

**UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E
AMBIENTAIS**

José Carlos Machado Junior

**DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E INTRODUÇÃO DO ISOLANTE
TERMO ELÉTRICO FLEXÍVEL NO MERCADO NACIONAL**

**Sorocaba/SP
2026**

José Carlos Machado Junior

**DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E INTRODUÇÃO DO ISOLANTE
TERMO ELÉTRICO FLEXÍVEL NO MERCADO NACIONAL**

Tese apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais - PTA da Universidade de Sorocaba, como exigência Parcial para obtenção do título de Doutor em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves

**Sorocaba/SP
2026**

Ficha Catalográfica

Machado Junior, José Carlos
M131d Desenvolvimento, caracterização e introdução do isolante termo elétrico flexível no mercado nacional / José Carlos Machado Junior. – 2026.
121 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo.
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves.
Tese (Doutorado em Processos Tecnológicos e Ambientais) –
Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2026.

1. Materiais - Desenvolvimento. 2. Materiais termoelétricos. 3. Polímeros. 4. Fibra de vidro. 5. Elastômeros. 6. Óxido de alumínio. 7. Mica. I. Restivo, Thomaz Augusto Guisard, orient. II. Gonçalves, Daniel Bertoli, coorient. III. Universidade de Sorocaba. IV. Título.


JOSÉ CARLOS MACHADO JUNIOR

DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E INTRODUÇÃO DO ISOLANTE TERMO ELÉTRICO FLEXÍVEL NO MERCADO NACIONAL

Tese apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Doutor em Processos Tecnológicos e Ambientais.


Aprovado: 05/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **THOMAZ AUGUSTO GUISARD RESTIVO**
Data: 23/02/2026 16:31:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

Orientador- Universidade de Sorocaba-Uniso

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAEL BASILIO PIRES NONATO**
Data: 06/02/2026 16:13:17-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Prof. Dr. Raphael Basílio Pires Nonato

Instituto Federal de Santa Catarina -UFSC

Documento assinado digitalmente
 **MARCUS VENICIUS BRANCO DE SOUZA**
Data: 24/02/2026 00:16:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Prof. Dr. Marcus Vinicius Branco de Souza

Faculdade de Tecnologia de Itapetininga – FATEC

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA**
Data: 24/02/2026 19:07:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Adriane de Medeiros Ferreira

Universidade de Sorocaba- Uniso

Documento assinado digitalmente
 **KESSI MARIE DE MOURA CRESCENCIO**
Data: 23/02/2026 17:03:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Kessi Marie de Moura Crescencio

Universidade de Sorocaba- Uniso

Dedico a DEUS, pelo amparo e direcionamento, direito de sonhar e não deixar desistir dos meus sonhos, sem DEUS nada seria possível...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por arquitetar, planejar e executar a realização deste sonho.

Agradeço à empresa Itel Isolantes termoelétricos, por meio do amigo Presidente Eng. Carlos Ronaldo Alves Nascimento, a oportunidade de atuar há mais de 20 anos em pesquisa e desenvolvimento de materiais isolantes termoelétricos.

Agradeço ao professor e amigo Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo, o qual foi orientador e incentivador na busca do Mestrado e Doutorado PTA Uniso, quanta paciência e sabedoria teve comigo, vaso escolhido por DEUS para esta missão.

Agradeço a todos os professores que colaboraram para esta realização, em especial o Coorientador Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves pela dedicação e prestatividade em compartilhar seu vasto conhecimento.

Ao Prof. Dr. Raphael Basilio Pires Nonato, Prof^ª. Dra. Adriane de Medeiros Ferreira, Prof^ª. Dra. Kessi Marie de Moura Crescencio e Prof. Dr. Marcus Vinicius Branco de Souza por aceitarem fazer parte da banca examinadora e acrescentarem com seus sábios e precisos comentários.

Agradeço a UNISO, a USP Politécnica, UFSCAR CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais), LABNUS (Laboratório de Biomateriais e Nanotecnologia) da Universidade Sorocaba e IPEN (Instituto de Pesquisa de Energia Nuclear) e seus profissionais por abrirem as portas para uso dos laboratórios e realização dos ensaios.

Agradeço a minha amada esposa Paloma, aos meus amados filhos Giovanna e José Gabriel pela compreensão, amor e incentivo.

Agradeço a minha amada mãe Eugênia e saudoso papai José Carlos, por doutrinarem nos caminhos a trilhar e não se desviar deles. A eles, eterna gratidão.

Agradeço a toda minha família que sempre me alicerçaram, apoiaram e compreenderam, acredito que é vitória de todos.

Agradeço a DEUS, por nosso SENHOR e Salvador JESUS CRISTO, toda honra e glória somente a ti pertence.

Em tudo sou grato!

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece” Filipenses 4:13

RESUMO

O mercado de isoladores termoelétricos envolve o desenvolvimento de isoladores para soluções nas indústrias metalúrgica, siderúrgica, naval, automotiva e principalmente de fundição e aciarias que trabalham em alta temperatura. Os principais equipamentos que utilizam isolantes termoelétricos são fornos a arco elétrico (FEA), forno a indução e de cadinho, bobinas de fornos e indutores, coletores automotivos, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos e principalmente isolantes termoelétricos desenvolvidos sob encomenda para o cliente. Entre as principais características dos isolantes termoelétricos estão a resistência mecânica, rigidez dielétrica, resistência à altas temperaturas, condutividade térmica, flamabilidade, resistência à absorção de água, resistência à absorção de óleo e comportamento inerte em relação à contaminação externa. Todos os isolantes termoelétricos possuem suas vantagens e desvantagens, o que direciona a necessidade de desenvolver o melhor custo-benefício para cada aplicação. Dentre os isolantes termoelétricos existentes no mercado, existem materiais isolantes termoelétricos flexíveis como chapa de mica, materiais a base de fibra de vidro com elastômero, chapas de mica e folhas de mica impregnadas com resina de silicone. Com relação aos isolantes termoelétricos rígidos, destacam-se as placas de mica moscovita e flogopita à base de resina de silicato, chapas à base de tecido de fibra de vidro impregnado com resina epóxi, poliéster, fenólica e silicone. Todos esses isolantes podem ser fabricados como moldados contínuos, chapas laminadas e tubos. Os isolantes termoelétricos podem ser fabricados por processos de usinagem como torno e fresa convencionais, serra de corte e CNC, entre outros. Dentre as muitas opções, o mercado segue em contínuo desenvolvimento e adaptação devido à alta demanda e competitividade, necessitando aprimorar os isolantes termoelétricos no monitoramento dos equipamentos, aliado à redução dos custos de isolamento para se manter competitivo. Neste cenário, a presente tese discute o desenvolvimento de um novo isolante termoelétrico flexível, de classe térmica que trabalhará acima de 300 °C, com rigidez dielétrica de 5 kV/mm, melhor resistência mecânica e flexível, antichama, isento de amianto e baixa condutividade térmica. Este material foi desenvolvido com tecido de fibra de vidro entrelaçado quer seja manta ou gaxeta tubular, impregnado com elastômero alta temperatura, prensado sob alta pressão e temperatura simultaneamente. O isolante compósito elastomérico com estrutura de fibra de vidro é classificado como material elastomérico flexível e foi desenvolvido para atender equipamentos onde os isolantes requerem trabalho em alta temperatura sem perder as características de isolamento. Por se tratar de um isolante nacional com matérias-primas também nacionais vale destacar o baixo custo em relação a outros isolantes. Os ensaios demonstram que o material polimérico flexível desenvolvido suporta 5 kV/mm e temperatura da ordem de 300 °C, tendo ainda uma baixa condutividade térmica aproximadamente 0,25 W/mK e mostrando ainda elevado calor específico de cerca de 1094 J/kgK. O Ensaio de flamabilidade (norma UL 94 V) classificou o isolante IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro como V-1 e o isolante IT2004 – MPS Mica Flexível como V-0.

Palavras-chave: isolantes termoelétricos; elastômero; fibra de vidro; alumina; mica.

ABSTRACT

The thermoelectric insulator market involves the development of insulators for solutions in the metallurgical, steel, naval, automotive, and especially foundry and steelmaking industries that operate at high temperatures. The main equipment that uses thermoelectric insulators includes electric arc furnaces (EAF), induction and crucible furnaces, furnace coils and inductors, automotive collectors, electronic and household appliances, and especially thermoelectric insulators developed to order for the customer. Among the main characteristics of thermoelectric insulators are mechanical strength, dielectric rigidity, high-temperature resistance, thermal conductivity, flammability, water absorption resistance, oil absorption resistance, and inert behavior regarding external contamination. All thermoelectric insulators have their advantages and disadvantages, which necessitates the development of the best cost-benefit ratio for each application. Among the thermoelectric insulators available on the market, there are flexible thermoelectric insulating materials such as micanite sheets, fiberglass-based materials with elastomer, mica sheets, and mica sheets impregnated with silicone resin. Regarding rigid thermoelectric insulators, muscovite and phlogopite mica plates based on silicate resin, plates made of fiberglass fabric impregnated with epoxy resin, polyester, phenolic, and silicone stand out. All these insulators can be manufactured as continuous molds, laminated sheets, and tubes. Thermoelectric insulators can be manufactured using machining processes such as conventional lathe and milling, cutting saw, and CNC, among others. Among the many options, the market continues to evolve and adapt due to high demand and competitiveness, necessitating the improvement of thermoelectric insulators in equipment monitoring, coupled with the reduction of insulation costs to remain competitive. In this scenario, the present thesis discusses the development of a new flexible thermoelectric insulator, with a thermal class that will operate above 300 °C, a dielectric strength of 5 kV/mm, better mechanical and flexible resistance, flame retardant, asbestos-free, and low thermal conductivity. This material was developed with woven fiberglass fabric, whether in mat or tubular gasket form, impregnated with high-temperature elastomer, and pressed under high pressure and temperature simultaneously. The elastomeric composite insulation with a fiberglass structure is classified as a flexible elastomeric material and was developed to meet the requirements of equipment where insulators need to work at high temperatures without losing their insulation characteristics. Since it is a national insulator with also national raw materials, it is worth highlighting the low cost compared to other insulators. The tests demonstrate that the developed flexible polymeric material withstands 5 kV/mm and temperatures around 300 °C, while also having low thermal conductivity of approximately 0.25 W/mK and showing a high specific heat of about 1094 J/kgK. The flammability test (UL 94 V standard) classified the IT5004-4 Bi-Component Oxi-Ferro insulator as V-1 and the IT2004 – MPS Flexible Mica insulator as V-0.

Keywords: thermoelectric insulators; elastomer; fiberglass; alumina; mica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração da classificação dos materiais sólidos	21
Figura 2 - Exemplos de materiais sólidos segundo sua classificação	22
Figura 3 - Estrutura genérica da borracha de silicone (SR)	28
Figura 4 - Produção de Silicones da Areia ao Elastômero de Silicone.....	29
Figura 5 - Fibra de Vidro	30
Figura 6 - Tecido de Fibra de Vidro.....	31
Figura 7 - Gaxeta Tubular em Fibra de Vidro.....	32
Figura 8 – Alumina	33
Figura 9 - Principais isolantes termoelétricos rígidos oferecido no mercado de baixa tensão	44
Figura 10 - Passos para o processo de desenvolvimento de novos produtos	51
Figura 11 - Fluxograma produtivo isolantes termoelétricos flexíveis.....	54
Figura 12 - Amostra do Corpo de Prova, segundo a norma.....	60
Figura 13- Sistema utilizado no ensaio UL-94.....	61
Figura 14 - Máquina de ensaio de tração Emic – Capacidade Máxima 100 kN	62
Figura 15 – Esquema do corpo de prova da norma	63
Figura 16 - Analisadores de área superficial BET e de volume e de diâmetro de poros(Anton Paar).....	64
Figura 17 - Digestor Micro-ondas (CEM-Mars 6).....	65
Figura 18 - Equipamento Beckman Coulter LS13320 com o módulo Tornado DPS.	66
Figura 19 - Isolante Termoelétrico Flexível	69
Figura 20 - Amostra Alumina Coletada para Compósito IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina	70
Figura 21 - Granulometria Difração a Laser da Alumina utilizado no compósito do Isolante Flexível IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina	71

Figura 22 - Análise TG/DTA do Isolante IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre.....	83
Figura 23 - Análise TG/DTA do Isolante IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	84
Figura 24 - Análise TG/DTA do Isolante IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	85
Figura 25 - Análise TG/DTA do Isolante IT2004 MPS Mica Flexível	86
Figura 26 Resultado ensaio de tração isolante flexível IT5004-4 Oxi-Ferro Bi- Componente.....	95
Figura 27 - Resultado Ensaio de Tração Isolante Flexível IT5004-4 Oxi-Cobre Alta Performance.....	96
Figura 28 - Resultado Ensaio de Tração Isolante Flexível IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina	97
Figura 29 - Resultado Ensaio de Tração Isolante Flexível IT-2004 MPF Mica Flexível	98
Figura 30 - Espectrograma de FTIR do Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina e do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina.....	100
Figura 31 - Espectrograma de FTIR do Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro e do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	103
Figura 32 - Espectrograma de FTIR do Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre e do compósito isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	105
Figura 33 - Espectrograma de FTIR da Resina Silicone Flexível e do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível	107
Figura 34 - Caso de Sucesso Isolantes Termoelétrico Flexível.....	111
Tabela 1 - Família de Elastômeros.....	27
Tabela 2 - Tempo estimado de vida, em serviço, da borracha de silicone a diferentes temperaturas	29
Tabela 3 - Designação da classe térmica	36
Tabela 4 - Tabela de Propriedades dos Principais Isolantes	45
Tabela 5 - Composição dos Isolantes	55
Tabela 6 - Critérios de avaliação do teste de queima vertical (norma UL-94).....	61
Tabela 7 - ICP-OES Amostra da Alumina utilizada no compósito IT5004-4 Bi- Componente 10% Alumina.....	72

Tabela 8 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, à 25°C, para os diferentes materiais termoelétricos.....	73
Tabela 9 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, em altas temperaturas, para os diferentes materiais termoelétricos.....	74
Tabela 10 - Valores Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT2004 MPS Mica Flexível (n=7)	75
Tabela 11 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro (n=7).....	75
Tabela 12 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre. (n=7)	76
Tabela 13 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina. (n=7).....	76
Tabela 14 - Valores Condutividade térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT2004 Mica Flexível (n=7)	78
Tabela 15 - Valores Condutividade térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro (n=7)	78
Tabela 16 - Valores Condutividade térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre. (n=7)	79
Tabela 17 - Valores Condutividade Térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina. (n=7)	79
Tabela 18 – Valores de calor específico em ensaio a 25 °C e 100 ± 1 °C.....	81
Tabela 19 - Medidas de (TG/DTA) para as diferentes amostras.....	87
Tabela 20. Resultado de densidade segundo a norma ISO 1183-1:2004.....	88
Tabela 21 - Resultado dureza ISO 868 shore A.....	89
Tabela 22 - Resultados do ensaio flamabilidade (norma UL 94 V) para o primeiro conjunto de corpos de prova da amostra IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro	91
Tabela 23 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro no primeiro conjunto de corpos de prova.	91
Tabela 24 - Resultados do ensaio flamabilidade (norma UL 94 V) para a amostra IT5004-4 Alta-Performance Oxi-Cobre.....	92
Tabela 25 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre.	92

Tabela 26 - Resultados do ensaio flamabilidade (norma UL 94 V) para a amostra IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina	93
Tabela 27 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina	93
Tabela 28 - Resultados do ensaio flamabilidade (norma UL 94 V) para a amostra IT2004 - MPSF Mica Flexível	94
Tabela 29 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT2004 - MPSF Mica Flexível	94
Tabela 30 - Tabela de ensaio de tração de materiais isolantes flexíveis	99
Gráfico 1 - Resultado das medidas de condutividade térmica a 26 ± 1 °C.....	77
Gráfico 2 – Resultado das medidas de condutividade térmica a 100 ± 1 °C	80
Gráfico 3 – Resultado das Medidas do Calor Especifico 25 °C ± 1 °C.....	81
Gráfico 4 - Resultado das medidas do calor especifico 100 °C ± 1 °C	82
Gráfico 5 - Resultado temperatura de decomposição/perda de massa.....	87
Gráfico 6 – Resultado de Densidade.....	88
Gráfico 7 - Valores de dureza shore A dos isolantes termoelétricos flexíveis.	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SIGLA	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APIs	Ingredientes Farmacêuticos Ativos
ASTM	Sociedade Americana de Testes em Materiais
ATR	Reflectância Total Atenuada
BET	Área Superficial Específica
CPs	Corpo de Provas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CTAB	Brometo de Cetiltrimetilamônio
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
E	Módulo de Elasticidade
FEA	Forno Elétrico a Arco
FTIR	Espectroscopia por Infravermelho com Transformada de Fourier
G-10	Isolante Tecido de Vidro com Resina Epóxi Classe (F) 155 °C
G-11	Isolante Tecido de Vidro com Resina Epóxi Classe (H) 180 °C
G-7	Isolante Tecido de Vidro com Resina Inorgânica Classe (C) 300 °C
HS	Indica o Número de Fios de Urdume
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente
ISO	Organização Internacional de Normalização
ITVF	Isolante Tecido de Fibra de Vidro
ITVFPlus	Isolante Tecido de Fibra de Vidro Aditivado inorgânica
MIE	Materiais Isolantes Elétricos
MLT	Materiais Laminados Termorrígidos
QA/QC	Garantia da Qualidade/Controle de Qualidade

RTV	Vulcanização a Temperatura Ambiente
SIE	Sistema de Isolação Elétrica
TG	Termogravimetria
TVE	Tecido de fibra de vidro com resina epóxi
TVS	Tecido de fibra de vidro com resina de silicone

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Classificação de Materiais Sólidos	21
2.1.1	Materiais metálicos.....	22
2.1.2	Materiais cerâmicos.....	23
2.1.3	Materiais poliméricos	23
2.1.4	Materiais compósitos	24
2.2	Materiais laminados termorrígidos	25
2.3	Elastômero	27
2.3.1	Silicone	28
2.4	Fibra de Vidro.....	30
2.4.1	Tecido de fibra de vidro	30
2.4.2	Gaxeta tubular em Fibra de Vidro.....	32
2.5	Alumina.....	33
2.5.1	Área Superficial Específica (BET).....	34
2.5.2	Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) 34	
2.5.3	Granulometria por Difração a Laser	35
2.6	Isolante termoelétrico.....	36
2.6.1	Designação da classe térmica do isolante termoelétrico	36
2.6.2	Propriedades dos isolantes termoelétricos	37
2.6.3	Principais isolantes termoelétricos rígidos oferecidos no mercado.....	44
2.6.4	Pesquisas acerca de novos compósitos análogos aos isolantes termoelétricos flexíveis	45
2.7	INTRODUÇÃO DO ISOLANTE TERMO ELÉTRICO FLEXÍVEL NO MERCADO NACIONAL	47
2.7.1	Como surgem novos produtos.....	47
2.7.2	Teste de mercado para novos produtos	48
2.7.3	Clientes potenciais no mercado-alvo	49
2.7.4	A influência pessoal tem um importante papel	49
2.7.5	As características da inovação afetam a taxa de adoção	49
2.7.6	Definição de valor e de satisfação para o cliente.....	50
2.7.7	Atração e retenção de clientes	50
2.7.8	O processo de desenvolvimento de novos produtos	51
3	OBJETIVOS E HIPÓTESES.....	52
3.1	OBJETIVO GERAL	52

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	52
3.3 Hipóteses da Pesquisa:	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1 Desenvolvimento do isolante termoeletrico	54
4.2 Ensaio e propriedades ensaiadas	55
4.2.1 Rigidez dielétrica	56
4.2.2 Condutividade térmica	57
4.2.3 Calor específico	58
4.2.4 Análise térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização.....	58
4.2.5 Densidade.....	59
4.2.6 Dureza	59
4.2.7 Flamabilidade Teste de Queima Vertical (V-0, V-1 ou V-2).	60
4.2.8 Resistência Mecânica.....	62
4.2.9 Área Superficial Específica (BET).....	64
4.2.10 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) 65	
4.2.11 Granulometria por Difração a Laser.....	66
4.2.12 Análise Espectroscópica por infravermelho com transformada de Fourier – Modo Reflectância Total Atenuada (ATR).....	67
4.3 Metodologia para análise preliminar de viabilidade técnica e de aplicação industrial	67
4.4 Estudo exploratório para inserção do produto no mercado nacional	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1 Desenvolvimento do isolante termoeletrico	69
5.2 Ensaio e propriedades ensaiadas	70
5.2.1 Área Superficial Específica (BET).....	70
5.2.2 Granulometria Difração a Laser.....	71
5.2.3 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) 72	
5.2.4 Rigidez dielétrica	73
5.2.5 Condutividade térmica	75
5.2.6 Calor específico	81
5.2.7 Análise Térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização	83
5.2.8 Densidade.....	88
5.2.9 Dureza	89
5.2.10 Flamabilidade – Teste de Queima Vertical	91
5.2.11 Resistência Mecânica.....	95
5.2.12 Espectroscopia por Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	100

5.3	Estudo exploratório para inserção do produto no mercado nacional	110
5.3.1	Mapeamento de segmentos industriais-alvo.....	110
5.3.2	Levantamento de potenciais clientes e concorrentes	110
5.3.3	Análise de custo-benefício comparativo	111
6	CONCLUSÕES.....	113
	REFERÊNCIAS.....	114

1 INTRODUÇÃO

Desenvolver um isolante flexível no mercado nacional refere-se a transformar uma boa ideia em um projeto, em seguida fabricá-lo e concentrar esforços nas vendas. A seleção de matérias-primas, dispêndio energético e resíduos gerados na produção devem estar inseridos ao desenvolvimento do novo produto, bem como a satisfação do cliente. Assim, o sucesso do novo produto no mercado depende de uma série de tomadas de decisões que estão relacionadas ao desenvolvimento, caracterização e introdução do novo produto no mercado (BARBOSA FILHO, 2009).

Quanto mais se avança na era da informação, mais o conhecimento está se tornando um componente crítico do sucesso competitivo das empresas. Assim como o mercado muda, as tecnologias proliferam, os competidores se multiplicam e os produtos tornam-se rapidamente obsoletos. As empresas de sucesso são caracterizadas por sua habilidade de criar novos conhecimentos, disseminá-los e incorporá-los em novos produtos (MUNDIM, 2002).

Segundo Boss; Caluzzi (2010), O desenvolvimento e caracterização de materiais isolantes termoelétricos passou por diversas mudanças ao longo da história. A primeira distinção entre condutor e isolante foi proposta por Stephen Gray em 1729, que observou que era capaz de transferir a carga elétrica de um bastão de vidro para uma bola de marfim pendurada por um barbante. Porém a transferência de carga não ocorria se a bola era pendurada por um fio metálico. Daí concluiu que o metal "levava embora" o fluido (carga). Gray concluiu que a maior parte das substâncias pode ser classificada como condutoras ou isolantes. Os condutores, como por exemplo os metais e soluções iônicas, facilitam o fluxo livre da carga elétrica, enquanto os isolantes, como por exemplo a madeira, borracha, seda e vidro, dificultam o fluxo da carga elétrica.

O primeiro polímero sintético foi produzido por Leo Baekeland em 1912, obtido pela reação entre fenol e formaldeído. Essa reação resultava em um produto sólido (resina fenólica) atualmente conhecido por baquelite, termo derivado do nome do seu inventor. Durante as décadas de 1920 e 1950, a baquelite foi extensamente usada na confecção de artigos domésticos, como telefone, componentes elétricos, hélice de aviões, painéis de carro etc, (RODRIGUES, JOSÉ DE ANCHIETA, 2014).

O mercado de isolantes termoelétricos exige o desenvolvimento de isolantes para soluções em indústria metalúrgica, siderúrgica, naval, automotiva e, principalmente, para a indústria de fundição, que trabalha em altas temperaturas.

Os principais equipamentos que utilizam isolantes termoelétricos são os fornos a arco, fornos a indução, fornos cadinho, bobinas de forno, estufas, fornos sequenciados, coletores automotivos, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos, empregando peças isolantes termoelétricas desenvolvidas sob encomenda para o cliente.

Entre as principais características dos isolantes termoelétricos estão a capacidade de resistência à alta temperatura, baixa inflamabilidade, baixa condutividade térmica, rigidez dielétrica e dureza elevadas, densidade, flexibilidade, resistência à absorção de água, resistência à absorção de óleo, característica inerte a contaminações externa. Por meio desta busca-se atender aos requisitos dos equipamentos requeridos pelo projeto. Todos os isolantes termoelétricos têm suas vantagens e desvantagens, de onde vem a necessidade de desenvolver o melhor custo-benefício para cada aplicação (MACHADO JUNIOR, 2023).

Entre os materiais isolantes termoelétricos, mencionam-se os materiais flexíveis como as fitas de micas, materiais a base de tecido de fibra de vidro com elastômero, chapas de micanite flexível e chapas de mica impregnadas com resina de silicato flexível.

Quanto aos isolantes termoelétricos rígidos, destacam-se as placas de mica moscovita e flogopita a base de resina de silicato, além de chapas a base de tecido fibra de vidro impregnado com resina epóxi. Tem-se ainda chapas de Celeron a base de tecido de algodão impregnado com resina fenólica e chapas a base de tecido de vidro impregnado com resina inorgânica. Todos estes isolantes podem ser confeccionados tanto como moldados contínuos, moldados laminados, chapas laminados, tubos e chapas prensadas.

Os isolantes termoelétricos podem ser fabricados através de processos de moldagem, prensagem, extrusão, entre outros. Dentre as muitas opções, o mercado mantém o contínuo desenvolvimento e adequação devido à alta demanda e competitividade.

Diante disto, no presente trabalho foi proposto o desenvolvimento de um novo isolante termoelétrico flexível, material compósito a base de resina silicone elastômero, estruturada com tecido de fibra de vidro, papel de mica e adição de

alumina, da classe térmica (segundo a ABNT NBR IEC 60085). Busca-se atender a condição de trabalho acima de 300 °C, antichama, sob a rigidez dielétrica 5 kV/mm.

A inserção comercial do isolante termoelétrico foi analisada por meio de um estudo exploratório, com o objetivo de identificar oportunidades e desafios de mercado, incluindo uma análise de custo-benefício comparativo entre o novo isolante e os materiais concorrentes já utilizados no mercado.

Entende-se a dificuldade de encontrar no mercado nacional o isolante termoelétrico flexível com todas as características técnicas necessárias para atendimento do mercado específico, como alta rigidez dielétrica, baixa condutividade térmica, maleabilidade e flexibilidade, flamabilidade UL-94, resistência mecânica, baixa densidade e resistente a alta temperatura.

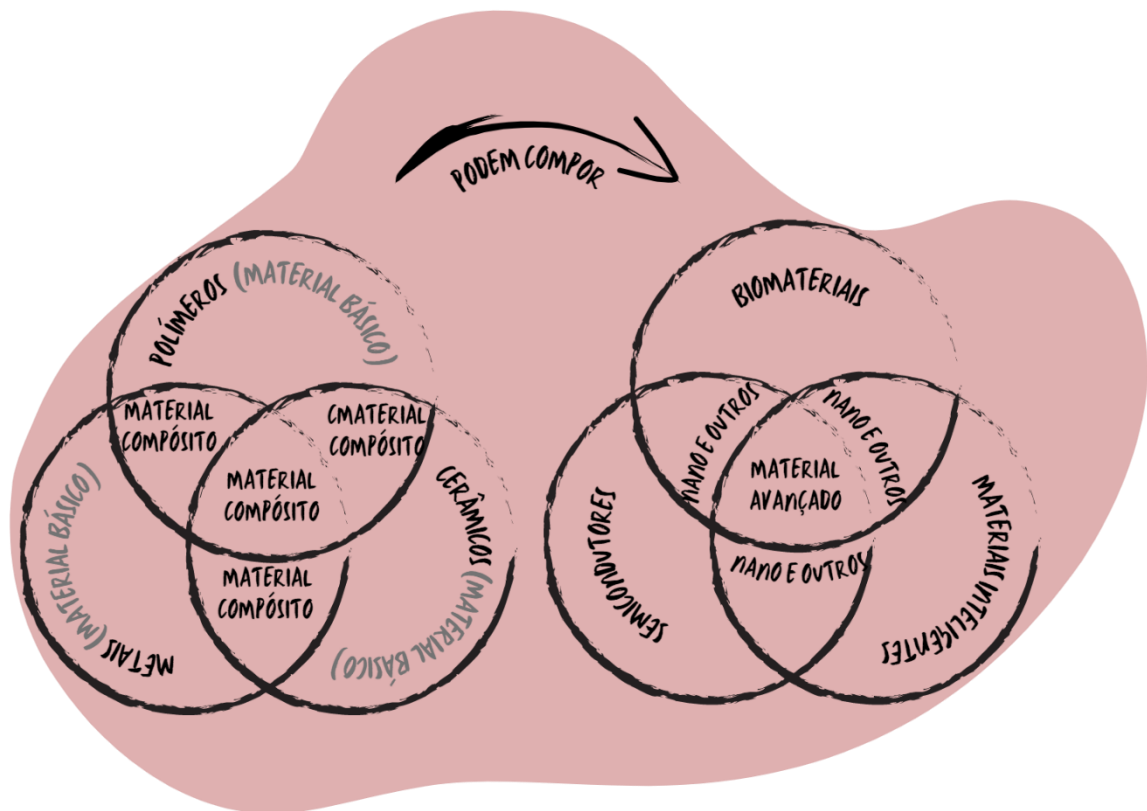
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Classificação de Materiais Sólidos

Uma revisão narrativa de literatura foi elaborada para embasar, cientificamente, o conhecimento de conceitos e características necessárias à avaliação das propriedades e estabilidade térmica de compósitos isolantes termoelétricos.

A classificação dos materiais sólidos (Figura 1) considera principalmente a estrutura atômica e a composição química, em que são definidos os seguintes grupos básicos: metais, cerâmicos, polímeros, biomateriais, semicondutores e compósitos (PAVANATI, 2015).

Figura 1 - Ilustração da classificação dos materiais sólidos



Fonte: Machado Junior, 2023.

A maioria dos materiais se enquadra em um ou outro grupo distinto. Adicionalmente, existem os compósitos, que são combinações de dois ou mais tipos de materiais diferentes, em uma explicação sucinta dessas classificações de materiais e suas características representativas. Outra categoria é a dos materiais avançados, assim denominados por operarem sistemas de alta tecnologia, sofisticados e

complexos (PAVANATI, 2015), tais como, os semicondutores, os biomateriais, os materiais inteligentes e os materiais de nano engenharia (CALLISTER JR., 2021).

Na Figura 2 são mostrados exemplos de materiais sólidos de emprego industrial.

Figura 2 - Exemplos de materiais sólidos segundo sua classificação



(a) Tubo Flexível em Aço Inox
Fonte: Elaboração própria (2025)



(b) Gaxeta Orbital Tecido de Fibra de Vidro
Fonte: Elaboração própria (2025)



(c) Borracha de Silicone RTV
Fonte: www.wacker.com (2025)



(d) Mangueira Flexível, Revestido com Isolante IT5004-4 Alta Temperatura > 300 °C
Fonte: Elaboração própria (2025)

2.1.1 Materiais metálicos

Os materiais metálicos (Figura 2a) são normalmente combinações de elementos metálicos que apresentam muitos elétrons livres, ou seja, que não estão presos a um único átomo. Esses elétrons conferem aos metais boa parte de suas propriedades (PAVANATI, 2015).

Os metais são compostos por um ou mais elementos metálicos (por exemplo, ferro, alumínio, cobre, titânio, ouro, níquel), e com frequência também elementos não metálicos (por exemplo, carbono, nitrogênio, oxigênio) em quantidades pequenas. Os átomos nos metais e nas suas ligas estão arranjados segundo uma maneira ordenada e, em comparação às cerâmicas e polímeros, são relativamente densos. Em relação às características mecânicas, esses materiais são relativamente rígidos e resistentes e ainda assim são dúcteis e resistentes a fratura, o que é responsável pelo seu amplo uso em aplicações estruturais.

Os metais são bons condutores de eletricidade e calor e não são transparentes a luz visível, sendo que uma superfície metálica polida possui uma aparência brilhosa. Além disso, alguns metais tem propriedades magnéticas desejáveis como o ferro, cobalto e níquel (CALLISTER JR, 2021).

2.1.2 Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos (Figura 2b) são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos; com maior frequência, são óxidos, nitretos e carbonetos. Os materiais cerâmicos comuns incluem o óxido de alumínio (ou alumina, Al_2O_3), o dióxido de silício (ou sílica, SiO_2), o carbeto de silício (SiC), o nitreto de silício (Si_3N_4) e, ainda, o que alguns chamam de as cerâmicas tradicionais – aqueles materiais compostos por minerais argilosos por exemplo a porcelana, assim como o cimento e o vidro (CALLISTER JR, 2021).

As características dos materiais cerâmicos englobam a baixa condutividade elétrica e térmica, sendo utilizados, em alguns casos, como isolantes. São materiais duros, porém frágeis e quebradiços. Sua resistência química e em altas temperaturas permite aplicações em ambientes agressivos em que os metais e polímeros nem sempre podem ser empregados (PAVANATI, 2015).

2.1.3 Materiais poliméricos

Os materiais poliméricos (Figura 2c) são constituídos por macromoléculas baseadas nos átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio, flúor e outros elementos não metálicos. Os polímeros são uma classe de materiais sintéticos que vem impactando

e transformando a vida cotidiana há décadas. Geralmente, são leves, isolantes elétricos e térmicos, flexíveis e apresenta boa resistência a corrosão, porém baixa resistência ao calor e baixa resistência mecânica.(PAVANATI, 2015)

Os polímeros incluem os conhecidos materiais plásticos e borracha. Muitos deles são compostos orgânicos que tem sua composição baseada em carbono, hidrogênio e outros elementos não metálicos como o Silício. Alguns dos polímeros comuns e conhecidos no mercado de isolamento termoelétrico são nylon e borracha de silicone. Uma das maiores desvantagem dos polímeros é sua tendência a amolecer e/ou decompor em temperaturas modestas, o que, em algumas situações, limita seu uso (MARINUCCI 2011).

2.1.4 Materiais compósitos

Os materiais compósitos (Figura 2d), também conhecidos como materiais conjugados ou compostos, são desenvolvidos com a finalidade de unir características desejáveis de duas ou mais classes de materiais. Fibra de vidro em uma matriz polimérica é um exemplo típico de material compósito que une a resistência mecânica da fibra de vidro à flexibilidade do polímero. Uma estrutura de concreto armado também é um exemplo de compósito, uma vez que temos a matriz de cimento Portland, o reforço de areia e pedregulho, além de barras de aço (Marinucci, 2011).

O compósito fibra de vidro embutido em uma matriz de polímero é muito comum. A alta resistência das fibras de vidro de pequeno diâmetro é combinada com a ductilidade da matriz de polímeros para produzir um material resistente, capaz de suportar a carga normal exigida de um material estrutural (SHACKELFORD, 2008).

O tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica é o vidro, devido principalmente ao baixo custo, alta resistência a tração, e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra são associadas ao relativo baixo módulo de elasticidade, abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos. As fibras de vidro podem ser produzidas tanto na forma de filamentos contínuos quanto na forma de fibras picadas (LEVY NETO; CLÁUDIO PARDINI, 2006).

2.2 Materiais laminados termorrígidos

Segundo a norma ASTM D-709-01, 2001, que regulamenta a especificação padrão para materiais laminados termorrígidos, estes consistem em duas ou mais camadas de reforço ligadas por uma resina sintética termofixa. Exemplo de tal reforço são papel *kraft*, tecido de algodão, tecido de vidro e tecido de fibra sintética. Esses MLT estão disponíveis sob a forma de chapas laminadas, tubos laminados e moldados.

Um compósito laminado é composto por lâminas ou painéis bidimensionais que estão colados uns aos outros. Cada camada possui uma direção preferencial de alta resistência a compactação, tal como encontrado nos polímeros reforçados com fibras contínuas e alinhadas. Uma estrutura em múltiplas camadas desse tipo é denominada um laminado.

As propriedades do laminado dependem de vários fatores, que incluem como a direção de alta resistência a compactação varia de camada para camada. Nesse sentido, existem quatro classes de compósitos laminados: unidirecional, cruzados, com camadas em ângulos e multidirecional. Nos laminados unidirecionais, a orientação da direção de alta resistência para todas as lâminas é a mesma; os laminados cruzados simétricos possuem orientações da camada de alta resistência alternadas em ângulos de 0° e 90° ; enquanto nos laminados com camadas em ângulo, as camadas sucessivas alternam entre orientações de alta resistência de $+\theta$ e $-\theta$ (por exemplo, $\pm 45^\circ$). Os laminados multidirecionais possuem orientações de alta resistência. Em todos os laminados, as camadas são tipicamente empilhadas tal que as orientações das fibras são simétricas em relação ao plano central do laminado; esse arranjo previne qualquer torção ou dobra fora do plano.

Um dos MLTs mais comuns é uma fita pré-preg unidirecional em uma resina de matriz não curada. Uma estrutura em múltiplas camadas com a configuração desejada é produzida durante o assentamento, à medida que várias fitas são colocadas umas sobre as outras segundo uma variedade de orientações de alta resistência predeterminadas. A resistência global e o grau de isotropia dependem do material de fibra, do número de camadas, assim como da sequência de numeração.

A maioria das fibras em MLT consiste em carbono, vidro e aramida. Após o assentamento, a resina deve ser curada e as camadas coladas umas nas outras; isso é conseguido mediante o aquecimento da peça enquanto se aplica pressão.

As técnicas usadas para o processamento pós-assentamento incluem a moldagem em autoclave, a moldagem por pressão e a moldagem em saco a vácuo. Também podem ser construídos laminados utilizando tecidos, tais como fibras de algodão, papel ou vidro trançadas, encerradas em uma matriz plástica. O grau de isotropia no plano é relativamente alto nesse grupo de materiais.

Os compósitos laminados também são usados extensivamente em equipamentos esportivos e recreativos. Por exemplo, o esqui moderno consiste em uma estrutura laminada relativamente complexa (CALLISTER JR., 2021).

As aplicações que utilizam compósitos laminados são principalmente nos setores de aeronaves, automotivos, marinho e de construção e infraestrutura civil. Aplicações específicas incluem: aeronaves – fuselagem, estabilizadores vertical e horizontal, porta do compartimento do trem de aterrissagem, pisos, carenagens e lâmina de rotores de helicópteros (REZENDE; BOTELHO, 2000).

Como exemplo de aplicações automotivas, pode-se citar os painéis de automóveis, carrocerias de carros esportivos e eixos de direção; marinho – cascos de navios, tampas de escotilhas, conveses, quilhas e propulsores (FURTINI et al., 2022); construção e infraestrutura civil – componentes de pontes, estruturas de telhados para grandes vãos, vigas, painéis estruturais, painéis de telhados e tanques.

Isolantes termofixos tornam-se duros e rígidos com o aquecimento. Isso porque as moléculas, normalmente menores que as dos termoplásticos, não apresentam forte interação intermolecular. Isso ocorre normalmente com o aumento da temperatura, onde se formam ligações fortes entre as moléculas, provocando o que é chamado de cura (reticulação). Dessa forma, o processo de cura é irreversível, ou seja, os materiais termofixos não são recicláveis por processos tradicionais, mas podem ser moídos e utilizados como cargas em outros materiais. Trata-se de uma característica semelhante à observada com o ovo cozido, ele ainda pode ser descascado quente, pois já adquiriu firmeza. Se reaquecermos o ovo, ele não amolecerá novamente, pelo contrário, queimará (degradação) (PAVANATI, 2015).

2.3 Elastômero

Dentre todos os tipos de materiais poliméricos, as borrachas, ou elastômeros, se distinguem por sua característica única de permitir grande alongamento, seguido instantaneamente de quase completa retração, especialmente quando se encontram na condição vulcanizada. Esse fenômeno foi inicialmente observado na borracha natural, e passou a ser conhecida pela elasticidade (MENDES, 1999).

Segundo Shackelford (2008), os elastômeros são polímeros com comportamento mecânico semelhante à borracha natural.

Na Tabela 1 são mostrados alguns elastômeros de maior utilização da indústria de borracha e suas classificações de acordo com suas características predominantes (GARBIM, 2011).

Tabela 1 - Família de Elastômeros

NOME	DESIGNAÇÃO ASTM	APLICAÇÃO
BORRACHA NATURAL POLIISOPRENO POLIBUTADIENO COPOLÍMERO (BUTADIENO-ESTIRENO)	NR IR BR SBR	USO GERAL
COPOLÍMERO (ETILENO-PROPILENO-DIENO)	EPDM	RESISTENTE A OZÔNIO
COPOLÍMERO (ISOBUTILENO-ISOPRENO)	IIR	IMPERMEÁVEL A GASES
POLISSULFETOS (THIOL) COPOLÍMERO (BUTADIENO-ACRILONITRILICA) POLICLOROPRENO (NEOPRENE) POLIURETANOS EPICLORIDRINAS	T NBR CR AU – EU CO	RESISTENTE A SOLVENTES
POLI (DIMETIL-SILOXANOS) (SILICONES) POLIETILENO CLORO-SULFONADO POLIACRILATOS FLUORELASTÔMEROS	PDMS (MQ) CSPE (CSM) ACM CFM	RESISTENTE AO CALOR

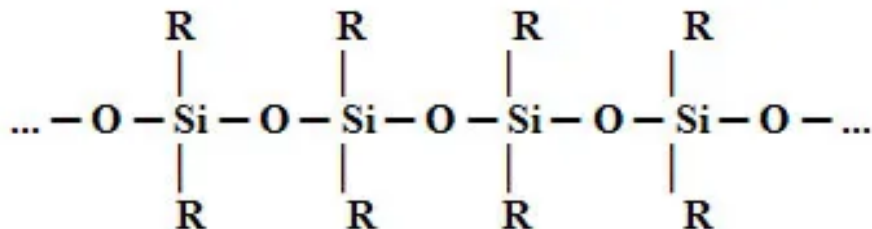
Fonte: Garbim, (2011).

2.3.1 Silicone

A borracha de silicone (SR) foi descoberta pelo Dr. J.F. Hyde, da Dow Corning Corp, o qual adicionando pequenas quantidades de sólidos alcalinos aos ciclos se obtinha uma borracha de silicone de qualidade superior à borracha natural. Outro passo de grande importância foi dado em 1943 quando Wright e Oliver mostraram que era possível fazer uma borracha de qualidade superior usando a reticulação com peróxido de benzoíla que vulcanizava à temperatura ambiente.

O silicone é um polímero inorgânico-orgânico com a fórmula química $[R_2SiO]_n$ onde R é um radical orgânico, como por exemplo, o metil, etil, fenil ou fluoralquil. Como demonstrado na Figura 3, a borracha de silicone (SR) tem uma cadeia polimérica que contém átomos de silício e de oxigênio, sendo as valências livres do átomo de silício neutralizados pelos radicais (R). Estes materiais consistem em uma cadeia principal inorgânica silício-oxigênio-silício (-Si-O-Si-) com radicais orgânicos ligados ao átomo de silício (PIRES 2010).

Figura 3 - Estrutura genérica da borracha de silicone (SR)



Fonte: Pires (2010).

As propriedades da borracha de silicone são devidas a uma estrutura do polímero não usual, que consiste de uma “espinha dorsal” de átomos de silício, aproximadamente 7000, alternando com átomos de oxigênio. A ligação em cadeia silício-oxigênio-silício nos silicones é similar à ligação em cadeia existente no quartzo e no vidro. Embora os silicones não sejam tão resistentes ao calor como o quartzo, apresentam, no entanto, uma resistência ao calor muito superior à de outros elastômeros (GARBIM, 2011).

As borrachas de silicone podem ser usadas a temperaturas entre -50 e 200 °C e alguns graus especiais entre -90 e 300 °C. As vidas estimadas das borrachas de silicone são mostradas na Tabela 2.

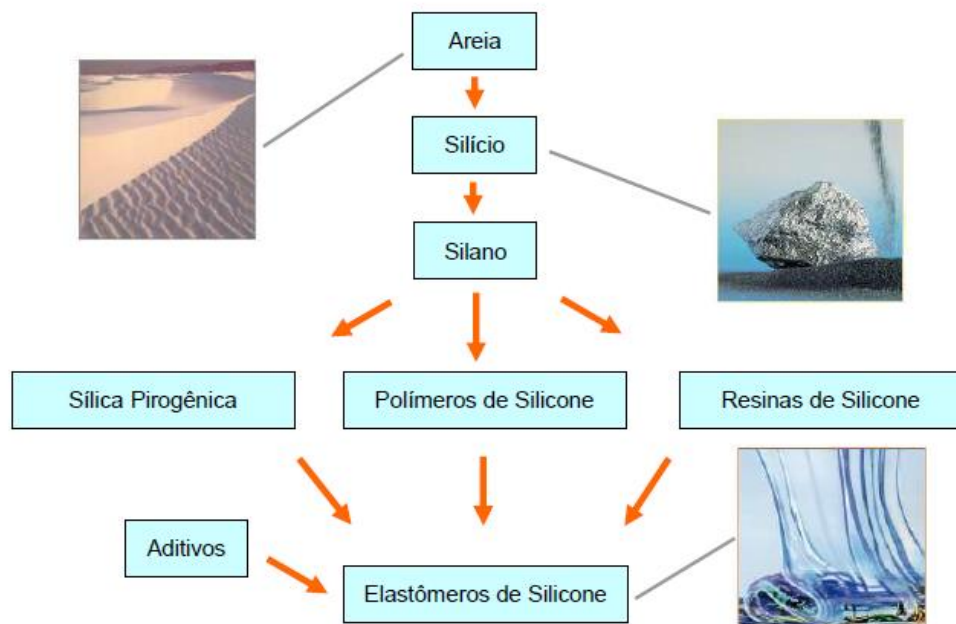
Tabela 2 - Tempo estimado de vida, em serviço, da borracha de silicone a diferentes temperaturas

Temperatura de serviço (°C)	Tempo estimado de vida em serviço
90	40 anos
121	10-12 anos
150	5-10 anos
200	2-5 anos
250	3 meses
315	2 semanas

Fonte: www.rubberpedia.com (2024)

O elastômero de silicone, devido sua pureza e suas características químicas, oferece biocompatibilidade, o que permite seu emprego em muitos artefatos médicos e farmacêuticos, em objetos que terão contato com alimentos, entre outros. Comparado com outros tipos de elastômeros, o silicone apresenta grande facilidade de processamento, o que resulta em alta produtividade e custo moderado no artefato final, conforme demonstrado na figura 4 (GARBIM, 2011).

Figura 4 - Produção de Silicones, da Areia ao Elastômero de Silicone



Fonte: Elaboração Própria (2024)

2.4 Fibra de Vidro

A Fibra de Vidro é um material composto de óxido de silício (SiO_2) modificado com óxidos de metais alcalinos que, depois de fundidos, são transformados em filamentos, ilustrados na Figura 5. Ele é um material composto da aglomeração de finíssimos filamentos de vidro altamente flexíveis, e pode ser disposto em forma de bobinas/rocas, cordas, fitas, tecidos e camisetas (MARINUCCI, 2011).

Por ser um material versátil e de grande disponibilidade, pode ser utilizado em diversos processos. Além de ser leve, resistente ao calor e não oxidar, pode ser até três vezes mais resistente que o aço.

Atualmente, a fibra de vidro é responsável pelas principais aplicações em setores estratégicos como: energia, óleo e gás, agro, saneamento básico, entre outros.

Figura 5 - Fibra de Vidro



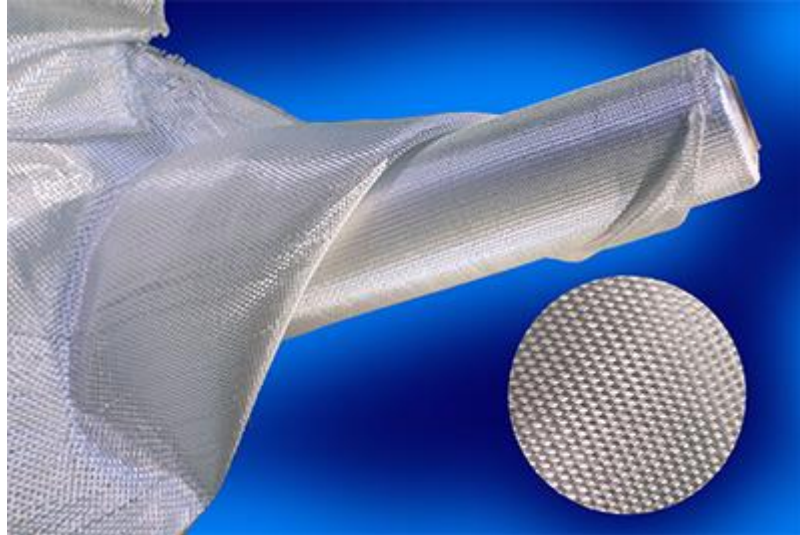
Fonte: www.texiglass.com.br (2024)

2.4.1 Tecido de fibra de vidro

Os tecidos de fibra de vidro (Figura 6) são geralmente utilizados em compósitos nos casos onde se necessita de uma relação de peso x resistência x dimensionamento mais apurada, portanto, em processos mais precisos que métodos convencionais e

artesanalais como de pistola de projeção (*Spray Up*) ou laminação com manta de fibra de vidro (fibras picadas).

Figura 6 - Tecido de Fibra de Vidro



Fonte: www.texiglass.com.br (2024)

Os tecidos podem ser até 4 vezes mais resistente que as mantas em questão de resistência à tração e ao impacto. No entanto, o que se destaca na manta ou fibras picadas é a resistência multidirecional da peça (isotropia).

As medidas nominais no mercado nacional dos tecidos de fibra de vidro encontram-se entre 26 a 1.350 g/m², bidirecionais e unidirecionais e em diversos tipos de tecelagens (tela, sarja 3×1, sarja *twill* 2×2, cetim 8HS, raso turco 4HS, giro inglês, etc.), podendo ter até 3,20 m de largura.

Entre as principais aplicações, estão reforços para pranchas de surfe, placas de circuito impresso, carrocerias de automóveis e carenagens de motocicletas, placas de circuito impresso, aeronaves, tubos, tanques, pás de geradores eólicos, cascos de barcos, varões de manobra, estações de tratamento, pisos elevados, tratamento de juntas, etc.

Além de aplicações em compósitos, a fibra de vidro é largamente usada na indústria de isolamentos térmicos por conta de suas propriedades excelentes de resistência a altas temperaturas, tais como:

- temperatura de trabalho máxima em contato direto: 400 °C;
- ponto de amolecimento: 700 °C;
- ponto de fusão: 1.100 °C;
- tecido de fibra de vidro é incombustível.

2.4.2 Gaxeta tubular em Fibra de Vidro

Gaxeta tubular, camisetas, tranças, espaguetes ou *braids* de fibra de vidro são fabricadas em formato tubular para aplicações específicas de compósitos e isolamentos térmicos / elétricos (Figura 7).

Com ótimas propriedades mecânicas, estabilidade a torção e resistência a compressão, as gaxetas tubulares têm a orientação à 45° e expandem até 65% do seu diâmetro original, adaptando-se facilmente às ferramentas e moldes, tubos, mangueiras, traços elétricos, remos esportivos, raquetes, compósitos em geral, etc.

Figura 7 - Gaxeta Tubular em Fibra de Vidro



Fonte: www.refratil.com.br (2024)

As gaxetas tubulares em fibra de vidro têm ótima aceitação para compósitos elastoméricos, atendendo com estrutura mecânica, resistência a alta temperatura e rigidez dielétrica, assim mantendo a flexibilidade.

2.5 Alumina

O óxido de alumínio (Al_2O_3) é um composto químico de alumínio e oxigênio, também é conhecido como alumina, usado frequentemente pelas comunidades de cerâmica e da ciência dos materiais. O óxido de alumínio é o principal componente da bauxita, o mais comum minério de alumínio. A alumina, conforme demonstra a figura 8, é utilizada como refratário de fornos de fusão de metais e em outras aplicações sujeitas a altas temperaturas, e onde uma alta resistência mecânica também seja necessária. Uma aplicação clássica da alumina é em isolantes nas velas de ignição. Algumas aplicações especiais dessa cerâmica também são encontradas em medicina e odontologia (ASKELAND 2011).

Figura 8 – Alumina



Fonte: revista alumínio (2025)

Segundo Marunucci 2011, a alumina é um material cerâmico versátil com propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas que a tornam adequada para uma ampla gama de aplicações em diversas indústrias. Algumas das principais características mecânicas são, massa específica de 4 g/cm^{-3} , resistência à tração de 2000 MPa, resistência a flexão de 275-700 MPa, dureza Vickers de 20 GPa e módulo de elasticidade de 470 GPa.

2.5.1 Área Superficial Específica (BET)

A área superficial, é, juntamente com o tamanho da partícula, frequentemente considerada como uma característica importante para a apreciação de uma carga.

Assumindo a forma esférica da partícula, podemos calcular, a partir do diâmetro médio da partícula, a área teórica da superfície, o que não tem em consideração a estrutura das partículas ou qualquer possível porosidade. Para a determinação da área superficial usa-se o método de absorção de nitrogênio desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller, obtendo-se o chamado valor **BET**, que define a área superficial de uma carga em $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ de N_2 absorvido.

Cargas com valores de BET de 0 até $12 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ são geralmente cargas inativas, de 10 a $60 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ são cargas parcialmente ativas e de aproximadamente 60 a $250 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ são cargas ativas (CANEVAROLO, 2007).

2.5.2 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)

A ICP-OES é uma técnica de detecção multielementar que utiliza uma fonte de plasma extremamente quente para excitar os átomos ao ponto de emitirem fótons de luz de comprimento de onda característicos e específicos de um determinado elemento.

O número de fótons produzidos está diretamente relacionado à concentração desse elemento na amostra. Esta tecnologia permite análises simultâneas de vários elementos em poucos segundos com ótimos limites de quantificação. Permite ainda a análise de elementos semimetálicos como o boro e não metálicos como o fósforo e enxofre, aumentando a flexibilidade das análises, a técnica é aplicada em amostras sólidas previamente digeridas em meio ácido e amostras em solução (RICCI, 2021).

O princípio desta técnica envolve a medida da radiação emitida quando átomos e íons excitados por radiação de um plasma retornam ao estado fundamental. A principal característica do ICP destaca-se por ser multielementar. Este potencial deriva do fato de que as radiações usadas para obter informação qualitativa e quantitativa são emitidas do plasma ao mesmo tempo. A técnica ICP OES tem sido

usada para determinações de mg/l ou µg/l, majoritariamente em amostras líquidas com sistema de introdução de amostra com nebulização (NUNES, 2024).

2.5.3 Granulometria por Difração a Laser

A granulometria por difração a laser é uma técnica altamente precisa e amplamente utilizada para determinar a distribuição de tamanho de partículas em uma ampla variedade de materiais. Seja em pó, suspensões ou emulsões, essa técnica oferece resultados rápidos e confiáveis.

A difração a laser (também conhecida como dispersão estática de luz) é uma das técnicas de distribuição de tamanho de partículas mais amplamente utilizadas. Amostras, que podem ser analisadas como uma suspensão líquida ou uma dispersão seca são perpassadas por um feixe de laser, espalhando a luz. Detectores colocados em ângulos fixos medem a intensidade da luz espalhada em cada posição, e um modelo matemático (Teoria de Mie ou Fraunhofer) é então aplicado para gerar uma distribuição de tamanho de partícula. O resultado final é relatado em uma base de volume de diâmetro esférico equivalente.

O tamanho de partícula por difração a laser é reconhecido por várias agências de padrões e orientações, incluindo ISO e ASTM. A capacidade dessa técnica de realizar análises de dispersão seca ou líquida a torna uma boa escolha para aplicações gerais de dimensionamento de partículas, e sua ampla faixa dinâmica (submicrômetro a milímetros) provou ser útil para indústrias como meio ambiente, farmacêutica, alimentícia, saúde e beleza.

Uma grande variedade de tipos de amostras pode ser analisada por difração a laser, incluindo produtos farmacêuticos ativos (APIs), excipientes, cinzas volantes, águas residuais turvas e amostras de emissões ambientais. Aplicações comuns incluem testes de lote QA/QC, medições de triagem de pesquisa geral e estudos comparativos (JUNCA, 2009).

2.6 Isolante termoelétrico

2.6.1 Designação da classe térmica do isolante termoelétrico

A Norma ABNT NBR IEC 60085 isolamento elétrica – Avaliação e designação térmicas, em seu escopo, faz a distinção entre classes térmicas para sistemas de isolamento elétrica e materiais isolantes elétricos. Ela estabelece os critérios para a avaliação da durabilidade térmica dos materiais isolantes elétricos (MIE) e dos sistemas de isolamento elétrica (SIE). Ela também estabelece procedimentos para a designação das classes térmicas (ABNT, 2017).

A isolamento termoelétrica é classificada por meio de designação da classe térmica, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Designação da classe térmica

Durabilidade térmica (°C)		Classe térmica (°C)	Letra de designação
≥ 90	≤105	90	Y
≥ 105	≤120	105	A
≥ 120	≤130	120	E
≥ 130	≤155	130	B
≥ 155	≤180	155	F
≥ 180	≤200	180	H
≥ 200	≤220	200	N
≥ 220	≤250	220	R
≥ 250	≤275	250	-

a- Caso desejado, a letra de designação pode ser adicionada entre parênteses, por exemplo Classe 180 (H). Quando o espaço disponível é limitado, como em uma placa de identificação, a comissão de estudos do produto pode optar por utilizar somente a letra de designação.

b- As designações das classes térmicas superiores a 250 devem acrescentar incrementos de 25, e serem designados apropriadamente.

Fonte: ABNT NBR IEC 60085 - Isolamento elétrica – Avaliação e Designação Térmicas, 2017.

A maioria dos materiais poliméricos é má condutora elétrica em razão da indisponibilidade de elétrons livres para participar no processo de condução; os elétrons nos polímeros são fortemente compartilhados entre os átomos em ligações covalentes (CALLISTER JR., 2021).

2.6.2 Propriedades dos isolantes termoelétricos

2.6.2.1 Rigidez dielétrica

Um material dielétrico é um isolante que, idealmente, não permite passagem de corrente elétrica. Na prática existe a passagem de corrente, mas com um valor muito baixo. Os materiais dielétricos funcionam como bons isolantes em uma grande faixa de tensão (VOLTS) aplicada sobre eles. Porém, sob elevados níveis de tensão, esses materiais podem deixar de funcionar como isolantes e conduzem correntes significativas (ABNT, 2010, p. 104).

A rigidez dielétrica indica em que grau um material é isolante; é medida pela tensão elétrica que o material pode suportar antes da ocorrência de perda das propriedades isolantes. A falha do material é revelada pela excessiva passagem de corrente elétrica, com a destruição parcial da peça. É acompanhada de efeitos luminosos, ruídos, interferência em transmissão de rádio e televisão. Ocorrem reações químicas, que acarretam o aparecimento de gases, com a degradação do material sólido, destruindo o isolamento elétrico. Esta propriedade é validada segundo o método ASTM D 149, e é normalmente expressa em V/mm. Não se aplica a metais, que são bons condutores de eletricidade. Nos polímeros, cerâmicas e vidro, os valores de rigidez dielétrica estão na faixa de 10-40 kV/mm (MANO, 1991).

A rigidez dielétrica de materiais poliméricos sob frequência industrial (48 a 62 Hz) pode ser determinada por métodos padronizados, conforme descrito nas normas: NBR 5405, da Associação Brasileira de Normas técnicas; IEC 243-1 da International Electrotechnical Commission e ASTM D149, da American Society for Testing and Materials. Estes métodos são bastante úteis quando se trata de ensaios de rotina ou ainda de controle de qualidade. No entanto, resultados de rigidez dielétrica, obtidos por métodos recomendados por estas normas devem ser evitados para o desenvolvimento de projetos, pois são muito limitados (CANEVAROLO, 2007).

2.6.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica quantifica a habilidade dos materiais de conduzir energia térmica. Estruturas feitas com materiais de alta condutividade térmica

conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente do que estruturas análogas feitas com materiais de baixa condutividade térmica. Desta maneira, materiais com alta condutividade térmica são utilizados em dissipadores térmicos e materiais de baixa condutividade térmica são utilizados na confecção de objetos que visam a prover isolamentos térmicos (PADILHA, 1997).

A condutividade térmica mede a quantidade de calor transferida, na unidade de tempo, por unidade da área, através de uma camada de espessura unitária, sendo 1 °C a diferença de temperatura entre as faces. Expressa a característica de o material ser bom ou mau condutor de calor. Os polímeros são tipicamente maus condutores, ao contrário dos metais; é bem conhecido que, pelo tato, através da sensação de calor ou frio, pode-se distinguir um plástico de um metal.

A condução de calor nos materiais de engenharia envolve dois mecanismos principais: vibrações atômicas e a condução por elétrons livres. Para os condutores elétricos ruins, como cerâmica e polímeros, a energia térmica é transportada, principalmente, pela vibração atômica (fônons). Para metais eletricamente condutores, a energia cinética dos elétrons condutores (ou livres) pode fornecer uma condução térmica muito mais eficiente do que as vibrações atômicas (SHACKELFORD, 2008).

2.6.2.3 Calor específico

Calor específico é a quantidade de energia térmica requerida para elevar em 1 unidade de temperatura a unidade de massa do material. Os metais apresentam valores muito baixos (abaixo de $0,4 \text{ J g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), enquanto os plásticos exibem valores entre 0,8 e 2,0 em parte devido à mobilidade dos segmentos moleculares. Para comparação, observe-se que o calor específico da água é cerca de $4 \text{ J g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, muito superior ao apresentado pelos materiais de engenharia (MANO, 1991).

É uma propriedade importante de um material, quando usado em aplicações em altas temperaturas. O calor específico, quando se trata de uma amostra pequena, pode ser medido com relativa facilidade. Entretanto, para um determinado corpo de prova, onde deve ser medido o calor específico do corpo com um todo, incluindo as diversas fases, não é possível preparar uma amostra pequena e representativa, e a

medida dessa propriedade torna-se bastante problemática (CANEVAROLO JR, 2007).

2.6.2.4 Análise térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização

A análise térmica diferencial (DTA) é uma técnica térmica de medição contínua das temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte, à medida que ambos são aquecidos ou resfriados em um forno. Estas medições de temperatura são diferenciais, pois registra-se a diferença entre a temperatura da referência T_r , e a da amostra T_a , ou seja ($T_r - T_a = \Delta T$), em função da temperatura ou do tempo, dado que o aquecimento ou resfriamento são sempre feitos em ritmo linear. Todas as aplicações da DTA se baseiam na interpretação adequada dos picos endotérmicos e exotérmicos que aparecem nas curvas DTA. O número, a forma e a posição destes picos permitem interpretações qualitativas e as áreas abaixo dos picos após a medição adequada, permitem determinação quantitativa. Os dados experimentais, após o tratamento matemático, permitem também, chegar-se a importantes conclusões sobre a cinética das transformações (MASSAO IONASHIRO, 2004).

As termobalanças são instrumentos que permitem a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura, ou seja, a medida em que ela é aquecida ou resfriada. As curvas de variação de massa (em geral perda, mais raramente ganho de massa) em função da temperatura, permitem tirar conclusões sobre a estabilidade térmica da amostra, sobre a composição e estabilidade dos compostos intermediários e sobre a composição de resíduo. As aplicações da termogravimetria podem ser assim descritas: 1- Estudo da decomposição térmica de substâncias orgânicas, inorgânicas e dos mais variados tipos de materiais como: minerais, minérios, carvão, petróleo, madeira, polímeros, alimentos, materiais explosivos etc. 2- Estudos sobre corrosão de metais em atmosferas controladas, em faixas muito amplas de temperatura. 3- Estudos sobre a velocidade de destilação e evaporação de líquidos, e de sublimação de sólidos (CANEVAROLO JR, 2003).

A termogravimetria (TG) ou análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação química em função do tempo ou temperatura, ou seja, pode ser definida como um processo contínuo que mede a variação de massa do material isolante como uma função da

temperatura e/ou tempo. A termogravimetria derivada (DTG) foi desenvolvida para uma melhor avaliação e visualização de TG, capazes de registrarem, automaticamente, a derivada das curvas de TG, curvas que auxiliam a visualizar e esclarecer os passos das curvas TG (MOTHÉ 2009).

2.6.2.5 Densidade

A densidade de um material reflete a sua estrutura química e a sua organização molecular. Assim, as regiões cristalinas são mais compactas, enquanto as regiões amorfas são mais volumosas. Os materiais poliméricos são todos comparativamente leves. A maior parte dos polímeros apresenta densidades na faixa 0,9 - 1,5 g. cm⁻³, com a maior concentração de valores em torno de 1 g. cm⁻³. A presença de halogênios conduz a maiores densidades, especialmente no politetrafluoretileno. Observa-se, que em geral, os materiais não poliméricos têm a densidade muito maior, especialmente os metais (por exemplo, ferro tem densidade 7,9 g. cm⁻³). A expressão densidade, ou densidade absoluta, pode ter diversos significados, assim, a massa por unidade de volume, a uma certa temperatura, é também chamada massa específica e é medida usualmente nas unidades g. cm⁻³, kg. m⁻³, g. ml⁻¹. Por outro lado, pode significar o quociente de duas massas específicas, sendo uma delas tomada como padrão, e neste caso é chamada densidade relativa, que é uma grandeza adimensional. Estes valores são praticamente iguais, e assim geralmente se emprega apenas o termo densidade.

A densidade absoluta é definida como a quantidade de massa em uma unidade de volume:

$$\mathbf{densidade} = \frac{\mathbf{massa}}{\mathbf{volume}} \quad \mathbf{(Equação 1)}$$

No cálculo da densidade relativa de sólidos e líquidos, o padrão usualmente escolhido é a densidade absoluta da água, que é igual a 1,000 g.cm⁻³ a 4,0 °C. A densidade de um sólido é função da temperatura e, principalmente, da natureza da sua estrutura cristalina, haja vista, que os diferentes polimorfos de um composto exibem diferentes densidades (MAZALI, [s.d.], MANO 1991).

2.6.2.6 Dureza

A dureza é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou risco). Os primeiros ensaios de dureza foram baseados em minerais naturais, com uma escala construída unicamente em função da habilidade de um material riscar outro material mais macio. Foi concebido um sistema qualitativo e um tanto quanto arbitrário de indexação da dureza, denominada escala Mohs, que varia de 1, para o talco, na extremidade de menor dureza da escala, até 10, para o diamante. Ao longo dos anos tem sido desenvolvidas técnicas quantitativas de dureza, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície de um material a ser ensaiado, sob condições controladas de carga e de taxa de aplicação.

A profundidade ou tamanho da impressão (indentação) resultante é medida e então relacionada a um número de dureza; quanto mais macio é o material, maior e mais profunda é a impressão, e menor é o número-índice de dureza. As durezas medidas são apenas relativas (em vez de absolutas), e deve-se tomar cuidado ao comparar valores determinados por técnicas diferentes. A dureza Shore A é uma medida da dureza superficial de materiais macios como borrachas, silicones e elastômeros, ela é obtida através de um durômetro Shore A, que aplica uma carga padronizada em um indentador cônico, medindo a profundidade de penetração no material. A escala Shore A varia de 0 a 100, onde valores mais altos indicam materiais com maior dureza (CALLISTER JR., 2021; ASKELAND, 2011).

2.6.2.7 Resistência Mecânica

Em projetos limitados por plasticidade, a propriedade de interesse é a resistência mecânica. A aplicação de um coeficiente de segurança evita que a tensão de escoamento seja superada, evitando a consequente deformação irreversível e a inutilização do componente. A principal razão para o uso de materiais com cada vez mais resistência mecânica identifica-se com a conhecida relação $\sigma=F/A$, em que F representa a carga aplicada e A, a área da seção transversal que efetivamente a suporta. O aumento de resistência mecânica permite reduzir o volume do componente, que multiplicado pela densidade equivale à redução de peso e de custos diretos e indiretos.

A unidade fundamental é a macromolécula, composta de vários monômeros. Estes se unem com ligações primárias, fortes, do tipo valência compartilhada. O peso molecular influi nas propriedades de ruptura (tensão, módulo e energia de ruptura). Assim, aumentando o peso molecular da cadeia, aumenta-se a tenacidade. As forças intermoleculares (entre cadeias) geralmente são do tipo Van der Waals, isto é, fracas. No entanto, para polímeros com ligações cruzadas, ou polímeros termofixos com estrutura tridimensional, as cadeias se interligam por meio de ligações primárias (FERRANTE, 2013).

A resistência à tração, ou resistência à ruptura, a ductilidade e tenacidade de um material, são avaliadas pela carga aplicada ao material por unidade de área, no momento da ruptura. Polímeros têm valores de resistência à tração todos muito baixos (abaixo de 10 kgf/mm²), bem maiores quando se trata de fibras; os metais apresentam resistência muito elevada, até 100 kgf/mm². Esses resultados são comumente expressos, tanto na literatura como na indústria, em MPa, Pa, N/m², kgf/mm². Os métodos ASTM D412, D638 e D 882 descrevem os ensaios (MANO,2011).

2.6.2.8 Inflamabilidade

A inflamabilidade dos materiais é propriedade muito importante. Quando um polímero orgânico é aquecido, ele vai progressivamente sofrendo modificações, a princípio físicas e depois químicas, terminando por sofrer decomposição total em produtos voláteis.

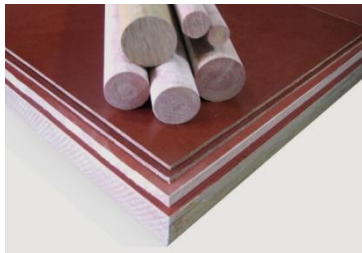
Conforme a natureza química do polímero, a decomposição térmica pode ser facilitada ou dificultada. Polímeros de fácil decomposição, como o nitrato de celulose, nem permitem a quantificação da propriedade, pela rapidez da combustão. Os polímeros termorrígidos, com resina fenólicas, apresentam maior dificuldade de combustão, e por isso são usados na confecção de peças de uso elétrico. Os métodos mais comuns para a avaliação da inflamabilidade de plásticos medem o tempo necessário para a chama percorrer um filme de polímero, sob determinadas condições, através dos métodos ASTM D 2843 e D 568. Outro método bastante usado é aquele proposto por Underwriters Laboratories, sob a designação UL-94 V. A certificação UL-94 V é importante para garantir a segurança contra incêndio e propagação de chamas. Embora não seja um requisito regulatório obrigatório, empresas optam por certificar seus produtos para atender aos padrões de segurança e demonstrar um compromisso com a qualidade e segurança dos materiais (MANO 2011).

2.6.3 Principais isolantes termoeletricos rígidos oferecidos no mercado

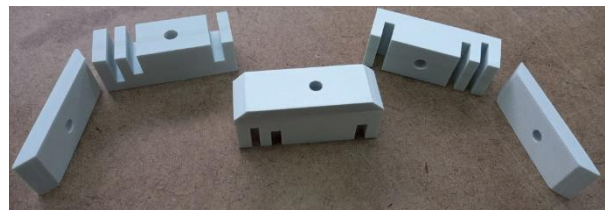
Segundo a NR 10:2004 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, é considerada Baixa Tensão (BT) a tensão superior a 50 Volts em corrente alternada ou 120 Volts em corrente contínua e igual ou inferior a 1000 Volts em corrente alternada ou 1500 Volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra (NORMA REGULAMENTADORA, 2004).

Segundo a ASTM D-709-01, a diversidade de isolantes termoeletricos é caracterizada de acordo com a classificação térmica e as propriedades dos materiais (ASTM INTERNATIONAL, 2001), como exemplificado na Figura 9 (a, b, c, d, e, f) e detalhado na Tabela 4.

Figura 9 - Principais isolantes termoeletricos rígidos oferecidos no mercado de baixa tensão



(a) Celeron – Tecido de Algodão com Resina Fenólica
Classificação térmica 120 °C (E)



(b) ITVS – IT5004 G-7
Tecido de Fibra de Vidro com Resina Silicone
Classificação térmica 300 °C (C)



(c) IT5003-2
Fibra de Vidro com Resina Sintética
Classificação térmica 155 °C (F)



(d) ITVF-IT5003-3
Tecido Fibra de Vidro com Resina Sintética
Classificação térmica 220 °C (R)



(e) ITVE-IT5003 G-10 / G-11
Tecido Fibra de Vidro com Resina Epóxi
Classificação térmica 155 °C (F)



(f) Mica Rígida Moscovita
Classificação térmica 500 °C (C)

Tabela 4 - Tabela de Propriedades dos Principais Isolantes

Propriedades	Isolante T.V.E.	Isolante T.V.S.	Isolante Mica Rígida	Celeron
Densidade (kg/m ³)	1,11 - 2,2	1,06 – 3,8	1 – 4,2	1,15 – 1,45
Dureza (Shore D)	75 - 89	75 - 90	75 – 80	76 - 86
Rigidez Dielétrica (kV/mm)	0,984 - 40	1,6 – 59,1	0,157 – 21,5	8,7 - 20
Temperatura de Trabalho (°C)	60 - 170	95,6 - 300	150 - 800	120 - 150
Condutividade Térmica (W/mK)	0,0418 - 16	0,06 – 6,5	0,22 – 5,58	0,290 – 0,300

Fonte: www.matweb.com (2023)

2.6.4 Pesquisas acerca de novos compósitos análogos aos isolantes termoelétricos flexíveis

O uso de materiais poliméricos tornou-se muito popular nos últimos trinta anos em diversas aplicações. Os materiais desta categoria podem ser amplamente divididos em duas categorias: termoplásticos e elastômeros. Devido a questões de proteção, os termoplásticos têm atraído mais atenção do que os termofixos. Os elastômeros termoplásticos são polímeros estruturais inovadores, materiais fisicamente reticulados compostos por um termoplástico e um elastômero SALMAN (2011).

O desempenho de equipamentos e dispositivos elétricos é determinado, em grande parte, pelas propriedades de seus materiais isolantes. Em sistemas de energia e dispositivos elétricos, os materiais isolantes precisam operar em condições extremas, que podem incluir grandes diferenças de temperatura, radiação intensa e fortes campos elétricos. Tais condições exigem materiais isolantes de alta qualidade, com propriedades elétricas, térmicas e mecânicas superiores, além de resiliência a outras agressões ambientais ZHONG (2010).

Diversos trabalhos tem sido conduzidos para a preparação de materiais com resinas e elastômeros para fins de isolação elétrica e térmica. A tese de doutorado de

Bezerra (2014) obteve um compósito de resina de silicone com alumina tri-hidratada e nanosílica, a qual demonstrou boa resistência térmica e baixa inflamabilidade, associadas à hidrofobicidade. Coser (2009) estudou a degradação térmica e envelhecimento de isoladores de borracha de silicone até 140 °C. O material tornou-se mais rígido após envelhecimento, com aumento no módulo de elasticidade e redução da deformação na ruptura, segundo ensaios de tração em corpos de prova.

Queiroz (2013) avaliou o desempenho de isoladores compósitos quanto à degradação e solicitações dielétricas, mostrando que há ganhos em relação a outros tipos como isoladores de porcelana.

Segundo Pires (2010), a composição de carga esfera de fibra de vidro sobre a resina de silicone influencia quanto a propriedade de densidade e dureza. Bonomo (2003) estudou a matriz confeccionada com elastômero de silicone mostrou-se ser eficiente na fabricação dos isoladores poliméricos, em conjunto com a descrição do seu processo, demonstrou-se ser facilmente reproduzida.

Silva (2009) avaliou os isolantes poliméricos – compósito – tiveram melhor desempenho que os isolantes cerâmicos, pois são mais leves, o que facilita o transporte, manuseio e instalação, além de não sobrecarregar as estruturas de sustentação. Devido à elevada hidrofobicidade do revestimento de borracha de silicone, estes isolantes dispensam as atividades de lavagem periódica, reduzindo os custos de manutenção.

Zhou (2007) investigou os efeitos da quantidade de alumina (Al_2O_3) na condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica (CTE), estabilidade térmica e propriedades mecânicas da borracha de silicone. Constatou que a condutividade térmica e a estabilidade térmica aumentaram, enquanto o coeficiente de expansão térmica diminuiu com o aumento do teor de carga de alumina.

Bielinski (2011) avaliou diversos compósitos à base de borracha de silicone contendo cerâmicas. As melhores propriedades foram obtidas para as misturas de borracha de silicone com sílica preenchida com wollastonita ou mica. Nesse caso, a perda de massa dos compósitos devido à exposição ao fogo foi menor e a estrutura cerâmica porosa criada em sua superfície foi capaz de suportar temperaturas muito elevadas.

Diversos estudos sobre isolantes foram citados. Todavia, esta tese visa inovar a fabricação dos isolantes termoelétricos flexíveis, utilizando estruturas de fibra de vidro e mica embebido com resina silicone, prensado, moldados ou gaxetas na

geometria que atenda o projeto dos clientes. Todos os compósitos isolantes são termoelétricos, sendo assim, esta é uma pesquisa inovadora no mercado de isolamento termoelétrica flexível, com aplicações já aprovado pelos principais clientes.

2.7 INTRODUÇÃO DO ISOLANTE TERMO ELÉTRICO FLEXÍVEL NO MERCADO NACIONAL

2.7.1 Como surgem novos produtos

Segundo Barbosa Filho (2009), novos produtos surgem quando há necessidades ainda não satisfeitas, seja porque os produtos atualmente disponíveis não conseguem satisfazê-las, seja porque, simplesmente, produtos com tal capacidade ainda não foram criados.

As necessidades não satisfeitas podem ir além do que se espera como função primária do produto. No mercado de isolamento termoelétrica, esta oportunidade é identificada pela engenharia e P&D junto ao potencial cliente final, que ao identificar as necessidades do cliente e a oportunidade de solução, busca o desenvolvimento de um novo produto planejado internamente, testado e aprovado junto ao consumidor final.

Normalmente estes custos de desenvolvimento são subsidiados pelo cliente final em parceria com a empresa desenvolvedora.

O compósito que atende a uma necessidade específica de um cliente, normalmente pode atender aos demais que tenham a mesma necessidade, assim cabendo ao setor de *marketing* e comercial divulgar a solução.

A inovação se dá quando complementa ou renova utilidades anteriormente atendidas por uma outra solução ou quando supera as expectativas em torno desta, tornando-a obsoleta. Um compósito aprovado como solução fica fidelizado ao processo do cliente, criando uma parceria duradoura e sadia de soluções (BARBOSA FILHO, 2009).

2.7.2 Teste de mercado para novos produtos

Novos produtos industriais e novas tecnologias normalmente passam pelo teste alfa (dentro da empresa) e pelo teste beta (com clientes externos). Durante o teste beta, o pessoal técnico observa como os clientes utilizam o produto – uma prática que, frequentemente, mostra os problemas não-previstos de segurança e suporte técnico e alerta a empresa para o treinamento do cliente e para suas necessidades de serviço. A empresa também pode observar quanto valor o equipamento agrega à operação do cliente, como base para a subsequente determinação do preço. Ela pede que os clientes que estão participando do teste expressem sua intenção de compra e outras reações após o teste.

Os clientes que participam do teste se beneficiam de várias maneiras: eles podem influenciar o projeto do produto, ganhar experiência com o novo produto antes dos concorrentes, conseguir um desconto à sua cooperação e reforçar sua reputação como pioneiros da tecnologia. As empresas devem interpretar cuidadosamente os resultados do teste beta, porque apenas um pequeno número de clientes é utilizado, os clientes não são escolhidos aleatoriamente e os testes são desenvolvidos levando-se em consideração o local e o ramo de atuação. Um outro risco é que os clientes que não gostarem do produto podem fazer comentários desfavoráveis a respeito do mesmo.

Um segundo método de teste comum para produtos isolantes é lançar o produto em feiras comerciais. As feiras comerciais atraem grande número de compradores, que veem muitos novos produtos em poucos dias. O vendedor pode observar quanto interesse os compradores demonstram pelo novo produto, como reagem as várias características e condições de compra e quanto expressam intenções de compra ou fazem pedidos. Os fabricantes praticamente utilizam um teste de mercado completo quando fornecem uma quantidade limitada do produto à força de vendas para ser vendida em um determinado número de áreas que recebem apoio de promoção e catálogos impressos. Dessa maneira, a gerência pode tomar uma decisão mais embasada sobre a comercialização do produto (KOTLER, 2000).

2.7.3 Clientes potenciais no mercado-alvo

Nos mercados de lançamento, a empresa dirige a distribuição e suas promoções iniciais aos grupos com maior probabilidade de serem clientes. Presumivelmente, a empresa levanta o perfil dos melhores clientes potenciais, que idealmente teriam as seguintes características: os primeiros a adotar o produto, usuários frequentes e líderes de opinião e alcançados a um baixo custo. Poucos grupos tem essas características. A empresa classifica vários grupos potenciais e visa o melhor grupo, tentando gerar vendas vigorosas tão logo quanto possível, para motivar a força de vendas e atrair novos clientes potenciais (KOTLER, 2000).

Muitas empresas se surpreendem ao identificarem os compradores de seu produto e verificarem as razões. Os fornos de micro-ondas começaram a ter um crescimento explosivo somente após a pipoca para micro-ondas ter sido desenvolvida. As compras de microcomputadores aumentaram drasticamente quando os CD-ROMs foram lançados.

2.7.4 A influência pessoal tem um importante papel

A influência pessoal é o efeito que uma pessoa tem sobre a atitude ou probabilidade de compra de outra pessoa. Embora a influência pessoal seja um fator a ser considerado, sua importância é maior em algumas situações que em outras. A influência pessoal é mais importante na etapa de avaliação do processo de adoção do produto. Ele exerce poder sobre os adotantes posteriores que sobre os adotantes imediatos. É também mais importante em situação de risco.

2.7.5 As características da inovação afetam a taxa de adoção

Alguns produtos são aceitos imediatamente, ao passo que outros levam um longo tempo para conseguir a aceitação. Cinco características que influenciam a taxa de adoção de uma inovação são:

A primeira é a vantagem relativa - em que a inovação parece superior aos produtos existentes;

A segunda é a compatibilidade – o grau em que a inovação corresponde aos valores e às experiências das pessoas;

A terceira é a complexibilidade – o grau em que a inovação é relativamente difícil de ser compreendida ou utilizada.

A quarta é a divisibilidade – o grau em que a inovação pode ser experimentada em uma base limitada.

A quinta é a comunicabilidade – o grau em que os resultados benéficos da utilização são observáveis ou podem ser descritos aos outros (KOTKER 2000).

2.7.6 Definição de valor e de satisfação para o cliente

A primeira tarefa de uma empresa é “criar clientes”. Mas os clientes de hoje se deparam com um vasto universo de produtos, marcas, preços e fornecedores pelos quais optar. Acredita-se que os clientes avaliam qual oferta proporciona maior valor. Eles procuram sempre maximizar o valor, dentro dos limites impostos pelos custos envolvidos na procura e pelas limitações de conhecimento, mobilidade e receita. Eles formam uma expectativa de valor e agem com base nela. A probabilidade de satisfação e repetição da compra depende de a oferta atender ou não a essa expectativa de valor (KOTLER, 2000).

2.7.7 Atração e retenção de clientes

Além de melhorar suas relações com seus parceiros na cadeia de suprimentos, muitas empresas estão se concentrando no desenvolvimento de vínculos mais sólidos com seus clientes finais. No passado, muitas empresas achavam que seus clientes eram garantidos. Hoje acredita-se que os clientes são mais difíceis de agradar devido ao nível de exigência. Assim os desenvolvedores de novos isolantes ao desenvolver isolantes específicos aos clientes criam fidelidade e parcerias duradouras, até mesmo inibindo a concorrência (KOTLER, 2000).

Segundo Deming (1990), o 5º princípio da qualidade relata acabar com a prática de negócio compensador baseado apenas no preço. Em vez disso, minimizar o custo total. Insistir na ideia de em único fornecedor para cada item, desenvolvendo relacionamentos duradouros, calçados na qualidade e na confiança.

2.7.8 O processo de desenvolvimento de novos produtos

Uma vez que as empresas estão organizadas para o desenvolvimento de novos produtos, elas podem estabelecer procedimentos para transpor as ideias de novos produtos para o mercado. Com frequência, o desenvolvimento de novos produtos, além de levar muito tempo, é arriscado e caro. Em geral, as empresas devem gerar dezenas de ideias de novos produtos para produzir um produto bem sucedido. Na verdade, as taxas de falhas de novos produtos são de 80% em média. Os produtos fracassam por muitas razões, incluindo avaliações de mercado inadequadas, falta de orientação de mercado, triagem e avaliações de projetos ineficientes, defeitos de produtos e esforços de lançamentos insuficientes. E esses erros custam caro: as empresas investem quase a metade de todos os fundos dedicados a inovações de produtos em produtos sujeitos a fracassar comercialmente (BOONE, 2009).

Novos produtos são mais propensos a se tornarem bem-sucedidos se as empresas seguirem um desenvolvimento baseado em seis passos, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Passos para o processo de desenvolvimento de novos produtos



Fonte: (BOONE 2009)

Tradicionalmente as empresas desenvolvem novos produtos, mediante ao desenvolvimento por fases, que segue os seis passos em sequência ordenada. As responsabilidades de cada fase passam pelo setor de pesquisa e desenvolvimento, engenharia e comercialização. O desenvolvimento de novo produto em tese substitui um produto já existente, assim inovando para satisfação do mercado.

3 OBJETIVOS E HIPÓTESES

3.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um isolante termoelétrico flexível em forma de gaxeta e manta que venha a atender a necessidade do mercado de isolantes termoelétricos para altas temperaturas, classificação térmica $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e Classe (C). Assim, o trabalho buscou substituir os isolantes existentes por um isolante com vantagens em desempenho.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. **Sintetizar a formulação do material** com foco na obtenção de um isolante termoelétrico flexível e livre de amianto.
2. **Atingir as seguintes propriedades físico-químicas e termoelétricas do material:**
 - Rigidez dielétrica $\geq 5\text{ kV/mm}$
 - Resistência térmica $\geq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Classe térmica C)
 - Densidade entre 1,2 e 1,5 g/cm^3
 - Condutividade térmica $< 0,5\text{ W/m}\cdot\text{K}$
 - Dureza Shore A > 75
 - Comportamento antichama (classificação UL-94)
 - Hidrofobicidade (resistência à absorção de umidade)
 - Resistência mecânica com flexibilidade adequada à aplicação em gaxetas e mantas
3. **Avaliar o desempenho do material por meio de ensaios laboratoriais**, conforme normas técnicas aplicáveis (ex.: ASTM, IEC, UL).
4. **Comparar o novo isolante com materiais isolantes termoelétricos convencionais**, em termos de desempenho, durabilidade e segurança.
5. **Realizar uma análise preliminar de viabilidade técnica e de aplicação industrial**, considerando aspectos como potencial de produção, aplicação e custo-benefício.

6. **Propor estratégias de inserção do produto no mercado nacional**, com base nas necessidades do setor industrial e nos diferenciais competitivos do novo material.

3.3 Hipóteses da Pesquisa:

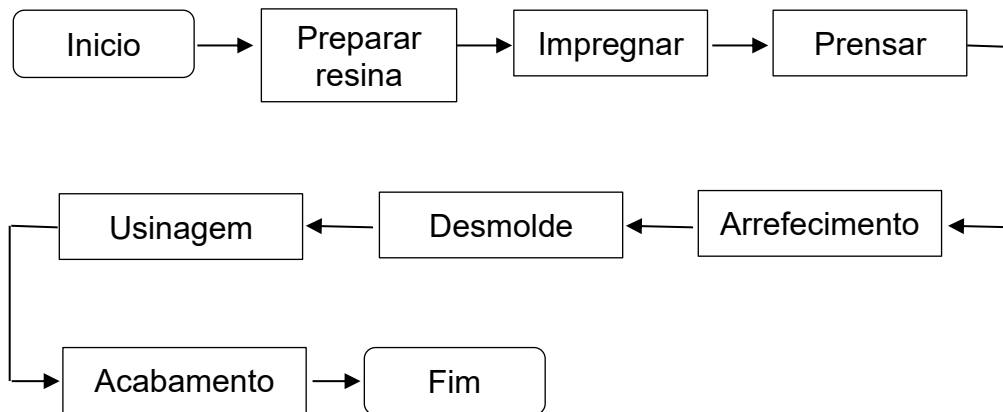
- H1: O novo isolante termoelétrico flexível desenvolvido com resina de silicone, fibra de vidro, mica e alumina apresenta desempenho técnico adequado, atendendo aos requisitos de rigidez dielétrica (≥ 10 kV/mm) e resistência térmica (> 300 °C), conforme a classe térmica C.
- H2: O material apresenta propriedades físico-mecânicas compatíveis com aplicações industriais, incluindo flexibilidade, dureza (Shore A > 75), condutividade térmica $< 0,5$ W/m·K, resistência à água e ao óleo, e comportamento antichama (UL-94).
- H3: O novo isolante termoelétrico apresenta melhor relação custo-benefício em comparação com isolantes termoelétricos comerciais utilizados atualmente, considerando desempenho, durabilidade e economia de energia em aplicações industriais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento do isolante termoelétrico

O novo isolante termoelétrico flexível é uma peça (produto) desenvolvida para a solução de um problema apresentado no mercado de fundição para atender as especificações da classe térmica superior a 300 °C, segundo a ABNT NBR IEC 60085 (ABNT, 2017), isto é, suportar uma condição de trabalho acima de 300 °C, sem perder suas principais propriedades, sendo processado conforme o fluxograma demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma produtivo dos isolantes termoelétricos flexíveis



Fonte: Elaboração Própria

Quatro compósitos foram avaliados, sendo codificados como:

- IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre, estruturado com tecido de fibra de vidro inflado TF-700, do fabricante nacional Texiglass, resinado com elastômero RTV Copper Alta Performance, fabricante TEK-BOND Saint-Gobain, cura ambiente, vulcanizando 1 mm a cada 24 horas.
- IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, estruturado com tecido de fibra de vidro inflado TF-700, do fabricante nacional Texiglass, resinado com elastômero Bicomponente oxi-ferro do fabricante nacional Polisil, cura na prensa de compactação, sob temperatura de 100 °C e 10 t de pressão simultaneamente por 1 hora, com aguardo de arrefecimento para desmolde.

- IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina, estruturado com tecido de fibra de vidro inflado TF-700, do fabricante nacional Texiglass, resinado com elastômero Bicomponente azul do fabricante nacional Polisol, aditivado com 10% de alumina cedida pela empresa CBA Companhia Brasileira de Alumínio, cura na prensa de compactação, sob temperatura de 100 °C e 10 t de pressão simultaneamente por 1 hora, com aguardo de arrefecimento para desmolde.
- IT 2004 MPSF Mica Flexível, estruturado com papel de mica moscovita 160 g/m² do fabricante Von-Roll, resinado com resina silicone flexível do fabricante Wacker Química, cura na prensa de compactação, sob temperatura de 150 °C e 30 t de pressão simultaneamente por 3 horas, com aguardo de arrefecimento para desmolde.

4.2 Ensaios e propriedades ensaiadas

O novo material isolante termoelétrico flexível foi desenvolvido em quatro diferentes compósitos, cuja composição está na Tabela 5. As proporções empregadas seguem a recomendação do fabricante do elastômero, corroboradas com a experiência na fabricação desses materiais isolantes, promovendo boa fluidez, baixa quantidade de poros e facilidade na impregnação a quente ou frio. As Proporções indicadas facilitam a fabricação e asseguram alta rigidez dielétrica no material isolante.

Tabela 5 - Composição dos Isolantes

ISOLANTES	RESINA	REFORÇO	Proporção Resina/Reforço(%)
IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre	Tecido de Fibra de Vidro Inflado TF-700	35/65
IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro	Tecido de Fibra de Vidro Inflado TF-700	30/70
IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina	Tecido de Fibra de Vidro Inflado TF-700	35/65
IT 2004 MPSF Mica Flexível	Resina Silicone Flexível	Papel de Mica Moscovita 160 gr.	10/90

Fonte: Elaboração Própria (2025)

4.2.1 Rigidez dielétrica

Métodos de Aplicação de Tensão: Aparelho de Alta Voltagem, Modelo TAV10CA, marca Instrumed, ano 1987.

É utilizado o método ASTM D149 Método A, teste de Curta Duração – Aplica-se a tensão uniformemente aos eletrodos de teste de zero em uma das taxas V/s até que ocorra a ruptura. O teste de curta duração deve ser utilizado, a menos que especificado de outra forma.

Ao estabelecer uma taxa V/s para que ela seja incluída em uma nova especificação, seleciona-se uma taxa que, para um determinado conjunto de corpos de prova, dê um tempo médio de desagregação entre 10 e 20 s. Em alguns casos é necessário realizar um ou dois testes preliminares para determinar a taxa de aumento mais adequada. Para muitos materiais é usada uma taxa de 500 V/s.

Caso o documento que faz referência a este método de ensaio especifique uma taxa de aumento, esta deve ser usada de forma consistente, apesar do tempo médio ocasional de quebra cair fora da faixa de 10 a 20 s. Neste caso, os tempos de falha devem ser incluídos no relatório.

Na execução de uma série de ensaios comparando diferentes materiais, deve-se utilizar a mesma taxa de subida, dando-se preferência a uma taxa que permita que o tempo médio fique entre 10 e 20 s. Se o tempo de avaria não puder ser respeitado, o tempo deve ser incluído no relatório.

O relatório do teste deve incluir as informações:

- Identificação da amostra de teste para cada amostra:
- Espessura medida:
- Tensão máxima suportada (para testes passo a passo)
- Tensão de ruptura dielétrica,
- Rigidez dielétrica (para testes passo a passo),
- Resistência à ruptura dielétrica e;
- Localização da falha (centro do eletrodo, borda ou parte externa).
- Descrição dos corpos de prova,
- Condicionamento e preparação do corpo de prova,
- Meio envolvente,

- Temperatura do teste.

4.2.2 Condutividade térmica

Procedimento de análise

-Determinação via método de Fonte Plana Transiente Modificada (MTPS – ASTM D7984) Thermal Conductivity Instrument C-Therm modelo Trident, que mede a efusividade térmica de amostras ($W.s^{1/2}.k^{-1}.m^{-2}$).

O instrumento C-Therm Trident possui um conjunto contendo um aquecedor/sensor plano circundado por um anel quente protegido (guarded hot ring) que promove uma blindagem para a transferência de calor radial. Os procedimentos de análise são:

- A amostra é colocada em contato íntimo com o conjunto plano sob uma massa de 500 g.

- Um pulso de corrente de 1 a 3 segundos é aplicado ao aquecedor/ sensor e anel causando uma elevação local de temperatura.

- Simultaneamente, o sensor registra o aumento da temperatura em função do tempo da aplicação do pulso.

- A taxa de aumento da temperatura na interface sensor/ amostra quando da aplicação do pulso é proporcional à potência aplicada e às perdas térmicas por condução através da amostra.

- Através de calibrações das taxas de aumento de temperatura em vazio (vácuo, sem amostra) e com amostras padrões de condutividades térmicas conhecidas, é possível determinar a condutividade térmica da amostra.

- O *software* integrado do equipamento perfaz a análise em 7 medidas após estabilização do sistema.

- O sensor é inserido em estufa para a determinação de condutividade térmica acima da temperatura ambiente, após estabilização.

- Para a realização das medidas, a calibração é escolhida conforme as faixas de valores e tipos de materiais.

- Incertezas máximas do método: 5%.

4.2.3 Calor específico

Procedimento de análise

O calor específico (C_p) é derivado dos valores de condutividade térmica (λ), efusividade térmica (e) (medido pelo método descrito em 4.2.2.) e densidade geométrica (ρ) do material, empregando-se a fórmula:

$$C_p = \frac{e^2}{\lambda \cdot \rho} \quad (\text{Equação 2})$$

Cujas unidades dos termos são;

(C_p) Calor Especifico = $J.Kg^{-1}.k^{-1}$

(ρ) Densidade = $Kg.m^{-3}$

(λ) Condutividade Térmica = $W.m^{-1}.k^{-1}$

(e) Efusividade Térmica = $W.s^{1/2}.k^{-1}.m^{-2}$

4.2.4 Análise térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização

Amostras de 4 isolantes flexíveis – propriamente ditos, IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre, IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, IT 5004 Bicomponente Azul 10% Alumina e IT 2004 MPS Mica flexível, foram analisadas por técnicas de termogravimetria e análise térmica diferencial simultâneas (TG/DTA) (Netzsch STA 409, Alemanha). Amostras de cerca de 4 mm de espessura foram ensaiadas em termobalança até 1000 °C e taxa de aquecimento de 10 °C. min^{-1} , sob fluxos combinados de 35 ml. min^{-1} de ar sintético (80 % N_2 e 20 % O_2) e 25 ml. min^{-1} de argônio. Enquanto o ar sintético corresponde ao gás reativo, argônio faz a função de gás protetor da termobalança.

Os ensaios empregaram cadinhos DTA de alumina para amostra, onde a referência consistiu em um cadinho vazio. A partir da derivação do sinal TG, obtém-se curvas de termogravimetria derivada (DTG), que correspondem à taxa de perda de massa.

4.2.5 Densidade

A determinação de densidade foi feita segundo a norma ISO 1183-1:2004 – Método A – imersão (ISO, 2004) sob 24 °C. Seguindo o procedimento:

1. A amostra foi seca em estufa a 50 °C por 1 h.
2. A amostra foi cortada e preparada com massa acima de 10 g.
3. A amostra foi pesada em sistema de medida por imersão (densidade hidrostática) conforme:
 - a. Pesagem em cesta antes da imersão: massa seca (m_{seca})
 - b. Pesagem após imersão em água destilada em Becker; retiradas de bolhas de ar com toques de agulha
4. A temperatura medida por termômetro imerso no Becker com água destilada foi de 24 °C.
5. A densidade da água destilada considerada foi $\rho_{\acute{a}gua} = 0,99732 \text{ g. cm}^{-3}$
6. Determinação da densidade da peça ($\rho_{pe\grave{c}a}$) por meio da Equação 3.

$$\rho_{pe\grave{c}a} = \frac{m_{seca}\rho_{\acute{a}gua}}{m_{seca} - m_{imersa}} \times 1000 \text{ kg m}^{-3} \quad (\text{Equação 3})$$

A densidade hidrostática pode destoar da medida geométrica em razão da presença de porosidade e irregularidades na forma.

4.2.6 Dureza

A dureza mede a resistência à penetração, ou ao risco. Os materiais termorrígidos possuem dureza mais elevada quando comparados aos termoplásticos. Os materiais poliméricos são menos duros do que os materiais cerâmicos, vítreos e metálicos (MANO, 1991).

A dureza foi determinada através do ensaio de dureza Shore A em durômetro analógico (marca Digimess, modelo 400.144, país Brasil) segundo norma ISO 868:2003 (ISO, 2003).

Condições de análise: indentador Shore A.

Os procedimentos de análise – ISO 868 – dureza Shore A são:

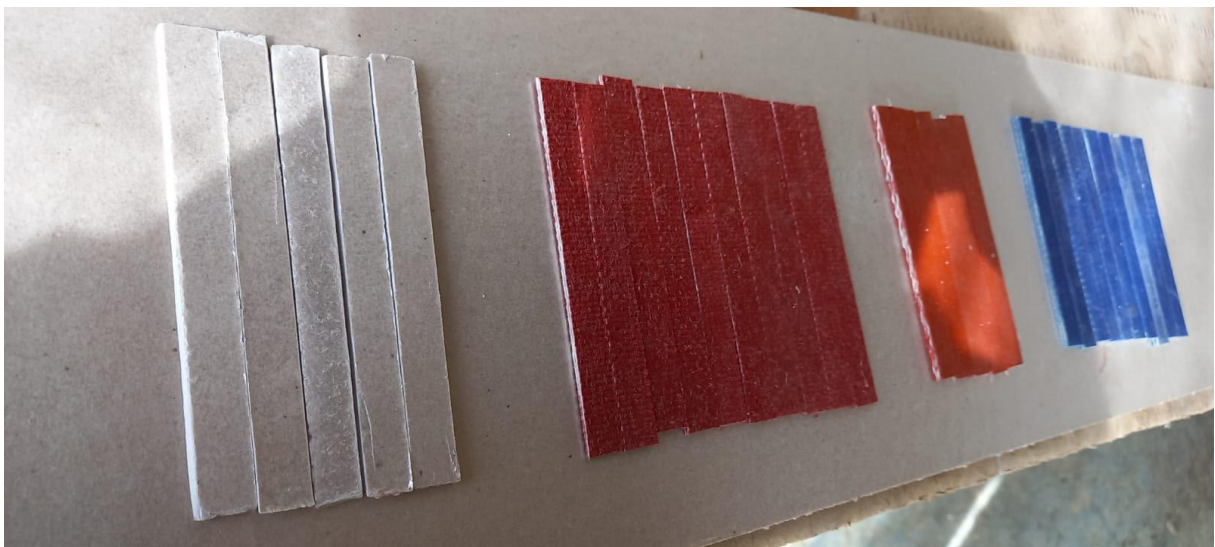
1. Posicionamento da placa sobre a base do durômetro com relógio indentador de ponteira com raio 0,1 mm e carga total de 44,45 N;
2. Aproximação da ponteira para contato com a peça;
3. Imposição da carga;
4. Os valores são registrados após 15 s de carga máxima;
5. Realizadas sete medidas em pontos distintos da placa e tomados os 5 valores mais próximos para o cálculo da média de dureza.

4.2.7 Flamabilidade Teste de Queima Vertical (V-0, V-1 ou V-2).

A avaliação da resistência à propagação de chama em materiais poliméricos pode ser feita, em princípio, através de ensaios em larga escala. Nesses ensaios, procura-se verificar o desempenho de materiais em situação real de incêndio. Contudo, para fins de seleção de materiais para aplicações em produtos resistentes à propagação de chama, foram desenvolvidos testes em escala laboratorial, os quais são bastante adequados para a finalidade de comparação de desempenho de materiais ou de diferentes formulações de um mesmo polímero principal.

O ensaio de flamabilidade foi realizado baseado na UL 94 V:2014 – “Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances – 20 mm Vertical Burning Test”. Neste ensaio, conforme Figura 12, o corpo de prova no dimensional 5x13x125 mm fica posicionado verticalmente em relação à chama.

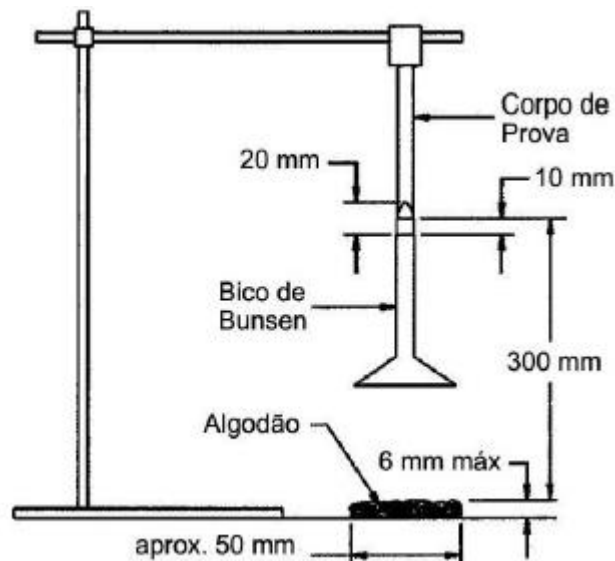
Figura 12 - Amostra do Corpo de Prova, segundo a norma



Fonte: Elaboração própria do autor, (2025)

A montagem utilizada no experimento está apresentada na Figura 13.

Figura 13- Sistema utilizado no ensaio UL-94



Fonte: (CCDM/UFSCar, 2025)

Em uma de suas extremidades aplica-se a chama por 10 segundos e observa-se comportamento do corpo de prova. O tempo entre a retirada da chama e a auto extinção do fogo no corpo de prova (t_1) é registrado. Após a extinção da chama, caso ocorra, aplica-se novamente a chama por mais 10 segundos e registra-se novamente o tempo entre a retirada da chama e a auto extinção do fogo no corpo de prova (t_2). Deve-se registrar também o tempo que o corpo de prova permaneceu incandescente após a segunda aplicação (t_3).

Os critérios de avaliação do teste de queima vertical da norma UL-94 estão mostrados na Tabela 6. Por fim, o ensaio foi realizado no dia 29 de janeiro de 2025.

Tabela 6 - Critérios de avaliação do teste de queima vertical (norma UL-94).

Critérios	V-0	V-1	V-2
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova (t_1 ou t_2)	≤10s	≤30s	≤30s
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova (somatória $t_1 + t_2$ de cada corpo de prova)	≤50s	≤250s	≤250s
Tempo de queima mais tempo de incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama ($t_2 + t_3$)	≤30s	≤60s	≤60s
Queima do corpo de prova até o prendedor por propagação da chama ou incandescência	Não	Não	Não
Queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas.	Não	Não	Sim

Fonte: Elaboração Própria (2026)

4.2.8 Resistência Mecânica

Tipo de análise/serviço: Determinação de propriedades mecânicas em ensaio de tração; normas ISO 527-1:2019.

O espécime de teste é estendido ao longo de seu eixo longitudinal principal a uma velocidade constante até que o espécime se quebre ou até que a tensão (carga) ou a deformação (alongamento) atinjam algum valor predeterminado. Durante esse procedimento, a carga sustentada pelo espécime e o alongamento são medidos.

Procedimentos de análise

Conforme a Figura 14, máquina de ensaio de tração EMIC modelo: DL10000 NO: 10372 NS: 384

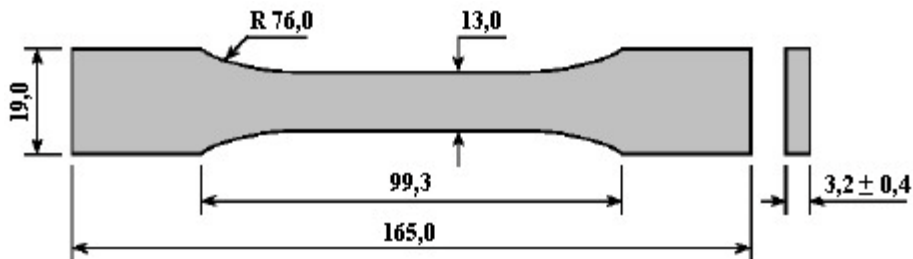
Figura 14 - Máquina de ensaio de tração Emic – Capacidade Máxima 100 kN



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

1. A amostra foi usinada segundo o corpo de prova da norma, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Esquema do corpo de prova da norma



Fonte: Norma ISO 527:2019

2. A amostra foi fixada nas garras da máquina de tração.
3. O sistema foi zerado pela medida da distância entre garras.
4. Realizou-se o ensaio com velocidade de avanço de 5 mm/min até a fratura do corpo de prova.
5. Os valores de tensão e deformação foram registrados em gráfico, cujos parâmetros foram determinados através de *software* gráfico com leitura de valores característicos.

4.2.9 Área Superficial Específica (BET)

O método BET, conduzido para o aditivo alumina, é uma técnica para determinar a área superficial específica (ASE) de uma amostra em m^2/g , que é a área ocupada pela superfície das partículas que compõem a amostra.

O método BET é baseado na teoria de Langmuir e na ideia de que as moléculas de gás podem adsorver-se na superfície de um sólido em monocamadas.

Para realizar o ensaio, conforme a Figura 16, a amostra é submetida a um processo de degaseificação, que remove moléculas de água e outros contaminantes. Depois, a amostra é colocada numa célula de condutividade térmica, onde um gás, normalmente nitrogênio, passa através dela. A quantidade de gás adsorvido é medida através da queda de pressão, que está correlacionada com a área superficial da amostra.

O método BET também permite avaliar a porosidade e o tamanho dos poros da amostra. Esta medida é importante porque todas as reações químicas começam na superfície da amostra.

Figura 16 - Analisadores de área superficial BET e de volume e de diâmetro de poros(Anton Paar)



Fonte:www5.usp.br (2024)

4.2.10 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)

Para o método de abertura utilizou-se digestor micro-ondas da marca CEM – Mars 6 como ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Digestor Micro-ondas (CEM-Mars 6)



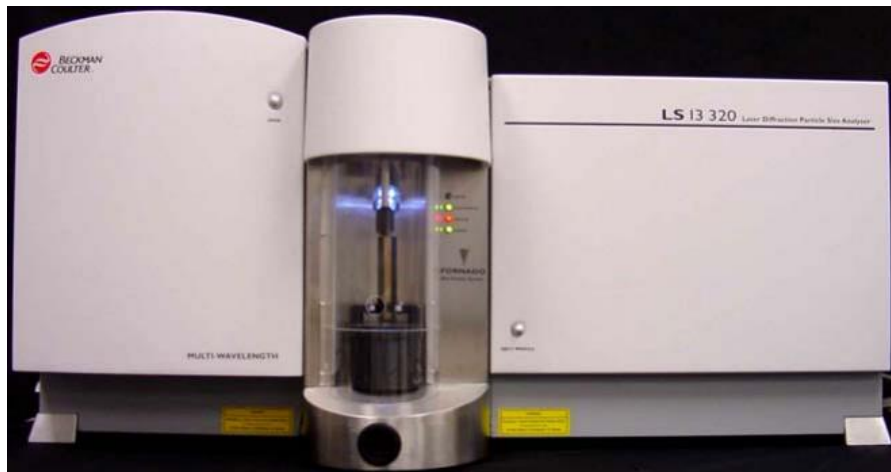
Fonte: (LAREX, 2025)

Necessitou-se de 0,25 g de amostra para abertura total do material e adicionou-se 6,5 ml de Ácido fosfórico (H_3PO_4) e 3,5ml de Ácido de sulfúrico (H_2SO_4). O método presente no equipamento utiliza um aquecimento até 270 °C mantendo por 20 min.

4.2.11 Granulometria por Difração a Laser

O equipamento utilizado, conforme figura 18, para as análises de distribuição de tamanho de partículas foi da marca Beckman Coulter, modelo LS13320, com o módulo ULM (Universal Liquid Module) para as análises via úmida, com faixa de medida de 0,04 a 2000 μm . Para as análises via seca foi utilizado o mesmo equipamento com o módulo Tornado DPS (Dry Powder System) que permite análises na faixa de 0,4 a 2000 μm .

Figura 18 - Equipamento Beckman Coulter LS13320 com o módulo Tornado DPS.



Fonte: (Papini, 2006)

4.2.12 Análise Espectroscópica por infravermelho com transformada de Fourier – Modo Reflectância Total Atenuada (ATR)

4.2.12.1 Material

Oito amostras, identificadas como IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina, IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre, IT 2004 MPSF Mica Flexível, Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina, Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro, Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre e Resina Silicone Flexível, foram analisadas no Laboratório de Biomateriais e Nanotecnologia da Universidade de Sorocaba (LaBNUS) localizado no Parque Tecnológico de Sorocaba em 23/05/2025 e 22/10/2025.

4.2.12.2 Método

Espectroscopia por Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A caracterização dos sinais referente aos grupamentos químicos das respectivas amostras foi realizada no espectrofotômetro IRAffinity-1S (Shimadzu, Quioto, Japão) no modo ATR. Os espectros de transmitância foram reportados na faixa de número de onda entre 4000 e 600 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 128 varreduras.

Os espectrogramas das 8 amostras foram normalizados para facilitar comparações entre eles, e as bandas de estiramentos foram identificadas e marcadas nos respectivos números de onda.

4.3 Metodologia para análise preliminar de viabilidade técnica e de aplicação industrial

Para a avaliação da viabilidade técnica e da aplicabilidade do novo isolante termoeletrico no setor industrial, foram adotados os seguintes procedimentos:

- **Revisão bibliográfica e documental** sobre aplicações industriais que exigem isolantes de Classe C ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), incluindo análise das propriedades exigidas em normas técnicas (como ASTM, IEC, UL e ABNT).
- **Mapeamento de requisitos de uso industrial**, com base em consulta a especificações de uso em setores como metalurgia, cerâmica, vidro e petroquímica.
- **Comparação técnica** entre o isolante desenvolvido e materiais comerciais similares (como mica, fibras cerâmicas e polímeros resistentes ao calor), utilizando critérios como: desempenho térmico, rigidez dielétrica, durabilidade, densidade e comportamento ao fogo.
- **Projeção preliminar de escalabilidade produtiva**, considerando disponibilidade de insumos, processos de fabricação e custos estimados.

4.4 Estudo exploratório para inserção do produto no mercado nacional

A inserção comercial do produto será abordada por meio de um estudo exploratório composto pelas seguintes etapas:

1. Identificação dos segmentos-alvo do mercado industrial por meio de análise secundária de dados

2. Levantamento de potenciais clientes e concorrentes, incluindo empresas que atuam com isolantes termoelétricos e distribuidores de materiais industriais.

3. Análise de custo-benefício comparativo entre o novo isolante e os materiais concorrentes já utilizados no mercado. A comparação será baseada nos seguintes critérios:

- Consumo energético estimado com os isolantes atuais versus o novo material.
- Ganho em eficiência térmica (%) com a substituição do isolante.
- Economia financeira mensal e anual estimada para o cliente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

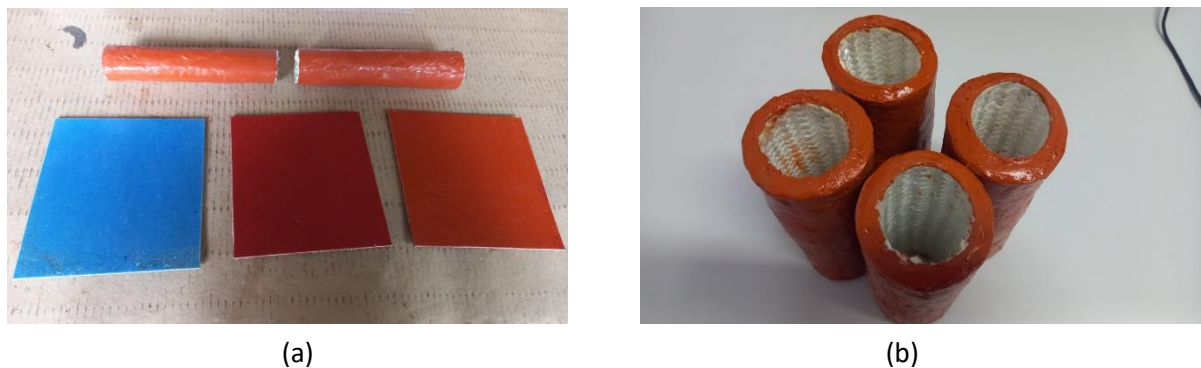
5.1 Desenvolvimento do isolante termoeletrico

A figura (19a e 19b) são formas geométricas do isolante termoeletrico flexível, que podem ser fabricados na geometria exigida no projeto do cliente quer sejam mantas, peças moldadas ou gaxeta tubular que isola superior a 300 °C, podendo alcançar até 1260 °C. Conforme a necessidade solicitada, se altera o compósito.

As mantas podem ser prensadas e fabricadas no dimensional da placa da prensa hidráulica, a medida comercial é (L) 1000 mm e (C) 6000 mm, sendo a espessura de 3 a 15 mm.

Já a gaxeta tubular pode ser feita no diâmetro interno de 6 a 250 mm, no comprimento desejado pelo projeto do cliente, normalmente comprimento máximo de 30 metros.

Figura 19 - Isolante Termoeletrico Flexível



Fonte: Elaboração Própria (2023)

O material isolante termoeletrico flexível, foi desenvolvido devido à necessidade do mercado em encontrar um isolante flexível que isole termoeletricamente cabos elétricos, mangueiras hidráulicas, mangueiras de resfriamento, cabos refrigerados, entre outros materiais.

Já a manta foi desenvolvida para isolar termoeletricamente máquinas, eletrocalhas, operações de risco, afim de bloquear a radiação de calor e reduzir a exposição das pessoas e isolar eletricamente, eliminando risco de choque elétrico e radiação de calor.

5.2 Ensaio e propriedades ensaiadas

5.2.1 Área Superficial Específica (BET)

BET Área Superficial Específica da Alumina (Al_2O_3) coletada para a composição do Isolante Flexível IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina : **100.5797 m^2/g**

Figura 20 - Amostra Alumina Coletada para Compósito IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina

Sample: Alumina
 Operator: Miguel B.
 Submitter:
 File: C:\2020\DATA\ALUM.SMP

Started: 07/03/2024 7:31:39
 Completed: 07/03/2024 16:10:29
 Report Time: 22/04/2024 9:33:25
 Sample Mass: 1.0811 g
 Cold Free Space: 67.7749 cm^3
 Ambient Temperature: 22.00 $^\circ\text{C}$
 Automatic Degas: Yes

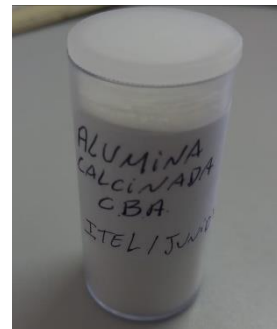
Analysis Adsorptive: N2
 Analysis Bath Temp.: -196.317 $^\circ\text{C}$
 Thermal Correction: No
 Warm Free Space: 23.0909 cm^3 Measured
 Equilibration Interval: 20 s
 Low Pressure Dose: None

Summary Report

Surface Area

Single point surface area at P/Po = 0.302165002: 98.2955 m^2/g

BET Surface Area: 100.5797 m^2/g



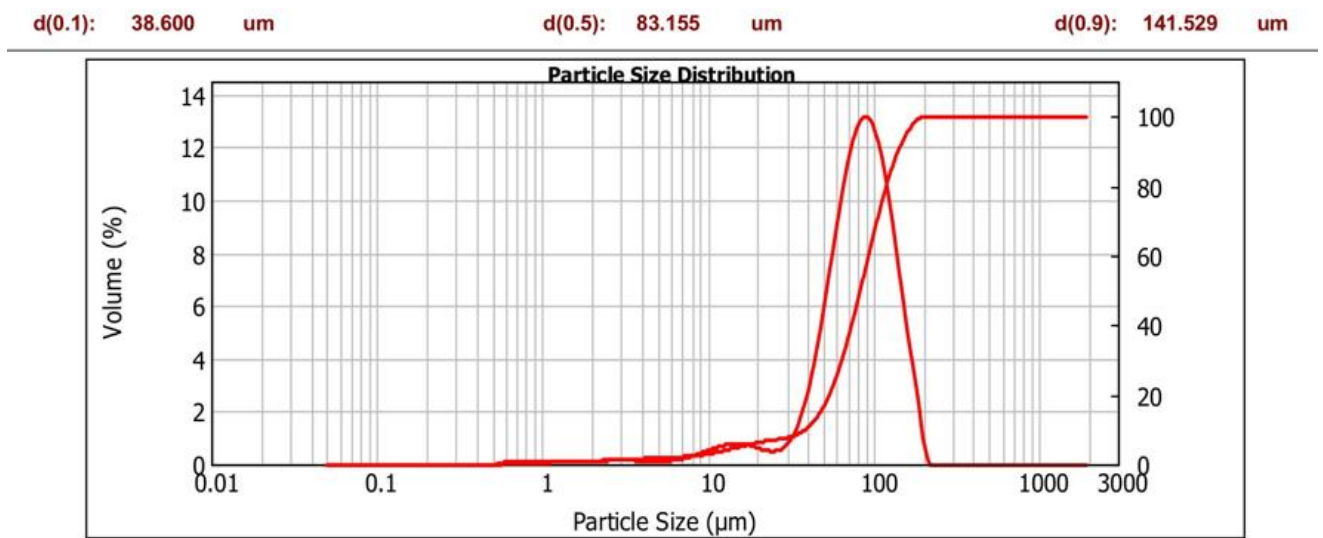
Fonte: Elaboração Própria (2024)

Conforme demonstrado na Figura 20, a área superficial BET da alumina, ou seja, a área de superfície específica da alumina (Al_2O_3) medida através do método Brunauer-Emmett-Teller (BET), foi de 100,6 m^2/g , evidenciando uma alta atividade da alumina no processo de mistura e fabricação do isolante termoelétrico flexível IT-5004 Bi-Componente 10% Alumina.

5.2.2 Granulometria Difração a Laser

Conforme demonstra a Figura 21, a alumina (Al_2O_3) utilizada no compósito IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina, tem a média de granulometria da alumina de 83.155 μm , o que facilita a mistura e homogeneização do compósito.

Figura 21 - Granulometria por Difração a Laser da Alumina utilizado no compósito do Isolante Flexível IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina



Fonte: Elaboração própria (2024)

5.2.3 Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)

Conforme demonstra a Tabela 7, o teor de contaminantes presentes na amostra de alumina (Al_2O_3) é relativamente baixo, totalizando 0,178%, ou seja, a alumina (Al_2O_3) utilizada no compósito IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina tem 99,82% de pureza.

Tabela 7 - ICP-OES Amostra da Alumina utilizada no compósito IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina

Elemento	Teor (%)
Na	0,121
Si	0,051
K	0,004
Fe	0,002

Fonte: Elaboração própria (2024)

5.2.4 Rigidez dielétrica

Os resultados do ensaio rigidez dielétrica para os quatro tipos diferentes de isolantes termoelétricos foram organizados nas Tabelas 8 e 9 abaixo. O isolante termoelétrico flexível foi comparado entre eles, conforme a Tabela 8 em temperatura ambiente, e na Tabela 9 em temperatura limite de utilização.

Conforme a Tabela 8 e 9, os materiais isolantes flexíveis desenvolvidos serão caracterizados segundo a sua aplicação.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, a 25°C, para os diferentes materiais termoelétricos

Isolante termoelétrico	Espessura (mm)	Tensão máxima aplicada	Fuga de corrente (mA)	Tensão de ruptura dielétrica	Rigidez dielétrica (kV mm ⁻¹)
IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	1	10 kV	0,05	---	10
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	1	10 kV	0,05	---	10
IT5004-4 Bicomponente Óxi-Ferro	1	10 kV	0,04	---	10
IT2004-MPS Mica Flexível	1	10 kV	0,05	---	10

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Por meio da Tabela 8 observa-se que o isolante IT2004-MPS Mica Flexível ensaiado em temperatura ambiente 25 °C, com altíssima Rigidez Dielétrica 10 kV/mm, composto de 90% minério de papel de mica moscovita e 10% resina flexível silicone inorgânica, ou seja, ótimo isolante termoelétrico.

Os demais isolantes termoelétricos flexíveis também apresentaram alta isolamento elétrica 10 kV/mm, atendendo o mercado de média e baixa tensão em temperatura ambiente, todavia, nos quatro ensaios não houve ruptura dielétrica, devido ao dispositivo de medição atingir seu limite de 10 kV, ou seja, todos os ensaios suportaram a tensão máxima do aparelho de medição 10 kV.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, em altas temperaturas, para os diferentes materiais termoelétricos

Isolante termoelétrico	Espessura (mm)	Temperatura Aplicada (°C)	Tensão máxima aplicada	Fuga de corrente (mA)	Tensão de ruptura dielétrica	Rigidez dielétrica (kV mm ⁻¹)
IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	1	300	10 kV	3,0	8	5
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	1	300	10 kV	3,0	6	5
IT5004-4 Bicomponente Óxi- Ferro	1	300	10 kV	3,0	8	5
IT2004-Mica Flexível	1	300	10 kV	3,0	7	5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Por meio da tabela 9 observa-se que foi aplicada a tensão 10 kV no limite superior de temperatura de trabalho 300 °C de cada isolante desenvolvido, todos os ensaios se comportaram com ruptura dielétrica, ou seja, os ensaios sugerem que quando se aplicou a temperatura a rigidez dielétrica diminui sua eficiência de isolação elétrica.

A tabela 9 nos mostra alto desempenho dos isolantes flexíveis em isolação elétrica quando aplicados na temperatura de trabalho solicitada, porém abaixo dos ensaios temperatura ambiente descrito na tabela 8. Todavia, mesmo em alta temperatura, continua isolando termoeletricamente 5 kV/mm.

5.2.5 Condutividade térmica

5.2.5.1 Ensaio de condutividade térmica a 25 ± 2 °C

Os resultados dos ensaios de condutividade térmica a 26 ± 1 °C dos materiais isolantes são mostrados nas Tabelas 10 a 13.

Tabela 10 - Valores Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT2004 MPS Mica Flexível (n=7)

Tabela 10 - Valores Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT2004 MPS Mica Flexível (n=7)		
Densidade (kg m^{-3})	1471,6	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	360,73	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,273	382,82	26,2
0,279	384,82	26,1
0,278	384,50	26,2
0,276	383,98	26,1
0,286	387,02	26,2
0,279	384,84	26,2
0,278	384,59	26,2
Média (0,279 \pm 0,003)	Média 384,66	Média 26,15

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 11 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro (n=7)

Tabela 11 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro (n=7)		
Densidade (kg m^{-3})	1230,2	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1128,16	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,453	792,64	25,7
0,455	794,66	25,7
0,456	795,79	25,7
0,456	796,34	25,7
0,454	793,93	25,7
0,453	793,31	25,7
0,453	793,10	25,7
Média (0,455 \pm 0,003)	Média 794,26	Média 25,7

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 12 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre. (n=7)

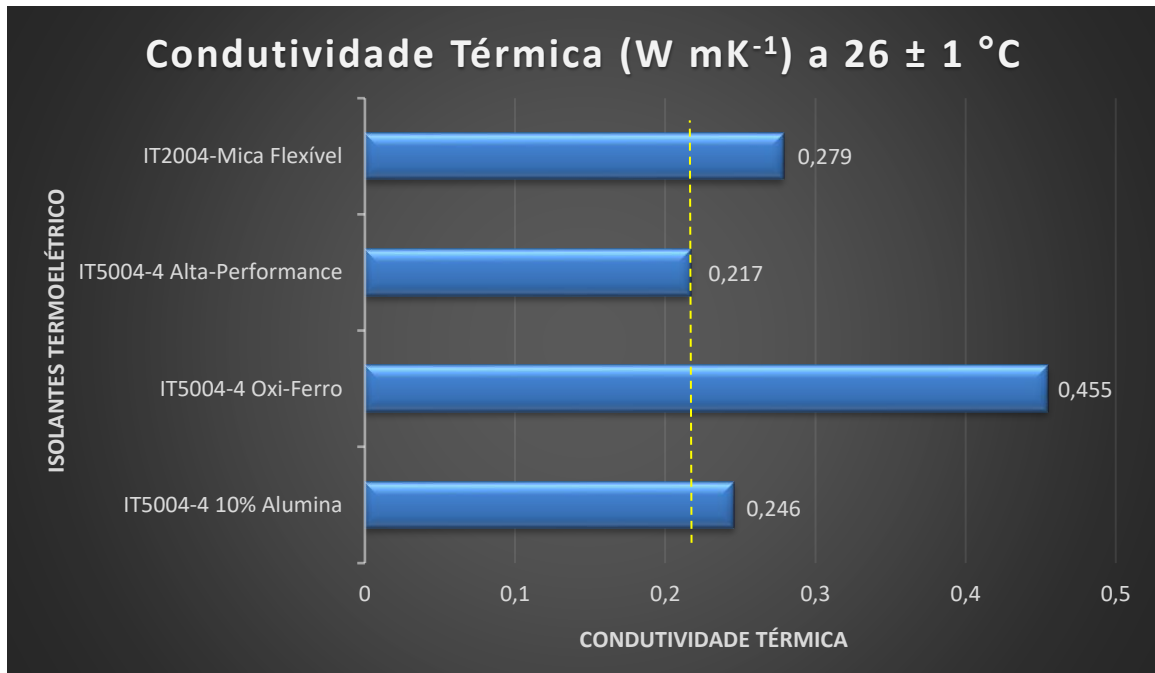
Densidade (kg m^{-3})	1401,5	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	959,41	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,217	541,07	25,5
0,217	541,11	25,5
0,218	542,31	25,5
0,218	542,00	25,5
0,211	534,52	25,4
0,217	541,20	25,5
0,217	540,40	25,5
Média (0,217 \pm 0,003)	Média 540,38	Média 25,5

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 13 - Condutividade térmica a 26 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina. (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1216,6	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1093,99	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,247	573,86	25,9
0,245	571,48	25,9
0,245	571,82	25,9
0,246	572,73	25,9
0,245	571,71	25,9
0,247	573,87	25,9
0,244	570,88	25,9
Média (0,246 \pm 0,003)	Média 572,34	Média 25,9

Fonte: Elaboração própria (2025)

Gráfico 1 - Resultado das medidas de condutividade térmica a $26 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 

Fonte: Elaboração própria (2025)

Por meio dos resultados apresentados nas Tabelas de 10 a 13 e resumido no Gráfico 1 pode-se notar que a condutividade térmica dos isolantes termoelétricos flexíveis ensaiados em temperatura ambiente são bastante próximas, indicando que a condutividade térmica quanto menor for, melhor é para a aplicação de isolantes termoelétricos flexíveis, pois ela reduz a radiação de calor na superfície externa.

A condutividade térmica é relativamente baixa devido ao reforço ser de fibra de vidro e mica, o que assegura a isolação da face quente do oposto da peça, resultado de uma baixa troca de calor. Assim, caracteriza-se uma vida útil maior do isolante por trabalhar mais frio e menor manutenção de baixa temperatura do componente.

5.2.5.2 Ensaio condutividade térmica a 100 ± 1 °C

Os resultados dos ensaios de condutividade térmica a 100 ± 1 °C dos materiais isolantes termoelétricos flexíveis são apresentados nas Tabelas 14 a 17.

Tabela 14 - Valores Condutividade térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT2004 Mica Flexível (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1471,6	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	959,88	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura (°C)
0,158	474,95	99,81
0,162	479,24	99,93
0,160	477,04	100,05
0,164	481,64	100,08
0,161	478,33	100,07
0,164	481,32	99,93
0,167	485,32	99,80
Média ($0,163 \pm 0,003$)	Média 479,70	Média 100,00

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 15 - Valores Condutividade térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1230,2	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1259,45	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura (°C)
0,114	424,12	99,9
0,116	427,02	100,3
0,118	429,27	100,5
0,123	435,35	100,7
0,118	429,29	100,5
0,122	433,80	100,3
0,124	436,01	100,1
Média ($0,120 \pm 0,003$)	Média 430,70	Média 100,4

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 16 - Valores Condutividade térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre. (n=7)

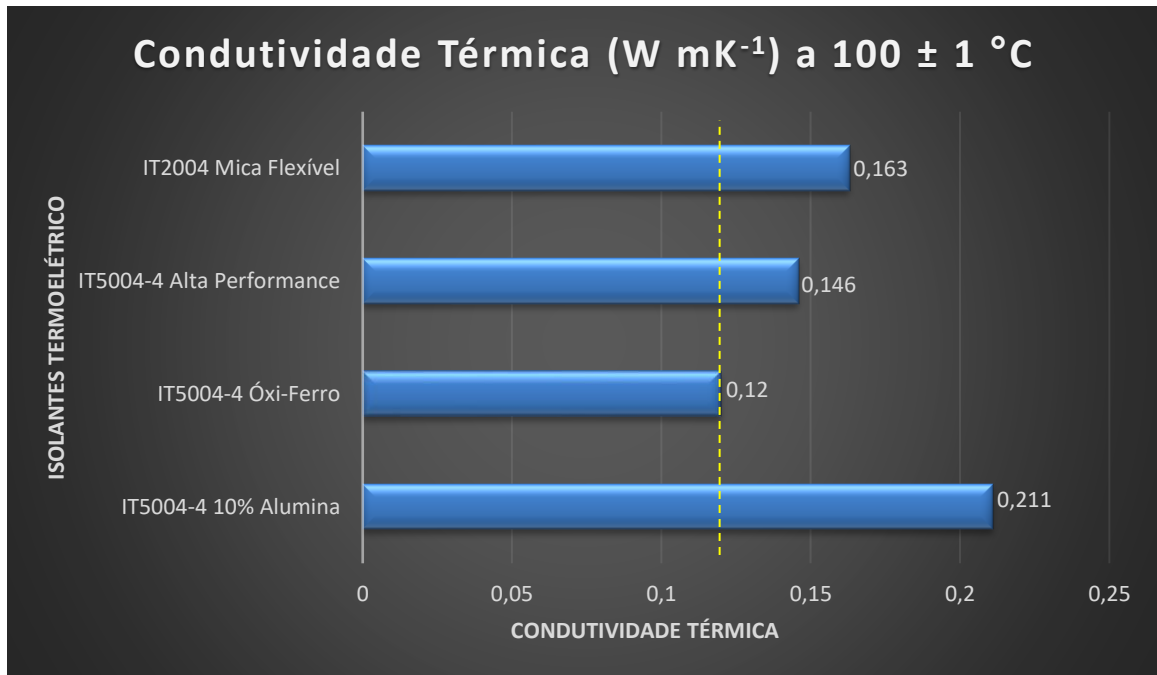
Densidade (kg m^{-3})	1401,5	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1036,35	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,147	462,03	101,1
0,144	458,85	100,9
0,146	461,43	100,8
0,146	460,64	100,6
0,144	458,59	100,4
0,146	460,85	100,1
0,147	462,65	99,5
Média (0,146 \pm 0,003)	Média 460,73	Média 100,5

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 17 - Valores Condutividade Térmica a 100 ± 1 °C do Isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina. (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1216,6	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1108,86	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,208	530,36	99,7
0,209	531,69	99,8
0,209	531,98	99,9
0,211	534,23	99,9
0,215	539,13	99,9
0,209	531,91	99,8
0,213	536,12	99,7
Média (0,211 \pm 0,003)	Média 533,64	Média 99,8

Fonte: Elaboração própria (2025)

Gráfico 2 – Resultado das medidas de condutividade térmica a $100 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 

Fonte: Elaboração própria (2025)

Conforme demonstrado na Tabela 14 a 17 e resumido no Gráfico 2, observa-se que os isolantes termoeletrônicos flexíveis apontam similaridade e baixa condutividade térmica, até menor que as medidas no Gráfico 1 em temperatura ambiente. Esses resultados demonstram elevada isolação térmica, inibindo a passagem de calor e atuando com sucesso em sua aplicação.

Observa-se que o Isolante IT5004-4 10% Alumina teve a condutividade térmica acima dos demais quando medida a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Este fenômeno induz a acreditar que é devido ao acréscimo de 10% de alumina que possui condutividade relativamente alta.

5.2.6 Calor específico

A Tabela 18 mostra os resultados das medidas dos ensaios Cp (calor específico) a $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $100 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ dos materiais isolantes termoelétricos flexíveis.

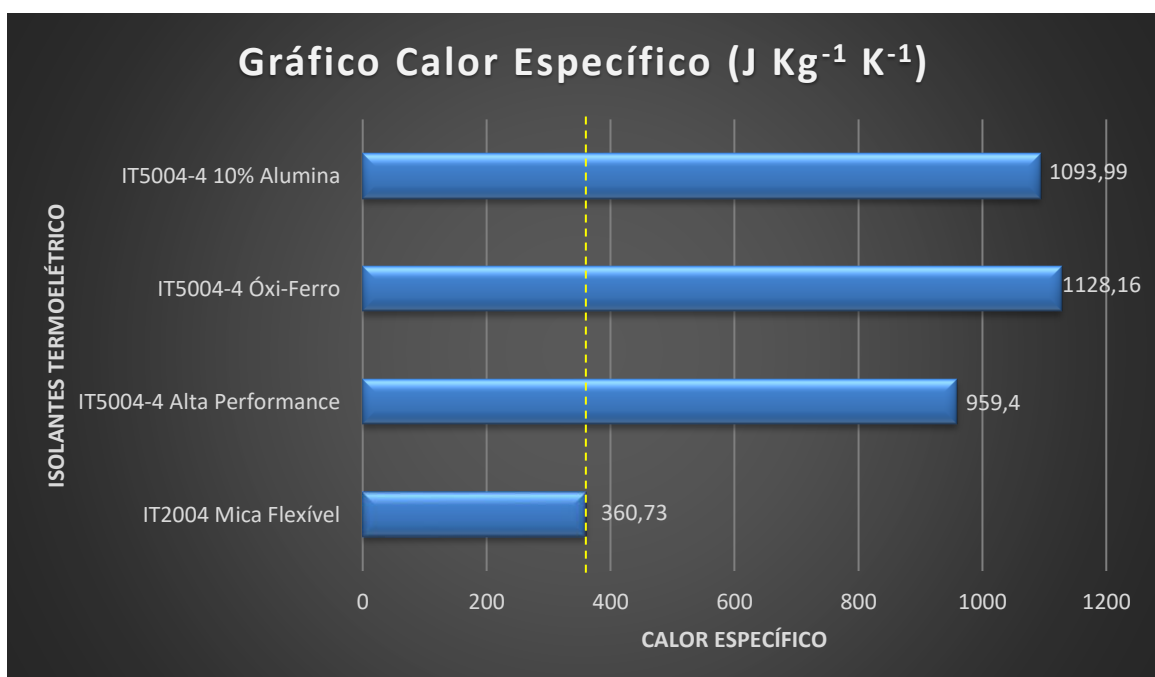
Tabela 18 – Valores de calor específico em ensaio a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

Isolante termoelétrico	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
IT2004 MPS Mica Flexível	25	360,73	100	959,87
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Mica	25	959,40	100	1036,34
IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	25	1128,16	100	1259,45
IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	25	1093,99	100	1108,85

Fonte: Elaboração própria (2025)

Pode-se observar na Tabela 18 e Gráfico 3 que os isolantes termoelétricos flexíveis a base de tecido de fibra de vidro com elastômero quando medidos em temperatura ambiente, mostram resultados próximos devido as características semelhantes.

Gráfico 3 – Resultado das Medidas do Calor Específico $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

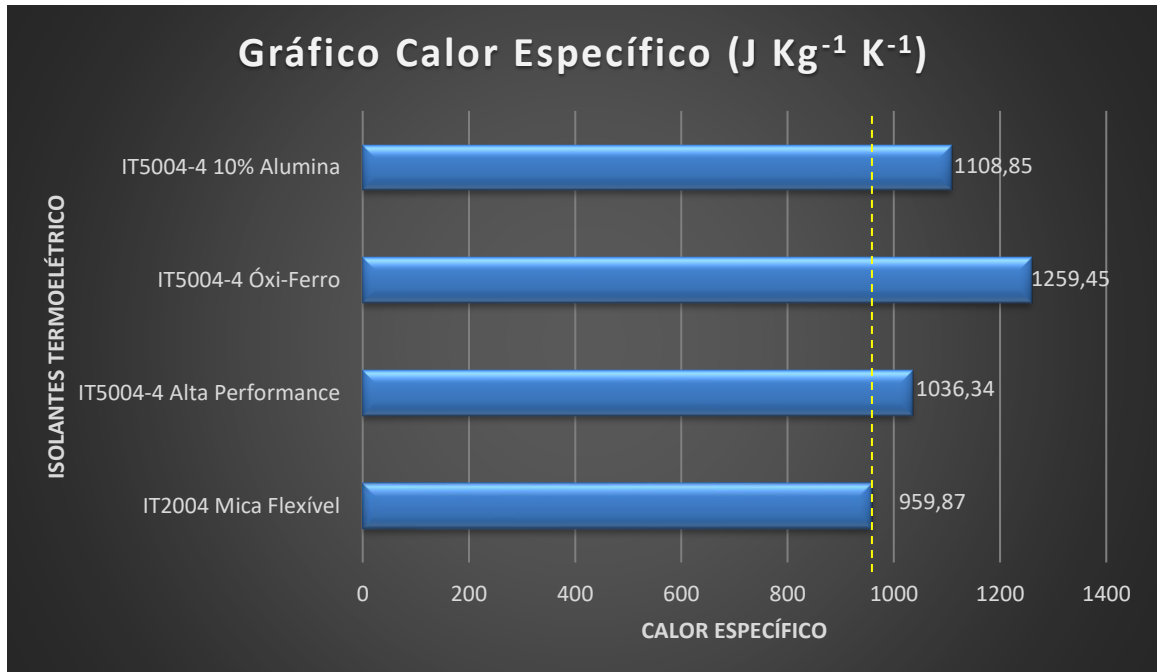


Fonte: Elaboração própria (2025)

Já o isolante IT2004 MPSF Mica Flexível apresenta característica diferente, pois necessita de menor energia do que as demais para o aumento de temperatura em 1 °C, ou seja, os isolantes a base de tecido de fibra com elastômero mostram-se sua melhor eficiência como cobertor térmico, com menor aumento efetivo de temperatura.

Pode-se observar na Tabela 18 e Gráfico 4 que os isolantes termoelétricos flexíveis melhor se equiparam, ainda assim o isolante IT2004 MPS Mica Flexível apresenta característica de condutividade térmica um pouco menor, pois necessita de menor energia do que as demais para aumentar a temperatura em 1 °C. Ou seja, os isolantes à base de tecido de fibra com elastômero mostram sua melhor eficiência como cobertor térmico quando medidos a 100 °C, resistindo à elevação de temperatura.

Gráfico 4 - Resultado das medidas do calor específico 100 °C ± 1°C



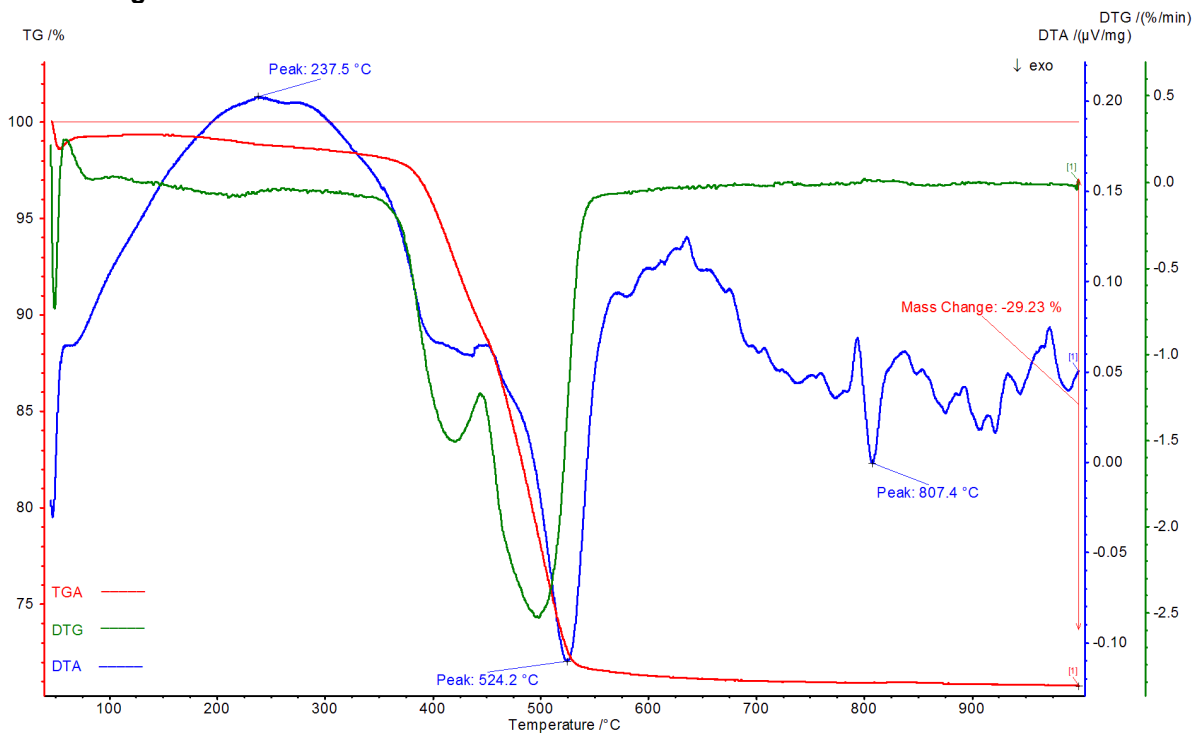
Fonte: Elaboração própria (2025)

5.2.7 Análise Térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização

Os resultados das análises termogravimétricas e DTA simultâneo dos materiais isolantes são mostrados nas Figuras 22 a 25.

As curvas TG (vermelho) mostram a diferença na degradação térmica dos isolantes.

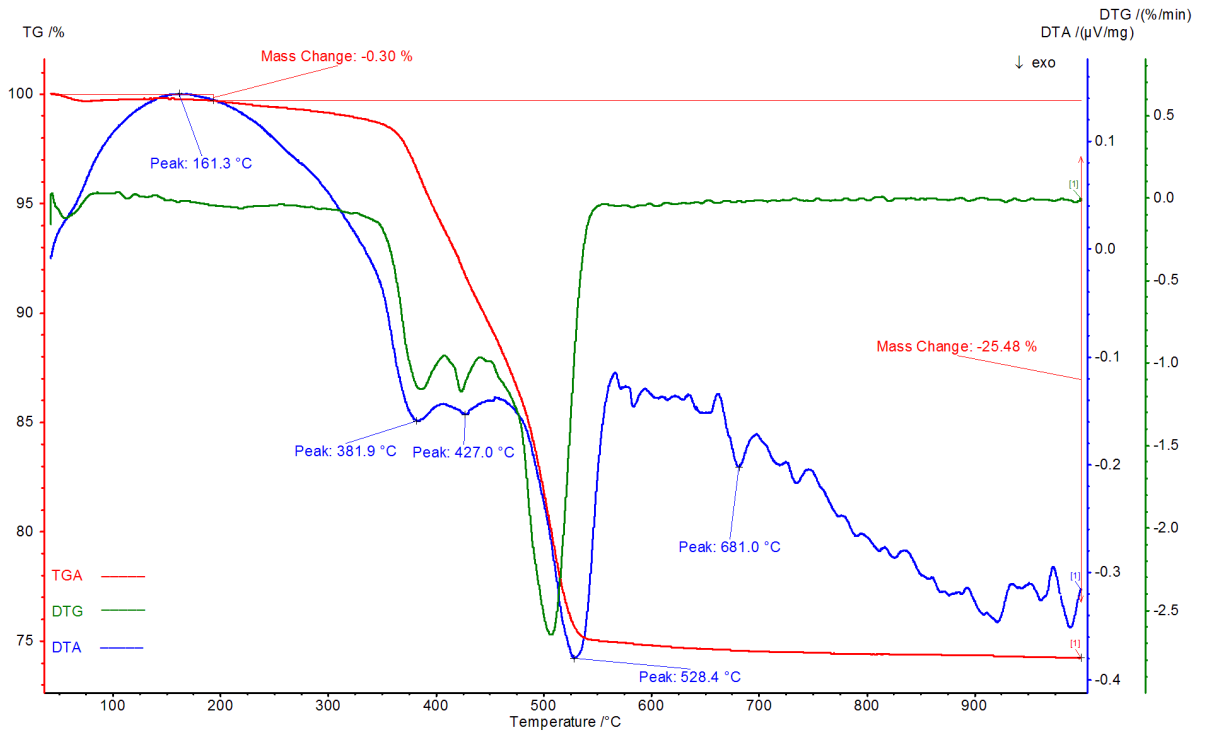
Figura 22 - Análise TG/DTA do Isolante IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre



Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 22 corresponde ao isolante IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre, sua estrutura é de tecido fibra de vidro texturizado e inflado, no mesmo foi espatulado o elastômero alta performance oxi-cobre e prensado a 10 t em temperatura ambiente. Este material isolante inicia a decomposição em temperatura de 380 °C e, ao final de 1000 °C, teve perda de massa de 29,23 %. Ou seja, atendeu às expectativas, operando acima do objetivo do desenvolvimento de 300 °C.

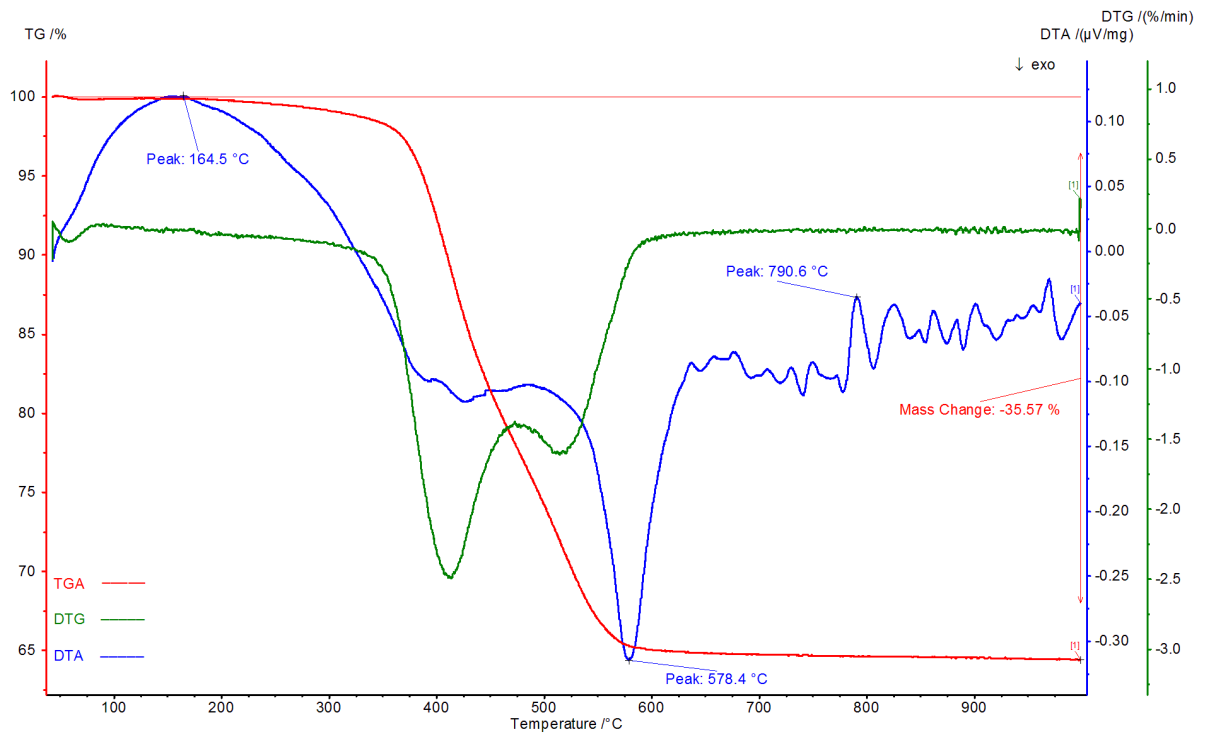
Figura 23 - Análise TG/DTA do Isolante IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro



Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 23 corresponde ao isolante IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, em que sua estrutura é de tecido de fibra de vidro texturizado e inflado. No mesmo foi espatulado o elastômero Bicomponente Oxi-Ferro e prensado a 10 t em temperatura 150 °C. Decompõe-se inicialmente em temperatura de 360 °C e, ao final de 1000 °C, teve perda de massa de 25,78 %. Sendo assim, sugere-se que atendeu às expectativas operando acima do objetivo do desenvolvimento de 300 °C.

Figura 24 - Análise TG/DTA do Isolante IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina

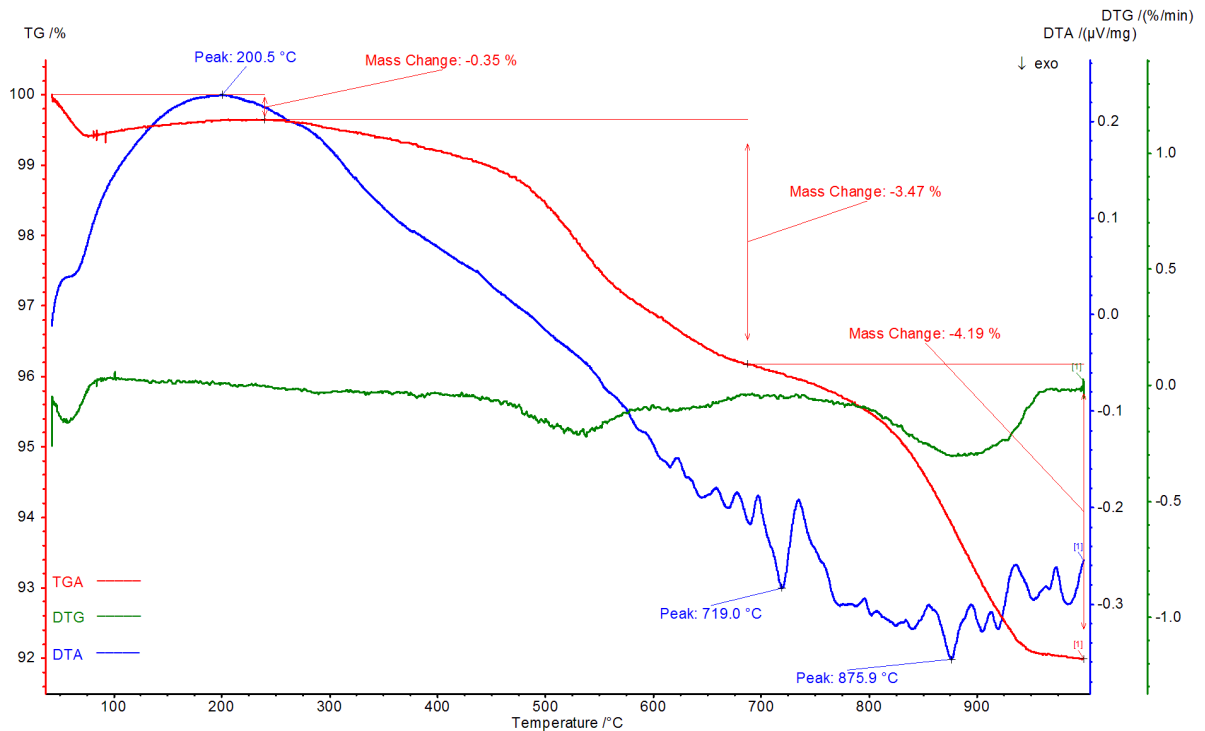


Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 24 corresponde ao isolante IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina, cuja estrutura é de tecido fibra de vidro texturizado e inflado. No mesmo foi espatulado o elastômero Bicomponente Azul e adicionado 10% de alumina e prensada a 10 t em temperatura de 150 °C. O início da decomposição ocorre a partir da temperatura de 350 °C e, ao final de 1000 °C, teve perda de massa de 35,57%.

Mediante os dados deste ensaio, sugere-se que o objetivo foi alcançado, operando acima do alvo do desenvolvimento à 300 °C.

Figura 25 - Análise TG/DTA do Isolante IT2004 MPS Mica Flexível



A Figura 25 corresponde ao isolante IT2004 MPSF Mica Flexível, cuja estrutura é de papel de mica moscovita 160 g/m², impregnado de resina de silicone inorgânica e prensada a 10 t em temperatura de 180 °C simultaneamente. A decomposição ocorre a partir de 500 °C e, ao final de 1000 °C, teve perda de massa de 8,01 %.

Este compósito em análise trouxe menor perda de massa entre os quatro ensaios realizados. Sugere-se que o objetivo foi alcançado, operando acima do valor almejado no desenvolvimento à 300 °C.

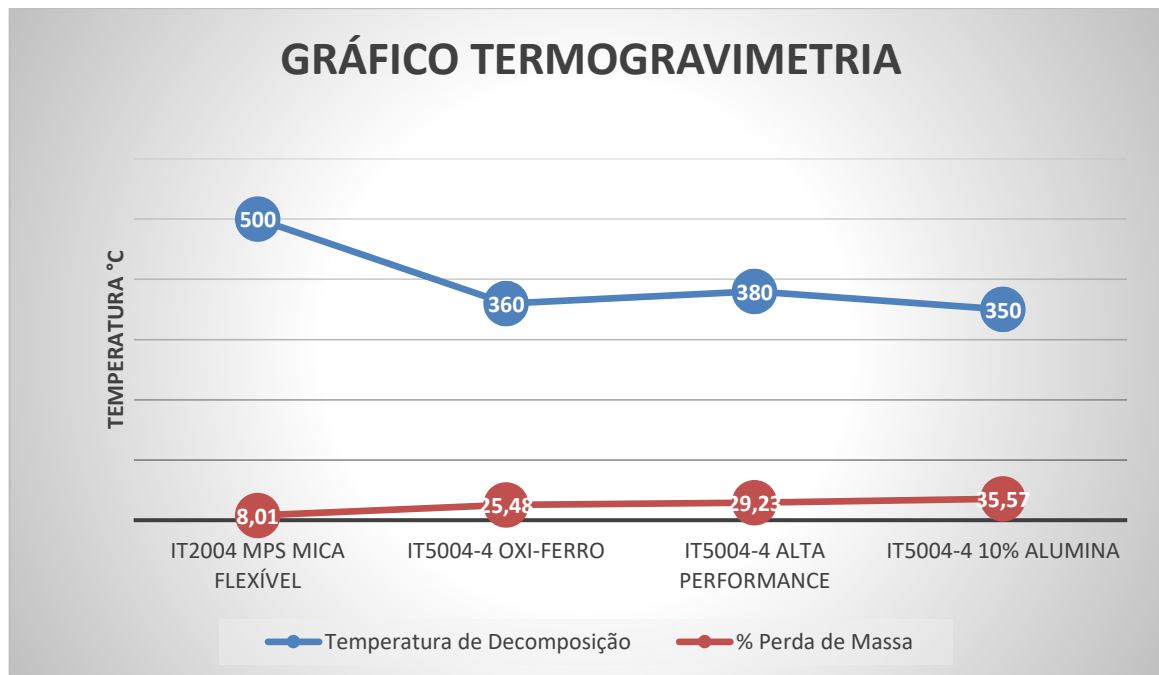
A Tabela 19 e o Gráfico 5 compilam os resultados de TG/DTA quanto à temperatura de decomposição e perda dos massa dos relativos isolantes.

Tabela 19 - Medidas de (TG/DTA) para as diferentes amostras.

Isolantes termoeletricos	Temperaturas de Decomposição (°C)	Perda de Massa (%)
IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	360	25,78
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	380	29,23
IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	350	35,57
IT2004 MPSF Mica Flexível	500	8,01

Fonte: Elaboração própria (2025)

Gráfico 5 - Resultado temperatura de decomposição/perda de massa



Fonte: Elaboração própria (2025)

Por meio da Tabela 19 e do Gráfico 5, observa-se que os isolantes termoeletricos flexíveis que se assemelham em sua estrutura, sendo o isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível de maior resistência a temperatura, vindo a se decompor a partir de 500 °C. Ao final de 1000 °C perdeu apenas 8,01% de massa. Esse resultado expressivo é superior aos demais, embora também mostrem alta performance acima de 300 °C.

5.2.8 Densidade

A Tabela 20 mostra as densidades medidas para os isolantes ensaiados segundo a Norma ISO 1183-1:2004.

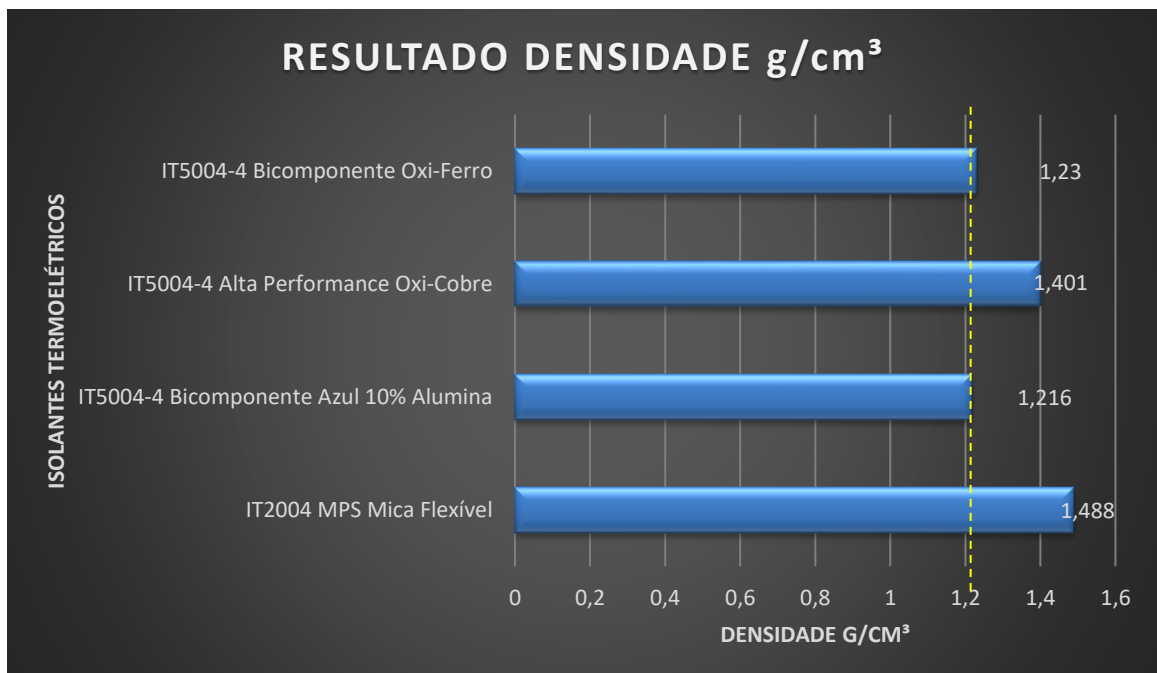
Tabela 20. Resultado de densidade segundo a norma ISO 1183-1:2004

ISOLANTE TERMOELÉTRICO FLEXÍVEL	DIMENSIONAL H x C x L mm	Massa (g)	DENSIDADE Kg/m ³
IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	51,3x52x3,5	11,5	1230,2
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	50,6x50,6x2,6	9,4	1401,6
IT5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina	49,6x48x4,7	13,7	1216,6
IT2004 MPS Mica Flexível	51,1x51,2x3,5	13,5	1487,9

Fonte: Elaboração própria (2025)

Por meio da Tabela 20 e gráfico 6 entende-se que os isolantes termoeletricos flexíveis são leves, de fácil aplicação e se mostram similares, pois tem compósitos similares. A exceção é o isolante IT2004 MPS Mica Flexível, que necessita em seu processo fabril de alta compactação para as ligas dos pré pregos, assim aumentando sua densidade.

Gráfico 6 – Resultado de Densidade



Fonte: Elaboração própria (2025)

5.2.9 Dureza

As escalas shore (A) são indicadas para a medição de dureza de borrachas/elastômeros e usadas também para plásticos “moles” como poliolefinas, fluoropolímeros e vinis. A escala A é usada para polímeros “moles ou menos duros” enquanto a escala D é usada para polímeros mais “duros” (CIMM, 2023).

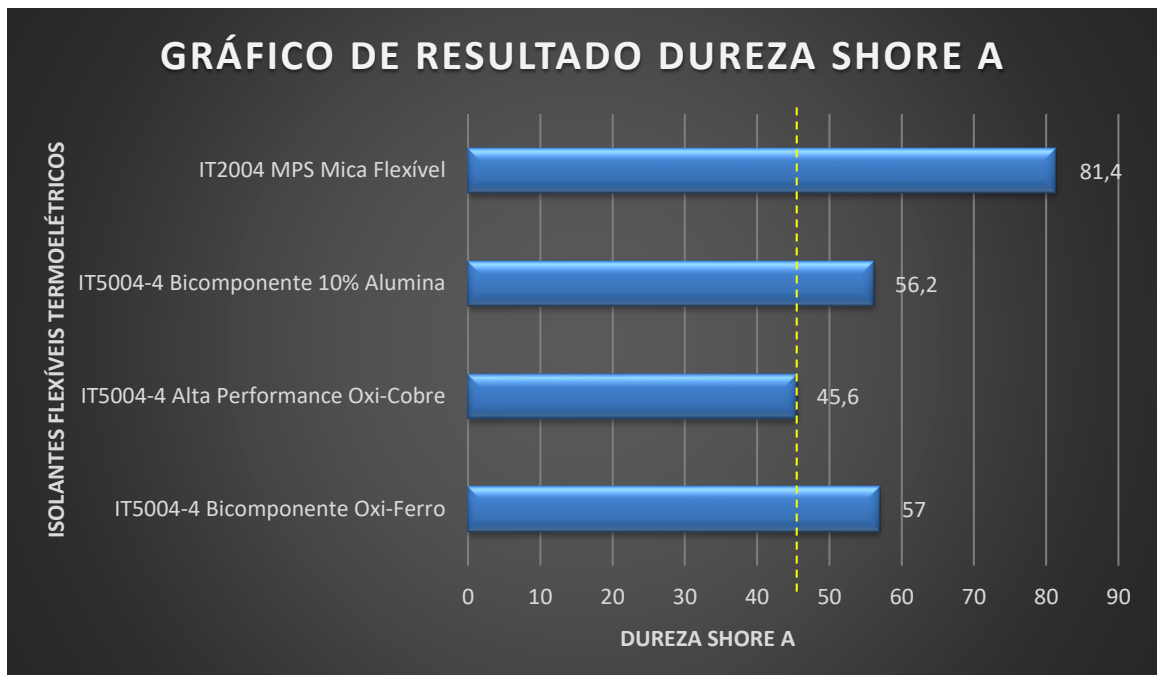
A Tabela 21 demonstra, segundo a norma ISO 868:2003 shore os resultados dos ensaios de dureza Shore A em cinco (5) pontos de medidas.

Tabela 21 - Resultado dureza ISO 868 shore A

Isolante termoeletrico	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Dureza Shore (A)
IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	56	57	60	57	55	57
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	48	47	44	47	42	45,6
IT5004-4 Bicomponente 10% Alumina	55	58	52	59	57	56,2
IT2004 MPS Mica Flexível	81	82	82	80	82	81,4

Fonte: Elaboração própria (2025)

Na Tabela 21 e o Gráfico 7 observa-se que a dureza Shore A dos isolantes termoeletricos flexiveis atendem a dureza proposta para polimeros flexiveis segundo a Norma ISSO 868, assim se moldando às instalações propostas.

Gráfico 7 - Valores de dureza shore A dos isolantes termoeletricos flexíveis.

Fonte: Elaboração própria (2025)

O isolante IT2004 MPS Mica Flexível se mostra com maior dureza devido a composição de mica e resina silicone compactada em alta temperatura, não utilizando tecido de fibra de vidro em sua composição. As demais se mantêm mais flexíveis e com menor dureza por apresentar alta concentração de elastômero e tecido estruturado de fibra de vidro.

5.2.10 Flamabilidade – Teste de Queima Vertical

Os resultados obtidos para o ensaio de flamabilidade vertical para a amostra IT 5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados do ensaio de flamabilidade (norma UL 94 V) para o primeiro conjunto de corpos de prova da amostra IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro

Amostra	Corpo de prova	Tempo de combustão [s]		Tempo de incandescência (t ₃) [s]	Observações	
		t1	t2		Atingiu suporte	Algodão
IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro	1	9	23	--	Não	Não
	2	7	24	--	Não	Não
	3	22	24	--	Não	Não
	4	18	18	--	Não	Não
	5	10	22	--	Não	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 23 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro no primeiro conjunto de corpos de prova.

Critérios	IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova (t ₁ ou t ₂) [s]	24
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova (somatória t ₁ + t ₂ de cada corpo de prova) [s]	159
Tempo máximo de queima + incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama (t ₂ + t ₃) [s]	24
Queima do corpo de prova até o prendedor por propagação da chama ou incandescência	Não
Queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas.	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com os resultados da Tabela 23, e aqueles descritos na Tabela 6 (norma UL94 V), por comparação, verifica-se que a amostra IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro pode ser classificada como V-1, conforme os critérios da norma UL-94 posição vertical.

Os resultados obtidos para o ensaio de flamabilidade vertical para a amostra IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de flamabilidade (norma UL 94 V) para a amostra IT5004-4 Alta-Performance Oxi-Cobre

Amostra	Corpo de prova	Tempo de combustão [s]		Tempo de incandescência (t ₃) [s]	Observações	
		t1	t2		Atingiu suporte	Algodão
IT5004-4 Alta-Performance Oxi-Cobre	1	1	54	--	Não	Não
	2	134	0	--	Não	Não
	3	122	-	--	Sim	Não
	4	160	0	--	Não	Não
	5	27	0	--	Não	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 25 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre.

Critérios	IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova (t ₁ ou t ₂) [s]	160
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova (somatória t ₁ + t ₂ de cada corpo de prova) [s]	498
Tempo máximo de queima + incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama (t ₂ + t ₃) [s]	54
Queima do corpo de prova até o prendedor por propagação da chama ou incandescência	Sim
Queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas.	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com os resultados da Tabela 25, e aqueles descritos na Tabela 6 (norma UL94 V), por comparação, verifica-se que a amostra IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre não pode ser classificada em nenhuma categoria, conforme os critérios da norma UL-94 posição vertical.

Os resultados obtidos para o ensaio de flamabilidade vertical para a amostra IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina, estão apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de flamabilidade (norma UL 94 V) para a amostra IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina

Amostra	Corpo de prova	Tempo de combustão [s]		Tempo de incandescência (t ₃) [s]	Observações	
		t1	t2		Atingiu suporte	Algodão
IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina	1	3	10	--	Não	Não
	2	4	36	--	Não	Não
	3	6	23	--	Não	Não
	4	0	35	--	Não	Não
	5	4	12	--	Não	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 27 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina

Critérios	IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova (t ₁ ou t ₂) [s]	36
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova (somatória t ₁ + t ₂ de cada corpo de prova) [s]	133
Tempo máximo de queima + incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama (t ₂ + t ₃) [s]	36
Queima do corpo de prova até o prendedor por propagação da chama ou incandescência	Não
Queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas.	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com os resultados da Tabela 27, e aqueles descritos na Tabela 6 (norma UL94 V), por comparação, verifica-se que a amostra IT5004-4 Bi-Componente Azul 10% Alumina não pode ser classificada em nenhuma categoria, conforme os critérios da norma UL-94 posição vertical, nos quais a Tabela 5, o tempo máximo de queima é $\leq 30s$, no qual os CPs 1, 3 e 5 ficaram abaixo, caracterizando V-1 e os CPs 2 e 4 ficaram 35 e 36, excedendo os 30s.

Os resultados obtidos para o ensaio de flamabilidade vertical para a amostra IT2004 – MPS Mica Flexível estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de flamabilidade (norma UL 94 V) para a amostra IT2004 - MPSF Mica Flexível

Amostra	Corpo de prova	Tempo de combustão [s]		Tempo de incandescência (t ₃) [s]	Observações	
		t1	t2		Atingiu suporte	Algodão
IT2004 – MPS Mica Flexível	1	0	0	--	Não	Não
	2	0	0	--	Não	Não
	3	0	0	--	Não	Não
	4	0	0	--	Não	Não
	5	0	0	--	Não	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 29 - Avaliação dos critérios para classificação da amostra (UL 94 V) IT2004 - MPSF Mica Flexível

Critérios	IT2004 – MPSF Mica Flexível
Tempo máximo de queima de cada corpo de prova (t ₁ ou t ₂) [s]	0
Tempo total de queima do conjunto de 5 corpos de prova (somatória t ₁ + t ₂ de cada corpo de prova) [s]	0
Tempo máximo de queima + incandescência de cada corpo de prova após a segunda aplicação da chama (t ₂ + t ₃) [s]	0
Queima do corpo de prova até o prendedor por propagação da chama ou incandescência	Não
Queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas.	Não

Fonte: Elaboração própria (2025)

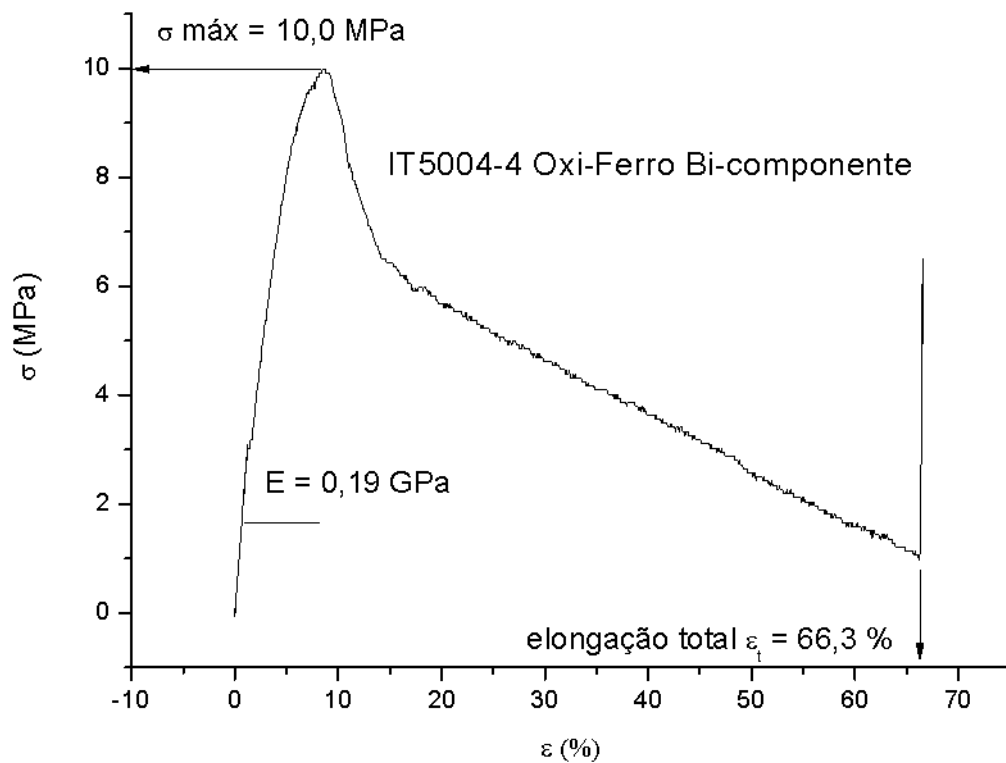
De acordo com os resultados da Tabela 29, e aqueles descritos na Tabela 6 (norma UL94 V), por comparação, verifica-se que a amostra IT2004 – MPSF Mica Flexível pode ser classificada como V-0, conforme os critérios da norma UL-94 posição vertical.

5.2.11 Resistência Mecânica

Tipo de análise/serviço: Determinação de propriedades mecânicas em ensaio de tração; normas ISO 527 e ISO 37:2024.

Condições de análise: amostra tipo A1; velocidade de avanço 5 mm/min, L₀ 60 mm, Largura 13 mm, Espessura 3,40 mm.

Figura 26 - Resultado do ensaio de tração isolante flexível IT5004-4 Oxi-Ferro Bi-Componente



Fonte: Elaboração própria (2025)

Legenda/ Valores

$\sigma_{\text{máx}}$ = tensão de limite de resistência = 10,0 MPa.

E = módulo de elasticidade = 0,19 GPa.

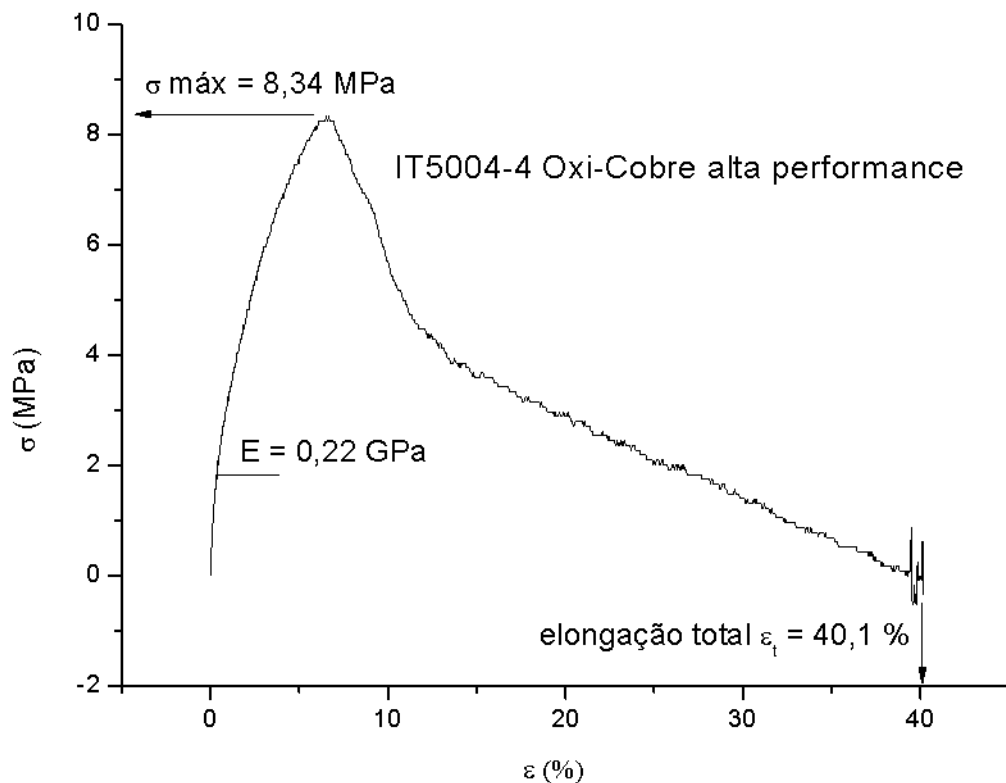
ε_t = deformação da ruptura = 66,3 %.

A Figura 26, demonstra que o isolante IT5004-4 Oxi-Ferro Bi-Componente é material de considerável flexibilidade e maleabilidade, com E = 0,19 GPa.

Tipo de análise/serviço: Determinação de propriedades mecânicas em ensaio de tração; normas ISO 527 e ISO 37:2024.

Condições de análise: amostra tipo A2; velocidade de avanço 5 mm/min, L_0 70 mm, Largura 12,7 mm, Espessura 3 mm.

Figura 27 – Resultado do Ensaio de Tração Isolante Flexível IT5004-4 Oxi-Cobre Alta Performance



Fonte: Elaboração própria (2025)

Legenda/ Valores

$\sigma_{\text{máx}}$ = tensão de limite de resistência = 8,34 MPa.

E = módulo de elasticidade = 0,22 GPa.

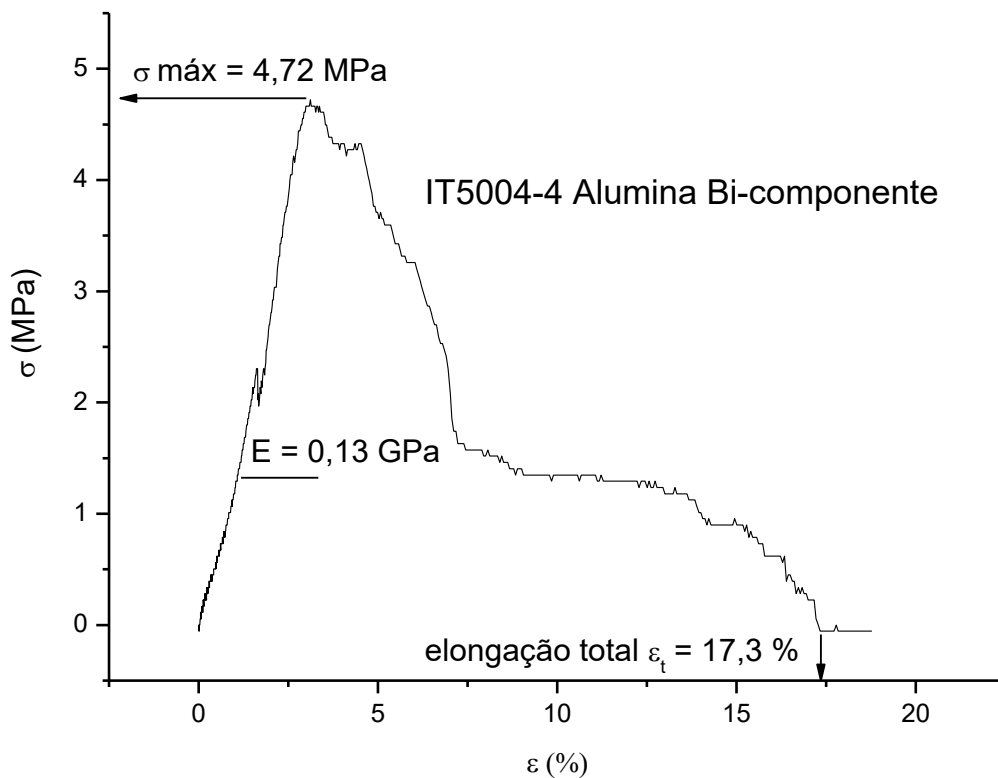
ε_t = deformação da ruptura = 40,1 %.

A Figura 27, demonstra que o isolante IT5004-4 Oxi-Cobre Alta Performance é material de considerável flexibilidade e maleabilidade, com $E = 0,22 \text{ GPa}$.

Tipo de análise/serviço: Determinação de propriedades mecânicas em ensaio de tração; normas ISO 527 e ISO 37:2024.

Condições de análise: amostra tipo A3; velocidade de avanço 5 mm/min, L₀ 75 mm, Largura 12,4 mm, Espessura 4,80 mm.

Figura 28 – Resultado do Ensaio de Tração Isolante Flexível IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina



Fonte: Elaboração própria (2025)

Legenda/ Valores

σ máx = tensão de limite de resistência = 4,72 MPa.

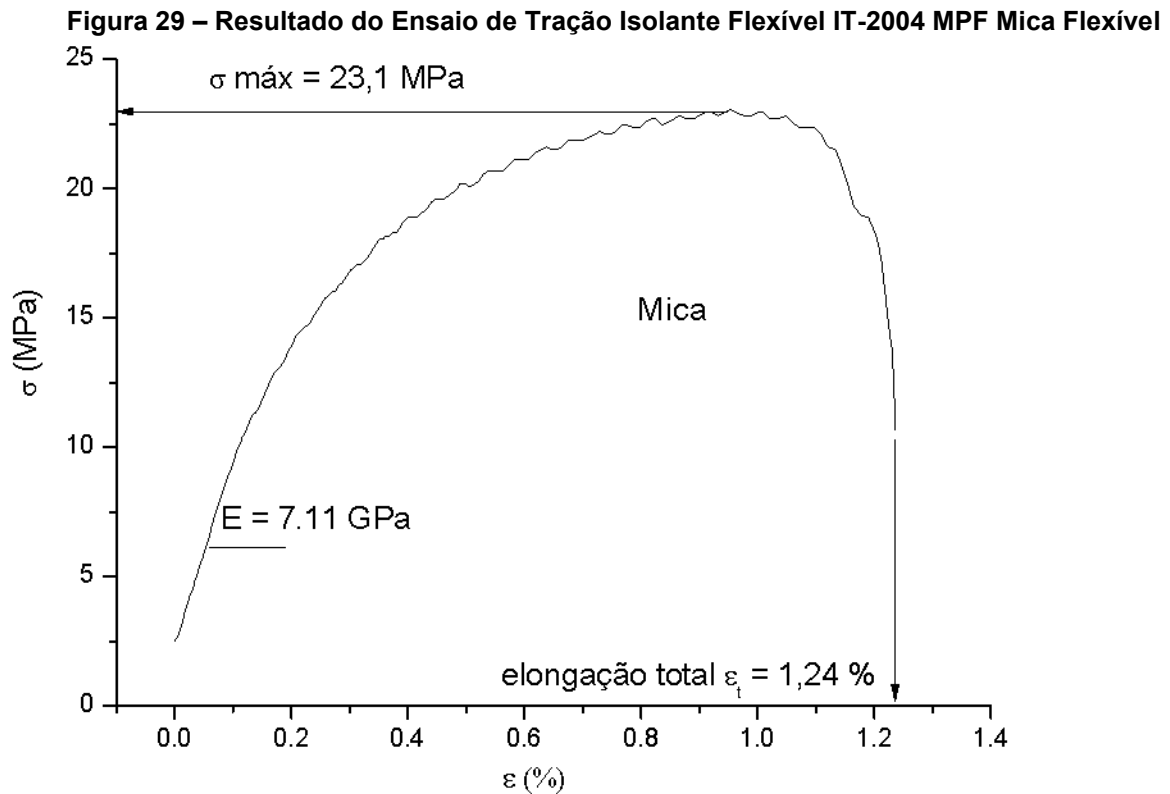
E = módulo de elasticidade = 0,13 GPa.

ϵ_t = deformação da ruptura = 17,3 %.

A Figura 28, demonstra que o isolante IT5004-4 Bi-Componente 10% Alumina é material de considerável flexibilidade e maleabilidade, com E = 0,13 GPa.

Tipo de análise/serviço: Determinação de propriedades mecânicas em ensaio de tração; normas ISO 527 e ISO 37:2024.

Condições de análise: amostra tipo A4; velocidade de avanço 5 mm/min, L₀ 70 mm, Largura 13 mm, Espessura 3,20 mm.



Fonte: Elaboração própria (2025)

Legenda/ Valores

$\sigma_{\text{máx}}$ = tensão de limite de resistência = 23,1 MPa.

E = módulo de elasticidade = 7,11 GPa.

ϵ_t = deformação da ruptura = 1,24 %.

A Figura 29, demonstra que o isolante IT-2004 MPF Mica Flexível é material de menor flexibilidade comparada as 3 amostras anteriores, porém de considerável flexibilidade e maleabilidade, com $E = 7,11 \text{ GPa}$.

Conforme demonstrado na tabela 30, todos os isolantes flexíveis demonstraram ser flexíveis, pois apresentaram baixo módulo de elasticidade, ainda que flexível, o isolante IT2004 MPS Mica flexível apresentou módulo de elasticidade superior aos demais isolantes, sugere-se que ocorreu devido a carga de 90% de mica e apenas 10% se resina silicone. Todavia, todos os ensaios de tração, entende-se que apresentaram resultados satisfatórios.

Tabela 30 - Tabela de ensaio de tração de materiais isolantes flexíveis

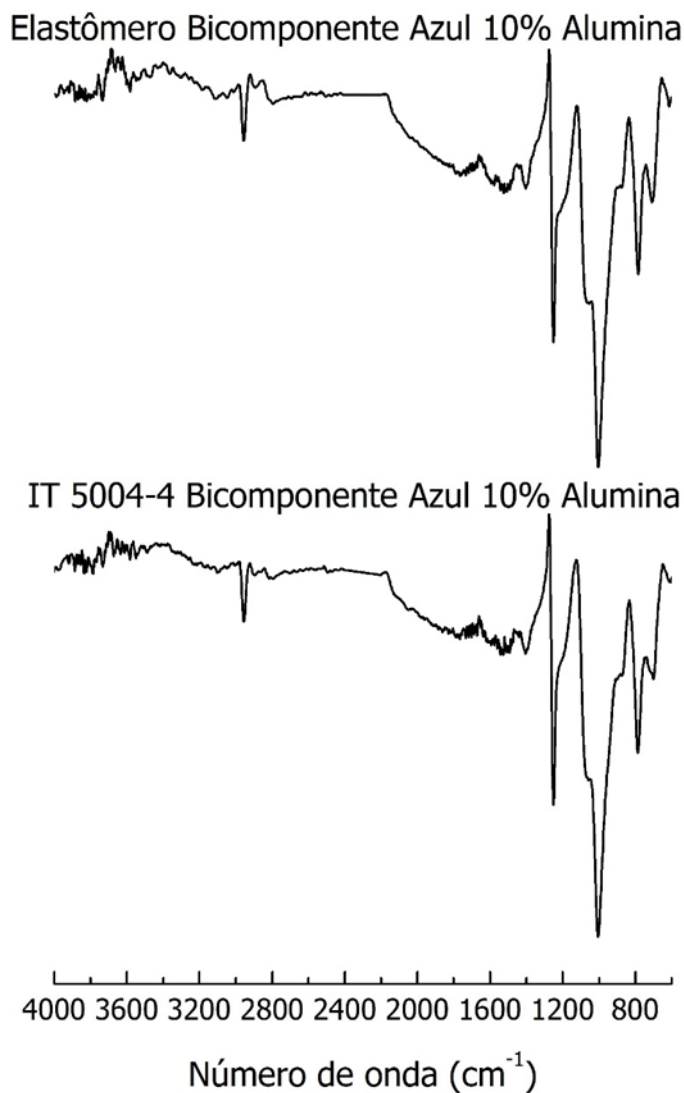
Isolante Termoelétrico flexíveis	Tensão de limite de resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação da ruptura (%)	Velocidade de avanço (mm/min.)
IT5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro	10	0,19	66,3	5
IT5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre	8,34	0,22	40,1	5
IT5004-4 Bicomponente 10% Alumina	4,72	0,13	17,3	5
IT2004 MPS Mica Flexível	23,1	7,11	1,24	5

Fonte: Elaboração própria (2025)

5.2.12 Espectroscopia por Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectrogramas obtidos por FTIR para as resinas no estado sólido (Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina, Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro, Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre e Resina Silicone Flexível) e para os seus respectivos compósitos isolantes (IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina, IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre e IT 2004 MPSF Mica Flexível) são apresentados nas Figuras 30 a 33, respectivamente.

Figura 30 - Espectrograma de FTIR do Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina e do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina



Número de onda (cm^{-1})

Fonte: Elaboração própria (2025)

Os espectrogramas do Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina e o compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina (Figura 30) apresentaram os mesmos grupamentos químicos. Estes grupamentos são característicos da resina silicone RTV e da alumina que estão presentes na estrutura do elastômero e do compósito polimérico. Quando os dois espectrogramas foram comparados, não foram observadas alterações significativas, o que indica que a adição do tecido de fibra de vidro ao Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina, para a obtenção do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina, não ocasionou interações/ reações químicas, uma vez que, a estrutura química do elastômero não foi modificada.

Os espectrogramas do Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina e do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina apresentaram semelhanças com os espectrogramas encontrados na literatura para o polímero de silicone PDMS (polidimetilsiloxano) e a resina silicone RTV. Os picos na faixa de $3786,27 - 3732,26 \text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento do grupamento hidroxila (O – H), o pico na faixa de $2956,87 - 2954,95 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação C – H do grupamento Si – CH₃, o pico na faixa de $1404,18 - 1394,53 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de flexão da ligação C – H, o pico em $1251,80 \text{ cm}^{-1}$ corresponde às vibrações de deformação simétrica do grupamento Si – CH₃ e o pico em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação Si – O do grupamento Si – O – Si (Azhar et al., 2025; Chacon et al., 2024; Wen et al., 2017; Zhai et al., 2020).

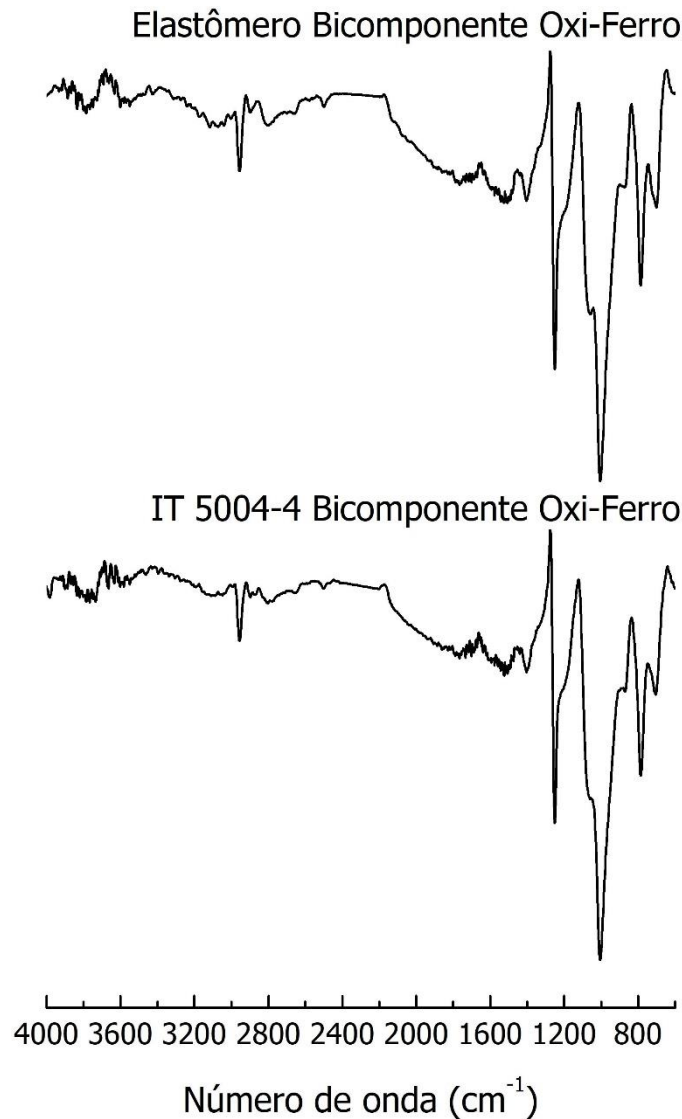
De acordo com An et al. (2020), o espectrograma de FTIR da fibra de vidro apresenta apenas um pico amplo em 1000 cm^{-1} que é atribuído à vibração de estiramento da ligação Si – O do dióxido de silício (SiO₂) presente na estrutura da fibra de vidro (An et al., 2020). Com base nisso, é possível inferir que o tecido de fibra de vidro não interagiu / reagiu com o elastômero, uma vez que, não ocorreu o aumento da intensidade do pico em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$, após a adição do tecido de fibra de vidro ao Elastômero Bicomponente Azul 10% Alumina para a obtenção do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina.

Os picos na faixa de $877,61 - 785,03 \text{ cm}^{-1}$ correspondem aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₂ e o pico na faixa de $709,80 - 702,09 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₃ e aos grupamentos

fenil presentes na estrutura da resina silicone RTV. Esses picos são característicos de resinas silicone RTV, uma vez que estas resinas apresentam os grupamentos metil e fenil em sua estrutura química (Chacon et al., 2024; Wen et al., 2017; Wu et al., 2017).

Devido à presença de 10% de alumina no elastômero e no compósito polimérico, os picos na faixa de $1734,01 - 1523,76 \text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídos às vibrações de flexão do grupamento hidroxila (O – H) das moléculas de água (H₂O) adsorvidas em óxidos metálicos (Duarte; Guilherme, 2021), os picos na faixa de $1404,18 - 1394,53 \text{ cm}^{-1}$ e em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$ também podem ser atribuídos às vibrações de flexão e estiramento das ligações Al – O, o pico na faixa de $877,61 - 875,68 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído às ligações Al – O – Al e o pico na faixa de $786,96 - 785,03 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído à vibração de estiramento da ligação Al – O (Egzar et al., 2022; Nagarajan et al., 2023; Sharma et al., 2024).

Figura 31 - Espectrograma de FTIR do Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro e do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro



Fonte: Elaboração própria (2025)

Os espectrogramas do Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro e o compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro (Figura 31) apresentaram os mesmos grupamentos químicos. Estes grupamentos são característicos da resina silicone RTV e do óxido de ferro III (Fe_2O_3) que estão presentes na estrutura do elastômero e do compósito polimérico. Quando os dois espectrogramas foram comparados, não foram observadas alterações significativas, o que indica que a adição de tecido de fibra de vidro ao Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro, para a obtenção do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, não ocasionou interações/ reações químicas, uma vez que, a estrutura química do elastômero não foi modificada.

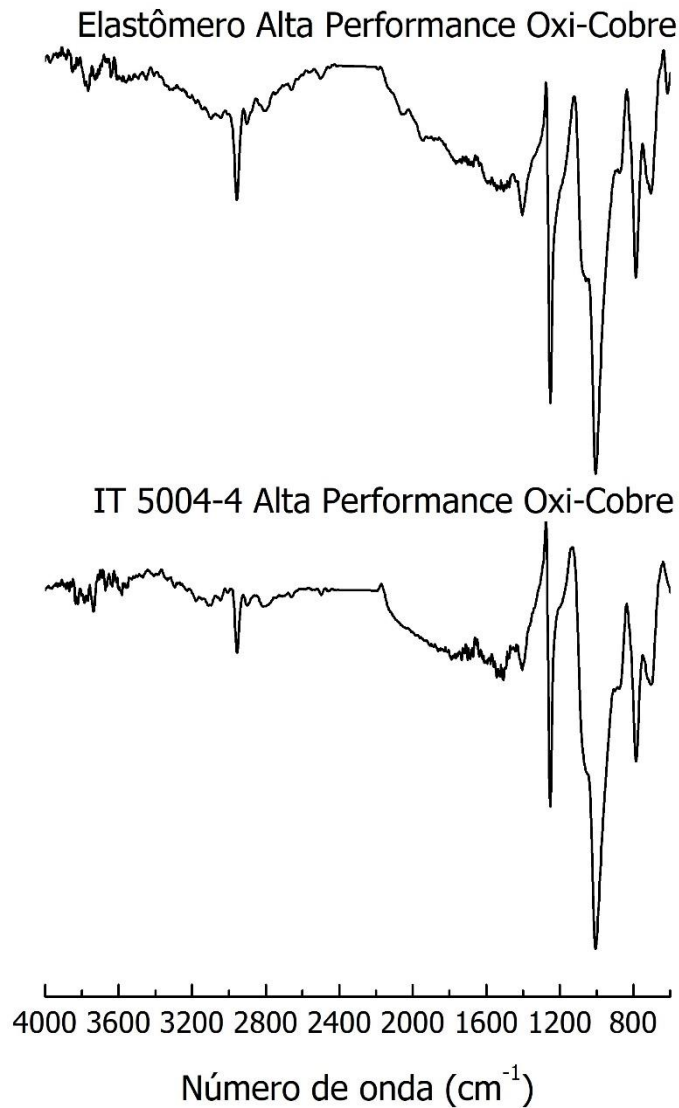
Os espectrogramas do Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro e do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro apresentaram semelhanças com os espectrogramas encontrados na literatura para o polímero de silicone PDMS (polidimetilsiloxano) e a resina silicone RTV. Os picos na faixa de $3786,27 - 3601,10 \text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento do grupamento hidroxila (O – H), o pico na faixa de $2956,87 - 2954,95 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação C – H do grupamento Si – CH₃, o pico em $1404,18 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de flexão da ligação C – H, o pico em $1251,80 \text{ cm}^{-1}$ corresponde às vibrações de deformação simétrica do grupamento Si – CH₃ e o pico na faixa de $1006,84 - 1004,91 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação Si – O do grupamento Si – O – Si (Azhar *et al.*, 2025; Chacon *et al.*, 2024; Wen *et al.*, 2017; Zhai *et al.*, 2020).

De acordo com An *et al.* (2020), o espectrograma de FTIR da fibra de vidro apresenta apenas um pico em 1000 cm^{-1} que é atribuído à vibração de estiramento da ligação Si – O do dióxido de silício (SiO₂) presente na estrutura da fibra de vidro (An *et al.*, 2020). Com base nisso, é possível inferir que o tecido de fibra de vidro não interagiu/ reagiu com o elastômero, uma vez que, não ocorreu o aumento da intensidade do pico em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$, após a adição do tecido de fibra de vidro ao Elastômero Bicomponente Oxi-Ferro para a obtenção do compósito isolante IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro.

Os picos na faixa de $871,82 - 786,96 \text{ cm}^{-1}$ correspondem aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₂ e o pico na faixa de $704,02 - 700,16 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₃ e aos grupamentos fenil presentes na estrutura da resina silicone RTV. Esses picos são característicos de resinas silicone RTV, uma vez que estas resinas apresentam os grupamentos metil e fenil em sua estrutura química (Chacon *et al.*, 2024; Wen *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017).

Devido à presença de óxido de ferro III (Fe₂O₃) no elastômero e no compósito polimérico, os picos na faixa de $1757,15 - 1525,69 \text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídos às vibrações de flexão do grupamento hidroxila (O – H) das moléculas de água (H₂O) adsorvidas em óxidos metálicos (Duarte; Guilherme, 2021) e o pico na faixa de $704,02 - 700,16 \text{ cm}^{-1}$ também pode ser atribuído à vibração de estiramento da ligação Fe – O presente no Fe₂O₃ (Farahmandjou; Soflaee, 2015; Sobhanardakani *et al.*, 2018).

Figura 32 - Espectrograma de FTIR do Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre e do compósito isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre



Fonte: Elaboração própria (2025)

Os espectrogramas do Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre e do compósito isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre (Figura 32) apresentaram os mesmos grupamentos químicos. Estes grupamentos são característicos da resina silicone RTV e do óxido de cobre I (Cu₂O) que estão presentes na estrutura do elastômero e do compósito polimérico. Quando os dois espectrogramas foram comparados, não foram observadas alterações significativas, o que indica que a adição de tecido de fibra de vidro ao Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre, para a obtenção do compósito isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre, não ocasionou interações/ reações químicas, uma vez que, a estrutura química do elastômero não foi modificada.

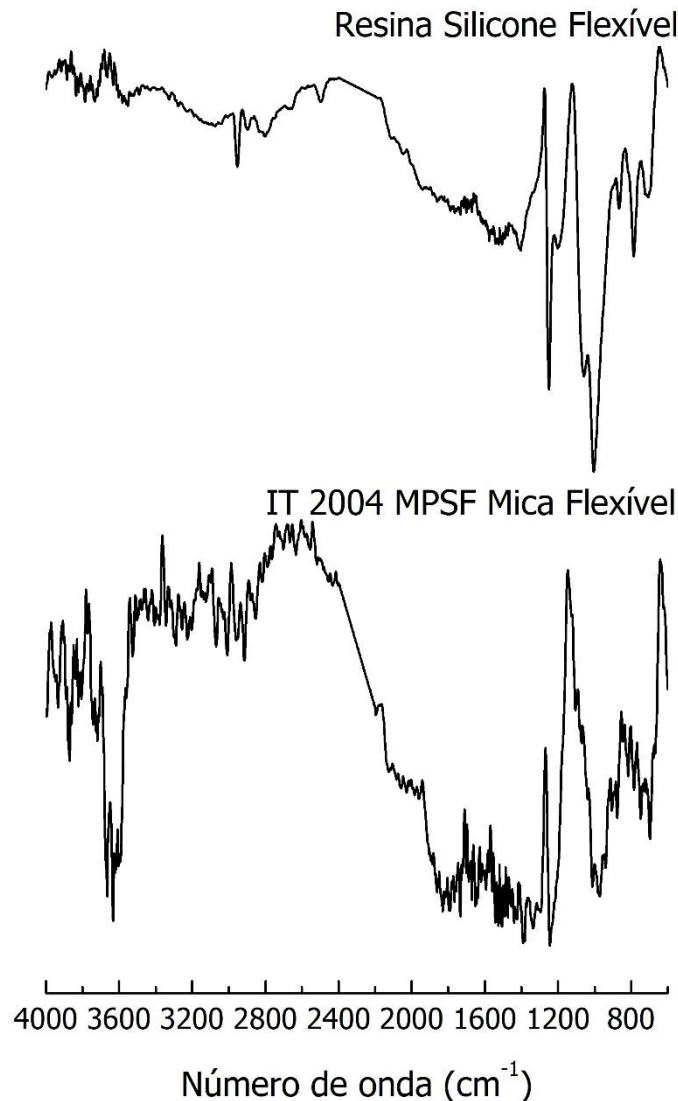
O espectrograma do Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre e do compósito isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre apresentaram semelhanças com os espectrogramas encontrados na literatura para o polímero de silicone PDMS (polidimetilsiloxano) e a resina silicone RTV. Os picos na faixa de $3765,05 - 3591,46 \text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento do grupamento hidroxila (O – H), o pico na faixa de $2956,87 - 2954,95 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação C – H do grupamento Si – CH₃, o pico na faixa de $1404,18 - 1396,46 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de flexão da ligação C – H, o pico em $1251,80 \text{ cm}^{-1}$ corresponde às vibrações de deformação simétrica do grupamento Si – CH₃ e o pico em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação Si – O do grupamento Si – O – Si (Azhar et al., 2025; Chacon et al., 2024; Wen et al., 2017; Zhai et al., 2020).

De acordo com An et al. (2020), o espectrograma de FTIR da fibra de vidro apresenta apenas um pico em 1000 cm^{-1} que é atribuído à vibração de estiramento da ligação Si – O do dióxido de silício (SiO₂) presente na estrutura da fibra de vidro (An et al., 2020). Com base nisso, é possível inferir que o tecido de fibra de vidro não interagiu/ reagiu com o elastômero, uma vez que, não ocorreu o aumento da intensidade do pico em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$, após a adição do tecido de fibra de vidro ao Elastômero Alta Performance Oxi-Cobre para a obtenção do compósito isolante IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre.

Os picos na faixa de $879,54 - 785,03 \text{ cm}^{-1}$ correspondem aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₂ e o pico na faixa de $704,02 - 698,23 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₃ e aos grupamentos fenil presentes na estrutura da resina silicone RTV. Esses picos são característicos de resinas silicone RTV, uma vez que, estas resinas apresentam os grupamentos metil e fenil em sua estrutura química (Chacon et al., 2024; Wen et al., 2017; Wu et al., 2017).

Devido à presença de óxido de cobre I (Cu₂O) no elastômero e no compósito, os picos na faixa de $1789,94 - 1506,41 \text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídos às vibrações de flexão do grupamento hidroxila (O – H) das moléculas de água (H₂O) adsorvidas em óxidos metálicos (Duarte; Guilherme, 2021) e o pico na faixa de $704,02 - 698,23 \text{ cm}^{-1}$ também pode ser atribuído à vibração de estiramento da ligação Cu – O presente no Cu₂O (Torres-Ramos et al., 2024; Wu; Xu; Jiang, 2020).

Figura 33 - Espectrograma de FTIR da Resina Silicone Flexível e do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível



Número de onda (cm⁻¹)

Fonte: Elaboração própria (2025)

Os espectrogramas da Resina Silicone Flexível e do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível (Figura 33) apresentaram alguns grupamentos químicos em comum. Esses grupamentos são característicos da Resina Silicone Flexível. Quando os dois espectrogramas foram comparados, foram observadas alterações significativas, decorrentes da presença da mica moscovita no compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível. Isto indica que a adição de papel de mica moscovita 160 g/m² à Resina Silicone Flexível, para a obtenção do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível, ocasionou interações/ reações químicas, uma vez que, a estrutura química da Resina Silicone Flexível foi modificada e ocorreu o aparecimento de

grupamentos químicos característicos da mica moscovita no espectrograma do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível.

O espectrograma da Resina Silicone Flexível apresentou semelhanças com os espectrogramas encontrados na literatura para o polímero de silicone PDMS (polidimetilsiloxano). Os picos na faixa de $3786,27 - 3550,95 \text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento do grupamento hidroxila (O – H), o pico em $2953,02 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação C – H do grupamento Si – CH₃, o pico em $1406,11 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de flexão da ligação C – H, o pico em $1249,87 \text{ cm}^{-1}$ corresponde às vibrações de deformação simétrica do grupamento Si – CH₃ e o pico em $1004,91 \text{ cm}^{-1}$ corresponde ao estiramento da ligação Si – O do grupamento Si – O – Si. Os picos na faixa de $866,04 - 786,96 \text{ cm}^{-1}$ correspondem aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₂ e o pico em $707,88 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₃ (Azhar et al., 2025; Wen et al., 2017; Zhai et al., 2020).

O espectrograma do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível apresentou semelhanças com o espectrograma encontrado na literatura para a mica gigante. O pico em $972,12 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação Si – O, os picos na faixa de $817,82 - 748,38 \text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento da ligação Al – O e o pico em $696,30 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuído às vibrações de flexão das ligações Si – O – Al (Deniz, 2022). Entretanto, diferentemente da mica gigante, o isolante IT2004-MPSF apresentou picos na faixa de $3672,47 - 3622,32 \text{ cm}^{-1}$ que correspondem à vibração de estiramento do grupamento hidroxila (O – H) (Deniz, 2022; Ribeiro et al., 2022).

Além disso, o espectrograma do compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível apresentou semelhanças com os espectrogramas encontrados na literatura para a mica moscovita. O pico em $1645,28 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de flexão do grupamento hidroxila (O – H) das moléculas de água (H₂O) adsorvidas na mica moscovita, o pico em $972,12 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento das ligações Si – O – Si dos silicatos, o pico em $877,61 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de estiramento da ligação Al – O – Al dos aluminatos, os picos na faixa de $817,82 - 748,38 \text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento das ligações Al – O e Al – O – Al e o pico em $696,30 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração de flexão das ligações Si – O – Al e Si – O – Si (Ismail et al., 2022; Luo et al., 2021; Singha; Singh, 2016).

O espectrograma desse compósito isolante apresentou semelhanças com os espectrogramas encontrados na literatura para o polímero de silicone PDMS (polidimetilsiloxano). Os picos na faixa de 3718,76 – 3288,63 cm^{-1} correspondem à vibração de estiramento do grupamento hidroxila (O – H), o pico em 2914,44 cm^{-1} corresponde à vibração de estiramento da ligação C – H do grupamento Si – CH₃, o pico em 1390,68 cm^{-1} corresponde à vibração de flexão da ligação C – H, o pico em 1244,09 cm^{-1} corresponde às vibrações de deformação simétrica do grupamento Si – CH₃ e o pico em 972,12 cm^{-1} corresponde ao estiramento da ligação Si – O do grupamento Si – O – Si. Os picos na faixa de 877,61 – 785,03 cm^{-1} correspondem aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₂ e o pico em 696,30 cm^{-1} pode ser atribuído aos grupamentos metil (–CH₃) presentes em Si(CH₃)₃ (Azhar et al., 2025; Wen et al., 2017; Zhai et al., 2020).

Nesse contexto, é importante ressaltar que o pico na faixa de 1010 – 972,12 cm^{-1} pode ser observado nos espectrogramas dos compósitos isolantes IT 5004-4 Bicomponente Azul 10% Alumina, IT 5004-4 Bicomponente Oxi-Ferro, IT 5004-4 Alta Performance Oxi-Cobre e IT 2004 MPSF Mica Flexível. Entretanto, este pico apresentou deslocamento e diminuição da intensidade no compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível. O pico na faixa de 1010 – 972,12 cm^{-1} corresponde à vibração de estiramento das ligações Si – O – Si presentes na cadeia principal do PDMS (polidimetilsiloxano) e caracteriza a estrutura distinta de siloxano silício-oxigênio (Si – O) presente no silicone. Desta forma, nesse contexto, é importante destacar que a excelente resistência ao calor e as propriedades mecânicas (flexibilidade, resistência à tração, adesão e resistência ao impacto) das resinas de silicone estão relacionadas à presença dessas fortes ligações Si – O – Si em sua estrutura (Azhar et al., 2025).

A diminuição da intensidade deste pico no compósito isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível pode ser explicada pelo fato desse compósito polimérico apresentar o menor percentual de resina silicone flexível (10%) (Tabela 5), o que explica a menor flexibilidade do isolante IT 2004 MPSF Mica Flexível (Figura 29), em comparação com os três isolantes IT 5004-4, que apresentam percentuais de resina silicone RTV na faixa de 30 – 35% (Tabela 5).

5.3 Estudo exploratório para inserção do produto no mercado nacional

Após as análises técnicas e comparativas do novo isolante termoelétrico flexível desenvolvido, esta seção busca apresentar os resultados do estudo para a inserção do produto no mercado nacional.

5.3.1 Mapeamento de segmentos industriais-alvo

O mapeamento de segmentação consiste em um grande grupo que é identificado a partir de suas preferências, poder de compra, localização geográfica, atitudes de compra e hábitos de compra similares. O mapeamento inicialmente consiste em atendimento ao mercado nacional, em empresas que solicitam soluções em materiais isolantes termoelétricos flexíveis, empresas que devido a sua necessidade ajudam a financiar a pesquisa, desenvolvimento e fabricação. Após atendimento pleno a estes clientes, se abre a possibilidade de mapear novo mercado no mesmo segmento.

5.3.2 Levantamento de potenciais clientes e concorrentes

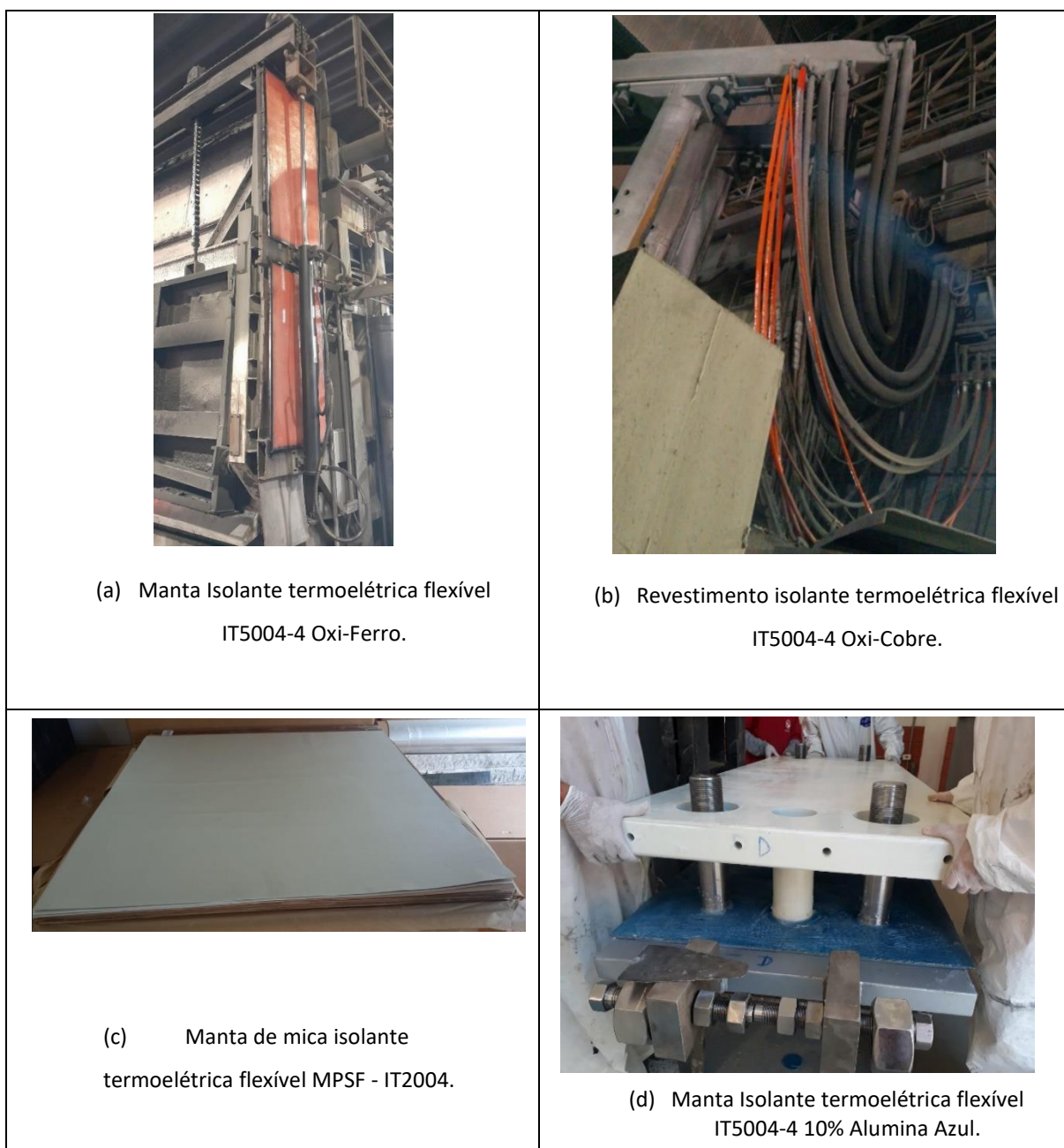
No conceito de mercado da concorrência podemos identificar que concorrentes são empresas que atendem as mesmas necessidades dos clientes, todavia o isolante flexível desenvolvido é inovador e específico, desenvolvido sob as necessidades e exigências dos clientes do mercado de fundição, fornos FEA, fornos a indução, cubas eletrolíticas e outros que necessitam de proteção termoelétrica flexível, quer seja cliente final como usuários dos fornos (siderurgias) e clientes fabricantes de fornos.

Os principais clientes que incentivaram a pesquisa e estão introduzindo os isolantes termoelétricos flexíveis são empresas de fundição que deram abertura para esta oportunidade e estão localizadas principalmente no sul e sudeste do Brasil, havendo posteriormente oportunidade de abrangência para todo território nacional.

5.3.3 Análise de custo-benefício comparativo

Mostra-se na Figura 34 (a, b, c, d), o caso de cada isolante termoeletrico desenvolvido nesta tese, sendo introduzido no mercado nacional.

Figura 34 - Caso de Sucesso Isolantes Termoeletrico Flexível



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na Figura 34 (a), manta isolante termoeletrica flexível IT5004-4 Oxi-Ferro, o isolante flexível foi instalado na parede do forno de cura de tarugo de alumínio, onde

a radiação do calor estava comprometendo a vida útil do pistão hidráulico aparente, exigindo a manutenção corretiva periódica. A partir da instalação do isolante flexível, não houve mais a necessidade da manutenção do pistão, aumentando a sua vida útil e o protegendo da radiação de calor.

Na Figura 34 (b), revestimento isolante termoelétrica flexível IT5004-4 Oxi-Cobre, estas mangueiras hidráulicas NBR não eram revestidas termicamente, a qual devido a radiação do calor, dificultava a passagem dos fluidos, chegando a bloquear a passagem. Este fato compromete o equipamento e há necessidade de parada corretiva do forno FEA e troca da mangueira. Após revestir as mangueiras com o isolante flexível, a vida útil foi aumentada, não havendo mais entupimento das mangueiras, deixando o canal livre para os fluidos e sem parada para manutenção corretiva. Esta mesma aplicação estão se multiplicando por toda a aciaria.

Na Figura 34 (c), a manta de mica isolante termoelétrica flexível MPSF - IT2004, foi desenvolvida para ser aplicada principalmente na isolação elétrica para alta temperatura > 500 °C. Conforme demonstrado pelos ensaios, em razão da flexibilidade, o isolante se molda à necessidade mecânica para diversas aplicações no mercado e fundição e elétrica.

Na Figura 34 (d), a manta isolante termoelétrica flexível IT5004-4 10% Alumina Azul, é aplicada no braço do forno FEA, entre outros fornos, para acomodar o isolante termorrígido, de forma que corrija a planicidade da placa metálica, evitando a entrada de contaminantes com pó, óleo e água, evitando possível fechamento de arco elétrico.

Os quatro itens desenvolvidos estão em processo implantação mercadológica, sendo oferecidos como solução segundo suas características, portanto sem substituição de isolantes existentes e sim aperfeiçoando processo e equipamentos existentes, aumentando a vida útil do mesmo, potencializando a produção e reduzindo custo de parada para manutenção, processo e conseqüentemente produto final.

6 CONCLUSÕES

Foram realizados diversos ensaios nos isolantes termoelétricos flexíveis, afim de que possa se concluir que;

- O ensaio de rigidez dielétrica mostrou resultados que atendem aos objetivos, atingindo 5 kV/mm de Isolação elétrica, mesmo a 300 °C de temperatura;
- A medida de dureza Shore A utilizada em borrachas e elastômeros se manteve dentro dos limites de aceitação Shore A,
- A condutividade térmica medida atingiu o objetivo quando ensaiada à 25 °C, alcançando 0,217 a 0,455 W/mK, e quando ensaiada à 100 °C, alcançando 0,120 a 0,163 W/mK, ou seja, mesmo aumentando a temperatura se manteve a baixa condutividade;
- O calor específico atingiu o objetivo quando ensaiado à 25 °C e 100 °C, com valores de 360,73 a 1093,99 J/kgK e 959,87 a 1259,45 J/kgK, mostrando que o material demanda certa energia para se aquecer;
- A Densidade 1,216 a 1,488 kg/m³ demonstra a sua leveza para fácil aplicação, mobilidade e flexibilidade.
- A temperatura de decomposição com início de perda de massa a 350 °C, chegando a 500 °C mostram a eficiência do trabalho a alta temperatura proposto como objetivo inicial de 300 °C.
- O Ensaio (norma UL 94 V) de flamabilidade realizado na CCDM/UFSCAR São Carlos-SP, classificou o isolante IT5004-4 Bi-Componente Oxi-Ferro como V-1 e o isolante IT2004 – MPS Mica Flexível como V-0.

Enfim, o trabalho demonstra, por meio de números e ensaios, que o isolante termoelétrico flexível é um excelente isolante podendo atender a classificação térmica 300 °C da Norma ABNT NBR IEC 60085 Isolação Elétrica – Avaliação e designação Térmicas.

A matéria-prima do compósito utilizado para a fabricação dos isolantes flexível, é produzido em território nacional, facilitando a logística e a disponibilidade.

Os quatro isolantes termoelétricos desenvolvidos nesta tese já estão sendo fabricados pela empresa Itel Isolantes, “financiadora desta tese”, e comercializados no mercado nacional, atendendo principalmente o mercado de fundições e metalurgias.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR IEC 60085:2017 Isolação elétrica - Avaliação e designação térmicas. Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 21 set. 2017. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=91555>>. Acesso em: 30 out. 2022

ALUMINIO, Revista. **Alumina**. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/especial-alumina-conheca-a-historia-de-sua-producao-e-aplicacoes/>. Acesso em: 02 nov. 2025.

AN, Lu et al. A scalable crosslinked fiberglass-aerogel thermal insulation composite. **Applied Materials Today**, [s. l.], v. 21, p. 100843, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100843>.

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais** / Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé; São Paulo: Cengage Learning, 2011.

ASTM. **D149:2020 Current add to watchlist standard test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies. American Society for Testing and Materials**, 1 jan. 2020.

ASTM INTERNATIONAL. **Designation: D 709-01 Standard Specification for Laminated Thermosetting Materials 1**. [s.l: s.n.].

AZHAR, Muhammad Hanif et al. Electrical and Mechanical Properties of Silicone Electrically Conductive Adhesive (ECAs) Filled Graphene-Carbon Black (GR-CB). **Science Letters**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 1–12, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.24191/scl.v19i1.5868>.

BARBOSA Filho, Antonio Nunes – **Projeto e desenvolvimento de produtos** / Antonio Nunes Barbosa Filho. - - São Paulo: Atlas, 2009.

BIELINSKI, D. M.et al. - **Ceramizable silicone rubber-based composites** - Technical University of Lodz, Faculty of Chemistry, Institute of Polymer and Dye Technology, 2011. Institute for Engineering of Polymer Materials and Dyes, Elastomers and Rubber Technology Division, 30 Harcerska Str., 05-820 Piastow, Poland.

BEZERRA, Daniella Cibele - **Revestimento de isoladores elétricos utilizando borracha de silicone/ alumina trihidratada/ nanosílica** – Campina Grande - Paraíba, 2014. Tese (doutorado) – Ciências e Engenharia de Materiais.

BONOMO, Angela – **Estudo sobre isoladores poliméricos à base de resina poliuretana para ambiente externo**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia São Carlos – Universidade de São Paulo, 2003. Engenharia Elétrica.

BOONE. Louis E. **Marketing Contemporâneo** / Louis E. Boone, David L. Kurtz; São Paulo: Cengage Learning, 2010.

BOSS, S. L. B.; CALUZI, J. J. Uma breve biografia de Stephen Gray (1666-1736). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 1, p. 1602–1609, mar. 2010.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. [s.l.] Grupo Gen-LTC, 2021. v. 10ª Edição

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **TÉCNICAS E CARACTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS**. São Paulo: [s.n.].

CHACON, Luis A. et al. Chemical and structural degradation of room temperature vulcanizing (RTV) silicone at high temperatures. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 220, p. 110661, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110661>.

CARVALHO, L. M.; DE JESUS, V. **História da Eletricidade**. [s.l.: s.n.].

CIMM. Durometro Shore. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6563-o-durometro-shore. Acesso 05 nov. 2025.

COSER, Eliane – **Caracterização da borracha de silicone utilizadas em isoladores para rede elétrica**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2009. Programa de Pós Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais.

DENIZ, Kiymet. Mica Types as Indication of Magma Nature, Central Anatolia, Turkey. **Acta Geologica Sinica (English Edition)**, [s. l.], v. 96, n. 3, p. 844–857, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14670>.

DONALD R. Askeland, Pradeep P. Phulé. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DUARTE, Guilherme Mendes; GUILHERME, Luciana Rebelo. Avaliação do Óxido de Ferro como Atenuante para Degradação Fotolítica do Fármaco Montelucaste. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 1069–1081, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210029>.

EDUFSCAR. **Engenharia de Materiais para Todos**. [s.l.: s.n.]. v. 2ª edição

ELOISA BIASOTTO MANO. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. Em: São Paulo: [s.n.].

EGZAR, Hanaa Kadtem et al. Electrochemical preparation of aluminum oxide nanoparticles and using for remove chromotrope-E122 dye. **International journal of health sciences**, [s. l.], v. 6, p. 7613–7620, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns3.7764>.

FARAHMANDJOU, Majid; SOFLAEE, Farzane. Synthesis and characterization of α -Fe₂O₃ nanoparticles by simple co- precipitation method. **Physical Chemistry Research**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 191–196, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.22036/pcr.2015.9193>.

FERRANTE, Maurizio, Seleção de Materiais / Maurizio ferrante, 3º ed. – São Carlos: EdUFSCar, 2013.

FURTINI, A. C. C. et al. Compósitos laminados de gesso com reforço de polpa celulósica e manta de juta. **Conjecturas**, v. 22, n. 9, p. 257–270, 17 ago. 2022.

GARBIM, Valdemir José – **Borrachas: tecnologia, caraterísticas, compostos e aplicações**. – Rio de Janeiro – RJ. - - Publit 2011.

GOMES, Manuel Morato. **Borracha de Silicone (Q)**. Disponível em: <https://www.rubberpedia.com/borrachas/borracha-silicone.php>. Acesso em: 7 dez. 2024.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 527-1:2012 **Plastics** — Determination of tensile properties — Part 1: General principles 2º Edição. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 868-2003 Dureza Shore**Reference number ISO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iso.ch>.

ISMAIL, Nor Hafizah Che et al. Novel intercalation mechanism of cationic surfactants modified muscovite. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 66, p. 4084–4087, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.114>.

ISO. **ISO 1183-1:2004 Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics — Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method**. International Organization for Standardization, fev. 2004. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/27790.html>>. Acesso em: 30 out. 2022

JUNCA, Eduardo – Estudo da separação e aproveitamento da parte metálica e dos óxidos presentes no resíduo gerado no corte de rochas ornamentais / E. Junca. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

KHAN, Hidayatullah ¹, Muhammad Amin ² e Ayaz Ahmad ³. **Características dos compósitos de silicone para isolamentos de alta tensão**. Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia da Informação COMSATS, Wah Cantt, 47040, Paquistão, 01 jan. 2018.

KOTLER, Philip, **Administração de Marketing: a edição do novo milênio** / Philip Kotler; São Paulo: Prentice Hall, 2000.

LI, S., Zhong, L., Li, J., e outros.: **'Breve histórico e progresso da pesquisa sobre sólidos dielétricos de engenharia na China'**, IEEE Electr. Insul. Mag. 2010.

LAZARINI, Rafael Gouveia, **Relatório de Ensaio LCP25-000054-Ver.00 CCDM/UFSCar São Carlos -SP, 11-03-2025**.

LEVY NETO, F.; CLÁUDIO PARDINI, L. **Compósitos Estruturais**. [s.l: s.n.]. v. 1º edição

LUO, Dongxia et al. Trichoderma viride involvement in the sorption of Pb(II) on muscovite, biotite and phlogopite: Batch and spectroscopic studies. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 401, p. 123249, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123249>.

MACHADO JUNIOR, José Carlos. **Desenvolvimento de compósito isolante termoeletrico e avaliação das propriedades e estabilidade térmica: 2023**. Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) – Universidade de Sorocaba, Sorocaba, 2023. Disponível em: <https://uniso.br/mestrado-doutorado/pta/dissertacoes/2023/jose-carlos.pdf>. Acesso em: 29 out. 2025.

MANO, Eloisa Biassoto, **Introdução a polímeros** / eloisa Biassoto Mano, luis cláudio Mendes – 2º ed. Ver. E ampl. – São Paulo: Blucher, 1999.

MANO, Eloisa Biasotto, **Polímeros com materiais de engenharia** / Eloisa Biasotto Mano – São Paulo: Blucher, 1991.

MANO, Eloisa Biassoto. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: Blucher, 2011.

MASSAO IONASHIRO. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial**. [s.l: s.n.].

MARINUCCI, Gerson - **Materiais compósitos poliméricos** / Gerson Marinucci. – São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MARSHALL Junior, Isnard – **Gestão da Qualidade** / Isnard Marshall Junior... [el al.] – 10. Ed – Rio de Janeiro: Editora FGV, 2010.

MAZALI, ITALO O. **Determinação da Densidade de Sólidos pelo Método de Arquimedes**. [s.d.].

MENDES, Eloisa Biasotto Mano e Luís Cláudio. **Introdução a Polímeros**. São Paulo: Blucher, 1999.

MOREIRA, António Carrizo ¹, karachun, Hanna Leonidivna ². **Uma revisão interpretativa sobre o desenvolvimento de novos produtos**. Bogotá, Colômbia, 01 dez. 2014.

MOTHÉ, Cheila Gonçalves. **Análise Térmica de Materiais**. São Paulo: Artliber, 2009.

MUNDIM, Ana Paula Freitas – **Desenvolvimento de produtos e educação corporativa** / Ana Paula Freitas Mundim. - - São Paulo: Atlas, 2002.

NORMA REGULAMENTADORA. **NR 10-SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE**. , 2004.

NAGARAJAN, Punitha et al. Biofabricated Aluminium Oxide Nanoparticles Derived from Citrus aurantium L.: Antimicrobial, Anti-Proliferation, and Photocatalytic Efficiencies. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 1743, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15021743>.

NUNES, Matheus de Faccio – **Desenvolvimento de métodos para determinação elementar de escórias por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma por Laser**. – São Paulo, 2024. Dissertação (mestrado) – programa de pós graduação em Química.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**. [s.l: s.n.].

PAPINI, C. J.; YOSHITO, W. K. ; GOUVÊA, D.; LEAL NETO, R. M. . Particle size distribution analysis of an alumina powder: influence of some dispersants, PH and supersonic vibration. **Materials Science Forum**, v. 498, p. 73-78, 2005.

PAVANATI, H. C. **Ciências e Tecnologia de Materiais**. [s.l: s.n.].

PIRES, João Paulo **Influência das diferentes cargas nas propriedades do elastômero de silicone (PDMS)**. 2010.

QUEIRÓS, José Pedro Martinho - **Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais** – Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2013. Dissertação (mestrado) - Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

RAICIK, A. C.; PEDUZZI, L. O. Q. Um resgate histórico e filosófico dos estudos de Stephen Gray. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 16, n. 1, 2016.

REFRATIL. Gaxeta Tubular. Disponível em: <https://www.refratil.com.br/produto/espagete-de-fibra-ceramica-para-isolamento-eletrico>. Acesso 07 dez. 2024.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, p. e4–e10, jun. 2000.

RIBEIRO, Anna Carla et al. Physico-chemical and electrostatic surface characterisation of mica mineral and its applicability on the adsorption of Safranin Orange and Reactive Black 5 dyes. **Environmental Technology (United Kingdom)**, [s. l.], v. 43, n. 24, p. 3765–3778, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1934562>.

RICCI, Thiago Gomes - **Análise estatística multivariada aplicada à espectrometria de emissão óptica de plasma acoplado indutivamente para a avaliação de micronutrientes em tomates de cultivo orgânico e convencional** – Mato Grosso do Sul, 2021. Tese (doutorado) – programa de pós graduação em Química.

RUBBERPEDIA. **Polímeros / Elastômeros / Borrachas**. Disponível em: <https://www.rubberpedia.com/cargas-brancas.php>, acesso 07 dez.2024.

SALMAN, Amin¹ e Muhammad Amin². **Materiais termoplásticos elastoméricos e sua utilização no isolamento elétrico externo**. Universidade de Engenharia e Tecnologia, Taxila, Paquistão, 03 março 2011.

SHARMA, Bunty et al. Recycling waste aluminium foil to bio-acceptable nano photocatalysts [aluminium oxide (Al₂O₃) & aluminium oxyhydroxide (AlOOH)]; dye degradation as proof-of-concept. **Materials Advances**, [s. l.], v. 5, n. 20, p. 8304–8317, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d4ma00717d>.

SHACKELFORD, J. F. **CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. 6º Edição ed. [s.l: s.n.].

SILVA, G. C; PIAZZA F; INONE, P. C; PORTELLA, K. F (LACTEC); CABUSSU M. S; CERQUEIRA, D. P. (COELBA). Avaliação de desempenho de isoladores cerâmicos e poliméricos no nordeste brasileiro por meio de medidas on line de corrente de fuga e classificação da severidade da contaminação local. . **ANEEL, COELBA e LACTEC**, Curitiba-PR, agosto de 2009. Disponível em : <https://ventolestetecnologia.com/wp-content/uploads/2012/10/avaliac3a7c3a3o-isoladores-cerc3a2micos-e-polimc3a9ricos.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

SINGHA, Mohan; SINGH, Lakhwant. Vibrational spectroscopic study of muscovite and biotite layered phyllosilicates. **Indian Journal of Pure and Applied Physics**, [s. l.], v. 54, p. 116–122, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mohan-Singh1/publication/301228631_Vibrational_spectroscopic_study_of_muscovite_and_biotite_layered_phyllosilicates/links/59c4c2630f7e9bd2c003cf13/Vibrational-pectroscopic-study-of-muscovite-and-biotite-layered-phyllosilicates.pdf.

SOBHANARDAKANI, Soheil et al. Removal of heavy metal (Hg (II) and Cr(VI)) ions from aqueous solutions using Fe₂O₃@SiO₂ thin films as a novel adsorbent Removal of heavy metal (Hg(II) and Cr(VI)) ions from aqueous solutions using Fe₂O₃@SiO₂ thin films as a novel ads. **Process safety and environmental protection**, [s. l.], v. 120, p. 348–357, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.002>.

TEXIGLASS. **Fibra de Vidro**. Disponível em: <https://texiglass.com.br/fibras-de-reforco>. Acesso em 07 dez.2024.

TEXIGLASS. **Tecido Fibra de Vidro**. Disponível em: <https://texiglass.com.br/produtos/tecidos-planos-tramados>. Acesso 07 dez. 2024.

TORRES-RAMOS, María Isabel et al. Cu₂O Nanoparticles as Nanocarriers and Its Antibacterial Efficacy. **Pharmaceuticals**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 1124, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ph17091124>.

UFSCAR, Ccdm. **Espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente icp-oes**. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/ensaios-quimicos/espectrometria-de-emissao-optica-por-plasma-acoplado-indutivamente-icp-oes> Acesso 20 dez.2024.

USP. **Analisadores de área superficial BET e de volume e de diâmetro de poros(Anton Paar**. Disponível em: <https://sites.usp.br/lapcat/infraestrutura/>. Acesso 20 dez.2024.

USP. **Fundamentos ICP OES**. Disponível em: <https://cmaa.esalq.usp.br/fundamentos-icp-oes/>. Acesso 20 dez. 2024.

WEN, Xishan et al. RTV silicone rubber degradation induced by temperature cycling. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 7, p. 1054, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10071054>.

WU, Xutao et al. Effect of vulcanization temperature and humidity on the properties of RTV silicone rubber. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 207, n. 1, 2017.

WU, Yurong; XU, Longshan; JIANG, Yanying. Preparation and Thermal Properties of Modified Cu₂O/Polypropylene (PP) Composite. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 309, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13020309>.

ZHAI, Qianqian et al. Curing Kinetics Study by FTIR Spectroscopy and Properties Analysis of Methyl Silicone Resin Membrane. **Silicon**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2761–2768, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00369-1>.

ZHOU, Wenying et al. Novo composto de borracha de silicone condutora de calor. **Applied Polymer Science**, Fev 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.25479>.