

JULIANO DE NEGREIROS BARJUD

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE INSERTOS CERÂMICOS EM MATERIAIS
COMPÓSITOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

JULIANO DE NEGREIROS BARJUD

Orientador

Prof. Dr. GIULIANO VENSON

Avaliação numérica e experimental de insertos cerâmicos em materiais compósitos

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL em ENGENHARIA AERONÁUTICA**.

UBERLÂNDIA - MG

2023

Avaliação numérica e experimental de insertos cerâmicos em materiais compósitos

Projeto de conclusão de curso **APROVADO** pelo
Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia
Aeronáutica da Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Giuliano Gardolinski Venson
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA - MG

2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha gratidão aos meus supervisores no leibniz-institut für polymerforschung (Dresden, Alemanha), o Professor Dr. Axel Spickenheuer e o Dr. Tales de Vargas Lisboa, pela confiança que depositaram em mim para desenvolver o tema deste estágio, pela paciência, entusiasmo, motivação e disposição para ensinar com os quais tive contato quase diariamente.

Também gostaria de agradecer aos meus colegas do instituto, Sr. Simon Konze, Sra. Nicole Schmidt, Sr. Sacha Bruk, Sr. Cameron Welker, Sr. Moritz Kurkowski, Dr. Lars Bittrich e Dr. Eduardo Antônio Wink de Menezes, sem os quais eu não teria sido capaz de fazer tudo o que fiz.

Agradeço também aos meus amigos Sr. Fábio Fonseca, Sr. Leonardo Gonçalves Chiquita e Sr. Carlos Eduardo Espírito Santo Magalhães por seu estímulo e comentários importantes.

E, finalmente, agradeço à minha família, que mesmo de longe me encoraja e torce pelo meu sucesso.

BARJUD, J. N. **Numerical and Experimental evaluation of ceramic inserts in composites.** 2023. 42p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

ABSTRACT

This paper aims to determine the pros and cons of using ceramic inserts on carbon fibre-reinforced plastics (CFRP) components with respect to thermal and mechanical behavior. It is well known that, for such applications, the difference between the coefficient of expansion of the CFRP part and the metallic insert generates thermal stresses that can reduce the lifespan of these components due to fatigue and/or introduce local failures that reduce the efficiency of load introduction points. Furthermore, metallic inserts are susceptible to electrochemical corrosion when in contact with CFRP parts. Since ceramic materials are inert to this effect and have a similar coefficient of expansion to CFRP components, an evaluation of the mechanical behavior of ceramic inserts is proposed under mechanical and thermal loading. A bolt-joint insert is proposed, and alumina, steel, aluminum, and titanium inserts were produced. Simple geometry was proposed and comparative analyses, both numerical and experimental, were performed. Key results have shown that the performance of alumina inserts was better than the metallic ones under both high and low temperatures. Good agreement was found between the numerical and experimental approaches.

KEYWORDS: *Bolt joints in composites, Ceramic inserts, Metallic inserts, Thermal stresses, Inserts niche application.*

HIGHLIGHTS:

- *Comparison of thermal behavior of ceramic and metallic inserts.*
- *Avoidance of electrochemical corrosion of CFRP parts by using ceramic inserts.*
- *Numerical and experimental evaluation of the behavior of ceramic and metallic inserts under mechanical loading.*
- *Numerical and experimental evaluation of the behavior of ceramic and metallic inserts under thermal loading.*

BARJUD J. N. **Avaliação numérica e experimental de insertos cerâmicos em materiais compósitos**. 2023. 42p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

Este artigo tem como objetivo determinar os prós e os contras do uso de insertos de cerâmica em componentes de plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP) com relação ao comportamento térmico e mecânico. Sabe-se que, para essas aplicações, a diferença entre o coeficiente de expansão da peça de CFRP e o inserto metálico gera tensões térmicas que podem reduzir a vida útil desses componentes devido à fadiga e/ou introduzir falhas locais que reduzem a eficiência dos pontos de introdução de carga. Além disso, os insertos metálicos são suscetíveis à corrosão eletroquímica quando em contato com peças de CFRP. Como os materiais cerâmicos são inertes a esse efeito e têm um coeficiente de expansão semelhante ao dos componentes de CFRP, propõe-se uma avaliação do comportamento mecânico dos insertos cerâmicos sob carga mecânica e térmica. Foi proposto um inserto de junta de parafuso e foram produzidos insertos de alumina, aço, alumínio e titânio. Foi proposta uma geometria simples e foram realizadas análises comparativas, tanto numéricas quanto experimentais. Os principais resultados mostraram que o desempenho das pastilhas de alumina foi melhor do que o das metálicas, tanto em altas quanto em baixas temperaturas. Foi encontrada uma boa concordância entre as abordagens numérica e experimental.

PALAVRAS-CHAVE: *Juntas de parafusos em compósitos, insertos de cerâmica, insertos metálicos, tensões térmicas, aplicação de nicho de insertos.*

DESTAQUES:

- *Comparação do comportamento térmico de insertos cerâmicos e metálicos.*
- *Prevenção da corrosão eletroquímica de peças de CFRP com o uso de insertos de cerâmica.*
- *Avaliação numérica e experimental do comportamento de insertos cerâmicos e metálicos sob carga mecânica.*
- *Avaliação numérica e experimental do comportamento de insertos cerâmicos e metálicos sob carga térmica.*

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos deste trabalho	11
1.2	Conteúdo deste relatório.....	11
2	CONTEXTO	13
2.1	Posicionamento do assunto	13
2.2	Revisão do estado da arte	13
3	METODOLOGIA.....	16
3.1	Preparação de Pré-formas de Compósitos Têxteis	16
3.1.1	Colocação de Fibra Sob Medida (TFP)	16
3.2	Processos de Infiltração da Matriz	17
3.2.1	Molde Híbrido de Infusão.....	17
3.2.2	Processo Assistido a Vácuo (VAP)	19
3.3	Dimensionamento dos Espécimes.....	22
3.3.1	Comprimento, largura e espessura.....	22
3.3.2	Composição, tipo de fibra e resina epóxi	23
3.4	Simulação Numérica no Ansys Workbench	23
3.4.1	Parâmetros do Ansys Workbench.....	23
3.4.2	Propriedades dos Materiais.....	24
3.4.3	Contato	25
3.4.4	Malha.....	26
3.4.5	Condições de contorno do teste de expansão térmica	26
3.4.6	Condições de contorno do teste de aplicação de carga de rolamento	26
3.4.7	Condições de contorno do teste de aplicação de carga de expansão térmica e rolamento	26
3.5	Metodologia de testes experimentais.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Análise de Raios-X CT de Infiltração	28
4.2	Insertos Cerâmicos e Metálicos.....	28
4.3	Resultados da fabricação de placas e espécimes VAP	29
4.4	Resultados da simulação numérica	31
4.5	Demonstração de inserto cerâmico - A479 20F	31
4.6	Demonstração de inserto metálico - S18F.....	33
4.7	Resultados da análise de expansão térmica e carga de rolamento.....	34
5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	43
5.1	Conclusões.....	43
5.1.1	Geometria dos insertos e processo de fabricação dos compósitos	43

5.1.2 Simulações numéricas no Ansys Workbench 2021	43
5.2 Trabalhos futuros.....	44
REFERÊNCIAS	45

Lista de figuras

Figura 1 Princípio TFP	16
Figura 2 Máquina TFP	16
Figura 3 Pré-forma de carbono produzida com a máquina TFP	17
Figura 4 Design SolidWorks de: (a) Molde flexível inferior; (b) Molde flexível superior; (c) Molde rígido superior	17
Figura 5 Design de Cavidade SolidWorks de: (a) Molde inferior; (b) Molde superior	18
Figura 6 Processo de Aplicação de Acetona	18
Figura 7 Duas partes impressas do contramolde e parte superior rígida do molde	18
Figura 8 (a) Molde de silicone inferior; (b) Molde de silicone superior; (c) Molde superior rígido	19
Figura 9 Molde híbrido superior.....	19
Figura 10 (a) Etanol; (b) Selante e desmoldante para molde; (c) Fita adesiva	20
Figura 11 (a) Molde flexível pronto para a infusão com insertos metálicos e cerâmicos; (b) Tecido de fibra de vidro com revestimento de teflon; (c) Auxiliar de fluxo.....	20
Figura 12 (a) Membrana de VAP; (b) Bolsa a vácuo completa (c) peso acima da bolsa a vácuo.....	21
Figura 13 Geometria dos insertos: (a) 1,8 mm plano (b) 2 mm plano (c) 2 mm ondulado.....	22
Figura 14 Propriedades do CFRP	24
Figura 15 Exemplo da área de contato 3 (Contato entre a parte inferior e a superior do inserto).....	25
Figura 16 Malha da CFRP.....	26
Figura 17 Malha do inserto.....	26
Figura 18 Rótulo da amostra para testes experimentais.....	27
Figura 19 Raios-X CT de um inserto plástico ABS ondulado de 2 mm.....	28
Figura 20 Insertos Metálicos: (a) A18F (b) T18F (c) S20W (d) S20W fechado.....	29
Figura 21 Insertos Cerâmicos: (a) C20F (b) C20W com escala (c) C18F e S18F.....	29
Figura 22 Três placas com insertos metálicos e cerâmicos.....	29
Figura 23 Espécimes cortados: (a) com insertos de alumínio (b) com insertos de aço (c) com insertos de titânio (d) com insertos cerâmicos	30
Figura 24 Espécimes cortados: (a) com insertos 18F (b) com insertos 20F (c) com insertos 20W.....	30
Figura 25 Resultados de tensão normal na direção das fibras para A479 20F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.....	31
Figura 26 Resultados de tensão normal perpendicular à direção das fibras para A479 20F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.....	32
Figura 27 Resultados de tensão de cisalhamento para A479 20F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.....	32
Figura 28 Resultados de tensão de cisalhamento máxima para A479 20F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.....	32
Figura 29 Resultados de Tensão Normal na Direção da Fibra S18F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.....	33
Figura 30 Resultados de tensão normal perpendicular à direção da fibra S18F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultados de expansão térmica e carga de rolamento.....	33
Figura 31 Resultados de tensão de cisalhamento A479 20F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultados de expansão térmica e carga de rolamento.....	34

Figura 32 Resultados de tensão equivalente (Von Mises) S18F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.....	34
Figura 33 Tensão normal na direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) A471 18F (e) A479 18F (f) ZTA 18F.....	35
Figura 34 Tensão normal na direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) A471 20F (e) A479 20F (f) ZTA 20F.....	36
Figura 35 Tensão normal na direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) A471 20W (e) A479 20W (f) ZTA 20W.....	36
Figura 36 Tensão normal perpendicular à direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) A471 18F (e) A479 18F (f) ZTA 18F.	37
Figura 37 Tensão normal perpendicular à direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) A471 20F (e) A479 20F (f) ZTA 20F.	38
Figura 38 Tensão normal perpendicular à direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) A471 20W (e) A479 20W (f) ZTA 20W.	38
Figura 39 Tensão de cisalhamento após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) A471 18F (e) A479 18F (f) ZTA 18F.	39
Figura 40 Tensão de cisalhamento após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) A471 20F (e) A479 20F (f) ZTA 20F.	40
Figura 41 Tensão de cisalhamento após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) A471 20W (e) A479 20W (f) ZTA 20W (g) legenda total S12.	40
Figura 42 Tensão de cisalhamento máxima após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A471 18F (b) A479 18F (c) ZTA 18F (d) legenda total S12.	41
Figura 43 Tensão de cisalhamento máxima após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A471 20F (b) A479 20F (c) ZTA 20F (d) legenda total S12.	41
Figura 44 Resultados de tensão de cisalhamento máximo após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A471 20W (b) A479 20W (c) ZTA 20W (d) legenda total de Tresca.	41
Figura 45 Resultados de tensão equivalente após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) legenda total de Von Mises equivalente.	41
Figura 46 Resultados de tensão equivalente após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) legenda total de Von Mises equivalente.	42
Figura 47 Resultados de tensão equivalente após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) legenda total de Von Mises equivalente.	42

1 INTRODUÇÃO

O Leibniz-Institut für Polymerforschung (IPF) é um dos maiores institutos de pesquisa de polímeros na Alemanha. O IPF conduz pesquisas tanto básicas quanto aplicadas. Dessa forma, desenvolve conhecimento e tecnologia no campo dos polímeros. Suas atividades variam do estudo teórico e modelagem de polímeros à síntese e análise dos mesmos. Materiais biológicos e materiais com características estruturais estão sendo desenvolvidos, assim como pesquisas na área de sustentabilidade e meio ambiente.

Dentro do grupo Componentes Estruturais Complexos (KSK), um grupo de trabalho dentro do IPF, a equipe visa desenvolver novas abordagens para o eixo variável (VA), utilizando a tecnologia Tailored Fiber Placement (TFP) para otimizar as posições das fibras que atuam como reforço em materiais compósitos. A partir dessa otimização, é possível construir componentes estruturais leves com rigidez e resistência específicas elevadas.

Com a intenção de iniciar um estudo de insertos cerâmicos em polímeros reforçados com fibras de carbono para evitar problemas com corrosão eletroquímica com insertos metálicos, o grupo busca desenvolver a melhor geometria e o processo de fabricação que fornecerá os corpos de prova para realizar testes experimentais que, se bem-sucedidos, podem mostrar que a cerâmica é uma boa solução para os insertos em materiais compósitos de fibras de carbono. Assim, surgiu a oportunidade de realizar o trabalho descrito neste relatório.

1.1 Objetivos deste trabalho

- Melhor compreensão de materiais compósitos e como mudanças em sua composição afetam suas propriedades térmicas e mecânicas estáticas;
- Maior compreensão dos procedimentos de fabricação de compósitos, bem como ter contato com máquinas e ferramentas necessárias.
- Dimensões do corpo de prova, composição e quais materiais usar;
- Desenvolvimento de um procedimento para fabricação de corpos de prova compósitos feitos de polímeros reforçados com fibras de carbono com insertos cerâmicos e metálicos.
- Verificação do processo desenvolvido: geometria e propriedades mecânicas dos espécimes;
- Medição e análise experimental das tensões após uma expansão térmica e aplicação de carga de rolamento dentro do inserto;
- Realizar simulações numéricas de Elementos Finitos do espécime para obter mais informações sobre o comportamento do polímero reforçado com fibras de carbono com insertos.

1.2 Conteúdo deste relatório

Este trabalho consistiu na aquisição de "conhecimento teórico sobre compósitos", "dimensionamento de insertos cerâmicos e metálicos", "fabricação de corpos de prova", "sequências de testes experimentais" e "análise numérica de expansão térmica e carga de

rolamento (Bearing load) dentro do inserto". Estas etapas são descritas em detalhes nas seções abaixo: Metodologia, Resultados e Discussões.

Este relatório está dividido em:

- **Introdução:** Descreve um pouco sobre o instituto IPF e o grupo de trabalho. Também define os objetivos deste trabalho.
- **Contexto:** Descreve parte da importância e aplicação do estudo.
- **Metodologia:** Descreve toda a metodologia utilizada para realizar os experimentos, assim como todos os processos utilizados.
- **Resultados e Discussão:** Todos os resultados brutos obtidos são descritos aqui e, em seguida, esses resultados serão analisados e discutidos.
- **Conclusão e trabalhos futuros:** Descreve as principais conclusões obtidas durante este trabalho e oportunidades para pesquisas futuras nessa direção.

2 CONTEXTO

2.1 Posicionamento do assunto

Geralmente, as aplicações de compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) envolvendo insertos metálicos apresentam problemas de corrosão eletroquímica, levando a falhas e outros problemas que diminuem a vida útil da peça e aumentam os custos de manutenção. Assim, o desenvolvimento de insertos cerâmicos, que, apesar de serem mais frágeis, não reagem quimicamente com as fibras do compósito de alto desempenho e têm melhores respostas em aplicações de alta temperatura se torna interessante.

Esta melhoria pode impactar diversos setores, desde a indústria (reduzindo falhas e custos de manutenção) até o uso final do cidadão comum (aumentando a vida útil de produtos e ferramentas comuns). Portanto, em sistemas de engenharia avançados (como Vasos de Pressão de Acoplamento), o uso de insertos cerâmicos pode aumentar a vida útil de partes importantes no sistema de transporte de carga, principalmente associado à tecnologia implementada em TFP.

2.2 Revisão do estado da arte

O uso de compósitos de alto desempenho na indústria tem crescido rapidamente nos últimos anos. Os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) são particularmente populares como material leve, devido à sua alta rigidez específica e resistência. À medida que o CFRP é cada vez mais utilizado para fins industriais, novos desafios surgem com a integração entre peças para introdução de carga e/ou junções. Duas das abordagens mais aplicadas para lidar com esse problema são o uso de insertos metálicos por junção parafusada e por colagem adesiva [1–3]. O conceito de insertos em materiais compósitos está relacionado à necessidade de introdução de carga em regiões específicas, fixação ou conexão conjunta entre dois ou mais componentes [4]. Diante da baixa resistência ao cisalhamento do CFRP e de outros materiais compósitos, principalmente na direção fora do plano, as juntas são imperativas em várias aplicações para esses materiais [2, 3].

A junção por parafusos apresenta algumas vantagens em comparação com a colagem adesiva [4–7]: facilidade de montagem/desmontagem, substituição de peças, reparo, inspeção e certificação de navegabilidade; melhor tolerância a efeitos ambientais; e bem estabelecida para o design de compósitos. No entanto, essa solução tem duas desvantagens principais: a concentração de estresse no furo e os problemas decorrentes da perfuração do furo, o que reduz fortemente a capacidade de suporte de carga [8]. Além disso, para o CFRP, a diferença no potencial eletroquímico leva à corrosão anódica e, portanto, à perda de integridade e falha total da montagem [9].

Os principais modos de falha das juntas parafusadas, com foco no comportamento mecânico no contexto de materiais compósitos, são [1, 5, 8, 10]: suportar, tensão líquida, cisalhamento, clivagem e ruptura. O modo de falha depende fortemente da geometria do espécime e das direções das fibras [11]. Para evitar os modos de falha mencionados e a perda

de desempenho, algumas técnicas foram desenvolvidas para melhorar sua eficiência. Conforme apontado por Galinska [12], cinco delas têm resultados interessantes, onde duas estão no nível do inserto e as outras três estão no nível do CFRP.

Em relação ao nível do inserto, o uso de materiais metálicos colados ao laminado ao redor do furo e a adição local de folhas de titânio no laminado são técnicas projetadas para aumentar a eficiência de juntas parafusadas compósitas [5–7]. A primeira modifica a forma como a carga é transferida para o laminado: as tensões radiais devido ao contato do furo do parafuso são transferidas usando toda a superfície do furo para o compósito em vez de aproximadamente metade da superfície do furo [5, 13]. A segunda é a técnica baseada na substituição de algumas das camadas compostas por folha de titânio, resultando em um material com alta capacidade de suporte de carga, resistência ao cisalhamento, tensão entalhada e compressão na região híbrida, o que é indispensável para obter alta eficiência de junta parafusada [14–18]. Em relação aos compósitos CFRP, a rigidez e a resistência podem ser significativamente melhoradas com o direcionamento das fibras, combinando fibras e direções de carga [19, 20]. Em segundo lugar, a adição de reforços de partículas à resina leva a melhorias nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras [21]. A terceira consiste em evitar a perfuração de furos onde há fibras, tornando-as inativas em termos de suporte de carga. Isso pode ser alcançado com furos modulados, fabricados com o objetivo de alinhar as fibras de reforço ao redor dos furos antes de o compósito ser curado [22], por exemplo. O uso de Tailored Fiber Placement (TFP) [23–25] é uma abordagem alternativa devido à sua versatilidade em termos de colocação de fios em um pré-molde. Além disso, o uso de técnicas de otimização, como a Otimização Direta de Caminho de Fibra [26] ou outras [27–29], pode aumentar a capacidade de transferência de carga.

Apesar de seus benefícios, todas essas soluções se enquadram no mesmo problema principal: corrosão eletroquímica com CFRP, levando a comprometimento irreparável do sistema, redução da vida útil e desperdício de material. Uma abordagem possível para resolver esse problema é substituir o inserto metálico por um material inerte quando em contato com o CFRP. O uso de materiais cerâmicos em insertos interromperia a corrosão, tendo vantagens adicionais, como resistências químicas e térmicas, desempenho de desgaste e fadiga e isolamento elétrico, ao utilizar um material de baixa densidade [30].

Além disso, devido ao comportamento inerte de uma Combinação de Inseto Cerâmico (CI) e compósito CFRP, que garante um desempenho excepcional em manutenção não corrosiva de longo prazo com excelentes propriedades mecânicas, aspectos leves de alto desempenho pode ser melhorados [30]. As propriedades específicas de rigidez dos materiais CI visados superam os insertos metálicos atuais, e as tensões térmicas entre CI e CFRP são menos críticas. Além disso, as propriedades de condutividade térmica de CI (Al_2O_3) em comparação com os insertos à base de metal (liga de alumínio) permitirão a aplicação de insertos CI em áreas termicamente sensíveis onde são necessários requisitos de isolamento térmico elevado, por exemplo, recipientes de alta pressão criogênica [31]. Além disso, devido à alta dureza intrínseca de CI, podem ser esperadas excelentes propriedades tribológicas sob carga de fricção e repetição para elementos funcionais [32,33]. Ainda assim, os materiais

cerâmicos têm características frágeis, e o acoplamento CI/CFRP deve ser devidamente avaliado sob diferentes cargas/ambientes agressivos.

Este trabalho tem como objetivo fabricar os compósitos CFRP com os insertos de junção parafusada, conectando os processos de colocação de fibras baseadas em filamentos, Tailored Fiber Placement (TFP) [23–25], e as técnicas de Processo Assistido a Vácuo (VAP), e analisar experimental e numericamente os resultados dos modos de falha para três diferentes condições de contorno. Foram produzidos espécimes com insertos de junção parafusada metálicos (liga de alumínio, liga de aço e liga de titânio) e cerâmicos (Alumina Al₂O₃) com três geometrias diferentes de superfícies internas para determinar os prós e os contras do uso de insertos cerâmicos em compósitos de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) em relação ao comportamento térmico e mecânico. Para o CI, foram aplicadas técnicas de produção de ponta: tecnologias de manufatura aditiva e generativa, impressão 3D de cerâmica [34]. Com essas tecnologias, é possível obter mais liberdade no design de formas de CI e a exploração das propriedades anisotrópicas de CFRP para compósitos de alto desempenho.

3 METODOLOGIA

3.1 Preparação de Pré-formas de Compósitos Têxteis

3.1.1 Colocação de Fibra Sob Medida (TFP)

A Colocação de Fibra Sob Medida (Tailored Fiber Placement) é o nome dado ao processo desenvolvido em meados dos anos 90 no IPF Dresden [23–25], que consiste em definir a posição e orientação das fibras usadas como reforço em compósitos. Isso é feito costurando a fibra em um material base (Figura 1) usando uma máquina TFP (Figura 2), que é uma adaptação de uma máquina de bordado industrial. Esse processo permite a criação de componentes estruturais mais leves, mais baratos e completamente otimizados para uma determinada aplicação desejada, permitindo a criação de um material feito sob medida.

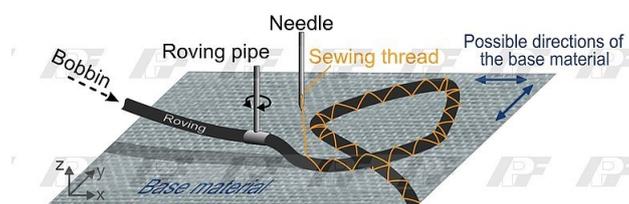


Figura 1 Princípio TFP



Figura 2 Máquina TFP

Para fabricar uma placa unidirecional, foram usadas duas pré-formas de fibra de carbono HT 12k unidimensionais como reforço, colocadas de forma que o material base para a costura (tecido de vidro) de ambas estivesse no centro do compósito, tornando o compósito simétrico.

O padrão que foi costurado pela máquina de costura TAJIMA foi criado primeiramente como um esboço no SolidWorks e depois convertido em um caminho de costura, que pode ser lido pela máquina, no software EDOpath. A aparência final de uma pré-forma da placa apenas com fibra de carbono HT 12k [0°] e material base é representada na Figura 3. Para a produção inicial desses espécimes, todas as fibras estão na mesma direção com [0°], uma vez que a ideia é fabricar os primeiros espécimes para melhorar a compreensão do comportamento desses

insertos. Círculos foram costurados para mostrar a posição correta para cortar as fibras manualmente antes da aplicação dos insertos nas pré-formas e do processo de infusão.



Figura 3 Pré-forma de carbono produzida com a máquina TFP

3.2 Processos de Infiltração da Matriz

Para a consolidação da pré-forma em um compósito, é necessário adicionar a matriz. Um processo de infiltração de resina, chamado Processo Assistido a Vácuo (VAP), foi utilizado para isso.

Uma boa solução para ter um melhor controle da geometria final da placa de plástico reforçado com fibra de carbono após a infusão foi usar um molde de silicone juntamente com uma estrutura rígida impressa em 3D que reduz a expansão do molde de silicone durante a infusão.

3.2.1 Molde Híbrido de Infusão

É difícil controlar a espessura da placa durante a infusão de resina porque durante o processo de VAP é impossível ver o que está acontecendo dentro da membrana de VAP e as irregularidades só poderiam ser vistas após a cura. Portanto, para evitar esses problemas, um molde híbrido foi desenvolvido com duas partes flexíveis de silicone e uma parte rígida de ABS impressa em 3D que passa por cima da parte flexível e mantém (com uma pequena tolerância) a forma e rigidez corretas da placa durante a infusão de resina.

Primeiro, um design 3D do molde no SolidWorks deve ser criado considerando a geometria exatamente desejada da placa CFRP após a infusão (Figura 4).

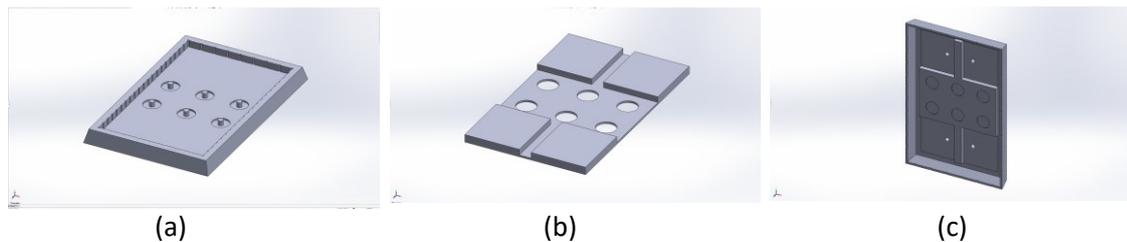


Figura 4 Design SolidWorks de: (a) Molde flexível inferior; (b) Molde flexível superior; (c) Molde rígido superior

Em seguida, as duas partes flexíveis do molde foram utilizadas com a Ferramenta de Cuidade, para produzir os contramoldes para a impressão 3D (Figura 5). Essas partes impressas em plástico serão usadas como molde para curar a resina de silicone no formato dos moldes desejados para a infusão.

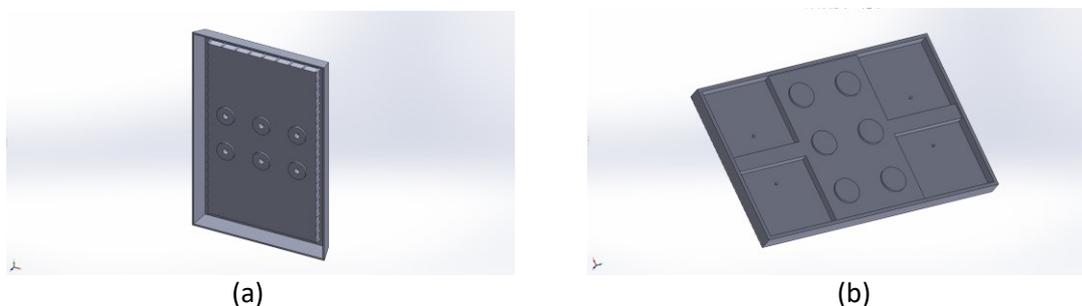


Figura 5 Design de Cuidade SolidWorks de: (a) Molde inferior; (b) Molde superior

Em seguida, é necessário lixar bem os moldes para remover as irregularidades devido à impressão 3D que às vezes apresenta uma hiper extrusão. Mesmo lixando com lixa de grão de 320 a 1000, a peça ainda não possui a qualidade necessária para colocar a resina de silicone para fazer os moldes que participarão da infusão. Portanto, antes deste passo, é necessário aplicar acetona (Figuras 6 e 7) no contramolde impresso para criar uma camada plana com menos imperfeições.



Figura 6 Processo de Aplicação de Acetona



Figura 7 Duas partes impressas do contramolde e parte superior rígida do molde

Depois, o volume das partes superiores e inferiores do molde foi analisado com as ferramentas de Avaliação do SolidWorks. Com esse valor em cm^3 , foi calculada a massa de resina de silicone que deve ser usada para a criação dos moldes a partir da densidade de $1,2 \text{ g/cm}^3$. Neste caso, a parte superior do molde precisava de 160 g e a parte inferior do molde precisava de 370 g de silicone. A mistura com a resina de silicone e o endurecedor deve ser feita em uma proporção de 1:1 em uma balança semi-analítica e depois misturada antes de ser derramada no contramolde. Para garantir que a parte inferior do molde ficasse plana, foi utilizada uma placa de plástico, juntamente com uma placa de metal, para pressionar o contramolde enquanto a resina de silicone estava secando. Após 12 horas, o molde de silicone estava pronto (Figura 8). E a parte superior rígida foi impressa com uma impressora 3D (Figura 8 (c)).

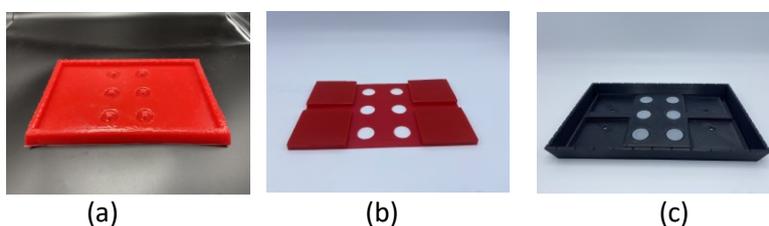


Figura 8 (a) Molde de silicone inferior; (b) Molde de silicone superior; (c) Molde superior rígido

Finalmente, foi possível ver o molde híbrido superior (Figura 9):

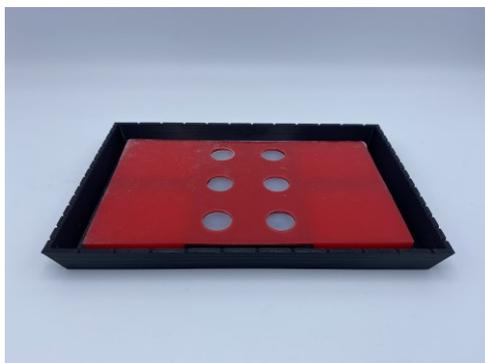


Figura 9 Molde híbrido superior

3.2.2 Processo Assistido a Vácuo (VAP)

Este é um processo que usa vácuo para infundir a resina em toda a pré-forma. Consiste em colocar a moldes, fibras e insertos sob vácuo e introduzir a resina de tal forma que ela percorra toda a pré-forma. Abaixo está o processo passo a passo que foi utilizado neste trabalho para o VAP.

- Limpe com etanol (Figura 10 (a)) a superfície metálica sobre a qual os componentes necessários para a infusão serão colocados;
- Aplicação de desmoldante (Figura 10 (b)) em toda a superfície da chapa de metal que entrará em contato com a resina;

- Cole a fita adesiva na chapa de metal, limitando a região onde a pré-forma será colocada e definindo o local onde a membrana de VAP e a membrana à prova d'água serão fixadas (Figura 10 (c));

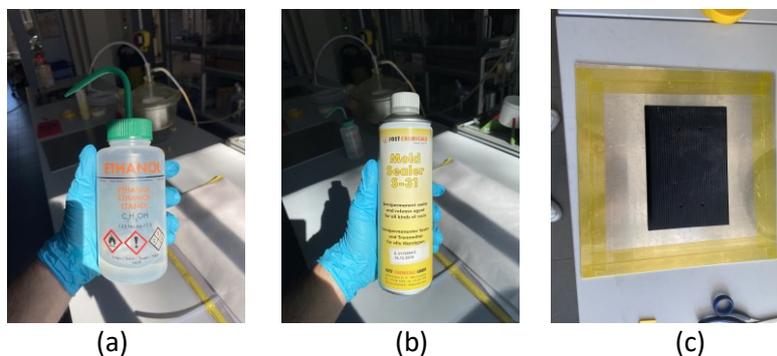


Figura 10 (a) Etanol; (b) Selante e desmoldante para molde; (c) Fita adesiva

- Prepare a pré-forma de carbono, cortando as bordas externas e os furos nas posições marcadas (com uma ferramenta de corte circular).
- Coloque o molde de silicone e a estrutura rígida com seis inserções e as duas pré-formas de fibra de carbono dentro (Figura 11 (a)), com o material base de ambos localizado no meio (resultando em um compósito simétrico);
- Coloque a camada de tecido de fibra de vidro com revestimento de teflon (Figura 11 (b)) acima da pré-forma;
- Coloque a camada de auxiliar de fluxo (Figura 11 (c)) acima do tecido de fibra de vidro com revestimento de teflon;

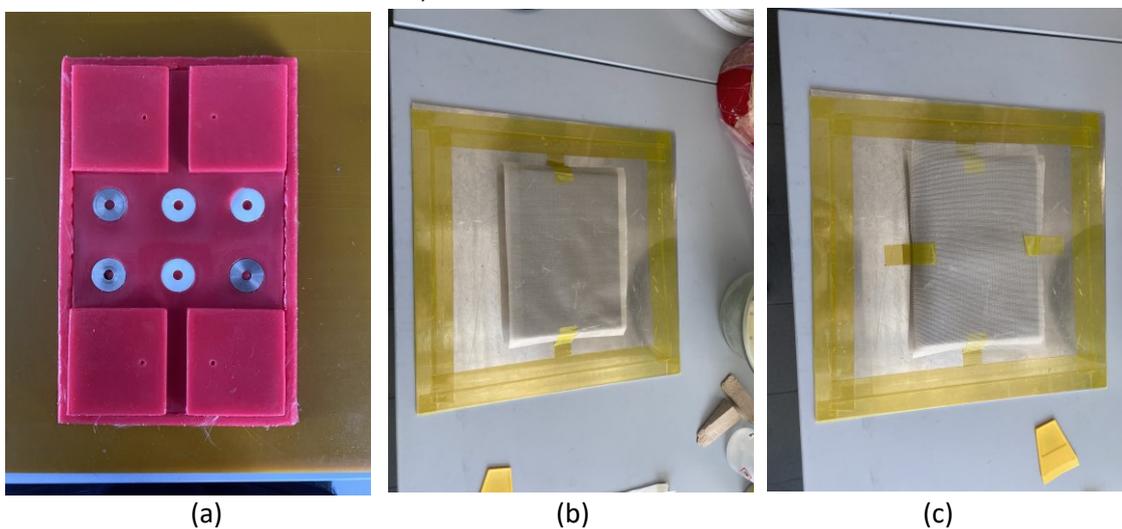
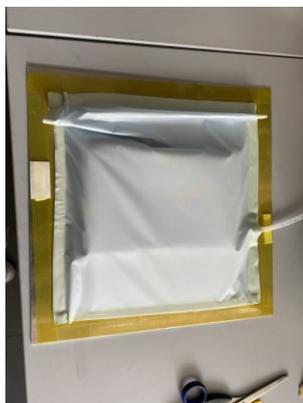


Figura 11 (a) Molde flexível pronto para a infusão com inserts metálicos e cerâmicos; (b) Tecido de fibra de vidro com revestimento de teflon; (c) Auxiliar de fluxo

- Use a Fita Adesiva Pegajosa para fixar a membrana de VAP sobre a fita adesiva na chapa de metal (Figura 12 (a)), selando as pré-formas entre a placa e a membrana, colocando os tubos por onde a resina fluirá. Essa membrana atua para evitar que a resina saia, mas ainda permite que qualquer resíduo de ar seja removido;

- Use uma membrana de algodão de proteção para reduzir a velocidade da resina, facilitando a identificação de possíveis problemas na direção do fluxo da resina. Se a resina entrar na bomba, ela pode destruir o sistema.
- Use Fita Adesiva Pegajosa para fixar a membrana de vedação (Figura 12 (b)) ao redor de todo o sistema. Não se esqueça de colocar o tubo para o vácuo (o tubo deve estar fora da membrana de VAP, mas dentro da membrana de vedação). A membrana de vedação atua para garantir que o vácuo seja alcançado, selando o sistema quase completamente, para que o único material que entre no sistema seja a resina.
- Conecte a bomba de vácuo ao sistema, vedando os tubos de entrada de resina.
- Aguarde o sistema atingir um valor de pressão inferior a 1 mbar (aproximadamente 2 horas).
- Prepare a mistura da resina com o endurecedor, para a L20 epóxi a proporção é de 4:1 da resina e do endurecedor, respectivamente. O volume da placa é de $57,4 \text{ cm}^3$, mas, por segurança e para garantir que a resina preencherá a fibra de carbono e os espaços livres, um fator de 4x o volume de resina necessário foi usado, ou seja, 220 g de resina.



(a)



(b)



(c)

Figura 12 (a) Membrana de VAP; (b) Bolsa a vácuo completa (c) peso acima da bolsa a vácuo

- Conecte o recipiente de resina ao sistema para permitir o início da infusão.
- Aguarde cerca de cinco a seis horas com a bomba de vácuo ligada para garantir que todo o ar residual no sistema tenha sido removido. Nesse caso, é importante usar uma estrutura pesada acima da bolsa de vácuo para pressionar o molde e alcançar a geometria da placa desejada (Figura 12 (c));

- Execute a primeira etapa do processo de cura (aguarde em temperatura ambiente por 10 horas);
- Execute o processo de desmolde;
- Coloque a placa no forno a 60°C por 10 horas para finalizar o processo de cura;
- Execute o corte e acabamento dos espécimes (lixar as bordas e etiquetar).

3.3 Dimensionamento dos Espécimes

Como os insertos cerâmicos eram a parte crítica a ser produzida, a geometria dos insertos foi definida pelos limites da produção de um Inserto Cerâmico por fabricação aditiva.

Com a geometria do inserto cerâmico, os insertos metálicos foram produzidos com a mesma geometria e o CFRP foi definido como um retângulo (fácil fabricação com cantos vivos) com comprimento das bordas que evita o efeito de borda gerado pelo furo necessário para posicionar o inserto.

3.3.1 Comprimento, largura e espessura

A fabricação dos corpos de prova ocorrerá produzindo uma placa de 202mm×124mm×2mm, seguida de corte em seis placas menores de 100 mm x 40 mm x 2 mm. Cada espécime tem um inserto de material diferente e uma geometria diferente (Figura 13).

Três geometrias foram fabricadas para os testes, com inserto de diâmetro de 20 mm com um furo M6 no centro:

1. Inserto plano de 2 mm: distância de 2 mm entre o topo e o fundo para se ajustar exatamente à fibra de carbono.
2. Inserto plano de 1,8 mm: distância de 1,8 mm entre o topo e o fundo para pressionar um pouco a fibra de carbono.
3. Inserto "ondulado" de 2 mm: distância de 2 mm entre o topo e o fundo para se ajustar exatamente à fibra de carbono, mas com dois "dentes" (um em cima e outro em baixo) que pressionam a fibra de carbono como um movimento "ondulado".

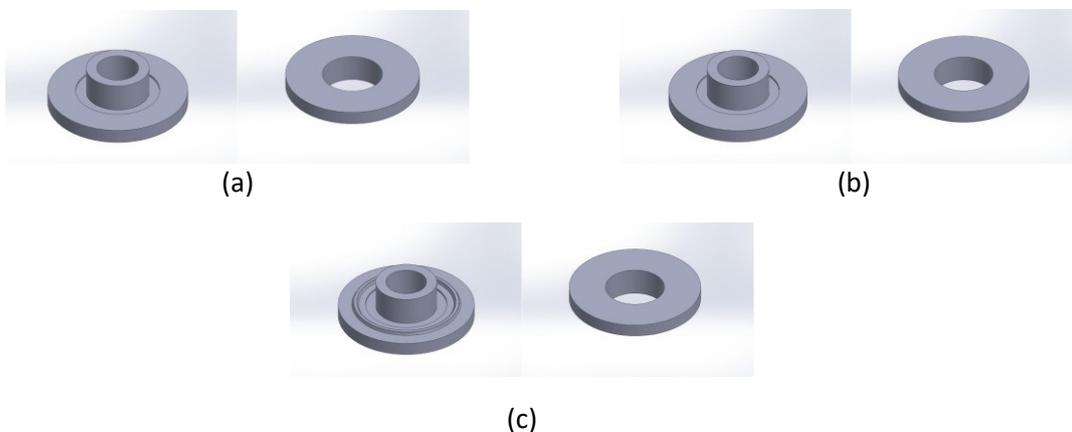


Figura 13 Geometria dos insertos: (a) 1,8 mm plano (b) 2 mm plano (c) 2 mm ondulado

3.3.2 Composição, tipo de fibra e resina epóxi

Os insertos metálicos foram feitos de liga de alumínio, aço CrMg e liga de titânio. Os insertos cerâmicos foram feitos de Alumina Al₂O₃ (óxido de alumínio). O óxido de alumínio é o material cerâmico mais utilizado devido ao seu baixo custo, boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão etc. Os produtos cerâmicos feitos a partir desse tipo de material geralmente são fabricados usando técnicas acessíveis, como revestimento por imersão, fundição por deslizamento, moldagem por injeção. Além disso, é fácil modificar a microestrutura e as propriedades por dopagem, o que também pode trazer um comportamento químico diferente nas interfaces. Por exemplo, a dopagem de sílica altera o comportamento de sinterização, aumenta a difusividade e melhora a reatividade química com outros materiais inorgânicos.

As fibras de carbono HT 12k foram escolhidas como reforço devido à questão mencionada anteriormente em relação à reação química entre metais e CFRPs. A combinação da Resina Epóxi L20 e do Endurecedor EpH 161 produz uma resina de laminação de baixa viscosidade que apresenta propriedades de impregnação e umectação superiores às fibras de vidro, aramida e carbono. Em conjunto com a Resina Epóxi L20, o uso do Endurecedor EpH 161 resulta em uma longa vida útil para o compósito de resina com resistências mecânicas e dinâmicas muito altas e cura perfeita em laminados espessos (> 2 cm) e finos (1,5 mm). Antes que as propriedades mecânicas especificadas pudessem ser obtidas, os laminados devem ser pós-curados por cerca de 15 horas a 60°C após seu período inicial de cura a frio.

3.4 Simulação Numérica no Ansys Workbench

Como um novo assunto de estudo, foi interessante fazer simulações numéricas para entender melhor o problema e ter a magnitude dos resultados de estresse para se preparar para os testes experimentais e ser capaz de comparar os resultados posteriormente. O ANSYS é um pacote de modelagem de elementos finitos de propósito geral para resolver numericamente uma ampla variedade de problemas mecânicos. Esses problemas incluem análises estruturais estáticas/dinâmicas, transferência de calor e problemas de fluidos, bem como problemas acústicos e eletromagnéticos.

Neste problema, foram realizadas três simulações estruturais estáticas: uma com uma condição térmica de aquecimento, outra com a carga de rolamento aplicada no centro do furo do inserto e a última com as duas condições juntas. Três geometrias diferentes e seis materiais de insertos foram usados para procurar os valores de tensões térmicas e mecânicas após a simulação. Para fazer uma simulação adequada, são necessárias as propriedades dos materiais, a geometria, a formulação de contato, definir e criar uma malha, as condições de contorno e os resultados procurados.

3.4.1 Parâmetros do Ansys Workbench

- Material: seis materiais diferentes foram usados para os insertos: liga de alumínio, aço estrutural, liga de titânio, Alumina A471, Alumina A479 e Alumina ZTA-20 e as

propriedades de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (CFRP) foram usadas para a placa composta;

- Malha: solução quadrática para um elemento tetraédrico com tamanho de aresta de 0,25 mm;
- Contato: condição de ligação (todas as três regiões de contato);
- Condições de contorno: uma superfície fixa (borda distante do inserto), condição térmica de aquecimento de 60K, carga de rolamento de 2000 N na direção da fibra;
- Resultados: tensão normal na direção da fibra, tensão normal perpendicular à direção da fibra e tensão de cisalhamento para o CFRP, e tensão de cisalhamento máxima para os insertos cerâmicos e tensão de Von-Mises equivalente para os insertos metálicos.

3.4.2 Propriedades dos Materiais

Para o Laminado CFRP, o Software AlfaLam, da TU Darmstat, foi usado para avaliar as propriedades de um laminado com 2 mm de espessura consistindo em fibra de carbono HT na orientação [0°] e 0,55 de fração volumétrica com uma matriz epóxi (Figura 14), resultando em um material ortotrópico. Propriedades individuais dos constituintes são aplicadas para calcular, com a abordagem da micromecânica (Regra das Misturas), as propriedades finais do compósito nas três direções principais.

Ingenieurkonstanten				Globale Größen			
$E_x, \text{Zug} [\text{N/mm}^2]$	116600	$E_x, \text{Biegung} [\text{N/mm}^2]$	117141	$\epsilon_x [\%]$	2.85E-03	$\alpha_x [1/\text{K} \cdot 10^{-6}]$	0.48
$E_y, \text{Zug} [\text{N/mm}^2]$	7673	$E_y, \text{Biegung} [\text{N/mm}^2]$	7708	$\epsilon_y [\%]$	2.15E-01	$\alpha_y [1/\text{K} \cdot 10^{-6}]$	35.89
$G_{xy}, \text{Schub} [\text{N/mm}^2]$	4173	$G_{xy}, \text{Torsion} [\text{N/mm}^2]$	4173	$\gamma_{xy} [\%]$	0.00E+00	$\alpha_{xy} [1/\text{K} \cdot 10^{-6}]$	0
$\nu_{xy}^{\text{Dach}} [-]$	0.017			$\kappa_x [1/\text{mm}]$	1.29E-02	$\rho_{\text{ges}} [\text{g/cm}^3]$	1.47
$\nu_{yx}^{\text{Dach}} [-]$	0.265			$\kappa_y [1/\text{mm}]$	-3.41E-03		
				$\kappa_{xy} [1/\text{mm}]$	0.00E+00		



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Figura 14 Propriedades do CFRP

A Liga de Alumínio, a Liga de Titânio e o Aço Estrutural foram retirados diretamente dos Dados de Engenharia de Materiais Gerais do Ansys Workbench (Tabela 1).

Tabela 1 Propriedades de ligas metálicas

Property	Aluminum	Steel	Titanium
Young's Modulus [GPa]	71	200	96
Poisson ratio	0.33	0.3	0.36
Coef. of thermal expansion [10^{-6}K^{-1}]	23	12	9.4

Os materiais cerâmicos foram escolhidos considerando a faixa usual em relação às aplicações de fabricação aditiva. Os escolhidos foram Óxido de Alumínio A471, Óxido de Alumínio A479 e Alumina Reforçada com Zircônia ZTA-20.

O ZTA apresenta resistência e tenacidade à fratura em temperatura ambiente mais elevadas devido a uma transformação de fase de Zircônia metaestável enquanto a carga é

aplicada. O Óxido de Alumínio é o material cerâmico mais utilizado devido ao seu baixo custo, boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

As propriedades dessas três cerâmicas isotrópicas estão na Tabela 2:

Tabela 2 Propriedades de Materiais Cerâmicos

Ceramics	Poisson modulus	Young modulus [GPa]	Coef. of thermal expansion [$10^{-6} K^{-1}$]
A471	0.23	280	7.1
A479	0.23	360	7.2
ZTA 20	0.23	338	6

3.4.3 Contato

Devido à geometria, havia três regiões de contato:

1. Contato entre a parte inferior do inserto e o CFRP;
2. Contato entre a parte superior do inserto e o CFRP;
3. Contato entre a parte inferior e a superior do inserto (Figura 15).

Para todos os três contatos, a condição de ligação foi usada. Se as regiões de contato estiverem ligadas, então nenhum deslizamento ou separação entre as faces ou arestas é permitido. Este tipo de contato permite uma solução linear, pois o comprimento/área de contato não mudará durante a aplicação da carga. Se o contato for determinado no modelo matemático, quaisquer lacunas serão fechadas e qualquer penetração inicial será ignorada.

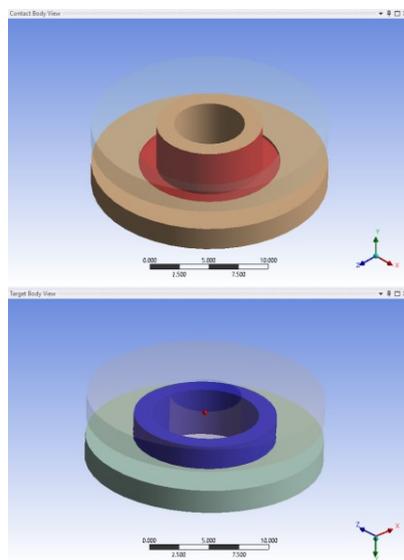


Figura 15 Exemplo da área de contato 3 (Contato entre a parte inferior e a superior do inserto)

3.4.4 Malha

Para a malha, a formulação quadrática foi utilizada com um elemento tetraédrico com aresta de 0,25 mm em todos os três corpos. A malha final na CFRP (Figura 16) e no inserto (Figura 17) são mostradas abaixo. A malha deve ser bem ajustada, com as duas superfícies em contato com o mesmo tamanho de elemento de malha, para evitar erros de convergência.



0,00 10,00 20,00 30,00 40,00 (mm)

Figura 16 Malha da CFRP



0,000 2,500 5,000 7,500 10,000 (mm)

Figura 17 Malha do inserto

3.4.5 Condições de contorno do teste de expansão térmica

Para a análise térmica, duas condições de contorno são usadas:

- A superfície inferior da CFRP (longe do inserto) é fixada;
- Os três corpos têm uma diferença de temperatura positiva de 60 K (de 295 a 355 K).

3.4.6 Condições de contorno do teste de aplicação de carga de rolamento

Para a análise mecânica, são utilizadas duas condições de contorno (BC):

- A superfície inferior da CFRP (longe do inserto) é fixada;
- Uma carga de rolamento com a magnitude de 2000 N é aplicada no orifício do cilindro do inserto na direção 1 (direção das fibras).

3.4.7 Condições de contorno do teste de aplicação de carga de expansão térmica e rolamento

Para a análise térmica e mecânica, três condições de contorno são utilizadas:

- A superfície inferior da CFRP (longe do inserto) é fixada;
- Uma carga de rolamento com a magnitude de 2000 N é aplicada no orifício do cilindro do inserto na direção 1 (direção das fibras).
- Os três corpos têm uma diferença de temperatura positiva de 60 K (de 295 a 355 K).

3.5 Metodologia de testes experimentais

Para os testes experimentais, um rótulo de amostra foi desenvolvido (Figura 18):

As opções de rótulo são:

1. Primeiro, o número da infusão (começando a partir de 1);
2. Segundo, a posição na placa durante a infusão: indo de 1 a 6, com 1 sendo o canto superior esquerdo, 2 o meio superior, 3 o canto superior direito, 4 o canto inferior esquerdo, 5 o meio inferior e 6 o canto inferior direito;
3. Terceiro, a letra do material do inserto pode ser A para liga de alumínio, S para liga de aço, T para liga de titânio e C para insertos de cerâmica;
4. Quarto, o tipo de inserto, representando sua geometria, pode ser 20W, que é o inserto ondulado de 2 mm, 20F, que é o inserto plano de 2 mm e 18F, que é o inserto plano de 1,8 mm.

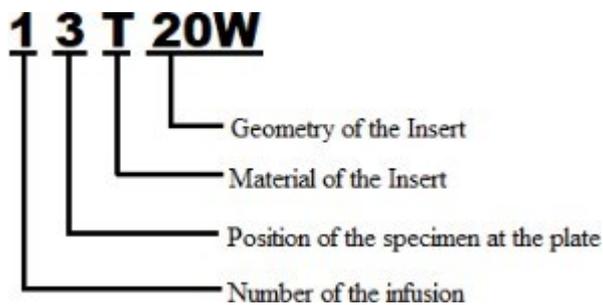


Figura 18 Rótulo da amostra para testes experimentais

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de Raios-X CT de Infiltração

Esta análise é importante para visualizar o interior do inserto e garantir que a resina tenha sido bem infiltrada, especialmente para o inserto ondulado. A melhor opção de inserto para usar na máquina de Raios-X CT PXR foi um inserto de plástico em uma placa CFRP. A fibra de carbono possui uma absorção menor da radiação do que a fibra de vidro, facilitando a visualização da resina dentro, entre as duas partes do inserto. Em comparação com insertos metálicos e cerâmicos, o inserto de plástico precisa de muito menos energia para ser atravessado, o que possibilita a visualização interna com bom contraste. Por esse motivo, foi escolhido realizar a análise de Raios-X CT de um inserto plástico ABS 20W (Figura 19).

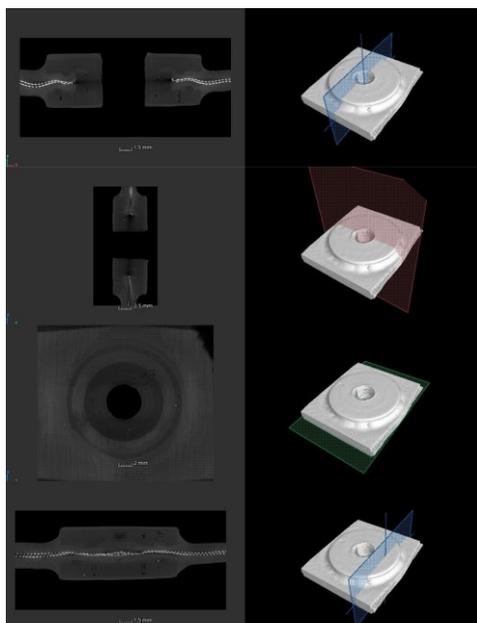


Figura 19 Raios-X CT de um inserto plástico ABS ondulado de 2 mm.

As imagens de reconstrução 3D mostram que a resina penetra profundamente no interior do inserto e o impregna em todas as partes. Essa visualização indica que a metodologia da infusão foi apropriada e que, com os insertos metálicos e cerâmicos, a resina também fluiria corretamente no interior.

4.2 Insertos Cerâmicos e Metálicos

Com o desenho 2D dos insertos, tanto os metálicos (Figura 20) quanto os cerâmicos (Figura 21) foram produzidos. Os insertos cerâmicos foram produzidos pelo processo de fabricação aditiva de última geração no Laboratório IKTA.



Figura 20 Insertos Metálicos: (a) A18F (b) T18F (c) S20W (d) S20W fechado.

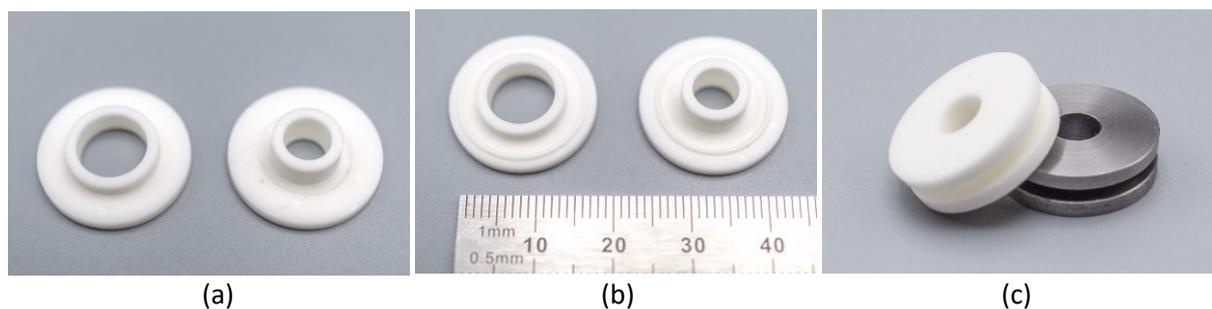


Figura 21 Insertos Cerâmicos: (a) C20F (b) C20W com escala (c) C18F e S18F.

4.3 Resultados da fabricação de placas e espécimes VAP

Usando o processo VAP com molde híbrido explicado na Metodologia (seção 3), foram produzidas sete placas com insertos metálicos e cerâmicos (Figura 22).

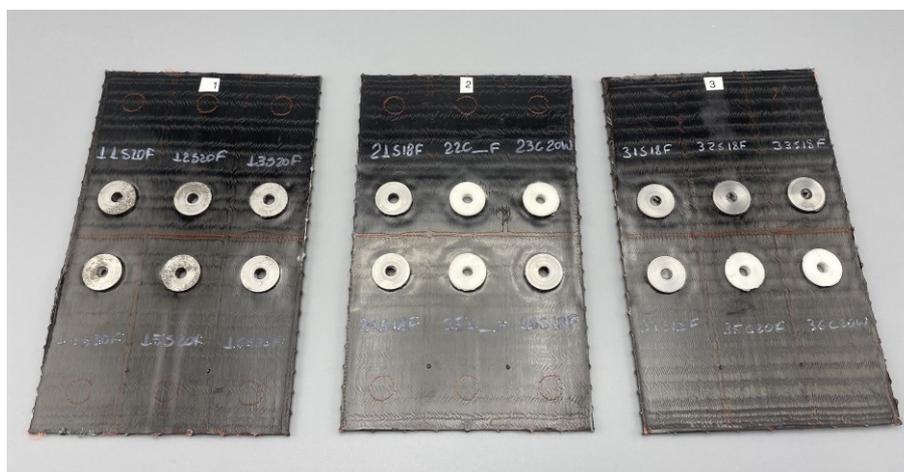


Figura 22 Três placas com insertos metálicos e cerâmicos.

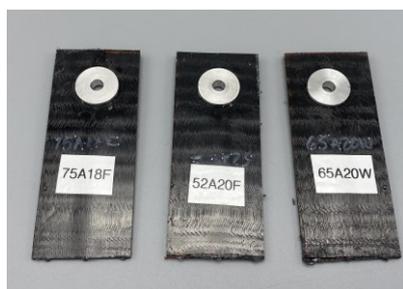
Como cada placa continha seis insertos, foram produzidos 42 espécimes para realizar testes térmicos e mecânicos (Tabela 3). Os espécimes foram separados por material do inserto (Figura 23) e geometria do inserto (Figura 24).

Tabela 3 Quantidade e tipo de espécimes fabricados

-	18F	20F	20W
Aluminum	7	6	6
Steel	6	6	3
Titanium	3	0	0
Alumina	0	1	2

Para analisar o efeito da corrosão eletroquímica, é importante marcar o dia em que as infusões foram realizadas:

- Primeira infusão: 06/09/2022
- Segunda infusão: 08/09/2022
- Terceira infusão: 12/09/2022
- Quarta e quinta infusões: 20/09/2022
- Sexta infusão: 21/09/2022
- Sétima infusão: 22/09/2022



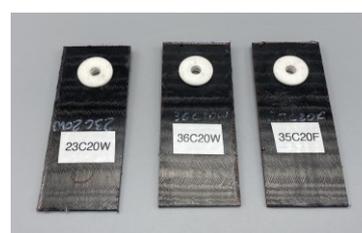
(a)



(b)

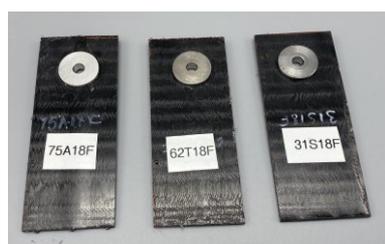


(c)

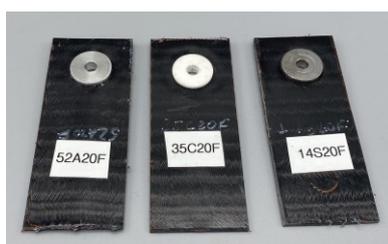


(d)

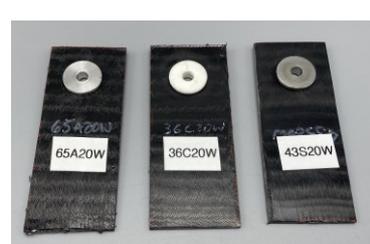
Figura 23 Espécimes cortados: (a) com insertos de alumínio (b) com insertos de aço (c) com insertos de titânio (d) com insertos cerâmicos



(a)



(b)



(c)

Figura 24 Espécimes cortados: (a) com insertos 18F (b) com insertos 20F (c) com insertos 20W.

4.4 Resultados da simulação numérica

Os resultados de tensão normal na direção das fibras (1) e perpendicular à direção das fibras (2), bem como a tensão de cisalhamento (12), serão mostrados no nível do compósito CFRP. Para os insertos metálicos, foi aplicado o estresse equivalente de Von Mises, e para os insertos cerâmicos, o estresse máximo de cisalhamento (Tresca). Esses resultados mostram a influência do aumento de temperatura e da carga de rolamento em cada elemento para os seis diferentes insertos de materiais. A diferença nos resultados observados para os insertos metálicos e cerâmicos baseia-se em suas propriedades dúcteis e frágeis, respectivamente.

Para possibilitar o uso de uma escala de cores, os valores máximos e mínimos da escala numérica foram fixados para cada resultado diferente observado e para cada simulação diferente. Assim, foi possível comparar os resultados entre diferentes geometrias e diferentes materiais. Portanto, como foram realizadas 15 simulações diferentes (cinco resultados diferentes e três condições de carga diferentes), foram escolhidas 15 escalas de cores. Os valores máximos e mínimos foram escolhidos em relação ao contraste de cores nos resultados.

Considerando a superposição dos resultados de expansão térmica e mecânica quando ambas as condições de contorno estavam juntas, a escala dessa simulação foi a adição das escalas escolhidas para cada condição de contorno separadamente. Para mostrar esses fenômenos, foi apresentado um exemplo de inserto cerâmico e um exemplo de inserto metálico.

4.5 Demonstração de inserto cerâmico- A479 20F

Para mostrar a superposição de resultados nos insertos cerâmicos, foram apresentados os resultados do A479 20F para tensões normais (Figura 25 e 26), tensão de cisalhamento (Figura 27) e tensão de cisalhamento máxima (Figura 28):

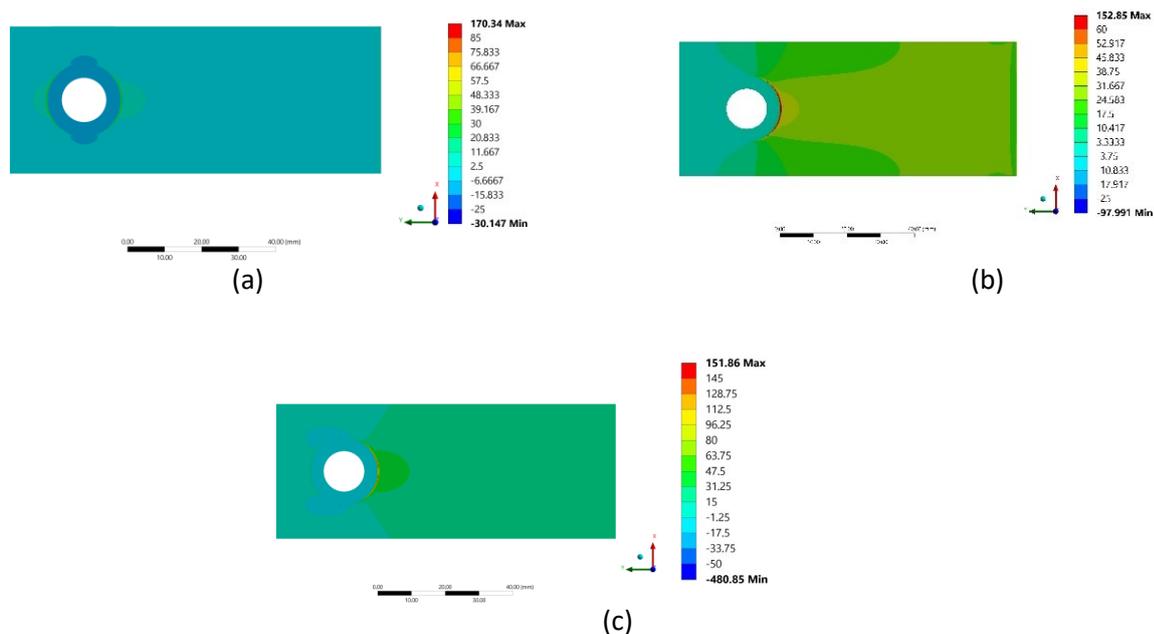


Figura 25 Resultados de tensão normal na direção das fibras para A479 20F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.

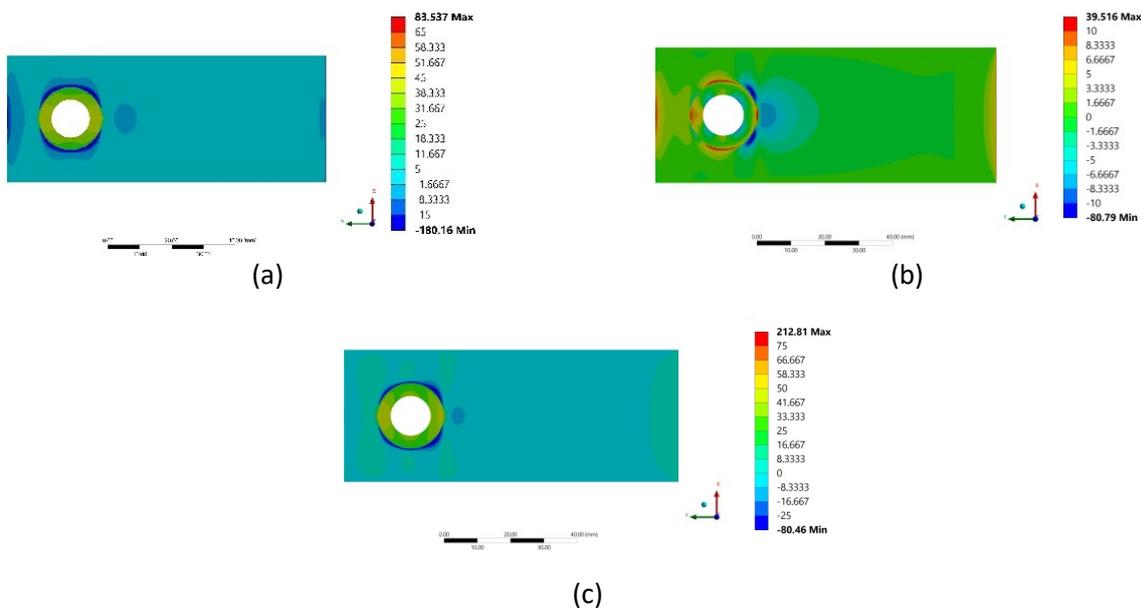


Figura 26 Resultados de tensão normal perpendicular à direção das fibras para A479 20F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.

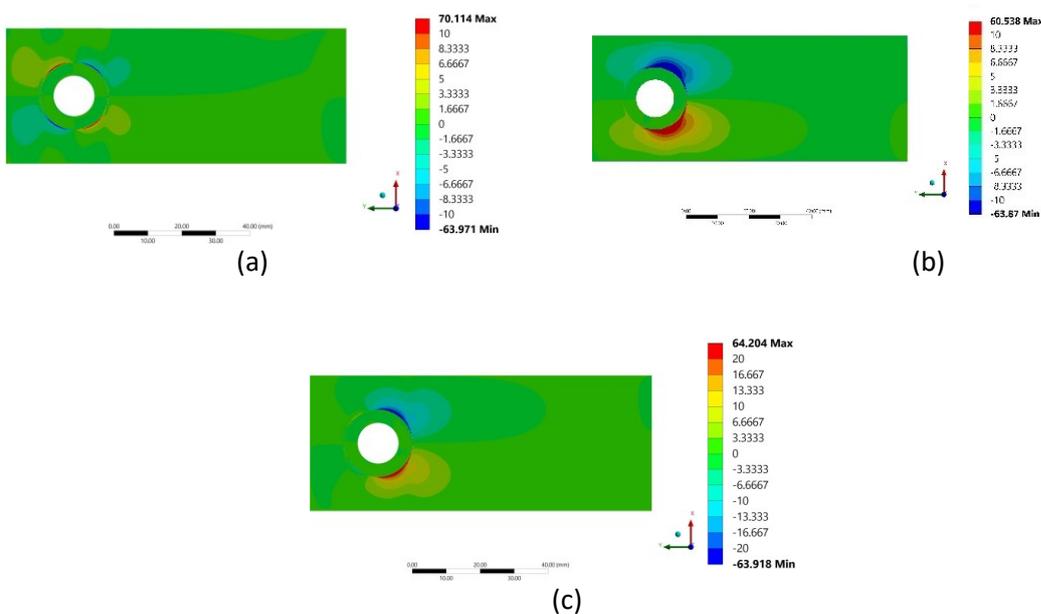


Figura 27 Resultados de tensão de cisalhamento para A479 20F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.

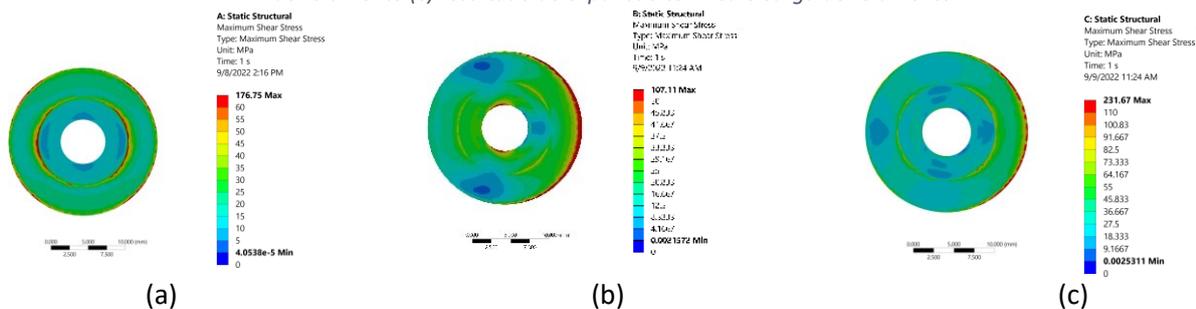


Figura 28 Resultados de tensão de cisalhamento máxima para A479 20F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.

4.6 Demonstração de inserto metálico- S18F

Para mostrar a superposição de resultados nos insertos metálicos, foram apresentados os resultados do S18F para tensões normais (Figura 29 e 30), tensão de cisalhamento (Figura 31) e estresse equivalente (Figura 32):

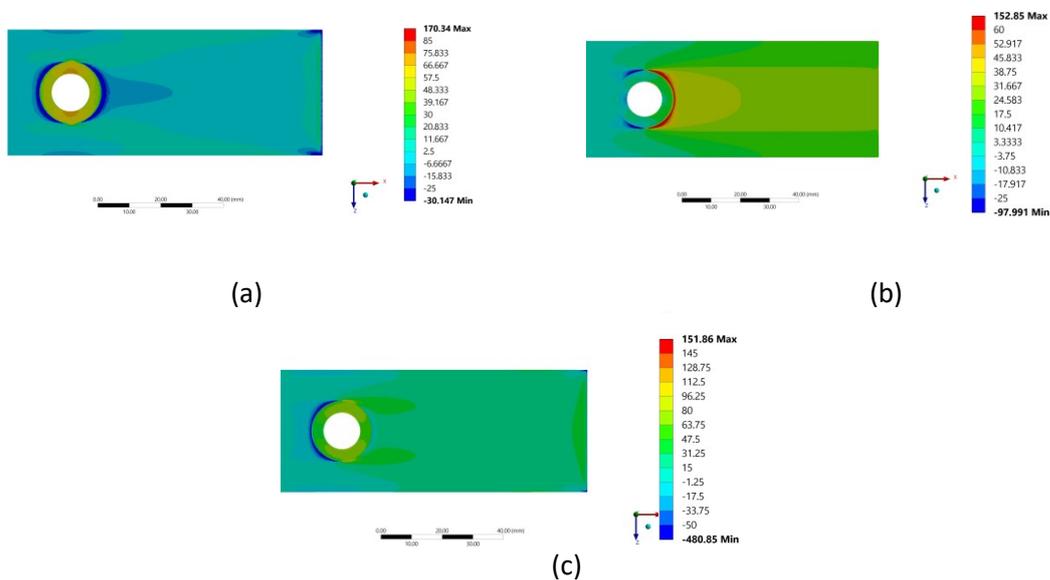


Figura 29 Resultados de Tensão Normal na Direção da Fibra S18F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.

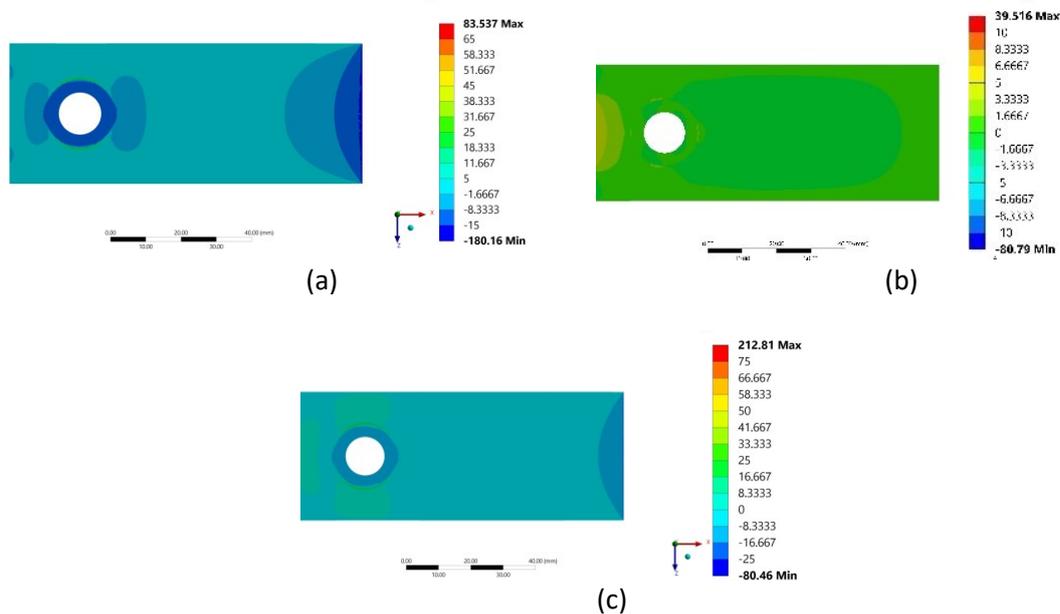


Figura 30 Resultados de tensão normal perpendicular à direção da fibra S18F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultados de expansão térmica e carga de rolamento.

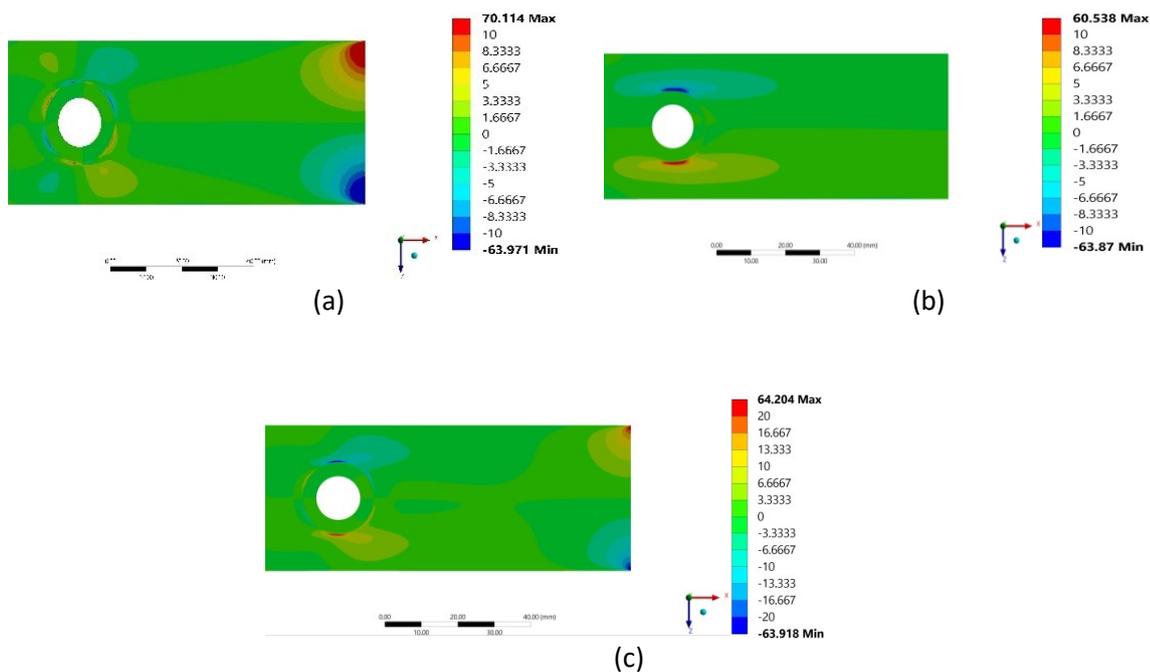


Figura 31 Resultados de tensão de cisalhamento A479 20F: (a) resultados de expansão térmica (b) resultados de carga de rolamento (c) resultados de expansão térmica e carga de rolamento.

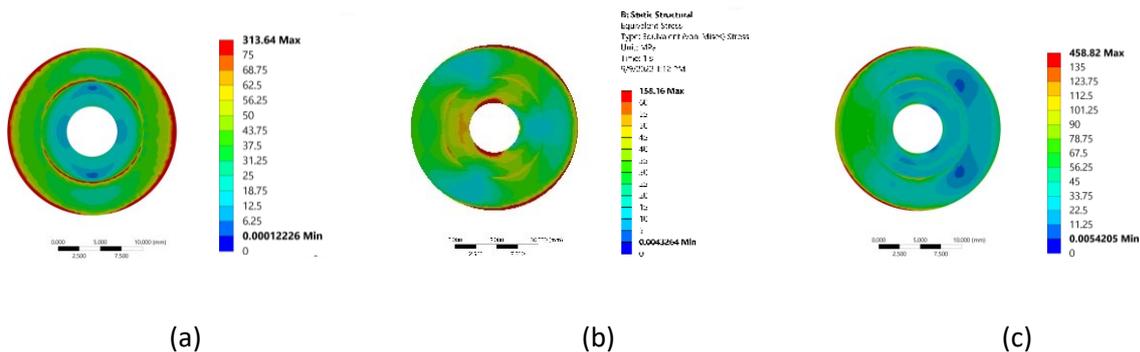


Figura 32 Resultados de tensão equivalente (Von Mises) S18F: (a) resultado de expansão térmica (b) resultado de carga de rolamento (c) resultado de expansão térmica e carga de rolamento.

4.7 Resultados da análise de expansão térmica e carga de rolamento

Como mostrado, os resultados da expansão térmica e da carga de rolamento aplicados juntos eram uma sobreposição dos resultados da expansão térmica e da carga de rolamento aplicados separadamente. Continuando com essa observação, os resultados da expansão térmica e da carga de rolamento aplicados juntos foram mostrados para as três geometrias diferentes e para os seis materiais.

Resultados de tensão normal na direção das fibras (N1) para insertos 18F (Figura 33) para insertos 20F (Figura 34) e insertos 20W (Figura 35).

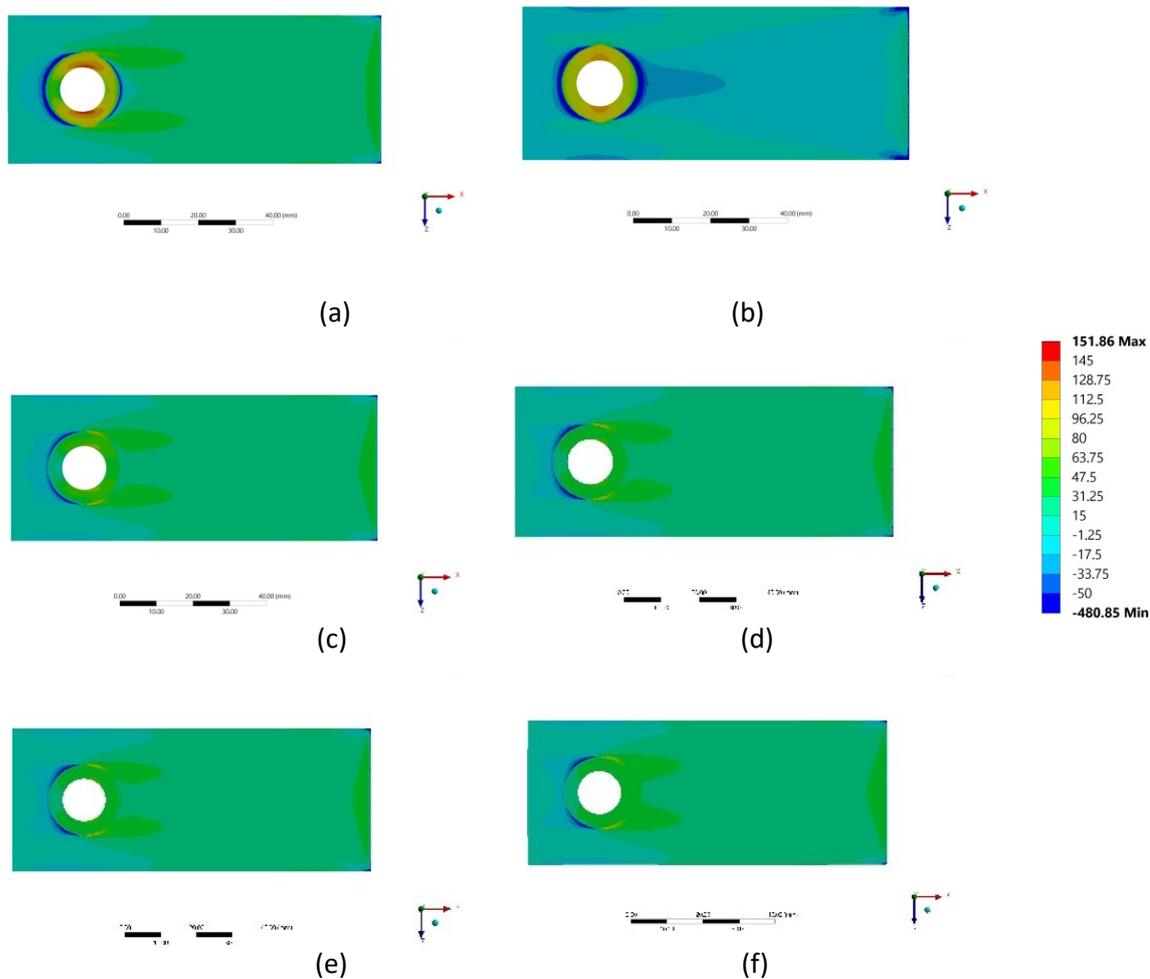
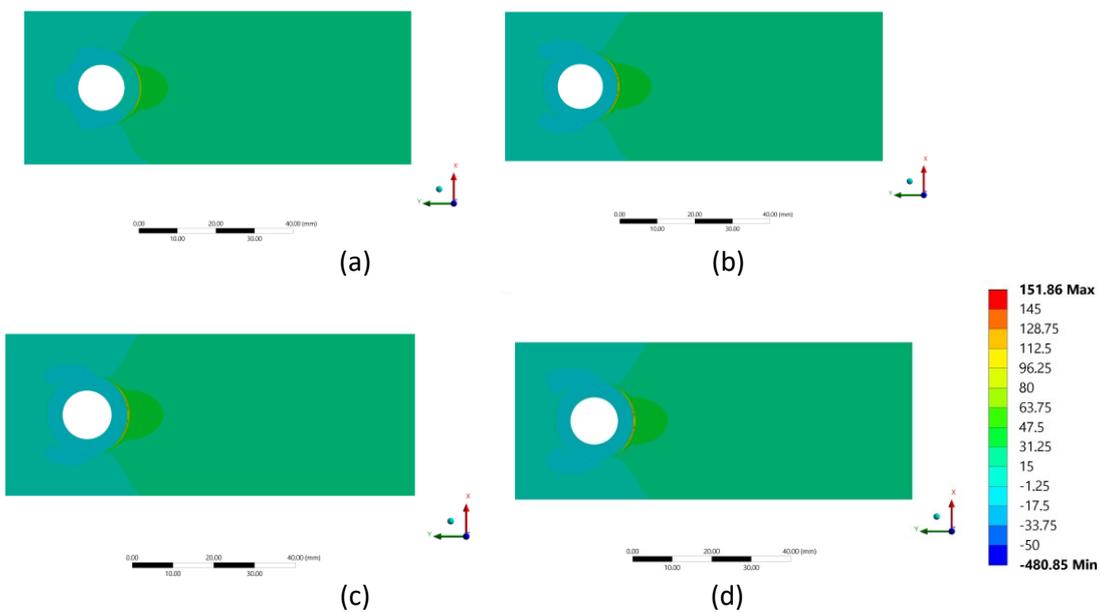


Figura 33 Tensão normal na direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) A471 18F (e) A479 18F (f) ZTA 18F.



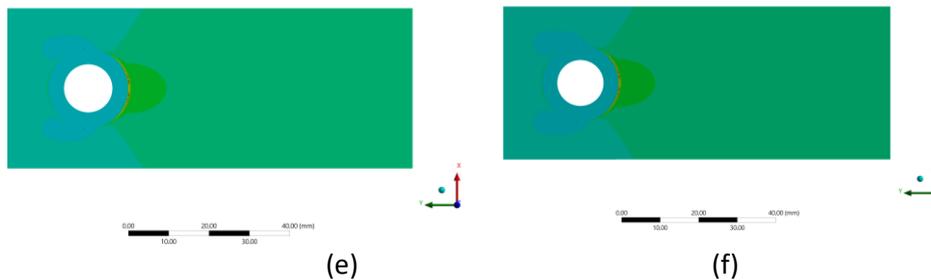


Figura 34 Tensão normal na direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) A471 20F (e) A479 20F (f) ZTA 20F.

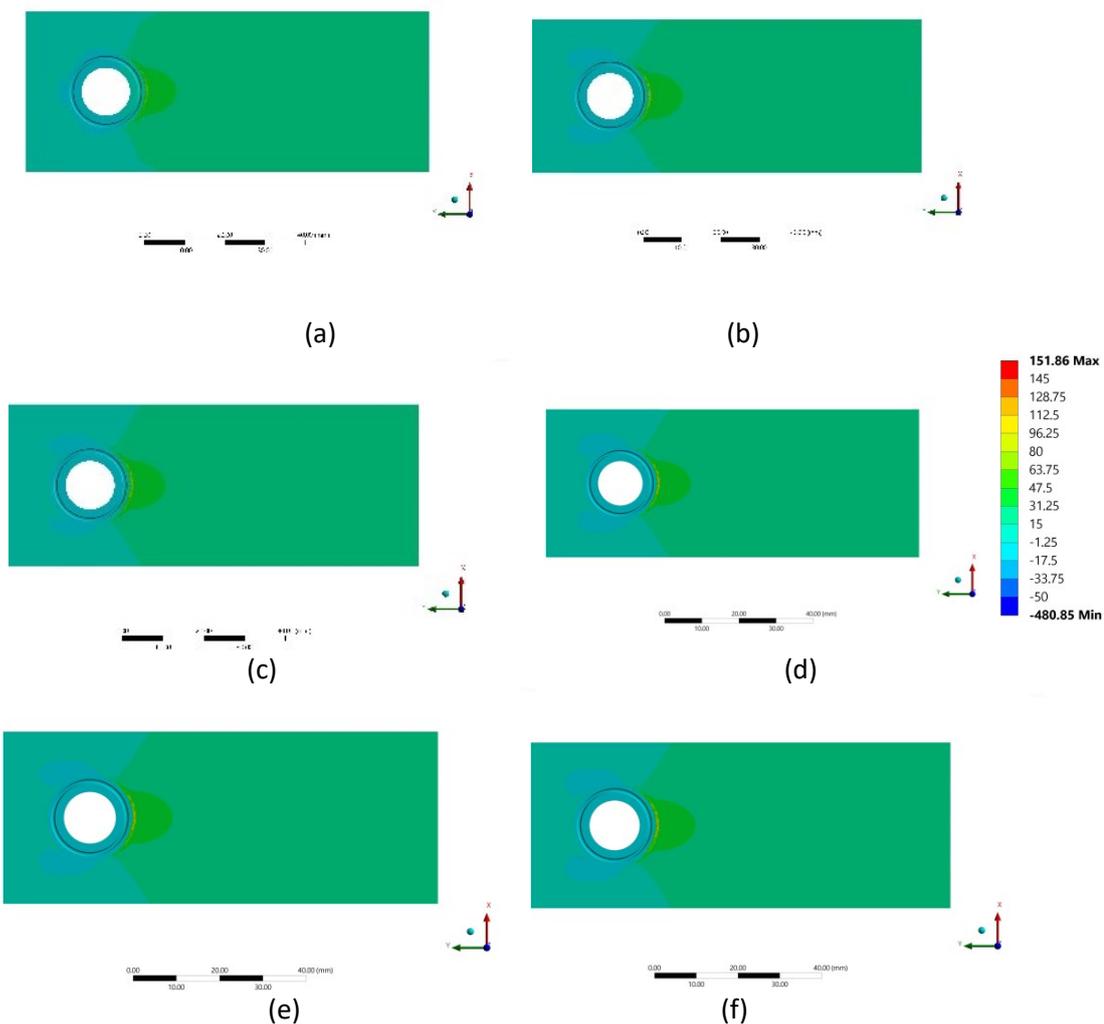


Figura 35 Tensão normal na direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) A471 20W (e) A479 20W (f) ZTA 20W.

Resultados de tensão normal perpendicular à direção das fibras (N2) para insertos 18F (Figura 36), para insertos 20F (Figura 37) e insertos 20W (Figura 38).

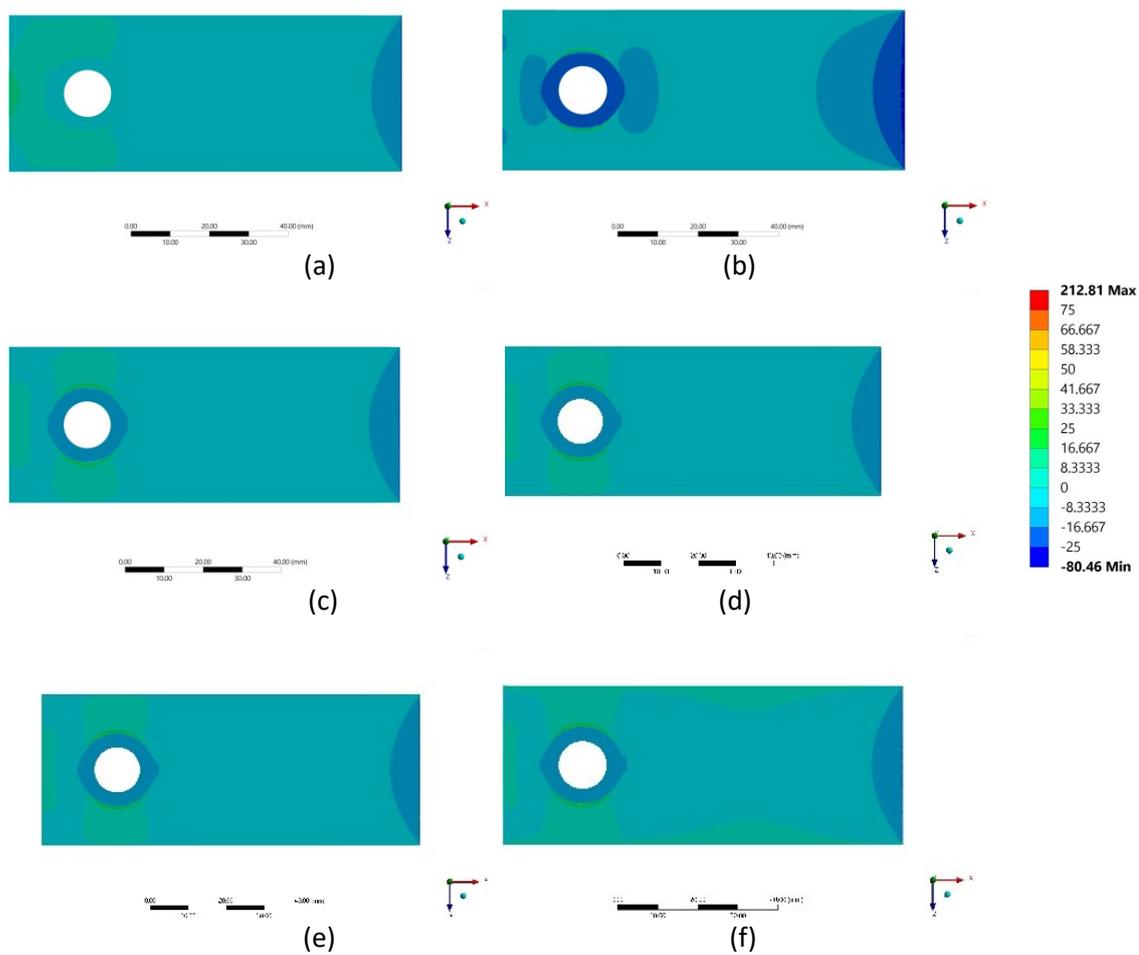
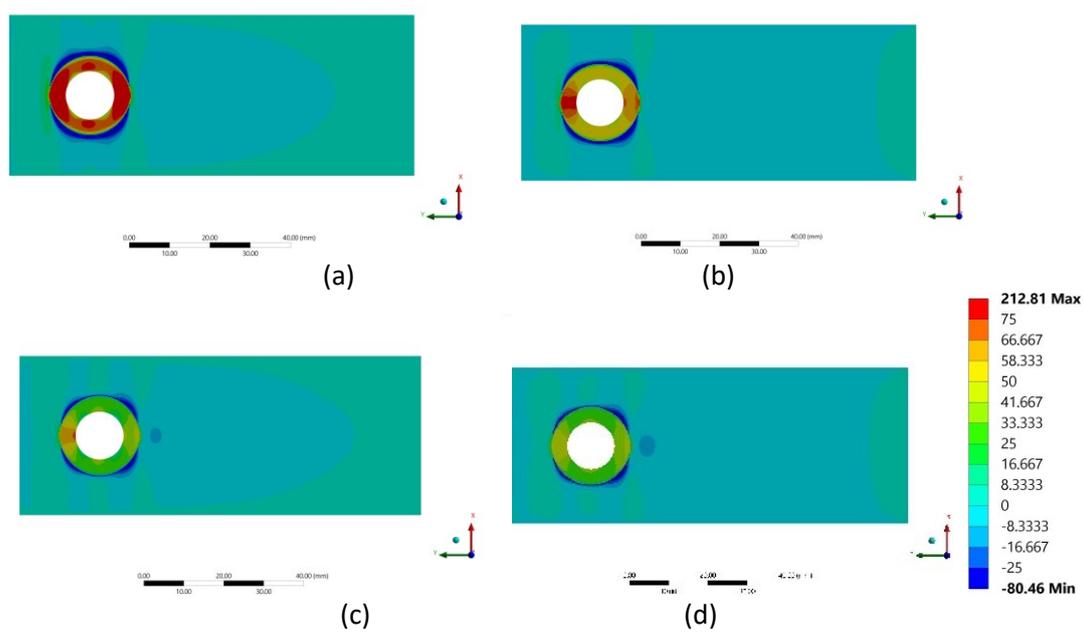


Figura 36 Tensão normal perpendicular à direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) A471 18F (e) A479 18F (f) ZTA 18F.



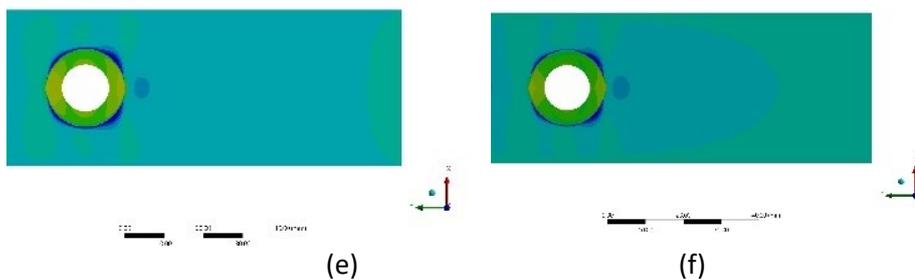


Figura 37 Tensão normal perpendicular à direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) A471 20F (e) A479 20F (f) ZTA 20F.

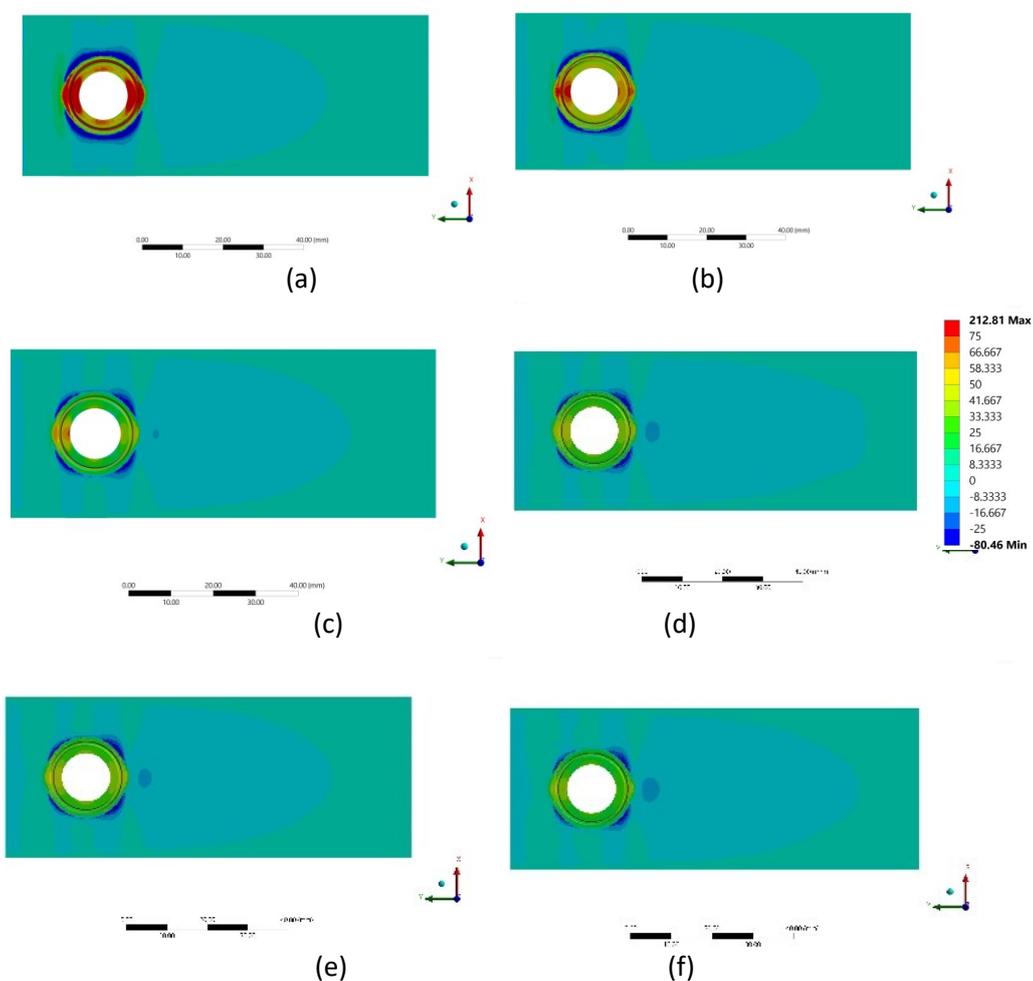


Figura 38 Tensão normal perpendicular à direção das fibras após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) A471 20W (e) A479 20W (f) ZTA 20W.

Resultados de tensão de cisalhamento (S12) para insertos 18F (Figura 39), para insertos 20F (Figura 40) e insertos 20W (Figura 41).

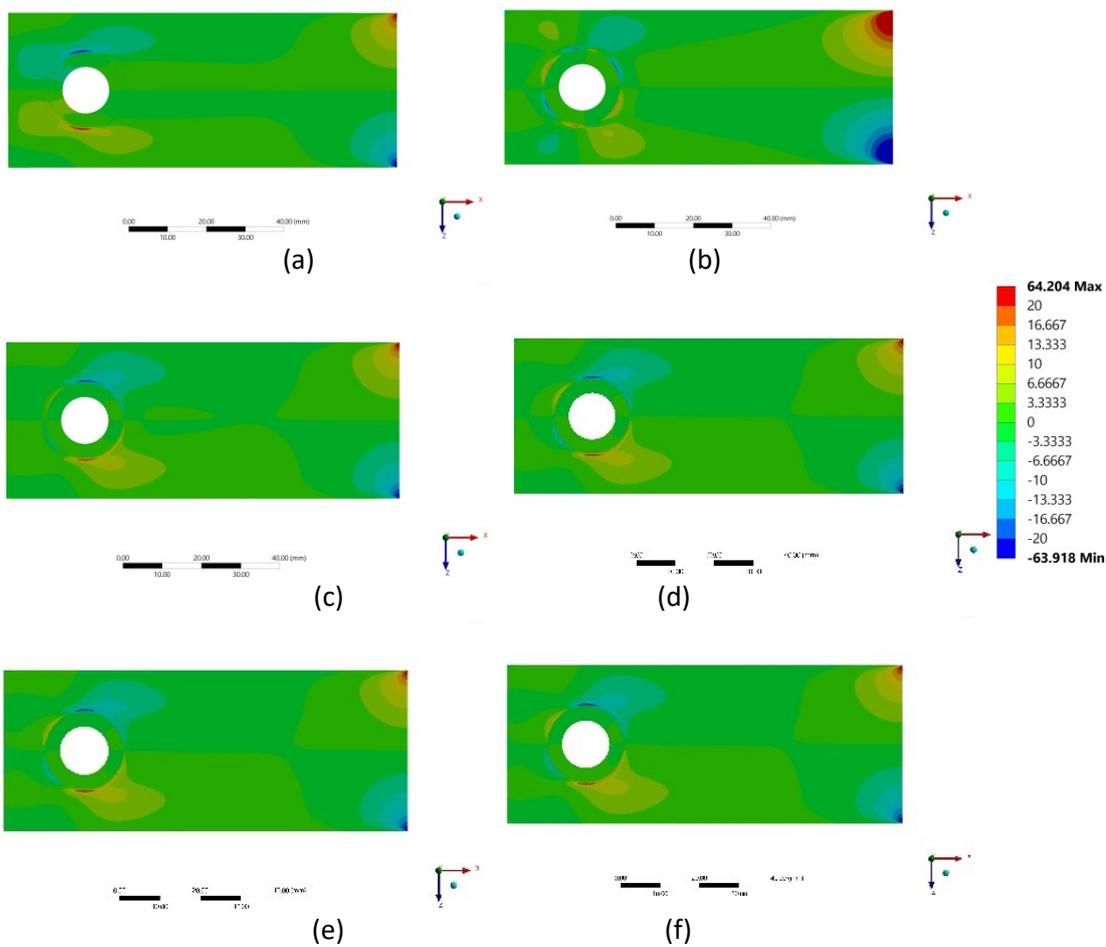
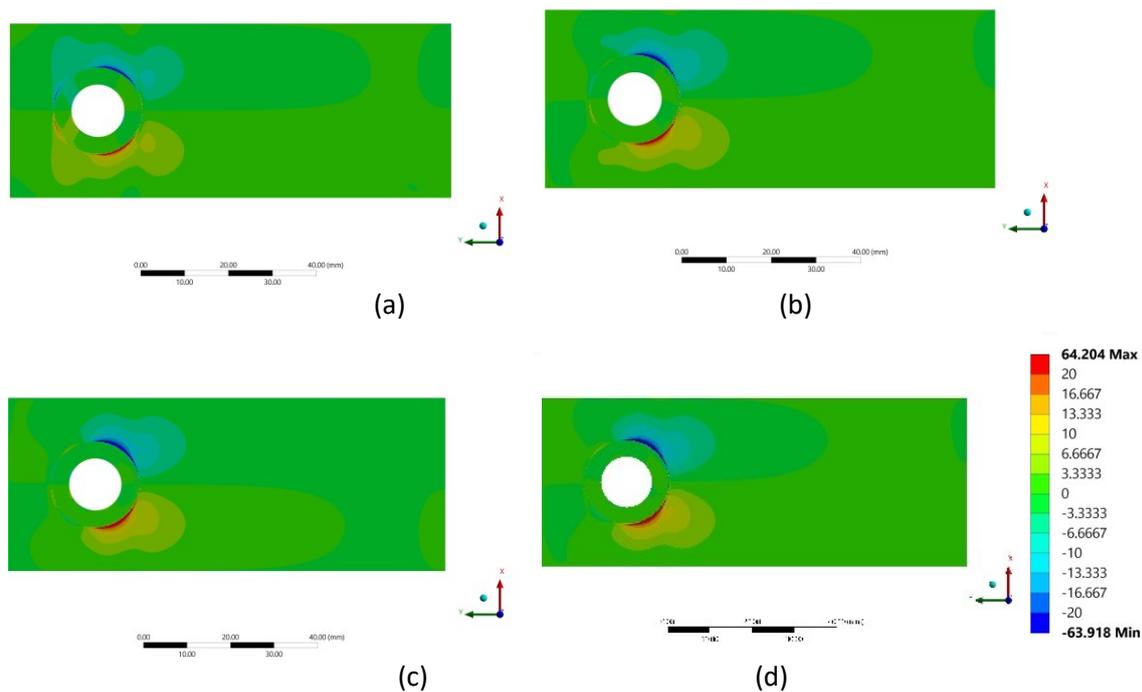


Figura 39 Tensão de cisalhamento após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) A471 18F (e) A479 18F (f) ZTA 18F.



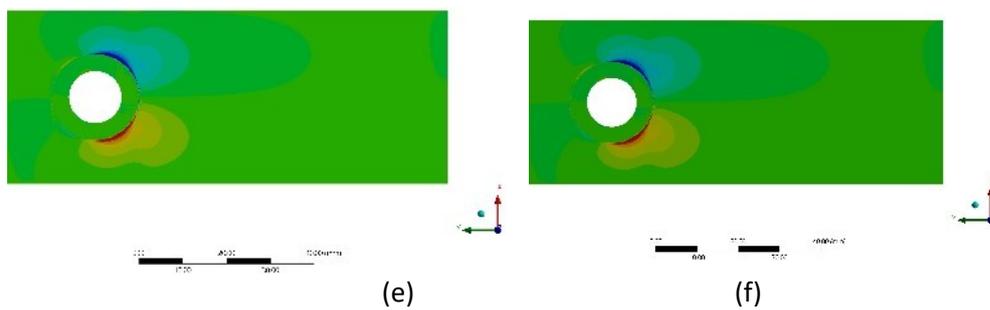


Figura 40 Tensão de cisalhamento após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) A471 20F (e) A479 20F (f) ZTA 20F.

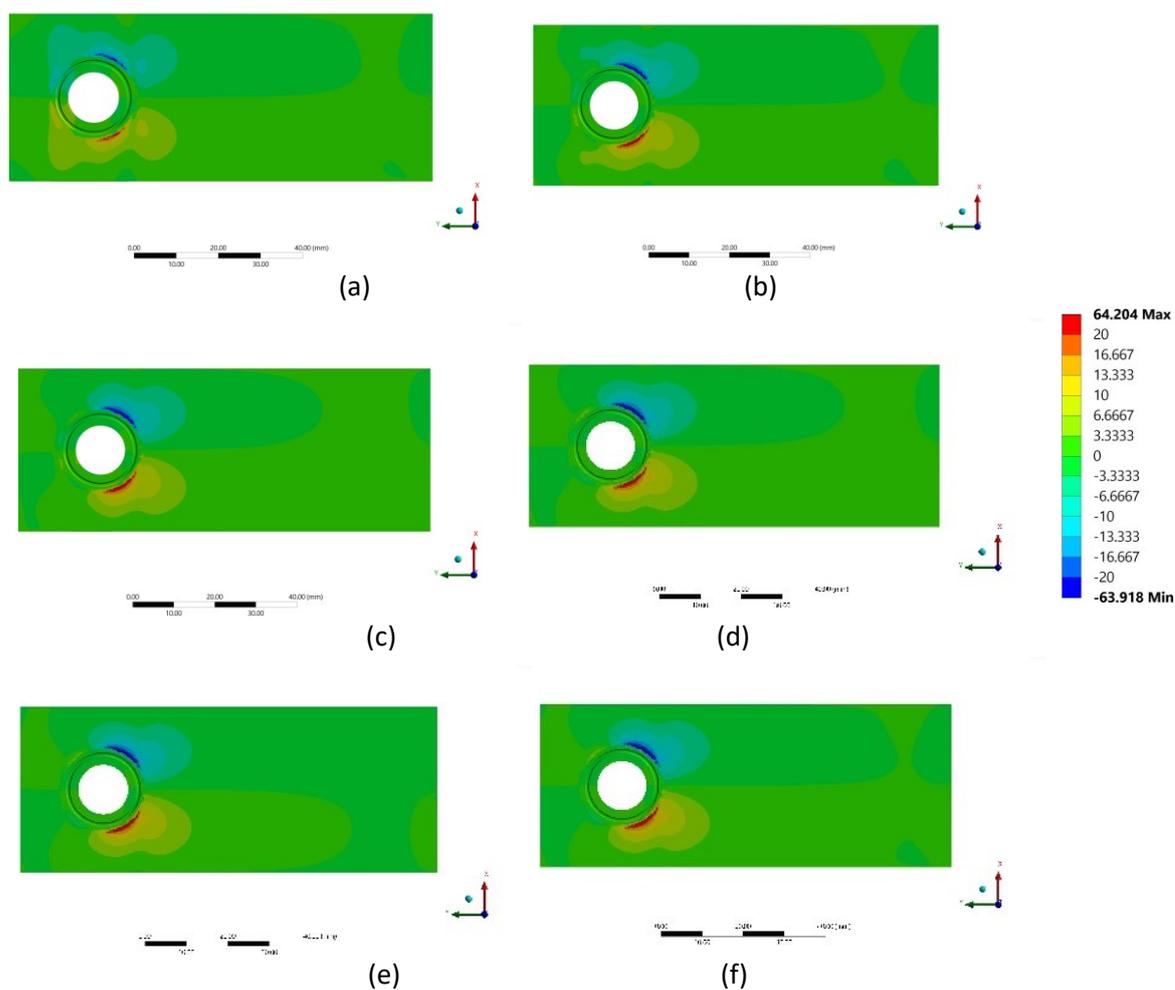


Figura 41 Tensão de cisalhamento após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) A471 20W (e) A479 20W (f) ZTA 20W (g) legenda total S12.

Resultados de tensão de cisalhamento máxima para insertos cerâmicos 18F (Figura 42) para insertos cerâmicos 20F (Figura 43) e insertos cerâmicos 20W (Figura 44).

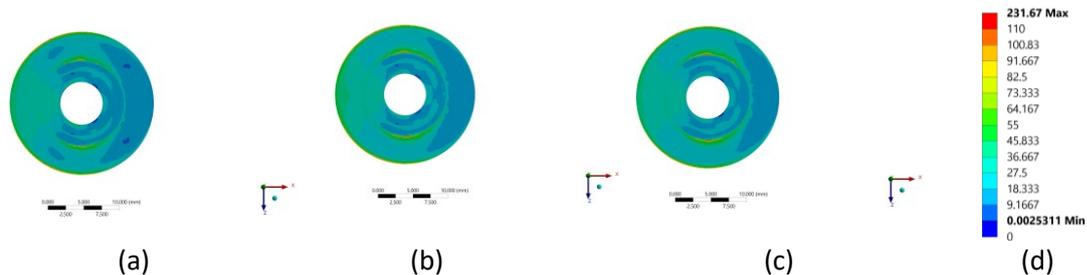


Figura 42 Tensão de cisalhamento máxima após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A471 18F (b) A479 18F (c) ZTA 18F (d) legenda total S12.

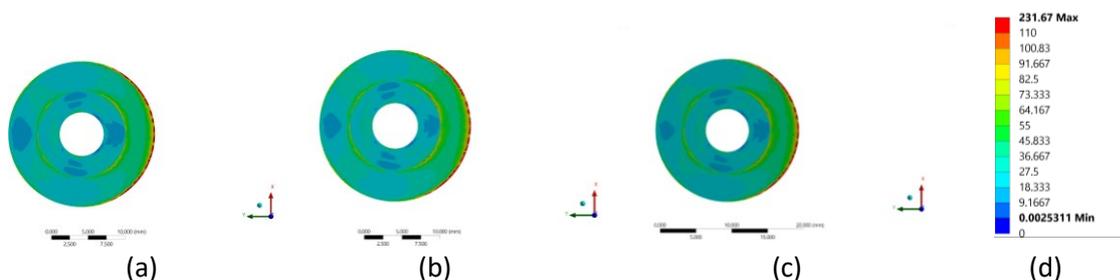


Figura 43 Tensão de cisalhamento máxima após resultados de simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A471 20F (b) A479 20F (c) ZTA 20F (d) legenda total S12.

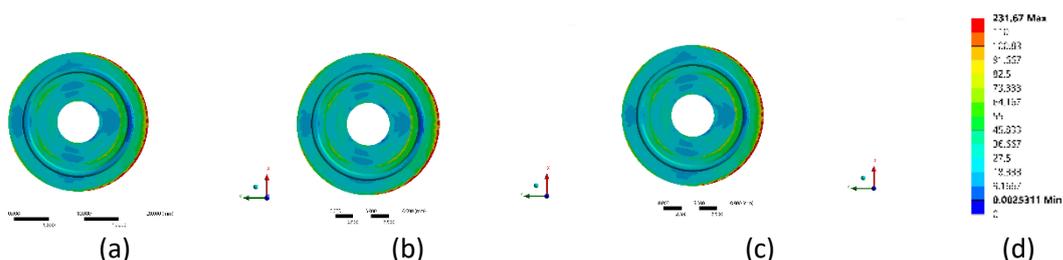


Figura 44 Resultados de tensão de cisalhamento máximo após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A471 20W (b) A479 20W (c) ZTA 20W (d) legenda total de Tresca.

Resultados de estresse equivalente de Von Mises para insertos metálicos 18F (Figura 45) para insertos metálicos 20F (Figura 46) e insertos metálicos 20W (Figura 47).

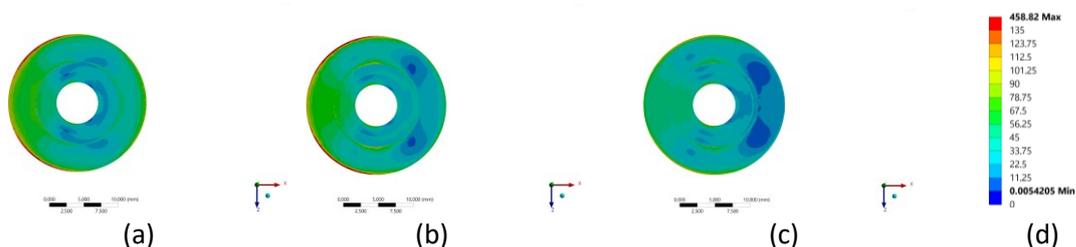


Figura 45 Resultados de tensão equivalente após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A18F (b) S18F (c) T18F (d) legenda total de Von Mises equivalente.

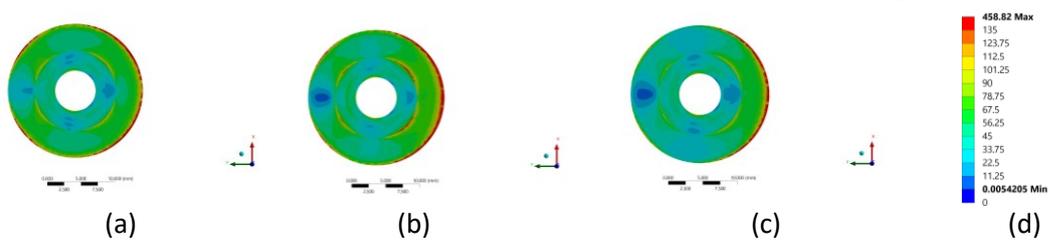


Figura 46 Resultados de tensão equivalente após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20F (b) S20F (c) T20F (d) legenda total de Von Mises equivalente.

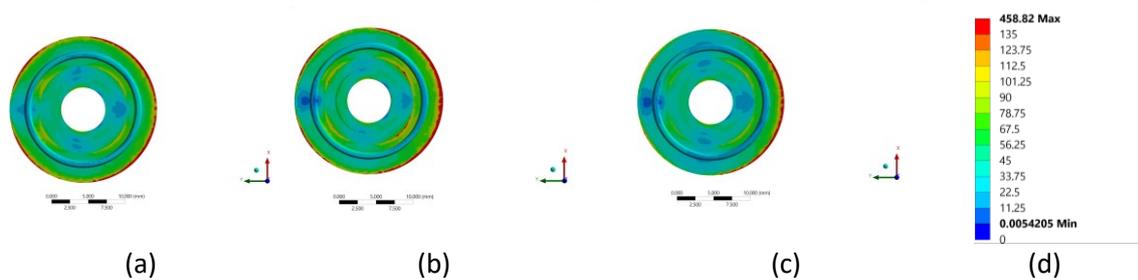


Figura 47 Resultados de tensão equivalente após simulação de expansão térmica e carga de rolamento: (a) A20W (b) S20W (c) T20W (d) legenda total de Von Mises equivalente.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

5.1.1 Geometria dos insertos e processo de fabricação dos compósitos

Após algumas infusões com abordagens diferentes, o processo com um molde híbrido e o uso de peso sobre o saco de vácuo após a infusão de resina teve bons resultados para a rigidez da placa e a posição dos insertos. No entanto, ainda é difícil prever a rigidez final da placa, e o processo manual, como cortar as bordas e os furos na pré-forma de fibra de carbono, é uma fonte importante de imperfeições. Uma baixa precisão é alcançada ao cortar as bordas de fibra de carbono e os furos na posição desejada.

No final, os 42 espécimes apresentaram boa geometria e as infusões foram realizadas com sucesso. Os insertos de alumina 20F e 20W podem ser comparados com insertos de alumínio e aço. Infelizmente, apenas insertos metálicos 18F foram produzidos durante o trabalho. As infusões 2, 3, 6 e 7 forneceram resultados realmente bons, o que confirma que o peso sobre o saco de vácuo é extremamente importante para a geometria final da placa.

Finalmente, o uso de um molde híbrido mostrou ser uma boa abordagem para limitar a expansão do molde de silicone durante a infusão, mas a necessidade de imprimir uma nova peça rígida para cada infusão pode ser uma grande desvantagem.

5.1.2 Simulações numéricas no Ansys Workbench 2021

Após a realização das simulações numéricas FEM, resultados interessantes foram alcançados. No entanto, uma grande preocupação com relação às concentrações de estresse nas áreas de contato é necessária para analisá-las, pois elas podem mascarar a visualização dos valores de estresse tanto na placa CFRP quanto no inserto. A alteração dos valores máximos e mínimos da escala de cores e a fixação da mesma escala para todos os insertos diferentes para a mesma simulação ajudaram a possibilitar a comparação entre os seis materiais diferentes.

Em geral, os resultados para ambas as condições de carga tiveram uma tendência semelhante, como esperado a partir de resultados disponíveis na literatura, com a direção perpendicular às fibras sendo consideravelmente menos solicitada do que a direção das fibras, devido à propriedade ortotrópica do compósito, e um estresse de cisalhamento quase zero, em vista da simetria das camadas de fibra de carbono. Além disso, para as três combinações diferentes de condições de contorno, os resultados dos três insertos cerâmicos foram muito semelhantes entre si e ao inserto de liga de titânio e superior ao de aço e liga de alumínio. Como esperado, os insertos de liga de alumínio sofreram mais com a expansão térmica, seguidos pelos de aço, e depois o de liga de titânio; todos os cerâmicos tiveram um desempenho melhor para uma condição de aquecimento de 60K.

Por outro lado, é difícil prever o comportamento real do inserto sem um critério de falha adequado que irá conectar todos os estresses e calcular um coeficiente com base no

limite de todos os materiais para indicar quais são mais resistentes às cargas e quais são mais suscetíveis a falhas.

5.2 Trabalhos futuros

Os próximos passos, com a análise numérica, consistem em melhorar a formulação de contato no software Ansys APDL e usar um Critério de Falha para entender melhor a influência das condições de carga no CFRP e no inserto.

Além disso, na frente experimental, os próximos passos são usar os espécimes para realizar testes experimentais em temperatura alta, temperatura baixa e carga de rolamento para analisar a resposta a diferentes condições e comparar com os resultados numéricos. Também, para fazer um melhor espécime com fibras contínuas, um padrão deve ser desenvolvido levando em conta o furo e colocando a fibra estrategicamente usando a máquina de costura TFP.

REFERÊNCIAS

- [1] S. D. Thoppul, J. Finegan, R. F. Gibson, Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – a review, *Composites Science and Technology* 69 (2009) 301–329. doi:10.1016/j.compscitech.2008.09.037.
- [2] M. Chishti, C. H. Wang, R. S. Thomson, A. C. Orifici, Experimental investigation of damage progression and strength of countersunk composite joints, *Composite Structures* 94 (2012) 865–873. doi:10.1016/j.compstruct.2011.10.011.
- [3] R. Starikov, J. Schön, Quasi-static behaviour of composite joints with countersunk composite and metal fasteners, *Composites Part B: Engineering* 32 (2001) 401–411. doi:10.1016/S1359-8368(01)00013-0.
- [4] A. Pramanik, A. Basak, Y. Dong, P. Sarker, M. Uddin, G. Littlefair, A. Dixit, S. Chattopadhyaya, Joining of carbon fibre reinforced polymer (cfrp) composites and aluminium alloys – a review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 101 (2017) 1–29. doi:10.1016/j.compositesa.2017.06.007.
- [5] P. Camanho, C. Tavares, R. de Oliveira, A. Marques, A. Ferreira, Increasing the efficiency of composite single-shear lap joints using bonded inserts, *Composites Part B: Engineering* 36 (2005) 372–383. doi:10.1016/j.compositesb.2005.01.007.
- [6] P. Camanho, A. Fink, A. Obst, S. Pimenta, Hybrid titanium–cfrp laminates for high-performance bolted joints, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40 (2009) 1826–1837. doi:10.1016/j.compositesa.2009.02.010.
- [7] A. Fink, P. Camanho, J. Andrés, E. Pfeiffer, A. Obst, Hybrid cfrp/titanium bolted joints: Performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor, *Composites Science and Technology* 70 (2010) 305–317. doi:10.1016/j.compscitech.2009.11.002.
- [8] X. Cheng, S. Wang, J. Zhang, W. Huang, Y. Cheng, J. Zhang, Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method, *Composite Structures* 160 (2017) 8–15. doi:10.1016/j.compstruct.2016.10.042.
- [9] Z. Peng, X. Nie, Galvanic corrosion property of contacts between carbon fiber cloth materials and typical metal alloys in an aggressive environment, *Surface and Coatings Technology* 215 (2013) 85–89. doi:10.1016/j.surfcoat.2012.08.098.
- [10] A. Atas, C. Soutis, Subcritical damage mechanisms of bolted joints in cfrp composite laminates, *Composites Part B: Engineering* 54 (2013) 20–27. doi:10.1016/j.compositesb.2013.04.071.
- [11] P. P. Camanho, F. L. Matthews, Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in frp: a review (1997). 38
- [12] A. Galinska, Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. ‘ part i: Bolted joining, *Polymers* 12 (2020) 2252. doi:10.3390/polym12102252.
- [13] A. R. Rispler, G. P. Steven, L. Tong, Photoelastic evaluation of metallic inserts of optimised shape, *Composites Science and Technology* 60 (2000) 95–106. doi:10.1016/S0266-3538(99)00107-4.
- [14] A. Fink, B. Kolesnikov, Hybrid titanium composite material improving composite structure coupling, in: K. Fletcher (Ed.), *Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing 2005*, Vol. 581 of ESA Special Publication, 2005, p. 135.1.

- [15] B. Kolesnikov, L. Herbeck, A. Fink, Cfrp/titanium hybrid material for improving composite bolted joints, *Composite Structures* 83 (2008) 368–380. doi:10.1016/j.compstruct.2007.05.010.
- [16] S. Akbarpour, S. Hallström, Enhancing the performance of bolted joints in composites by use of patched steel or titanium inserts, *Composite Structures* 275 (2021) 114464. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114464.
- [17] P. Jakubczak, J. Bienias, The response of hybrid titanium carbon laminates to the low-velocity impact, *Engineering Fracture Mechanics* 246 (2021) 107608. doi:10.1016/j.engfracmech.2021.107608.
- [18] J. Sun, A. Daliri, G. Lu, D. Ruan, Y. Lv, Tensile failure of fibre-metal-laminates made of titanium and carbon-fibre/epoxy laminates, *Materials & Design* 183 (2019) 108139. doi:10.1016/j.matdes.2019.108139.
- [19] R. Li, D. Kelly, A. Crosky, Strength improvement by fibre steering around a pin loaded hole, *Composite Structures* 57 (2002) 377–383. doi:10.1016/S0263-8223(02)00105-8.
- [20] M. Tosh, D. Kelly, On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (2000) 1047–1060. doi:10.1016/S1359-835X(00)00063-4.
- [21] O. Asi, An experimental study on the bearing strength behavior of al₂o₃ particle filled glass fiber reinforced epoxy composites pinned joints, *Composite Structures* 92 (2010) 354–363. doi:10.1016/j.compstruct.2009.08.014.
- [22] E. Sevkat, M. Brahim, S. Berri, A novel manufacturing technique to improve bearing strength of pin loaded woven composites, *Advanced Composites Letters* 20 (2011) 096369351102000. doi:10.1177/096369351102000304.
- [23] P. Mattheij, K. Gliesche, D. Feltin, 3d reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement. URL www.elsevier.com/locate/compositesa 39
- [24] P. Mattheij, K. Gliesche, D. Feltin, Tailored fiber placement - mechanical properties and applications, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 17 (1998) 774–786. doi:10.1177/073168449801700901.
- [25] K. Uhlig, L. Bittrich, A. Spickenheuer, J. H. S. Almeida, Waviness and fiber volume content analysis in continuous carbon fiber reinforced plastics made by tailored fiber placement, *Composite Structures* 222 (8 2019). doi:10.1016/j.compstruct.2019.110910.
- [26] L. Bittrich, A. Spickenheuer, J. H. S. Almeida, S. Müller, L. Kroll, G. Heinrich, Optimizing variable-axial fiber-reinforced composite laminates: The direct fiber path optimization concept, *Mathematical Problems in Engineering* 2019 (2019). doi:10.1155/2019/8260563.
- [27] M. Eckrich, P. A. Arrabiyeh, A. M. Dlugaj, D. May, Structural topology optimization and path planning for composites manufactured by fiber placement technologies, *Composite Structures* 289 (2022) 115488. doi:10.1016/j.compstruct.2022.115488.
- [28] A. Elvas, A. Sohoul, A. Suleman, Simultaneous topology and fiber path optimization of composite structures with mac constraints, *Composite Structures* 294 (2022) 115645. doi:10.1016/j.compstruct.2022.115645.

- [29] V. S. Papapetrou, C. Patel, A. Y. Tamijani, Stiffness-based optimization framework for the topology and fiber paths of continuous fiber composites, *Composites Part B: Engineering* 183 (2020) 107681. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107681.
- [30] P. Auerkari, Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics, Technical Research Centre of Finland, 1996.
- [31] S. M. Aceves, F. Espinosa-Loza, E. Ledesma-Orozco, T. O. Ross, A. H. Weisberg, T. C. Brunner, O. Kircher, High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels, *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (3) (2010) 1219–1226. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.11.069. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909018394>
- [32] R. Damani, D. Rubeša, R. Danzer, Fracture toughness, strength and thermal shock behaviour of bulk plasma sprayed alumina — effects of heat treatment, *Journal of the European Ceramic Society* 20 (2000) 1439–1452. doi:10.1016/S0955-2219(00)00033-9.
- [33] P. C. Milak, F. D. Minatto, A. D. N. Jr., O. R. K. Montedo, Wear performance of alumina-based ceramics - a review of the influence of microstructure on erosive wear, *Cerâmica* 61 (2015) 88–103. doi:10.1590/0366-69132015613571871.
- [34] M. Schwentenwein, J. Homa, Additive manufacturing of dense alumina ceramics, *International Journal of Applied Ceramic Technology* 12 (2015) 1–7. doi:10.1111/ijac.12319.