméricos

Os revestimentos poliméricos desempenham papel essencial no desempenho e na confiabilidade dos cabos utilizados em aerogeradores, especialmente devido às elevadas solicitações mecânicas, térmicas e ambientais presentes em parques eólicos *onshore* e *offshore*. Entre os materiais mais utilizados destacam-se o policloreto de vinila (PVC) e o etileno-propileno borracha (HEPR), escolhidos por sua combinação de propriedades elétricas, resistência ao envelhecimento e processabilidade.

O PVC é um polímero termoplástico amplamente empregado em isolamentos e capas externas de cabos devido à sua boa resistência à abrasão, ao fogo e à ação de agentes químicos, além do baixo custo e facilidade de extrusão. Suas propriedades podem ser significativamente ajustadas por plastificantes e estabilizantes térmicos, permitindo seu uso em cabos de baixa e média tensão de aerogeradores. Entretanto, sua estabilidade térmica é limitada e o material pode apresentar rigidez a baixas temperaturas, o que requer formulações específicas para ambientes externos agressivos (Callister & Rethwisch, 2021; Kabir *et al.*, 2020).

Já o HEPR, uma borracha de etileno-propileno modificada, pertence à família dos elastômeros reticulados, apresentando excelente flexibilidade, boa resistência térmica (tipicamente até 90–110 °C), elevada resistência dielétrica e boa durabilidade frente a umidade e intempéries. Essas características tornam o HEPR adequado para cabos sujeitos a movimentos repetitivos, vibração e ciclos mecânicos típicos de torres e nacelles de aerogeradores. Além disso, sua estrutura reticulada proporciona maior estabilidade dimensional e melhor resistência ao envelhecimento térmico quando comparado ao PVC (Wang *et al.*, 2023; Montanari *et al.*, 2018).

De forma geral, a seleção entre PVC e HEPR depende das exigências de flexibilidade, temperatura de operação, resistência mecânica, comportamento frente ao fogo e expectativa de vida útil dos cabos. Em sistemas eólicos, onde há grande demanda por confiabilidade e resistência a ciclos dinâmicos, o HEPR tende a ser preferido em isolamentos, enquanto o PVC permanece amplamente

utilizado em capas externas de proteção, dependendo das condições ambientais e requisitos normativos.

3.5 Comportamento Mecânico e Integridade de Cabos Condutores em Ambientes de Alta Exigência

A integridade mecânica dos cabos condutores é um aspecto fundamental para a confiabilidade de sistemas elétricos, especialmente em ambientes onde os condutores estão sujeitos a esforços repetitivos, vibração, impacto e processos abrasivos. Danos superficiais aparentemente pequenos podem evoluir para falhas significativas no isolamento, causando curto-circuitos, interrupções operacionais e riscos durante atividades de manutenção.

Estudos sobre desgaste e resposta mecânica de materiais poliméricos reforçam que a resistência ao cisalhamento e à deformação plástica está diretamente associada às características intrínsecas do material, como rigidez, dureza e composição da matriz polimérica. Nesse sentido, Souza (2015) demonstra que polímeros com maior densidade estrutural tendem a exigir maiores níveis de energia para iniciar mecanismos de ruptura, evidenciando a importância da avaliação do comportamento mecânico em aplicações práticas. Assim como, compreender o desempenho dos revestimentos diante de esforços concentrados, como o corte, é essencial para prever sua durabilidade e garantir segurança em sistemas elétricos industriais, incluindo instalações eólicas.

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

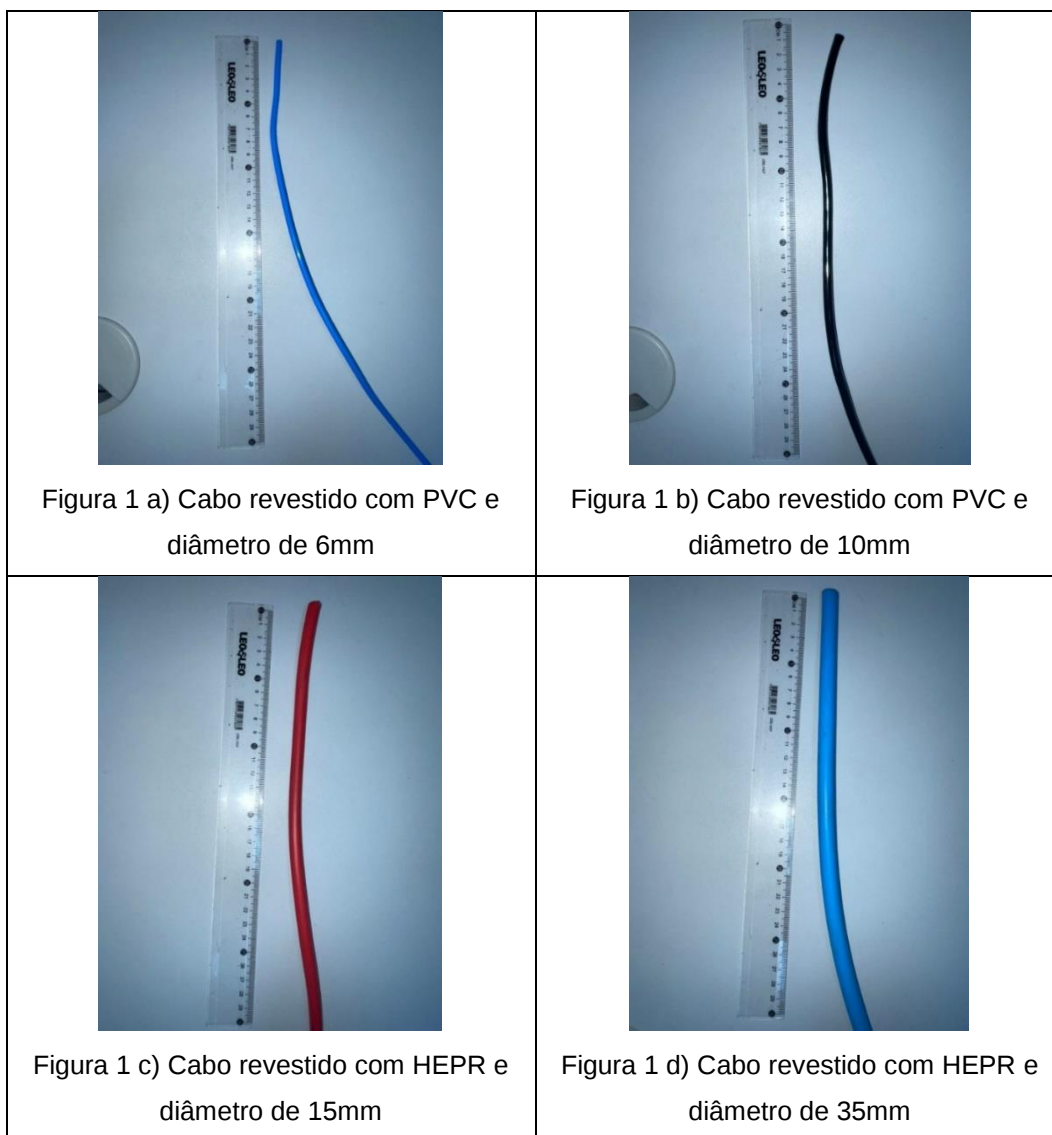
A presente pesquisa é de natureza experimental, com abordagem quantitativa e exploratória. A proposta envolve a utilização de um equipamento de ensaio tribológico, para a avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de fios metálicos revestidos com diferentes polímeros e com diâmetros distintos, através da quantificação da energia despendida durante o riscamento, mensurando variáveis físicas e em seguida analisando a superfície danificada.

4.1 Materiais Utilizados

Foram utilizados como amostras deste estudo, cabos condutores elétricos com diferentes seções transversais (6 mm, 10 mm, 16 mm e 35 mm) e tipos de isolamento (PVC e HEPR), amplamente empregados em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Essa variação dimensional e de material

permitiu avaliar como a espessura e a composição influenciam o comportamento tribológico e a energia de deformação observada nos ensaios esclerométricos. As amostras utilizadas são apresentadas nas Figuras 1 a), b), c) e d) abaixo.

Figura 1 – Amostras dos fios condutores de energia.



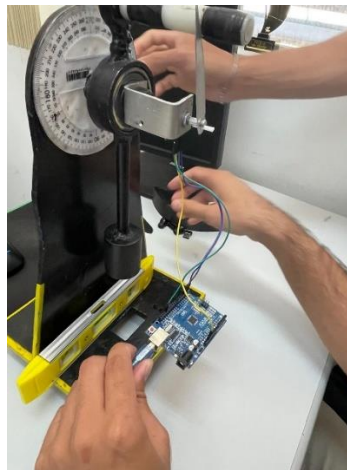
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Esclerometria Pendular

O esclerômetro pendular foi o tribômetro utilizado para a realização dos ensaios de riscamento, permitindo a avaliação da energia de deformação associada ao contato entre o indentador e a superfície de revestimento do fio. O equipamento é composto por um pêndulo com ponta

cônica indentadora, suporte de fixação da amostra, sistema de medição angular e módulo eletrônico de aquisição de dados. A Figura 1 apresenta a estrutura geral do esclerômetro utilizado nos experimentos.

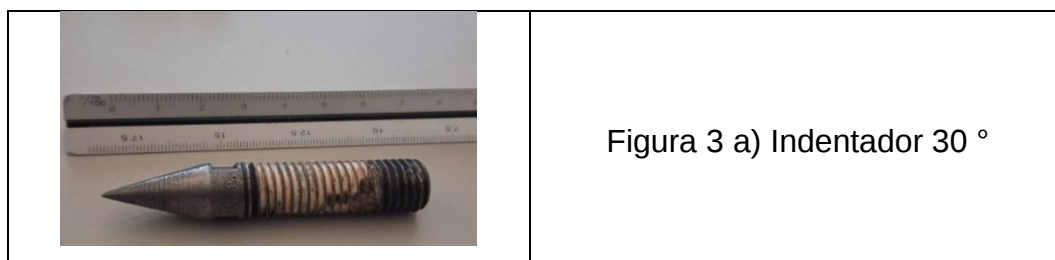
Figura 2 – Esclerômetro Pendular

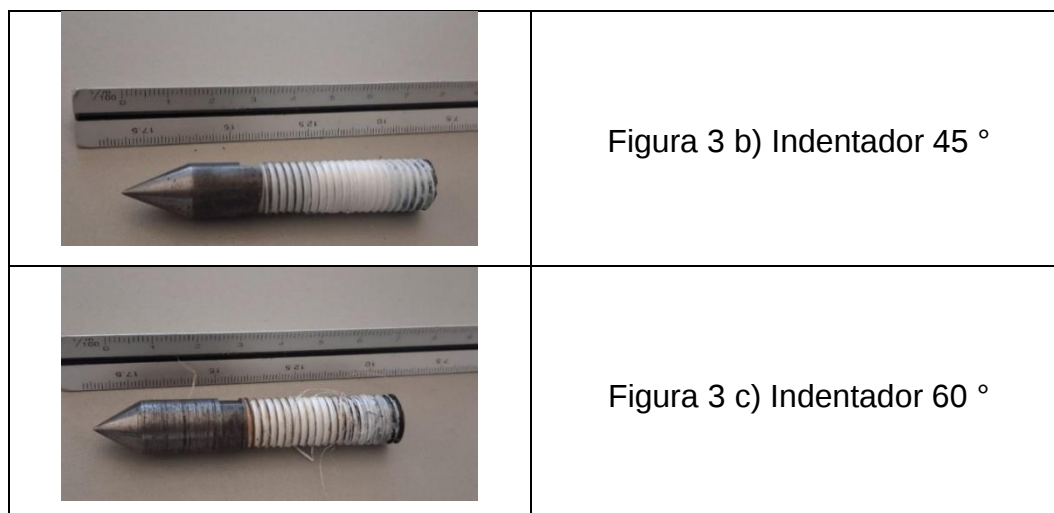


Fonte: Autoria própria (2025)

Foram utilizados três pontas cônicas indentadoras com diferentes ângulos de ponta (30° , 45° e 60°), permitindo avaliar a influência da geometria de contato na energia de deformação e na formação dos sulcos após o riscamento. Cada ângulo proporciona uma condição distinta de pressão de contato e penetração sobre a superfície do fio, como ilustrado nas Figuras 3 a), b) e c).

Figura 3 - Pontas Cônicas Identadoras a) Indentador 30° b) Indentador 45° e c) Indentador 60°





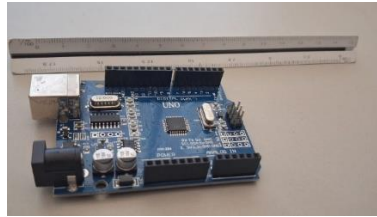
Fonte: Autoria própria (2025)

Com o sistema montado e calibrado o pêndulo foi liberado de uma altura conhecida e o movimento da ponta cônica indentadora gerou um sulco na superfície do fio. Para cada amostra ou diâmetro do cabo de energia, foram realizados sete ensaios com os ângulos de 30°, 45° e 60° e suas energias tanto inicial como de contato foram registradas através de um programa gerenciado pelo arduíno.

4.3 Aquisição de Dados

O microcontrolador Arduino Uno foi utilizado como unidade de aquisição e processamento dos dados obtidos durante os ensaios, como pode-se observar na Figura 4. Permitindo-se registrar os ângulos de oscilação do pêndulo e converter as medições em valores de energia, garantindo maior precisão e repetibilidade nos resultados experimentais, após ler e interpretar os pulsos provenientes do sensor KY-040, o Arduino Uno envia os dados para o notebook por meio da interface USB integrada. Essa comunicação utiliza protocolo serial uart, convertido automaticamente para USB pelo chip controlador da placa. O notebook recebe essas informações pela porta com virtual, permitindo que softwares como Labview ou o monitor serial processem, exibam e armazenem os valores de forma contínua.

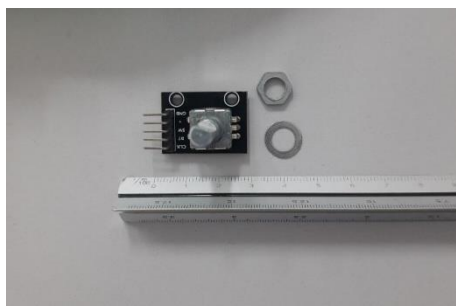
Figura 4 – Arduíno uno



Fonte: Autoria própria (2025)

Assim como, um módulo Sensor Rotary Encoder Rotativo Decoder Ky-040 Arduino foi utilizado para medir os ângulos de oscilação do pêndulo, convertendo o movimento rotacional em sinais elétricos enviados ao Arduino para registro dos dados. O módulo possui quatro terminais: *Clock*, *Data*, *Switch*. Os sinais *Clock* e *Data* fornecem pulsos elétricos digitais em onda quadrada, defasados entre si, permitindo determinar tanto a quantidade de incrementos quanto o sentido de rotação do eixo. O terminal *Switch* corresponde ao botão embutido no encoder, ativado por pressão. Esses três sinais são conectados aos pinos digitais do Arduino Uno, que detecta as transições de nível lógico por meio de interrupções ou leitura rápida. Dessa forma, o Arduino converte o movimento mecânico do eixo em sinais elétricos interpretáveis, registrando cada variação angular de forma precisa, visualizado na Figura 5 a seguir.

Figura 5 – Módulo Sensor Rotary Encoder Rotativo Decoder Ky-040 Arduino



Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados foram adquiridos e processados em tempo real por uma placa Arduino Uno, programada para calcular a diferença de altura (Δh) do movimento pendular e assim quantificar a energia durante o movimento de riscamento do

as marcas de riscamento ou trilhas de desgaste, com aumento de 10x e avaliar visualmente o nível de deformação superficial causado pelo impacto do pêndulo.

Figura 7 – Microscópio Óptico Opticam



Fonte: Autoria própria (2025)

5. Resultados e Discussão

5.1 Ensaios Esclerométricos

Os ensaios esclerométricos foram executados nos cabos com diâmetros de 6mm, 10mm, revestidos com PVC e de 15mm e 35 mm, revestidos com HEPR, utilizando-se das pontas cônicas indentadoras com os ângulos de 30°, 45° e 60°. Foram capturados os dados de energia inicial (L_i), referente a energia anterior ao lançamento do pêndulo, antes de tocar a superfície de contato e a energia de contato (E_c), referente a energia suficiente para provocar o risco na superfície dos cabos ensaiados.

Na Tabela 1 tem-se os dados de energia das energias registradas no sistema de aquisição de dados para o ângulo de ponta de 30° de todas as amostras estudadas, inclusive para ambos os revestimentos de PVC e HEPR. Foi possível identificar que os valores de energia inicial (L_i) apresentaram pouca variação entre os ensaios, com baixos desvio padrão, indicando boa repetição mecânica do sistema pendular e estabilidade nas condições de lançamento.

Tabela 1 – Dados aquisitados para o indentador 30°

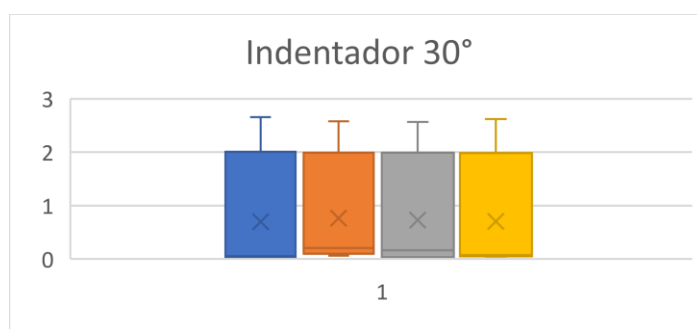
CABOS	Média Li (J)	DesvPad (Li)	Média Ec (J)	DesvPad (Ec)
6mm ²	2,6567	0,0273	0,0575	0,046 8
10mm ²	2,5799	0,1955	0,0618	0,1959
15mm ²	2,5621	0,2568	0,0694	0,2662
35mm ²	2,6178	0,0692	0,0783	0,0687

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que os valores médios permanecem estáveis entre os ensaios, enquanto os desvios-padrão indicam boa repetibilidade das medições para esta condição de teste.

Já a energia de contato (Ec), àquela necessária para riscar a superfície dos cabos, apresentou diferenças mais significativas entre os diâmetros. Os fios de 6 mm² e 10 mm² apresentaram menores valores médios de Ec, enquanto os fios de 15 mm² e 35 mm² exigiram maior energia para o corte. Isso confirma que diâmetros maiores demandam maior energia de cisalhamento, como verifica-se na Figura 8, Para padronização dos gráficos e análises, cada seção nominal dos cabos foi representada por uma cor específica: 6 mm² (azul), 10 mm² (laranja), 15 mm² (cinza) e 35 mm² (verde).

Figura 8 - Energia de Deformação gasta com o ângulo de 30° para os cabos estudados



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que os fios de 6 mm² e 10 mm², isolados em PVC, apresentaram menores valores médios de energia de contato. Isso pode ser

justificado pela característica de superfície do PVC, apresentar menor rugosidade, sendo mais liso, apesar de mais rígido e assim possuir menor resistência ao risco em suas menores espessura de diâmetro.

Já os fios de 15 mm² e 35 mm², também isolados em HEPR, registraram valores mais elevados de E_c . O HEPR é um material mais rígido, com maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura, o que contribui para o aumento da energia dissipada no impacto. Assim, parte da diferença observada entre as bitolas decorre não da seção do cobre metálico, mas sim do tipo de material isolante, visto que o riscamento foi superficial, não suficiente para remover todo o revestimento e tocar ou expor a parte metálica do fio.

Os dados de energia das energias registradas no sistema de aquisição de dados para o ângulo de ponta de 45° de todas as amostras estudadas, inclusive para ambos os revestimentos de PVC e HEPR, podem ser verificados na Tabela 2, a seguir. O mesmo padrão verificado anteriormente para o ângulo de 30° se repete, tem-se o aumento progressivo de energia gasta para provocar o risco com o aumento do diâmetro dos cabos, independente do revestimento.

A Tabela 2 apresenta os valores médios e os desvios-padrão correspondentes à segunda condição de ensaio. Esses resultados permitem comparar o comportamento do sistema em relação à primeira etapa, destacando possíveis variações decorrentes das mudanças de adotadas.

Tabela 2 – Dados aquisitados com o indentador 45°

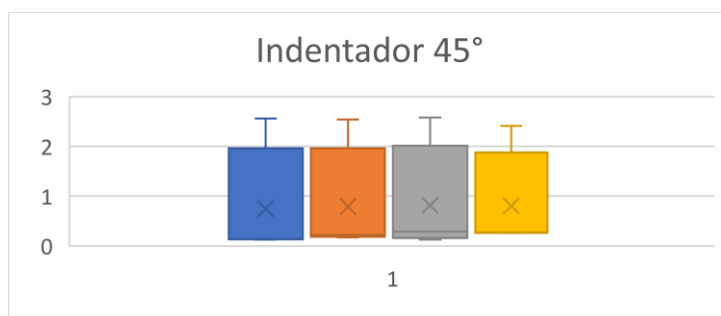
CABOS	Média Li (J)	DesvPad (Li)	Média Ec (J)	DesvPad (Ec)
6mm²	2,5625	0,1388	0,144	0,1279
10mm²	2,5381	0,2279	0,1738	0,2159
15mm²	2,5786	0,1236	0,2639	0,306
35mm²	2,41	0,26	0,2858	0,26

Fonte: Autoria própria (2025)

Para essa Tabela 2, a média apresenta uma variação ligeiramente superior, porém os desvios-padrão continuam dentro de limites aceitáveis, demonstrando confiabilidade no processo de aquisição de dados.

O gráfico a seguir apresenta os valores de energia obtidos quando o ensaio foi realizado com o indentador 45°, permitindo avaliar como esse ângulo intermediário influencia o desempenho dos diferentes cabos.

Figura 9 – Energia de Deformação gasta com o ângulo de 45° para os cabos estudados.



Fonte: Autoria própria (2025)

Verificados na Tabela 3 os dados de energia registrados no sistema de aquisição de dados para o ângulo de ponta de 60° de todas as amostras estudadas, inclusive para ambos os revestimentos de PVC e HEPR.

A Tabela 3 reúne os valores médios e os respectivos desvios-padrão obtidos na terceira condição de teste. Essa etapa complementa a análise, permitindo verificar a consistência dos dados ao longo de todas as repetições e identificar eventuais tendências entre as diferentes condições avaliadas.

Tabela 3 – Dados aquisitados com o indentador 60°

CABOS	Média Li (J)	DesvPad (Li)	Média Ec (J)	DesvPad (Ec)
6mm ²	2,42157	0,44342	0,1638	0,1257
10mm ²	2,41344	0,28612	0,2771	0,2544
15mm ²	2,33099	0,47761	0,3791	0,3242
35mm ²	2,38211	0,44799	0,3891	0,3495

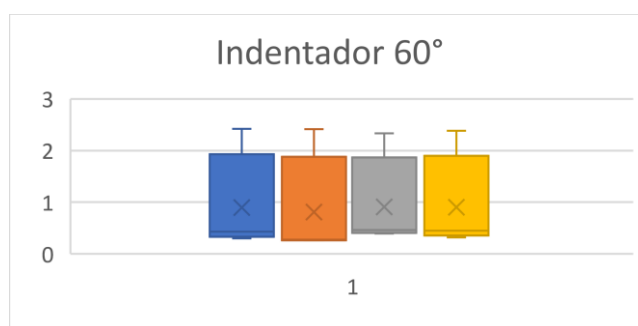
Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados da terceira tabela mantêm o mesmo comportamento geral, com médias coerentes e desvios-padrão compatíveis com o tipo de ensaio.

Esses parâmetros reforçam a estabilidade do sistema experimental e a adequação do número de repetições adotado.

Os resultados de energia para o ângulo de 60°, possibilitando analisar o comportamento dos materiais de maior inclinação e comparar o efeito dessa variação geométrica no processo de corte.

Figura 10 – Energia de Deformação gasta com o ângulo de 60° para os cabos estudados.

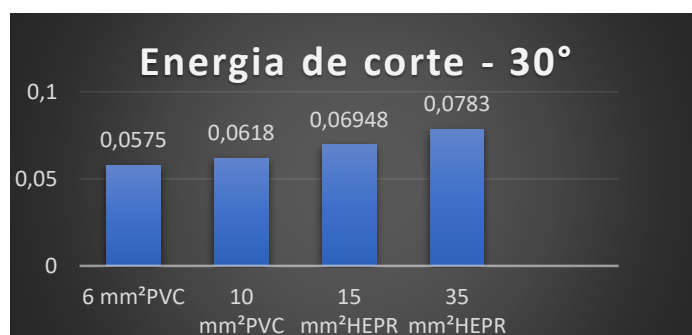


Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados estão de acordo com a teoria de resistência dos materiais, que prevê maior demanda energética para seções maiores, reforçando a adequação do método pendular para avaliar resistência mecânica em condutores, como indicado por PEARSON (2017).

A Figura 11 apresenta um resumo dos valores de energia de corte obtidos para os diferentes cabos analisados quando o ensaio foi realizado com a lâmina posicionada a 30°.

Figura 11 – Análise de dados.

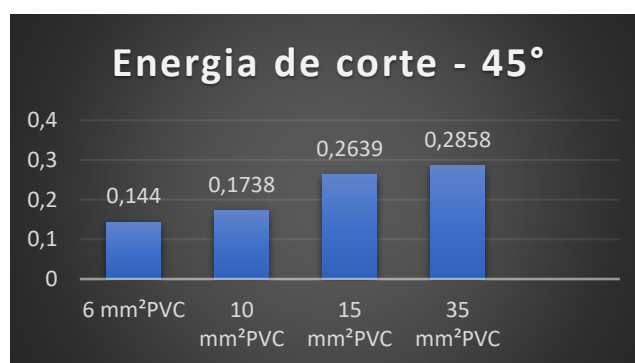


Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que a energia de corte aumenta conforme o diâmetro dos fios. Os fios de PVC de 6 mm² e 10 mm² apresentaram as menores demandas energéticas, enquanto os condutores HEPR de 15 mm² e 35 mm² necessitaram das maiores energias, evidenciando o efeito do material.

A Figura 12 referente ao ângulo de 45°, também exhibe o resumo dos valores de energia de corte registrados para cada cabo, permitindo avaliar como a inclinação modifica o comportamento do sistema durante o ensaio.

Figura 12 – comparação de resultados.

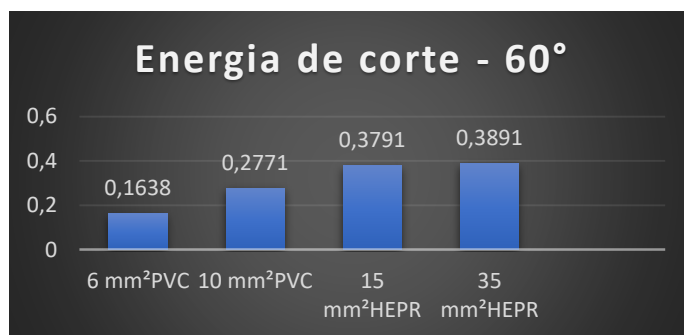


Fonte: Autoria própria (2025)

Neste ângulo, verifica-se novamente um aumento gradual da energia necessária com o aumento do diâmetro. O corte torna-se mais eficiente do que a 30°, porém ainda exige energia crescente conforme o cabo apresenta maior seção e revestimento mais rígido.

A Figura 13 correspondentes ao ângulo de 60° exhibe os resultados de energia de corte obtidos para cada tipo de cabo. Este é o maior ângulo analisado e a ponta cônica indentadora mais rasa.

Figura 13 – Desempenhos no indentador 60°



Fonte: Autoria própria (2025)

A tendência de aumento da energia de corte permanece proporcional ao diâmetro. A inclinação de 60° melhora a ação sobre o material, contribuindo para uma redução na energia de corte. Apesar disso, os cabos continuam apresentando o mesmo padrão de resistência entre si.

Os resultados obtidos demonstram de forma consistente que o aumento da seção dos cabos e a utilização de materiais de maior rigidez impactam diretamente na energia requerida para o processo de corte. As análises comparativas entre os diferentes ângulos reforçam que a inclinação do esclerômetro modifica a eficiência da ação mecânica, mas não altera a tendência fundamental: cabos mais espessos e com revestimentos mais resistentes continuam apresentando maiores demandas energéticas.

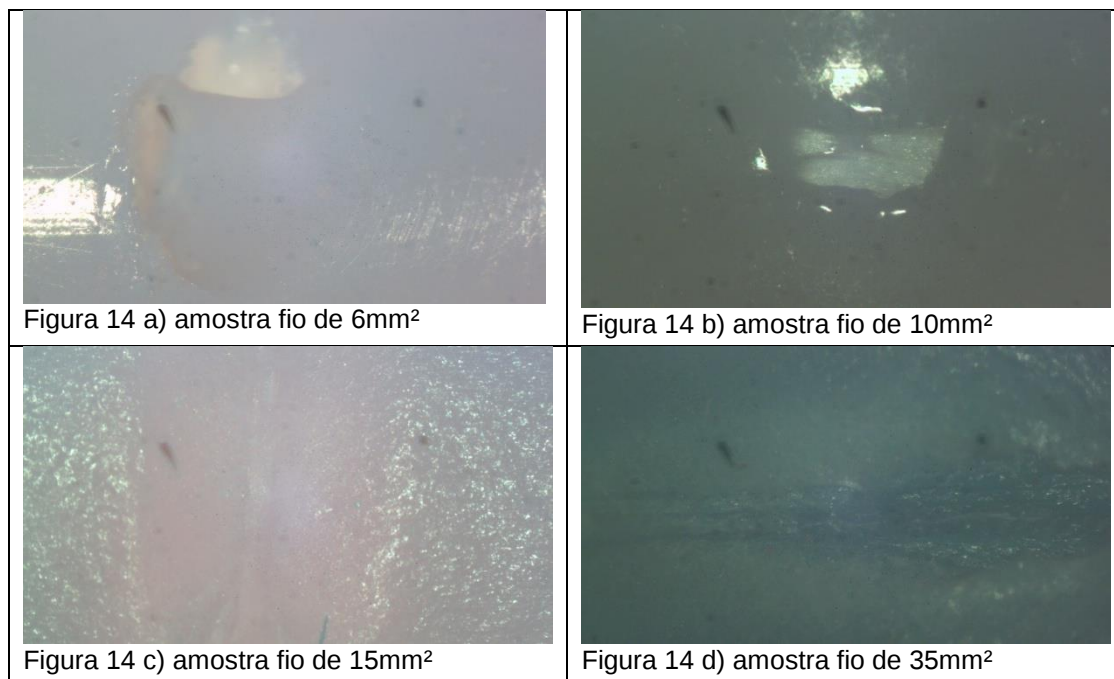
Somando-se aos fundamentos apresentados no referencial teórico, e ao que já é discutido na literatura sobre comportamento mecânico de materiais poliméricos, os ensaios confirmam a confiabilidade do sistema, a coerência física dos resultados e a precisão na caracterização dos cabos testados. Esses achados consolidam a etapa experimental e fornecem base sólida para as conclusões gerais do trabalho.

5.2 Microscopia Óptica

Nesta fase, realizou-se a análise dos sulcos formados durante o corte dos fios por meio do microscópio óptico. O propósito dessa avaliação foi examinar a morfologia da superfície afetada pela ação da indentadora,

verificando-se se houve risco e formação de uma trilha de desgaste através de aspectos como profundidade e uniformidade, Figura 11.

Figura 14 – Micrografias dos riscos após ensaios de esclerometria



Fonte: microscópio óptico Opticam (2025)

De acordo com as micrografias, é possível identificar que houve desgaste abrasivo com a passagem de todos os indentadores. No entanto, as imagens não são conclusivas para quantificar profundidade, comprimento e largura dos riscos. Desta forma, pela visualização física presencial, sugere-se que os fios de PVC (6 mm² e 10 mm²) apresentam sulcos mais rasos e com bordas menos definidas. Enquanto que os fios revestidos de HEPR (15 mm² e 35 mm²), exibem sulcos mais profundos e com maior deformação lateral, indicando maior energia necessária para o corte, corroborando com os dados de energia de deformação obtidos e discutidos anteriormente.

É importante destacar que ângulos de ponta menores, são mais afiados e apresentam maior pressão de contato durante o riscamento, em relação aos ângulos mais rasos e isto justifica o aumento progressivo de energia consumida nos ensaios com o aumento do ângulo de ponta do indentador, como observado por SOUZA (2015). Além disso, confirma-se a dependência entre diâmetro e

energia consumida durante a análise de riscamento, pois o aumento do diâmetro resulta em sulcos mais amplos e com maior deslocamento plástico.

Tais comportamentos se alinham com os observados na literatura. BRISCOE (1996), nos quais a energia de contato (E_c) varia conforme a dureza, a espessura e a composição do polímero. Sustentando-se que materiais mais rígidos tendem a apresentar maior resistência ao corte, o que corrobora os resultados experimentais obtidos com os diferentes tipos de fios ensaiados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma avaliação tribológica com o uso de um esclerômetro pendular instrumentado aplicado ao riscamento de fios condutores com diferentes materiais de revestimentos e diâmetros. A energia inicial do sistema manteve-se praticamente constante entre os diferentes ensaios, o que indica não apenas uma boa mecânica do equipamento, mas também a eficácia do controle eletrônico implementado com o Arduino. A estabilidade das leituras confirma que o sistema de aquisição, composto pelos sensores e pela plataforma Arduino, realizou a medição dos parâmetros cinemáticos de forma precisa e consistente. Esse desempenho é fundamental em aplicações de Engenharia Elétrica, nas quais a confiança dos dados é decisiva para a caracterização de materiais, validação de modelos e desenvolvimento de dispositivos experimentais. Observou-se também que a energia de contato variou conforme o material e o diâmetro dos fios, assim como a variação do ângulo de ponta do indentador, sendo menor nos condutores de PVC (6 mm² e 10 mm²) e mais elevada nos fios de HEPR (15 mm² e 35 mm²), evidenciando a maior resistência mecânica ao risco destes últimos.

As imagens obtidas pelo microscópio óptico reforçaram essa diferença, revelando sulcos mais profundos e maior deformação plástica nos fios de maior diâmetro e material HEPR. Dessa forma, confirmou-se que o esclerômetro pendular proposto é capaz de distinguir o comportamento mecânico dos diferentes condutores, mostrando-se uma ferramenta viável para estudos de corte, desgaste e caracterização de materiais poliméricos.

De forma prática, os resultados experimentais se mostraram coerentes com o desempenho real desses fios em aplicações elétricas. Fios de PVC, geralmente usados em instalações residenciais e de baixa corrente, exibiram menor resistência ao cisalhamento, enquanto cabos de HEPR empregados em ambientes industriais e sistemas de geração, como turbinas eólicas mostraram comportamento mais robusto, compatível com sua função de suportar maiores esforços mecânicos e térmicos. Assim, o esclerômetro pendular demonstrou capacidade de reproduzir, em pequena escala, diferenças reais de resistência observadas no uso cotidiano desses condutores.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, Anthony. Idealização, projeto, construção e avaliação de esclerômetros retilíneos totalmente computadorizados. 1999. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

ALEXANDER, M. Why power cables need more attention than they get. *Windpower Engineering & Development*, 2015. Disponível em: <<https://www.windpowerengineering.com/power-cables-need-attention-get/>>. Acesso em: 22 de novembro de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7286: Cabos de potência com isolamento extrudada de borracha etileno-propileno (EPR, HEPR ou EPR 105) para tensões de 1 kV a 35 kV — Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR 10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: MTE, 2019.

BHUSHAN, Bharat. Introduction to Tribology. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2013.

BRISCOE, B. J.; TABOR, D. *Polymer Tribology*. Oxford: Clarendon Press, 1996.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10^a ed. Wiley, 2021.

CUI DEVICES. AMT103-V Encoder Datasheet, 2022. Disponível em: <https://www.cuidevices.com>. Acesso em: 20 jul. 2025.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Energia eólica no Brasil: panorama atual e perspectivas. Brasília: EPE, 2023.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

HOLMBERG, Kenneth; MATTHEWS, Allan. *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2009. 576 p.

Kabir, E., Kaur, R., Lee, J., Kim, K.-H., & Kwon, E. E. "Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics." *Journal of Cleaner Production*, 2020.

Montanari, G. C., Mazzanti, G., & Simoni, L. "Insulation materials for power cables." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW User Manual. Austin, TX: National Instruments, 2020

OPTICAM. Manual do Microscópio Óptico *Opticam*. São Paulo: Opticam do Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.opticam.com.br>. Acesso em: 11 nov. 2025.

QIN, X.; ZHANG, M.; FU, S.; XU, Y. Review on researches and main influencing factors on mechanical properties of offshore wind power cables. *Journal of Ocean Engineering and Science*, v. 9, p. 101403, 2024.

SILVA, R. H. et al. Análise de desgaste e condutividade elétrica em cabos metálicos. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, v. 18, n. 2, p. 45-58, 2022.

Souza, Juliana. Desenvolvimento de compósitos tribologicamente eficazes. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SOUZA, M. F.; ALMEIDA, P. C. Estudo comparativo de cabos condutores sob esforços mecânicos e térmicos. *Revista de Materiais e Energia*, v. 5, n. 3, p. 21-33, 2020.

Wang, J., Li, H., Zhang, T., & Chen, G. "Review on researches and main influencing factors on mechanical properties of offshore wind power cables." *Engineering Failure Analysis*, 2023.

WANG, Q. J. et al. Modeling of single-particle abrasive wear processes. *Wear*, v. 250, p. 722–731, 200.