

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LAÍS DE ALMEIDA MAYOR

Desempenho mecânico em tração de juntas compósitas co-infundidas à vácuo.

São Carlos
2023

LAIS DE ALMEIDA MAYOR

Desempenho mecânico em tração de juntas compósitas de co-infundidas à vácuo.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Tarpani

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

M473d

Mayor, Lais de Almeida

Desempenho mecânico em tração de juntas compósitas co-infundidas à vácuo / Lais de Almeida Mayor; orientador José Ricardo Tarpani. -- São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Laminados. 2. Fibra de vidro. 3. Resina epóxi.
4. Infusão assistida a vácuo. I. Título.

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Laís de Almeida Mayor
Título do TCC / Title: Desempenho mecânico de juntas compósitas de cisalhamento infundidas à vácuo.
Data de defesa / Date: 13/07/2023

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professor José Ricardo Tarpani (orientador)	Aprovada
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Professor Volnei Tita	Aprovada
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Mestre Francisco Javier Goyo Brito	Aprovada
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee


José Ricardo Tarpani (Jul 17, 2023 16:27 ADT)

Professor José Ricardo Tarpani

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Ricardo Tarpani, que muito me ensinou contribuindo para o meu crescimento científico.

A Prof. Dra. Alessandra Cristina Soares Pozzi Tarpani , pela ajuda, disponibilidade e ensinamentos passados.

Ao João Jerônimo Bernardi, por todo o auxílio prestado em laboratório.

Aos colegas da disciplina SMM 0309- Laboratório de Materiais Compósitos- Primeiro semestre de 2022, que me ajudaram nos experimentos realizados.

RESUMO

Mayor, L. A. **Desempenho mecânico em tração de juntas compósitas co-infundidas à vácuo.** 2023. 48 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Neste trabalho, estudou-se o comportamento mecânico de juntas laminadas compósitas, fabricadas com tecido de fibra de vidro e resina epóxi. Por intermédio da técnica de infusão de resina líquida assistida a vácuo foram projetadas e fabricadas cinco diferentes geometrias de juntas laminadas compósitas e um laminado íntegro com o mesmo arranjo de camadas das juntas como controle. As juntas e o laminado íntegro foram submetidos a ensaios de tração, e analisadas após a fratura. Obtiveram-se valores de carga máxima, resistência máxima, rigidez estrutural, deformação e energia absorvida até a fratura para cada junta e para o laminado íntegro. Os resultados foram comparados, com respeito aos parâmetros mais relevantes de projeto estrutural (resistência máxima e rigidez), e pôde-se concluir que a junta de geometria Intercalada (*interspersed*) exibiu o máximo desempenho em termos de propriedades absolutas e relativas à massa das juntas. Tendo em vista as notáveis vantagens da implementação de estruturas leves de engenharia, particularmente na indústria da mobilidade, tais como, economia de combustível, maior autonomia do veículo, compensação da potencial redução de peso por maior espaço interno, menor poluição por unidade de deslocamento, a junta intercalada, por exibir notável eficiência estrutural, merece ser melhor pesquisada visando otimizar o seu já relevante desempenho mecânico.

Palavras-chave: Materiais compósitos. Juntas laminadas. Propriedades mecânicas. Eficiência estrutural.

ABSTRACT

Mayor, L. A. **Mechanical performance in tensile strength of vacuum co-infused composite joints.** 2023. 48 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

In this study, the mechanical behavior of laminated composite joints made of fiberglass fabric and epoxy resin was investigated. Using the vacuum-assisted resin infusion technique, five different geometries of laminated composite joints and a solid laminate with the same layer arrangement as the joints (as a control) were designed and manufactured. The joints and the solid laminate were subjected to tensile tests and analyzed after fracture. Maximum load, ultimate strength, structural stiffness, deformation, and energy absorbed until fracture values were obtained for each joint and the solid laminate. The results were compared with respect to the most relevant parameters of structural design (ultimate strength and stiffness), and it was concluded that the interspersed geometry joint exhibited the highest performance in terms of absolute properties and relative to the mass of the joints. Considering the notable advantages of implementing lightweight engineering structures, particularly in the mobility industry, such as fuel savings, increased vehicle autonomy, compensation for potential weight reduction with more interior space, and lower pollution per unit of displacement, the interspersed joint, due to its remarkable structural efficiency, deserves further research to optimize its already relevant mechanical performance.

Keywords: Composite materials. Laminated joints. Mechanical properties. Structural efficiency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 METODOLOGIA	17
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A concepção e o desenvolvimento dos materiais compósitos, que misturam distintas classes de materiais, veio com a necessidade de obtenção de novos materiais com propriedades intermediárias aos tradicionalmente usados na indústria, como metais, polímeros e cerâmicas. Ao combiná-las, alia-se a diminuição de peso, com boas qualidades estruturais, por exemplo. Primeiramente voltados para a indústria aeronáutica (fuselagem de aeronaves, peças de motores de avião, pás de helicópteros), teve a utilização ampliada e hoje com inúmeros usos, como militar (coletes a prova de bala), automobilísticos (capacetes de pilotagem, macas de resgate), entre outros. Normalmente são compostos por uma matriz, que pode ser cerâmica, polimérica ou metálica, com um material de reforço (CALLISTER JR.; & RETHWISCH, 2013).

Materiais compósitos continuam apresentando maior uso na indústria aeroespacial, naval e automobilística. É um elemento essencial a utilização de materiais de alto rendimento, que possuam baixo peso, tenham elevada resistência mecânica, como elevada dureza, resistência à tração (principalmente na direção em que as cargas estão orientadas) (REZENDE; BOTELHO, 2020). Porém, fabricar peças muito extensas é inviável, gerando a necessidade de se unir os componentes da peça. Ao se unir, pode ser empregado dois métodos: união mecânica por meio de rebites e parafusos, que gera necessidade de se perfurar ambas as peças; e por união adesiva, normalmente usada uma resina epóxi como adesivo.

Juntas compósitas coladas ou adesivadas são amplamente utilizadas por suas vantagens sobre as mecanicamente fixadas por rebites e parafusos. Como vantagens, pode-se ver menor concentração de tensões pela ausência de furações, pois ao redor do rebite se concentra altas tensões, devido ao furo feito no sistema (MARCHEZIN; PARDINI; GUIMARÃES, 2012). Isso gera dificuldades de se fazer a transferência de carga entre os elementos da junta ocorrer na fração de área disponível. Também há uma distribuição mais uniforme de carga nas áreas coladas, devido a uma superfície de contato integral entre as partes unidas, reduzindo pontos de concentração de tensão. Juntas coladas apresentam outras vantagens como menor peso, e melhor desempenho em fadiga, e de modo geral, têm baixo custo de fabricação (ABUSREA; ARAKAWA, 2016).

Materiais de reforço comumente utilizados têm origem cerâmica, como as fibras de vidro e fibras de carbono. Podem ser poliméricas também, como kevlar, ou até mesmo se fabricar um tecido misto trançado com fibras de carbono e fibras de kevlar, para unir as

propriedades dos dois elementos. Neste trabalho, escolheu-se usar fibras de vidro devido a vantagens econômicas, por ser relativamente barato. Propriedades físicas também foram decisivas na escolha, pois possui certa flexibilidade, é um bom isolante, com coeficiente de expansão térmica baixo, além de ser resistente à corrosão. Tem uma resistência à tração superior à maioria dos metais.

Como matriz, foi escolhido trabalhar com resina epóxi, que é termoestável, possui um amplo espectro de viscosidade, reologia e velocidade de cura, facilitando o manuseio. Os laminados compósitos estruturais de matriz polimérica são substancialmente mais leves que os metais e suas ligas. Outra vantagem apresentada é a ampla possibilidade de manufatura próxima à forma final (*near-net-shape*), que é um benefício que vem sendo explorado na busca de estruturas contendo juntas exibindo elevada eficiência estrutural (i.e., elevada razões de resistência e rigidez por unidade de massa) (ABUSREA *et al.*, 2015).

Para manufaturar os laminados compósitos, foi escolhido o método de infusão de resina líquida assistida à vácuo. Ela vem sendo empregada cada vez mais nas indústrias aeronáutica, marítima, automotiva e eólica, pois une características como, simplicidade, rapidez, custo reduzido, em relação ao processo. E concilia ao mesmo tempo com complexidade e desempenho do produto final (HINDERSMANN, 2019). O termo empregado para o uso da técnica de infusão de resina líquida na união de duas ou mais pré-formas secas que serão unidas entre si é “co-infusão” (VERMA *et al.*, 2020), e a expressão “junta laminada” é utilizada para este tipo de construção (ASADI *et al.*, 2018).

Neste trabalho, estudou-se o comportamento mecânico de juntas laminadas compósitas fabricadas com tecido de fibra de vidro e resina epóxi. Uma amostra de cada uma das cinco diferentes geometrias de junta (Figura 1) foram projetadas e manufaturadas utilizando 10 camadas de tecido empilhadas segundo uma mesma arquitetura. Um laminado íntegro com idêntico arranjo de empilhamento de camadas de reforço utilizado nas juntas foi empregado como referência.

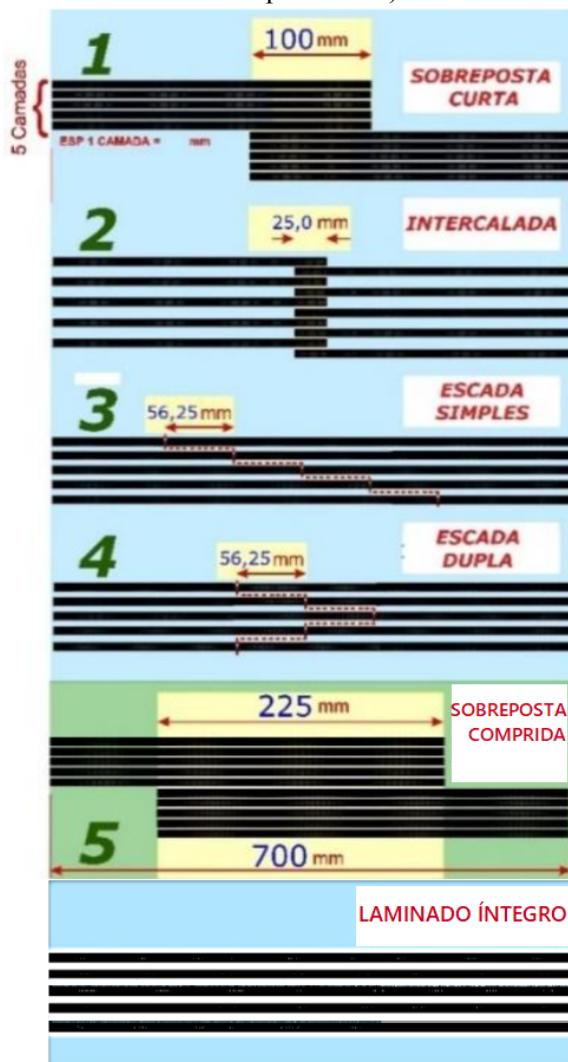
As manufaturas foram feitas em conjunto com os alunos da disciplina de Laboratório de Materiais Compósitos de 2022, e por questões didáticas, as normativas ASTM 3163 e ASTM D5868 não foram seguidas, pois as amostras manufaturadas tiveram tamanhos superiores ao que a norma determina.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho, estudou-se o comportamento mecânico de juntas laminadas compósitas fabricadas com tecido de fibra de vidro e resina epóxi. Cinco diferentes geometrias de junta (Figura 1) foram projetadas e manufaturadas utilizando 10 camadas de tecido empilhadas segundo uma mesma arquitetura. Um laminado íntegro com idêntico arranjo de empilhamento de camadas de reforço utilizado nas juntas foi empregado como referência (grupo controle).

Por limitações de tempo e material, apenas um laminado de cada geometria foi construído. Para que as condições de fabricação fossem as mesmas, todos os laminados foram manufaturados no mesmo laboratório, simultaneamente, expostos às mesmas condições de temperatura, umidade e pressão atmosférica.

Figura 1 – Representação esquemática da seção longitudinal das juntas laminadas compósitas (nominadas de 1 a 5 de cima para baixo) e do laminado íntegro.



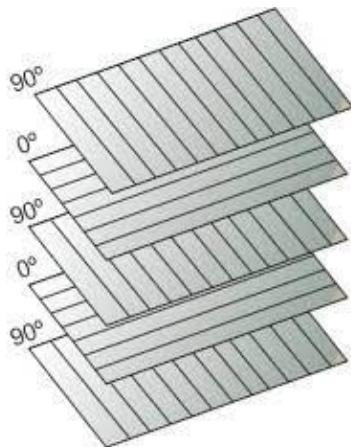
Fonte: Autoral

A técnica aplicada na confecção dos espécimes foi a infusão de resina líquida assistida a vácuo. A largura e comprimento nominal deles foram de, respectivamente, 50 mm e 700 mm.

O princípio fundamental seguido no estudo para permitir uma comparação justa entre as juntas, foi a de que a área de contato cisalhante fosse idêntica, de 225 mm, exceção feita à junta 1, com uma área muito inferior, de modo a que se pudesse verificar o efeito dessa variável em juntas sobrepostas simples (sobreposta curta (junta 1) e sobreposta comprida (junta 5)).

O primeiro passo para montar o sistema foi cortar os tecidos de fibra de vidro do tamanho indicado, e posterior empilhamento no sentido 0°-90°. Esse tipo de orientação é indicado para aplicações em que as forças direcionais são exercidas principalmente no sentido longitudinal ou transversal da amostra. Foram empilhadas dessa forma dez camadas, cada uma com a geometria da figura 1. No final, todas tinham o mesmo comprimento e a mesma largura.

Figura 2 – Orientação dos tecidos de fibra de vidro ao serem empilhados.



Fonte: Oxiblack- Creating through composites (2017)

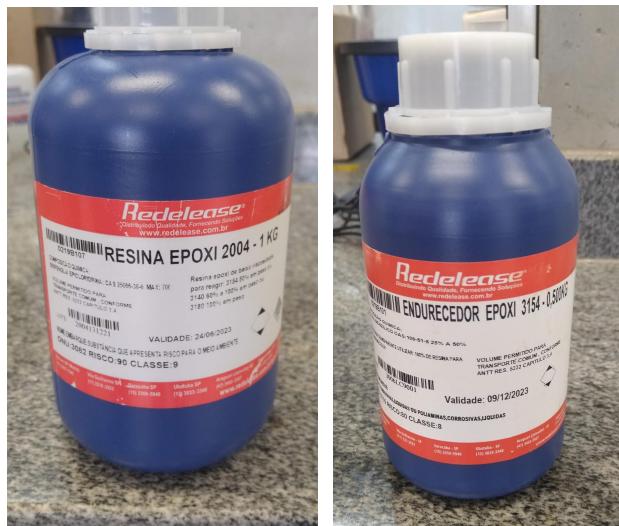
O segundo passo foi a montagem do sistema. Foi passada uma camada de desmoldante, uma cera natural, como mostra a figura 2, sobre a base de vidro usada. Depois foram colocados os tecidos de fibra de vidro corretamente empilhados. De etapa paralela, foram adicionadas duas mangueiras em extremidades opostas do sistema de infusão. Uma foi conectada à bomba de vácuo, e outra foi utilizada para adicionar resina epóxi ao sistema. Acompanhando o comprimento do tecido, foram colocados dois tubos em espiral, um de cada

lado do sistema, para ajudar na distribuição de resina. Um deles estava conectado à mangueira ligada ao vácuo, e a outra à mangueira de entrada.

Sobre todo esse sistema, foram colocadas algumas camadas. Primeiro, foi acrescentado um tecido chamado *peel ply*, que facilita o desmolde da peça, depois uma rede de distribuição, para permitir que a resina preenchesse de modo eficiente o tecido, e depois, a bolsa de vácuo. A mesma bolsa de vácuo foi colada à base de vidro com uma fita adesiva de dupla face chamada de *tracky tape*, *tape* ou bambam. Elas são resistentes à resina, ou seja, não se relacionam uma com a outra, são inertes. Assim, se cria um ambiente fechado hermeticamente que não permite a passagem de ar, fazendo com que a resina possa penetrar as fibras de maneira eficiente e sem que haja bolhas, que são concentradoras de tensão.

O passo seguinte foi a preparação da resina epóxi para infusão. Foi utilizada a fabricante Redorelease, sendo usada a resina epóxi 2004, juntamente com o endurecedor epoxi 3154, de mesmo fabricante, na proporção de 2:1, consecutivamente.

Figura 3 – Resina Epóxi 2004 e Endurecedor Epóxi 3154 de marca Redorelease



Fonte: Autoral

A resina e o endurecedor foram pesados com uma balança tradicional, e foram misturados. Imediatamente após a mistura, o sistema é turvo. Quando há uma real mescla entre resina e endurecedor, o sistema passa a ser transparente. Ao se misturar, há incorporação de ar atmosférico no sistema. Há a necessidade de se eliminar o ar da resina, pois ele gera bolhas, que prejudicam o embebimento da resina nos tecidos de fibra de vidro, o que fragiliza o laminado. Por isso, foi necessário colocar a resina em um sistema de degasagem, para tirar o

ar da mistura e assim ser mais eficiente, como mostra a figura 4. A resina permaneceu no sistema até que visualmente não houvesse mais bolhas de ar.

Figura 4 – Sistema de degasagem



Fonte: Autoral

Após a mistura ser finalizada, foi a etapa da infusão a vácuo. Todas as amostras foram infundidas do mesmo modo. A mangueira de entrada foi mergulhada na resina, e a bomba à vácuo foi ligada. A resina entra no sistema por meio da mangueira de alimentação (localizada à direita na figura 5), e é conduzida por todo o tecido pelos condutores de resina (mangueira em espiral e pela rede de distribuição). O encharque ocorreu da direita para a esquerda, que foi a direção do fluxo de resina. O excesso foi direcionado pelo condutor de vácuo (mangueira em espiral à esquerda) para ser removido pela mangueira de vácuo, diretamente ligada à bomba de vácuo, e então o sistema foi desligado, como mostrado na figura 5. Tal processo foi realizado de modo individual por questões didáticas durante as práticas da disciplina de Laboratório de Materiais Compósitos.

Figura 5 – Sistema de infusão submetido ao vácuo, após resina ser infundida no sistema



Fonte: Autoral

Esperou-se a cura dos corpos de prova, em torno de uma semana, e então foi realizado o desmolde e lixamento das beiradas, para que ficasse com uma superfície mais uniforme.

As extremidades de cada uma das amostras foram lixadas (para aumentar irregularidades e melhorar a área de contato) e foram colados 4 tabletes de alumínio, para facilitar o agarre nas garras da máquina de ensaio de tração. Foi usada cola epóxi araldite hobby, na proporção de 1:1 entre epóxi e endurecedor.

Figura 6 – a) Cola Epóxi Araldite usada para colagem dos tabletes de alumínio. b) Tabletes de alumínio colados na extremidade do laminado.



Fonte: Autoral

Todas as amostras foram submetidas a um processo de cura, em um forno à 90°C por meia hora. Todas as amostras perderam um pouco de massa, devido ao processo natural de se

perder voláteis e água durante a cura. As amostras foram pesadas, medidas, como se pode ver na tabela 1. Calculou-se a largura média com 3 medições em pontos distintos dos laminados, e o mesmo processo ocorreu com a espessura, que foi medida na região do laminado (e não na região da junta). A área útil da seção transversal calculou-se ao multiplicar a espessura média com a largura média.

Figura 7 – Laminados juntos após infusão e antes de serem ensaiados, na mesma ordem, da esquerda para a direita, são: Intercalada (junta 2), Escada dupla (junta 4), Escada simples (junta 3), Sobreposta curta (junta 1), sobreposta comprida (junta 5).



Fonte: Autoral

A etapa laboratorial seguinte foi o ensaio de tração. Cada uma das amostras foi submetida a um ensaio de tração, até a falha. Foi usada uma máquina EMIC, na velocidade de 1mm/min. A célula de carga utilizada foi de 100 kN e não houve necessidade de pré-carga na máquina para realização dos ensaios. Os dados tratados foram obtidos diretamente do travessão da máquina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os laminados, ao serem colocados na máquina de ensaio de tração EMIC, na velocidade de 1mm/min, principalmente nos períodos finais do ensaio, era possível ouvir estalos do material sendo forçado. Regiões com falhas e concentradores de tensão, como bolhas e fita adesiva usada na confecção, geraram regiões esbranquiçadas, que indicam danificações. Os laminados escada simples (junta 3) e escada dupla (junta 4) romperam na região das juntas. Os laminados sobreposta curta (junta 1) e sobreposta comprida (junta 5) romperam próximos a junta. E os laminados intercalada (junta 2) e o íntegro falharam próximo a extremidade do laminado, a centímetros do fim, devido à uma alta concentração de bolhas nessas regiões, que fragilizaram muito o laminado, e essas regiões falharam no ensaio de tração antes da junta e áreas cercanas.

Como o laminado intercalado e o laminado íntegro falharam em regiões não desejadas, muito próxima a extremidade, pensou-se em refazer os corpos de prova e refazer os ensaios. Por falta de tempo e recursos reduzidos, escolheu-se a opção de retirar a parte danificada e usar o mesmo corpo de prova em um novo ensaio. Assim, seus comprimentos foram reduzidos com uma serra, lixados, pesados e medidos novamente, e re-ensaiados na mesma máquina EMIC, nas mesmas condições anteriores.

Ao serem ensaiados novamente, tanto o laminado intercalado quanto o íntegro apresentaram regiões esbranquiçadas em áreas com falhas, e também era possível ouvir estalos do material sendo forçado. O ensaio foi finalizado ao se ouvir um grande estalo, e visualmente ser possível ver que houve falha no material, e desta vez, a milímetros da junta, para o laminado intercalado, e na região central do laminado íntegro. O estudo feito em cada uma das juntas foi nas suas regiões centrais, com comprimento de 250 mm.

Todas as amostras foram medidas, pesadas. Calculou-se a massa para o comprimento de 250mm. A largura e a espessura foram medidas em três regiões distintas do laminado, não sendo a região da junta. E então foi feita uma média aritmética dos valores, e com esses dados calculou-se a área da seção transversal da amostra, chamada de seção líquida.

Tabela 1 – Relação da geometria de cada um dos laminados em relação à junta, a massa obtida, comprimento, largura, espessura e área da seção transversal.

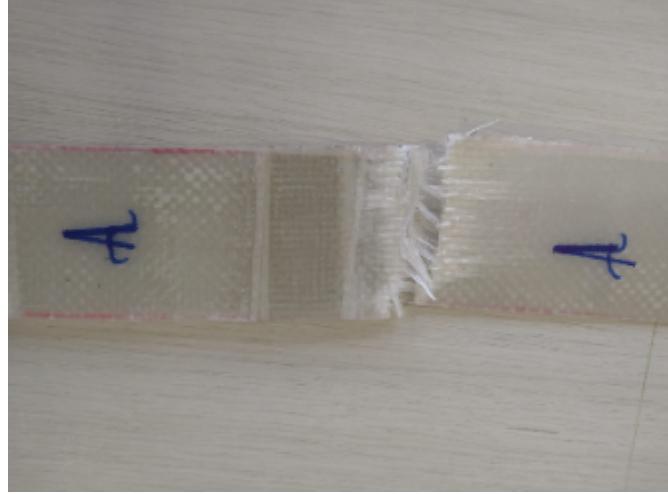
Identificação	Geometria	Massa (g)	Comprimento Estudado (mm)	Largura média (mm)	Espessura média (mm)	área da seção transversal da seção líquida (mm ²)
junta 1	sobreposta curta	25,5	250	49	1,1	55,4
junta 2	intercalada	21,4	250	48	1,1	52,4
junta 3	escada simples	16,8	250	48	1,2	56,9
junta 4	escada dupla	18,5	250	51	1,1	55,5
junta 5	sobreposta comprida	39,5	250	50	1,2	57,6
Laminado	íntegro	16	250	43	0,9	37,7

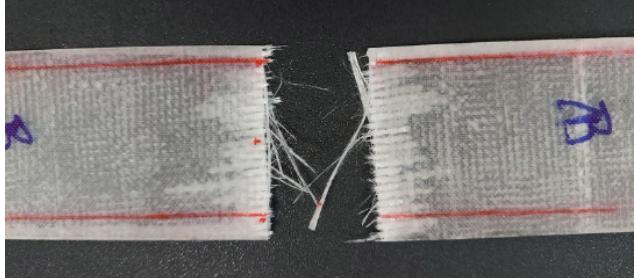
Fonte: Autoral

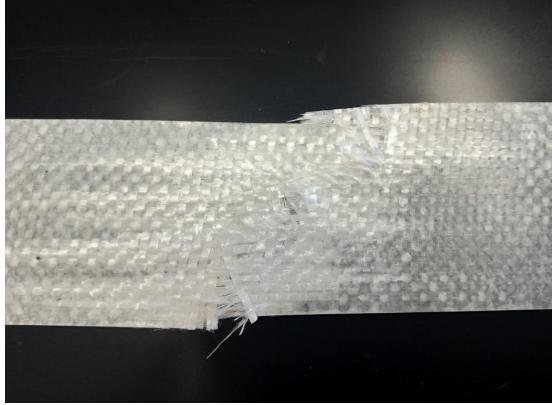
Após a realização dos experimentos, o equipamento oferece dados de tempo do experimento, deformação da amostra e força aplicada.

Primeiro, os corpos de prova ensaiados foram analisados visualmente, principalmente a região em que houve falha.

Quadro 1 – Comparação de falha de cada uma das amostras ensaiadas, com imagem característica da ruptura e localização da fratura.

Junta	Geometria	Imagens das fraturas	Localização da fratura
Junta 1	sobreposta curta	<p>Figura 8 –a) e b) Laminado sobreposto curto após o ensaio de tração</p>  <p>Fonte: Autoral</p>	<p>Fraturou a centímetros da junta, que teve danos mas não chegou a fraturar. Nota-se o efeito do momento secundário, causado pelo desalinhamento das linhas de força em relação à colagem dos quatro tabletos de alumínio na parte inferior e superior do laminado.</p>
Junta 2	intercalada	<p>Figura 9 – Laminado intercalado após o ensaio de tração</p>  <p>Fonte: Autoral</p>	<p>Fraturou a milímetros da junta, que teve danos mas não chegou a fraturar. Menor efeito do momento secundário devido aos eixos de força do laminado estarem mais alinhados que a junta 1.</p>

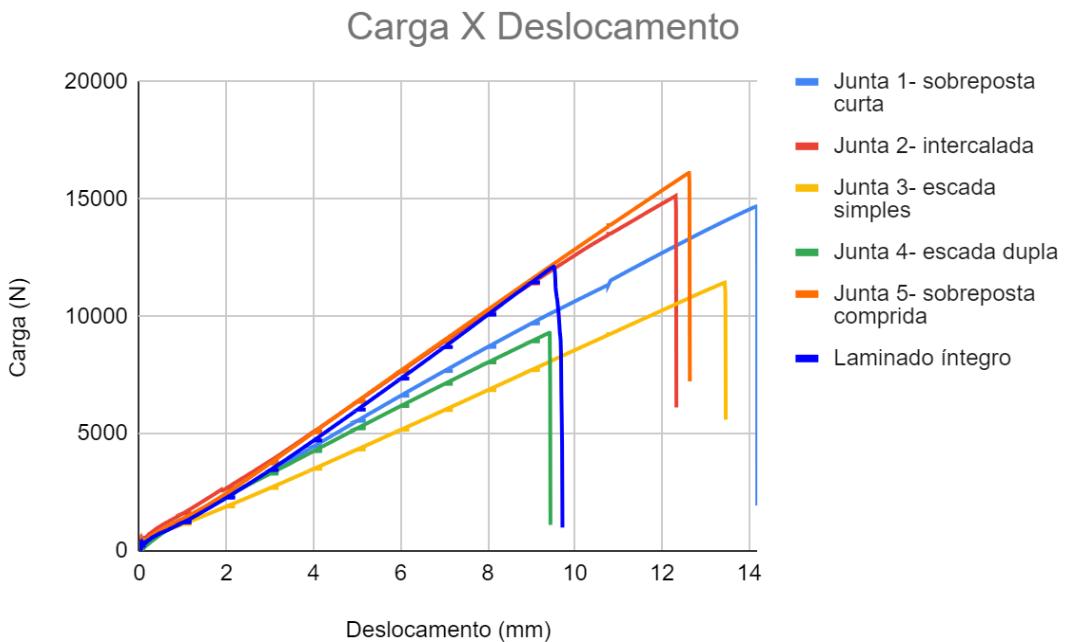
Junta 3	escada simples	<p>Figura 10 – a) e b) Laminado escada simples após o ensaio de tração</p>  <p>Fonte: Autoral</p>	<p>Rompeu no último degrau da junta (mais longe do centro). Como na junta 2, houve um leve efeito do momento secundário devido aos eixos de força do laminado estarem mais alinhados que a junta 1.</p>
Junta 4	escada dupla	<p>Figura 11 – Laminado escada dupla após o ensaio de tração</p>  <p>Fonte: Autoral</p>	<p>Rompeu no centro da junta. Como nas juntas 2 e 3, houve um leve efeito do momento secundário devido aos eixos de força do laminado estarem mais alinhados que a junta 1.</p>

Junta 5	sobreposta comprida	<p>Figura 12 – Laminado sobreposto comprido após o ensaio de tração</p>  <p>Fonte: Autoral</p>	<p>Fraturou a centímetros da junta, que teve danos mas não chegou a fraturar. Nota-se o efeito do momento secundário, causado pelo desalinhamento das linhas de força em relação à colagem dos quatro tabletos de alumínio na parte inferior e superior do laminado, muito similar ao da junta 1.</p>
Laminado íntegro		<p>Figura 13 – Laminado íntegro após o ensaio de tração</p>  <p>Fonte: Autoral</p>	<p>A fratura ocorreu na região central. Não houve momento secundário pois o laminado íntegro possui apenas um eixo de forças.</p>

Fonte: Autoral

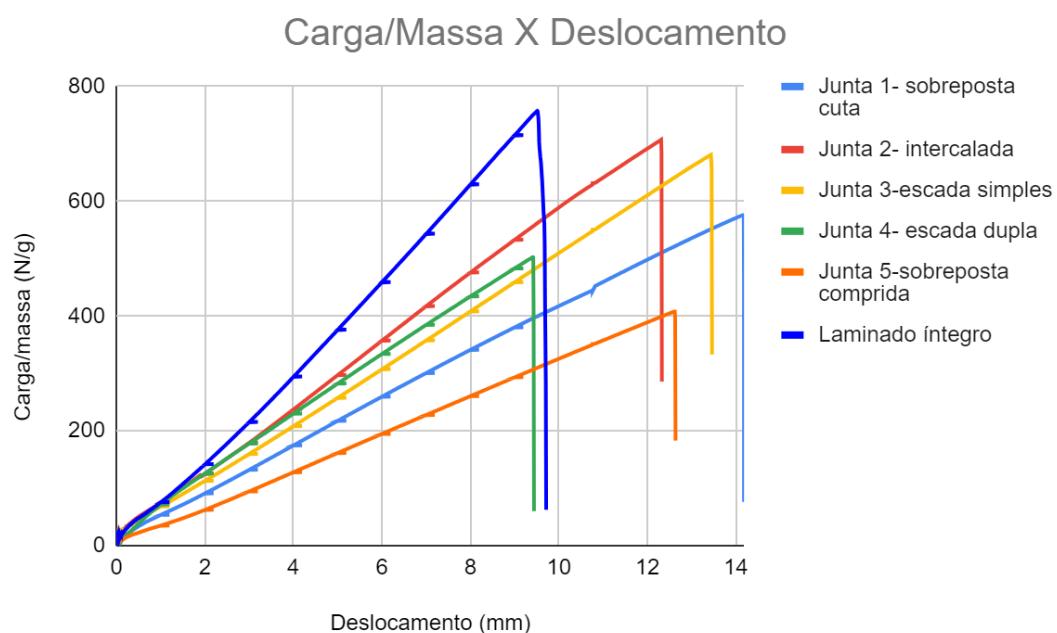
Então, com os dados obtidos no ensaio, foi plotado um gráfico de Carga Versus Deslocamento e outro gráfico de Carga Versus Deslocamento em relação à massa, como podem ser observados nos gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 – Representação do comportamento de cada uma das juntas ao ser solicitada num ensaio de tração, em relação à carga usada versus deslocamento ocorrido.



Fonte: Autoral

Gráfico 2 – Representação do comportamento de cada uma das juntas ao ser solicitada num ensaio de tração, em relação à carga usada versus deslocamento ocorrido, em relação à massa de cada uma das juntas



Fonte: Autoral

A etapa seguinte foi do cálculo de tensão e deformação, por meio do Excel, de cada uma das juntas. A tensão é dada pela expressão:

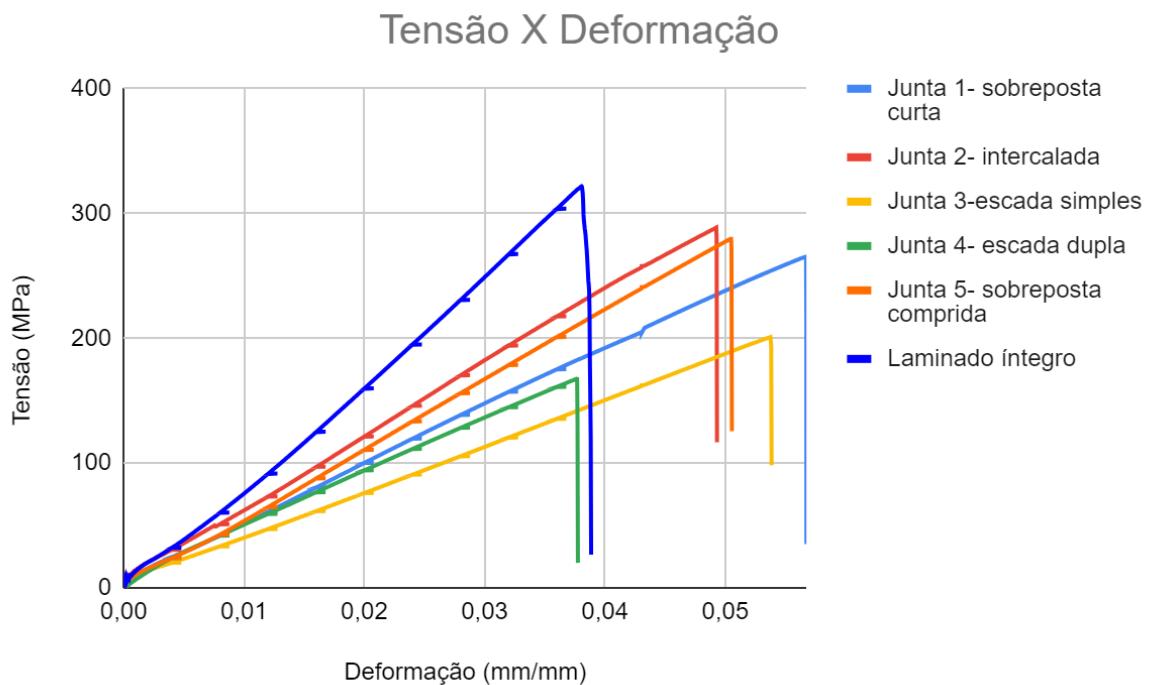
$$\tau = \frac{\text{Força}}{\text{área seção transversal}}$$

E a deformação é dada pela expressão:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

E assim, construiu-se o gráfico 3.

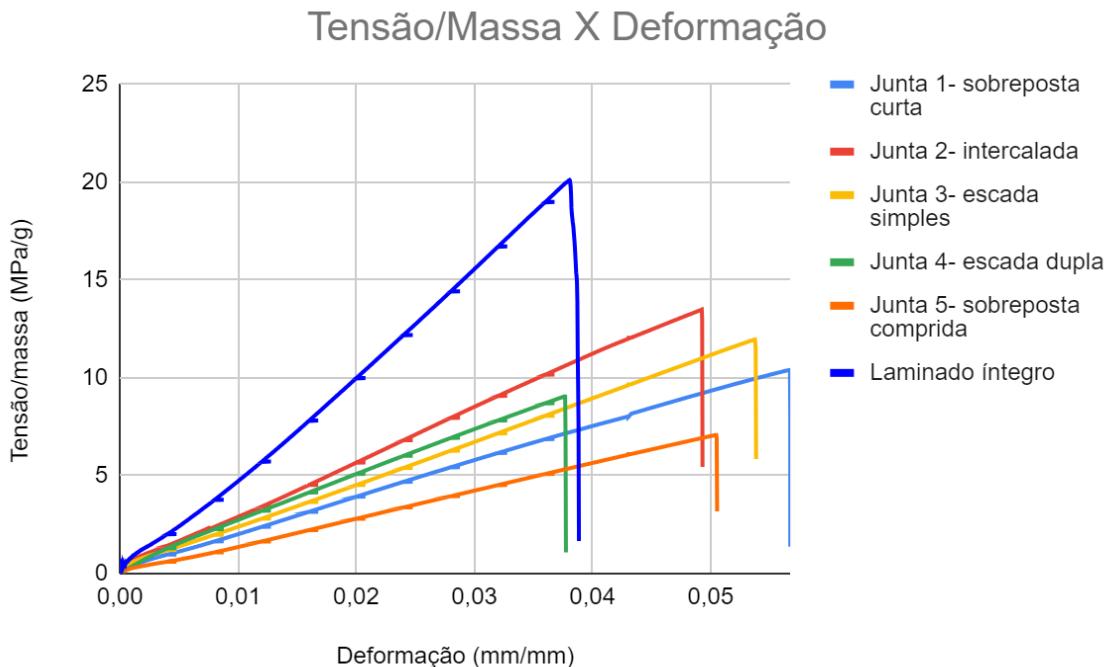
Gráfico 3 – Representação do comportamento de cada uma das juntas ao ser solicitada num ensaio de tração, em relação à tensão versus deformação ocorrida.



Fonte: Autoral

Nessa etapa de construção dos gráficos, também foi feito com Tensão Versus Deformação relativos à massa, como mostra o gráfico 4.

Gráfico 4 – Representação do comportamento de cada uma das juntas ao ser solicitada num ensaio de tração, em relação à tensão versus deformação ocorrida, em relação à massa.



Fonte: Autoral

Com esses dados, foram destacados alguns pontos, como a carga máxima suportada por cada um dos laminados antes da fratura. Também foram calculadas algumas grandezas, como Rigidez Estrutural, Tensão Máxima, Deformação de Carga Máxima, Energia absorvida até a fratura (área abaixo da curva de tensão-deformação), como se pode ver na tabela 2.

Por meio de mais cálculos, foram feitos outros comparativos com os resultados das amostras.

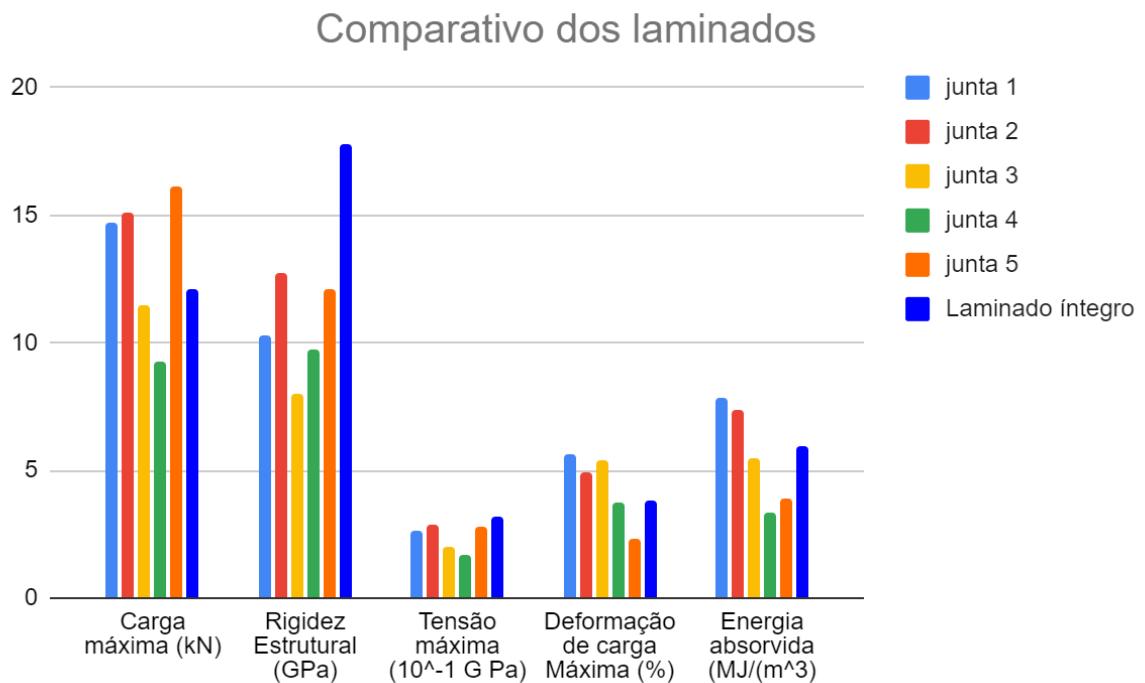
Tabela 2 – Dados de Carga Máxima, Rigidez Estrutural, Tensão Máxima, Deformação de Carga Máxima e Tenacidade de Carga Máxima suportadas por cada uma das amostras ensaiadas.

	Carga máxima (kN)	Rigidez estrutural (GPa)	Tensão máxima (GPa)	Deformação de carga Máxima (%)	Energia absorvida (MJ/m ³)
junta 1- Sobreposta curta	14,689	10,258	0,265	5,668	7,832
junta 2- Intercalada	15,136	12,765	0,289	4,916	7,356
junta 3- Escada simples	11,440	8,006	0,201	5,378	5,496
junta 4- Escada dupla	9,298	9,743	0,166	3,769	3,322
junta 5- Sobreposta comprida	16,115	12,091	0,279	2,293	3,925
Laminado íntegro	12,121	17,819	0,322	3,794	5,912

Fonte: Autoral

O gráfico 5 foi extraído da tabela 2, para melhor comparação. (Obs: Para facilitar a visualização no gráfico, as ordens de grandeza utilizadas não são as tradicionalmente usadas no S.I.).

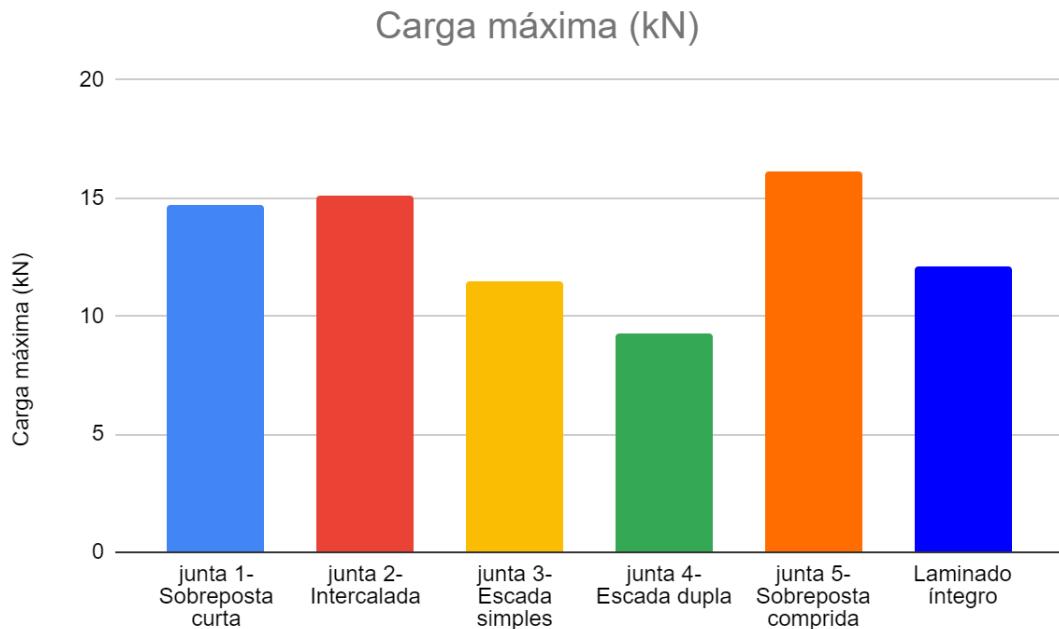
Gráfico 5 – Dados de Carga Máxima, Rígidez Estrutural, Tensão Máxima, Deformação de Carga Máxima e Tenacidade de Carga Máxima suportadas por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

E cada uma delas foi tratada de modo individual também.

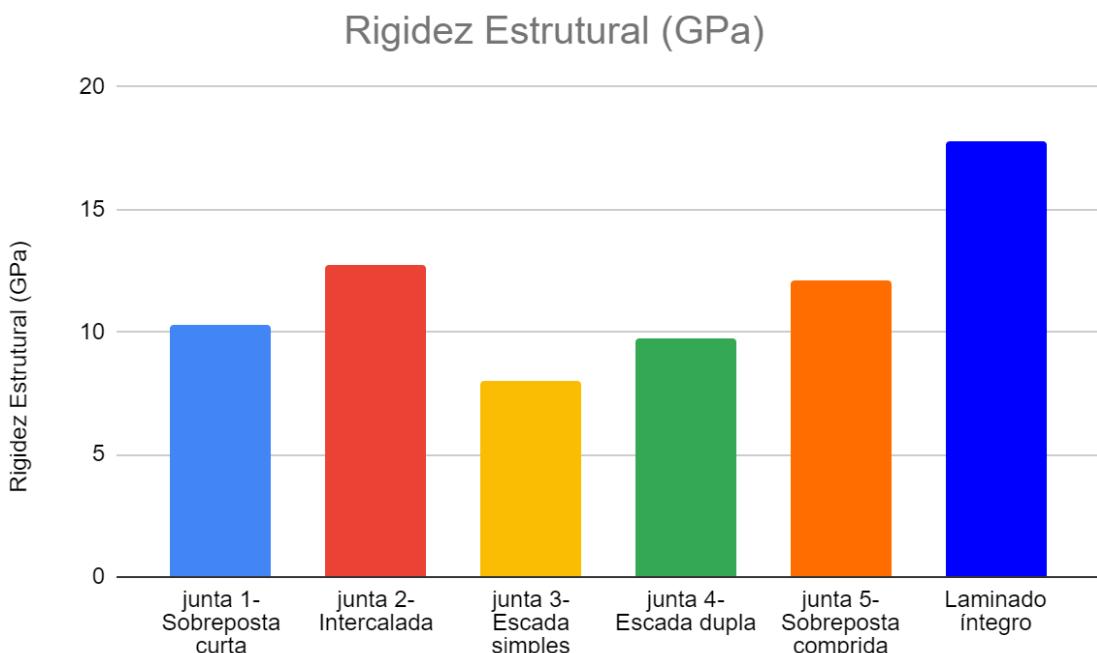
Gráfico 6 – Dados de Cargas Máximas suportadas por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que suportou uma maior carga foi o da junta 5 (sobreposta comprida), e em segundo lugar, a junta 2 (intercalada).

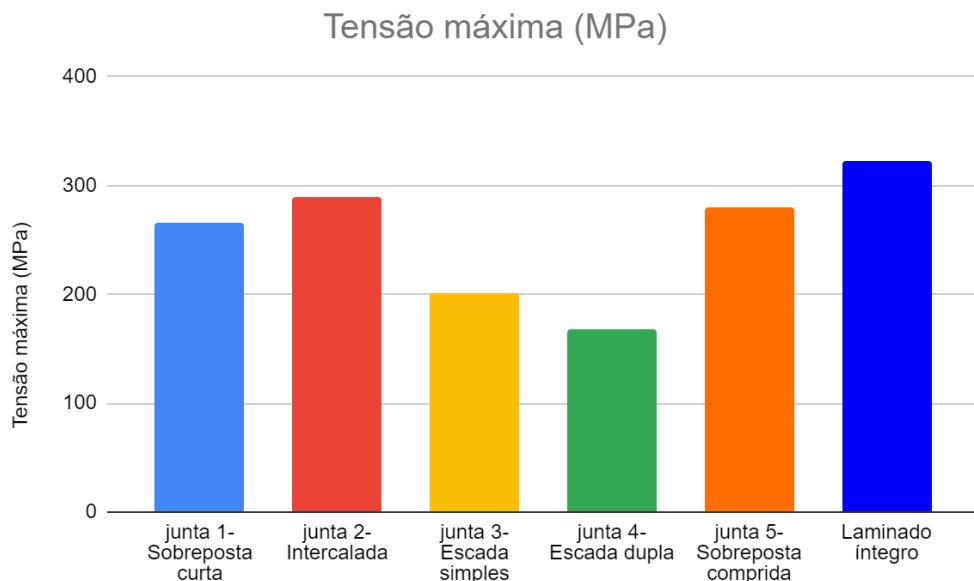
Gráfico 7 – Dados de Rígidez Estrutural suportada por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que teve uma maior rigidez estrutural foi o laminado inteiriço, e posteriormente a junta 2 (intercalada).

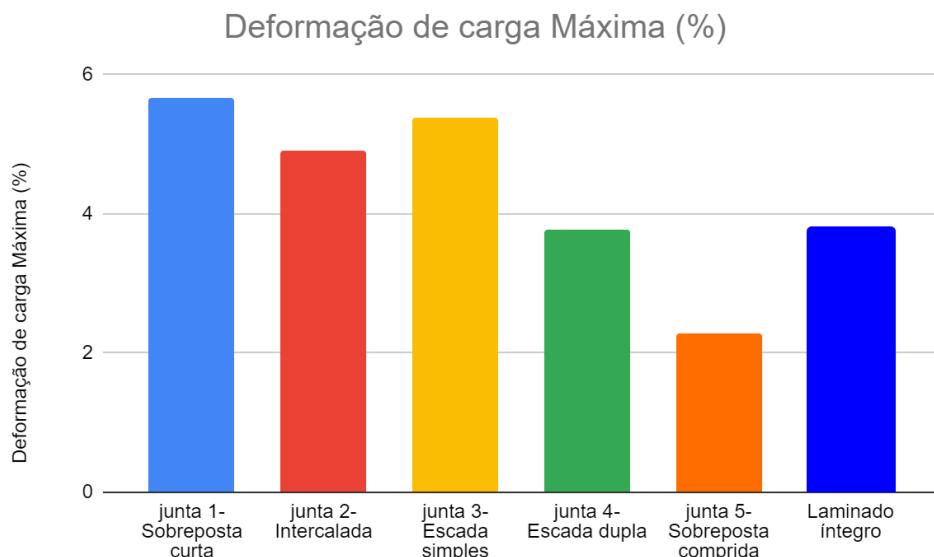
Gráfico 8 – Dados de Tensão Máxima suportada por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que suportou uma tensão máxima maior foi o laminado íntegro, e posteriormente a junta 2 (intercalada).

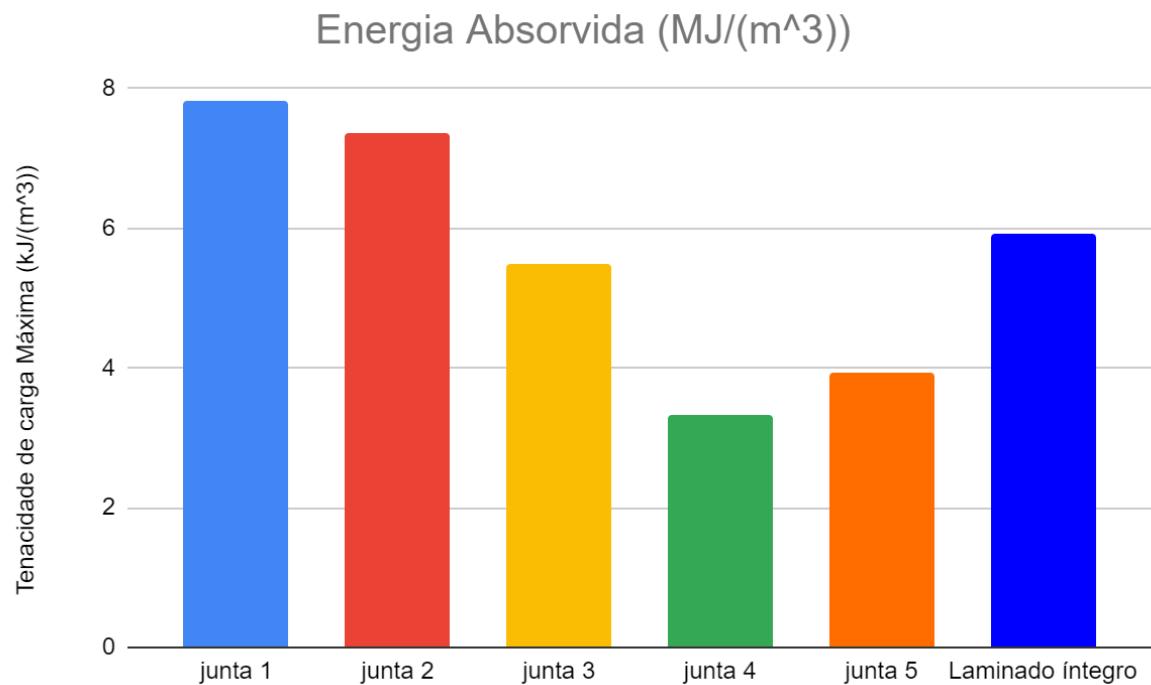
Gráfico 9 – Dados de Deformação de Carga Máxima suportada por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que suportou uma deformação de carga máxima maior foi a junta 1 (sobreposta curta), em segundo lugar, a junta 3 (escada simples), depois vem a junta 2 (intercalada), e sequencialmente o laminado íntegro. Os piores resultados são da junta 4 (escada dupla) e da junta 5 (sobreposta comprida).

Gráfico 10 – Dados de Tenacidade de Carga Máxima suportada por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que suportou uma tenacidade de carga máxima maior foi a junta 1 (sobreposta curta), a junta 2 (intercalada) vem em segundo lugar, e sequencialmente o laminado íntegro

Outra análise foi feita, das mesmas grandezas, mas em relação à massa, como mostra a tabela 3.

Tabela 3 –Dados de Carga Máxima, Rrigidez Estrutural, Tensão Máxima e Tenacidade de Carga Máxima, todos em relação à massa, suportadas por cada uma das amostras ensaiadas.

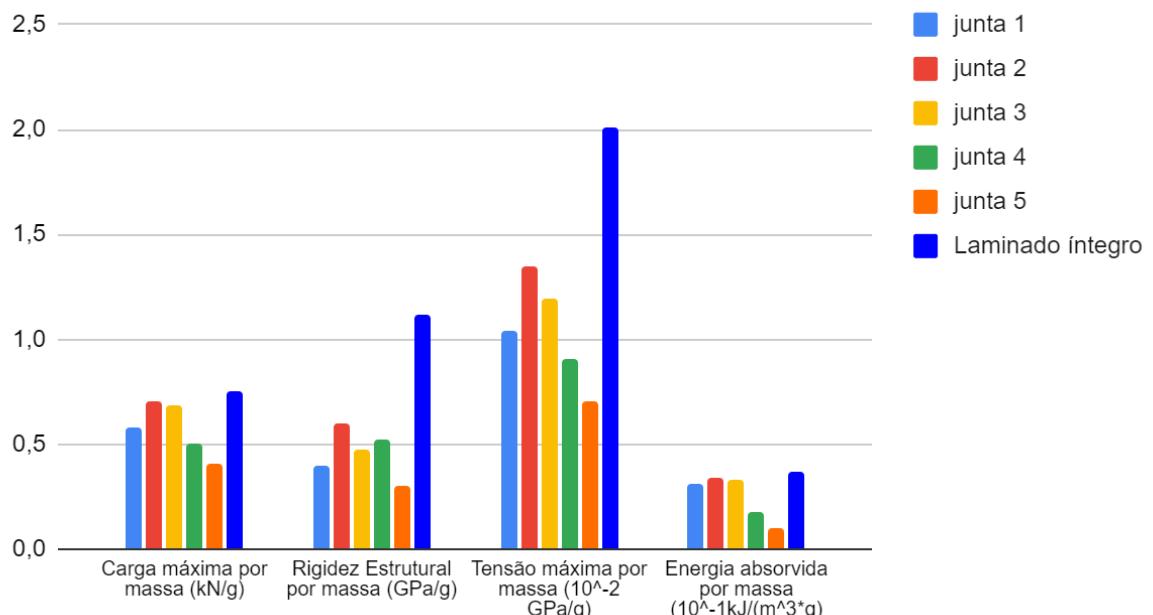
	Carga máxima por massa (kN/g)	Rrigidez estrutural por massa (GPa/g)	Tensão máxima por massa (MPa/g)	Energia absorvida por massa (kJ/(m ³ *g))
junta 1- Sobreposta curta	0,576	0,402	10,403	0,307
junta 2- Intercalada	0,707	0,596	13,491	0,344
junta 3- Escada simples	0,681	0,476	11,963	0,327
junta 4- Escada dupla	0,503	0,527	9,055	0,179
junta 5- Sobreposta comprida	0,408	0,306	7,081	0,099
Laminado íntegro	0,757	1,114	20,114	0,369

Fonte: Autoral

E para fazer uma análise comparativa entre todas as juntas, o gráfico 11 foi feito, utilizando unidades não usuais no sistema internacional para melhor visualização.

Gráfico 11 – Dados de Carga Máxima, Rrigidez Estrutural, Tensão Máxima e Tenacidade de Carga Máxima, todos em relação à massa, suportadas por cada uma das amostras ensaiadas.

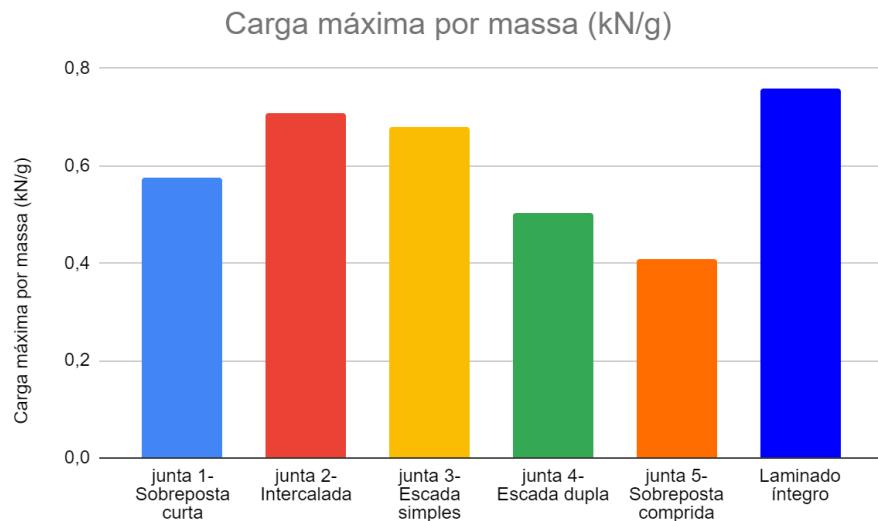
Comparativo dos laminados em relação a massa



Fonte: Autoral

E as comparações também foram feitas de modo individual.

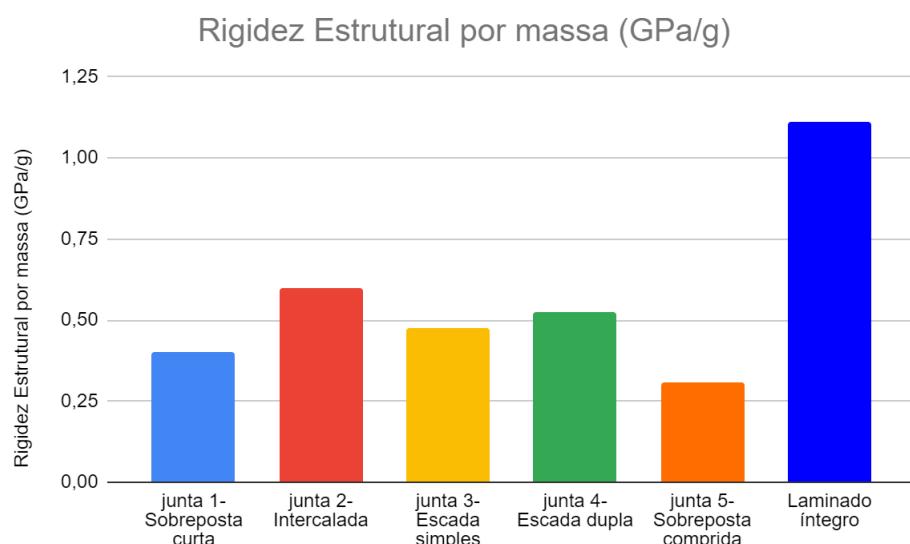
Gráfico 12 – Dados de Carga Máxima em relação à massa, suportados por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que suportou uma maior carga em relação à massa foi o laminado íntegro, e em segundo lugar, a junta 2 (intercalada).

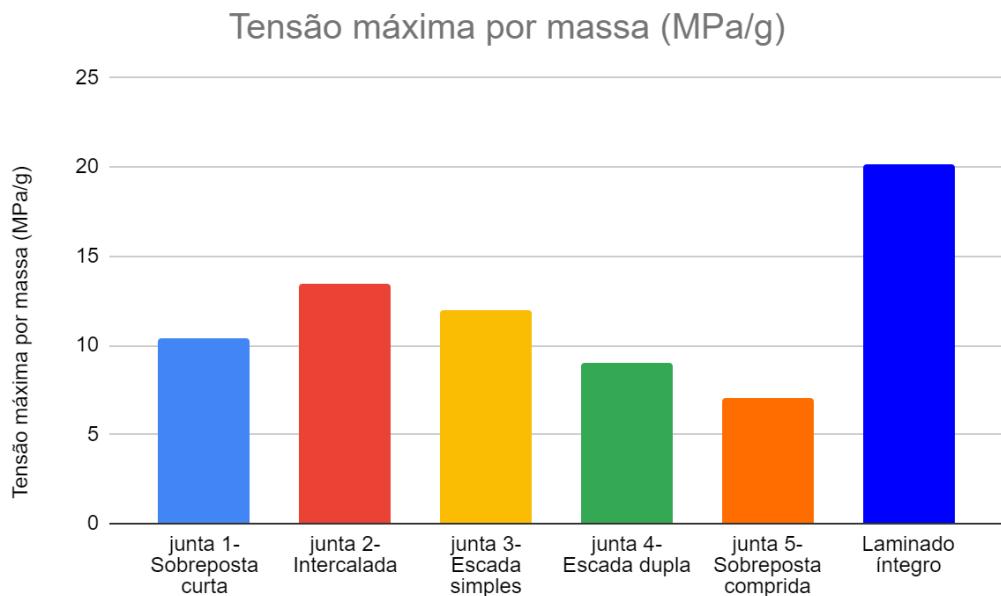
Gráfico 13 – Dados de Rígidez Estrutural em relação à massa, suportadas por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que teve uma maior rigidez estrutural em relação à massa foi o laminado íntegro, e em segundo lugar, a junta 2 (intercalada).

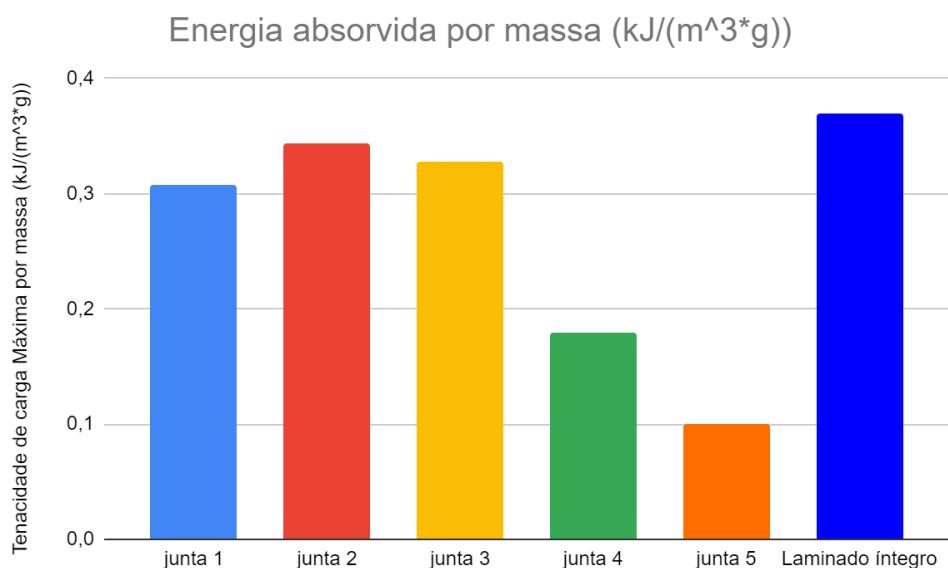
Gráfico 14 – Dados de Tensão Máxima em relação à massa, suportados por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que teve tensão máxima em relação à massa maior foi o laminado íntegro, e em segundo lugar, a junta 2 (intercalada).

Gráfico 15 – Dados de Tenacidade de Carga Máxima em relação à massa, suportados por cada uma das amostras ensaiadas.



Fonte: Autoral

O laminado que teve uma maior tenacidade de carga máxima em relação a massa foi o laminado íntegro, e em segundo lugar, a junta 2 (intercalada).

Outro tratamento de dados abordado foi dividir os resultados de cada uma das juntas pelo resultado do laminado inteiriço, que foi o laminado controle, como pode-se ver na tabela 4 e no gráfico 16.

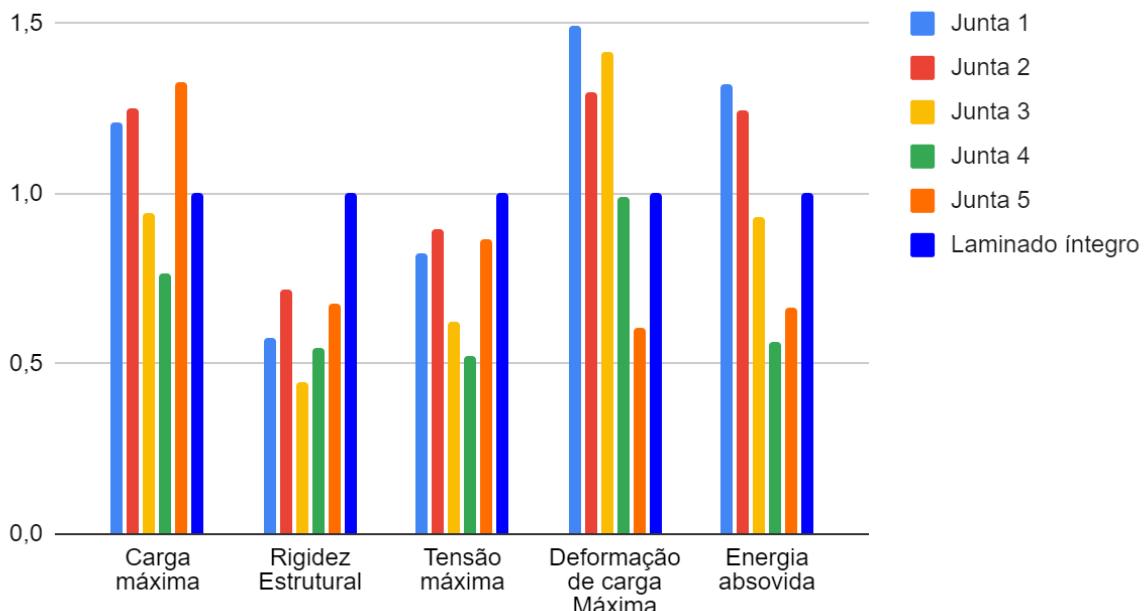
Tabela 4 – Dados de Carga Máxima, Rigidez Estrutural, Tensão Máxima, Deformação de Carga Máxima e Tenacidade de Carga Máxima suportadas por cada uma das amostras ensaiadas, normalizados pelo laminado inteiriço.

	Carga máxima	Rigidez Estrutural	Tensão máxima	Deformação de carga Máxima	Energia absorvida
junta 1- Sobreposta curta	1,211	0,575	0,824	1,494	1,325
junta 2- Intercalada	1,248	0,716	0,897	1,296	1,244
junta 3- Escada simples	0,943	0,449	0,624	1,418	0,929
junta 4- Escada dupla	0,767	0,546	0,521	0,993	0,562
junta 5- Sobreposta comprida	1,329	0,678	0,869	0,604	0,664
Laminado íntegro	1	1	1	1	1

Fonte: Autoral

Gráfico 16 – Dados de Carga Máxima, Rigidez Estrutural, Tensão Máxima, Deformação de Carga Máxima e Tenacidade de Carga Máxima suportadas por cada uma das amostras ensaiadas, normalizados pelo laminado íntegro.

Razão das juntas pelo laminado íntegro



Fonte: Autoral

De modo geral, é possível ver a partir do gráfico 16 que as juntas 1 (sobreposta curta), 2 (intercalada) e 5 (sobreposta comprida) obtiveram uma carga máxima superior. Também é possível ver que em questão de rigidez estrutural e tensão máxima, o laminado íntegro ganha em resultados, seguido pela junta 2 (intercalada) e depois pela junta 5 (sobreposta comprida). Em relação à deformação de carga máxima, o melhor resultado foi o da junta 1 (sobreposta simples), e em seguida, a junta 3 (escada simples), e depois a junta 2 (intercalada). E em relação aos resultados de tenacidade de carga máxima, o melhor resultado é o da junta 1 (sobreposta simples), seguido da junta 2 (intercalada), e em sequência o laminado íntegro.

A próxima análise de dados abordado foi dividir os resultados de cada uma das juntas pelo resultado do laminado inteiriço, que foi o laminado controle, em relação às suas massas. Os dados obtidos encontram-se na tabela 5 e no gráfico 17.

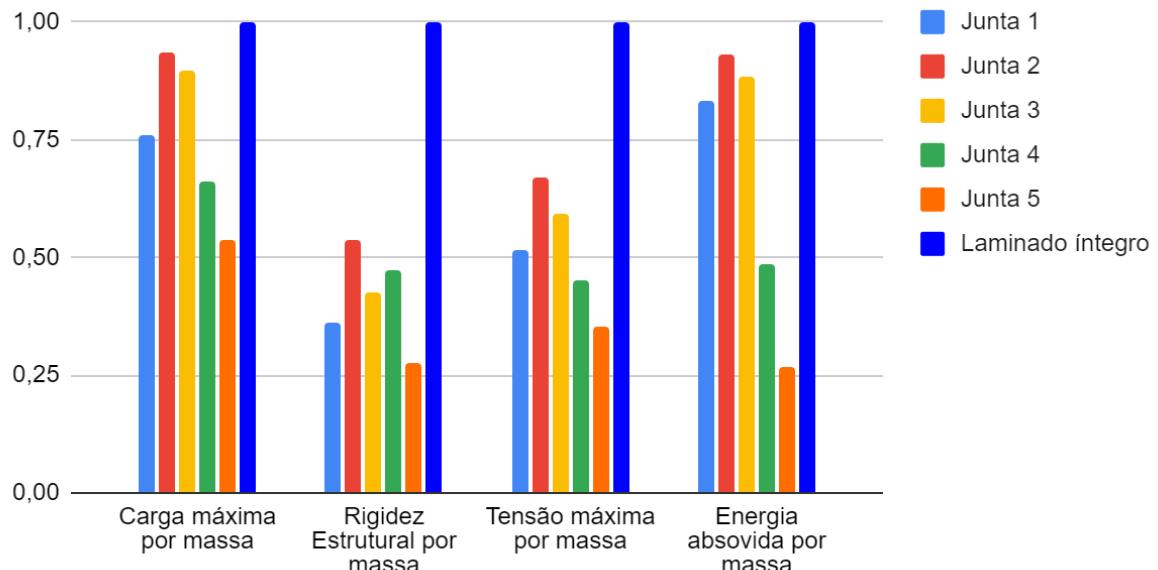
Tabela 5 – Dados de Carga Máxima, Rigidez Estrutural, Tensão Máxima e Tenacidade de Carga Máxima, em relação à massa, suportadas por cada uma das amostras ensaiadas, normalizados pelo laminado inteiriço.

	Carga máxima por massa	Rigidez Estrutural	Tensão máxima por massa	Tenacidade de carga Máxima por massa
junta 1- Sobreposta curta	0,760	0,361	0,517	0,831
junta 2- Intercalada	0,934	0,536	0,671	0,930
junta 3- Escada simples	0,899	0,428	0,595	0,885
junta 4- Escada dupla	0,663	0,472	0,450	0,486
junta 5- Sobreposta comprida	0,528	0,275	0,352	0,269
Laminado íntegro	1	1	1	1

Fonte: Autoral

Gráfico 17 – Dados de Carga Máxima, Rigidez Estrutural, Tensão Máxima e Tenacidade de Carga Máxima, em relação à massa, suportadas por cada uma das amostras ensaiadas, normalizados pelo laminado inteiriço.

Relação das juntas pelo o laminado íntegro em relação a massa



Fonte: Autoral

De modo geral, é possível ver a partir do gráfico 17 que o laminado íntegro tem os melhores resultados. O laminado íntegro supera os outros em grande quantidade por ser mais leve, e consequentemente, mais eficiente. A junta 2 (intercalada) obteve uma carga máxima por massa, rigidez estrutural por massa, tensão máxima por massa e tenacidade de carga máxima por massa superior às outras, só abaixo do laminado íntegro.

Ao juntar os dados obtidos de todo o estudo, fez-se uma análise, resumida a seguir. Conforme ilustrado no gráfico 1, os laminados que suportaram, ao serem ensaiados, uma maior carga por deslocamento foram a juntas 5 (sobreposta comprida), 2 (intercalada), 1 (sobreposta curta), e o laminado íntegro, consecutivamente. Isso afeta diretamente os resultados de tensão e deformação expressos no gráfico 3 (escada simples), sendo que o laminado íntegro e a junta 2 (intercalada) apresentam os melhores resultados, seguidos pela junta 5 (sobreposta comprida) e depois pela junta 1 (sobreposta curta), e os piores resultados estão com a junta 4 (escada dupla) e 3 (escada simples), respectivamente. Ao analisar esses mesmos resultados em relação às massas, os desempenhos mudam, principalmente das juntas 1 (sobreposta curta) e da 5 (sobreposta comprida). Seus desempenhos caem devido a alta massa, prejudicando os resultados.

Conforme ilustrado nos gráficos 5 à 10, as propriedades mecânicas do laminado íntegro superam as demais em Rigidez Estrutural, e em Tensão Máxima. O segundo lugar, em ambas as propriedades, é da junta 2 (intercalada), e em seguida, vem a junta 5 (sobreposta comprida) com melhores desempenhos.

Quanto à carga máxima suportada pelas juntas, observa-se que o laminado íntegro é superado pelas juntas 5 (sobreposta comprida), 2 (intercalada) e 1 (sobreposta curta), respectivamente, de forma que estas juntas suportarão maior carregamento em serviço (como por exemplo, em uma aeronave isso é muito importante). Destaca-se a junta 5 (sobreposta comprida), por ser a mais pesada dentre todas devido ao excesso de resina acumulada na manufatura por infusão, e também maior quantidade de tecido de fibras de vidro, fruto de aspectos geométricos e dimensionais da junta.

Em relação à Deformação de Carga Máxima, os maiores valores são da junta 1 (sobreposta curta) junta 3 (escada simples) e depois da junta 2 (intercalada). O laminado íntegro e a junta 4 (escada dupla) estão quase equiparados, e o resultado mais baixo é da junta 5 (sobreposta comprida).

Com relação à Tenacidade de carga máxima, os melhores resultados são da junta 1 (sobreposta curta), depois da junta 2 (intercalada), em seguida vem o laminado íntegro. Como a tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e deformar sem fraturar, esses dados podem, ou não, ser uma vantagem, a depender do uso planejado para a junta, por exemplo, se for importante que haja deformação para absorver energia mecânica.

A juntas 1 (sobreposta curta), que possui geometria idêntica à 5 (sobreposta comprida), porém com área de contato para cisalhamento menor que a metade, consequentemente menos resina, e menos tecido, ou seja, menos peso. A junta 2 (intercalada) é mais avançada tecnologicamente, exibe idêntica área de contato cisalhante que a junta 5 (sobreposta comprida), com um peso menor devido ao uso de menos resina e menos tecido. Ambas as juntas 1 (sobreposta curta) e 2 (intercalada) competem pelo desempenho máximo com a junta 5 (sobreposta comprida), mas obtêm esses resultados de modo mais eficiente.

Ao se pensar em uma união entre partes (junta) que será introduzida numa estrutura que tenha de sustentar elevados níveis de carregamento estático, conclui-se que, certamente a junta 2 (intercalada) seria a melhor opção, seguida pela junta 1 (sobreposta curta) que possui a menor área de contato cisalhante dentre todas, exatamente 45%. Os resultados mostram que a junta 3 (escada simples) seria uma escolha ruim, seguido da junta 4 (escada dupla) como a pior escolha.

Pensar na massa da junta como critério fundamental de projeto e tomada de decisões em relação às juntas é essencial, o que pode ser visto no dia a dia de uma empresa que se importa por economia e por maior eficiência com menores custos. Tais ações estão muito presentes na fabricação de estruturas aeronáuticas, utilizando-se o termo “eficiência estrutural da junta”. Ao estudar o desempenho das juntas em relação à massa, os gráficos 11 a 15, em especial o gráfico 11 revela que a junta 2 (intercalada) é a melhor solução, e na sequência, viria a junta 3, seguida da junta 1 (sobreposta curta). Porém, a junta 3 (escada simples) peca bastante no quesito de tenacidade, devido a uma grande área de contato de cisalhamento praticamente contínua; já que a sua configuração espacial de área é a que mais se aproxima da junta 5 (sobreposta comprida), que é o laminado que mais apresentou esse problema devido à grande área contínua de contato cisalhante. A junta 5 (sobreposta comprida) apresenta os piores resultados devido à elevada massa, que prejudica suas propriedades e em penúltimo lugar se encontra a junta 4 (escada dupla). É importante ressaltar que, nesta comparação entre desempenhos específicos por unidade de massa, o desempenho do laminado íntegro é insuperável frente a todas as juntas avaliadas.

Ao se usar o laminado inteiriço como controle de pesquisa, e normalizar todos os valores das outras juntas pelo laminado inteiriço, tem-se os dados expostos nos gráficos 16 e 17. As juntas 5 (sobreposta comprida), 2 (intercalada) e 1 (sobreposta curta), apresentam os melhores resultados. Focando na análise do gráfico 17, os melhores resultados são do laminado inteiriço e da junta 2 (intercalada), sequenciados pela junta 3 (escada simples), ao se enfatizar a massa como um dado importante ao futuro uso do laminado.

Portanto, das geometrias estudadas, a que apresentou melhores resultados é a Junta 2 (intercalada). Nota-se a necessidade de continuar os estudos sobre tal junta, variando alguns elementos. É importante a construção e o ensaio de mais de um corpo de prova de mesma geometria e ensaiá-los, para estudar variação de comportamento. É interessante o estudo da mesma geometria de junta, intercalada, mas com algumas variações de construção. Diferentes tamanhos de juntas (sobreposição dos tecidos), podem ser estudados, variando a área de contato, e assim se estudar a menor área de contato viável, gerando economia de material e redução de massa. Também é interessante a realização de outros tipos de ensaios destrutivos, como por exemplo ensaio de Compressão, de Cisalhamento, Torção; para se determinar a melhor maneira de construção de juntas compósitas que atendam às necessidades do mercado aeroespacial. Esse tipo de estudo ajuda a determinar a resistência e estimar a durabilidade, evitando falhas e possíveis acidentes.

4 CONCLUSÃO

Na seção a seguir, serão elencadas as principais constatações derivadas dos resultados alcançados neste Trabalho de Conclusão de Curso, bem como experiências obtidas durante o desenvolvimento.

1. Quanto aos resultados obtidos, é interessante destacar os seguintes pontos:

(I) Os materiais estudados nesta pesquisa são de potencial aplicação no projeto e manufatura de estruturas leves de engenharia, confeccionadas com materiais compósitos de matriz polimérica e fibras contínuas de reforço. Tais materiais possuem propriedades de interesse em projetos, como alta resistência específica, rigidez, leveza e bom desempenho em termos de propriedades mecânicas. Essas características os tornam ideais para aplicações que exigem redução de peso sem comprometer a resistência e a segurança das estruturas. Nas indústrias aeroespacial e automobilística, essas propriedades são vantajosas e resultam em veículos mais leves e com maior eficiência energética.

(II) Apesar de ainda relativamente pouco estudada cientificamente, a geometria de junta intercalada (junta 2- *interspersed*) demonstrou cabalmente possuir uma eficiência estrutural, em termos das propriedades mais importantes na área de construção mecânica (resistência e rigidez em tração), superior às das juntas concorrentes, mais tradicionais. É importante ressaltar que mais estudos são necessários para explorar as propriedades e vantagens da junta intercalada.

(III) É importante ressaltar que este estudo foi feito com apenas um corpo de prova de cada uma das geometrias. Para resultados mais precisos, seria necessário dar continuidade a este mesmo estudo, com realização de pelo menos cinco corpos de prova de mesma geometria, compará-los entre si, e posteriormente, compará-los com as outras geometrias. Também foi possível verificar, principalmente nos resultados e tipos de falhas ocorridas, a ação do momento secundário causado pelo desalinhamento das linhas de força, principalmente nas juntas 1(sobreposta curta) e 5 (sobreposta comprida). Para próximos ensaios, o ideal é que apenas dois dos tablets de alumínio sejam colados, de modo a compensar o desalinhamento e centralizar as linhas de força.

(IV) Sugere-se um investimento em estudos futuros focados na otimização desta configuração de junta, de modo a explorar ao máximo seu potencial de desempenho específico por unidade de massa. A resistência e rigidez da junta são uma função direta de sua massa, já que o comprimento de sobreposição das camadas de tecido de reforço contribui simultaneamente para o incremento da resistência, da rigidez e de seu peso. Por isso, a

determinação da mínima massa (mínimo comprimento de sobreposição) para resistir ao esforço aplicado em serviço, que automaticamente incrementa sua eficiência estrutural, é indicado. Isso implica em encontrar o equilíbrio ideal entre o comprimento de sobreposição das camadas de tecido de reforço, a resistência, a rigidez e o peso da junta, e assim determinar a mínima massa necessária para que a junta resista às cargas aplicadas, visando alcançar a máxima eficiência estrutural; de acordo com o uso planejado.

(IV) O emprego desta geometria de junta contribuiria significativamente para a indústria relacionada à mobilidade, seja terrestre ou aérea, com reflexos econômicos, sociais e ambientais ao país. Ao reduzir a massa, há uma redução no consumo de combustível, proporcionando maior autonomia do veículo. Há compensação da redução de peso em relação a um maior espaço interno, pois uma das preocupações ao reduzir o peso dos veículos é manter o espaço interno e o conforto para os ocupantes. Como o peso será reduzido na carenagem do veículo, o espaço interno não será reduzido. Há também menor poluição por unidade de deslocamento, por se reduzir a emissão de gases poluentes provindos do combustível. Outros ganhos estão relacionados aos relativamente baixos custos de produção, à rapidez e à facilidade de fabricação pela técnica de co-infusão à vácuo. Isso gera uma economia de recursos financeiros tanto para os usuários dos veículos quanto para os fabricantes, ou seja, as indústrias automotiva e aeronáutica.

2. Quanto ao valor agregado referente a este trabalho de conclusão de curso à formação da aluna, é interessante destacar os seguintes pontos:

(I) Ao se estudar materiais compósitos, alinharam-se os três campos principais de um engenheiro de materiais, os polímeros, metais e cerâmicos, pois pode-se trabalhar com matriz polimérica, como no caso deste trabalho, e materiais de reforço cerâmicos (como é o caso das fibras de vidro usadas nesta pesquisa), poliméricos ou até metálicos. O comportamento mecânico é uma mescla dos materiais usados, unindo as melhores propriedades de cada um deles, como alta resistência mecânica, baixo peso e boa qualidade estrutural. O estudo e visitação de conteúdos de antigas disciplinas referentes a cada área de conhecimento do saber foram necessárias. O desenvolvimento, fabricação, estudo e análise de materiais compósitos, mais especificamente das juntas de fibra de vidro com matriz epóxi, também reforçaram a melhor maneira de se trabalhar em laboratório, organização em relação ao estudo, escolher quais metodologias seguir e alternativas caso uma não desse certo. Grandes ensinamentos sobre trabalho em equipe e união foram agregados, e quando um grupo trabalha unido, as ideias são melhores e o trabalho é menos árduo.

(II) O desenvolvimento deste trabalho trouxe grandes ganhos em relação à bagagem científica. A área de materiais compósitos é muito extensa, e pouco estudada ainda, tendo muita amplitude de futuros trabalhos. Relacionado a este estudo, ainda podem ser desenvolvidas muitas pesquisas para se determinar melhor geometria da junta, área ideal de contato, em relação à massa, para deixar a junta mais eficiente. Ensinou também que o trabalho de pesquisadores é árduo, exige muito conhecimento, dedicação, seja em desenvolvimento de amostras, ou em análise de resultados, pesquisas em referências bibliográficas.

(III) O tema estudado neste trabalho de conclusão de curso é amplo e permite futuros estudos, como já mencionado. Tal fato oferece a oportunidade de desenvolver uma tese de mestrado, e futuramente, de doutorado, em relação a ele. Também abre possibilidades de trabalhos em empresas e indústrias de ponta, que prezam por tecnologia em suas fabricações e investem em profissionais altamente qualificados, devido a experiência prática em manufaturas de materiais compósitos, especialmente em relação à infusão de resina líquida assistida à vácuo, e a escolha e desenvolvimento de métodos de união eficientes em compósitos e outros materiais.

REFERÊNCIAS

ABUSREA, M. R.; ARAKAWA, K. Improvement of an adhesive joint constructed from carbon fiber-reinforced plastic and dry carbon fiber laminates. **Composites Part B: engineering**, v. 97, p. 368-373, 2016.

ABUSREA, M. R.; JIANG, S.; CHEN, D.; ARAKAWA, K. Novel CFRP adhesive joints and structures for offshore application. **International Journal of Materials and Metallurgical Engineering**, v. 9, p. 1176-1179, 2015.

ASADI, A.; ABUSREA, M. R.; ARAKAWA, K.; COLTON, J.; KALAITZIDOU, K. A Comparison of CFRP composite laminated joints fabricated with vacuum assisted resin transfer molding. **Express Polymer Letters**, v. 12, p. 781-789, 2018.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9thed. New York: John Wiley, 2013.

HINDERSMANN, A. Confusion about infusion: an overview of infusion processes. **Composites Part A: applied Science and manufacturing**, v. 126, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105583>.

MARCHEZIN, E.; PARDINI, L.C.; GUIMARÃES, V.A. Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi. **Matéria**, v. 17, n. 1, p. 889-900, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000100002>.

OXYBLACK: creating through composites. **Placas de fibra de carbono**. 2017. Disponível em: <https://www.oxyblack.com/index.php/pt/produtos-e-servicos/placas-fibra-de-carbono>. Acesso em: 02 abr. 2023.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O Uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 10, n. 2, p. E4-E10, jun. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/Sp5xW8K4WctGhyppz5Fhbmb/?lang=pt>. Acesso em: 04 abr. 2023.

VERMA, K. K.; VISWARUPACHARI, C. H.; VISWAMURTHY, S. R.; GADDIKERI, K. M.; KUMAR, S.; BOSE, S. Effect of tufting on mechanical performance of co-cured co-infused carbon epoxy composite T-joint. **Composite Structures**, v. 250, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112468>.