

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME WALDOW

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO REFORÇADO COM
PARTÍCULAS FERROMAGNÉTICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

GUILHERME WALDOW

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO REFORÇADO COM
PARTÍCULAS FERROMAGNÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Waldow

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO REFORÇADO COM PARTÍCULAS FERROMAGNÉTICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado às **10:00hs** do dia **3 de Dezembro de 2018**, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Cornélio Procópio, ___/___/____.

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa (Orientador)

Prof. Dr. Ana Paula de Moura (Membro)

Prof. Dra. Sandra Mara Domiciano (Membro)

Prof. Dr. Rogério Ikegami (Membro)

Dedico esse trabalho a minha família e
amigos que tornaram possível essa
conquista.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos laboratórios LEME UTFPR-CP e CMCM UTFPR-CT pelos equipamentos e mão de obra cedidas para a realização deste trabalho. Agradeço também aos membros do laboratório de materiais compósitos (LMC UTFPR-CP) pelo apoio nesses anos conjuntos de trabalho.

“I look like I’m suffering, huh? That’s not good... But of course I’d be suffering. I mean, I’m gonna sail in uncharted waters, right? Both, taking on a challenge and creating something. It is painful, but it’s fulfilling.”

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar um material compósito reforçado por partículas ferromagnéticas visando a aplicação de um atuador eletromagnético para controle de vibração. O desenvolvimento do compósito foi focado no processo de fabricação, especificamente na distribuição de partículas. Além disso, as amostras foram separadas em grupos divididos por tamanhos de partículas para avaliar a influência da granulometria das partículas magnéticas nas propriedades do compósito. A avaliação das propriedades foram focadas nas características mecânicas, tração, flexão, magnética e adesão. Para avaliar e validar os testes, os corpos de prova de materiais convencionais também foram testados. Os campos de deformação de tração e flexão foram adquiridos através de correlação de imagem digital (DIC). No ensaio de flexão as amostras dopadas obtiveram um maior módulo de elasticidade em comparação com os corpos de prova de epóxi puro, além disso, o material mais rígido foi o com o menor tamanho de partícula. Os resultados do teste de tração apresentaram propriedades inferiores para todas as amostras de compósitos. Ao longo deste trabalho, foi demonstrado que os compósitos magnéticos desenvolvidos possuem propriedades interessantes para aplicações eletromagnéticas, uma vez que possuem uma resposta magnética e uma densidade relativamente baixa.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop and characterize a particulate composite with magnetic properties for the application of an electromagnetic actuator for vibration control. The composite development was focused on the manufacture process, specifically on the particle distribution. Furthermore, specimens were separated in groups divided by particle sizes to evaluate the influence of the magnetic particles granulometry in the composite properties. The evaluation of the magnetic composite properties was focused on the mechanical characteristics, tensile and flexural, magnetic and adhesion. In order to evaluate and validate the tests, standardized specimens were tested as well. Flexural properties showed increasing elasticity modulus for the composite materials compared to the pure epoxy specimens, moreover, the most rigid material was the one with the smallest particle sizes. The tensile test results presented inferior properties for all doped samples. Tensile and flexural strain values were acquired with digital image correlation (DIC). Throughout this work, it was shown that the developed magnetic composites has interesting properties for electromagnetic applications, once it possess a magnetic response and a relative small density.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Grupo epóxico.....	18
Figura 2 – Reação do grupo epóxico com uma amina e com um grupo hidroxila.....	20
Figura 3 – (a) Curva TG e (b) Curva DTG para resina epóxi	20
Figura 4 – Estruturas de compósitos tipicamente usadas em aviões comerciais.....	22
Figura 5 – Classificações materiais compósitos.....	23
Figura 6 – Esquema da fase intermediária partícula-matriz	25
Figura 7 – Módulo de elasticidade versus concentração de aditivos.....	26
Figura 8 – Esquema das interações das partículas nos SMC's	27
Figura 9 – Tensão real x tensão de engenharia	29
Figura 10 – Máquina de vácuo Edwards RV8 e câmara do laboratório LMC UTFPR- cp	32
Figura 11 – (a) Resina antes e (b) após a câmara de vácuo	32
Figura 12 – Conjunto de peneiras granulométricas.....	33
Figura 13 – (a) Molde de silicone (b) molde com camadas (c) câmara de pressão ..	35
Figura 14 – Esquema de cura dos cdp's	35
Figura 15 – Dimensões do corpo de prova de flexão	36
Figura 16 – Ensaio de flexão.....	37
Figura 17 – Obtenção dos dados de deflexão através de DIC	38
Figura 18 – Dimensões corpo de prova para ensaio de tração	39
Figura 19 – Fixação do corpo de prova de tração.....	40
Figura 20 – Obtenção da deformação de tração por DIC.....	41
Figura 21 – (a) Projeto do suporte e (b) suporte fabricado.....	42
Figura 22 – Microscópio eletrônico EVO MA 15.....	44
Figura 23 – Equipamento Quanta Quorum Q150R ES	44
Figura 24 – Amostras dentro da câmara do MEV	45
Figura 25 – Forno utilizado para evaporação	46
Figura 26 – Amostras em cadinhos para evaporação	47
Figura 27 – Curva média tensão x deformação real para a epóxi pura.....	50
Figura 28 – Curva média tensão x deformação real para os 0.250-0.450 SPS	51
Figura 29 - Curva média tensão x deformação real para os 0.450-1 SPS	52
Figura 30 – Curva média tensão x deformação real para os 1-2 SPS	53
Figura 31 – Todas as curvas tensão x deformação para flexão	54
Figura 32 - Curva média tensão x deformação real a tração para a epóxi Pura	55
Figura 33 - Curva média tensão x deformação real a tração para os 0.250-0.450 SPS	56
Figura 34 - Curva média tensão x deformação real a tração para os 0.450-1 SPS ..	56
Figura 35 - Figura 36 - Curva média tensão x deformação real a tração para os 1-2 SPS	57

Figura 37 – (a) Todas as curvas tensão x deformação para tração (b) Módulo de elasticidade	58
Figura 38 – Força magnética em relação a distância.....	59
Figura 39 – Máxima força magnética	60
Figura 40 – Deformação dos (a) 1-2 SPS (b) 0.450-1 SPS (c) 0.250-0.450 SPS	61
Figura 41 – (a) Análise EDS e (b) ampliação da fratura das amostras 0.250-0.450 SPS	61
Figura 42 - (a) Análise EDS e (b) ampliação da fratura das amostras 1.000-2.000 SPS	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do aço AISI 1045	27
Tabela 2 – Propriedades mecânicas aço AISI 1045.....	28
Tabela 3 – Propriedades de manuseio da resina epóxi	31
Tabela 4 – Propriedades físicas da resina epóxi.....	33
Tabela 5 – Tamanho de partículas.....	34
Tabela 6 – Massas obtidas com o processo de produção	48
Tabela 7 – Proporção de aço, epóxi e vazios em volume	49
Tabela 8 – Propriedades obtidas com o ensaio de flexão	53
Tabela 9 – Propriedades obtidas com o ensaio de tração	58
Tabela 10 – Análise EDS para 0.250-0.450 SPS	62
Tabela 11 – Análise EDS para 1.000-2.000 SPS	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1 RESINA EPÓXI	18
4.1.1 Aplicações da resina epóxi	18
4.1.2 Cura do epóxi	19
4.1.3 Degradação da resina epóxi	20
4.2 MATERIAIS COMPÓSITOS	21
4.2.1 Compósitos reforçados por partículas	23
4.2.2 Propriedades magnéticas em materiais compósitos de matriz polimérica	26
4.3 AÇO AISI 1045	27
4.4 TENSÃO-DEFORMAÇÃO REAL POR EXTENSOMETRIA ÓPTICA	28
4.5 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	29
5 MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1 MATRIZ DE EPÓXI	31
5.2 PARTICULAS ELETROMAGNÉTICAS	33
5.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	34
5.4 ENSAIO DE FLEXÃO	36
5.4.1 Procedimentos do ensaio	36
5.4.2 Cálculo dos resultados	37
5.5 ENSAIO DE TRAÇÃO	39
5.5.1 Procedimento do ensaio	40
5.5.2 Cálculo dos resultados	40
5.6 TESTE DE FORÇA MAGNÉTICA	42
5.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	43
5.7.1 Equipamentos utilizados	43
5.7.2 Amostras	44
5.8 REGRA DAS MISTURAS	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
6.1 MASSAS DOS CORPOS DE PROVA	48
6.2 REGRA DAS MISTURAS	49
6.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO	49
6.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	54
6.5 RESULTADOS DO TESTE DE FORÇA MAGNÉTICA	59
6.6 RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	61

7 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Mesmo com uma grande quantidade de materiais já disponíveis no mercado, cada um com suas particularidades, ainda existe uma forte demanda para o desenvolvimento de materiais com os mais variados conjuntos de características e propriedades. (MAZUMDAR, 2002).

Materiais compósitos contribuíram consideravelmente na redução de peso, no aumento da confiabilidade e tempo de vida útil de equipamentos de alta performance, devido a um conjunto de propriedades que não podem ser alcançados por materiais convencionais de engenharia, como por exemplo o alumínio, ligas de titânio e ferro (ANTIPOV; KUL; PIMENOV, 2016). Essas propriedades incluem baixa densidade, grande resistência mecânica, rigidez e resistência a corrosão. (CHEUNG et al., 2009; HAGNELL; LANGBECK; ÅKERMO, 2016; NICKELS, 2017).

Porém uma das maiores limitações de compósitos em geral, é a ausência de interação desses a campos magnéticos, prejudicando seu uso em métodos de controle magnéticos, como por exemplo, atuadores magnéticos de vibração e testes como o *magnetic flux leakage* (MFL) (PAULA et al., 2015).

Nas últimas décadas, o estudo de materiais compósitos com propriedades magnéticas tem sido estimulado por novos métodos e por esses possuírem propriedades que são desejadas por diversas aplicações. Compósitos produzidos por *electrospinning*, por exemplo, tem sua aplicação devido a resposta a impulsos magnéticos e sua característica isolante (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

Uma maneira de obter essas propriedades é com a adição de partículas sólidas ferromagnéticas na matriz polimérica (PAULA et al., 2015; TALIJAN, 2010). Com essa adição algumas propriedades mecânicas também podem ser melhoradas, em custo do decréscimo de outras. Considerando que as partículas adicionadas possuem uma rigidez maior que a matriz, a dureza e rigidez do compósito podem melhorar (KUNDIE; MUCHTAR, 2018). Já a resistência a tração pode ser prejudicada se essas partículas e a matriz não tiverem uma boa união, as partículas se comportarão como vazios dentro do material e formando pontos de concentração de tensão (MEBARKI et al., 2014).

A alteração de algumas variáveis como proporção de reforço-matriz, densidade de empacotamento e orientação de reforço também pode ter um efeito significativo nas propriedades do material (ALFONSO et al., 2016; NOWOSIELSKI et

al., 2015). O tamanho de partícula também pode ter um efeito significativo nas propriedades mecânicas e será objeto de pesquisa neste trabalho (KUNDIE; MUCHTAR, 2018). A resistência do material é fortemente dependente da transferência de tensão entre as partículas e a matriz. As partículas menores podem ter uma área de superfície livre maior do que as maiores, induzindo uma melhor união entre o material adesivo e o reforço (OMAR; AKIL; AHMAD, 2013).

2 JUSTIFICATIVA

A constante necessidade de materiais mais leves do que os aços convencionalmente usados e com ótima resistência mecânica tem impulsionado o estudo de materiais compósitos. A ausência de propriedades magnéticas impossibilita o uso de métodos não destrutivos de controle magnético, sendo esses métodos simples e úteis para o controle do estado do material, mesmo estes estando em utilização. Portanto é necessário desenvolver um método simples de suprir essa propriedade a estes. A adição de partículas recicláveis de aço AISI 1045 se encaixa nessa necessidade pela facilidade de se encontrar esse tipo de material em refugos industriais e presença de resposta magnética. Os efeitos dessa adição nas propriedades mecânicas da matriz polimérica precisam ser avaliados.

Para um melhor controle magnético é necessário a adição de uma quantidade substancial de partículas e por esse motivo procuraremos o depósito máximo, ou seja, a maior quantidade possível de partículas de aço adicionadas a matriz. Também serão avaliadas as propriedades mecânicas, magnéticas e adesão partícula-matriz para três grupos de tamanhos de partículas. Além disso, devido a diferença de densidade entre esses as partículas e a matriz, um método deve ser idealizado para a produção de corpos de prova com qualidade satisfatória.

Por conseguinte, o presente trabalho tem por objetivo caracterizar as propriedades mecânicas e analisar quantitativamente a resposta magnética de um compósito com matriz de epóxi dopada com partículas ferromagnéticas de aço AISI 1045 em diferentes tamanhos de partículas, visando o uso de atuadores magnéticos para controle de vibração nesses compósitos. Esses resultados servirão como ponto inicial para o desenvolvimento de compósitos reforçados por fibras de vidro e aço e o efeito da aplicação dessas partículas rígidas em meio a matriz polimérica.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Caracterização de um compósito reforçado por particuladas ferromagnéticas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados

(1) Realizar ensaios mecânicos de tração e flexão para amostras com diferentes granulometrias;

(2) Desenvolver um método de avaliação da resposta magnéticas;

(3) Realizar ensaio de avaliação das propriedades magnéticas;

(4) Analisar a morfologia da fratura com microscopia eletrônica de varredura;

(5) Analisar a adesão entre as partículas e a matriz através da microscopia eletrônica de varredura;

(6) Calcular a taxa em volume de aço, resina e vazios através da lei das misturas;

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

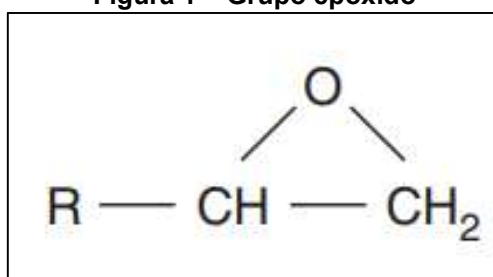
No presente capítulo são apresentados os conceitos sobre os materiais e os métodos utilizados na presente pesquisa, visando uma maior compreensão dos resultados obtidos.

4.1 RESINA EPÓXI

As resinas epóxi foram descobertas pelo químico russo Prileschajew em 1909. Sua primeira aparição comercial significativa aconteceu por volta de 1947, nos Estados Unidos da América. O primeiro produto foi fabricado pela companhia Devoe-Raynolds e era basicamente considerado como um poliol para a preparação de óleos secantes sintéticos (MAY, 1988).

Resinas epóxi são definidas como moléculas que contém um ou mais grupo epóxido nas extremidades das cadeias. O grupo epóxido (C_2H_3O), também conhecido como óxido de etileno, é mostrado na figura 01 (DAVÉ et al., 2012).

Figura 1 – Grupo epóxido



Fonte: Nakada (2012).

4.1.1 Aplicações da resina epóxi

As resinas epóxi são atualmente uma das mais importantes e utilizadas resinas termorrígidas (GU et al., 2013). Possuem uma vasta gama de propriedades desde líquidos de baixa densidade sem solventes até sólidos com alta temperatura de fusão (FINK, 2018). Compósitos com matriz de epóxi mostraram uma maior

estabilidade mecânica que outros polímeros, como por exemplo a poliuretana (ABDEL-MAGID et al., 2003; MONTEIRO; D'ALMEIDA, 2018).

São vastamente estudadas e utilizadas em diversos produtos industriais, como adesivos de estruturas automotivas e compósitos laminados de alta performance reforçados por fibras (LIU et al., 2017; NICKELS, 2017; SPRENGER, 2013). Também são muito utilizadas como adesivos e na indústria eletrônica (CASTELLO et al., 2017; GU et al., 2013). Isso é devido a suas ótimas propriedades mecânicas, alta adesividade a muitos substratos, boa resistência química e resistência ao calor (JIN; LI; PARK, 2015; NA et al., 2018).

4.1.2 Cura do epóxi

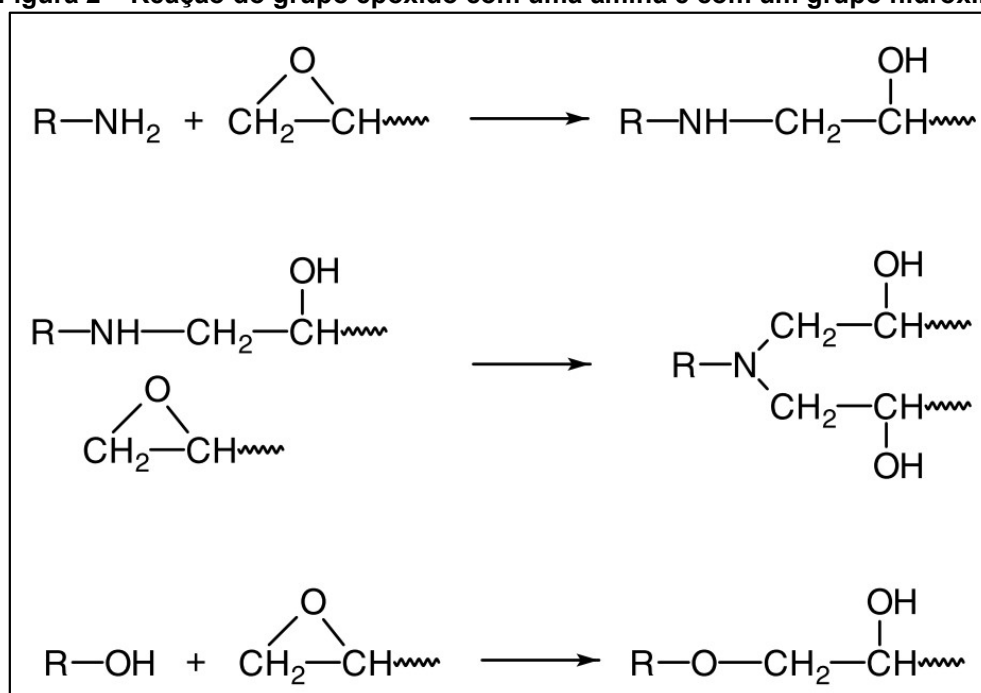
Para a cura da resina epóxi são utilizadas uma vasta variedade de endurecedores. Suas propriedades dependem do tipo de combinação específica da resina epóxi e do endurecedor utilizado (JIN; LI; PARK, 2015).

O processo de cura é uma reação química onde o grupo epóxido na resina reage com o endurecedor para formar uma estrutura com altas quantidades de ligações cruzadas, a chamada rede tridimensional termorrígida. O endurecimento de resina epóxi podem ser geralmente descritas por uma autocatalização de ordem “n” (DAVÉ et al., 2012).

O grupo epóxido reage com substâncias de variadas classes. Mas em pratica apenas algumas possíveis reações são usadas para a cura. Endurecedores de resinas epóxi podem ser classificados em três classes: compostos com hidrogênios ativos, iniciadores iônicos e grupos hidroxila. A reação de cura mais utilizada é baseada na reação de poli adição, abrindo o anel epóxido (FINK, 2018). Na figura 2 é possível ver a abertura do anel epóxido através da reação com um grupo amina e com um grupo hidroxila.

Devido a vasta aplicação de epóxi em estruturas de materiais compósito e sua já extensa presença no mercado, a resina epóxi foi a escolhida para esse estudo.

Figura 2 – Reação do grupo epóxico com uma amina e com um grupo hidroxila.

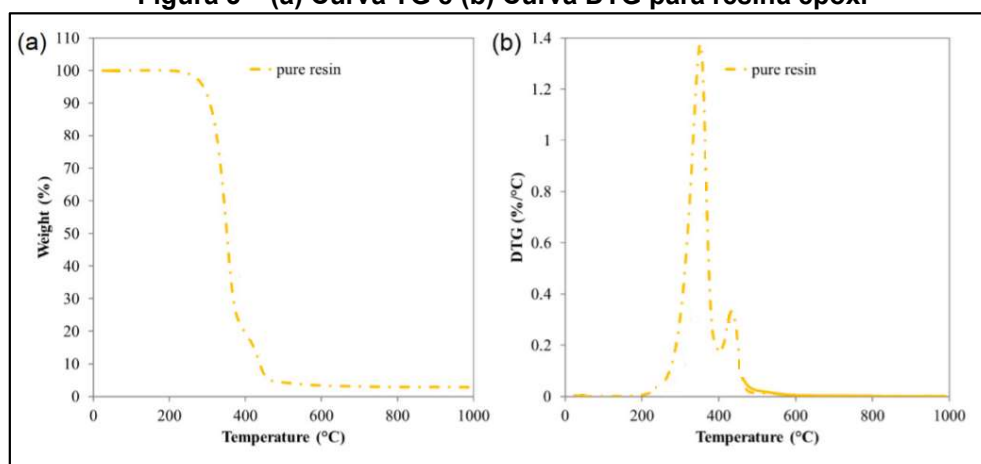


Fonte: Fink (2018)

4.1.3 Degradação da resina epóxi

Termogravimetria (TG) e Termogravimetria derivada (DTG) são utilizadas para se monitorar a variação da massa de uma amostra em função da temperatura. Seu princípio de funcionamento é analisar a perda de massa para diferentes temperaturas. BALDISSERA et al. (2017) apresentou as curvas TG e DTG para a resina epóxi, representadas na figura 3.

Figura 3 – (a) Curva TG e (b) Curva DTG para resina epóxi



Fonte: Adaptado de Baldissera et al. (2017)

É possível observar que o primeiro degrau de decomposição aconteceu a um sinal exotérmico próximo a 355°C. O segundo degrau de decomposição foi menos intenso, a uma temperatura próxima de 440°C. Essas temperaturas serão utilizadas para realizar a evaporação da resina.

4.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

A aplicação de materiais compósitos é uma realidade atual, principalmente no setor de indústrias aeronáutica e aeroespacial (GORBATIKH; WARDLE; LOMOV, 2016). Compósitos podem ser definidos como um material multifase formado por dois ou mais materiais que, quando combinados, produzem um material com propriedades que excedem a dos materiais constituintes. Em outras palavras, procura-se moldar os melhores arranjos de propriedades por uma combinação criteriosa de dois ou mais materiais distintos. Esse materiais que formam o compósito podem ser classificados como aglomerante (fase contínua ou matriz) ou reforço (fase dispersa) (CHOUBEY; SUNEETHA; PANDEY, 2018; TITA, 2006).

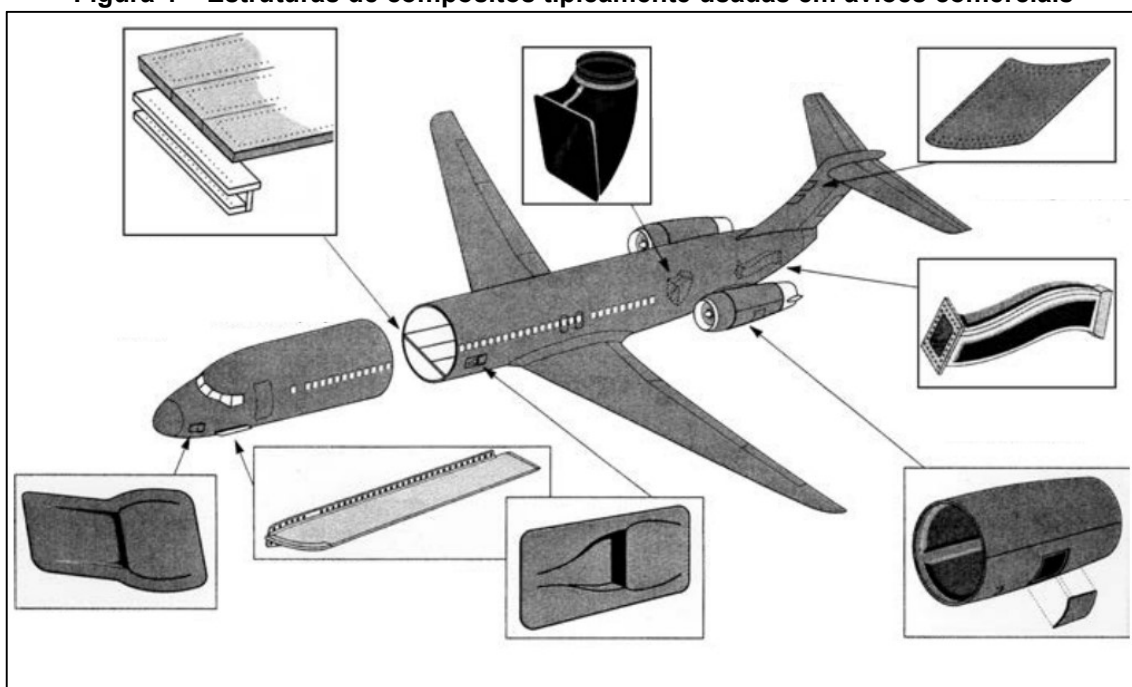
Segundo Sreekumar e Thomas (2008), é a de que materiais compósitos são materiais heterogêneos criado pela junção de dois ou mais componentes com o objetivo de se obter propriedades e características específicas. A matriz dá ao material sua forma, superfície e é responsável de transmitir as tensões para os reforços. O reforço é responsável por suportar os carregamentos aplicados.

O desenvolvimento de materiais compósitos com propriedades que são praticamente inatingíveis para materiais convencionalmente utilizados na engenharia, como por exemplo alumínio, aço e ligas de titânio, contribuiu consideravelmente para diminuir o peso, melhorar o nível de confiança e o tempo de vida útil (ANTIPOV; KUL; PIMENOV, 2016).

Materiais compósitos são em geral leves se comparado aos metais, tem boa rigidez e boas propriedades mecânicas, ou seja, com o uso desse tipo de material é possível a redução no peso final do produto e até mesmo uma redução de custos. Com a redução de peso significativa, o desempenho melhora e conseqüentemente, no caso de automóveis, há um menor consumo de combustível e uma redução na emissão de CO₂ (DE MACEDO et al., 2018; FAN; NJUGUNA, 2016).

Dentre as principais aplicações atuais, podemos citar a indústria aeronáutica, estruturas aero espaciais, materiais esportivos e em outras variadas aplicações industriais (CHEUNG et al., 2009; HAGNELL; LANGBECK; ÅKERMO, 2016; NICKELS, 2017). A figura 4 mostra estruturas de aviões comerciais comumente produzidas com materiais compósitos (MAZUMDAR, 2002).

Figura 4 – Estruturas de compósitos tipicamente usadas em aviões comerciais

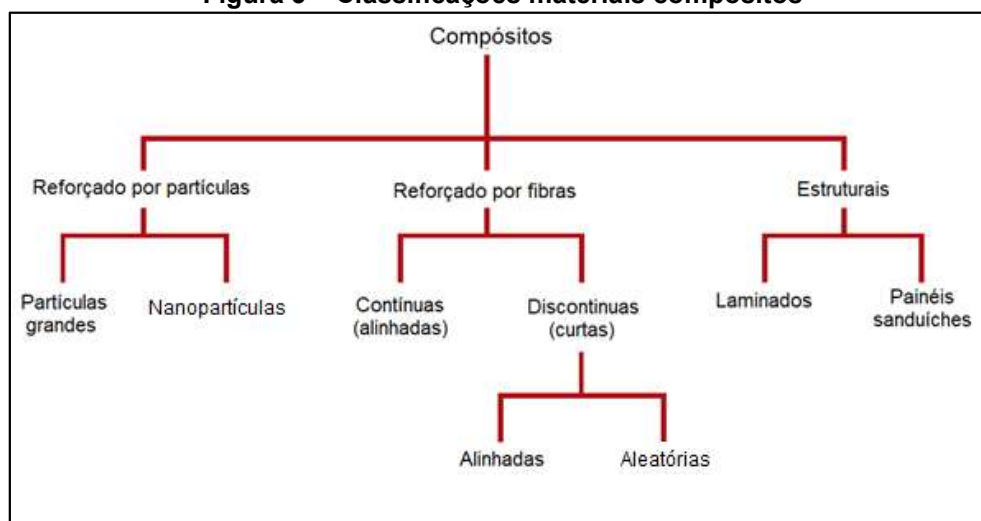


Fonte: Adaptado de Mazumdar (2002)

Mesmo esses materiais sendo geralmente mais caros se comparados com materiais convencionais, seu uso tem se tornado cada vez mais popular, seja por causa de suas propriedades como a de isolante elétrico, sua resistência a corrosão, sua flexibilidade e baixa manutenção ou por seu longo tempo de vida útil e flexibilidade de design (MÅRTENSSON; ZENKERT; ÅKERMO, 2015; SAI, 2016).

Callister Jr. e Rethwisch (2010) citam uma possível classificação para os materiais compósitos, demonstrado na figura 5, dividida em 3 principais grupos: reforçado por partículas, por fibras e materiais estruturais, com pelo menos duas subdivisões cada.

Figura 5 – Classificações materiais compósitos



Fonte: Adaptado de Callister (2010)

Portanto, a fase dispersa não necessariamente tem de ser na forma de longas fibras. Essas podem ter a forma de partículas, flocos, fibras curtas, fibras contínuas ou laminados e painéis sanduíches (CHAWLA, 2013).

4.2.1 Compósitos reforçados por partículas

A disponibilidade de materiais na forma de partículas é significativamente maior que na forma de fibras, devido ao fato de que a produção de materiais nessa forma é mais fácil. Grande parte dos materiais sólidos podem ser convertidos em pó por processos como a moagem (NETO; PARDINI, 2016). Compósitos reforçados por partículas tem se tornado uma opção para várias aplicações estruturais devido ao seu excelente balanço entre resistência ao impacto e peso (OMAR; AKIL; AHMAD, 2013).

Como mostrado na figura 5, existem 2 classificações de compósitos reforçados por partículas, sendo essas partículas grandes e nano partículas. As distinções entre estes são baseadas no mecanismo de reforço ou fortalecimento.

O termo “grandes” é usado para indicar que a interação entre a partícula e a matriz não pode ser tratada no nível atômico ou molecular, então é utilizada a mecânica contínua.

Para grande parte desses materiais, a fase dispersa é mais rígida e dura que a matriz. Essas partículas tendem a restringir o movimento da fase contínua nas suas proximidades. Em essência, a matriz transfere parte da tensão aplicada para as

partículas, que suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou aprimoramento das propriedades mecânicas e o comportamento depende de uma forte ligação na interface entre as fases (W. D. CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

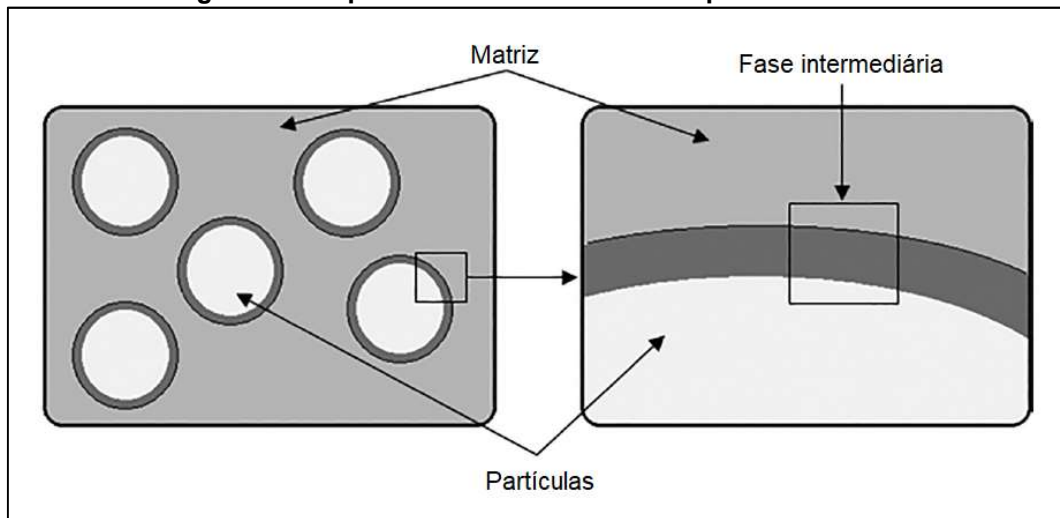
Já as nano partículas são muito menores, com diâmetros entre 10nm e 100nm. Com isso, a interação partícula matriz é no nível atômico ou molecular (W. D. CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

Algumas propriedades mecânicas podem ser melhoradas com essa adição, em detrimento de outras propriedades. A dureza, rigidez e resistência a compressão, por exemplo, podem ter melhoras porque as partículas adicionadas geralmente possuem uma rigidez maior que a matriz polimérica (KAMALBABU; KUMAR, 2014). A resistência a tensão pode diminuir se esse material adicionado agir como um concentrador de tensão (MEBARKI et al., 2014).

Em compósitos particulados com matriz polimérica, a interação partícula matriz tem papel principal em determinar suas propriedades em geral. Sobre condições de perfeita adesão, uma grande quantidade de energia é consumida na interface partícula-matriz. A existência de uma fina e resistente fase intermediária resulta em uma transferência efetiva de tensão. (KUNDIE; MUCHTAR, 2018). A figura 6 exemplifica essa fase intermediária.

Partículas com menores tamanhos podem aumentar os obstáculos para a deformação do material, diminuir deformações localizadas e podem também melhorar a resistência a flexão. Além disso, devido a uma maior área de contato, uma maior energia de superfície na interface matriz-partícula pode melhorar a ligação entre as duas fases do compósito, melhorando as propriedades. (KUNDIE; MUCHTAR, 2018).

Figura 6 – Esquema da fase intermediária partícula-matriz



Fonte: Adaptado de Kundie; Muchtar (2018)

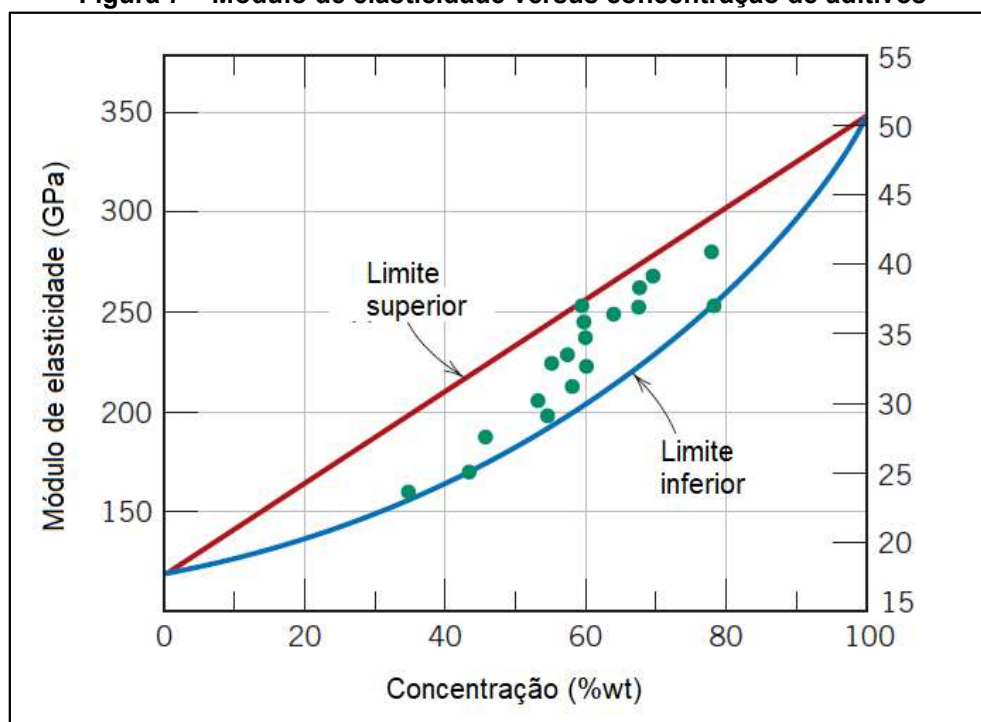
Partículas podem ter variadas geometrias. Para um reforço efetivo, as partículas têm que ser uniformemente distribuídas na matriz. Além disso, a fração volumétrica das duas fases influenciam no comportamento e nas propriedades mecânicas (W. D. CALLISTER; RETHWISCH, 2010). As equações 1 e 2 foram formuladas para prever o limite superior e inferior do módulo de elasticidade.

$$E_c(\text{superior}) = E_m V_m + E_p V_p \quad (1)$$

$$E_c(\text{inferior}) = \frac{E_m E_p}{E_p V_m + E_m V_p} \quad (2)$$

Um exemplo de como esses limites funcionam pode ser visto na figura 7. Assim, o efeito de características relacionadas à partícula, tais como tamanho de partícula, adesão de interface partícula-matriz, quantidade de partículas, densidade de empacotamento, formato de partícula e geometria requerem atenção extra durante a avaliação das propriedades mecânicas (ALFONSO et al., 2016; OMAR; AKIL; AHMAD, 2013).

Figura 7 – Módulo de elasticidade versus concentração de aditivos



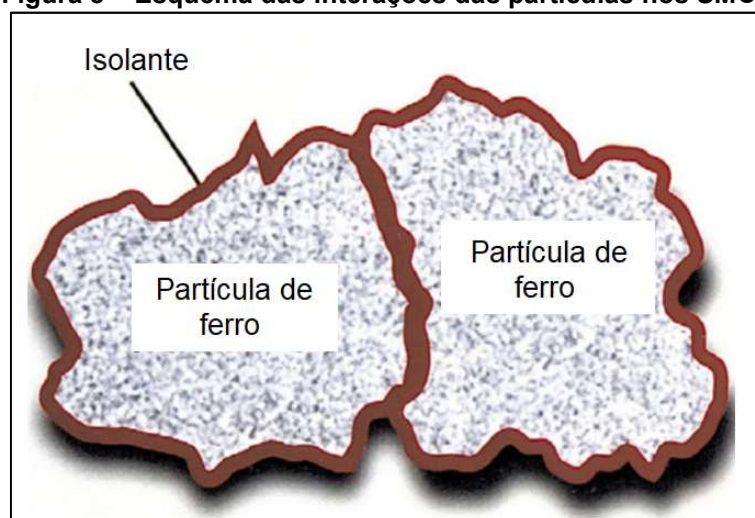
Fonte: Adaptado de Callister (2010)

4.2.2 Propriedades magnéticas em materiais compósitos de matriz polimérica

Uma das maiores limitações dos materiais poliméricos, é a ausência de qualquer resposta ou propriedade magnética. Os compósitos mais utilizados em estruturas como os reforçados por fibras de vidro ou aramida também carecem desse tipo de propriedade pois prejudica o uso de sistemas de controle magnéticos que vem sendo utilizados, como atuadores magnéticos para controle de vibração e testes como “*Magnetic Flux Leakage*” (MFL) (PAULA et al., 2015). São recursos não destrutivos e de fácil utilização que podem potencializar as aplicações de materiais compósitos.

Existem variados estudos sobre fabricação de novos materiais com propriedades magnéticas. Um exemplo que pode ser dado são os SMC's (*Soft Magnetic Composites*) (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007), que utiliza resina e partículas de ferros extremamente pequenas. Essas tem por objetivo ter uma resposta magnética sem haver a condução elétrica, pois a matriz polimérica além de unir as partículas se comporta como um isolante (SOWTER, 1987). Esse efeito é mostrado na figura 8.

Figura 8 – Esquema das interações das partículas nos SMC's



Fonte: Adaptado de Shokrollahi (2007)

Esses e outros materiais são desenvolvidos como uma alternativa viável para materiais de aço em transformadores, indutores, sensores, motores elétricos e outras novas aplicações, pois permitem redução de custo e peso sem sacrificar o desempenho (DE MACEDO et al., 2018; FÜZER et al., 2018).

Uma forma mais simples de obter uma resposta magnética, por parte de um compósito, é pela adição de partículas que respondem a esse tipo de estímulo em meio a matriz (PAULA et al., 2015; TALIJAN, 2010).

4.3 AÇO AISI 1045

Ferro puro não é utilizado diretamente como um material estrutural devido a este ser dúctil e fraco. A combinação de ferro, carbono e outros elementos químicos produz o aço que tem uma maior qualidade em dureza, resistência e ductilidade. O aço carbono AISI/SAE 1045 é um aço de médio carbono utilizado constantemente em partes estruturais e elementos de equipamentos (IBRAHIM, 2015). A composição desse aço, segundo HARVEY (1982), se encontra listado na tabela 1.

Tabela 1 – Composição do aço AISI 1045

	Carbono (%)	Manganês (%)	Fósforo (%)	Enxofre (%)
Aço 1045	0.43-0.50	0.6-0.9	0.040 max	0.050 max

Fonte: Adaptado de Harvey (1982)

Com o catálogo do fabricante Atlas Speciality Metals (2006), algumas propriedades mecânicas foram consultadas e estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas aço AISI 1045

	Métrico
Densidade	7870 kg/m ³
Dureza Brinell	207
Limite de Resistencia	690 MPa
Limite de Escoamento	540 MPa
Alongamento até a ruptura	8 %
Modulo de Elasticidade	206 GPa
Coefficiente de Poisson	0.29

Fonte: Adaptado de Atlas (2006)

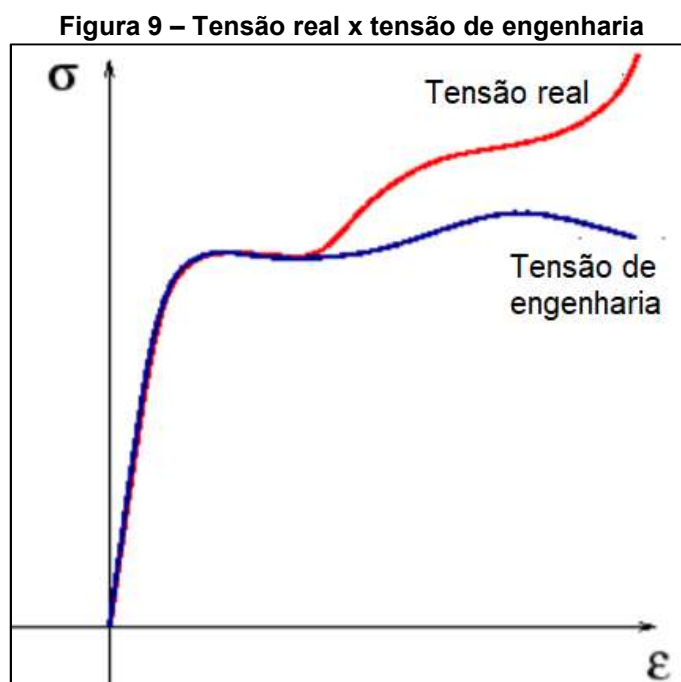
Além das boas propriedades mecânicas, o aço SAE 1045 é um material ferromagnético convencionalmente utilizado. Por essas razões ele se encaixa na necessidade apresentada.

4.4 TENSÃO-DEFORMAÇÃO REAL POR EXTENSÔMETRIA ÓPTICA

Apesar de métodos tradicionais de extensometria serem extensivamente utilizados para medir a deformação em superfícies de materiais e estruturas, suas características não o permitem ser usados em aplicações que não é possível o contato (BAI; ZHU; HE, 2015). Outro método de medir esse campo de deformações é através do uso de técnicas de processamento de imagem. Para essa análise um padrão deve ser aplicado no material a ser analisado e imagens tem que ser obtidas durante o teste. Através do estudo da localização das diferentes marcas no material em relação ao tempo, é possível obter a deformação instantânea do material (TOURLONIAS et al., 2005).

Alguns estudos utilizam diferentes métodos de marcação do corpo, como pontos e retas nas direções paralelas e perpendiculares ao esforço. Se o material estudado for isotrópico ou ter um comportamento isotrópico é possível obter a variação na espessura e conseqüentemente da secção transversal (TOURLONIAS et al., 2005).

Com a área instantânea da secção transversal do corpo de prova, é possível calcular a tensão verdadeira do material. Na figura 9 é possível observar a diferença entre tensão de engenharia e a tensão real.



Fonte: Adaptado de Faridmehr et al. (2014)

4.5 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

O magnetismo surge como resultado do movimento de cargas, seja no nível atômico ou em larga escala. Esse movimento estabelece um campo magnético. A maioria dos materiais não interagem em grande medida com o campo magnético no qual estão submersos, mas certas classes de materiais interagem significativamente (MOOSBRUGGER; CVERNA, 2000). Os materiais chamados ferromagnéticos são predominantemente ligas de ferro, cobalto e níquel e são conhecidos por um forte e rápida resposta a esse tipo de estímulo.

Uma outra classificação para materiais magnéticos são *soft* e *hard*. Ligas magnéticas classificadas como *hard* são ligas ferromagnéticas capazes de serem permanentemente magnetizadas por sua habilidade de reter magnetização induzida e os polos magnéticos após o campo externo cessar.

Os materiais chamados de *softs* são ligas ferromagnéticas que se tornam magnetizadas logo após a aplicação de um campo e que volta ao estado inicial após a interrupção do campo. Essas ligas possuem alta permeabilidade magnética, baixa força coercitiva e baixa perda de histerese magnética.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção é reservada para os métodos que foram utilizados durante a produção e os ensaios para o levantamento das propriedades e do comportamento do material.

5.1 MATRIZ DE EPÓXI

As amostras foram produzidas usando o sistema de resina epóxi AR-260 e o endurecedor AH-30, fornecida pela companhia Barracuda Composites. É um sistema de cura rápida, de baixa viscosidade para uso em laminação manual, laminação a vácuo e infusão (BARRACUDA, 2018). Na tabela 3 se encontram as propriedades de manuseio dessa resina, fornecido pelo fabricante.

Tabela 3 – Propriedades de manuseio da resina epóxi

	Valor	Valor (SI)	Método
Densidade da resina (lbs/gal)	9.6	1150 (kg/m ³)	ASTM E-201
Densidade do endurecedor (lbs/gal)	8,2	983 (kg/m ³)	ASTM E-201
Viscosidade da resina @ 25°C (cps)	1200	1.2 (Ns/m ²)	ASTM D-2393
Viscosidade do endurecedor @ 25°C (cps)	50	0.05 (Ns/m ²)	ASTM D-2393
Viscosidade Mista @ 25°C (cps)	580	0.58 (Ns/m ²)	ASTM 2393
Taxa de mistura por peso 100A	100A : 33B	100A : 33B	Calculado
Gek time @ 25°C (cps) (150g massa, min.)	30	0.03 (Ns/m ²)	ASTM D-2471

Fonte: Barracuda (2018)

A proporção da mistura é de 3 de resina para 1 de endurecedor. Este endurecedor escolhido tem um tempo de cura parcial de cerca de 12 horas. A homogeneização da mistura aconteceu a 3000 rpm em um vasilhame de plástico. Com o objetivo de minimizar a probabilidade de problemas estruturais e de acabamento causados por bolhas de ar, a mistura foi colocada em uma câmara de vácuo mostrada na figura 10 por cerca de 10 minutos.

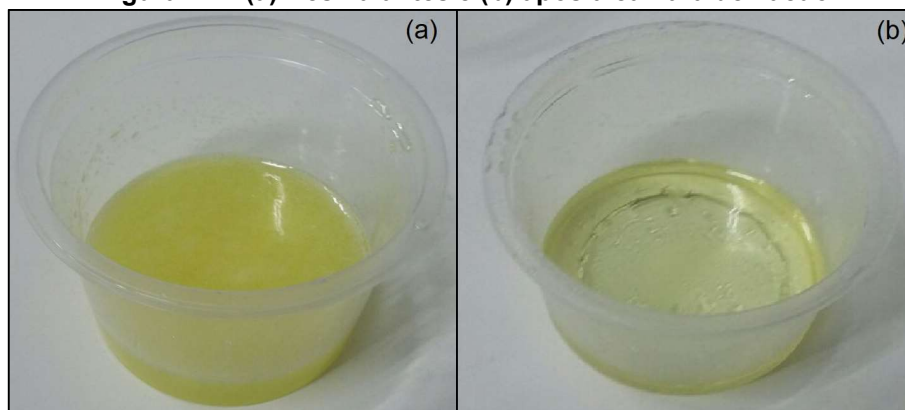
Figura 10 – Máquina de vácuo Edwards RV8 e câmara do laboratório LMC UTFPR-cp



Fonte: Autoria própria

A figura 11a mostra a resina antes do processo de homogeneização e a figura 11b após o processo de homogeneização, se tornando mais translúcido e com menos bolhas aparentes, uma melhora considerável na aparência da resina epóxi.

Figura 11 – (a) Resina antes e (b) após a câmara de vácuo



Fonte: Autoria própria

Na tabela 4 é listada algumas das propriedades mecânicas da resina epóxi, também fornecidas pelo fabricante. Essas propriedades podem ser utilizadas posteriormente para a avaliação do método de produção das amostras de epóxi puro. As unidades foram fornecidas no sistema inglês mas foram convertidas para o sistema internacional para facilitar comparações posteriores.

Tabela 4 – Propriedades físicas da resina epóxi

	Valor (Inglês)	Valor (SI)	Método
Cor	Amarelo palha	Amarelo palha	Visual
Dureza Shore D	82	82	ASTM D-2240
Resistência à tração (psi)	11400	78.6 (MPa)	ASTM D-638
Módulo de tensão (psi)	419000	2.89 (GPa)	ASTM D-638
Alongamento (%)	7.0	7.0	ASTM D-638
Resistência à compressão (psi)	14800	102 (MPa)	ASTM D-695
Resistência à flexão (psi)	19200	132.38(MPa)	ASTM D-790
Módulo de flexão (psi)	469000	3.23 (GPa)	ASTM D-790
HDT – Cura Temperatura ambiente (°C)	58	58	ASTM D-648
HDT – Temperatura de pós-cura (°C)	78	78	ASTM D-648
Impacto Izod, com entalhe (ft-lb/in)	1.18	53.38 (J/m)	ASTM D-256

Fonte: Barracuda (2018)

5.2 PARTICULAS ELETROMAGNÉTICAS

Para a produção do compósito, utilizou-se partículas de aço AISI 1045. Visando expressar a influência do tamanho das partículas nas propriedades do material, as partículas foram divididas em 3 grupos, utilizando o conjunto de peneiras granulométricas mostradas na figura 12.

Figura 12 – Conjunto de peneiras granulométricas



Fonte: Autoria própria

As amostras foram nomeadas de acordo com o tamanho de partícula que adicionada a amostra, como mostrado na Tabela 5. O acrônimo SPS significa *steel particle size* (tamanho de partícula de aço).

Tabela 5 – Tamanho de partículas

Grupo	Tamanho mínimo (mm)	Tamanho máximo (mm)
0.250-0.450 SPS	0.250	0.450
0.450-1.000 SPS	0.450	1.000
1.000-2.000 SPS	1.000	2.000

Fonte: Autoria própria

Para esse trabalho foram produzidos 3 corpos de prova para cada grupo e ensaio, buscando assim o comportamento médio do material.

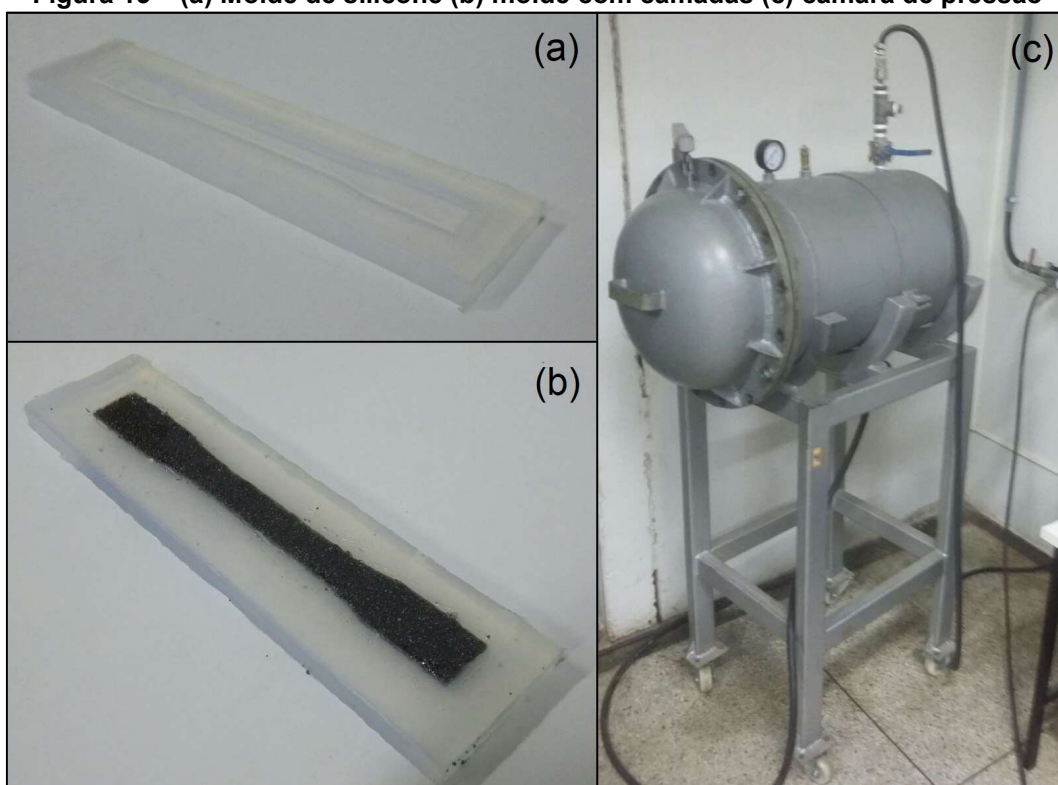
5.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Uma maneira de simplificar a dispersão das partículas de aço no compósito seria adicionar essas partículas no processo de homogeneização. No entanto, a grande diferença na densidade de matriz e reforço causaria uma dispersão ruim nas amostras finais.

A solução mais simples encontrada foi aplicar camadas de epóxi e de partículas de aço, sendo que o epóxi apenas preenche os vazios entre as partículas de aço (figura 13b). Esse processo visa a melhor distribuição das partículas em meio a matriz e o número de camadas depende do tamanho das partículas adicionadas. As massas de aço adicionadas serão avaliadas para todos os compósitos ainda neste trabalho através da lei das misturas. Esse processo é feito diretamente em um molde de silicone (figura 13a), com dimensões de acordo com as respectivas normas dos ensaios.

Este trabalho busca as propriedades de acordo com o depósito máximo de partículas de aço e então a massa para cada grupo pode variar. A cura ocorreu em um vaso de pressão do laboratório de materiais compósitos da UTFPR de cornélio procópio, figura 13c, a uma pressão manométrica de 0.8 MPa durante 24 horas.

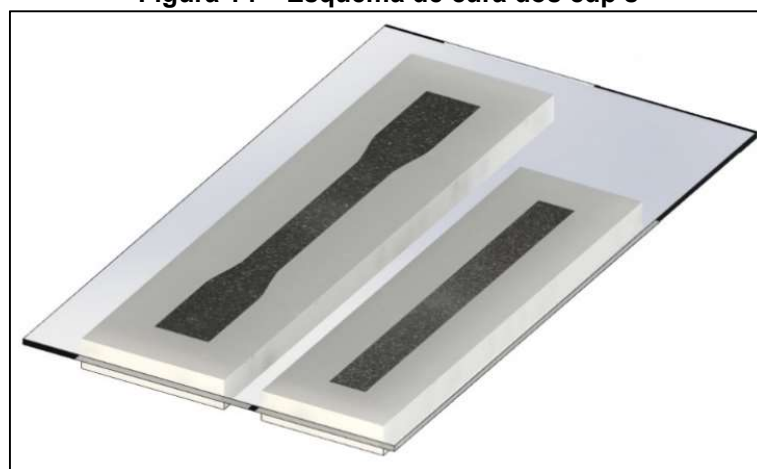
Figura 13 – (a) Molde de silicone (b) molde com camadas (c) câmara de pressão



Fonte: Autoria própria

Uma placa de vidro foi posicionada na superfície superior do molde visando uma maior conformidade dimensional, visto na figura 14. Após a desmoldagem, um tratamento superficial de fresamento foi feito em uma face para melhorar a precisão dimensional e superficial.

Figura 14 – Esquema de cura dos cdp's

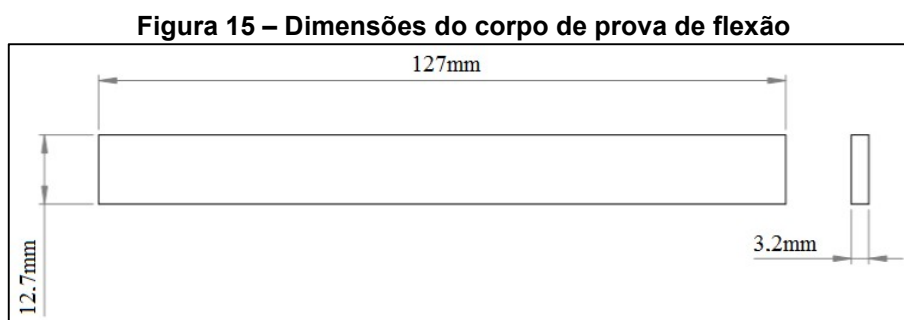


Fonte: Autoria própria

5.4 ENSAIO DE FLEXÃO

Tendo por referência a norma ASTM D790-17 (ASTM, 2018a), os testes de flexão foram realizados em todas as amostras de todos os tamanhos de partículas, sendo 3 de cada grupo, com o objetivo de determinar as propriedades do material a esforços flexores. Os testes foram realizados em uma máquina universal de testes (UTM) da Jinan Shijin Group modelo WDW-100E, controlada eletronicamente por um microcomputador e com uma célula de carga Transcell DBSL-SJ-10t.

Os corpos de prova foram produzidos conforme mostrado na seção 5.3. As dimensões das amostras são mostradas na figura 15.



Fonte: Autoria própria

Esse teste utiliza um sistema de carregamento de três pontos para aplicar a carga no corpo de prova, como mostrado na figura 16. Este corpo de prova de seção transversal retangular repousa sobre dois suportes na posição horizontal e a carga é aplicada por meio de um travessão localizado entre esses dois suportes. A amostra é defletida até que a ruptura ocorra na superfície externa ou até que uma deformação máxima de 5.0% fosse atingida, o que ocorrer primeiro. Porém, nesse trabalho, todas as amostras foram ensaiadas até a ruptura.

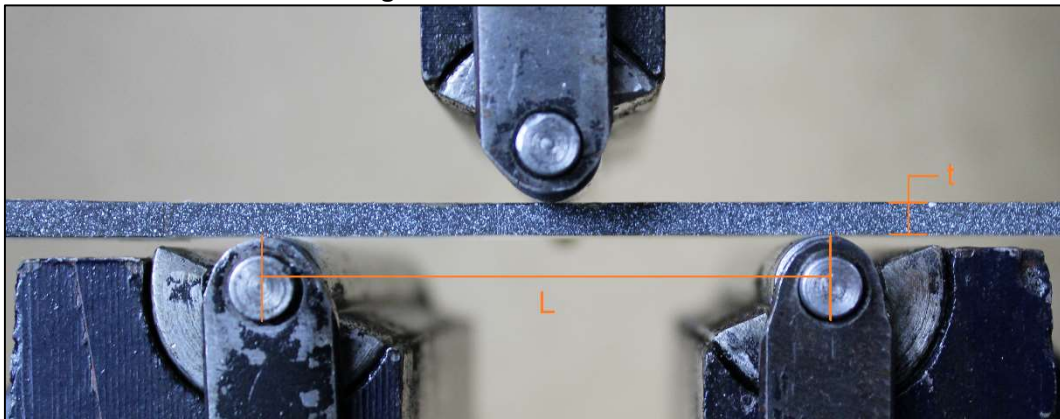
5.4.1 Procedimentos do ensaio

Para começar o ensaio, o travessão foi colocado na iminência de contato com o corpo de prova. A distância entre os suportes (L), destacado na figura 16, e a distância entre os dois suportes inferiores e deve ser 16 vezes a espessura do corpo de prova

(t). As amostras tinham uma espessura média (t) de 3.2 mm, portanto o vão de suporte (L) foi de 51.2 mm. Considerando a taxa de esforço da fibra externa 0.01 mm/mm/min e aproximando-se do resultado da Equação (3), os testes foram realizados com taxas de deslocamento (R) de 2 mm/min.

$$R = \frac{zL^2}{6t} \quad (3)$$

Figura 16 – Ensaio de flexão



Fonte: Autoria própria

5.4.2 Cálculo dos resultados

Os dados da carga (P) aplicada pelo travessão foram obtidos em um intervalo de 0.25 segundos. Essa carga é identificada através do uso de uma célula de carga conectada a máquina universal de testes.

A tensão de flexão (σ_f) é a tensão máxima na superfície externa do corpo de prova e ocorre no centro deste. Essa tensão pode ser calculada usando a Equação (4), onde (b) é a largura do corpo de prova.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (4)$$

A norma ASTM D790-17 determina que a deflexão seja medida por um extensômetro abaixo e em contato com o corpo de prova, no centro do vão e entre os dois apoios. Métodos de extensometria óptica podem ser usados para criar essa ferramenta. Para tanto, foi aplicado um padrão aleatório sobre uma das faces do corpo

de prova e o ensaio foi fotografado em intervalos de 5 segundos. Utilizou-se o software GOM Correlate, um software de correlação de imagens digitais (DIC) livre, que forneceu o máximo de deflexão do centro do corpo de prova (D). A obtenção desse dado é exemplificada na figura 17.



Fonte: Autoria própria

A deflexão é utilizada para calcular a deformação à flexão (ϵ_f) através da equação (5).

$$\epsilon_f = \frac{6Dt}{L^2} \quad (5)$$

Com a tensão a flexão (σ_f) e a deformação a flexão (ϵ_f) calculados são os dados necessários para plotar o gráfico de tensão-deformação de flexão utilizando o software OriginPro 8.1. Porém, para a plotagem é necessário que as duas tenham o mesmo número de pontos.

No software, plotou-se a curva de tensão-tempo e deformação-tempo e foi adicionado uma linha de tendência polinomial. Ao traçar essa linha o software oferece 1000 dados na abscissa e nas ordenadas. Com isso, temos os dados de tensão e deformação com o mesmo número de pontos, possibilitando a plotagem da curva tensão deformação.

Todas as curvas foram plotadas com a mesma quantidade de dados (1000), tornando mais fácil a obtenção de dados médio e de desvio padrão. Por fim, foram obtidas 4 curvas médias de tensão-deformação de flexão com os respectivos valores de desvio padrão para as amostras de epóxi pura, 0.250-0.450 SPS, 0.450-1.000 SPS e 1.000-2.000 SPS.

O módulo da elasticidade é calculado usando a equação (6) ou pelo ângulo da parte linear (elástica) da curva de tensão-deformação de flexão.

$$E_B = \frac{L^3 M}{4bd^3} \quad (6)$$

5.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

A norma ASTM D638-14 (ASTM, 2018b) é designada para obter os dados de propriedades do material a esforços de tração para materiais plásticos. O método de produção das amostras de tração também seguiu o procedimento citado na seção de produção dos corpos de prova. As dimensões para plásticos rígidos ou semi-rígidos são mostradas na figura 18.



Fonte: Autoria própria

O teste resume-se em um membro móvel e um membro fixo, cada um carregando um grampo. Para realizar este teste, utilizou-se um modelo de máquina de ensaio universal eletrônico (UTM) controlado por microcomputador WDW-100E e uma célula de carga Transcell DBSL-SJ-10t.

5.5.1 Procedimento do ensaio

Para o ensaio de tração, os corpos de prova foram montados na posição vertical com uma distância entre os grampos de 115 mm, ou seja, o corpo de prova era preso com 25mm nos grampo de ambas as extremidades. A montagem pode ser observada na figura 19.

Figura 19 – Fixação do corpo de prova de tração



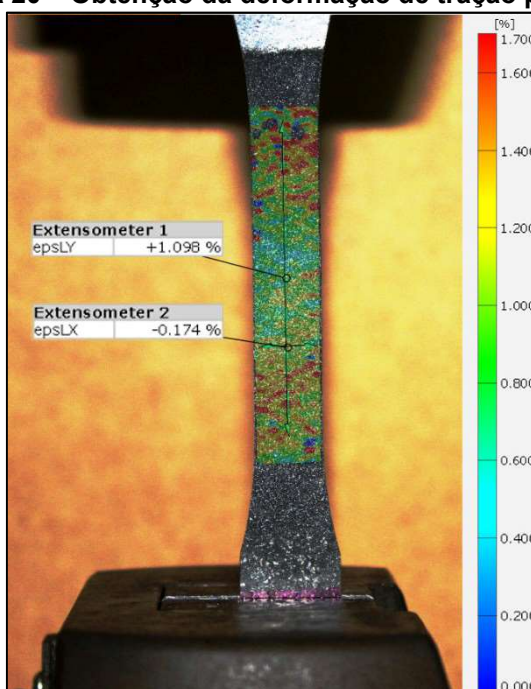
Fonte: Autoria própria

Considerando uma taxa de deformação nominal de $0,1 \text{ min}^{-1}$, a velocidade de teste utilizada foi de $5 \pm 1,25 \text{ mm/min}$. Assim como nos testes de flexão, foi aplicado um padrão aleatório no corpo de prova e utilizada a correlação digital de imagens para obter a deformação longitudinal e transversal instantânea.

5.5.2 Calculo dos resultados

No software GOM Correlate, os dados de deformação longitudinais (ϵ_L) e transversais (ϵ_T) foram obtidos através de um extensômetro virtual posicionado no centro da amostra (figura 20).

Figura 20 – Obtenção da deformação de tração por DIC



Fonte: Autoria própria

Os dados de deformação são obtidos de 5 em 5 segundos e possibilitam o cálculo do coeficiente de Poisson, como mostrado na equação (7).

$$\nu = \frac{-\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (7)$$

Considerando a isotropia transversal do material, também é possível estipular a área da seção transversal instantânea através da equação (8), onde b_0 e t_0 são respectivamente a largura inicial e a espessura inicial do corpo de prova. Os valores da deformação transversal informados pelo software são negativos devido a diminuição da largura do corpo de prova.

$$Area_{int} = (b_0(1 + \varepsilon_T)) \cdot (t_0(1 + \varepsilon_T)) \quad (8)$$

Os valores de carga (P) são extraídos da máquina universal de testes com um intervalo de 0,25 segundos. Como os dados de variação de área e de carga são de quantidades diferentes, o mesmo método usado na seção 5.4.2 foi utilizado. A tensão de tração é calculada através da equação (9).

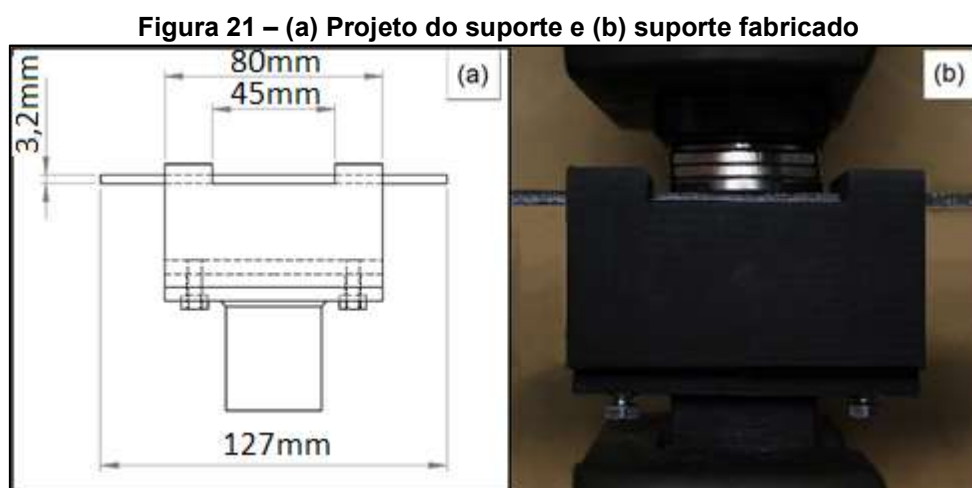
$$\sigma = \frac{P}{Area_{int}} \quad (9)$$

A tensão real é calculada pela relação entre a carga e a área instantânea ao longo de todo o teste para todas as amostras, tornando possível plotar curvas reais média de tensão-deformação para todas as amostras testadas. A porção linear inicial da curva tensão-deformação pode ser usada para obter o módulo de elasticidade.

5.6 TESTE DE FORÇA MAGNÉTICA

Um novo teste foi desenvolvido visando a avaliação quantitativa das respostas magnéticas dos compósitos desenvolvidos. Este teste é capaz de fornecer dados sobre a força magnética na amostra a diferentes distâncias da fonte magnética. Portanto, permite que uma curva de força-deslocamento seja plotada.

O teste consiste em um ímã preso à garra fixa na máquina universal de ensaios e a amostra presa na garra móvel. Para posicionar a amostra e evitar deslizamentos, um suporte foi projetado e fabricado. Neste a amostra seria posicionada horizontalmente, onde a área de contato entre o ímã e a amostra é a maior. Esse posicionamento na face de maior área de contato também é utilizado no controle de vibração por um eletroímã. A figura 21a mostra o projeto do suporte com dimensões em mm e a figura 21b mostra o suporte fabricado e o esquema de posicionamento.



Fonte: Autoria própria

Três amostras de cada compósito e uma amostra de aço foram testadas e a máquina de teste universal foi responsável por fornecer os dados de deslocamento e carga. Os corpos de prova foram os mesmos utilizados para testes de flexão.

A amostra foi posicionada em contato com o imã e máquina foi responsável por afastar o corpo de prova até não haver mais interação entre estes, cerca de 15mm. Com isso temos a força necessária para a separação e a força conforme a distância aumenta. A correlação de imagem digital (DIC) usando o software GOM Correlate foi utilizada permitindo a observação e análise da deflexão causada pelo campo magnético e pelo suporte em cada amostra testada. Os resultados dos compósito serão comparados com os da amostra de aço para se ter um resultado qualitativo da resposta magnética.

5.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para a análise de imagens foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com esse foi possível obter informações sobre a morfologia da região de ruptura do material e uma análise da adesão das partículas a matriz.

5.7.1 Equipamentos utilizados

O microscópio eletrônico utilizado foi do modelo EVO MA 15 do laboratório CMCM da UTFPR campus Curitiba, equipado com detector para análise química. Possui filamento de tungstênio, câmara para amostras de até 250mm de diâmetro e massa de 500g com movimento total do estágio (XYZ e inclinação). O equipamento está ilustrado na figura 22.

Figura 22 – Microscópio eletrônico EVO MA 15



Fonte: CMCM (2018)

Esse equipamento também possui a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) que será utilizada na caracterização química das amostras. A epóxi não é um material condutor de eletricidade e por essa razão foi necessário o recobrimento das amostras com partículas de ouro. Esse recobrimento foi realizado com o equipamento Quanta Quorum Q150R ES, mostrado na figura 23.

Figura 23 – Equipamento Quanta Quorum Q150R ES



Fonte: Autoria Própria

5.7.2 Amostras

A análise por MEV será realizada no local da fratura do material. Para tanto, foram utilizados os corpos de prova provindos dos ensaios mecânicos. Os corpos de prova foram cortados, colocados no equipamento para recobrimento de ouro e logo após, colocadas na câmara para amostras. A figura 24 ilustra as amostras dentro da câmara do microscópio eletrônico.

Figura 24 – Amostras dentro da câmara do MEV



Fonte: Autoria Própria

Os dados obtidos foram imagens aumentadas do local de fratura do corpo de prova, possibilitando uma análise morfológica da região fraturada e da adesão das partículas a matriz.

5.8 REGRA DAS MISTURAS

Para a análise de materiais compósitos é importante se conhecer a proporção relativa de resina e reforço presente na amostra, que pode ser fornecida como proporção no volume ou em massa. Em uma amostra está contido resina epóxi com volume V_e e massa M_e , partículas de aço de volume V_p e massa M_p e um volume de vazios V_v . Os subscritos c, e, p e v denotam compósito, epóxi, partículas e vazios. Utilizamos as equações (10) e (11) para calcular as massas e os volumes, respectivamente.

$$M_c = M_p + M_e \quad (10)$$

$$V_c = V_p + V_e + V_v \quad (11)$$

Para medirmos a proporção em massa de partícula e epóxi, foram cortadas amostras de todo os corpos de prova nas dimensões de 13mm x 30mm x 3,2mm, sendo essas medidas com auxílio de um micrômetro para uma melhor precisão no cálculo do volume do compósito (V_c). Todas as amostras cortadas foram pesadas, obtendo a massa do compósito (M_c) de cada uma e os dados foram catalogados.

As amostras catalogadas foram colocadas dentro de cadinhos e foram levadas a um forno do fabricante Sanches Fornos Industriais (figura 25) a uma temperatura de 600°C por pelo menos 5 horas.

Após esse tempo o forno era desligado e as amostras permaneciam neste até o forno atingir a temperatura ambiente, que levava cerca de 10 horas. Como a temperatura de degradação do epóxi é cerca de 400°C, é esperado a evaporação completa da resina, restando apenas as partículas de aço dentro do cadinho.

Figura 25 – Forno utilizado para evaporação



Fonte: Autoria própria

A figura 26 mostra os cadinhos com as amostras antes de serem levados para a evaporação. O conteúdo restante era pesado e catalogado como a massa de partículas (M_p) em cada amostra. Com a equação 10 é calculado a massa de resina. Com as densidades da resina e das partículas fornecidas pelos fabricantes, é possível estipular o volume de ambas e utilizando a equação 11, é possível obter o volume de vazios dentro do material. Como estamos procurando pela proporção, todas as massas e volumes obtidos serão divididos pela massa e volume do compósito respectivamente.

Figura 26 – Amostras em cadinhos para evaporação



Fonte: Autoria Própria

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e justificados os resultados obtidos para todos os ensaios.

6.1 MASSAS DOS CORPOS DE PROVA

Comparando as densidades, as massas dos compósitos dopados apresentaram uma diferença substancial quando comparadas com a de aço. As amostras 0.250-0.450 SPS foram cerca de 15% mais pesadas que as amostras 0.450-1.000 SPS e 1.000-2.000 SPS, mas apresentaram uma redução de 70% na densidade se comparadas com o aço, como pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6 – Massas obtidas com o processo de produção

Material	Massa (g)	Densidade (kg/m³)
SAE 1045	39.39	7631.83
Epóxi	6.08 ± 0.06	1226.90
1.000-2.000 SPS	10.55 ± 0.09	2025.72
0.450-1.000 SPS	10.31 ± 0.35	1997.57
0.250-0.450 SPS	12.24 ± 1.27	2300.27

Fonte: Autoria própria

Era esperado que a densidade das amostras 0.450-1.000 SPS obtivessem um valor intermediário entre os outros dois compósitos. O valor próximo ao de maior tamanho de partícula pode ser devido ao formado das partículas, que, por serem de uma origem reciclável, não são esféricas. O desvio de massa das amostras com tamanhos de partículas menores foi o mais alto e pode ser explicado pela dificuldade na padronização da distribuição de partículas densas dentro da matriz polimérica de epóxi.

6.2 REGRA DAS MISTURAS

O procedimento da seção 5.8 foi realizado e os dados calculados se encontram na tabela 7. Como este trabalho procura o depósito máximo, a variação da massa de aço de acordo com o tamanho de partícula era esperada. As amostras com o menor tamanho de partícula apresentaram a maior proporção de volume vazio e isso pode ser explicado pelas dificuldades de distribuição da resina em espaços menores, já que o volume de aço desse grupo é o maior entre todas as amostras. As amostras dos compósitos com tamanho médios e grandes apresentaram proporção em volume relativamente iguais.

Tabela 7 – Proporção de aço, epóxi e vazios em volume

Material	Proporção em volume de aço (%)	Proporção em volume de epóxi (%)	Proporção em volume de vazios (%)
1.000-2.000 SPS	11.4 ± 0.45	83.4 ± 3.42	5.22 ± 3.58
0.450-1.000 SPS	12.2 ± 1.08	81.9 ± 1.47	5.84 ± 1.48
0.250-0.450 SPS	16.2 ± 2.92	73.8 ± 3.06	9.99 ± 4.51

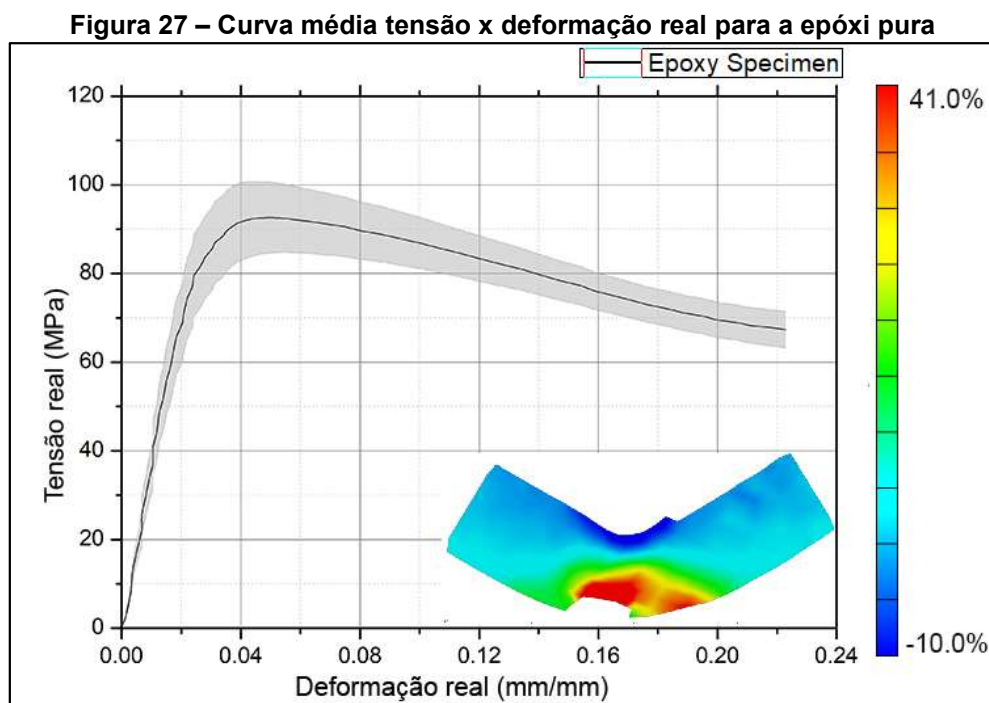
Fonte: Autoria Própria

6.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO

Os dados dos ensaios de flexão foram tratados e plotados em gráficos que serão apresentados no decorrer desta seção. Os testes foram realizados até o ponto de ruptura das amostras. Todas as propriedades aqui apresentadas se referem ao comportamento real médio. Além disso, o módulo de elasticidade foi medido até uma deformação de 1% porque, desconsiderando as amostras de epóxi pura, todos os compósitos apresentaram deformação máxima menor que 5% e alguns deles tiveram apenas 2% de deformação.

As amostras de flexão da epóxi pura, figura 27, apresentaram uma resistência à flexão real de 92.59 ± 7.96 MPa e uma deformação máxima real calculada de 0.2229 ± 0.0134 mm/mm. A transição entre o comportamento elástico e plástico do material pode ser facilmente observada. Os dados da correlação de imagens digitais (DIC) mostram o campo de deformação do material. É possível observar uma concentração de tensão no centro da amostra, onde aconteceu a ruptura do material, o que significa

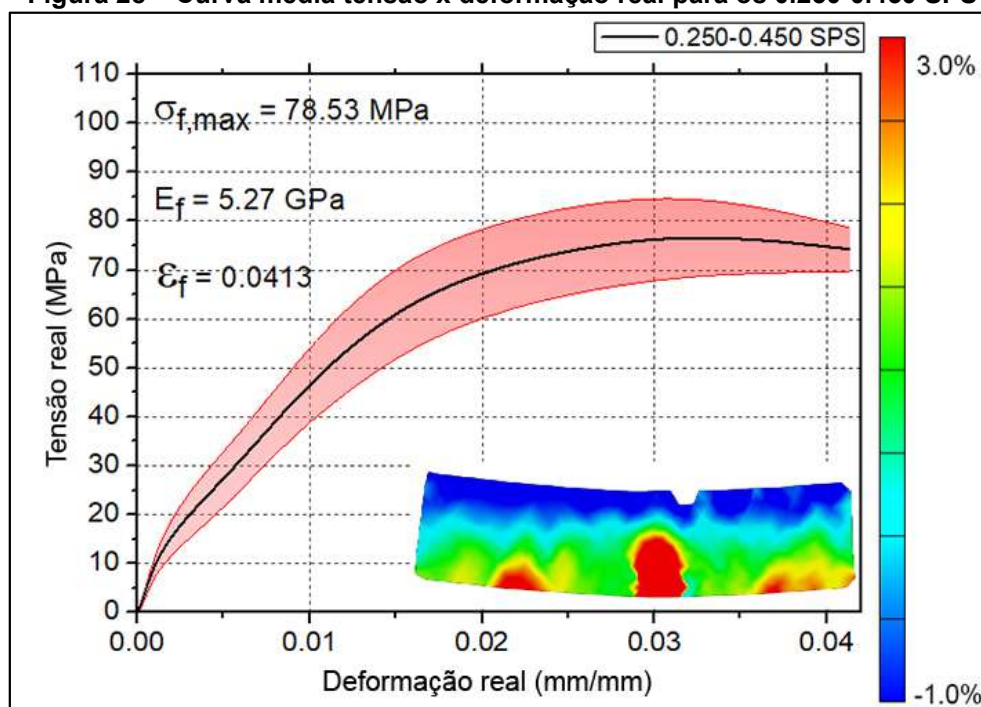
que a deformação calculada possui um valor muito próximo a deformação na área de deflexão máxima.



Fonte: Autoria própria

O 0.250-0.450 SPS, figura 28, apresentou um comportamento bi linear seguida por uma zona de comportamento plástico. O comportamento bi linear pode ser causado por fricção nos suportes.

Figura 28 – Curva média tensão x deformação real para os 0.250-0.450 SPS



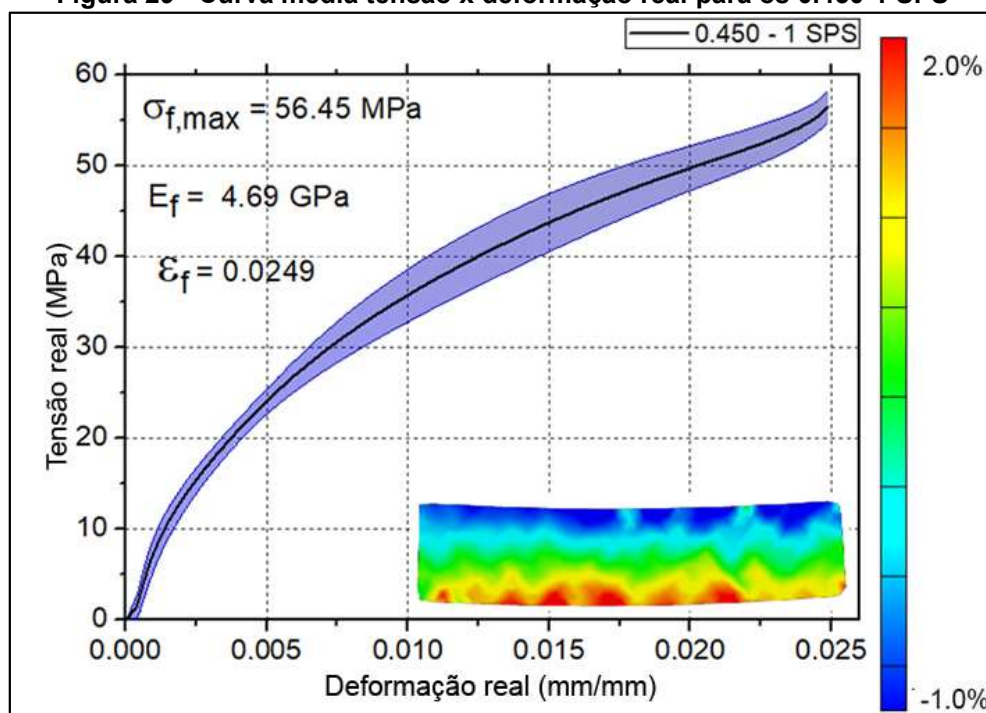
Fonte: Autoria própria

A resistência à flexão real foi de $78.73 \pm 8.34 \text{ MPa}$, um valor relativamente igual à do epóxi puro, considerando o desvio padrão. Essa tensão máxima, mesmo com uma proporção de resina em volume de aproximadamente 74%, pode ser explicada pela matriz estar transferindo o esforço para as partículas e essas estão suportando uma fração do esforço solicitado.

A deformação máxima foi de $0.0413 \pm 0.0241 \text{ mm/mm}$, uma redução de cerca de 80% em relação a deformação do epóxi puro. Essa redução pode ser causada pelas partículas agirem como obstáculos, diminuindo a capacidade de deformação do epóxi e formando concentradores de tensão. A DIC mostrou uma concentração de tensão no meio da amostra dessa forma, assim como no epóxi puro, a deformação calculada possui um valor muito próximo a da deformação na área de deflexão máxima.

Com as amostras do tamanho médio de partículas, 0.450-1.000 SPS (figura 29), observou-se uma redução de 39% na tensão máxima real suportada pelo epóxi puro, ficando em torno de $56.45 \pm 1.75 \text{ MPa}$. Assim como nas amostras 0.250-0.450 SPS, uma redução drástica de aproximadamente 89% na deformação foi observada, com $0.0249 \pm 0.0103 \text{ mm/mm}$.

Figura 29 - Curva média tensão x deformação real para os 0.450-1 SPS

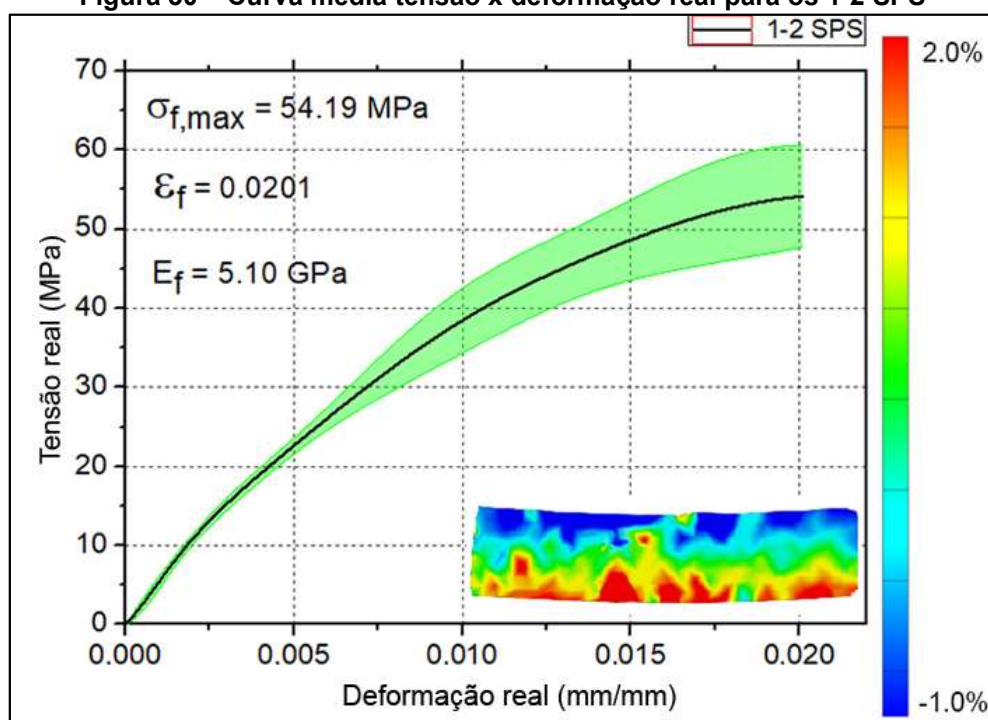


Fonte: Autoria própria

No entanto, nenhuma região linear era visível na curva e a transição entre a fase elástica e a fase plástica da deformação não pode ser observada. A correlação de imagens mostrou pontos de concentração de tensão distribuídos pelo material, portanto a deformação calculada pode diferir levemente do valor da deformação na área de deflexão máxima, uma vez que a deformação não ficou concentrada apenas nessa região.

As amostras 1.000-2.000 SPS (figura 30), com o maior tamanho de partícula, obteve uma tensão máxima real de $54.16 \pm 6.49 \text{ MPa}$ e uma deformação máxima de $0.0201 \pm 0.0182 \text{ mm/mm}$. Assim como aconteceu com as amostras 0.450-1.000 SPS, a DIC mostrou áreas de concentração de tensão distribuídas. A redução na tensão e na deformação máxima para as partículas de maior tamanho pode ser efeito de essas possuírem uma maior facilidade de intersecção entre os planos de cisalhamento, enquanto as pequenas permitem que as lamina se desloquem mais naturalmente. Dessa forma, maiores partículas tendem a formar pontos de concentração de tensão mais facilmente nesses locais de intersecções (distribuídos pela amostra) causando o efeito mostrado na DIC e, conseqüentemente, a ruptura prematura da amostra.

Figura 30 – Curva média tensão x deformação real para os 1-2 SPS



Fonte: Autoria própria

A Tabela 8 mostra as propriedades de todos os grupos para esforços de flexão. O módulo de elasticidade de flexão das amostras puras ($3.25 \pm 0,241$ GPa) apresentou um valor igual ao relatado pelo fabricante (3.23 GPa). Isso mostra que o processo de produção de resina é satisfatório. Todos os compósitos apresentaram módulos de elasticidade relativamente iguais, mas mostraram uma melhora em relação às amostras puras. Isso pode ser explicado pelas partículas rígidas estarem suportando uma fração das cargas e sendo obstáculos para a deformação dos mesmos, aumentando assim a rigidez.

Tabela 8 – Propriedades obtidas com o ensaio de flexão

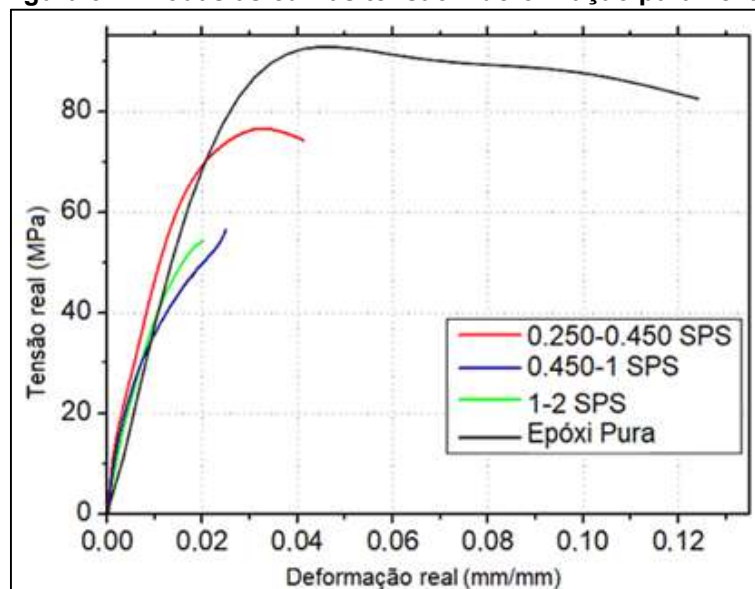
Amostras	Tensão máxima a flexão (MPa)	Deformação máxima à flexão (mm/mm)	Módulo de elasticidade à flexão (GPa)
Epóxi pura	92.59 ± 7.96	0.2229 ± 0.0134	3.25 ± 0.241
1.000-2.000 SPS	54.19 ± 6.49	0.0201 ± 0.0182	4.12 ± 0.091
0.450-1.000 SPS	56.45 ± 1.75	0.0249 ± 0.0103	3.94 ± 0.11
0.250-0.450 SPS	78.53 ± 8.34	0.0413 ± 0.0241	4.3 ± 0.6

A figura 31 compara as curvas de tensão-deformação para todos os grupos. Um comportamento recorrente apresentado foi o de que quanto maior o tamanho da

partícula adicionada a matriz, menor a deformação da amostra. Como foi explicado anteriormente, esse comportamento é devido a partículas maiores possuírem uma maior facilidade de criar pontos de concentração de tensão, que se propagam e causam a ruptura do material. Esse efeito pôde ser observado nos campos de deformações, onde as amostras com partículas maiores apresentavam vários pontos de concentração de tensão distribuídas pela amostra e as amostras com os menores tamanhos apresentavam concentração apenas na área de deflexão máxima. A figura mostra também explicitamente a redução da tenacidade do material.

Entre os compósitos, as amostras do grupo 0.250-0.450 SPS apresentaram o melhor comportamento mecânico, mesmo com o maior volume de aço. As partículas de menor tamanho, além de facilitarem o deslizamento dos planos de cisalhamento, tendem a apresentar uma melhor união a matriz devido a maior área de contato que essas proporcionam para um mesmo volume, melhorando assim a transmissão de esforços para as partículas.

Figura 31 – Todas as curvas tensão x deformação para flexão

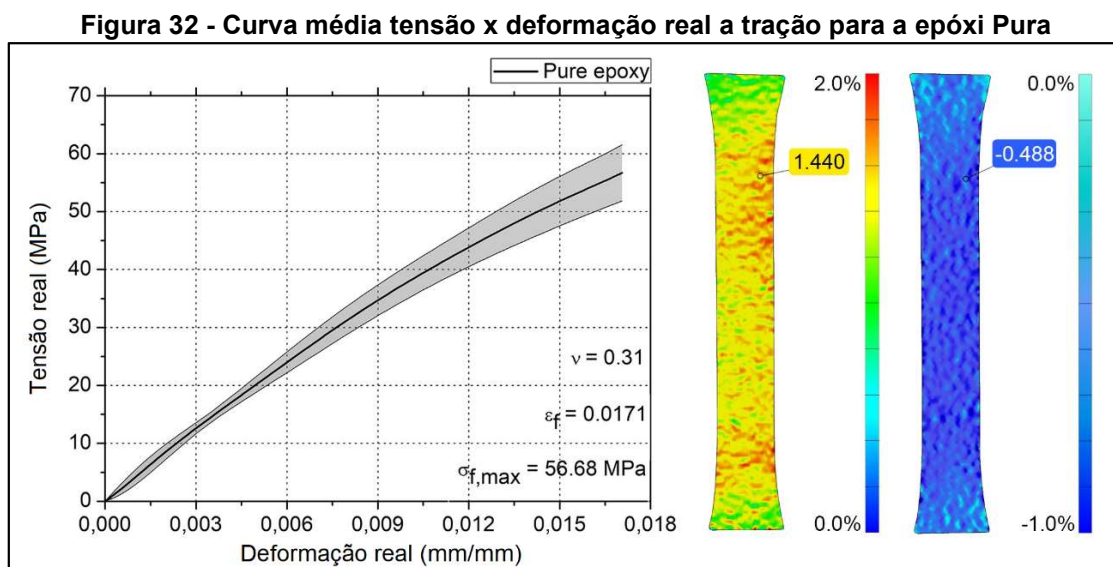


Fonte: Autoria própria

6.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Os dados obtidos dos ensaios de tração foram tratados e plotados em gráficos que mostram o comportamento mecânico do material para esforços de tração. Todos os testes ocorreram até o ponto de ruptura e, assim como no ensaio de flexão, o

módulo de elasticidade será calculado até uma deformação máxima de 1%. A figura 32 mostra a curva tensão-deformação real para as amostras de epóxi puro.

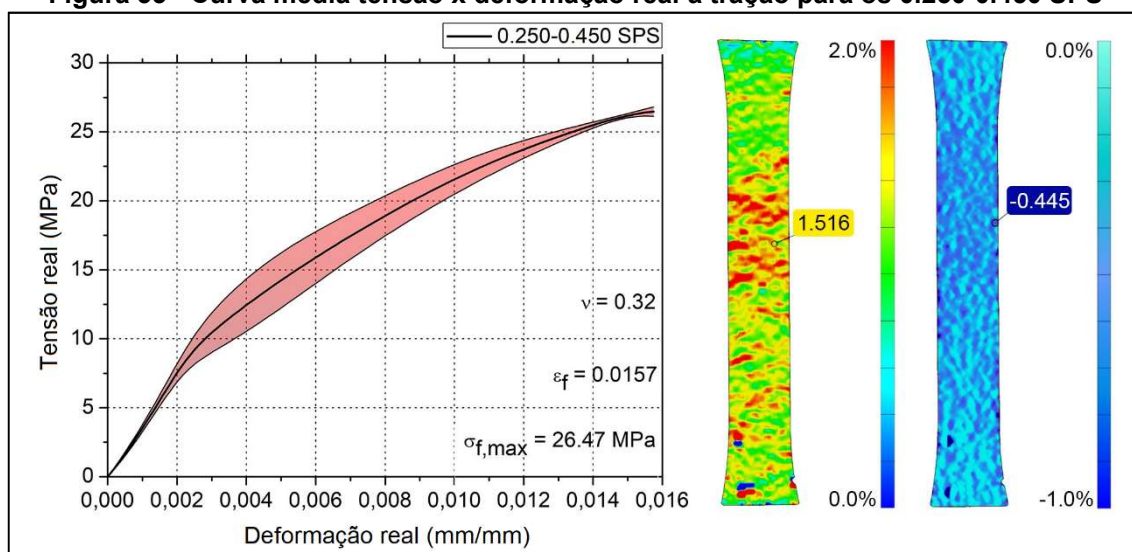


Fonte: Autoria própria

Não é possível delimitar a transição entre a fase elástica e a plástica do material. A tensão máxima real observada é de 56.58 ± 4.84 MPa, uma deformação máxima real de 0.0171 ± 0.0027 mm/mm e um coeficiente de Poisson de 0.31.

A Figura 33 mostra a curva tensão-deformação real para as amostras menores de 0.250-0.450 SPS que apresentaram uma deformação máxima real de 0.0157 ± 0.0013 mm/mm, relativamente igual à apresentada pelo epóxi puro se considerado o desvio padrão e uma tensão máxima real de 26.46 ± 0.33 MPa, apenas 46% do epóxi puro. Essa redução substancial na resistência a tração era esperada e pode ser explicada pelo fato que para esforços de tração, em especial, o epóxi não transfere apropriadamente os esforços para as partículas de aço ou também pelo efeito de concentração de tensão por parte das partículas. O coeficiente de Poisson é de 0.32. Foi observado na correlação de imagens pontos de tensão concentrada mais ao centro do corpo de prova e mais longas transversalmente. A ruptura aconteceu nessa região.

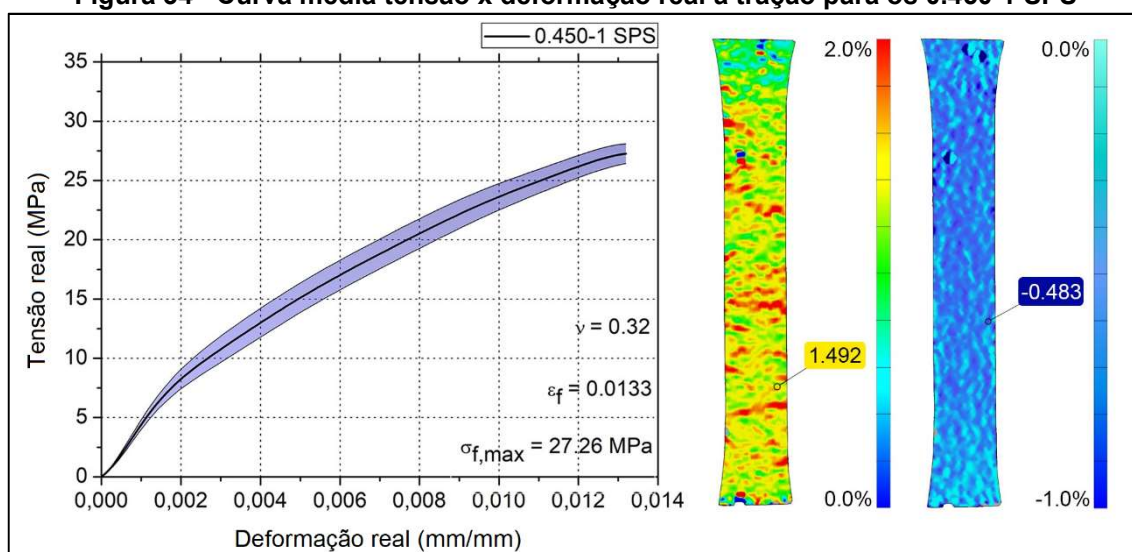
Figura 33 - Curva média tensão x deformação real a tração para os 0.250-0.450 SPS



Fonte: Autoria própria

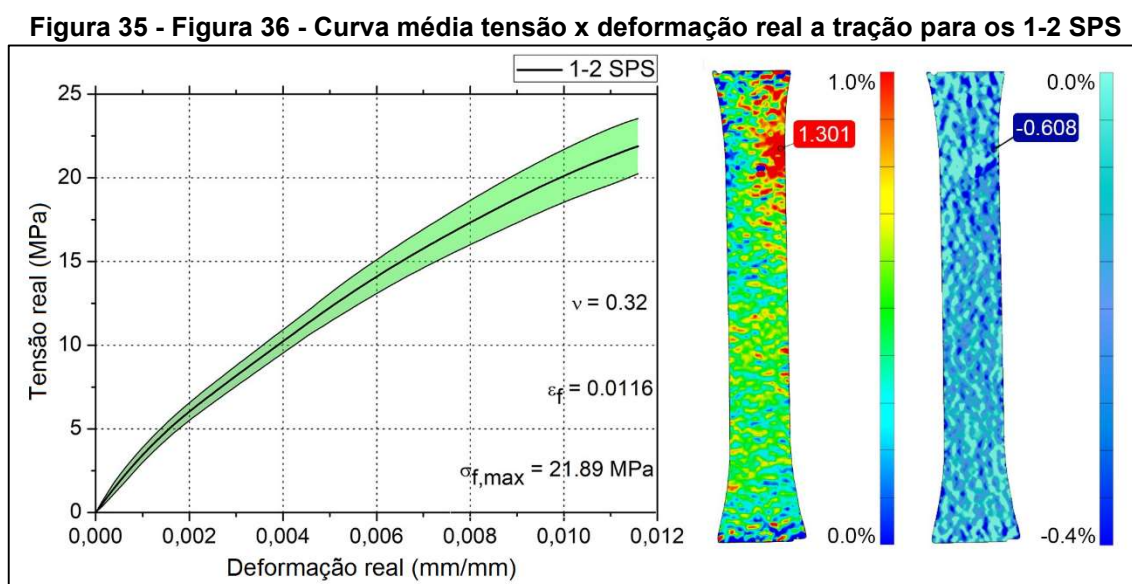
Um comportamento similar foi apresentado pelas amostras 0.450-1.000 SPS, com uma tensão máxima real de 27.26 ± 0.83 Mpa, como mostra a figura 34. Mas apresentou uma redução de 15% na deformação máxima real, com 0.0133 ± 0.0001 mm/mm e um coeficiente de Poisson de 0.32. Os dados de correlação também apresentaram algumas áreas de concentração de tensão longas transversalmente, mas essas areas estavam distribuídas por diferentes pontos pela seção retangular do corpo de prova. A ruptura aconteceu na parte inferior da amostra.

Figura 34 - Curva média tensão x deformação real a tração para os 0.450-1 SPS



Fonte: Autoria própria

A curva média das amostras 1.000-2.000 SPS é mostrada na figura 35. Essas amostras apresentaram os piores resultados nesse teste, com uma deformação máxima real de 0.0116 ± 0.0001 mm/mm, 21.89 ± 1.65 MPa de tensão real máxima e um coeficiente de Poisson de 0.32.

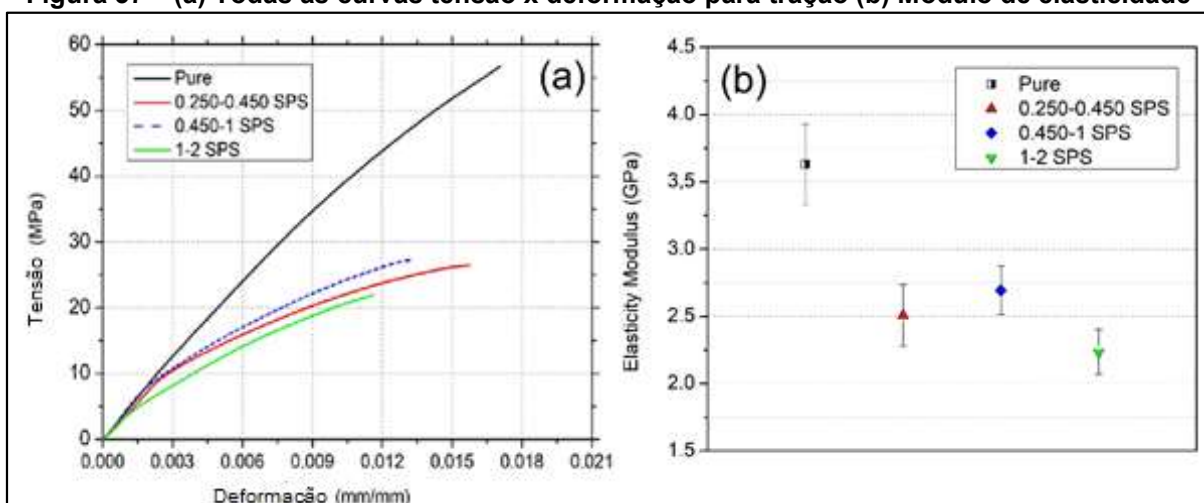


Fonte: Autoria própria

A DIC mostrou uma área de alta concentração de tensão na parte superior do corpo de prova, onde aconteceu a ruptura, o que indica a presença de um defeito.

A figura 37a mostra um gráfico comparativo para todas as curvas em escala. É fácil notar uma maior tenacidade por parte das amostras de epóxi puro a esforços de tração. Todos os compósitos dopados apresentaram menor deformação à medida que o tamanho das partículas cresce e, como explicado anteriormente, pode ser devido ao comportamento das partículas maiores formarem mais facilmente concentradores de tensão. A correlação também apresentou surgimento de pontos de grandes concentrações de tensão distribuídos pela amostra à medida que o tamanho da partícula aumenta.

Figura 37 – (a) Todas as curvas tensão x deformação para tração (b) Módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria

A tabela 9 resume as propriedades calculadas no ensaio de tração. Diferente do ensaio de flexão, as amostras puras apresentaram o maior módulo de elasticidade a tração. O módulo informado pelo fabricante é de 2.89 GPa, um valor abaixo do calculado nesse teste. Porém, nesse trabalho foram calculadas as curva tensão-deformação real do material, então era esperado um módulo de elasticidade maior uma vez que a área de secção transversal diminui com o andamento do ensaio. Além disso, as amostras curaram a uma pressão absoluta de 0.9 MPa, o que diminui consideravelmente a probabilidade de surgimento defeitos. Todos os compósitos dopados apresentaram módulos de elasticidade semelhantes e inferiores a epóxi pura.

Tabela 9 – Propriedades obtidas com o ensaio de tração

Amostras	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (mm/mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
Epóxi pura	56.68 ± 4.84	0.0171 ± 0.0027	3.631 ± 0.301
1.000-2.000 SPS	21.89 ± 1.65	0.0116 ± 0.0001	2.235 ± 0.168
0.450-1.000 SPS	27.26 ± 0.83	0.0133 ± 0.0001	2.694 ± 0.180
0.250-0.450 SPS	26.47 ± 0.33	0.0157 ± 0.0013	2.507 ± 0.230

Fonte: Autoria própria

Todas as propriedades a tração pioraram com a adição de partículas, mas partículas com menores tamanhos tiveram esse efeito minimizado. Essas apresentaram uma maior deformação se comparado com os outros compósitos

dopados e possuíam uma maior quantidade de aço adicionado à matriz, potencializando a resposta magnética.

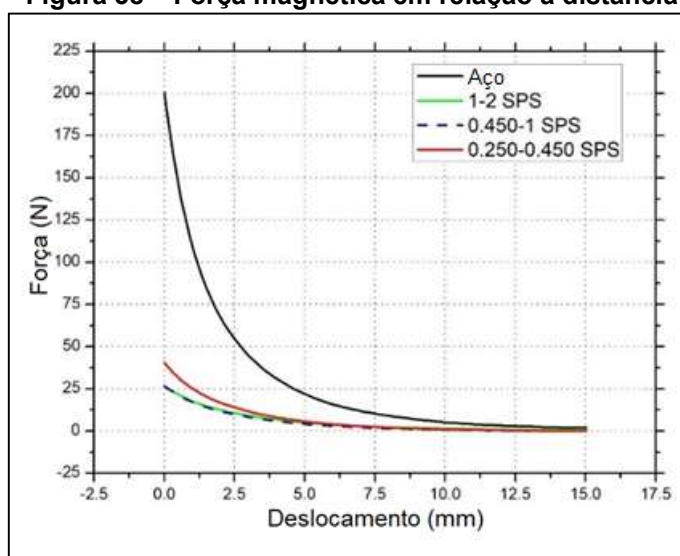
6.5 RESULTADOS DO TESTE DE FORÇA MAGNÉTICA

Uma vez que os materiais compósitos apresentam propriedades intermediárias em comparação com os materiais em sua composição, os resultados esperados em relação às propriedades magnéticas de um compósito magnético são uma força magnética intermediária diretamente proporcional a quantidade de partículas ferromagnéticas adicionadas.

Os materiais testados mostraram diferentes respostas de acordo com o tamanho de partícula ferromagnética adicionado a cada compósito. Além disso, todo compósito apresentava um comportamento magnético quando exposto ao ímã. A figura 38 mostra a curva de força-deslocamento para os materiais testados.

Comparando as amostras de compósitos com a de aço, essas mostraram forças menores de aproximadamente 13% (0.450-1 e 1-2 SPS) e aproximadamente 20% (0,250-0,450 SPS) da força magnética máxima na amostra de aço.

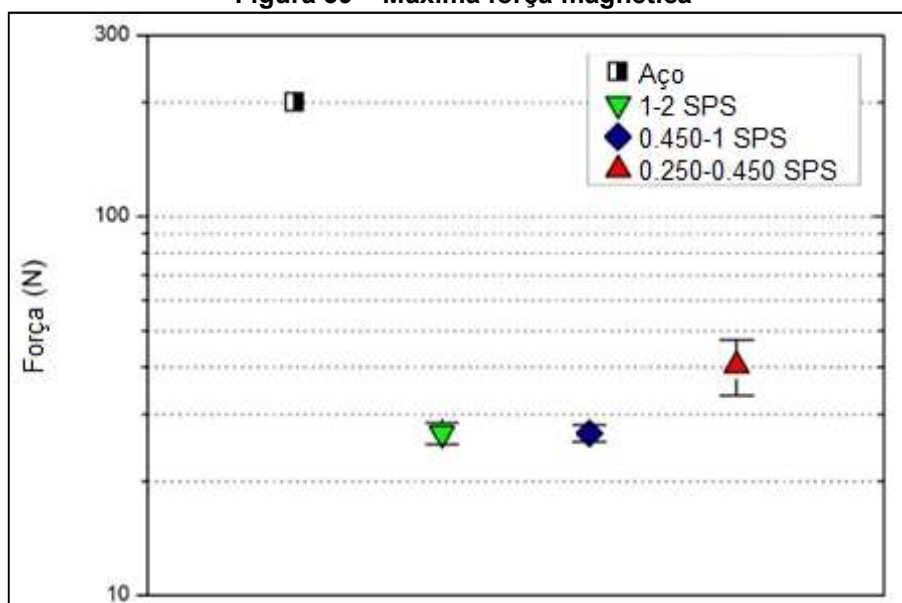
Figura 38 – Força magnética em relação a distância



Fonte: Autoria própria

A figura 39 compara os valores de forças máximas, em escala logarítmica, para os compósitos com seu respectivo desvio padrão.

Figura 39 – Máxima força magnética



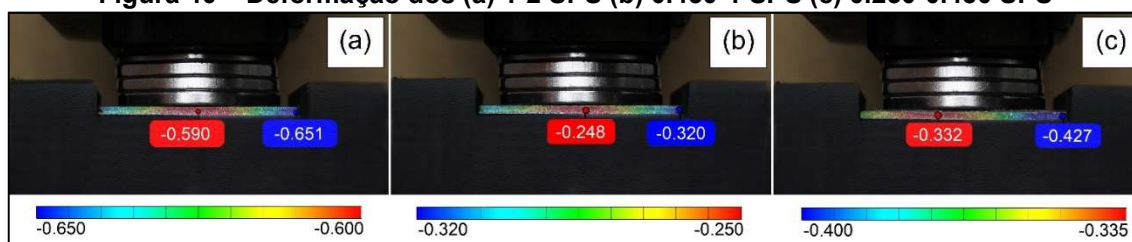
Fonte: Autoria própria

Como mostrado, o desvio padrão exibido pelo 1.000-2.000 e 0.450-1.000 SPS foi menor do que o mostrado por 0.250-0.450 SPS, o que pode ser explicado por problemas com a padronização de fabricação com partículas menores. Além disso, como todas as curvas tenderam a zero, o desvio padrão da força máxima também foi o maior desvio

O deslocamento pela correlação de imagens mostra a influência de uma força magnética flexora atuando no vão intermediário de cada amostra, assim, as forças de atração foram capazes de mostrar dados de deflexão entre o vão intermediário e o suporte da amostra.

A Figura 40 mostra a deflexão das amostras com (a) 1-2 SPS, (b) 0.450-1 SPS e (c) 0.250-0.450 SPS. Seus números representam a distância deslocada da última foto tirada (15 mm). Portanto, o material que apresentou a maior deformação foi a amostra com 0.250-0.450 SPS (0,095 mm). No momento em que a foto foi analisada, além disso, este material mostrou uma deflexão descentralizada, o que pode ser devido a uma distribuição de partículas metálicas não homogênea. A deformação foi apresentada por esse material, uma vez que as amostras com 1-2 e 0,450-1 SPS apresentaram valores menores de 0,061 mm e 0,072 mm, respectivamente. Além disso, a deformação máxima de flexão causada pelo imã foi de 0,058%, 0,068% e 0,090% para amostras com 1.000-2.000, 0.450-1.000 e 0.250-0.450 SPS, respectivamente.

Figura 40 – Deformação dos (a) 1-2 SPS (b) 0.450-1 SPS (c) 0.250-0.450 SPS

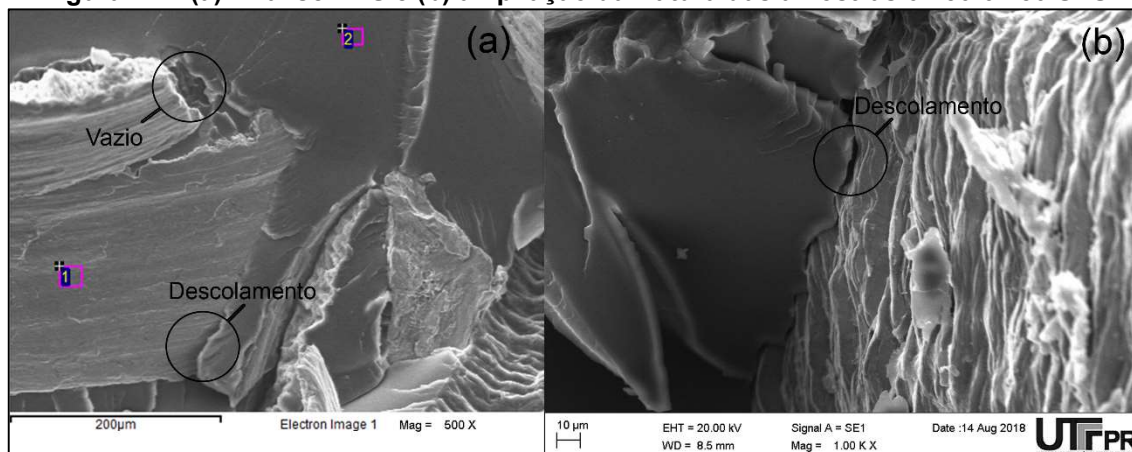


Fonte: Autoria própria

6.6 RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise da fratura foi conduzida com o auxílio de uma análise EDS, que foi usada para distinguir os elementos presentes em cada fase da amostra. A figura 41 representa a área de fratura da amostra 0.250-0.450 SPS, o menor tamanho de partícula. As partículas dessa amostra tenderam a descolar da matriz, o que indica uma união ruim entre essas. Foi observado também alguns pontos de vazios que podem ser devidos a desprendimentos da matriz no momento da ruptura.

Figura 41 – (a) Análise EDS e (b) ampliação da fratura das amostras 0.250-0.450 SPS



Fonte: Autoria própria

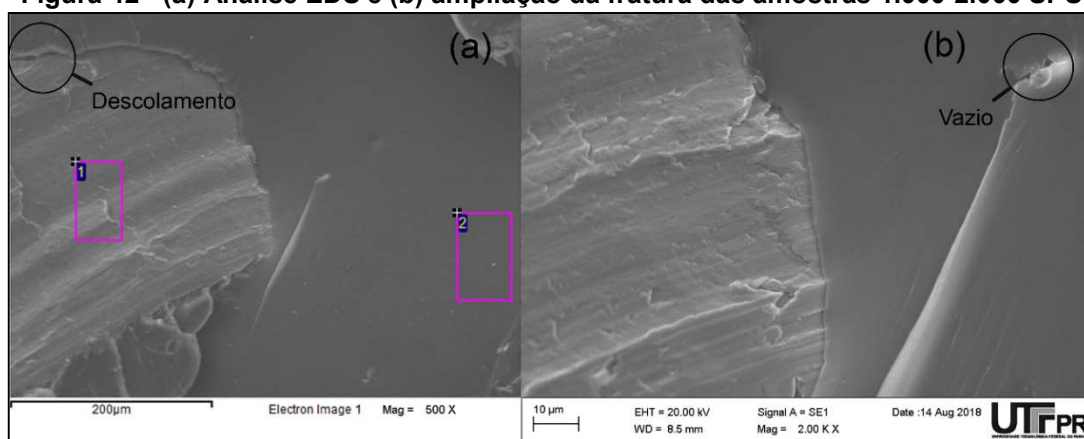
A análise química EDS mostrada na figura 41a apresentou a composição mostrada na tabela 10. A fase 1 representa a fase das partículas de aço. O aço carbono 1045 possui apenas 0.5%, conforme mostrado na seção 4.3, de carbono em sua composição e a análise indicou cerca de 19.09%. Isso pode indicar que apesar da união ruim entre as duas fases, houve uma adesão do epóxi as paredes das partículas.

Tabela 10 – Análise EDS para 0.250-0.450 SPS

Espectro	C [%]	O [%]	Si [%]	Cl [%]	Fe [%]	Total [%]
1	19.09	1.97	0.21	0	78.73	100.00
2	75.50	19.53	0	1.08	3.89	100.00

Fonte: Autoria própria

A figura 42 representa a área de fratura para o maior tamanho de partícula 1.000-2.000 SPS. Assim como para o menor tamanho de partícula, pôde ser observado pontos de descolamentos e vazios, o que mostra que independente dos tamanhos de partículas utilizados nesse trabalho, a união entre as fases não foi satisfatória.

Figura 42 - (a) Análise EDS e (b) ampliação da fratura das amostras 1.000-2.000 SPS

Fonte: Autoria própria

A tabela 11 mostra a análise EDS apresentada na figura 42a. O fenômeno apresentado pela tabela 10 também pode ser notado. Isso indica que houve adesão do epóxi a parede da partícula, apesar da união matriz-partícula não ser satisfatória. Essa união ruim pode ser a causa dos resultados inferiores apresentados pelos compósitos dopados a esforços de tração, pois a transmissão de carregamentos é prejudicada com o descolamento da matriz.

Tabela 11 – Análise EDS para 1.000-2.000 SPS

Espectro	C [%]	O [%]	Na [%]	Cl [%]	Fe [%]	Total [%]
1	20.67	4.10	0.58	0	74.65	100.00
2	74.98	24.49	0	0.53	0.00	100.00

Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÃO

Foram produzidos compósitos de matriz de epóxi reforçado com partículas de aço AISI 1045 para todos os ensaios. As amostras produzidas apresentaram uma redução considerável na densidade se comparado com a do aço. As propriedades mecânicas dos compósitos apresentaram um comportamento recorrente, a deformação máxima era menor a medida que o tamanho de partícula aumentava. O compósito 1.000-2.000 SPS apresentou os piores resultados de todos os compósitos testados e isso pode ser explicado pela influência do tamanho da partícula na formação de pontos de concentração de tensão no material. No teste de flexão as amostras dopadas apresentaram uma melhora na rigidez, sendo que as amostras 0.250-0.450 SPS obtiveram uma melhora de cerca de 32% no módulo de elasticidade à flexão quando comparada as amostras puras. Os resultados do ensaio de tração mostraram propriedades mecânicas inferiores com a adição de partículas. A análise através do MEV indicou uma união ruim apesar de haver adesão do epóxi as partículas. As amostras com partículas de menores tamanhos apresentaram as melhores propriedades mecânicas entre os compósitos para todos os ensaios, foram as que possuíam a maior quantidade de aço adicionada a matriz e as que obtiveram a maior força de resposta magnética, cerca de 20% da apresentada pela amostra de aço puro. Essa resposta magnética torna possível o controle eletromagnético nesse tipo de compósito.

REFERÊNCIAS

ABDEL-MAGID, B. et al. Flexure creep properties of E-glass reinforced polymers. **Composite Structures**, v. 62, n. 3–4, p. 247–253, 1 jan. 2003.

ALFONSO, I. et al. Estimation of elastic moduli of particulate reinforced composites using finite element and modified Halpin–Tsai models. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, p. 1317–1324, 2016.

ANTIPOV, Y. V.; KUL, A. A.; PIMENOV, N. V. Polymer Composite Materials: Technologies and Applications. **Polymer Science**, v. 58, n. 1, p. 26–37, 2016.

ASADI, A. et al. Lightweight sheet molding compound (SMC) composites containing cellulose nanocrystals. **Composite Structures**, v. 160, p. 211–219, 2017.

ASTM. **D790 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. West Conshohocken: ASTM - American Standard Test Method, 2018a.

ASTM. **D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken: ASTM - American Standard Test Method, 2018b.

ATLAS SPECIALITY METALS. **1045 Medium Tensile Carbon Steel Bar 1045 Atlas Specialty Metals Medium Tensile Carbon Steel Bar 1045**. [s.l.] Atlas speciality metals, 2006. v. 6

BAI, P.; ZHU, F.; HE, X. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 65, p. 28–37, 2015.

BALDISSERA, A. F. et al. Epoxy-modified Portland cement: effect of the resin hardener on the chemical degradation by carbon dioxide. **Energy Procedia**, v. 114, n. November 2016, p. 5256–5265, 2017.

BARRACUDA. **Ficha Técnica – Especificação do Produto Sistema de Resina - AR260 Resina Epóxi AH30 Endurecedor Epóxi**. Rio de Janeiro: Barracuda composites, 2018.

CASTELLO, D. A. et al. A general approach for viscoelastic model validation applied

on the analyses of epoxy resin modified by end-functionalized liquid polybutadiene. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 3, p. 993–1007, mar. 2017.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials Science and Engineering**. 3. ed. New York: Springer, 2013.

CHEUNG, H. et al. Composites: Part B Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. **Composites Part B**, v. 40, n. 7, p. 655–663, 2009.

CHOUBEY, G.; SUNEETHA, L.; PANDEY, K. M. Composite materials used in Scramjet- A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 1321–1326, 1 jan. 2018.

CMCM. **MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA EVO MA 15**. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/laboratorios-multiusuario/cmcm/estrutura>. Acesso em: 1 nov. 1BC.

DAVÉ, R. S. et al. Processing: Autoclave modeling. **Wiley encyclopedia of composites**, p. 2 e 3, 2012.

DE MACEDO, R. Q. et al. Elastic properties of unidirectional fiber-reinforced composites using asymptotic homogenization techniques. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 5, p. 255, 2018.

FAN, J.; NJUGUNA, J. **Lightweight Composite Structures in Transport**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2016.

FARIDMEHR, I. et al. Correlation between Engineering Stress-Strain and True Stress-Strain Curve. **American Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 2, n. March, p. 53–59, 2014.

FINK, J. K. Epoxy Resins. In: **Reactive Polymers: Fundamentals and Applications**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 139–223.

FÜZER, J. et al. Innovative ferrite nanofibres reinforced soft magnetic composite with enhanced electrical resistivity. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 753, p. 219–

227, 15 jul. 2018.

GORBATIKH, L.; WARDLE, B. L.; LOMOV, S. V. Hierarchical lightweight composite materials for structural applications. **Materials research society**, v. 41, p. 672–677, 2016.

GU, H. et al. Epoxy resin nanosuspensions and reinforced nanocomposites from polyaniline stabilized multi-walled carbon nanotubes. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 1, n. 4, p. 729–743, 2013.

HAGNELL, M. K.; LANGBECK, B.; ÅKERMO, M. Cost efficiency , integration and assembly of a generic composite aeronautical wing box. **Composite Structures**, v. 152, p. 1014–1023, 2016.

HARVEY, P. D. **Engineering Properties of Steel**. Ohio: American society for metals, 1982.

IBRAHIM, A. Effect of Heat Treatment on Hardness and Microstructures of AISI 1045. **Advanced Materials Research**, v. 1119, p. 575–579, 2015.

JIN, F.; LI, X.; PARK, S. Synthesis and application of epoxy resins : A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 2015.

KAMALBABU, P.; KUMAR, G. C. M. Effects of particle size on tensile properties of marine coral reinforced polymer composites. **Procedia materials science**, v. 5, p. 802–808, 2014.

KUNDIE, F.; MUCHTAR, A. Effects of Filler Size on the Mechanical Properties of Polymer-filled Dental Composites : A Review of Recent Developments Effects of Filler Size on the Mechanical Properties of Polymer-filled Dental Composites : A Review of Recent Developments. **Journal of Physical Science**, n. May, 2018.

LIU, S. et al. A review of extending performance of epoxy resins using carbon nanomaterials. **Composites Part B**, 2017.

MÅRTENSSON, P.; ZENKERT, D.; ÅKERMO, M. Effects of manufacturing constraints on the cost and weight efficiency of integral and differential automotive composite structures. **Composites Structures**, v. 134, p. 572–578, 2015.

MAY, C. A. **Epoxy Resins chemistry and technology**. 2 edição ed. New York: Marcel Dekker, 1988.

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product and process**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

MEBARKI, Y. et al. Effect of interfacial powder on mechanical properties of composites under dynamic tests. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, p. 939–949, 2014.

MONTEIRO, J. R. L.; D'ALMEIDA, J. R. M. Evaluation of the mechanical performance of the creep behavior of a fiberglass repair after aging in oil. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 7, p. 346, jun. 2018.

MOOSBRUGGER, C.; CVERNA, F. **Electrical and Magnetic Properties of Metals**. Ohio: ASM International, 2000.

NA, T. et al. Enhanced thermal conductivity of fluorinated epoxy resins by incorporating inorganic filler. **Reactive and Functional Polymers**, v. 128, n. April, p. 84–90, 2018.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**. 2. ed. São Paulo: Blusher, 2016.

NICKELS, L. Composites driving the auto industry. **Reinforced Plastics**, v. xx, n. xx, p. 10–11, 2017.

NOWOSIELSKI, R. et al. Ferromagnetic composites with polymer matrix consisted of nanocrystalline Fe-based filler. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 387, p. 179–185, 2015.

OMAR, M. F.; AKIL, H. M.; AHMAD, Z. A. Particle size – Dependent on the static and dynamic compression properties of polypropylene / silica composites. **Materials and Design**, v. 45, p. 539–547, 2013.

PAULA, A. et al. Magnetic properties of polymer matrix composites with embedded ferrite particles. **NDT and E International**, 2015.

SAI, M. K. S. Review of Composite Materials and Applications. **International Journal**

of **Latest Trends in Engineering and Technology**, v. 7, 2016.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 189, n. 1–3, p. 1–12, 6 jul. 2007.

SOWTER, G. A. V. Soft Magnetic Materials for Audio Transformers: History, Production, and Applications. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 35, n. 10, p. 760–777, 1987.

SPRENGER, S. Epoxy resins modified with elastomers and surface-modified silica nanoparticles. **Polymer**, 2013.

SREEKUMAR, P. A.; THOMAS, S. **Properties and Performance of Natural-Fibre Composites**. Calicut: Woodhead Publishing, 2008.

TALIJAN, N. MECHANICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITH POLYMER MATRIX. **Journal of mining and metallurgy**, v. 46, n. 1, p. 25–32, 2010.

TITA, V. **Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito Polimérico**. 1. ed. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2006.

TOURLONIAS, M. et al. Contactless Optical Extensometer for Textile Materials. **Society for Experimental Mechanics**, v. 45, n. 5, p. 420–426, 2005.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual Energy Review 2011**. Washington: U.S. Government Printing Office, 2012.

W. D. CALLISTER; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering an introduction**. 8. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010.