

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

José Carlos Machado Junior

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO ISOLANTE TERMOELÉTRICO E
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E ESTABILIDADE TÉRMICA**

**Sorocaba/SP
2023**

José Carlos Machado Junior

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO ISOLANTE TERMOELÉTRICO E
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E ESTABILIDADE TÉRMICA**

Dissertação 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 Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

Coorientadora: Profa. Dra. Valquíria Miwa Hanai Yoshida

**Sorocaba/SP
2023**

Ficha Catalográfica

Machado Junior, José Carlos
M131d Desenvolvimento de compósito isolante termoelétrico e
avaliação das propriedades e estabilidade térmica / José Carlos
Machado Junior. – 2023.
63 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo.
Co-orientadora: Profa. Dra. Valquíria Miwa Hanai Yoshida.
Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e
Ambientais) – Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2023.

1. Materiais - Desenvolvimento. 2. Materiais termoelétricos. 3.
Polímeros. 4. Fibra de vidro. I. Restivo, Thomaz Augusto Guisard,
orient. II. Yoshida, Valquíria Miwa Hanai, co-orient. III. Universidade
de Sorocaba. IV. Título.

JOSÉ CARLOS MACHADO JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO ISOLANTE TERMOELÉTRICO E
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E ESTABILIDADE TÉRMICA**

Dissertação 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 Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Aprovado: 27-03-2023

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

Universidade de Sorocaba



Prof. Dr. Norberto Aranha

Universidade de Sorocaba



Prof. Dra. Rossana Cristina Rossoni Figueira

Universidade de Sorocaba

Dedico a DEUS, por nunca me desamparar, me proporcionar esposa, filhos, família, moradia, emprego, saúde, amigos, dignidade, me capacitar quando eu mesmo não acreditava, me encorajar quando desanimei, me dar saúde quando estive doente, abrir meu sorriso quando estive triste, ser meu pai quando me encontrei órfão, me alimentar quando tive fome, me agasalhar quando tive frio, me abrigar quando estive desabrigado. A DEUS meu sentido de viver, a DEUS toda minha Dedicção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a empresa Itel Isolantes por meio do Presidente Eng. Carlos Ronaldo Alves Nascimento, a oportunidade de atuar na pesquisa e desenvolvimento de materiais isolantes termoelétricos nas principais empresas de fundição do Brasil.

Agradeço ao professor Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo, o qual foi incentivador a buscar o mestrado PTA Uniso, afim de adquirir novos conhecimento na minha área de atuação.

Agradeço a todos os professores que colaboraram para esta realização, em especial a Coorientadora Profa. Dra. Valquíria Miwa Hanai Yoshida pela dedicação e prestatividade em compartilhar seu vasto conhecimento. Ao Prof. Dr. Norberto Aranha por também ser incentivador e compartilhar seu vasto conhecimento em materiais poliméricos. A Profa. Dra Rossana Cristina Rossoni Figueira por aceitar a fazer parte da banca examinadora e acrescentar com seus sábios e precisos comentários. Ao Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves pela aceitação e acompanhamento na coordenação do Mestrado Processos Tecnológicos e Ambientais.

Agradeço a UNISO por proporcionar os laboratórios, a USP Politécnica e IPEN (Instituto de Pesquisa de Energia Nuclear) e seus profissionais por também abrir as portas para uso dos laboratórios e ensaios.

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

Agradeço a minha amada mãe Eugênia Aparecida Vieira Machado e saudoso papai José Carlos Machado, por doutrinar nos caminhos a trilhar.

Agradeço ao meu irmão engenheiro Eder Carlos Vieira Machado pioneiro em engenharia na família e sua amada família.

Agradeço a DEUS e a todos que oraram e oram por mim.

Em tudo sou grato!

“Quem observa o vento, nunca semeará,
e o que olha para as nuvens nunca
segará” Eclesiastes 11:4

RESUMO

O mercado de isoladores termoeletricos envolve o desenvolvimento de isoladores para solucoes nas industrias metalurgica, siderurgica, naval, automotiva e principalmente de fundicao e aciarias que trabalham em alta temperatura. Os principais equipamentos que utilizam isolantes termoeletricos sao fornos a arco eletrico, a inducao e de cadinho, bobinas de fornos e indutores, coletores automotivos, equipamentos eletronicos e eletrodomesticos e principalmente isolantes termoeletricos desenvolvidos sob encomenda para a solucao do cliente. Entre as principais caracteristicas dos isolantes termoeletricos estao a resistencia mecanica, rigidez dieletrica, resistencia a altas temperaturas, resistencia a absorcao de agua, resistencia a absorcao de oleo e comportamento inerte em relacao a contaminacao externa. Todos os isoladores termoeletricos possuem suas vantagens e desvantagens, o que direciona a necessidade de desenvolver o melhor custo-beneficio para cada aplicacao. Dentre os isoladores termoeletricos existentes no mercado, existem materiais isolantes termoeletricos flexiveis como chapa de mica, materiais a base de fibra de vidro com elastomero, chapas de micanite e folhas de mica impregnadas com resina de silicato. Com relacao aos isolantes termoeletricos rigidos, destacam-se as placas de mica moscovita e flogopita a base de resina de silicato, chapas a base de tecido de fibra de vidro impregnado com resina epoxi, poliester, Celeron e silicone. Todos esses isoladores podem ser fabricados como moldados contínuos, chapas laminadas e tubos. Os isoladores termoeletricos podem ser fabricados por processos de usinagem como torno e fresa convencionais, serra de corte e CNC, entre outros. Dentre as muitas opcoes, o mercado segue em contínuo desenvolvimento e adaptacao devido a alta demanda e competitividade, necessitando aprimorar os isoladores termoeletricos no monitoramento dos equipamentos, aliado a reducao dos custos de isolamento para se manter competitivo. Nestes cenarios, a presente dissertacao discute o desenvolvimento de um novo isolante termoeletrico, de classe termica (R) que trabalhará acima de 220 °C, com rigidez dieletrica de 10 kV/mm e melhor resistencia mecanica. Este material foi desenvolvido com tecido de fibra de vidro entrelacado, impregnado com resina termorrígida, prensado sob alta pressao e temperatura simultaneamente. O isolador composto polimerico com estrutura de fibra de vidro é classificado como material polimerico termorrígido e foi desenvolvido para atender equipamentos onde os isoladores requerem trabalho em alta temperatura sem perder as caracteristicas de isolamento. Por se tratar de um isolante nacional com materias-primas tambem nacionais vale destacar o baixo custo em relacao a outros isoladores. Os ensaios demonstram que o material polimerico desenvolvido suporta 10 kV/mm e temperatura da ordem de 220 °C, tendo ainda uma baixa condutividade termica de aproximadamente 0,400 W/mK e mostrando ainda elevado calor especifico de cerca de 790 J/kgK.

Palavras-chave: isolantes termoeletricos; polímero termorrígido; fibra de vidro.

ABSTRACT

The thermoelectric insulators market involves the development of insulators for solutions in the metallurgical, steel, naval, automotive industries and mainly foundries and steelworks that work at high temperature. The main equipment that uses thermoelectric insulators are electric arc, induction and crucible furnaces, furnace coils and inductors, automotive collectors, electronic equipment and household appliances and mainly thermoelectric insulators developed to order for the customer's solution. The main characteristics of thermoelectric insulators hold mechanical resistance, dielectric strength, resistance to high temperatures, resistance to water absorption, resistance to oil absorption and inert behavior in relation to external contamination. All thermoelectric insulators have their advantages and disadvantages, which drive the need to develop the best cost-benefit for each application. Among the thermoelectric insulators on the market, there are flexible thermoelectric insulating materials such as mica sheet, materials based on fiberglass with elastomer, micanite sheets and mica sheets impregnated with silicate resin. With regard to rigid thermoelectric insulators, plates of muscovite mica and phlogopite based on silicate resin, plates based on fiberglass fabric impregnated with epoxy resin, polyester, Celeron and silicone stand out. All these insulators can be manufactured as continuous castings, laminated sheets and tubes. All thermoelectric insulators are suitable for machining processes such as conventional and CNC lathe and milling, saw cutting and CNC, among others. Among the many options, the market advances in continuous development and adaptation due to the high demand and competitiveness, needing to improve thermoelectric insulators in the monitoring of equipment, combined with the reduction of insulation costs to remain competitive. In these scenarios, the present dissertation discusses the development of a new thermoelectric insulator, of thermal class (R) that will work above 220 °C, with dielectric strength of 10 kV/mm and better mechanical resistance. This material was developed with interlaced fiberglass fabric, impregnated with thermosetting resin, pressed under high pressure and temperature simultaneously. The polymeric composite insulator with fiberglass structure is classified as thermosetting polymeric material and was developed to meet equipment where the insulators require work at high temperature without losing the insulation characteristics. As it is a national insulator with also national raw materials, it is worth noting the low cost compared to other insulators. The tests demonstrate that the developed polymeric material supports 10 kV/mm and temperature around 220 °C, still having a low thermal conductivity of approximately 0.400 W/mK and showing a high specific heat of around 790 J/kgK.

Keywords: thermoelectric insulators; thermoset polymer; fiberglass fabric.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração da classificação dos materiais sólidos.....	15
Figura 2 - Exemplos de materiais sólidos segundo sua classificação.....	16
Figura 3 - Principais isolantes termoelétricos oferecido no mercado de baixa tensão	29
Figura 4 - Laminado isolante ITVF-IT5003-3.....	39
Figura 5 - Análise TG/DTA do Isolante Celeron	51
Figura 6 - Análise TG/DTA do Isolante ITVF-IT5003-3.	52
Figura 7 - Análise TG/DTA do isolante ITVF-IT5003 Plus.....	52
Figura 8 - Análise TG/DTA do Isolante ITVE IT5003 G-10.....	53
Figura 9 - Análise TG/DTA do Isolante ITVS-IT5004 G-7	54
Figura 10 - Análise TG/DTA do Isolante ITVS-IT5004 G-7 PLUS	55
Figura 11 - Análise TG/DTA do Isolante ITVS-IT5004 Refratário.....	56
Tabela 1 - Designação da classe térmica	23
Tabela 2 - Tabela de Propriedades dos Principais Isolantes	30
Tabela 3 - Composição dos Isolantes	33
Tabela 4 - Custos dos Isolantes Termoelétricos	40
Tabela 5 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, à 25 °C, para os diferentes materiais termoelétricos.....	41
Tabela 6 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, em altas temperaturas, para os diferentes materiais termoelétricos.....	41
Tabela 7 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVF-IT5003-3 (n=8).....	42
Tabela 8 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVE-IT5003 G-10 (n=7).43	
Tabela 9 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante Celeron (n=7)	43
Tabela 10 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVS-IT5004 G-7 (n=7).43	
Tabela 11 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Plus (n=7).....	44
Tabela 12 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Refratário (n=7)	44
Tabela 13 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante IT2003-MPA (n=7)	44
Tabela 14 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante IT2003-MPF (n=7)	45

Tabela 15 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVF-IT5003-3 Ensaio a 100 °C (n=8)	46
Tabela 16 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVE-IT5003 G-10 Ensaio a 100 °C (n=7)	46
Tabela 17 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante Celeron - Ensaio a 100 °C (n=7)	46
Tabela 18 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Ensaio a 100 °C (n=7)	47
Tabela 19 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Plus Ensaio a 100 °C (n=7)	47
Tabela 20 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Refratário Ensaio a 100 °C (n=7).....	47
Tabela 21 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante IT2003 MPA Mica Moscovita Ensaio a 100 °C (n=7)	48
Tabela 22 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante IT2003 MPF Mica Rígida Flogopita Ensaio a 100 °C (n=7)	48
Tabela 23 - Calor Especifico em ensaio a 25 °C e 100 °C ± 2°C	50
Tabela 24 - Medidas de (TG/DTA) para as diferentes amostras.....	57
Tabela 25 - Resultado de Densidade segundo a norma ISO 1183-1:2004	58
Tabela 26 - Resultado Dureza ISO 868 Shore D	59
Gráfico 1 - Resultado das medidas de Condutividade Térmica a 25 °C	45
Gráfico 2 – Resultado das Medidas de Condutividade Térmica a 100 °C	49
Gráfico 3 – Resultado das Medidas do Calor Especifico 25 °C.....	50
Gráfico 4 - Resultado Temperatura de Decomposição/Perda de Massa	57
Gráfico 5 – Resultado de Densidade.....	58
Gráfico 6 - Valores de dureza de isolantes térmicos e seus respectivos desvios padrão amostrais.....	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SIGLA	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana de Testes em Materiais
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DTA	Análise Térmica Diferencial
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
ITVF	Isolante Tecido de Fibra de Vidro
ITVFPlus	Isolante Tecido de Fibra de Vidro Aditivado inorgânica
MIE	Materiais Isolantes Elétricos
SIE	Sistema de Isolação Elétrica
TG	Termogravimetria
MLT	Materiais Laminados Termorrígido
DTG	Termogravimetria Derivada
PTA	Processos Tecnológicos e Ambientais
H	Altura
C	Comprimento
L	Largura
CNC	Comando Numérico Computadorizado
ITVE	Tecido de fibra de vidro com resina epóxi
ITVS	Tecido de fibra de vidro com resina de silicone
PTA	Processos Tecnológicos e Ambientais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Classificação de Materiais Sólidos	15
2.1.1	Materiais Metálicos	17
2.1.2	Materiais Cerâmicos	17
2.1.3	Materiais Poliméricos	18
2.1.4	Materiais Compósitos	18
2.2	Materiais laminados termorrígidos	20
2.3	Isolante termoelétrico	23
2.3.1	Designação da classe térmica do isolante termoelétrico	23
2.3.2	Propriedades dos isolantes termoelétricos	24
2.3.3	Principais isolantes termoelétricos oferecido no mercado de baixa tensão	29
3	OBJETIVOS	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Desenvolvimento do isolante termoelétrico	32
4.2	Caracterização dos Compósitos	33
4.2.1	Rigidez dielétrica	34
4.2.2	Condutividade térmica	35
4.2.3	Calor específico	36
4.2.4	Análise térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização	36
4.2.5	Densidade	37
4.2.6	Ensaio Dureza Shore (D)	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Desenvolvimento do isolante termoelétrico	39
5.2	Ensaio e propriedades ensaiadas	41
5.2.1	Rigidez dielétrica	41
5.2.2	Condutividade térmica	42
5.2.3	Calor específico	50
5.2.4	Análise Térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização	51
5.2.5	Densidade	58
5.2.6	Dureza	59
6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A primeira distinção entre condutor e isolante havia sido feita por Stephen Gray, em 1729. Stephen Gray 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 podem ser classificadas como condutoras ou isolantes. Os condutores, como por exemplo os metais e soluções iônicas, permitem o fluxo livre da carga elétrica, enquanto os isolantes, como por exemplo a madeira, borracha, seda e vidro, não permitem o fluxo da carga elétrica.(BOSS; CALUZI, 2010; CARVALHO; DE JESUS, 2000).

O primeiro polímero sintético foi produzido por Leo Baekeland em 1912, obtido pela reação entre fenol e formaldeído. Essa reação resultava num produto sólido (resina fenólica) atualmente conhecida 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 consiste em desenvolver isolantes para soluções em indústrias metalúrgicas, siderúrgicas, navais, automotivas e principalmente indústria de fundição que trabalham em altas temperaturas, pois estes segmentos realizam fundições de metais, necessitando assim isolantes termoelétricos resistente a alta temperatura para se obter a isolação elétrica em suas aplicações.

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

Entre as principais características dos isolantes termoelétricos estão a capacidade de resistência mecânica, rigidez dielétrica, resistência a temperatura, resistência à absorção de água, resistência à absorção de óleo, característica inerte a contaminações externa e, principalmente, atender aos requisitos dos equipamentos requeridos pelo projeto de solução. Todos os isolantes termoelétricos têm suas

vantagens e desvantagens, de onde vem a necessidade de desenvolver o melhor custo-benefício para cada aplicação.

Entre os materiais isolantes termoelétricos, mencionam-se os materiais isolantes termoelétricos 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.

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 base de tecido de vidro impregnado com resina inorgânica. Todos estes isolantes podem ser confeccionados tanto como moldados contínuo, moldados laminados, chapas laminados, tubos e chapas prensadas.

Os isolantes termoelétricos podem ser fabricados através de processos de usinagens, torno mecânico e CNC, fresa convencional e CNC, serra esquadrejadeira, entre outras. Dentre as muitas opções, o mercado mantém contínuo desenvolvimento e adequação devido à alta demanda e competitividade, necessitando potencializar os isolantes termoelétricos em adequação aos equipamentos, em conjunto com a redução de custos para se manter competitivos.

Com esse conhecimento, no presente trabalho foi proposto o desenvolvimento de um novo isolante termoelétrico, material polimérico a base de resina termofixa estruturada com tecido de fibra de vidro, da classe térmica R (segundo a ABNT NBR IEC 60085) para atender a condição de trabalho acima de 220 °C, sob a rigidez dielétrica de 10 kV mm⁻¹.

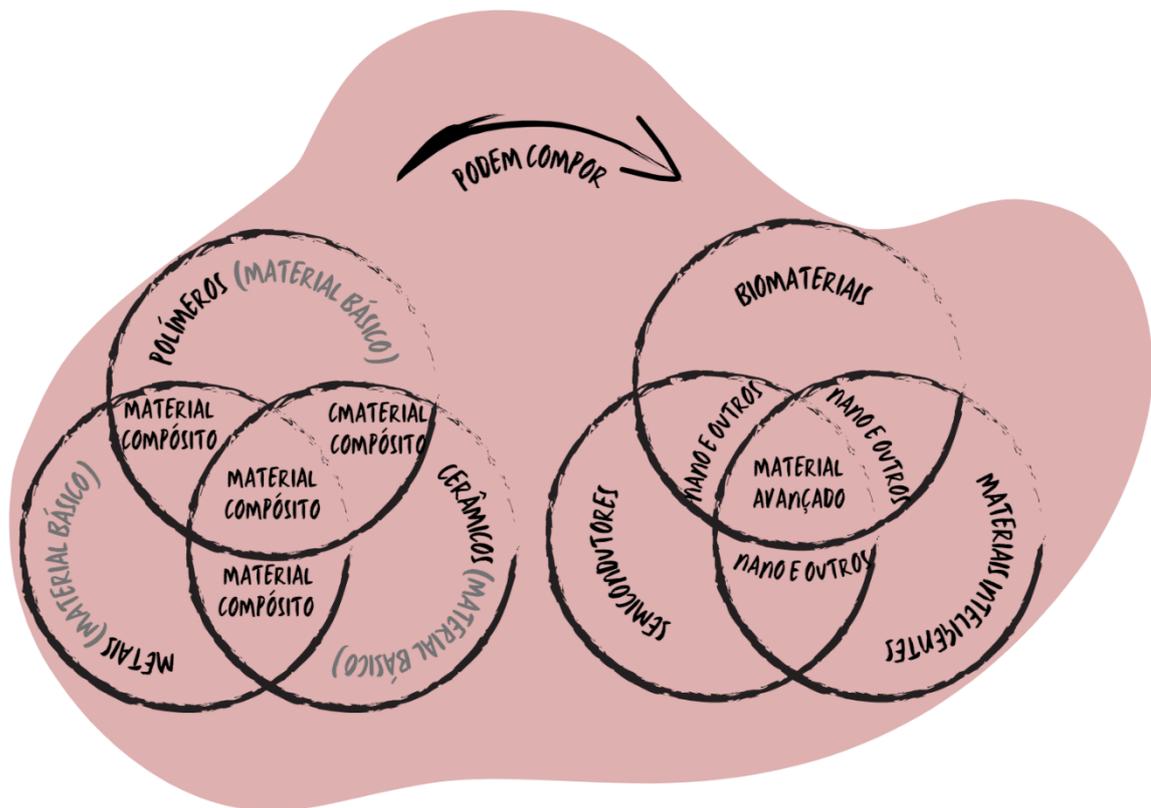
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Classificação de Materiais Sólidos

Uma revisão narrativa de literatura foi elaborada para embasar, cientificamente, o conhecimento de conceitos e características necessárias à caracterização de compósitos isolantes termoeletrônicos.

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: Elaboração própria

Os materiais sólidos foram convenientemente agrupados em três categorias básicas: metais, cerâmicas e polímeros, um esquema baseado, sobretudo na composição química e na estrutura atômica. 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 material diferentes, em uma explicação sucinta

dessas classificações de matérias 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 JUNIOR., 2021). Na Figura 2 são mostrados exemplos de materiais sólidos.

Figura 2 - Exemplos de materiais sólidos segundo sua classificação



(a) Metal em bobina
Fonte: www.csn.com.br (2022)



(b) Manta fibra cerâmica
Fonte: www.refratil.com.br (2002)



(c) Eliminador de gotas em polipropileno
Fonte: www.rotaplastic.com.br (2022)



(d) Tarugo isolante composto fibra de vidro com resina termo-fixo
Fonte: Elaboração própria

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).

Geralmente, os materiais metálicos possuem condutividade elétrica e térmica, resistência mecânica relativamente alta, rigidez relativamente alta, boa ductilidade, conformabilidade e resistência ao impacto, sendo por essa razão muito utilizada em estruturas.

Entre os materiais metálicos, destaca-se o aço, amplamente empregado. Entretanto, o alumínio, o zinco, o ferro fundido, o níquel, o titânio, o cobre e o magnésio estão bastante presentes em nosso dia a dia. Além destes, as ligas metálicas, o bronze (Cu-Sn), o latão (Cu-Zn) e o Zamac (Al-Cu-Mg-Zn), por exemplo, permitem uma combinação de propriedades individuais dos metais ampliando as opções de materiais disponíveis para uma seleção. (PAVANATI, 2015)

2.1.2 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos (Figura 2b) são frequentemente compostos por elementos metálicos e não metálicos, óxidos, nitretos e carbonetos. O vidro, a porcelana, os revestimentos como pisos e azulejos, os refratários e os abrasivos são exemplos de materiais cerâmicos muito presentes em nossas vidas.

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 permitem aplicá-los 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 em 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)

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 a flexibilidade do polímero. Um exemplo natural de compósito é a madeira, em que a matriz e o reforço são poliméricos. 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.(PAVANATI, 2015)

O compósito polimérico reforçado com fibra de vidro, fiberglass ou fibra de vidro identifica simplesmente um compósito que consiste em fibras de vidro contínuas ou descontínuas contida em uma matriz polimérica; esse tipo de compósito é produzido em grandes quantidades. A composição do vidro é mais comumente estirada na forma de fibras (às vezes chamado de Vidro-E); os diâmetros das fibras variam normalmente entre 3 e 20 μm . A fibra de vidro é popular como um material de reforço na forma de fibra por várias razões:

1. O fiberglass é estirado com facilidade em fibras de alta resistência a partir do seu estado fundido.
2. O fiberglass é um material facilmente disponível e pode ser fabricado economicamente em um plástico reforçado com vidro, usando uma ampla variedade de técnicas de fabricação e compósitos.

3. Como uma fibra, ele é relativamente resistente e, quando incorporado em uma matriz de plástico, produz um compósito com resistência específica muito alta.
4. Quando associado a diferentes plásticos, ele possui uma inercia química que torna o compósito útil em inúmeros ambientes corrosivos.

As características superficiais das fibras de vidros são extremamente importantes, pois mesmo diminutos defeitos superficiais podem afetar negativamente as propriedades de tração. Os defeitos superficiais são introduzidos com facilidade pelo atrito ou abrasão da superfície com outro material duro. Além disso, as superfícies de vidro que tenham sido expostas a atmosfera normal, mesmo que por apenas curtos períodos, apresentam geralmente uma camada superficial enfraquecida que interfere na ligação com a matriz.

As fibras, ao acabarem de ser estiradas, são geralmente revestidas durante o estiramento com uma cobertura, ou seja, uma fina camada de uma substância que protege a superfície de fibra contra danos e interações indesejáveis com o ambiente. Normalmente, essa cobertura é removida antes da fabricação do compósito, sendo substituída por um agente de acoplamento ou de acabamento, que produz uma ligação química entre a fibra e a matriz.

Existem várias limitações para esse grupo de materiais. Apesar de apresentarem resistências elevadas, eles não são muitos rígidos e não exibem a rigidez necessária para algumas aplicações (por exemplo, como elementos estruturais para aviões e pontes). A maioria dos materiais em fibra de vidro está limitada a temperaturas de serviços abaixo de 200 °C (400 °F); em temperaturas mais altas, a maioria dos polímeros começam a escoar ou deteriorar. As temperaturas de serviço podem ser estendidas até aproximadamente 300 °C (575 °F) pelo uso de sílica fundida de alta pureza para as fibras e polímeros de alta temperatura, tais como as resinas poli-imidas. (CALLISTER JUNIOR., 2021)

Muitas aplicações em fibras de vidro são conhecidas: carrocerias de automóveis e cascos de barcos, tubulações de plásticos, recipientes para armazenamentos e pisos industriais. As indústrias de transporte estão utilizando quantidades cada vez maiores de plásticos reforçados com fibra de vidro, em um reforço para reduzir o peso dos veículos e aumentar a eficiência dos combustíveis. Uma gama de novas aplicações está sendo empregada ou está atualmente sob investigação pela indústria automotiva.(CALLISTER JUNIOR., 2021)

O compósito fibra de vidro embutido em uma matriz de polímero é muito comum. Característica de bons compósitos, a fibra de vidro tem as melhores propriedades de cada componente, produzindo um material que é superior a qualquer um dos componentes separadamente. A alta resistência das fibras de vidro de pequeno diâmetro é combinada com a ductilidade da matriz de polímeros para produzir um material forte, capaz de suportar a carga normal exigida de um material estrutural. (SHACKELFORD, 2008)

A composição dos compósitos envolve praticamente todos os elementos da Tabela periódica, exceto os gases nobres (grupo 18). (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 vidros podem ser produzidas tanto na forma de filamentos contínuos quanto na forma de fibras picadas. (LEVY NETO; PARDINI, 2006)

2.2 Materiais laminados termorrígidos

Segundo ASTM D-709-01 (2001), norma que regulamenta especificação padrão para Materiais Laminados Termorrígido (MLT), 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.(CALLISTER JUNIOR., 2021)

Um dos MLT mais comum 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 uma 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.(CALLISTER JUNIOR., 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.

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 JUNIOR., 2021)

Isolantes termofixos tornam-se duros e rígidos com o aquecimento. Isso porque as moléculas, normalmente menores que as dos polímeros 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). Logo, tanto as ligações intramoleculares como a intermoleculares são do tipo forte. Após a reticulação, o material adquire resistência mecânica. Ao reaquecer o material, não há quebra de ligação intermolecular sem que haja também a quebra das ligações intramoleculares, pois há ligações com energia da mesma ordem de grandeza. 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 Isolante termoeletrico

2.3.1 Designação da classe térmica do isolante termoeletrico

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

A isolação termoeletrica é classificada por meio de designação da classe térmica, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - 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 - Isolação elétrica – Avaliação e Designação Térmicas, 2017.

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

2.3.2 Propriedades dos isolantes termoelétricos

2.3.2.1 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 JÚNIOR, 2007)

2.3.2.2 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.

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.(BIASOTTO MANO, 1991)

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. 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)

A condução térmica é o fenômeno pelo qual calor é transportado das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura de um material. A propriedade que caracteriza a habilidade de um material para transferir o calor é condutividade térmica. (PADILHA, 1997).

2.3.2.3 Calor específico

Calor específico é a quantidade de energia térmica requerida para elevar em 1 °C a unidade de massa do material. Os metais apresentam valores muito baixos (abaixo de $0,4 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), 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 $4 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, muito superior ao apresentado pelos materiais de engenharia.(BIASOTTO MANO, 1991)

É uma propriedade decisiva 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, e já não é mais possível a preparação de uma amostra pequena e representativa, a medida dessa propriedade torna-se bastante problemática (CANEVAROLO JÚNIOR, 2007).

2.3.2.4 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 vão sendo 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.(IONASHIRO, 2004)

Todas as aplicações da Análise Térmica Diferencial 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, permite tirar conclusões sobre a estabilidade térmica da amostra, sobre a composição e estabilidade dos compostos intermediários e sobre a composição de resíduo.(MASSAO IONASHIRO, 2004)

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. (IONASHIRO, 2004).

2.3.2.5 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 politetraflúor-etileno. 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 cm⁻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 (BIASOTTO MANO, 1991)

A densidade (ρ) absoluta é definida como a quantidade de massa (m) em uma unidade de volume (V):

$$\mathbf{densidade = \frac{m}{V}} \qquad \mathbf{Equação 1}$$

Cuja unidades dos termos são:

(ρ) Densidade = kg.m⁻³

(m) Massa = kg

(V) Volume = m³

A densidade de sólidos e líquidos, segundo o Sistema Internacional de Unidades é expressa em quilograma por metro cúbico - kg/m³. Entretanto, é mais

comumente expressa em unidades de gramas por centímetro cúbico (g/cm^3) ou gramas por mililitro (g mL^{-1}). A densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria, que a identifica e a diferencia das outras substâncias. A densidade relativa de um material é a relação entre a sua densidade absoluta e a densidade absoluta de uma substância estabelecida como padrão.

No cálculo da densidade relativa de sólidos e líquidos, o padrão usualmente escolhido é a densidade absoluta da água, que é igual a $1,000 \text{ g.cm}^{-3}$ a $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$. 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.]

2.3.2.6 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.(CALLISTER JUNIOR., 2021)

2.3.3 Principais isolantes termoelétricos oferecido no mercado de baixa tensão

Segundo a NR 10 – 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 termoelétricos é caracterizada de acordo com a classificação térmica e as propriedades dos materiais (ASTM INTERNATIONAL, 2001), como exemplificado na Figura 3 e detalhado na Tabela 2.

Figura 3 - Principais isolantes termoelétricos oferecido no mercado de baixa tensão



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



ITVS - Tecido de Fibra de Vidro com Resina Silicone
Classificação térmica 300° C (C)



ITVE-Tecido Fibra de Vidro com Resina Epóxi
Classificação térmica 155° C (F)



Mica Rígida
Classificação térmica 300° C (C)

Fonte: www.itelisolantes.com.br (2022)

Tabela 2 - Tabela de Propriedades dos Principais Isolantes

Propriedades	Isolante T.V.E.	Isolante T.V.S.	Isolante Mica Rígida	Celeron
Densidade (kg/m³)	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: [matweb](#) (2023)

3 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um isolante termoelétrico de baixo custo, que venha a atender a necessidade do mercado de isolantes para altas temperaturas, classificação térmica 220 °C e Classe (R). Assim, o trabalho buscou substituir os isolantes existentes por um isolante com vantagens de custo e desempenho.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Atingir as seguintes propriedades do material:

- Rigidez dielétrica: $\geq 10 \text{ K v mm}^{-1}$
- Resistência a temperatura: $\geq 220 \text{ }^\circ\text{C}$
- Densidade: $\geq 1,8 \text{ a } 2,2 \text{ g cm}^{-3}$
- Condutividade térmica: $< 0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Dureza: Shore (D) > 75
- Isolante antichama, não propaga chamas
- Isolante 100 % livre de amianto

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento do isolante termoelétrico

O novo isolante termoelétrico foi codificado como ITVF-IT 5003-3 (Isolante térmico com estrutura fibra de vidro) e é uma peça (produto) desenvolvida para a solução de um problema apresentado no mercado de fundição. O ITVF-IT 5003-3 foi desenvolvido para atender as especificações da classe térmica R de isolante, segundo a ABNT NBR IEC 60085 (ABNT, 2017), isto é, suportar uma condição de trabalho acima de 220 °C, sob a rigidez dielétrica de 10 kV mm⁻¹, material rígido e compacto.

O isolante ITVF-IT5003-3 foi desenvolvido com tecido de fibras de vidro entrelaçadas, impregnado com resina termofixa, prensado sob alta compactação e temperatura simultaneamente.

O ITVF IT5003-3, está na classe de laminados com estrutura de tecido de fibra de vidro. Neste desenvolvimento o tecido de vidro com gramatura de 200 g/m² foi impregnado com resina termofixa, sob a temperatura de 80 °C e velocidade de 1 m.min⁻¹, formando assim o pré-pregs.

As camadas foram prensadas, correspondendo a sete (7) tecidos por mm de espessura sob o dimensional desejado, em prensa hidráulica de alta compactação sob 150 t.m² e temperatura de 130 °C, sendo depois curadas por 3 h e arrefecidas por 5 h, estando apta a desmolde com a temperatura inferior a 60 °C.

4.2 Caracterização dos Compósitos

O novo material isolante termoeletrico ITVF IT5003-3 foi comparado com outros isolantes alternativos presentes no mercado, cujas características estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição dos Isolantes

ISOLANTES	RESINA	REFORÇO	Proporção Resina/Reforço(%)
ITVF IT5003-3	Resina Termofixa	Tecido de Fibra de Vidro	30/70
CELERON	Resina Fenólica	Tecido de Fibra de Algodão	50/50
ITVE-IT5003 G-10	Resina Epóxi	Tecido de Fibra de Vidro	40/60
ITVS IT5004 G-7	Resina Silicone	Tecido de Fibra de Vidro	35/65
ITVF IT5003-3 PLUS	Resina Termofixa aditivada com resina inorgânica	Tecido de Fibra de Vidro	40/60
ITVS IT5004-REFRATÁRIO	Silicone Refratário	Tecido de Fibra de Vidro	50/50
IT2003 MPFLOGOPITA	Resina Silicone	Papel de Mica Flogopita	10/90
IT2003 MPA MOSCOVITA	Resina Silicone	Papel de Mica Moscovita	20/80

Fonte: Elaboração Própria

4.2.1 Rigidez dielétrica

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

Método A - Teste de Curta Duração – Aplicou-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 $V.s^{-1}$ para que ela seja incluída em uma nova especificação, seleciona-se uma taxa que, para um determinado conjunto de corpos de prova, para um tempo médio de desagregação entre 10 e 20 s. Em alguns casos foi necessário realizar um ou dois testes preliminares para determinar a taxa de aumento mais adequada. Para muitos materiais foi usada uma taxa de $500 V.s^{-1}$.

Se o documento que faz referência a este método de ensaio especificar 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, utilizou-se a mesma taxa de subida, dando-se preferência a uma taxa que permitiu que o tempo médio ficasse 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 inclui 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.

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

- A amostra foi colocada em contato íntimo com o conjunto plano sob uma massa de 500g.
- Um pulso de corrente de 1 a 3 segundos foi aplicado ao aquecedor/sensor e anel causando uma elevação local de temperatura.
- Simultaneamente, o sensor registrou 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, foi 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 foi 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) e densidade (ρ) do material medidos, empregando-se a fórmula:

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

Cuja 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 dos isolantes Celeron, ITVF-IT5003-3, ITVF-plus, ITVE-5003 G-10, ITVS-IT5004 G-7, ITVS-IT5004 Plus e ITVS-IT5004 Refratário, 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 600 °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 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 ($\rho_{pe\grave{c}a}$) através da Equação 3.

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

Cujas Unidades dos termos são;

($\rho_{pe\grave{c}a}$) Densidade da Peça = kg.m^{-3}

(m_{seca}) Massa seca = g

($\rho_{\acute{a}gua}$) Densidade da água = g.cm^{-3}

(m_{imersa}) Massa imersa = g

4.2.6 Ensaio Dureza Shore (D)

Foi determinada de dureza shore D em durômetro analógico (marca Digimess, modelo 400.144, país Brasil) segundo norma ISO 868:2003 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003)

Condições de análise: indentador Shore D, ITVF IT5003-3 reforçado usinado (polido). Os procedimentos de análise – ISO 868 – dureza shore foram:

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

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desenvolvimento do isolante termoelétrico

A figura (4a e 4b) apresenta chapas do isolante Termoelétrico ITVF-IT5003, estas chapas podem ser usinadas segundo a geometria que necessita uma dada aplicação, exemplos de peças extraídas das chapas são arruelas, flanges isolantes, separadores, isolantes de barramentos, entre outros.

As chapas podem ser prensadas fabricadas no dimensional da placa da prensa hidráulica, a medida comercial é (L) 1000 mm e (C) 1000 mm, sendo a espessura de 0,10 a 300 mm.

Figura 4 - Laminado isolante ITVF-IT5003-3



(a)

(b)

Fonte: Elaboração Própria

O material isolante termoelétrico ITVF IT5003-3, foi desenvolvido devido à necessidade do mercado em encontrar um isolante laminado que atendesse a Classe R da ABNT NBR IEC 60085 (ABNT, 2017) (isto é, isolante que atenda a isolação termoelétrica a 220° C), sob baixo custo conforme Tabela 4. Este custo reduzido é possível pela composição da resina termorrígida aplicada atingir 30% e tecido de fibra de vidro 70%.

Tabela 4 - Custos dos Isolantes Termoelétricos

ISOLANTES	RESINA	REFORÇO	Custo (%)
ITVF IT5003-3	Resina Termofixa	Tecido de Fibra de Vidro	---
CELERON	Resina Fenólica	Tecido de Fibra de Algodão	+ 18
ITVE-IT5003 G-10	Resina Epóxi	Tecido de Fibra de Vidro	+ 116
ITVS IT5004 G-7	Resina Silicone	Tecido de Fibra de Vidro	+ 205
ITVF IT5003-3 PLUS	Resina Termofixa aditivada com resina inorgânica	Tecido de Fibra de Vidro	+ 41
ITVS IT5004-REFRATÁRIO	Silicone Refratário	Tecido de Fibra de Vidro	+ 253
IT2003 MPFLOGOPITA	Resina Silicone	Papel de Mica Flogopita	+ 183
IT2003 MPA MOSCOVITA	Resina Silicone	Papel de Mica Moscovita	+ 160

Fonte: Elaboração Própria

Os isolantes laminados existentes, como o ITVE G-10, atendem a isolação sob a temperatura de 155° C Classe (F), estruturada com tecido de fibra de vidro entrelaçado, impregnado com resina Epóxi aditivada. Na sequência tem-se o isolante o ITVS G-7 atendendo a demanda de temperatura de trabalho acima de 300° C, cuja composição estrutural é tecido de fibra de vidro, impregnado com resina silicone, o que eleva o custo de fabricação.

O novo isolante ITVF-IT5003-3, também pode ser fabricado na forma de tubos calandrados e peças moldadas. Pode ser usinado em fresas, tornos, serras, retificas, sempre utilizando ferramenta de corte aço duro, aço rápido ou diamantado.

5.2 Ensaios e propriedades ensaiadas

5.2.1 Rigidez dielétrica

Os resultados do ensaio rigidez dielétrica para os oitos tipos diferentes de isolantes termoelétricos foram organizados nas Tabelas 5 e 6 abaixo. O isolante termoelétrico ITVF IT5003-3 foi comparado aos demais isolantes conforme a Tabela 5, em temperatura ambiente, e na Tabela 6 em temperaturas limite de utilização.

O material desenvolvido ITVF IT5003-3 foi medido e comparado com os isolantes comum encontrado no mercado.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, à 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)
ITVF IT5003-3	1	10 kV	0,06	---	10
CELERON	1	10 kV	5,0	500 V	0,4
ITVE-IT5003 G-10	1	10 kV	0,06	---	10
ITVS IT5004 G-7	1	10 kV	0,06	---	10
ITVF IT5003-3 PLUS	1	10 kV	0,08	---	10
ITVS IT5004 G-7 REFRAATÁRIO	1	10 kV	0,08	---	10
IT2003 MPF MICA RIGÍDA FLOGOPITA	1	10 kV	0,06	---	10
IT2003 MPA MICA RIGÍDA MOSCOVITA	1	10 kV	0,06	---	10

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 6 - Resultados dos ensaios rigidez dielétrica, segundo ASTM D-149, em altas temperaturas, para os diferentes materiais termoelétricos

Isolante termoelétrico	Espessura (mm)	Temperatura Aplicada	Tensão máxima aplicada	Fuga de corrente (mA)	Tensão de ruptura dielétrica	Rigidez dielétrica (kV mm ⁻¹)
ITVF IT5003-3	1	220 °C	10 kV	0,09	---	10
CELERON	1	130 °C	10 kV	5,0	400 V	0,3
ITVE-IT5003 G-10	1	155 °C	10 kV	0,07	---	10
ITVS IT5004 G-7	1	300 °C	10 kV	5,0	9 kV	8,0
ITVF IT5003-3 PLUS	1	250 °C	10 kV	0,08	---	10
ITVS IT5004-REFRAATÁRIO	1	400 °C	10 kV	0,08	---	10
IT2003 MPFLOGOPITA	1	300 °C	10 kV	0,08	---	10
IT2003 MPA MOSCOVITA	1	300 °C	10 kV	0,08	---	10

Fonte: Elaboração Própria

Por meio da Tabela 5 observa-se que o isolante ITVF-IT5003-3 se manteve em temperatura ambiente 25 °C, nas mesmas condições de isolação elétrica dos demais isolantes e superior ao Celeron, uma vez que o ITVF-IT5003-3 resistiu a 10 kV/mm enquanto o Celeron 500 V.mm⁻¹.

Por meio da Tabela 6 observa-se que o isolante ITVF-IT5003-3 se manteve isolante a 10 kV/mm quando medido a 220 °C.

A excelente rigidez dielétrica se deu aparentemente pela baixa aplicação de resina termofixa 30% e alta concentração de tecido de fibra de vidro de boa trama 70%.

5.2.2 Condutividade térmica

5.2.2.1 Ensaio condutividade térmica a 25 ± 2 °C

Os resultados dos ensaios de condutividade térmica a 25 ± 2 °C dos materiais isolantes são mostrados nas Tabelas 7 a 14.

Tabela 7 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVF-IT5003-3 (n=8)

Densidade (kg m ⁻³)	1735,0	
Calor específico Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	790,76	
(K _{term}) Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Efusividade térmica (W K ⁻¹ m ⁻² s ^{1/2})	Temperatura (°C)
0,421	759,41	24,39
0,423	761,10	24,39
0,422	760,58	24,39
0,423	761,35	24,40
0,424	763,01	24,41
0,427	766,00	24,37
0,430	768,75	24,41
0,429	768,09	24,42
Média ± DP (0,425 ± 0,003)	Média ± DP 763,537	Média ± DP 24,40 ± 0,02

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVE-IT5003 G-10 (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1946,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	746,74	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,583	924,19	25,88
0,568	908,86	25,84
0,566	906,69	25,82
0,562	903,42	25,78
0,558	898,86	25,82
0,561	901,97	25,83
0,560	900,69	25,81
Média \pm DP (0,565 \pm 0,009)	Média \pm DP 906,382	Média \pm DP 25,83 \pm 0,03

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante Celeron (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1309,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1095,88	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,534	874,64	22,54
0,533	874,06	22,57
0,532	873,03	22,52
0,534	874,82	22,53
0,538	878,64	22,55
0,537	877,70	22,59
0,539	879,83	22,56
Média \pm DP (0,535 \pm 0,003)	Média \pm DP 876,101	Média \pm DP 22,550

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVS-IT5004 G-7 (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	2026,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	739,63	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,632	972,47	25,73
0,633	973,17	25,64
0,638	978,13	25,69
0,638	977,85	25,68
0,636	976,40	25,67
0,639	978,79	25,69
0,643	982,54	25,67
Média \pm DP (0,637 \pm 0,004)	Média \pm DP 977,050	Média \pm DP 25,681

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Plus (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1937,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	747,26	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,556	896,91	23,17
0,554	894,82	23,20
0,557	898,18	23,18
0,558	899,15	23,20
0,555	896,16	23,19
0,557	897,78	23,20
0,556	897,09	23,22
Média \pm DP (0,556 \pm 0,001)	Média \pm DP 897,157	Média \pm DP 23,194

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Refratário (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1862,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	801,29	
(K_{term}) Condutividade térmica (W mK^{-1})	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,619	959,49	25,14
0,616	956,66	25,17
0,622	962,38	25,19
0,625	965,05	25,19
0,632	972,37	25,21
0,634	974,49	25,20
0,640	979,70	25,19
Média \pm DP (0,627 \pm 0,009)	Média \pm DP 967,163	Média \pm DP 25,185

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante IT2003-MPA (n=7)

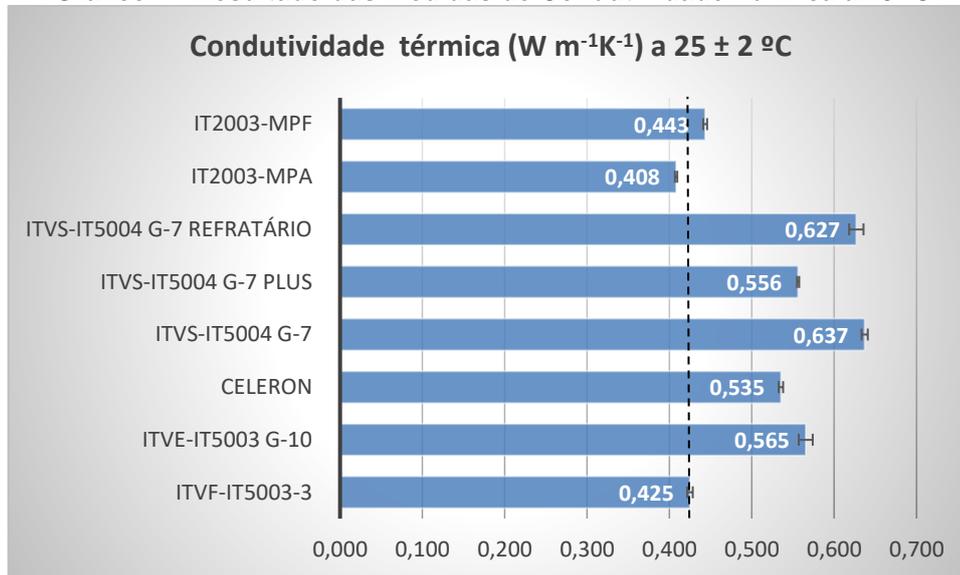
Densidade (kg m^{-3})	2117,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	644,17	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,405	743,18	22,79
0,408	746,31	22,77
0,408	746,16	22,79
0,408	745,74	22,81
0,409	746,95	22,81
0,409	747,31	22,81
0,409	746,77	22,82
Média \pm DP (0,408 \pm 0,001)	Média \pm DP 746,062	Média \pm DP 22,800

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 - Condutividade térmica a 25 ± 2 °C do Isolante IT2003-MPF (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	2181,0	
Calor específico C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	633,44	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,444	783,82	23,34
0,444	783,50	23,30
0,445	784,84	23,32
0,445	783,88	23,31
0,441	779,90	23,31
0,445	784,20	23,31
0,439	777,90	23,33
Média \pm DP (0,443 \pm 0,003)	Média \pm DP 782,576	Média \pm DP 23,317

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 1 - Resultado das medidas de Condutividade Térmica a 25 °C

Fonte: Elaboração própria

Por meio dos resultados apresentados nas Tabelas de 7 a 14 e resumido no Gráfico 1 pode-se notar que a condutividade térmica do isolante ITVF-IT5003-3 é inferior aos demais isolantes (exceto IT2003-MPA), garantindo assim que também se trata de um aceitável isolante térmico.

A condutividade térmica é relativamente baixa devido o reforço ser 70% tecido de fibra de vidro, 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.

5.2.2.2 Ensaio condutividade térmica a 100 ± 1 °C

Os resultados dos ensaios de condutividade térmica a 100 ± 1 °C dos materiais isolantes são apresentados nas Tabelas 15 a 22.

Tabela 15 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVF-IT5003-3 Ensaio a 100 °C (n=8)

Densidade (kg m^{-3})	1735,0	
Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	784,03	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura (°C)
0,403	740,16	98,32
0,400	737,18	98,68
0,402	740,05	99,00
0,400	737,82	99,32
0,399	736,83	99,49
0,400	737,82	99,62
0,396	733,43	99,73
0,407	744,55	99,76
Média \pm DP (0,401 \pm 0,003)	Média \pm DP 738,482	Média \pm DP 99,240

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVE-IT5003 G-10 Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1946,0	
Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	743,96	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura (°C)
0,557	898,17	99,45
0,557	898,02	99,56
0,553	894,17	99,60
0,557	898,04	99,59
0,556	896,79	99,54
0,559	900,35	99,43
0,557	898,11	99,29
Média \pm DP (0,557 \pm 0,002)	Média \pm DP 897,665	Média \pm DP 99,493

Fonte: Elaboração própria

Tabela 17 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante Celeron - Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m^{-3})	1309,0	
Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1109,52	
(K_{term}) Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Efusividade térmica ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$)	Temperatura (°C)
0,564	905,16	99,98
0,566	906,76	100,19
0,560	900,95	100,27
0,559	900,31	100,28
0,571	911,71	100,26
0,567	907,61	100,16
0,562	903,06	100,07
Média \pm DP (0,564 \pm 0,004)	Média \pm DP 905,079	Média \pm DP 100,172

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m ⁻³)	2026,0	
Calor específico Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	740,46	
(K _{term}) Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Efusividade térmica (W K ⁻¹ m ⁻² s ^{1/2})	Temperatura (°C)
0,637	976,69	99,46
0,631	971,55	99,54
0,643	983,23	99,56
0,639	978,67	99,56
0,647	986,40	99,56
0,641	980,99	99,46
0,640	979,90	99,36
Média ± DP (0,640 ± 0,005)	Média ± DP 979,631	Média ± DP 99,499

Fonte: Elaboração própria

Tabela 19 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Plus Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m ⁻³)	1937,0	
Calor específico Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	758,20	
(K _{term}) Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Efusividade térmica (W K ⁻¹ m ⁻² s ^{1/2})	Temperatura (°C)
0,591	932,10	99,94
0,587	927,92	100,03
0,593	934,17	100,03
0,593	933,33	99,90
0,583	924,20	99,91
0,586	927,32	99,75
0,596	937,07	99,61
Média ± DP (0,590 ± 0,005)	Média ± DP 930,875	Média ± DP 99,881

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante ITVS-IT5004 G-7 Refratário Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m ⁻³)	1862,0	
Calor específico Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	776,55	
(K _{term}) Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Efusividade térmica (W K ⁻¹ m ⁻² s ^{1/2})	Temperatura (°C)
0,541	882,09	100,22
0,553	894,48	100,74
0,549	890,36	100,93
0,533	873,68	101,05
0,562	902,91	100,97
0,573	914,05	100,81
0,565	906,46	100,41
Média ± DP (0,554 ± 0,014)	Média ± DP 894,863	Média ± DP 100,733

Fonte: Elaboração própria

Tabela 21 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante IT2003 MPA Mica Moscovita Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m ⁻³)	2117,0	
Calor específico Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	642,04	
(K _{term}) Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Efusividade térmica (W K ⁻¹ m ⁻² s ^{1/2})	Temperatura (°C)
0,393	729,93	99,82
0,401	738,17	100,06
0,396	733,79	100,30
0,399	736,15	100,40
0,402	739,67	100,48
0,392	729,56	100,48
0,407	744,77	100,47
Média ± DP (0,399 ± 0,005)	Média ± DP 736,008	Média ± DP 100,286

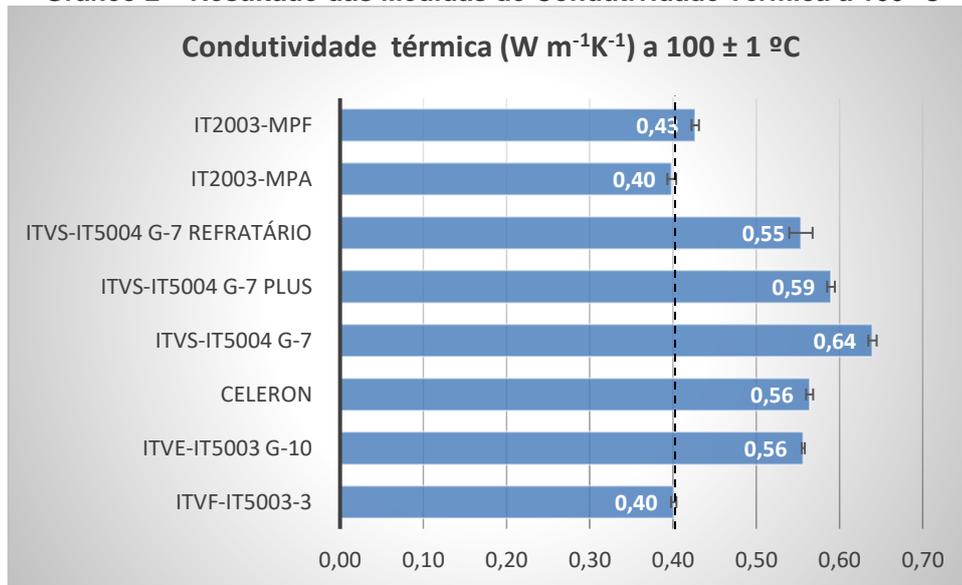
Fonte: Elaboração própria

Tabela 22 - Valores da Condutividade Térmica do Isolante IT2003 MPF Mica Rígida Flogopita Ensaio a 100 °C (n=7)

Densidade (kg m ⁻³)	2181,0	
Calor específico Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	629,50	
(K _{term}) Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Efusividade térmica (W K ⁻¹ m ⁻² s ^{1/2})	Temperatura (°C)
0,420	758,83	100,02
0,422	760,68	100,17
0,426	764,63	100,31
0,429	768,05	100,34
0,427	765,70	100,35
0,431	770,07	100,27
0,432	770,63	100,16
Média ± DP (0,427 ± 0,004)	Média ± DP 765,513	Média ± DP 100,232

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 2 – Resultado das Medidas de Condutividade Térmica a 100 °C



Fonte: Elaboração própria

Conforme demonstrados na Tabela 15 a 22 e resumido no Gráfico 2, observa-se que o isolante ITVF-IT 5003-3 é superior ou semelhante aos demais sob temperaturas de 100 °C, ou seja, mesmo trabalhando em temperatura alta, se mantém ou melhora a isolamento térmica.

Entende-se que o isolante ITVF-IT 5003-3 se manteve isolante elétrico e não se degradou, caso contrário teria se carbonizado e elevado a condutividade térmica. O ensaio foi realizado a 100 °C, para se aproximar das condições reais do emprego.

5.2.3 Calor específico

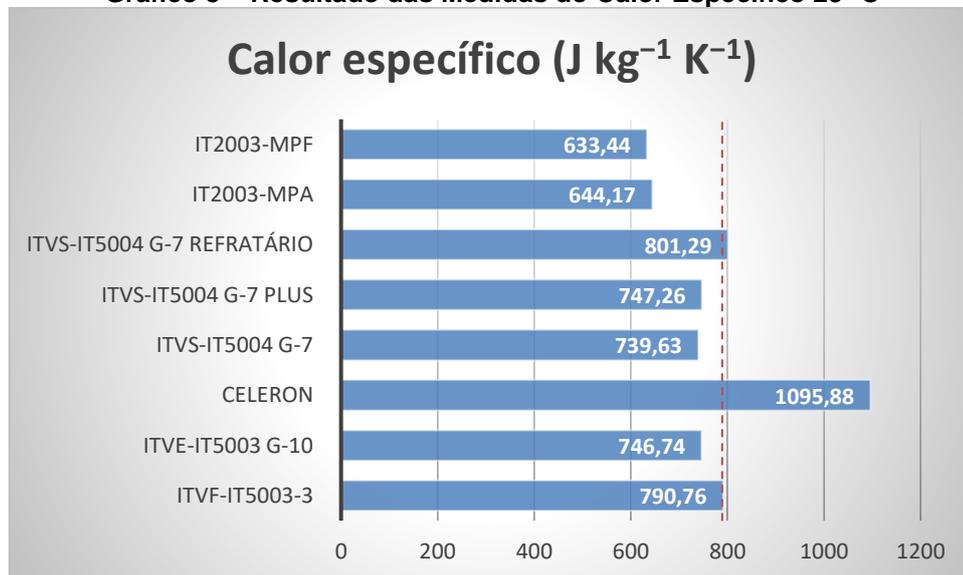
A Tabela 23 mostra os resultados das medidas dos ensaios Cp (calor específico) a $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $100 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ dos materiais isolantes termoelétricos.

Tabela 23 - Calor Específico em ensaio a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

Isolante termoelétrico	Temperatura $^\circ\text{C}$	Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Temperatura $^\circ\text{C}$	Calor específico Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
ITVF IT5003-3	25	790,76	100	784,03
ITVE-IT5003 G-10	25	746,74	100	743,96
CELERON	25	1095,88	100	1109,52
ITVS IT5004 G-7	25	739,63	100	740,46
ITVF IT5003-3 PLUS	25	747,26	100	758,20
ITVS IT5004 G-7 REFRAATÁRIO	25	801,29	100	776,55
IT2003 MPF MICA RIGÍDA FLOGOPITA	25	644,27	100	642,04
IT2003 MPA MICA RIGÍDA MOSCOVITA	25	633,44	100	629,50

Fonte: Elaboração própria

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



Fonte: Elaboração própria

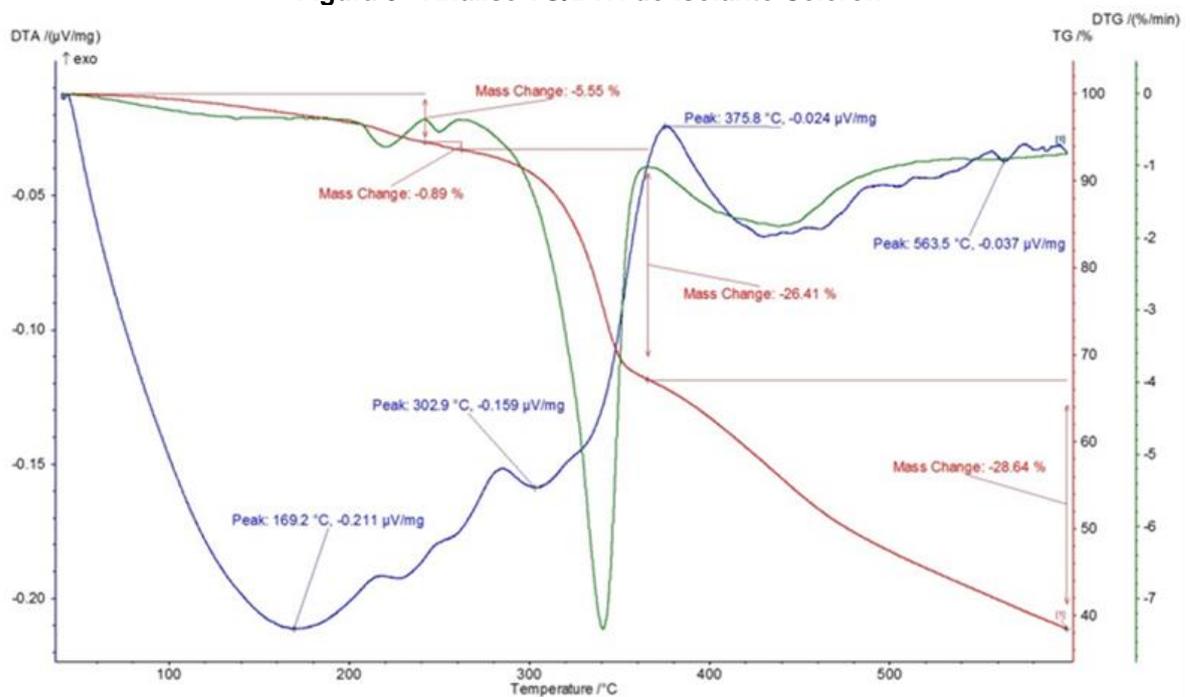
Pode-se observar a partir da Tabela 23 e Gráfico 3 que o isolante ITVF-IT5003-3 se mantém entre os 3 melhores resultados, pois necessita de maior energia para ser aquecido, ou seja, mostra-se sua eficiência como cobertor térmico, resistindo à

transferência de calor. Desta forma, entende-se que não perdeu suas propriedades de isolamento.

5.2.4 Análise Térmica e diferencial para indicação do ponto de carbonização

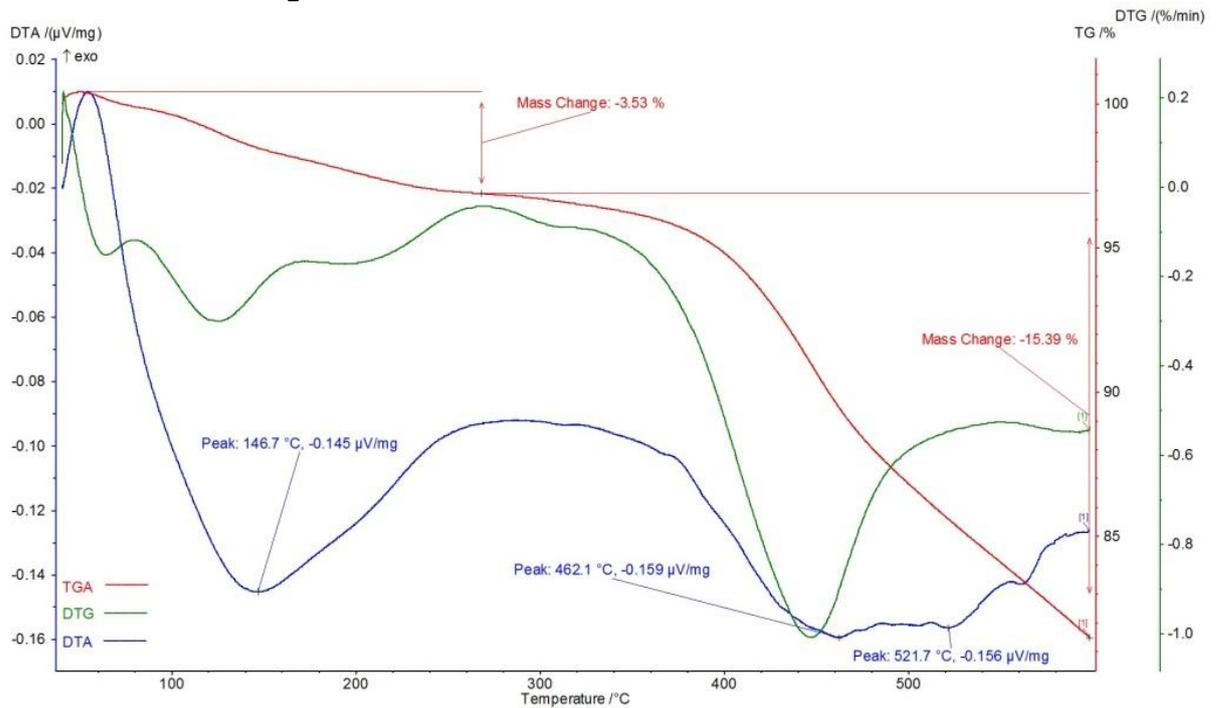
Os resultados das análises termogravimétricas e DTA simultâneo dos materiais isolantes são mostrados nas Figuras 5 a 11.

Figura 5 - Análise TG/DTA do Isolante Celeron



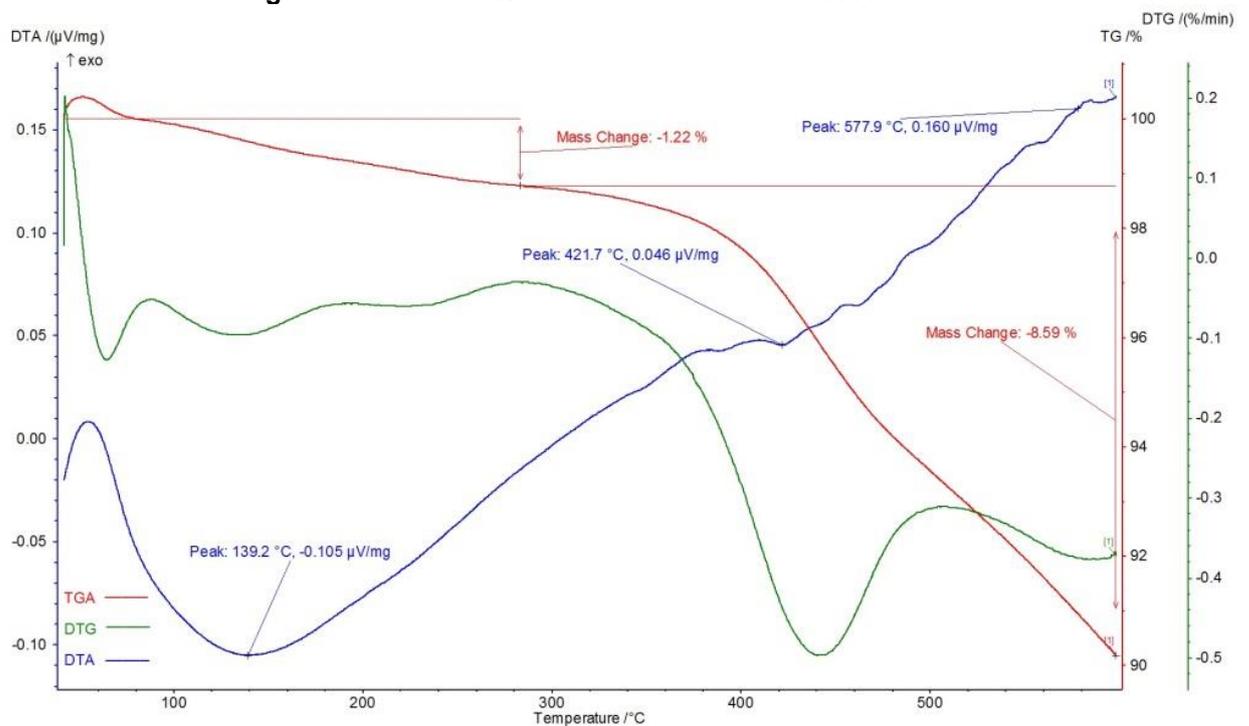
Fonte: Elaboração própria

Figura 6 - Análise TG/DTA do Isolante ITVF-IT5003-3.



Fonte: Elaboração própria

Figura 7 - Análise TG/DTA do isolante ITVF-IT5003 Plus.

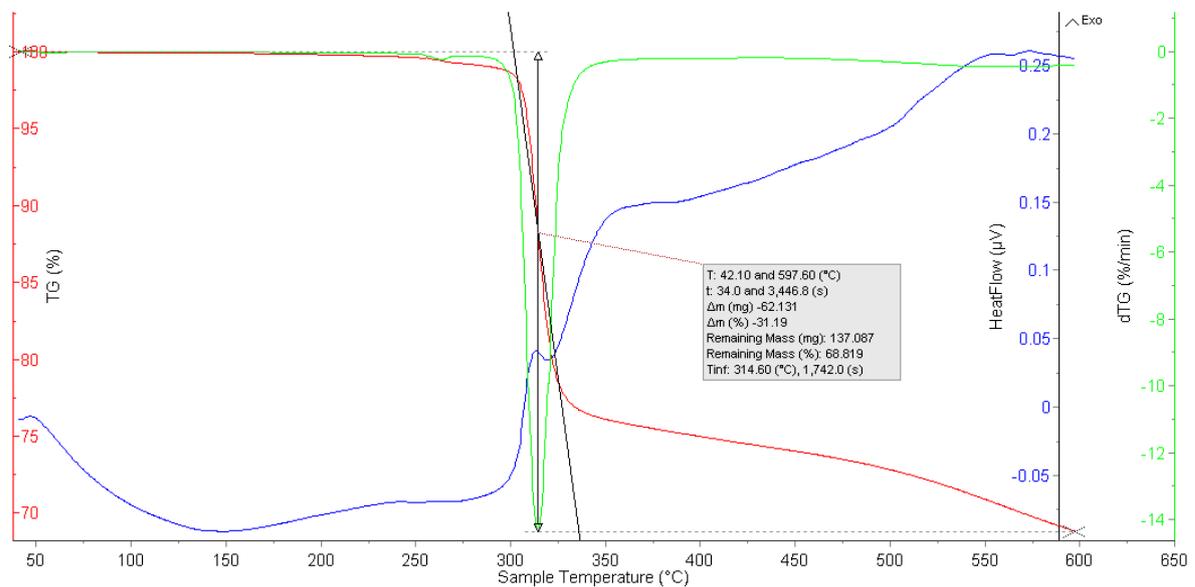


Fonte: Elaboração própria

As curvas TG (vermelho) mostram grande diferença na degradação térmica dos isolantes. Enquanto o isolante Celeron registra perda de massa total de 60,6% até

600°C, os isolantes ITVF-IT 5003-3 e ITVF Plus mostram perdas de massa totais mais modestas, de 18,92% e 9,81%, respectivamente. A curva de taxa de perda de massa DTG (verde) mostra picos bastante negativos para o Celeron, significando que este material é rapidamente degradado por combustão com o ar. O isolante Celeron sofre forte combustão com oxigênio da atmosfera a partir de 210°C, enquanto os isolantes ITVF-IT5003-3 e ITVF plus reagem pouco com este gás. Tal reação de combustão com o ar é sinalizada por picos DTA (Azul) exotérmicos intensos, observados na Figura 5, 6 e 7. Os novos materiais isolantes desenvolvidos são degradados lentamente a partir de cerca de 310°C, segundo as curvas TG e DTG, associados a eventos endotérmicos, segundo as curvas DTA (azul). Essas reações endotérmicas indicam a decomposição térmica lenta desses materiais com pouca oxidação, o que implica na melhoria da vida em serviço. Os isolantes ITVF-IT5003-3, especialmente ITVF plus, podem, assim, ser considerados mais resistentes a altas temperaturas que o Celeron. Estes resultados sugerem que a composição do Celeron, a base de algodão, é pouco resistente à decomposição térmica, uma vez que sofre queima ao ar.

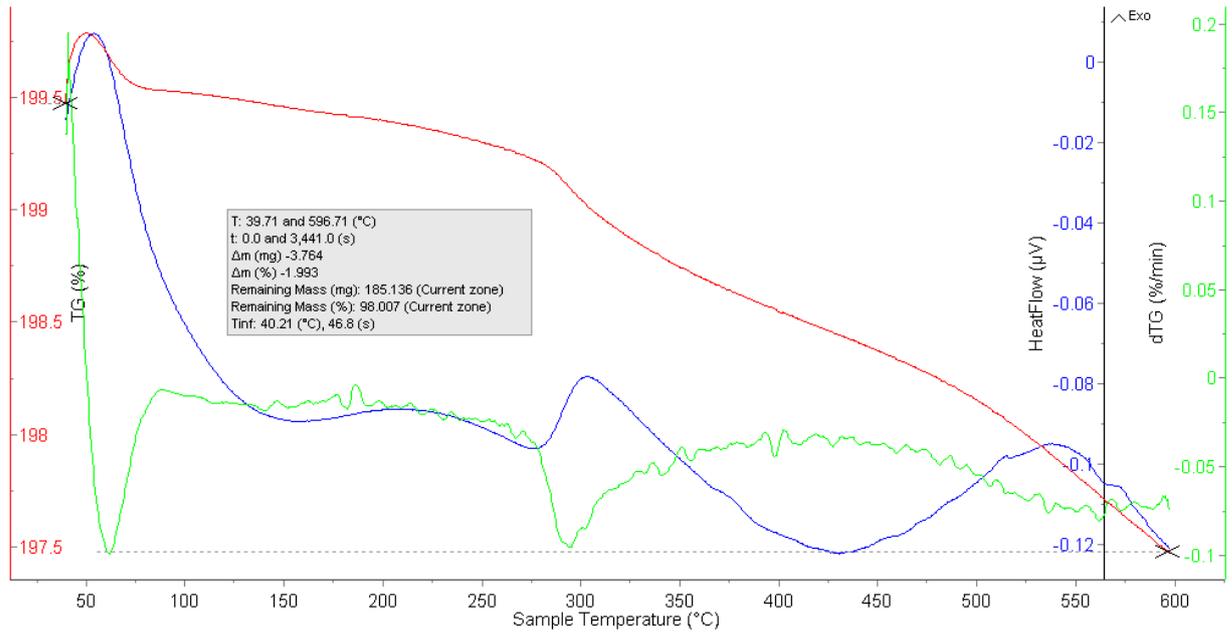
Figura 8 - Análise TG/DTA do Isolante ITVE IT5003 G-10



Fonte: Elaboração própria

Já a Figura 8 corresponde ao isolante ITVE G-10 IT-5003, por ser impregnado a base de resina termorrígida Epóxi, começou a decompor a temperatura de 275 °C e, ao final de 600 °C, teve perda de massa de 31,19 %.

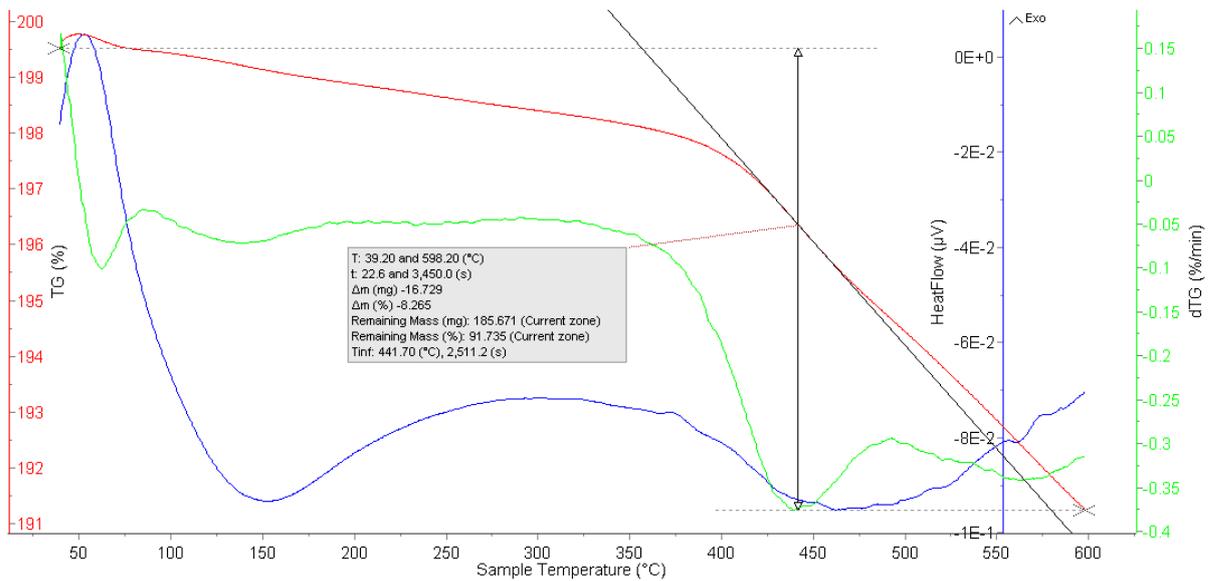
Figura 9 - Análise TG/DTA do Isolante ITVS-IT5004 G-7



Fonte: Elaboração própria

A Figura 9 corresponde ao material ITVS G-7 IT5004, isolante com estrutura de fibra de vidro impregnado com resina Inorgânica, iniciando a perder massa em 275 °C. Porém, ao final de 600 °C, perdeu apenas 2% de massa, o que mostra a estabilidade e resistência do isolante a alta temperatura.

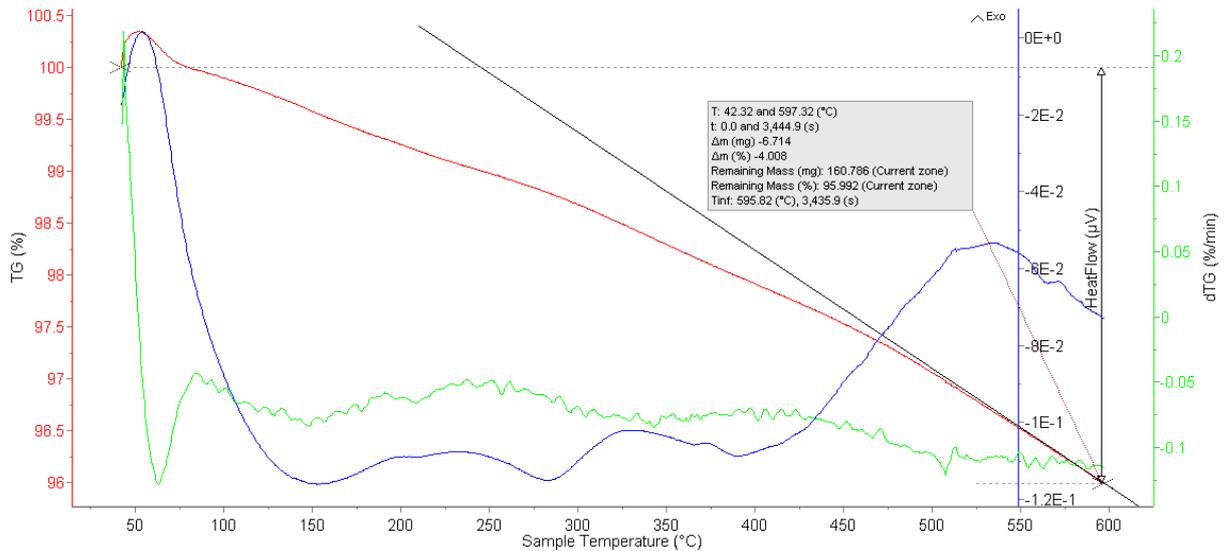
Figura 10 - Análise TG/DTA do Isolante ITVS-IT5004 G-7 PLUS



Fonte: Elaboração própria

A Figura 10 mostra resultados correspondentes ao Isolante ITVS-IT5004 Plus, isolante com estrutura de tecido de fibra de vidro entrelaçada, impregnado com resina termorrígida aditivada com resina inorgânica a fim de ter com este composto uma maior resistência mecânica sem perda de resistência a temperatura. A perda de massa iniciou-se em temperatura de 375 °C, e totalizou 8,27% ao final de 600 °C, se mostrando um excelente isolante.

Figura 11 - Análise TG/DTA do Isolante ITVS-IT5004 Refratário



Fonte: Elaboração própria

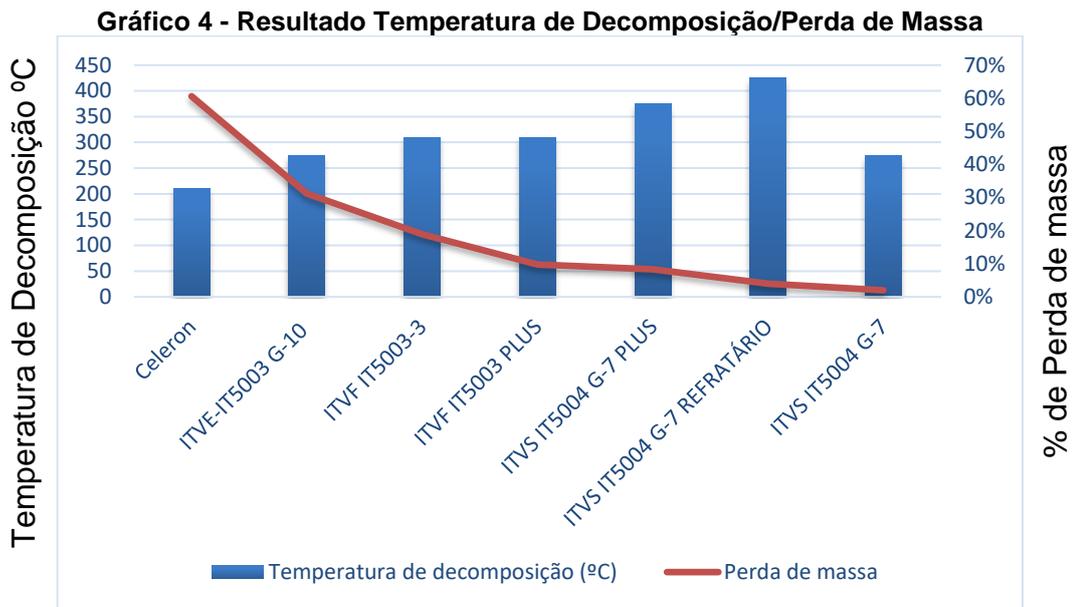
A Figura 11 corresponde ao Isolante ITVS Refratário, isolante com estrutura de tecido de fibra de vidro texturizado e inflado de alta gramatura, impregnado sob resina inorgânica, aditivada com resina refratária afim de alcançar resistência a alta temperatura. A Figura 11 indica uma perda de massa a 425 °C e ao final de 600 °C uma perda total de massa de 4%, o gráfico constante indica que esta perda está relacionada a umidade do isolante que foi dissipada durante o ensaio, onde se mostrou um isolante de grande eficiência.

A Tabela 24 e o Gráfico 4 compilam os resultados de TG/DTA quanto à temperatura de decomposição e perda dos massa dos relativos isolantes.

Tabela 24 - Medidas de (TG/DTA) para as diferentes amostras.

Isolantes termoeletricos	Temperatura de Trabalho °C	Temperaturas de Decomposição °C	% Perda de Massa Total
Celeron	120	210	60,6
ITVE-IT5003 G-10	155	275	31,19
ITVF IT5003-3	220	310	18,92
ITVF IT5003-3 PLUS	250	310	9,81
ITVS IT5004 G-7 PLUS	300	375	8,27
ITVS IT5004 G-7 REFRAATÁRIO	400	425	4,00
ITVS IT5004 G-7	300	275	1,99

Fonte: Elaboração própria



Fonte: Elaboração própria

Por meio da Tabela 24 e do Gráfico 4, observa-se que o novo Isolante ITVF-IT5003-3 apresentou dados significativos, iniciando a sua decomposição a 310 °C e ao final de 600 °C obteve perda de massa de 18,92%, enquanto os isolantes Celeron e ITVE G-10 obtiveram perda de massa de 60,6% e 31,19% respectivamente. Os demais isolantes apresentaram caracterização superiores ao isolante desenvolvido, porém são de alto custo devido a aplicação de resinas inorgânicas e caracterizam classificação térmica superiores.

5.2.5 Densidade

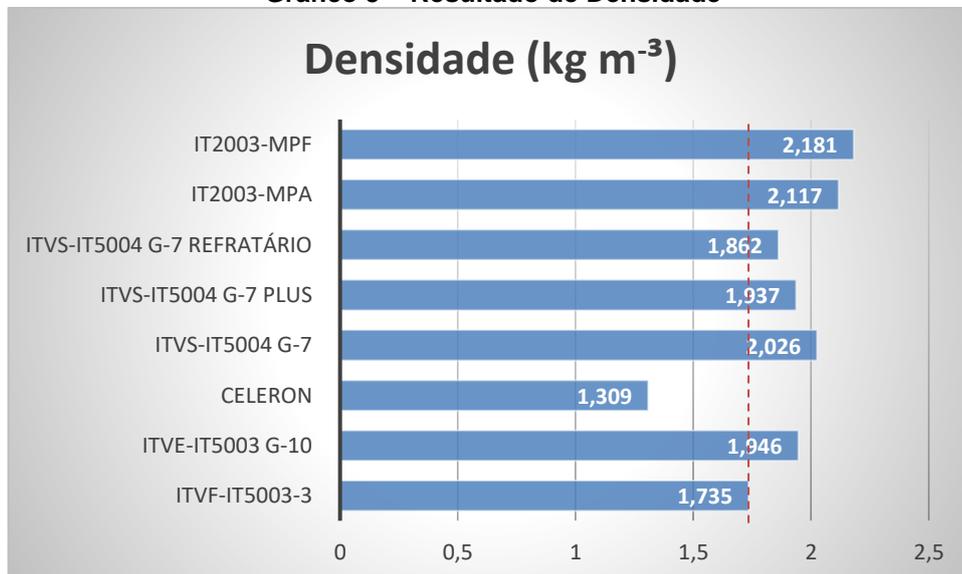
A Tabela 25 mostra as densidades medidas para os isolantes ensaiados segundo a Norma ISO 1183-1:2004.

Tabela 25 - Resultado de Densidade segundo a norma ISO 1183-1:2004

ISOLANTE TERMOELÉTRICO	DIMENSIONAL HxCxL mm	Massa (g)	DENSIDADE Kg.m ⁻³
ITVF-IT5003-3	10,3x49,6x50	44,3	1735,1
CELERON	7,5x44x44,5	19,0	1309,1
ITVE-IT5003 G-10	4,15x50x49,8	20,1	1946,3
ITVS-IT5004 G-7	4,9x50x49,7	24,6	2026,3
ITVS-IT5004 G-7 PLUS	5,7x49,8x49,9	27,4	1937,0
ITVS-IT5004 REFRACTÁRIO	26x55,1x70,1	186,9	1861,5
IT2003 MPA MICA MOSCOVITA	6,5x50x49,8	34,2	2117,2
IT2003 MPF MICA FLOGOPITA	3,3x50x49,8	17,9	2180,4

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 – Resultado de Densidade



Fonte: Elaboração própria

Por meio da Tabela 25 e Gráfico 5 entende-se que o isolante ITVF-IT5003-3 se mantém com a densidade acima do Celeron e bastante próximo dos demais, assim caracterizando uma boa compactação e, pela elevação da densidade, sugere-se a uma maior resistência a absorção de água e óleo.

5.2.6 Dureza

As escalas Shore (D) são indicadas para a medição de dureza de borrachas/elastômeros e usadas também para plásticos “moles” como poliolefinas, fluoro polímeros 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).

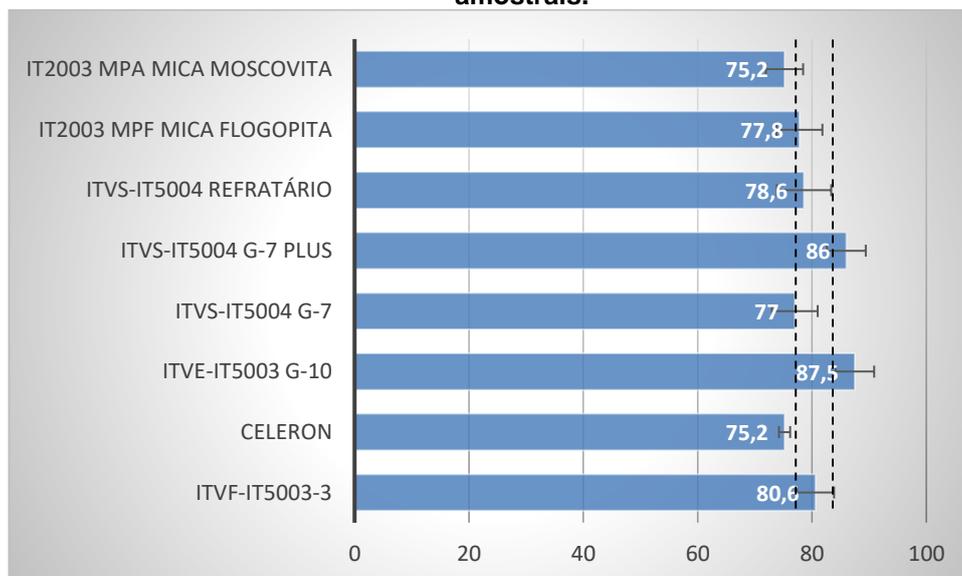
A Tabela 26 demonstra segundo a norma ISO 868 Shore os resultado dos ensaios de dureza Shore D em cinco (5) pontos de medidas.

Tabela 26 - Resultado Dureza ISO 868 Shore D

Isolante termoeletrico	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Dureza Shore (D)	Desvio padrão
ITVF-IT5003-3	84	79	75	82	83	80,6	3,65
CELERON	76	74	76	74	76	75,2	1,10
ITVE-IT5003 G-10	83	90	84	89	91,5	87,5	3,77
ITVS-IT5004 G-7	71	80	74	82	78	77	4,47
ITVS-IT5004 G-7 PLUS	85	80	90	88	87	86	3,81
ITVS-IT5004 REFRAATARIO	71	84	79	83	76	78,6	5,32
IT2003 MPF MICA FLOGOPITA	74	80	81	72	82	77,8	4,49
IT2003 MPA MICA MOSCOVITA	73	74	79	71	79	75,2	3,63

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 - Valores de dureza de isolantes térmicos e seus respectivos desvios padrão amostrais.



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 26 e o Gráfico 6 observa-se que a dureza Shore D do isolante termoelétrico ITVF-IT5003-3 tem a terceira maior dureza entre os isolantes propostos, relacionado a uma elevada compactação e cura eficiente, caracterizando um bom acabamento. O compósito polimérico de alta dureza tende a ser mais resistente a esforços de compressão em serviço.

6 CONCLUSÃO

Foram realizados diversos ensaios no Isolante ITVF-IT5003-3 em comparação aos demais isolantes existentes no mercado, afim de que possa se concluir que;

- O ensaio de rigidez dielétrica mostrou resultados que atendem aos objetivos, atingindo $10 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ de Isolação elétrica, mesmo a $220 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura;
- A medida de dureza Shore D de 80,6 se manteve no esperado, acompanhando os demais isolantes termorrígidos;
- A condutividade térmica medida atingiu o objetivo quando ensaiada à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, alcançando $0,425 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, e quando ensaiada à $100 \text{ }^\circ\text{C}$, alcançando $0,401 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, ou seja, mesmo aumentando a temperatura se manteve a baixa condutividade;
- O calor específico atingiu o objetivo quando ensaiado à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $100 \text{ }^\circ\text{C}$, com valores de $790,76 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e $784,03 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, mostrando que o material demanda certa energia para se aquecer, compatível com os demais materiais ensaiados;
- A Densidade $1,735 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ acompanha a densidade dos demais isolantes termorrígidos, assim indicando que se atingiu uma boa compactação.
- A temperatura de decomposição com início de perda de massa a $310 \text{ }^\circ\text{C}$, e $18,92\%$ de perda total a $600 \text{ }^\circ\text{C}$, número bastante inferior ao Celeron e ITVE G-10 por exemplo, qualifica o novo material para aplicações em altas temperaturas.

O trabalho demonstra por meios de caracterização do material que o isolante termoelétrico ITVF IT5003-3 é um excelente isolante podendo atender perfeitamente a classificação térmica (R) 220°C da Norma ABNT NBR IEC 60085 Isolação Elétrica – Avaliação e designação Térmicas.

Conforme a Tabela 4 o isolante desenvolvido caracteriza menor custo de fabricação com relação aos demais isolantes caracterizados, assim sugere-se junto as especificações técnica, um novo isolante termoelétrico competitivo e de menor custo a ser lançado no mercado de isolação termoelétrico, atendendo as especificações do objetivo desta dissertação.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR IEC 60085**: informação e documentação – Citações em Documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2017.

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, 10 set. 2001.

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 JUNIOR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 2021. 10ª Edição.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Técnicas e caracterização de polímeros**. São Paulo: 2003.

CARVALHO, L. M.; JESUS, V. **História da eletricidade**. 2000.

EDUFSCAR. **Engenharia de materiais para todos**. 2021, 3ª edição

BIASOTTO MANO, ELOISA. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. Em: São Paulo: 1991.

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.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 868-2003 Dureza ShoreReference number ISO**. 01, mar. 2003. Disponível em: <www.iso.ch>. acesso 07, abr, 2023.

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.

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

IONASHIRO, M. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial**. set. 2004

MAZALI, ITALO O. **Determinação da Densidade de Sólidos pelo Método de Arquimedes**. Set. 2005.

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

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**, jan. 1997.

PAVANATI, H. C. **Ciências e tecnologia de materiais**. [s.l: s.n.].

RACIK, 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.

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

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