

DARLAN MACHADO DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA DISPOSIÇÃO DE PINOS
DEPOSITADOS POR SOLDAGEM CMT-PIN EM
UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

DARLAN MACHADO DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA DISPOSIÇÃO DE PINOS DEPOSITADOS POR
SOLDAGEM CMT-PIN EM UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

UBERLÂNDIA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729
2018 Souza, Darlan Machado de, 1991-
Influência da disposição de pinos depositados por soldagem CMT-
PIN em união híbrida metal-compósito [recurso eletrônico] / Darlan
Machado de Souza. - 2018.

Orientador: Ruham Pablo Reis.

Coorientador: Edson Cocchieri Botelho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1202>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem. 3. Materiais compostos. 4.
Aeronaves. I. Reis, Ruham Pablo, 1979- (Orient.). II. Botelho, Edson
Cocchieri (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



TERMO

ALUNO: Darlan Machado de Souza

MATRÍCULA: 11622EMC006

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação **LINHA DE PESQUISA:** Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “Influência da Disposição de Pinos Depositados por Soldagem CMT-PIN em União Híbrida Metal-Compósito”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

COORIENTADOR: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro E - Bloco 5O, Campus Santa Mônica, em 20 de agosto de 2018, às 08:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis (orientador) - UFU

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho (coorientador) - UNESP/Guaratinguetá

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior - UFU

Profa. Dra. Michelle Leali Costa - UNESP/Guaratinguetá

Uberlândia, 20 de agosto de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/08/2018, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/08/2018, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michelle Leali Costa, Usuário Externo**, em 20/08/2018, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edson Cocchieri Botelho, Usuário Externo**, em 20/08/2018, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0654098** e o código CRC **C02DEC18**.

*Aos meus pais, Ivanir e Rosimeri.
Aos meus irmãos Darlex e Alex.
À minha amada esposa Pâmela Zati Ferreira Machado.
A toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças para nunca desistir, a minha família, meus pais, Ivanir e Rosimeri, que todo o tempo me encorajaram.

À minha amada esposa, Pâmela Zati Ferreira Machado, pelo companheirismo, pela compreensão e por me apoiar durante todo este longo período.

Ao meu orientador Prof. Ruham Pablo Reis, pela amizade, orientação, compreensão, paciência e total apoio.

Ao meu co-orientador Prof. Edson Cocchieri Botelho, pela orientação, ensinamento e oportunidade.

A Prof.^a Núbia dos Santos Saad, pelo auxílio na execução dos ensaios de cisalhamento por tração.

Ao Prof. Douglas Bezerra de Araújo, pelo auxílio na realização da aquisição de imagens térmicas no ensaio de cisalhamento por tração.

Aos pós-graduandos Iaroslav Skhabovskyi, Alberto Lima Santos e Leonardo da Silva pela amizade e pelo auxílio na deposição dos pinos *CMT-PIN*, na laminação e cura dos compósitos e nas imagens de MEV, respectivamente.

Aos engenheiros e técnicos de laboratório Douglas Trindade Mazer e Diandro Bailoni Fernandes.

Ao Grupo LAPROSOLDA/UFU (processo *CMT-PIN*), ao Laboratório de Processamento e Análises Térmicas/FEG-UNESP (laminação do compósito) e ao LMEst/UFU (ensaio de tração) pelo apoio técnico e laboratorial.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade de realizar este trabalho.

À Alltec Indústria de Componentes em Materiais Compostos pela doação dos materiais pré-impregnados de fibra de vidro.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma ajudaram a tornar a conclusão deste trabalho possível.

DE SOUZA, D. M. **Influência da Disposição de Pinos Depositados por Soldagem CMT-PIN em União Híbrida Metal-Compósito**. 2018. 109 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

RESUMO

Materiais compósitos, especialmente os de matriz polimérica, são atualmente utilizados nos mais diversos setores industriais, principalmente na área de transportes na qual estruturas leves são indispensáveis. Devido a este motivo e à coexistência de partes metálicas nestes tipos de estruturas, este trabalho visa avaliar o desempenho de união híbrida metal-compósito em termos da disposição (inclinação e distribuição) de pinos depositados por soldagem *CMT-PIN* em comparação a união apenas adesiva. Foram utilizadas juntas do tipo sobreposta simples, sendo o constituinte metálico em aço inoxidável AISI 304 para as chapas e ER309LSI para os pinos e o constituinte compósito formado por 15 camadas de tecido em fibra de vidro pré-impregnado com resina epóxi (7781-38"-F155). Foram utilizados pinos com o menor comprimento possível e do tipo cabeça abaulada, depositados em grupo de 25 com três inclinações diferentes (90°, 60° e 120°) em relação à superfície da chapa metálica. Considerou-se também duas distribuições de deposição, sendo os pinos depositados com espaçamento uniforme e de maneira concentrada nas bordas das juntas. Para avaliação de desempenho foi utilizado ensaio de cisalhamento por tração em juntas na condição envelhecida hidricamente e não envelhecida. Como forma de avaliar o modo de falha das juntas híbridas, foram capturadas imagens reais e térmicas durante a solicitação mecânica. Os pinos utilizados para a união híbrida foram capazes de melhorar significativamente o desempenho em cisalhamento das juntas metal-compósito em termos de energia de cisalhamento, carga máxima suportada e deslocamentos em carga máxima e final (total), com o envelhecimento hidrotérmico apenas atenuando os resultados. As formas de disposição dos pinos avaliadas não surtiram, no geral, efeito relevante, sendo que os pinos realmente inclinados (60° e 120°) tiveram efeitos adversos, o que anulou possíveis implicações positivas ou negativas da inclinação. Verificou-se também que a presença dos pinos evita o rompimento catastrófico das juntas metal-compósito, proporcionando uma resistência residual aliada ao aumento da capacidade de deformação da junta, isso, sem praticamente acréscimo significativo de peso.

Palavras Chave: Juntas híbridas, União metal-compósito, CMT-PIN e Envelhecimento hidrotérmico.

DE SOUZA, D. M. **Effects of the Disposition of Pins Deposited by CMT-PIN Welding on Metal-Composite Hybrid Joining**. 2018. 109 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil.

ABSTRACT

Composite materials, especially those of polymer matrix, are currently used in a wide range of industrial sectors, especially in the area of transport in which light structures are indispensable. Due to this reason and the coexistence of metal parts in these types of structures, this work aims to evaluate the performance of hybrid metal-composite joining in terms of the disposition (inclination and distribution) of pins deposited by CMT-PIN welding in comparison to adhesive bonding. Simple overlap joints were used, the metallic constituent being AISI 304 stainless steel plates and ER309LSI pins and the composite constituent formed by 15 layers of fiberglass fabric pre-impregnated with epoxy resin (7781-38"-F155). Pins with the shortest possible length and of the ball-head type were used, deposited in a group of 25 with three different inclinations (90°, 60° and 120°) in relation to the surface of the metal. Two deposition distributions were also considered, with the pins deposited with uniform spacing and in a concentrated manner at the edges of the joints. To evaluate the performance, a tensile shear test was used in joints in water-aged and not aged condition. As a way to evaluate the failure mode of the hybrid joints, real and thermal images were captured during the mechanical tests. The pins used for hybrid joining were able to significantly improve the shear performance of the metal-composite hybrid joints in terms of shear energy, maximum supported load and maximum and final (total) displacements, with water aging only attenuating the results. The disposition of the evaluated pins did not have, in general, any relevant effect, and the actual inclined pins (60 ° and 120 °) had adverse effects, which cancelled possible positive or negative consequences of the inclination. It was also verified that the presence of the pins avoids the catastrophic rupture of the metal-composite joints, providing a residual resistance coupled with the increase in the deformation capacity of the joint, without practically any significant increase in weight.

Keywords: Hybrid joints, Metal-composite joining, CMT-PIN and Water aging.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	<i>Altitude Adaptation</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BA	<i>Base Adaptation</i>
BCA	<i>Ball/Cyl. Adaptation</i>
CB	Concentrados nas Bordas
CFRP	<i>Carbon Fibre Reinforced Polymer</i>
CMT	<i>Cold-Metal Transfer</i>
CPs	Corpos de Prova
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
DLS	<i>Double lap shear specimen</i>
FAJ	<i>Friction Assisted Joining</i>
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FML	<i>Fiber-metal laminates</i>
GLARE	<i>Glass Reinforced Aluminum Laminate</i>
IE	Igualmente Espaçados
JH	Juntas híbridas
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
Prepregs	<i>Pré-impregnados</i>
PEEK	Poli (éter-éter-cetona)
T	Período de deposição
t_{pino}	Tempo deposição do pino
$t_{\text{transição}}$	Tempo de transição
$t_{\text{gás}}$	Tempo de aplicação do gás proteção
t_{arco}	Tempo para abrir o arco de soldagem
t_{soldar}	Tempo soldar arame na peça
t_{ruptura}	Tempo ruptura do arame-eletrodo
RTM	Moldagem por transferência de resina

SLJ	<i>Single-lap joints</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	viii
Capítulo I - Introdução e Justificativas	1
Capítulo II - Revisão Bibliográfica	6
2.1 Tipos de União Metal-Compósito	6
2.1.1 Uniões aparafusadas e rebitadas.....	6
2.1.2 Uniões adesivas.....	7
2.1.3 Uniões híbridas	10
2.1.3.1 Uniões híbridas com pinos metálicos	10
2.1.4 Uniões híbridas com pinos Z.....	20
2.2. Tratamento Superficial de Metais	21
2.2.1 Tratamento mecânico	22
2.2.2 Tratamentos químicos e/ou eletroquímicos.....	22
2.2.3 Texturização laser.....	23
2.3 Pré-impregnados.....	24
Capítulo III - Metodologia Geral	26
Capítulo IV - Fabricação das Juntas Metal-Compósito.....	30
Capítulo V - Caracterização das Juntas Metal-Compósito	39
5.1 Características dos Pinos <i>CMT-PIN</i>	39
5.2 Características das Secções Transversais das Juntas Híbridas	41
5.3 Caracterização de Massa dos Corpos de Prova.....	44
Capítulo VI - Resultados e Discussões das Juntas Metal-Compósito Não Envelhecidas	46
Capítulo VII - Resultados e Discussões das Juntas Metal-Compósito Envelhecidas	73
7.1 Envelhecimento Hidrotérmico.....	73
7.2 Juntas Não Envelhecidas <i>versus</i> Juntas Envelhecidas	86
Capítulo VIII - Conclusões	89
Capítulo IX - Recomendações para Trabalhos Futuros.....	92
Capítulo X - Referências Bibliográficas.....	93

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Materiais compósitos, especialmente os de matriz polimérica, são hoje utilizados nos mais diversos setores industriais, principalmente na área de transportes, na qual estruturas leves são indispensáveis. Dentro deste nicho, a indústria aeroespacial se destaca pela porcentagem de utilização de compósito em seus produtos. E a utilização de materiais compósitos em componentes e estruturas aeroespaciais aumentou consideravelmente nos últimos anos. Segundo Bertling et al. (2016), a proporção de estruturas produzidas a partir de materiais compósitos reforçados com fibras no setor da aviação passou de aproximadamente 3% na década de 1970 (aeronave Airbus A300) para mais de 50% em 2011 (aeronave Airbus A350).

Em termos industriais globais e mais recentes, a tendência não é diferente como apresentado na Fig. 1.1. A demanda por compósitos não é exclusiva do setor aeroespacial, apesar de seu expressivo domínio, como pode ser observado na Fig. 1.2. Assim, outras várias aplicações industriais como, por exemplo, na fabricação de turbinas eólicas, de artigos esportivos e de automóveis explicitam a importância de desenvolvimento de novas maneiras de unir partes metálicas ainda remanescentes nos projetos com partes compósitas (BUSCH, 2016). Tomando o setor automotivo como exemplo, o novo conceito para o modelo Audi TT apresenta todo o seu chassi fabricado em compósito reforçado com fibra de vidro, o que proporciona uma diminuição de 300 Kg no peso total do carro, mas leva à necessidade de diversas uniões com as partes metálicas utilizadas (FURLAN, 2017).

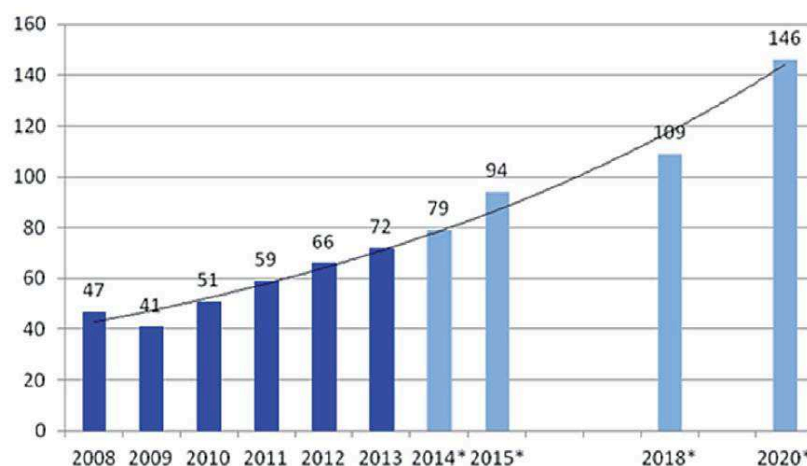


Figura 1.1 - Demanda global de polímero reforçado com fibra de carbono (CRP) entre 2008-2020 em mil toneladas (*estimado) (HOLMES, 2014).

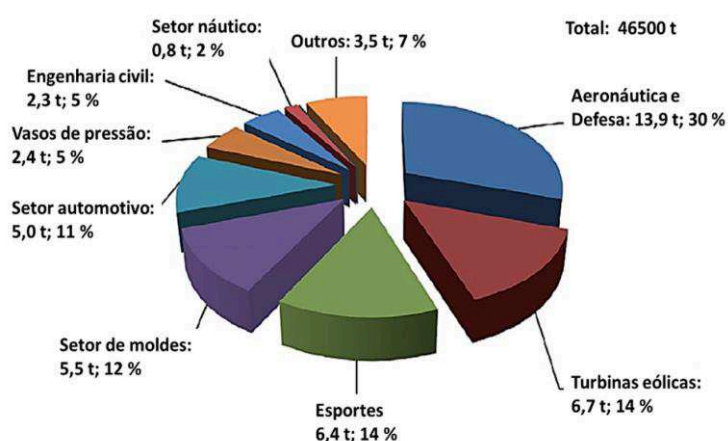


Figura 1.2 - Demanda global de fibra de carbono (FC) por aplicação no ano de 2013 em mil toneladas (HOLMES, 2014).

Esta realidade tem sido impulsionada principalmente por fatores econômicos e técnicos, visando a otimização dos projetos estruturais. Sendo assim, se faz necessário um material que combine elevado módulo de elasticidade com alta resistência mecânica (alto desempenho), massa específica (que leva a menos consumo de combustível), elevada resistência à corrosão e boas propriedades de fadiga (SINMAZÇELIK et al., 2011), requisitos estes todos atendidos pelos materiais compósitos. Diante disso, como visto na Fig. 1.3, o emprego de materiais compósitos em aviões militares atuais é bastante elevado, mas partes desses aviões continuam sendo fabricadas a partir de outros materiais, principalmente metais de baixo peso e alta resistência mecânica.

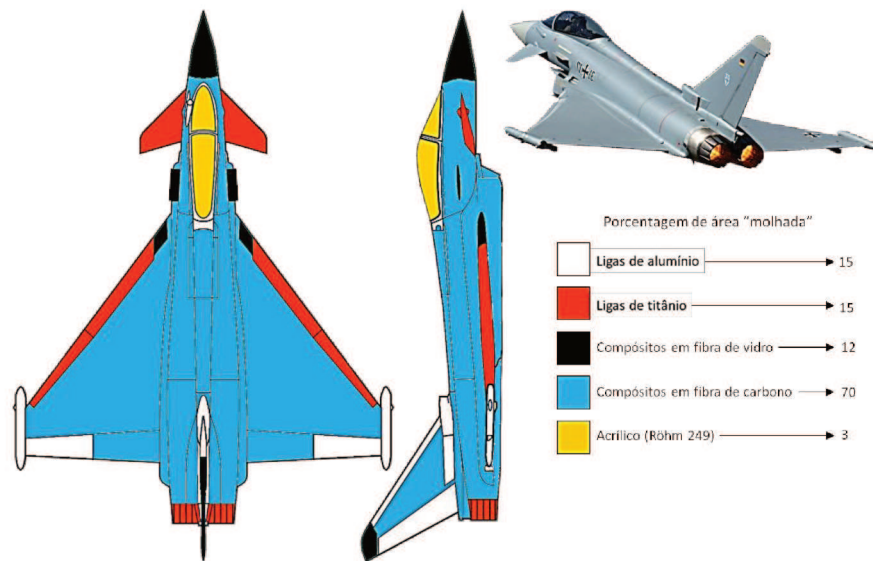


Figura 1.3 - Materiais no Eurofighter Typhoon (Baseado em EUROFIGHTER, 2017).

O cenário é bastante semelhante na indústria de aeronaves comerciais/civis. A Figura 1.4 mostra o quão alto é o uso de materiais compósitos na aviação comercial de última geração. Nota-se, entretanto, que apesar de um grande número de estruturas destas aeronaves serem feitas em compósitos, o uso de materiais metálicos permanece mais uma vez bastante significativo. Diante da demanda prevista por aeronaves civis nos próximos anos (Fig.1.5), espera-se da mesma forma maior uso de materiais compósitos e assim possivelmente da necessidade de integração destes com materiais metálicos (ligas de alumínio e aço inoxidável, por exemplo). O consumo dos diferentes materiais utilizados para produção de aeronaves em geral é exposto na Fig. 1.6.

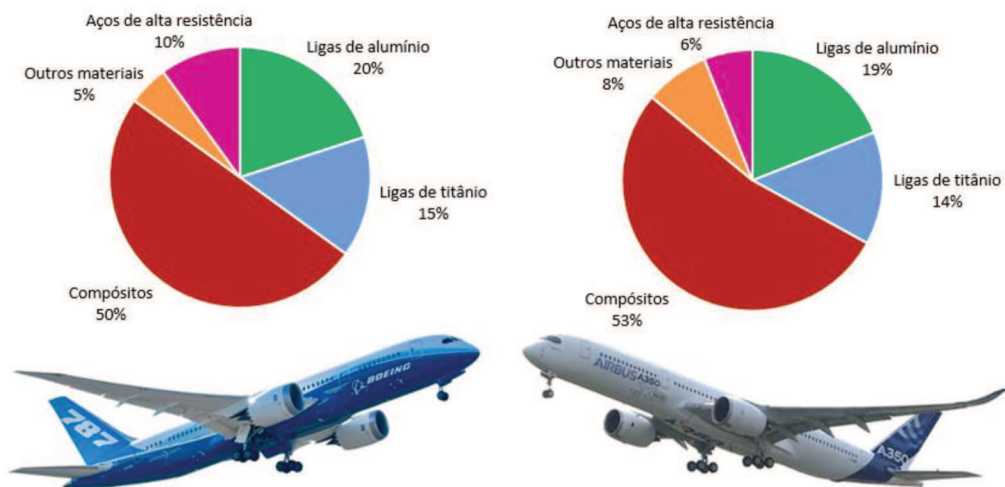


Figura 1.4 - Materiais utilizados no Boeing 787 Dreamliner e no Airbus A350 XWB (Baseado em BOEING e AIRBUS, 2017).

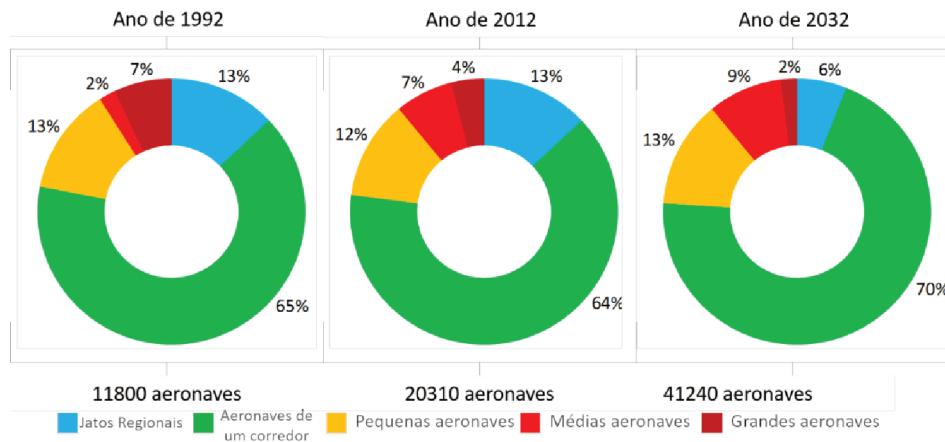


Figura 1.5 - Projeção da demanda unitária de aeronaves civis até 2032 (Baseado em CAMPBELL, 2016).

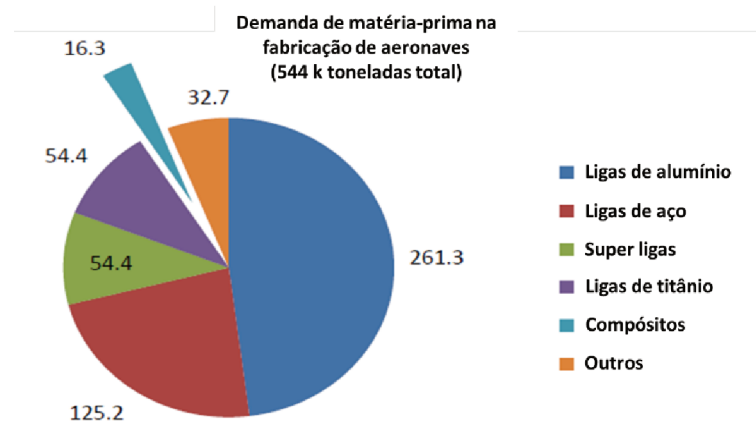


Figura 1.6 - Demanda de matéria-prima para fabricação de aeronaves (DAS et al., 2016).

Assim, o notável uso de compósitos em aeronaves modernas enfatizou a necessidade de uma integração eficiente entre estruturas metálicas e compósitas adjacentes por meio de processos de união avançados. Contudo, os dois materiais, um polímero reforçado com fibras (ortotrópico) e um metal (isotrópico), têm propriedades e métodos de fabricação diferentes, resultando em dificuldades para estabelecer uma união eficaz entre os dois (UCSNIK et al., 2010).

Para realizar tais operações de união, é possível utilizar a fixação por elementos mecânicos, geralmente através de rebites e parafusos, o que pode resultar em alta resistência estática. No entanto, a destruição de fibras de reforço e o enfraquecimento da seção transversal pelos furos necessários à montagem destes elementos de fixação, concentração de tensões em torno dos furos (problemas de fadiga) e problemas com folga de encaixe são

inconvenientes para esta técnica (UCSNIK et al., 2010). Outra maneira de unir é usar juntas adesivas (coladas), que apresentam a vantagem de terem um melhor acabamento, isto é, reduzem a ruptura do fluxo de ar que se traduz em alta eficiência aerodinâmica para a aeronave (RIBEIRO, 2009), além de evitar concentrações de tensão (bom desempenho em fadiga). A escolha adequada da técnica de união é essencial para proporcionar uma transferência de carga segura com baixo peso. Apesar dos avanços na integração entre estruturas em compósito e metálicas, os desafios associados ainda impedem a plena utilização dos benefícios potenciais da introdução de materiais compósitos em vários ramos de fabricação na indústria aeroespacial.

Recentemente, a combinação de uniões adesivas com elementos mecânicos de fixação, as chamadas uniões híbridas, tem sido alvo de investigação e apresentado resultados com desempenho mecânico superior e sem penalizar o peso das estruturas, se comparado à utilização de métodos de união puramente adesivos ou por elementos mecânicos de fixação (UCSNIK et al., 2010). Como será detalhado mais adiante, recentemente se tornou possível ter pequenos pinos metálicos soldados na parte metálica, por uma técnica baseada a soldagem *MIG/MAG (CMT-PIN)*, antes da laminação de compósito sobre esta, o que então forma uma união híbrida metal-compósito. Esta combinação de união tem apresentado resultados promissores (exemplificados mais adiante), mas ainda restrita a materiais de elevada densidade como, por exemplo, aços inoxidáveis. Vários pontos ainda precisam ser investigados antes de se buscar estender a aplicação em juntas formadas por metais leves (alumínio e titânio) e compósitos, e então beneficiar a indústria aeronáutica.

Assim, o principal objetivo da dissertação apresentada é avaliar como prova de conceito alguns aspectos relacionados com o desempenho de juntas híbridas metal-compósito em carregamento de cisalhamento por tração com diferentes disposições de pinos depositados por soldagem *CMT-PIN*. Espera-se que a resina do lado compósito traga as vantagens da união adesiva, enquanto que os pinos soldados no lado metálico ancorem o compósito, melhorando então o desempenho da junta. Os objetivos específicos serão em termos de avaliar experimentalmente a influência dos seguintes fatores/condições na junta híbrida:

- Inclinação dos pinos;
- Distribuição dos pinos (igualmente espaçados e concentrados mais nas bordas da junta);
- Envelhecimento hidrotérmico.

A fim de apoiar esta dissertação, uma discussão sobre temas considerados chave para o desenvolvimento do trabalho é realizada a seguir em forma de revisão bibliográfica.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como citado anteriormente no Capítulo I, o foco do trabalho foi estudar uniões híbridas metal-compósito com pinos ancoradores depositados pelo processo *CMT-PIN*. Entretanto, uma contextualização dos principais métodos de união entre metais e compósitos e de possíveis técnicas para melhoria deste tipo de união, estudados e/ou utilizados atualmente pela indústria, se fez necessária para definir melhor a metodologia de fabricação das juntas híbridas, bem como para prover base para comparação com os resultados obtidos.

2.1 Tipos de União Metal-Compósito

2.1.1 Uniões aparafusadas e rebitadas

Juntas aparafusadas e rebitadas são as mais antigas de que se tem conhecimento (YAN et al., 1999). Além disso, uniões por elementos mecânicos de fixação podem ser desmontadas com facilidade, especialmente as aparafusadas. Essa característica é importante, por exemplo, em partes como bordos de ataque de asas e de empenagens de aeronaves que apresentam maior desgaste do que outras áreas (impacto frontal) gerando maior frequência de reparo (VENTURINI, 2010). Na maioria das vezes, materiais metálicos são utilizados nessas regiões, devido a funcionarem como sistemas de aquecimento anti-gelo. Assim, é mais estratégico produzir essas estruturas combinando partes metálicas com partes em compósito.

Várias restrições devem ser consideradas em uniões híbridas metal-compósito fixadas mecanicamente. A primeira restrição existente, segundo Matuszewski (2004), é a não utilização de arruelas simples para a maioria das aplicações, pois seu uso pode facilitar o afrouxamento do parafuso, algo obviamente indesejável. Sendo assim, os parafusos para compósitos devem ter cabeças largas para distribuir cargas sobre uma área de superfície maior, evitando o esmagamento do compósito e aconselha-se a utilização de uma chave dinamométrica para ajustar a pré-carga. Assim, a tendência é que estes elementos de fixação aumentem o peso das estruturas metal-compósito. O segundo ponto de restrição a ser

considerado é a folga entre o parafuso e o compósito. Em geral, quanto mais sem folga (próximo à montagem com ajuste de interferência) melhor. Lin e Tsai (1995) mostraram inclusive que a resistência à ruptura por tração em uniões híbridas com furos moldados é até 20-50% maior do que com furos perfurados, justamente pela presença de folgas no último caso. Novamente segundo Matuszewski (2004), outra questão importante em juntas aparafusadas é a disposição dos elementos de fixação na região de união. Segundo Chutima (1996) a recomendação é que o espaçamento entre parafusos ou rebites deva ser de cerca de 5-6 vezes maior que o diâmetro dos mesmos, pois desta maneira a transferência de carga na junta praticamente não é afetada. Já a distância dos fixadores para a borda da junta deve ser de cerca de 3 vezes maior do que o diâmetro dos mesmos, pois novamente segundo Chutima (1996), produz-se uma transferência mais uniforme da carga tanto para as filas internas como externas de fixadores. A presença de várias filas de fixadores também proporciona uma distribuição de carga mais uniforme, que geralmente se traduz em uma capacidade de carga mais elevada (CHUTIMA et al., 1996). Um aspecto interessante de se ter múltiplas filas de fixadores é que as linhas mais externas (próximas às bordas da junta) transferem o maior percentual de carga entre as partes unidas, portanto, será a primeira a falhar (CHUTIMA et al., 1996).

Para o caso específico da indústria aeronáutica, segundo Borges (2013), os rebites são soluções de união permanentes amplamente aplicadas para juntas estruturais e de custo relativamente baixo se comparado aos parafusos. A principal vantagem dos rebites se deve à instalação rápida/simple e ao baixo peso (fabricados em alumínio ou até titânio). Segundo Jahn et al. (2016), como desvantagem em relação ao uso de parafusos, as juntas rebitadas são consideradas permanentes (só podem ser removidas por furação – perda dos rebites), possuem uma menor resistência em aplicações sob tração e dependem de furos sempre passantes (enfraquecimento das juntas devido ao efeito de concentração de tensões). Em termos mais gerais, juntas rebitadas não são, por si só, estanques nem ao ar nem à água, sendo necessário para vedação total o uso de adesivos ou selantes (STELZER et al., 2016).

2.1.2 Uniões adesivas

A chamada colagem adesiva representa uma técnica de união não destrutiva (não invasiva) para dois materiais diferentes (UCSNIK et al., 2010). O processo de colagem adesiva tem sido usado na fabricação de estruturas e componentes aeroespaciais há cerca de 30 ou 40 anos (MOLLERA et al., 2010). Inicialmente sua utilização estava ligada a aplicações em uniões secundárias (partes eletrônicas e de menor carregamento). Entretanto, segundo Park et al. (2010), os chamados adesivos estruturais atualmente têm levado as uniões adesivas de aplicações estruturais secundárias para primárias (principais e de maior carregamento) em

aeronaves, como uma das maneiras mais eficazes de unir partes estruturais com um alto nível de confiabilidade. Por exemplo, a colagem adesiva estrutural é usada principalmente para fixar reforçadores (*stringers*) em chapas de revestimento (*skins*) de fuselagem e asas, para enrijecer. Uniões adesivas também são aplicadas em ligação de chapas (*skins*) a núcleos do tipo “favo de mel” (*honeycomb*) em compósitos do tipo sanduíche, tais como em superfícies de controle (*ailerons* e *spoilers*) (SCALEA et al., 2001). Estruturas unidas por adesivos são mais resistentes à fadiga do que as estruturas equivalentes unidas por fixadores mecânicos (DAVIS, 1999).

A maioria dos adesivos utilizados para união é constituído de materiais poliméricos (GRASSI et al., 2006). Em projetos estruturais utilizam-se os polímeros termorrígidos, como é caso de resinas epóxi, pois devido as suas características, como por exemplo, boa aderência aos substratos, capacidade de não serem aquecidas e amolecidas repetidamente após a cura inicial, possuem excelente resistência à tração, além de resistirem bem à umidade, ao óleo e muitos outros solventes, proporcionam elevada resistência às juntas nas quais são utilizadas (BUSCH, 2016). Assim, as resinas epóxi são largamente utilizadas para unir diversos metais, tais como ligas de alumínio e ligas de titânio, inclusive para unir metais a compósitos, como, por exemplo, no caso de painéis laminados metal-compósito (BOTELHO et al., 2006).

A maior preocupação dos fabricantes de adesivos estruturais é assegurar um acoplamento perfeito entre o adesivo e os substratos (adesão), para o qual a limpeza cuidadosa das superfícies aderentes contribui significativamente. De acordo com Brockmann et al. (2009), a fim de ser eficaz como um adesivo, uma substância deve cumprir dois requisitos básicos. Primeiramente o adesivo deve ter uma mobilidade molecular elevada, ou seja, necessita ter as propriedades de um líquido mais ou menos viscoso para se aproximar das superfícies aderentes rígidas e irregulares até às dimensões moleculares (dimensões nanométricas) para permitir a união com o material. Em um segundo momento, dentro da camada adesiva, o material deve permitir que as forças de tração e de cisalhamento sejam transmitidas, isto é, em termos técnicos ele precisa se comportar como um objeto sólido. O bom funcionamento do adesivo tecnicamente está relacionado aos princípios de adesão e coesão. A adesão é definida como a força de atração entre moléculas e átomos de duas superfícies diferentes, já o conceito de coesão diz respeito às forças que mantêm unidos os átomos e moléculas de um mesmo corpo (CIAMPONI et al., 1989). Fatores como área adesivada, tipos de juntas e preparação da superfície já foram investigadas em detalhes e demonstraram ter forte influência no desempenho de uniões adesivas (HART, 1973). Embora a massa adesiva adicional introduzida seja em geral muito pequena, quando comparada com parafusos ou rebites, podem ser necessárias grandes áreas de ligação entre as partes para

uma transferência de carga segura (JAHN et al., 2016). Os principais tipos de juntas utilizadas na união adesiva são as juntas de duplo cisalhamento (*double lap shear specimen* – DLS) (UCSNIK et al., 2010) e as juntas sobrepostas simples (*single-lap joints* – SLJ) (STELZER et al., 2016). No que tange a métodos de preparação de superfície, isso será abordado mais adiante.

A aplicação do adesivo nas juntas pode ser realizada sob a forma de linhas ou áreas de superfície. Os seguintes métodos de aplicação são possíveis, com aumento da viscosidade do adesivo na ordem indicada: pulverização, imersão, gotejamento, rolamento, derramamento, pincelamento e estampagem (HABENICHT, 2006). Ao se escolher o método de aplicação, devem ser considerados, entre outros, os seguintes critérios: tipo de adesivo (um ou dois componentes, tempo de vida útil, proporção de mistura dos componentes, viscosidade, sensibilidade à umidade, possível material de enchimento, fornecimento de calor necessário); quantidade de adesivo a ser aplicada; grau de automação desejado; velocidade de aplicação; aplicação em áreas ou linhas; e geometria da superfície de ligação. Como será descrito posteriormente, o adesivo também pode ser oriundo da matriz do compósito se este é laminado diretamente sobre a parte metálica e a junta adesiva é curada concomitantemente ao compósito.

O comportamento de falha espontânea de juntas adesivas por envelhecimento (consequência da combinação de luz, umidade e temperatura de operação) é uma importante desvantagem deste tipo união. A introdução de "rebites de segurança" (então formando como que uma junta híbrida) pode ser adotada como medida protetiva, mas acaba aumentando o peso (STELZER et al., 2016). Da Costa et al. (2012) estudaram o efeito da ciclagem térmica sobre as propriedades mecânicas de *FML* (*fiber-metal laminates*) fabricados com AA2024 e pré-impregnados de epóxi-fibra de vidro. A resistência ao cisalhamento dos *FML* foi avaliada após 1000 e 2000 ciclos (variação rápida da temperatura de -50°C para +80°C). Verificou-se que o envelhecimento através da ciclagem térmica não resultou em piora nas propriedades mecânicas. Botelho et al. (2007) avaliaram a influência do envelhecimento hídrico (80°C e 90% de umidade) sobre as propriedades de compressão e tração para compósitos de epóxi-fibra de vidro e laminados tipo *Glare*. A saturação de umidade nos materiais ocorreu após 42 dias de exposição. Verificou-se que a resistência a tração e a compressão caíram para os compósitos, em comparação com corpos de prova não envelhecidos. Tal comportamento é justificado, segundo os autores, pelo efeito da plastificação da matriz aliado a formação de microtrincas devido a absorção de água. Já para o caso do *Glare* não houve alteração de resistência mecânica.

2.1.3 Uniões híbridas

A combinação de uniões adesivas com elementos mecânicos de fixação, as chamadas uniões híbridas, quando feitas entre metais e compósitos acarretam em um grande desafio para a engenharia moderna. Na maioria dos casos, os materiais apresentam diferentes coeficientes de expansão térmica, e esta diferença acaba levando a um alívio das juntas, principalmente em aplicações sob carregamento combinado, mecânico-térmico, onde após determinado número de ciclos ocorrerá certamente uma falha por fadiga (BORGES, 2013). Outros problemas que devem ser considerados no projeto de juntas híbridas são: a não existência de deformação plástica em materiais compósitos, o que implica que uma falha catastrófica pode ocorrer na resistência máxima (BASHFORD, 1986), as diferenças de propriedades térmicas que geram degradação térmica e futura separação da junta, devido a temperaturas de fusão e calores específicos diferentes, e a baixa miscibilidade (falta de mistura - não ocorrência da união plástica e/ou metalúrgica) (AMANCIO et al., 2012).

2.1.3.1 Uniões híbridas com pinos metálicos

Um dos principais métodos híbridos de união entre metal e compósito investigados nos últimos anos tem sido o uso de pequenas estruturas metálicas produzidas em cima da parte metálica da junta antes da laminação da parte compósita sobre ela, ao que se tem denominado de uniões híbridas avançadas (UCSNIK et al., 2010). Neste caso, pequenos pinos metálicos são usados como ancoradores entre as partes, e Graham et al. (2014) apresentam uma ampla revisão sobre esse tópico. Juntas híbridas com pinos de ancoramento tipicamente apresentam maior resistência e absorção de energia mecânica até o rompimento, como resultado dos modos de falha não catastróficos, do que juntas coladas equivalentes (GRAHAM et al., 2014). As propriedades mecânicas deste tipo de junta são fortemente dependentes do método de produção dos pinos na peça de metal e da interação destes pinos com a parte em compósito (GRAHAM et al., 2014). Várias técnicas têm sido utilizadas para produzir pinos na superfície de metais visando uniões híbridas. Essas técnicas podem ser categorizadas como Reestruturação Superficial (EARL et al., 2012) ou Manufatura Aditiva (UCSNIK et al., 2010).

(a) Reestruturação superficial

A Reestruturação Superficial envolve redistribuição do material do próprio metal sobre sua superfície para criar regiões elevadas e rebaixadas pelo uso de feixes de alta energia. Este método produz micropinos e ao mesmo tempo texturização na superfície do metal, e

poderia ser considerado um processo intermediário entre a deposição de macropinos e os tratamentos apenas superficiais como será destacado mais adiante. Apesar dos bons resultados de desempenho mecânico de juntas híbridas alcançados com estas técnicas, os principais inconvenientes são o controle limitado da geometria das protuberâncias formadas (pinos), danos excessivos à superfície causados pelo processo de reestruturação e os grandes custos associados à utilização de um feixe de elétrons ou laser para "conduzir" o material através da superfície metálica, além de ser considerado um processo lento para aplicações industriais (GRAHAM et al., 2014).

O método de Reestruturação Superficial mais conhecido é chamado comercialmente de *Surfi-Sculpt™* e foi desenvolvido no ano de 2004 pelo The Welding Institute (WANG et al., 2015). Este método consiste em construir pequenas estruturas protuberantes criando um padrão de texturização (*proggles*) (Fig. 2.1) pelo uso feixes de elétrons direcionados para tal (Fig. 2.2). Como ilustrado na Fig. 2.2b, após fundir o material próximo à superfície, esses feixes operam em angulações capazes de empurrar o material fundido por ação combinada da pressão de vapor e da tensão superficial formando uma protuberância (pino) (WANG et al., 2011). Em seguida, parte do material fundido se solidifica, e o procedimento é repetido. Os pinos produzidos podem apresentar diferentes formatos em função das velocidades e energias dos feixes de elétrons (XIONG et al., 2015). O tamanho dos pinos formados pode variar entre 10 µm e 20 mm, e o processo, por exemplo, leva cerca de 10 s para formar uma protuberância de 1,5 mm de altura (BUXTON e DANCE, 2011). O processo é aplicável a todos os metais e a uma grande variedade de outros materiais (TWI, 2017). Entretanto, por depender de feixes de elétrons o método depende de operação em uma câmara de alto vácuo, o que limita o tamanho das peças reestruturadas superficialmente e pode tornar o processo improdutivo pelo tempo demandado para produzir vácuo. Outro ponto de destaque é que ao escavar o material para formar os pinos, o método produz reentrâncias (depressões) na superfície do metal que podem ajudar a união adesiva por aumentar a área disponível para contato. Entretanto, isso diminui a espessura da parte metálica ao redor dos pinos, o que pode comprometer a resistência do conjunto.

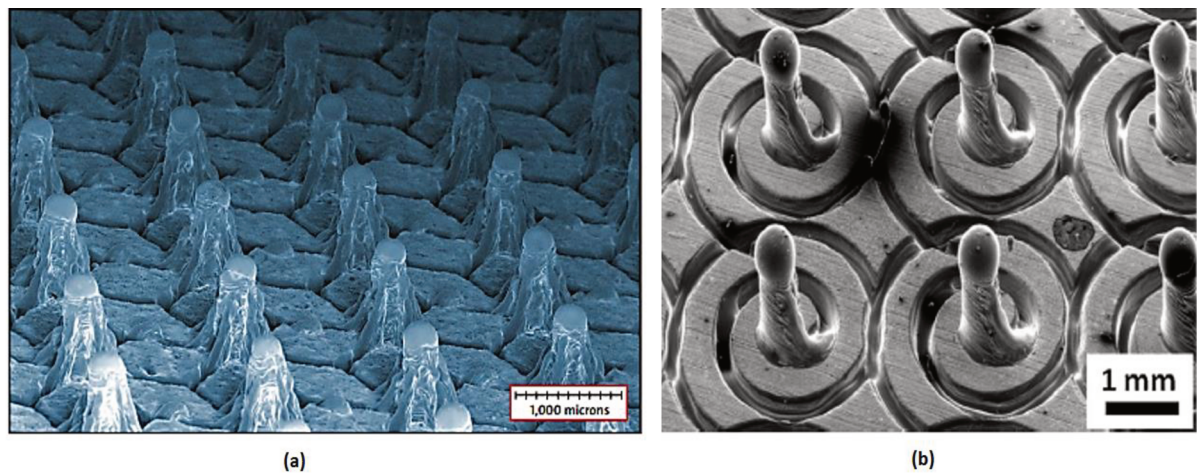


Figura 2.1 – Exemplos de protuberâncias (*proggles*) geradas pelo processo *Surfi-Sculpt™*. (a) (TWI, 2017) e (b) (Baseado em WANG et al., 2015).

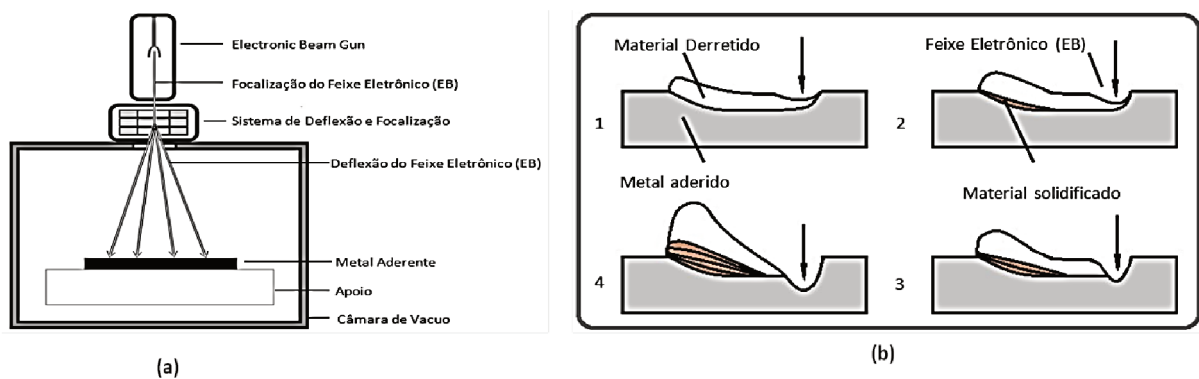


Figura 2.2 – (a) Equipamento eletrônico para *Surfi-Sculpt™* e (b) Passo a passo do procedimento *Surfi-Sculpt™* (Baseado em XIONG et al., 2015).

Ao que parece a grande aplicação da tecnologia *Surfi-Sculpt™* tem sido para auxiliar na união metal-compósito em juntas híbridas denominadas *Comeld™* (WANG et al., 2016). Xiong et al. (2015) comparam juntas apenas adesivas (R - referência) com três juntas híbridas incorporando diferentes quantidades de pinos fabricados por *Surfi-Sculpt™* para unir Ti-6Al-4V com compósito de polímero reforçado com fibra de carbono. Os resultados indicaram que os pinos presentes nas juntas híbridas foram capazes de aumentar a carga de ruptura final das juntas (Fig. 2.3), além de aumentar energia absorvida até a falha. Na condição mais favorável dentre as avaliadas, comparado à junta adesiva, a carga de ruptura final aumentou em 135% e a absorção de energia em cerca de 260%. Verificou-se também que os pinos podem atrasar o início da delaminação na região de ligação metal-compósito, o que já tinha sido observado antes (GRAHAM et al., 2014). Outro exemplo da utilização de pinos produzidos por Reestruturação Superficial em uniões híbridas metal-compósito é apresentado

por Smith (2015). Como observado na Fig. 2.4, a junta híbrida (*Comeld*TM) suportou maior carga e absorveu maior energia até a falha se comparado à junta adesiva (controle).

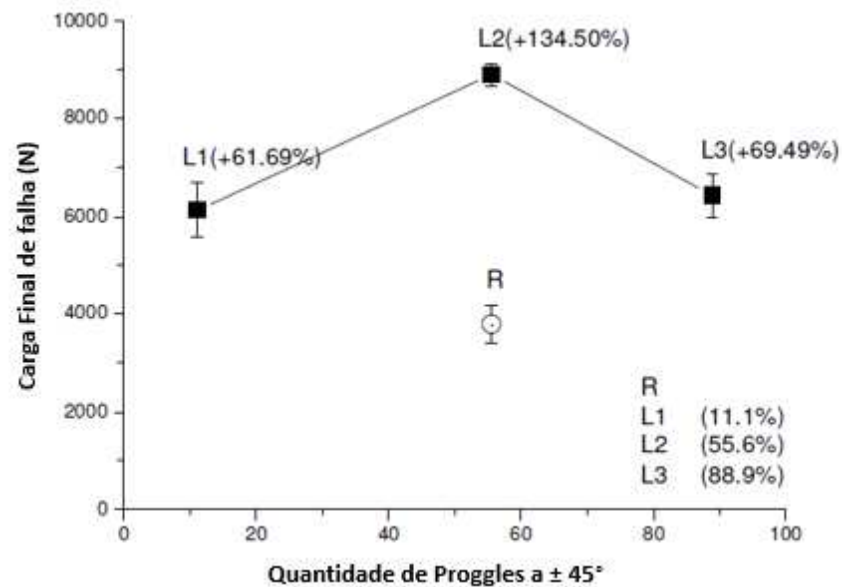


Figura 2.3 – Carga última de Falha (Baseado em XIONG et al., 2015).

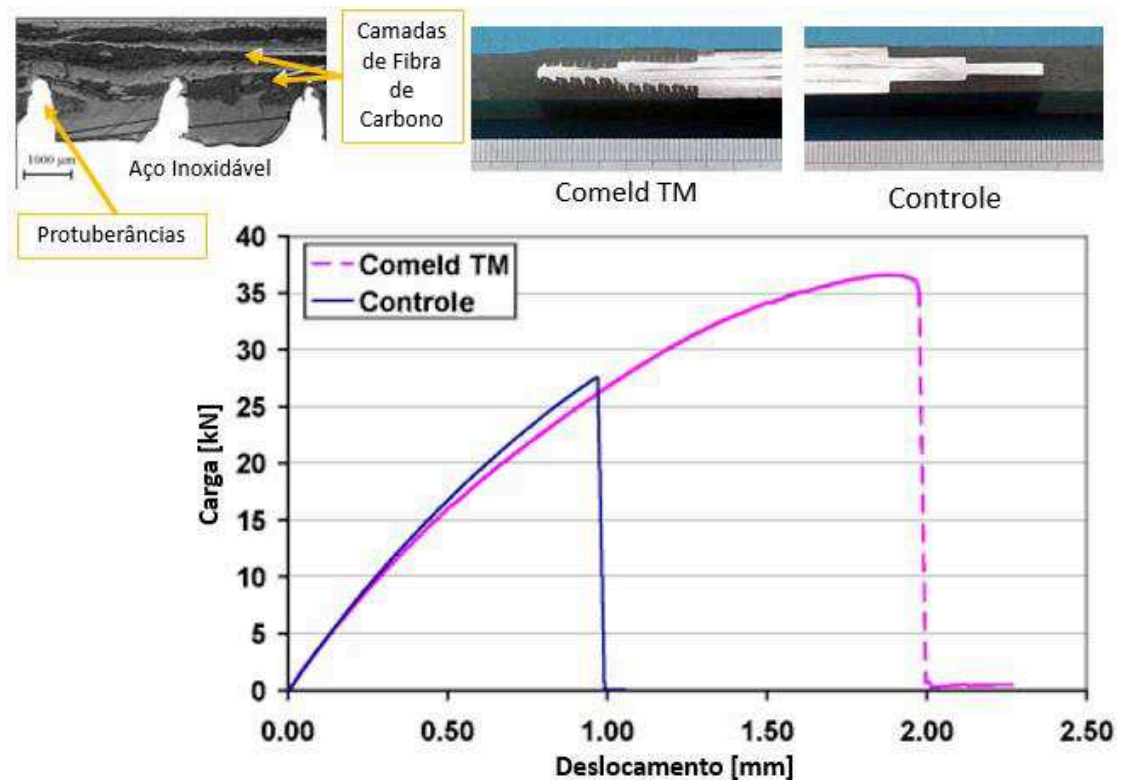


Figura 2.4 - Curva carga-deslocamento de juntas metal-compósito (*Comeld*TM - fabricada por reestruturação superficial) e de controle (adesiva) (SMITH, 2015).

(b) Manufatura aditiva

Em termos de Manufatura aditiva, várias técnicas têm sido utilizadas em uniões híbridas avançadas. O princípio geral por trás delas é o mesmo: construir protuberâncias (pinos) na superfície metálica por adição sequencial de material. Técnicas baseadas em processamento de metal em pó permitem um controle razoável da geometria dos pinos e geralmente não causam danos excessivos à superfície existente (GRAHAM et al., 2014). Neste caso, os dois tipos comuns de processos utilizados são a chamada Fusão Seletiva por Laser (*Selective Laser Melting - SLM*) e a Deposição de Metal por Laser (*Laser Metal Deposition - LMD*). O *SLM* utiliza um leito de metal em pó sobre o qual um feixe de laser é focado para fundir seletivamente e sequencialmente camadas de material, mas tem grandes limitações no tamanho da superfície na qual os pinos podem ser construídos. O *LMD* funciona com um laser de alta potência que incide sobre pó metálico que é como que soprado no seu ponto focal. O metal em pó, que é fundido camada por camada, forma os pinos. Mais detalhes deste processo podem ser encontrados em Boehm (2016) e Pirch et al. (2017). Ambas as técnicas mostram bons resultados, mas continuam sendo uma escolha dispendiosa para aplicações industriais (GRAHAM et al., 2014).

Como opção de baixo custo para produção de pinos metálicos visando uniões híbridas metal-compósito aparece uma versão derivativa da soldagem MIG/MAG. Neste caso, uma versão baseada na técnica MIG/MAG com curto circuito controlado por transferência de metal frio (*Cold Metal Transfer - CMT*) denominada *CMT-PIN* é capaz de soldar pequenos pedaços de arame metálico (oriundos do arame-eletrodo) a substratos também metálicos. As principais características de juntas híbridas metal-compósito fabricadas por intermédio de *CMT-PIN*, se comparadas com juntas co-curadas (adesivas), são a durabilidade ambiental e a tolerância ao dano superior (Fig. 2.5). Juntas híbridas com pinos obtidos por *CMT-PIN* também oferecem melhorias significativas de desempenho em fadiga mecânica (GRAHAM et al., 2014). Ilustrando ainda mais o potencial do *CMT-PIN* para atuar em juntas híbridas, Stelzer et al. (2016), estudaram a utilização desta técnica para reforçar, na direção da espessura, juntas compósito-compósito, investigando inclusive a influência do alinhamento de deposição e do tipo de pino. No caso, foi utilizada uma chapa fina de aço com pinos depositados coaxialmente em ambos os lados para servir como inserto de ancoramento entre as duas partes do compósito (Fig.2.6). Verificou-se que a união híbrida (adesivo + inserto com pinos) absorvem quantidades maiores de energia até a falha por tração da junta, quando comparado a juntas adesivas (STELZER et al., 2016).

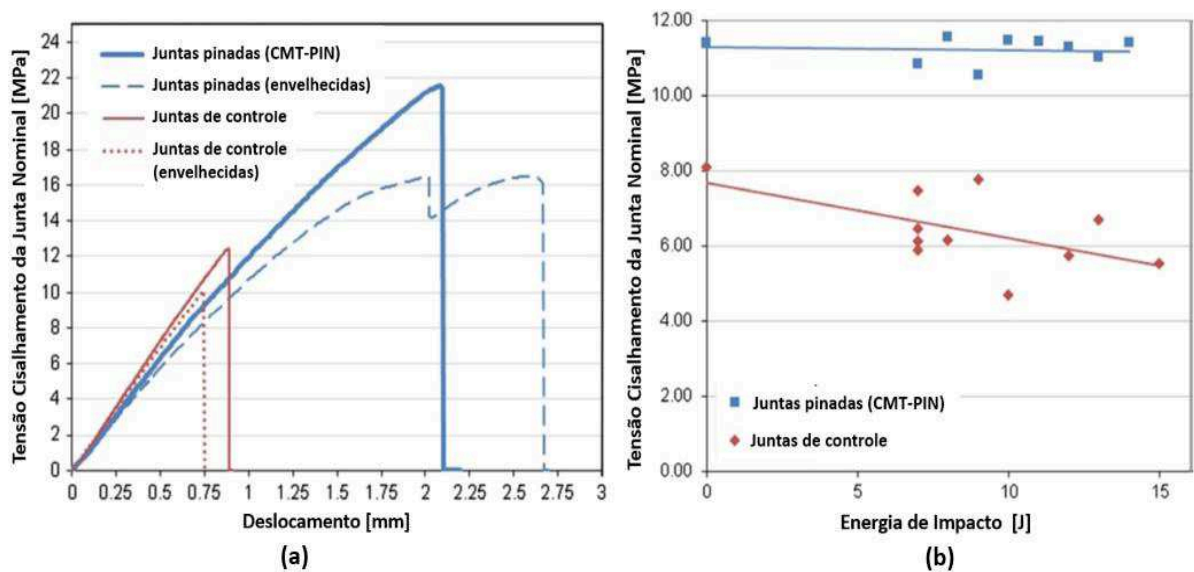


Figura 2.5 - (a) Efeito do envelhecimento ambiental na resposta de tensão *versus* deslocamento de juntas híbridas metal-compósito e de controle (adesivo); (b) Resistência residual em relação à energia de impacto (tolerância ao dano) de juntas híbridas metal-compósito e de controle (adesivo) (Juntas pinadas = pinos fabricados por manufatura aditiva por *CMT-PIN* + adesivo) (GRAHAM et al., 2014).



Figura 2.6 - Pinos fabricados por *CMT-PIN* (STELZER et al., 2016).

Uma alternativa, também de baixo custo, para deposição de pinos é o processo *Stud Welding*, no qual pequenos pinos metálicos também são soldados a um substrato metálico por ação de um arco elétrico (GRAHAM et al., 2014). Entretanto neste caso os pinos já vêm fabricados e são apenas soldados na parte metálica, com menor flexibilidade para mudança imediata de características geométricas, como pode ser feito no *CMT-PIN* e será visto mais adiante. Apesar de serem mais utilizadas para aço carbono, estas opções de baixo custo para produção de pinos (*MIG/MAG CMT-PIN* e *Stud Welding*) permitem o processamento de uma variedade de metais, incluindo aços inoxidáveis, ligas de alumínio e ligas de titânio.

Todos os benefícios associados ao uso de uniões híbridas com pinos metálicos são alcançados com um ganho de peso líquido praticamente nulo em relação às juntas co-curadas (adesivas), tornando as juntas híbridas avançadas mais atraentes do que as juntas aparafusadas, onde a desmontagem não é necessária. De fato, as juntas híbridas avançadas podem facilitar uma redução de peso em comparação com as juntas adesivas uma vez que o aumento do desempenho pode permitir uma redução no tamanho da junta (GRAHAM et al., 2014). Segundo Ucsnik et al. (2010), ainda é necessário mais trabalho experimental para obter compreensão detalhada sobre o desempenho e problemas de falha de juntas híbridas avançadas. Além disso, é necessário passar por comparações mais diretas entre uniões híbridas avançadas e outras formas de união concorrentes, tais como juntas rebitadas, ou mesmo apenas adesivadas e em outros tipos de solicitações mecânicas, como em flexão e torção.

Independentemente do método para depositar os pinos, uma vez que tenha sido produzido um conjunto na parte metálica, é necessário integrá-la com o material compósito. Tipicamente, a fabricação de juntas híbridas avançadas usa colagem adesiva como parte do processamento do compósito, de tal forma que o compósito é curado sobre o conjunto de pinos com sua matriz utilizada (resina) fazendo a função também de adesivo para a junta. Isto é geralmente feito com o acoplamento do conjunto de pinos com uma pré-forma de fibras secas ou pré-impregnadas com resina (*prepregs*) e depois, respectivamente, infundindo com resina e curando ou apenas curando a parte de compósito. Desta forma, o ancoramento mecânico e a ligação adesiva são combinados na junta híbrida de metal-compósito sem a necessidade de pré-furos e de destruir feixes de fibras de reforço (GRAHAM et al., 2014).

A maioria dos estudos sobre juntas híbridas avançadas tem utilizado pré-impregnados curados em autoclave ou processo de moldagem por transferência de resina (infusão forçada de resina em fibras secas - RTM) e suas variações para produção do lado compósito da junta. Aqui é importante destacar a importância de aplicação de pressão e mesmo vácuo para que a matriz polimérica se molde (“abraça”) totalmente aos pinos e parte metálica e fique com níveis mínimos de porosidade. Propriedades mecânicas como resistência ao cisalhamento, à tração e à flexão das peças compósitas diminuem significativamente com o aumento do conteúdo de vazios (porosidade formada por bolhas de ar), as quais não devem suplantiar 2% em volume, ou as uniões serão comprometidas (BERTLING et al., 2016).

Deve-se notar também que, uma vez que a colagem adesiva desempenha um papel importante nas uniões híbridas avançadas, métodos de tratamento (preparação) superficial do metal podem ajudar a melhorar o desempenho da união e devem ser sempre explorados. Uma rápida revisão dos principais métodos de preparação superficial é feita mais adiante.

Deste modo, fica demonstrado que uniões híbridas avançadas entre metal e compósito têm potencial para aplicação prática, por exemplo, na indústria aeroespacial, mas questões-chave ainda precisam ser aprofundadas e/ou exploradas, como é executado nesta dissertação, antes da adoção industrial com eventual certificação.

Técnica CMT-PIN

Antes de detalhar o processo de deposição de pinos por soldagem *MIG/MAG CMT-PIN*, é importante destacar a peculiaridade do seu enquadramento como manufatura aditiva. Neste caso não se trabalha com a deposição de sucessivas camadas de metal, como nas abordagens usuais. Diferentemente se faz a deposição planejada e sucessiva de pinos metálicos com diferentes formas e distribuição espacial, de forma automatizada para conseguir a geometria desejada para o componente/estrutura (a trajetória de deposição é programada, a geometria dos pinos escolhida pela seleção de seus parâmetros de deposição e a distribuição dos mesmos na superfície do metal é realizada por meios automatizados/robóticos).

A técnica *CMT-PIN* foi desenvolvida pela empresa austríaca Fronius International GmbH e é derivada da versão da soldagem *MIG/MAG* chamada *CMT* (*Cold Metal Transfer*). No processo *CMT* um arame metálico é continuamente alimentado e um arco (protegido por um gás inerte, normalmente) é aberto entre a ponta do arame e o material a ser soldado como em todas as outras versões da soldagem *MIG/MAG*. A principal diferença entre o *MIG/MAG* convencional e a versão *CMT* é uma tocha especial (Fig. 2.7), que permite inverter momentaneamente o movimento do arame-eletrodo (de avanço para recuo). A inversão ocorre quando o arame toca a poça de fusão (curto-circuito), permitindo uma transferência suave da gota (nesse instante a corrente também é reduzida drasticamente, sem picos de corrente de curto-circuito) sem respingos (perda de material). Como o arco é mantido sempre curto, o calor transferido para a peça de trabalho é muito baixo, justificando assim o nome *Cold Metal Transfer* e causando apenas pequenas mudanças metalúrgicas, baixa zona afetada pelo calor (ZAC) bem como baixo nível de distorção e descoloração (oxidação) no metal de base. A Figura 2.8 ilustra o equipamento *CMT*, sendo o “pulmão” (*buffer*) primordial, uma vez que impede a dobra localizada do arame de alimentação durante as suas reversões de movimento (acumula a diferença entre comprimento de avanço – vindo do alimentador – e comprimento de recuo – vindo da tocha).

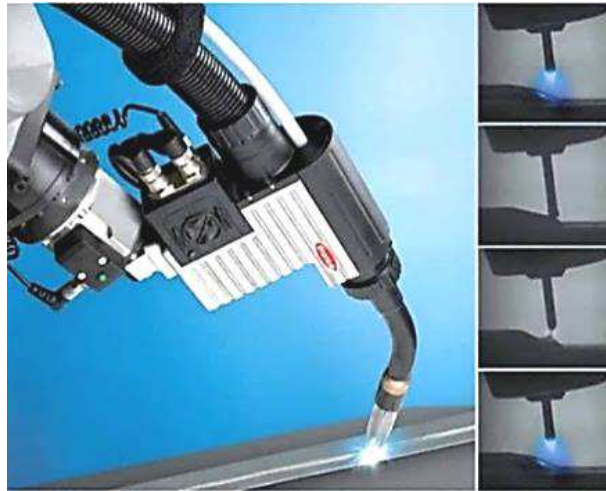


Figura 2.7 - Tocha especial para o processo *CMT*, estando do lado direito (de cima para baixo) os quatro estágios principais do processo: Arco aberto; Arame-eletrodo tocando a poça de fusão com corrente reduzida; Inversão do movimento do arame com corrente reduzida; Reabertura de arco (FRONIUS, 2014).

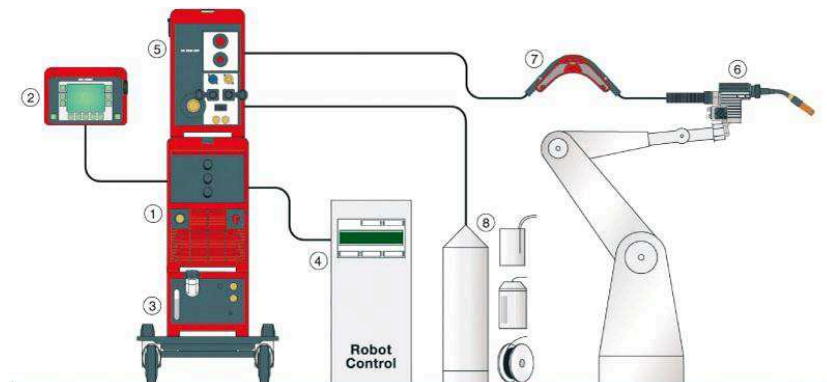


Figura 2.8 - Ilustração do equipamento para a soldagem *CMT*: (1) fonte de alimentação; (2) painel de controle; (3) rack; (4) controlador do robô; (5) alimentador de arame; (6) tocha especial com inversão de movimento do arame-eletrodo; (7) “pulmão” para acomodar o movimento de avanço e recuo do arame-eletrodo; (8) barril de arame (FRONIUS, 2014).

Assim como no *CMT*, a chave do processo *CMT-PIN* é um movimento controlado de avanço e recuo do arame-eletrodo durante o processo de soldagem. No contexto da fabricação dos pinos, o processo de soldagem *CMT-PIN* consiste em três estágios: aquecimento, resfriamento e modelagem (WITTEWER, 2011). Na fase de aquecimento, após o curto-circuito, o controle do processo faz com que o arame-eletrodo fique encostado contra a poça de fusão, sem arco aberto, permitindo seu resfriamento, solidificação do pé do pino (base junto à poça de fusão) e consequente soldagem no metal de base. Pouco tempo depois,

na fase de resfriamento, uma corrente elétrica baixa é imposta ao arame (entre a tocha e o metal de base) de tal forma que o aquece e amolece (perda de resistência mecânica por aquecimento por efeito Joule), mas não o suficiente para rompê-lo (como um fusível elétrico) e abrir o arco. Com o movimento de inversão iniciado, o arame metálico agora amolecido é submetido a uma força de tração e é rompido (de forma semelhante a um ensaio de tração), deixando um pino no metal de base, como ilustrado na Fig. 2.9a. Na última fase, modelagem, a cabeça do pino (parte superior) é formada, com controle de tamanho e geometria. Para o controle de cada fase e assim formação do pino, três parâmetros de regulação são utilizados no controle da fonte. O primeiro atua nos momentos iniciais e permite definir a forma do pé do pino. O segundo atua em sequência para definir a altura do pino. Por fim, o terceiro permite obter pinos com cabeça de diferentes geometrias, como ilustrado na Fig. 2.9b. Como no processo *CMT*, são vantagens do processo *CMT-PIN*, o baixo aporte de calor e consequente integridade metalúrgica, baixo nível de distorção e descoloração (oxidação) no metal de base.

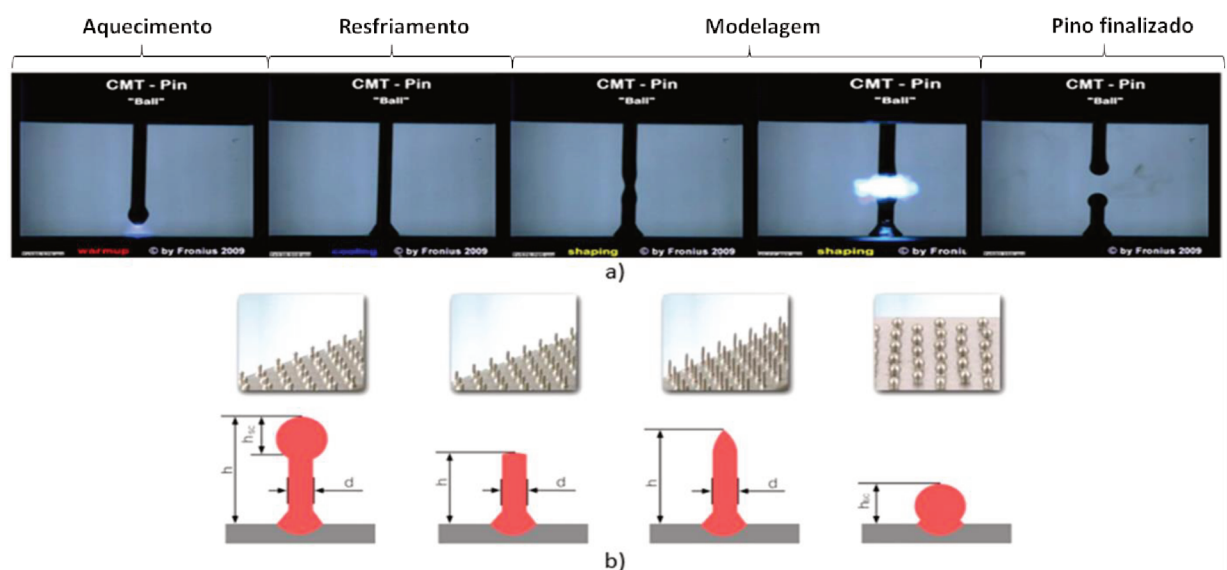


Figura 2.9 – (a) Formação sequencial de um pino do tipo “Ball head” (com cabeça de bola) pelo processo *CMT-PIN*; (b) Diferentes geometrias de pinos possíveis com o processo *CMT-PIN* (FRONIUS, 2014).

Skhabovskyi et al. (2015), estudaram a parametrização do *CMT-PIN*. Verificou-se, para as condições utilizadas, que o crescimento do pino apresenta tendência linear, sendo a técnica capaz de produzir pinos de cabeça cilíndrica com alturas entre $(3,52 \pm 0,17)$ mm até $(5,42 \pm 0,08)$ mm, e diâmetro de cabeça abaulada entre $(1,21 \pm 0,11)$ mm até $(1,81 \pm 0,05)$ mm (Fig. 2.10). Visando a utilização em juntas híbridas metal-compósito, os parâmetros do

CMT-PIN serão explorados para obter pinos mais curtos para permitirem a aplicação em compósitos finos.

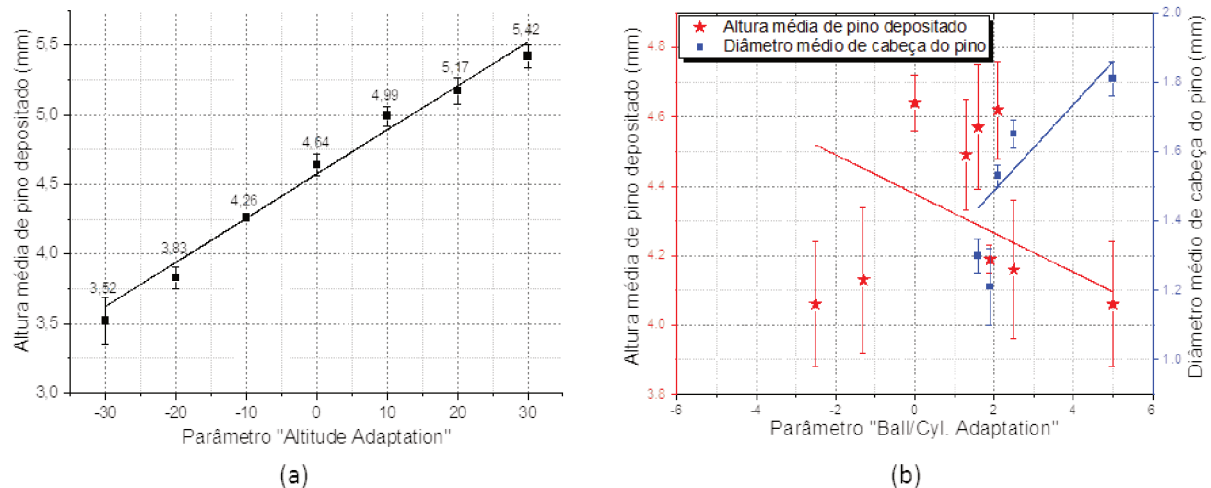


Figura 2.10 - Características geométricas dos pinos: (a) relação entre a altura média do pino depositado e a regulação do "Altitude Adaptation", com "Ball/Cyl. Adaptation" fixado em zero; (b) relação entre a altura média e o diâmetro médio de cabeça do pino depositado e a regulação do "Ball/Cyl Adaptation", com "Altitude Adaptation" fixado em zero (Baseado em SKHABOVSKIY et al., 2015).

2.1.4 Uniões híbridas com pinos Z

Os pinos Z funcionam basicamente como hastes curtas de pequeno diâmetro inseridas na direção da espessura (geralmente designada por eixo Z, portanto, o nome *Z-pins*) das camadas de compósitos laminados ainda no estágio de pré-impregnados antes da cura. Estes pinos ancoram as camadas do compósito laminado por uma combinação de atrito e aderência (DANTULURI et al., 2007). A técnica utilizada para a inserção dos pinos Z é um processo assistido por ultrassom (DANTULURI et al., 2007). Alguns dos materiais mais utilizados para estes pinos são as fibras de carbono de alta resistência, SiC, titânio, aço inoxidável e alumínio. Segundo Mouritz (2007), o conteúdo dos pinos varia tipicamente entre 8 e 70 pinos/cm² (equivalente a 0,5 e 4,0% volume).

A principal vantagem dos pinos Z é a eficácia para aumentar a resistência à delaminação e tolerância ao dano de compósito laminados (MOURITZ, 2007). Mesmo com as várias vantagens já comprovadas, esta técnica apresenta somente algumas aplicações práticas conhecidas, como, por exemplo, nas aeronaves F/A-18E/F Superhornet, nas quais é utilizada nas partes em compósitos dos dutos de tomada de ar dos motores e das portas do compartimento de armas, e em carros de Fórmula 1, nos quais é usada para fabricação de

barras de proteção contra capotamento (MOURITZ, 2007). As desvantagens estão relacionadas à redução de resistência a esforços no plano dos painéis, geralmente devido a fatores como a quebra de fibras durante o procedimento de aplicação dos pinos e até a consequente ondulação das fibras. No entanto, Mouritz (2007) acredita que, em geral, as melhorias nas propriedades interlaminares alcançadas pela utilização dos pinos Z compensam as reduções nas propriedades mecânicas em geral.

Apesar de serem utilizados majoritariamente como reforços de compósitos laminados, os pinos Z recentemente foram explorados também em união híbrida (CARTIÉ et al., 2006 e STELZER et al. 2015). Stelzer et al. (2015) utilizaram chapas com um conjunto de pinos Z (1,14 mm de diâmetro) encaixados em furos como insertos para promover a união híbrida de compósitos. Os resultados indicam que os pinos Z são capazes de contribuir para as propriedades de fadiga de juntas híbridas sobrepostas simples e levam a um comportamento de fadiga semelhante ao obtido com pinos depositados pelo *CMT-PIN*. Os resultados também mostram que as tensões de descolamento e de cisalhamento aumentam nas extremidades da região de sobreposição (compósito sobre o inserto metálico) e estão relacionadas às falhas como resultado do início e propagação das trincas nessa área.

2.2. Tratamento Superficial de Metais

Como mencionado anteriormente, as juntas híbridas metal-compósito se beneficiam de mecanismos de ligação adesiva que fortalecem a interface entre o metal e o compósito. O adesivo em geral é a resina da matriz do material compósito e promove uma coesão adequada na junta. Além de coesão adequada, que depende principalmente da microestrutura (propriedades intrínsecas) da resina, a junta híbrida se beneficia também de mecanismos de adesão, que é altamente influenciada pelas condições superficiais das partes a serem unidas (propriedades da interface), e que determina como o adesivo (resina) interage com os substratos. Assim, para produzir uma junta adesiva com resistência e durabilidade entre diferentes substratos, é necessário um tratamento superficial (MOLITOR et al., 2001). A modificação da superfície das partes aumenta a resistência de ligação com o adesivo devido ao aumento da rugosidade, da afinidade química e da tensão superficial (MOLITOR et al., 2001).

No presente trabalho o adesivo será a própria matriz do compósito e por isso fortemente ligado a ele. Ao aumentar a rugosidade da superfície do metal, ocorre um aumento na área superficial que permite que o adesivo se adeque às irregularidades da superfície para formar uma ligação mecânica mais confiável (CLEARFIELD et al., 1990), como que ancorando mecanicamente o adesivo ao substrato. A alteração química da superfície pode resultar na

formação de uma ligação química entre as moléculas do adesivo e a camada de óxido metálico presente no metal (BROCKMANN et al., 1986). O tratamento superficial também deve permitir que o adesivo se espalhe facilmente sobre a superfície do metal, com molhabilidade apropriada, gerando interação molecular e adsorção física (ALFANO et al., 2012).

Antes de qualquer tratamento superficial, é preciso remover possíveis materiais contaminantes que possam inibir o contato eficiente entre adesivo e substrato. Isso em geral é feito pela remoção de gorduras por meio de solventes, incluindo metanol, tolueno ou acetona (SINMAZÇELIK et al., 2011), sendo crítico para o desempenho das juntas e para prolongar a vida útil da união (PARK et al., 2010). Apesar de remover barreiras estranhas às partes a serem unidas para efetivo contato com adesivo, esta preparação prévia não promove a formação de condições superficiais adequadas, mas apenas prepara o substrato para o tratamento superficial (DAVIS, 1999).

Vários métodos de tratamento superficial podem ser aplicados aos metais para fins de ligação por adesão, sendo os principais apresentados a seguir.

2.2.1 Tratamento mecânico

O tratamento mecânico de superfícies pode ser feito por meio de variadas técnicas. Em termos gerais, a abrasão mecânica é usada para remover camadas de óxidos indesejáveis e gerar rugosidades superficiais (PARK et al., 2010; HARRIS et al., 1999). Pode compreender desde simplesmente esfregar a superfície do substrato com uma lixa convencional (80 *mesh*, por exemplo) (SINMAZÇELIK et al., 2011) a promover o jateamento com partículas duras, utilizando, por exemplo, grãos de alumina com 45 nm de tamanho a uma distância de 15 a 20 cm do substrato (MOLITOR et al., 2001). O jateamento é usado para alterar a topografia e o estado químico de aderentes pela introdução de uma morfologia do tipo "platô-vale ou platô-pico" (CRITCHLOW et al., 2006). Outros abrasivos mais baratos, como areia, são reconhecidos como proporcionadores de aumento dos níveis de adesão, uma vez que aumentam a área de superfície disponível para ligação e promovem o encaixe mecânico na interface adesivo-substrato (SINMAZÇELIK et al., 2011).

2.2.2 Tratamentos químicos e/ou eletroquímicos

O substrato metálico também pode ser modificado por tratamentos químicos e/ou eletroquímicos, que afetam sua morfologia pela formação de uma superfície rugosa, o que melhora o ancoramento mecânico (interação física com o adesivo) e gera uma camada de óxido poroso (interação química com o adesivo). Tipicamente, o tratamento químico, também

conhecido como acidificação, é um passo de produção intermediário entre a remoção de gorduras, limpeza alcalina e tratamento eletroquímico (PARK et al., 2010). Os tratamentos químicos mais comumente aplicados são baseados em gravura ácida (ataque seletivo) (MOLITOR et al., 2001). Simplesmente consistem em imergir o substrato em uma solução de ácido adequado (dependendo do metal a ser gravado), sendo mais comuns os ácidos crômico e sulfúrico (CRITCHLOW et al., 2006). A concentração de compostos, temperatura de imersão e tempo determinarão a mudança na superfície. Parâmetros para tratamentos químicos são encontrados na literatura, como em Sinmazçelik et al. (2011). Reações eletroquímicas também são usadas para limpar, gravar e oxidar superfícies metálicas, onde o metal atua como um ânodo ou cátodo. Os processos de anodização, amplamente utilizados na indústria aeroespacial, produzem um filme de óxido fino com alto grau de rugosidades. Soluções de ácidos crômico, sulfúrico ou fosfórico são comuns para a anodização de componentes de aeronaves (CARRINO et al., 2006), sendo que a última geralmente proporciona uma vida útil mais prolongada para uniões adesivas (CRITCHLOW et al., 1996). O óxido criado na superfície do metal depende do eletrólito, da tensão de anodização, do tempo e da temperatura (BROCKMANN et al., 1986). Um dilema constante relacionado com tratamentos químicos e/ou eletroquímicos são questões de saúde e segurança ocupacional e ambiental.

2.2.3 Texturização laser

Outras formas de tratamento superficial têm sido utilizadas como alternativas ecológicas principalmente aos tratamentos químicos e/ou eletroquímicos. Dentre eles, a texturização a laser apresenta bons resultados (ALFANO et al., 2012; WONG et al., 1997). Neste tratamento de superfície, uma fração da energia de um feixe de laser é absorvida pelo material, promovendo fusão superficial e assim modificações morfológicas de superfície e a formação de uma camada de óxido térmico (ALFANO et al., 2012). Os parâmetros que afetam o grau de tratamento de superfície incluem o comprimento de onda, polarização e intensidade do feixe de laser (MOLITOR et al., 2001). A texturização a laser mostrou bons resultados para a união adesiva de aços (JAHANI et al., 1998), ligas de alumínio (RECHNER et al., 2010 e LAMBIASE et al., 2018), ligas de titânio (BABURAJ et al., 2007) e compósitos de matriz polimérica (PARK et al., 2010). As vantagens desta técnica são geralmente ligadas a uma ação de limpeza, molhamento e formação de camada de óxido térmico superiores. Vale ressaltar que, devido à complexidade do tratamento com laser, a seleção dos parâmetros de tratamento é, em geral, feita empiricamente (ALFANO et al., 2012). Além disso, o custo de aquisição e operação do equipamento laser é elevado.

Lambiase et al. (2018) estudaram o comportamento mecânico de juntas de AA5053 com poli (éter-éter-cetona) (PEEK) fabricadas pelo processo *Friction Assisted Joining* (FAJ),

visando melhorar a resistência ao cisalhamento, devido ao aumento do bloqueio mecânico entre os substratos. As partes metálicas das juntas sofreram uma texturização com padrão quadrático por meio de laser. Verificou-se, para as condições ótimas, que a resistência média e a força ao cisalhamento foi de 47 MPa e 6,9 kN, respectivamente. Segundo o autor, o aumento da área de junção, proporcionado pela texturização, é responsável pela eficiência de 83% superior das juntas em comparação ao comportamento mecânico do *PEEK* somente.

2.3 Pré-impregnados

Os pré-impregnados (*prepregs*) são materiais para laminação pré-fabricados concebidos para a produção de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (MOLYNEUX, 1983). Consistem em fibras de reforço impregnadas com resina que então é pré-curada, sendo o conjunto protegido com filmes plásticos (como em fitas adesivas dupla-face) e mantido sobre refrigeração (sub zero) até momentos antes da utilização para evitar cura total. Apesar de serem utilizados desde o final da década de 1940, só alcançaram ampla aplicação industrial após o desenvolvimento das fibras de reforço de alto desempenho, como de carbono e de aramida (Kevlar) (MOLYNEUX, 1983).

Segundo Molyneux (1983), quando se trata da fabricação de pré-impregnados, existem três métodos básicos de impregnação das fibras: imersão em solução, spray de solução e revestimento direto à quente. Segundo este autor, na imersão em solução os componentes da resina são dissolvidos num solvente até um nível predeterminado (40 a 50%). Fibras secas, na forma de fio ou de tecido, são molhadas nessa solução, absorvendo uma determinada quantidade de resina-mais-solvente, a qual depende do tempo de molhamento e do nível de solvente utilizado. Na pulverização (*spray*) da solução a quantidade de resina é dosada diretamente sobre a fibra. Em ambos os casos anteriores, a fibra impregnada é então colocada através de um ciclo de aquecimento para remover o solvente, o que também proporciona uma cura parcial da resina e assim um certo grau de adesividade ao *prepreg*, mas conservando boa sua capacidade de moldar-se. Já no revestimento direto à quente, a solução de resina é misturada à temperatura elevada, reduzindo assim sua viscosidade de modo a facilitar a molhabilidade das fibras. Além de ser aplicado, por exemplo, em setores da indústria de fabricação de artigos esportivos, de automóveis, de embarcações e de turbinas eólicas, os pré-impregnados são primordiais atualmente na indústria aeroespacial para a fabricação de estruturas inclusive primárias, como partes de caixas de asas e seções de fuselagem (SINKE, 2008).

O procedimento de fabricação tradicional de peças utilizando pré-impregnados consiste em empilhar camadas deste material para formar um laminado, montagem em saco de vácuo e cura em autoclave. Dentro da autoclave, a alta temperatura e a alta pressão

combinadas com o vácuo junto à peça promovem a consolidação das camadas pré-impregnadas, a formação do laminado no formato desejado e até mesmo o sangramento do excesso de resina. Com temperaturas elevadas, a viscosidade da resina é inicialmente reduzida, facilitando seu fluxo e molhamento das fibras antes da cura estar completa (CENTEA et al., 2015). Com a alta pressão externa e o vácuo interno à peça, a porosidade (oriunda de bolhas de ar aprisionadas e os voláteis gerados pela cura da resina), principal defeito de fabricação envolvendo a utilização de pré-impregnados, é virtualmente suprimida e a resina é conduzida para áreas potencialmente de fibras secas (CENTEA et al., 2015). O resultado final é uma peça sólida, resistente e rígida. No entanto, autoclaves impõem custos significativos para aquisição, operação e de ferramental (CENTEA et al., 2015).

Uma das alternativas de baixo custo para o processo de cura de pré-impregnados, que confere propriedades similares às obtidas com autoclaves, é a prensagem a quente. Este processo, também conhecido por moldagem por compressão a quente, funciona através da aplicação de pressão e temperaturas controladas em ambas as faces paralelas (placas quentes) de uma prensa. Os pré-impregnados são empilhados e protegidos nas faces externas do conjunto por um filme desmoldante e posicionados na prensa. Uma pressão de até 100 t e uma temperatura que varia aproximadamente entre 35°C e 300°C (dependendo da resina utilizada) são aplicadas sobre o conjunto de pré-impregnados. Da mesma forma que em uma autoclave, a alta temperatura e a alta pressão aplicadas promovem a consolidação das camadas pré-impregnadas, a formação de ligações cruzadas no polímero (cura) e assim a formação do compósito laminado no formato desejado (BANDEIRA, 2015). As principais vantagens desta técnica são o baixo custo e facilidade operacionais e a não necessidade de câmara de vácuo. Entretanto, o processo gera rebarbas (excesso de resina nas bordas) no compósito e não é indicada para fabricação de peças complexas (CAIRES, 2009). Skhabovskiy et al. (2017) utilizaram recentemente a prensagem a quente para fabricar painéis laminados metal-compósito reforçados com pinos depositados por soldagem *CMT-PIN*. Neste caso, os pinos apresentaram potencial para melhorar a tolerância ao dano dos painéis por retardar a separação entre as camadas metálicas e compósitas dos mesmos devido ao ancoramento provido pelos pinos.

Enfim, dentre os processos citados na revisão bibliográfica anterior, o processo *CMT-PIN* é o que mais se encaixa nas possibilidades passíveis de serem executadas, devido a presença do equipamento na instituição de pesquisa e ainda, devido as suas diversas vantagens, quando comparado ao seu principal concorrente o processo *Surf-Sculpt*. Importante destacar que, como pode ser notado na revisão, não existe na literatura, até o momento, estudo sobre a inclinação e disposição dos pinos, esse fato corrobora a execução deste trabalho.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA GERAL

Conforme já mencionado no Capítulo I, o principal objetivo da dissertação é avaliar aspectos relacionados com o desempenho de juntas híbridas metal-compósito (Fig. 3.1) em carregamento de tração com diferentes disposições de pinos depositados por soldagem *CMT-PIN*. A expectativa é que a resina da parte em compósito trará as vantagens da união adesiva, enquanto que os pinos soldados no lado metálico irão ancorar o compósito, melhorando então o desempenho da junta. Para permitir estudar o efeito da presença dos reforçadores (pinos), adotaram-se as seguintes configurações de juntas:

- duas distribuições de pinos, igualmente espaçados e concentrados nas bordas da junta (Fig. 3.2);
- três inclinações de pinos, 60°, 90° e 120°, em referência a superfície da chapa metálica (Fig. 3.1)
- juntas de controle para fins de comparação, somente com colagem entre metal e compósito (juntas adesivas).

Para o constituinte metálico da junta optou-se por chapas de aço AISI 304 de 1,5 mm de espessura teórica, com intuito de se aproximar das possíveis aplicações futuras (indústrias mecânicas e/ou aeronáuticas). Já para laminar os 3,17 mm de espessura (para propiciar o total recobrimento dos pinos) da camada de compósito da junta híbrida, escolheu-se lâminas de pré-impregnado (*prepreg*) de fibra de vidro/epóxi (*7781-38"-F155 da Hexcel Corporation®*) (Fig. 3.1), as quais são amplamente utilizadas em diversos setores da indústria de transporte.

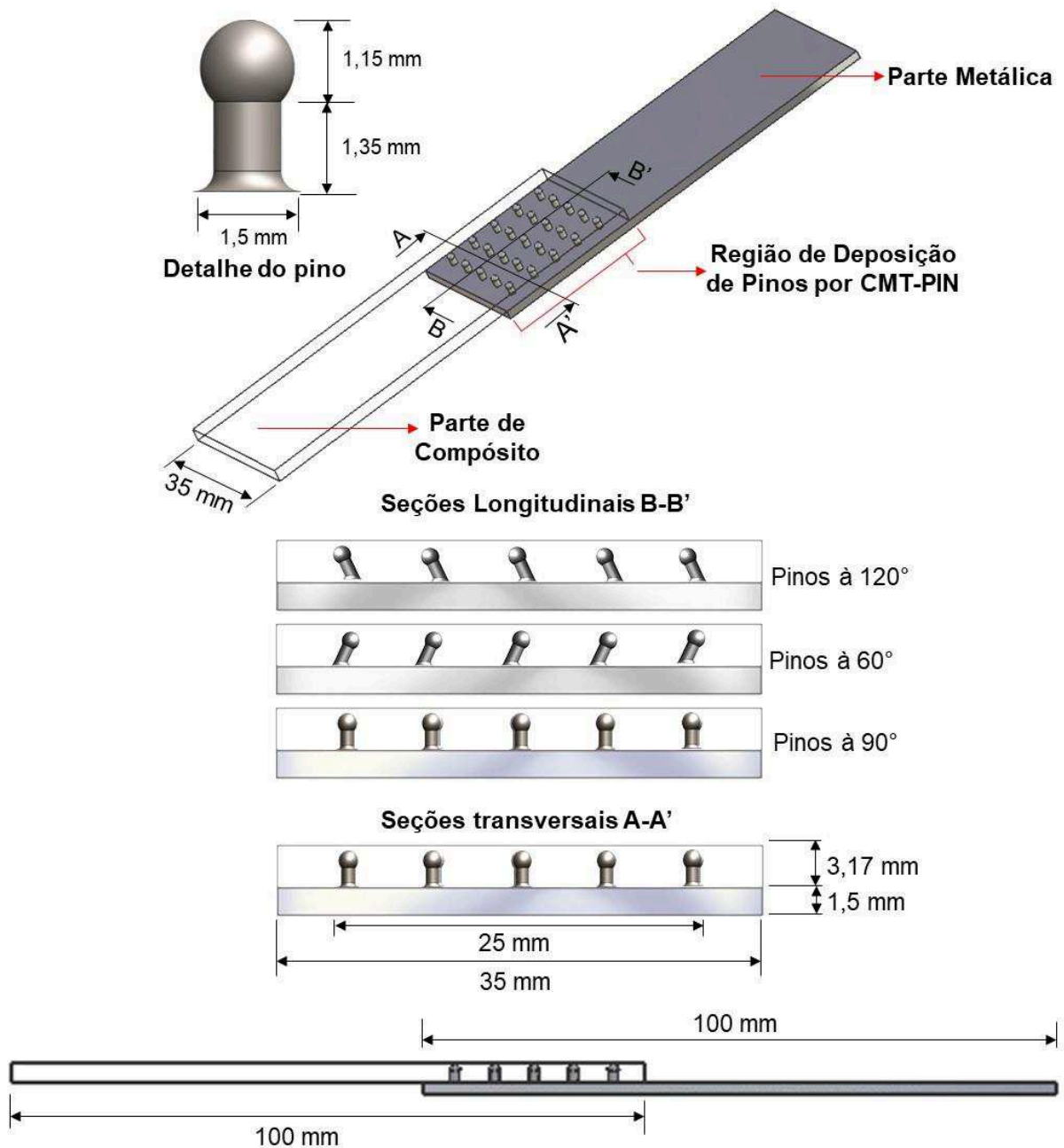


Figura 3.1 – Esquema das características geométricas de uma junta modelo (projeto teórico) para união híbrida metal-compósito.

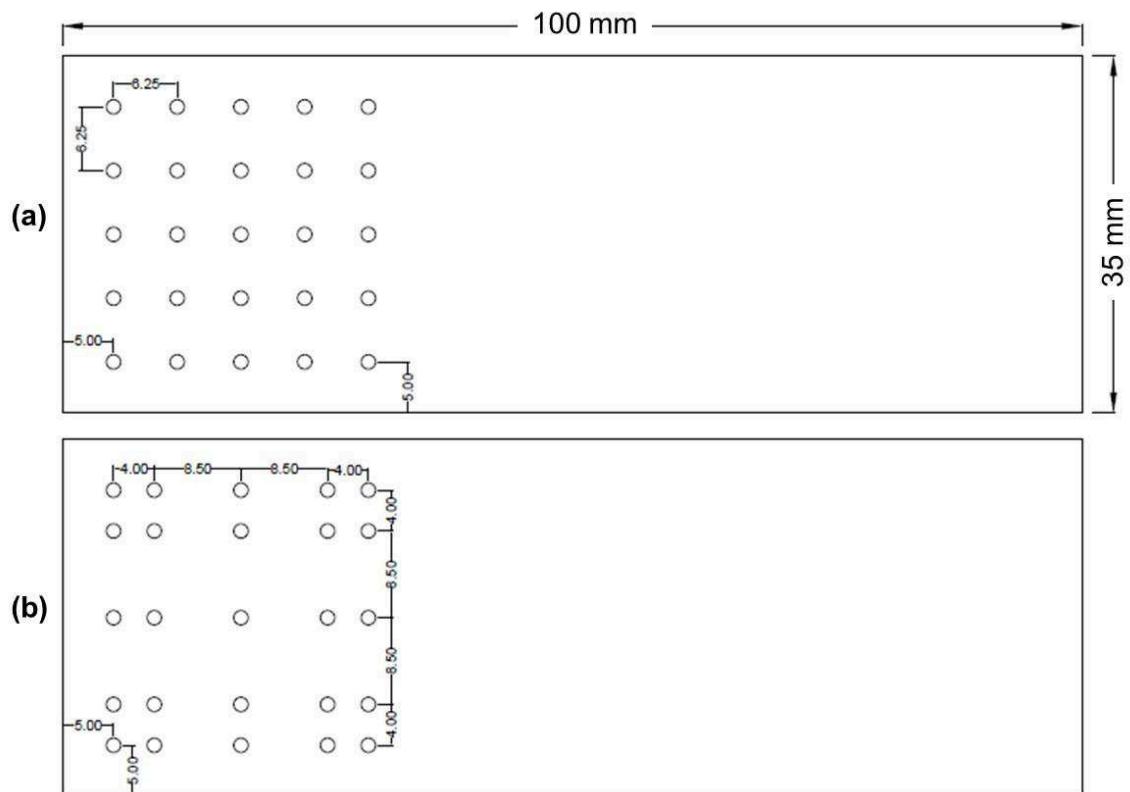


Figura 3.2 – Esquema de detalhe da parte metálica ilustrando as duas distribuições de deposição de pinos avaliadas (dimensões em mm). (a) Pinos igualmente espaçados e (b) Pinos concentrados nas bordas.

Para depositar os pinos nas chapas metálicas, empregou-se a técnica *CMT-PIN*. Com este processo, pinos de diferentes geometrias e tamanhos podem ser depositados variando-se a parametrização, como apresentado no trabalho de Skhabovskiy (2018). O pino do tipo “*Ball head*” foi escolhido, levando em consideração os trabalhos de Ucsnik et al. (2010), Carnio (2017), Felice (2017) e Franzoni (2017), por demonstrar melhores resultados já em tentativas de uniões híbridas metal-compósito, quando comparado a outros tipos de pinos. Como já apresentado no Capítulo II, segundo Ucsnik et al. (2010), este tipo de pino com cabeça do tipo “*Ball head*” dificulta a sua saída da camada de compósito, assim, necessitando de maior esforço no ensaio de tração para separar as partes da junta híbrida.

Para a fabricação da parte compósita das juntas, utilizou-se a técnica de cura a quente através de uma prensa a quente, conforme apresentado no trabalho de Skhabovskiy et al. (2017). Maiores detalhes do processo de fabricação dos corpos de prova podem ser encontrados no Capítulo IV.

Para avaliação da resistência e rigidez gerais e do modo de falha das juntas híbridas, foram realizados testes de cisalhamento por tração das juntas, tomando-se como base a

norma ASTM D1002 (ASTM, 2010) e Ucsnik et al. (2010), em duas condições diferentes, sem envelhecimento e com envelhecimento hidrotérmico. Executaram-se cinco repetições para todos os testes, por questões de repetitividade estatística. Foi feito um estudo do ganho de massa devido a adição dos pinos nas juntas metal-compósito e também devido ao envelhecimento hidrotérmico.

Para facilitar o trabalho com a grande quantidade de CPs, criou-se uma nomenclatura própria, onde se levou em conta o tipo de junta (junta adesiva ou híbrida - JH), a disposição dos pinos (igualmente espaçados - IE ou concentrados nas bordas - CB), a inclinação dos pinos (60°, 90° ou 120°) e por fim um algarismo como índice de numeração. Como exemplo, o CP nomeado “JH_90_IE_5” apresenta uma junta do tipo híbrida, com pinos a 90° com a superfície da chapa, igualmente espaçados e é o CP de número 5.

Por fim executou-se uma análise dos resultados, onde o desempenho das juntas híbridas metal-compósito foi confrontado com o desempenho das juntas de controle (adesivas) observando os fatos e indicações para explicar as melhorias/diferenças encontradas. Um fluxograma resumindo a metodologia geral da dissertação é apresentado na Fig. 3.5. Mais detalhes de cada etapa são apresentados nos capítulos seguintes.

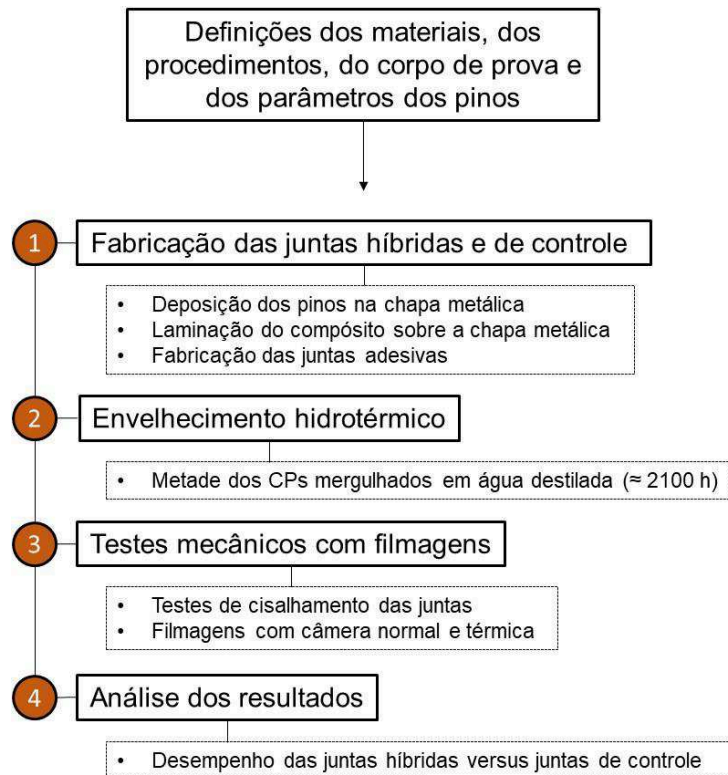


Figura 3.5 – Fluxograma geral da metodologia.

CAPÍTULO IV

FABRICAÇÃO DAS JUNTAS METAL-COMPÓSITO

Para a fabricação dos corpos de prova das juntas híbridas metal-compósito adotou-se uma sequência de fabricação como apresentada na Fig. 4.1. Na 1ª etapa as chapas de aço AISI 304 foram cortadas, utilizando uma guilhotina hidráulica, e limpas com acetona. Na 2ª etapa, após a fixação das chapas metálicas na mesa de soldagem, depositaram-se os pinos pela técnica *CMT-PIN* sobre as mesmas. Em seguida, durante a 3ª etapa, foram aplicadas as lâminas de pré-impregnado sobre a superfície da chapa metálica pinada. Na 4ª e última etapa, os conjuntos formados pelas chapas metálicas e pelas lâminas de pré-impregnado foram posicionados na prensa a quente, executando o ciclo de prensagem e cura do laminado compósito dos corpos de prova. Nos tópicos a seguir detalha-se mais a fundo toda a sequência de fabricação utilizada. Como já foi destacado, também foram fabricados corpos de prova sem pinos (juntas adesivas) para fins de comparação, adotando a mesma sequência de fabricação, sem a deposição dos pinos (2º etapa) (Fig. 4.1).

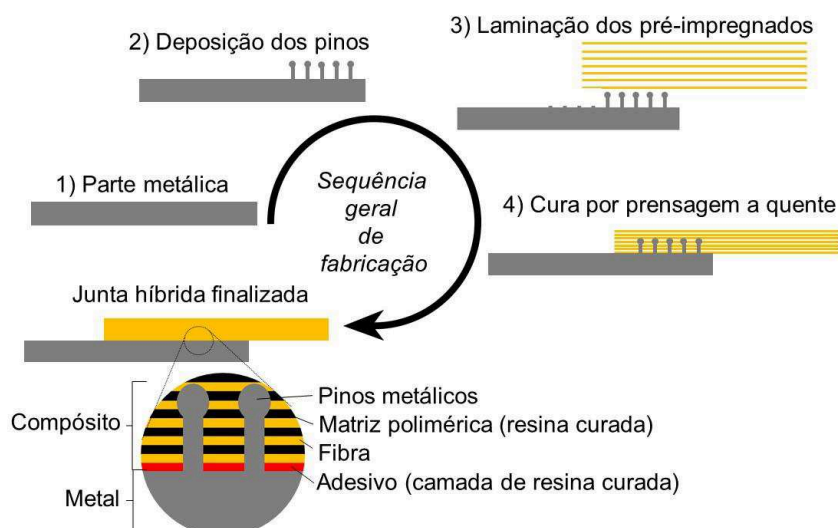


Figura 4.1 - Sequência geral de fabricação das juntas híbridas metal-compósito (combinação de união adesiva + conjunto de pinos metálicos soldados). Obs.: as juntas de controle (somente adesivas) seguiram a mesma sequência de fabricação, com exceção, obviamente, da deposição dos pinos.

Na 1ª etapa de fabricação, as chapas de aço AISI 304 passaram pelo processo de corte, ficando com as seguintes dimensões médias: espessura de $(1,47 \pm 0,03)$ mm, comprimento de $(100,26 \pm 0,37)$ mm e largura de $(35,07 \pm 0,26)$ mm. Optou-se por não tratar superficialmente as chapas de aço AISI 304 devido à grande quantidade de corpos de prova.

A bancada experimental, com seus componentes e dispositivos auxiliares, utilizada para a deposição dos pinos (2ª etapa) pela técnica *CMT-PIN* é apresentada Fig. 4.2. Para a deposição dos pinos utilizou-se o arame-eletrodo da classe *AWS/ASME SFA 5.9 ER309LSI*, com diâmetro nominal de 1 mm. A mistura de gás de proteção foi de $\text{Ar}+3,4\% \text{CO}_2$, a uma vazão de 9 litros/min, confirmada por intermédio de um fluxômetro calibrado. A composição química de cada mistura gasosa foi verificada através de um analisador comercial de gás (*Oxybaby®*). A distância bico de contato-peça (DBCP) foi mantida constante em 5 mm para todas as inclinações de pinos depositados. A técnica *CMT-PIN* foi estudada e parametrizada em parceria com Skhabovskyi (2018) antes de se executar o processo de deposição destes pinos no presente trabalho. Assim para a deposição de pinos do tipo “*Ball head*”, visando a menor altura possível dos mesmos, foram utilizados os parâmetros *Altitude Adaptation* (AA), *Base Adaptation* (BA) e *Ball/Cyl Adaptation* (BCA) selecionados nos seguintes valores, AA = -30, BA = -0,1 e BCA = 4,5 para todos os CPs.

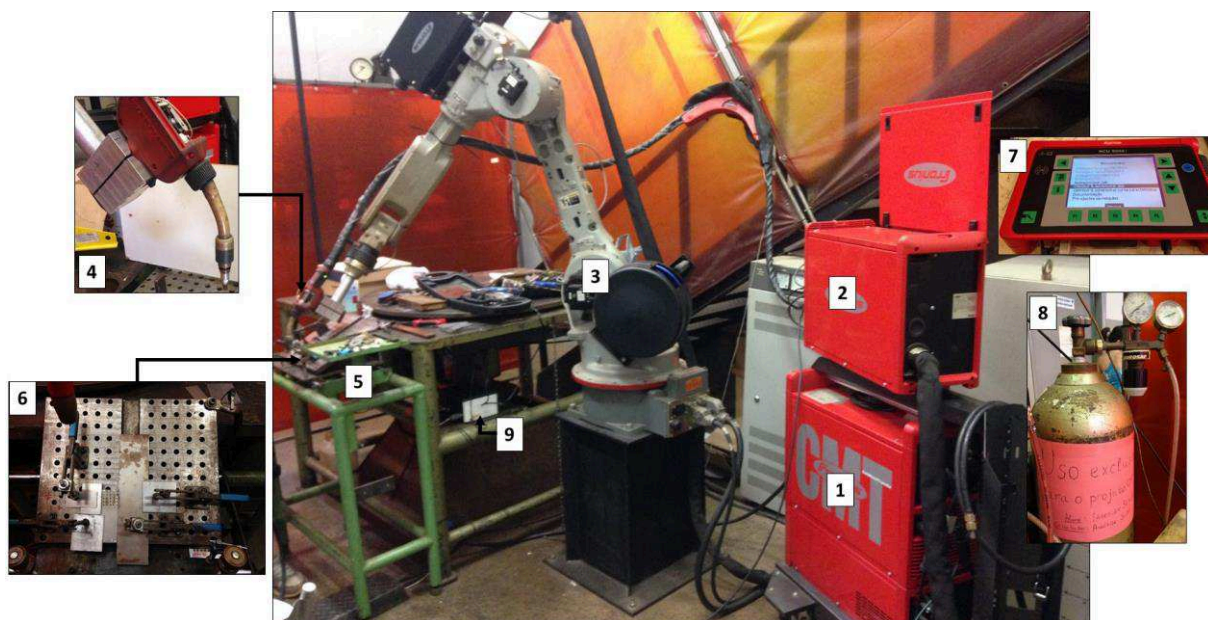


Figura 4.2 - Bancada de experimental: (1) fonte de soldagem Fronius TPS5000 *CMT*; (2) cabeçote alimentador de arame Fronius VR 7000 *CMT*; (3) robô MOTOMAN HP20 de seis graus de liberdade; (4) tocha de soldagem Fronius PullMig *CMT* refrigerada à água; (5) mesa de soldagem; (6) sistema de fixação das chapas metálicas para processo de deposição dos pinos (7) controle remoto Fronius RCU 5000i para fonte de soldagem; (8) cilindro e regulador

de vazão do gás de proteção e (9) sistema de aquisição de dados de corrente e tensão elétricas.

Skhabovskyi (2018) discrimina os diferentes intervalos de tempo que constam da deposição dos pinos. Com base nesta referência, as Fig. 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, os oscilogramas típicos da vazão de gás de proteção, da tensão e da corrente elétrica do processo *CMT-PIN* em um ciclo inteiro de deposição. O período de deposição (T) corresponde à soma do tempo de deposição do pino (t_{pino}) mais o tempo de transição ($t_{\text{transição}}$). O tempo de deposição do pino (t_{pino}) pode ser considerado igual ao tempo de aplicação do gás de proteção ($t_{\text{gás}}$), sendo que dentro deste último, tem-se o tempo para abrir o arco (t_{arco}), o tempo para soldar o arame na chapa de aço AISI 304 (t_{soldar}) e mais o tempo para ruptura do arame-eletrodo (t_{ruptura}). A Tabela 4.1 compila os valores médios (de cinco repetições) de cada um destes tempos, o que resulta em um tempo médio de aproximadamente 5,9 segundos para deposição de cada um dos pinos.

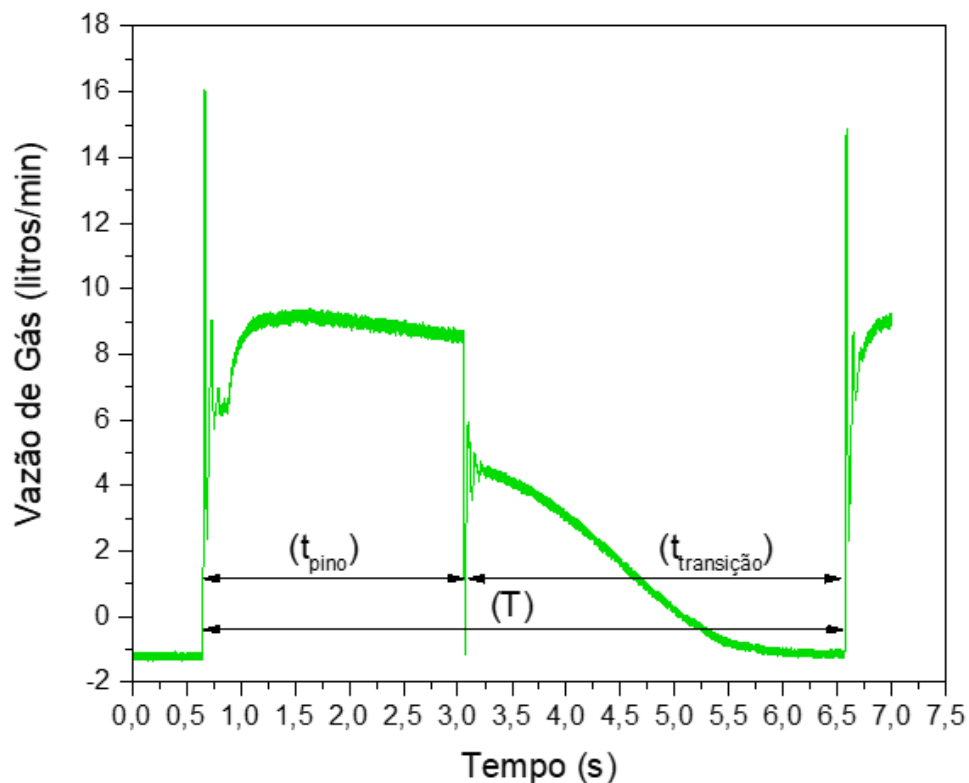


Figura 4.3 – Ciclo típico da vazão de gás de proteção para deposição de um pino sobre a chapa de aço inox.

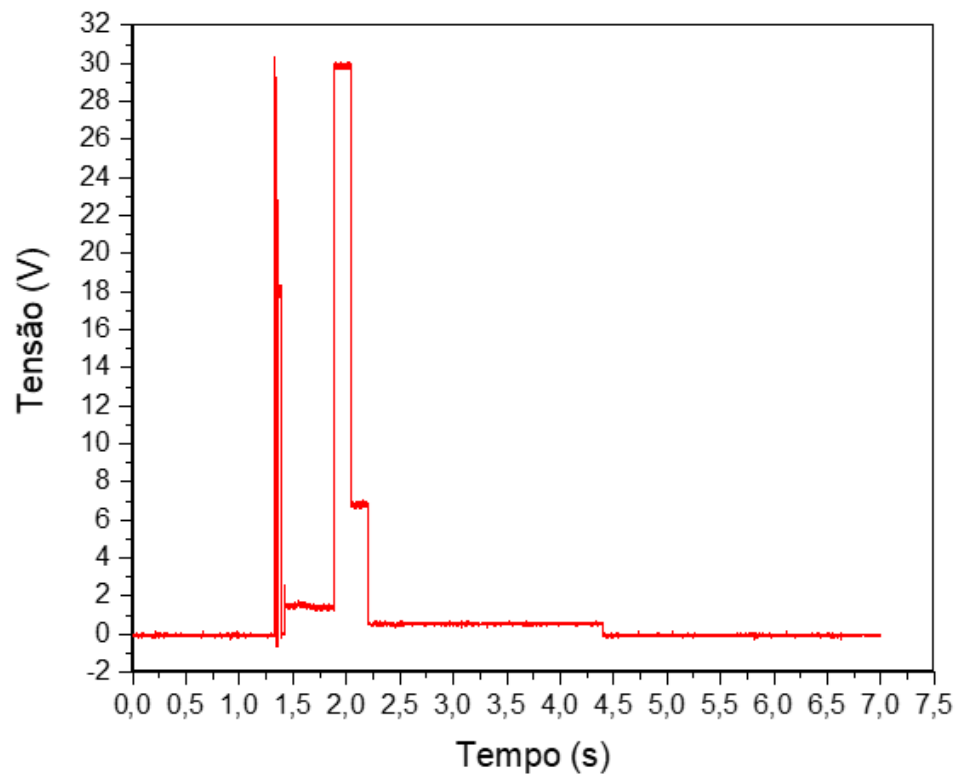


Figura 4.4 – Ciclo típico da tensão para deposição de um pino sobre a chapa de aço inox.

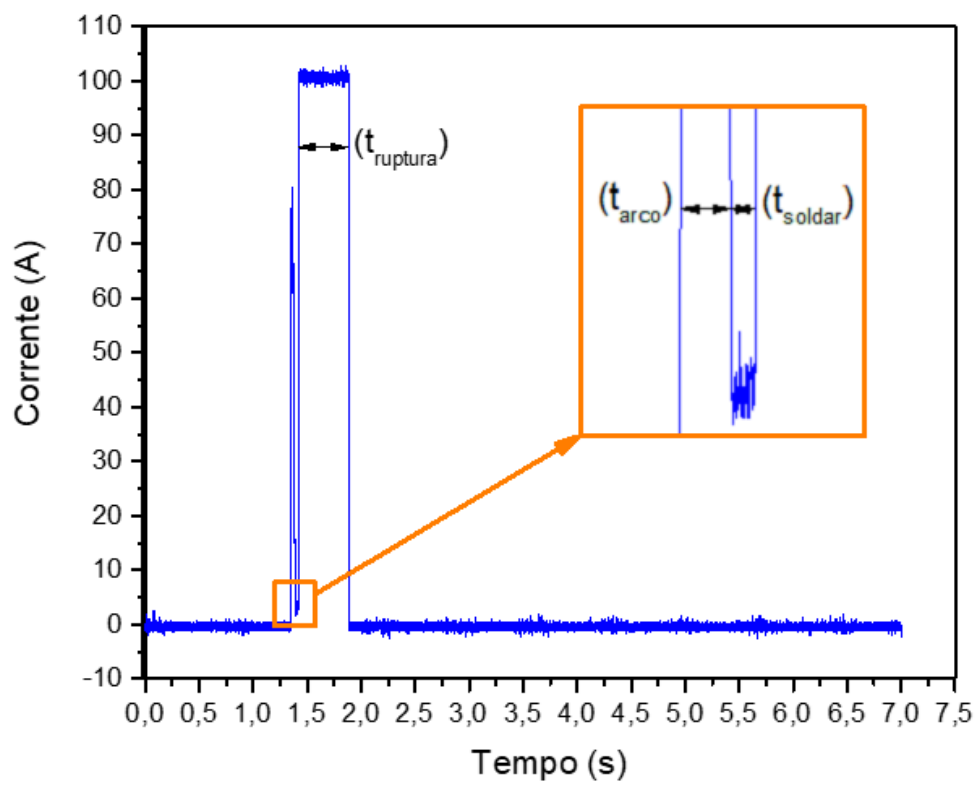


Figura 4.5 – Ciclo típico da corrente para deposição de um pino sobre a chapa de aço inox.

Tabela 4.1 – Parâmetros de tempo observados na deposição de um pino.

Parâmetros de tempo	Valores [s]
Período de deposição (T)	$5,92 \pm 0,03$
Tempo de deposição do pino (t_{pino})	$2,42 \pm 0,02$
Tempo de transição ($t_{\text{transição}}$)	$3,49 \pm 0,03$
Tempo de aplicação de gás de proteção ($t_{\text{gás}}$)	$2,42 \pm 0,02$
Tempo para abrir o arco (t_{arco})	$0,03 \pm 0,01$
Tempo para soldar arame (t_{soldar})	$0,01 \pm 0,00$
Tempo de ruptura (t_{ruptura})	$0,47 \pm 0,01$

Como dito no Capítulo III, foram depositados pinos *CMT-PIN* com três diferentes inclinações, pinos retos (90° com a superfície da chapa) e pinos inclinados (60° e 120° com a superfície da chapa). Para deposição dos pinos retos utilizou-se apenas a programação da matriz de trajetória do robô. Para o caso dos pinos inclinados, optou-se, pela facilidade, por inclinar a superfície superior da mesa de soldagem em 30° . Desta forma, mantendo a tocha de soldagem ajustada para deposição de pinos retos, foi possível depositar os pinos inclinados com 60° e 120° com a superfície da chapa, como esquematicamente ilustrado na Fig. 4.6.

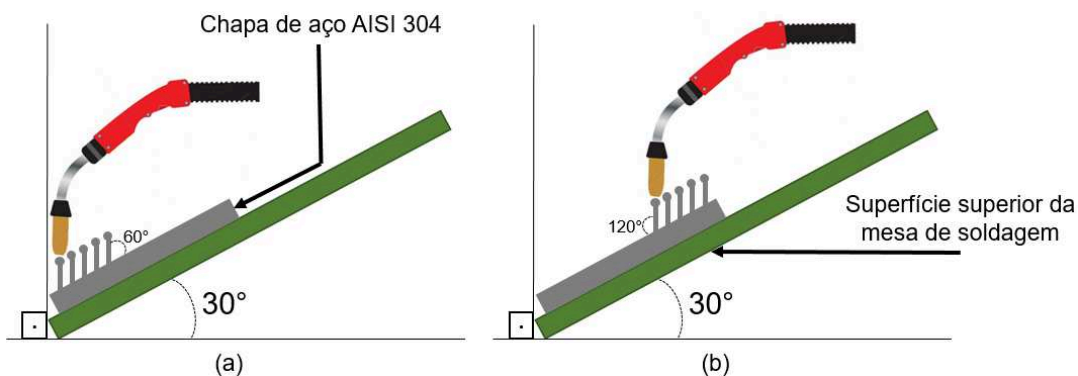


Figura 4.6 – Ilustração do aparato experimental utilizado para deposição dos pinos inclinados; (a) deposição dos pinos a 60° com a superfície da chapa e (b) deposição dos pinos a 120° com a superfície da chapa.

A sequência de deposição dos pinos foi mantida em paralelo à borda de 35 mm da chapa metálica sem alteração da direção de movimento da tocha de soldagem, independentemente do número da linha da matriz de trajetória do robô e do padrão de deposição, assim, depositando os pinos linha por linha. Isso facilitou a programação da matriz responsável pela trajetória do robô (Fig. 4.7). Logo após cada ciclo de deposição, as chapas

foram analisadas visualmente (qualitativamente) para verificar a presença e uniformidade de todos os pinos depositados.

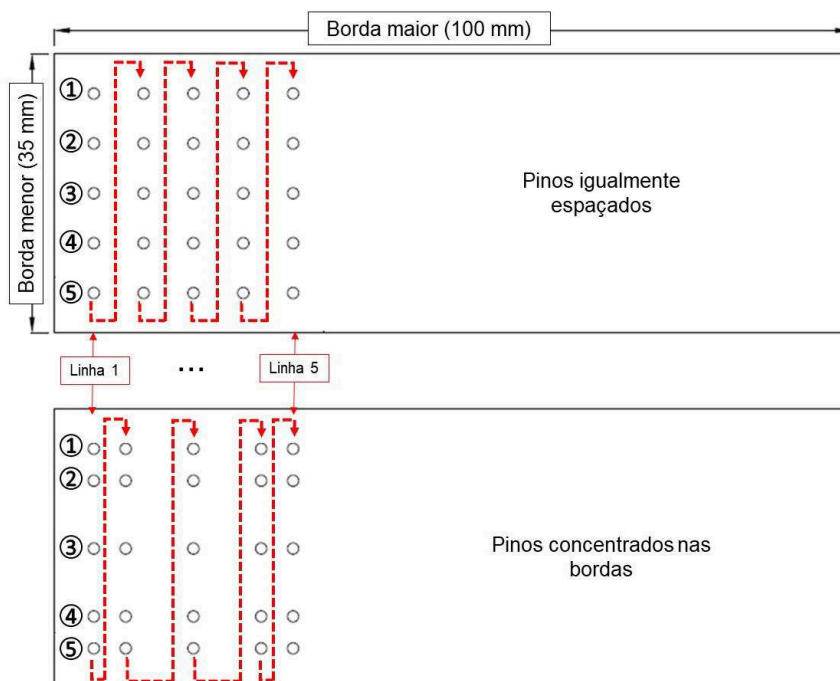


Figura 4.7 – Sequência de deposição dos 25 pinos *CMT-PIN* para ambos os padrões de disposição dos pinos.

Logo após a deposição dos pinos, executou-se uma primeira limpeza nas chapas, novamente com acetona, para retirada dos fumos e óxidos oriundos do processo de soldagem. Em seguida, antes de aplicar as lâminas de pré-impregnado, foi feita limpeza ultrassônica, mergulhando e vibrando conjuntos de 10 chapas metálicas por 10 min dentro de um *becker* com álcool etílico (C_2H_6O), para retirar qualquer contaminação remanescente. Por fim, as chapas foram embaladas em filme de PVC para evitar contaminação das superfícies até o momento da aplicação das lâminas de pré-impregnado.

Na 3ª etapa de fabricação foram aplicadas as lâminas de pré-impregnado (fibra de vidro/resina epóxi) na região da junta híbrida (chapa de aço AISI 304 + pinos *CMT-PIN*). Cada lâmina de pré-impregnado foi cortada com auxílio de uma tesoura manual com uma área de (200 × 340) mm, deixando um espaçamento de, aproximadamente, 3 mm entre os chapas metálicas adjacentes, para possibilitar uma folga de corte/separação, como ilustrado na Fig. 4.8. O filme plástico de PVC, previamente colocado, foi retirado imediatamente antes da aplicação das lâminas de pré-impregnado e todas foram laminadas, uma sobre as outras, com a direção de 0° de suas fibras alinhada com o comprimento das chapas metálicas. Só após serem laminadas uma sobre as outras que o conjunto das lâminas foi posicionado sobre as chapas pinadas, sendo que, a prensa foi a responsável por fazer com que os pinos

adentrassem nas diversas camadas de lâminas de pré-impregnados. Foram utilizadas 15 lâminas de pré-impregnado para garantir a cobertura total dos pinos, mesmo após a prensagem a quente.

Durante a 4ª etapa de fabricação foi efetuado o processo de cura do laminado compósito. A prensa de cura a quente utilizada é do modelo CMG100H-15-C e fabricada pela *CARVER* (Fig. 4.9). Primeiramente, foi necessário proteger as chapas auxiliares (laterais, central e superior) e ambas as faces de aquecimento da prensa com desmoldante (POLIDESMO 55). As placas auxiliares tinham a função de fazer com que, durante o processo de cura e prensagem, os CPs permanecessem com a geometria desejada (Fig. 4.9). A área útil das faces de aquecimento da prensa é de (380 × 380) mm o que permitiu curar o equivalente a 18 CPs por ciclo. A Figura 4.10 ilustra as etapas 3 e 4 anteriormente descritas. A pressão e o ciclo de cura (baseado em Skhabovskyi 2018) utilizados são apresentados na Fig. 4.11. A pressão uniformemente distribuída, aplicada pela prensa, foi responsável por garantir a penetração dos pinos através das 15 camadas de pré-impregnado. Tanto a 3ª quanto a 4ª etapas foram efetuadas nos Laboratórios de Análises Químicas e Térmicas do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG (UNESP-Guaratinguetá).

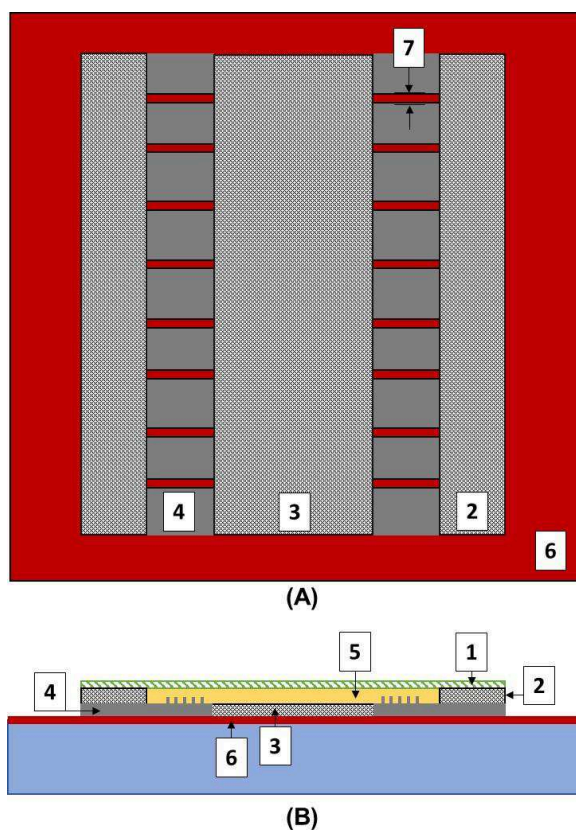


Figura 4.8 – Esquema ilustrativo da montagem utilizada para laminação e cura do laminado compósito: (A) vista superior; e (B) vista frontal; onde: (1) chapa auxiliar superior; (2) chapas

auxiliares laterais; (3) chapa auxiliar inferior; (4) chapas metálicas; (5) camada de compósito; (6) face inferior aquecida da prensa e (7) espaçamento entre chapas metálicas.

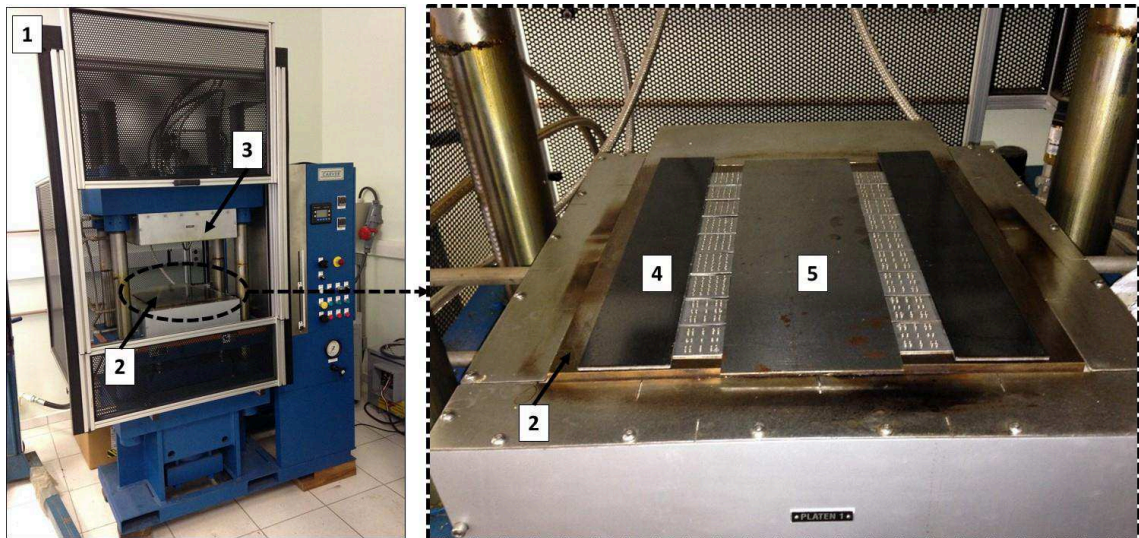


Figura 4.9 – (1) Prensa de cura a quente modelo CMG100H-15-C do fabricante *CARVER*; (2) face inferior de aquecimento; (3) face superior de aquecimento; (4) chapas auxiliares laterais e (5) chapa auxiliar central. Obs.: A região pontilhada destaca a câmara de prensagem do compósito.

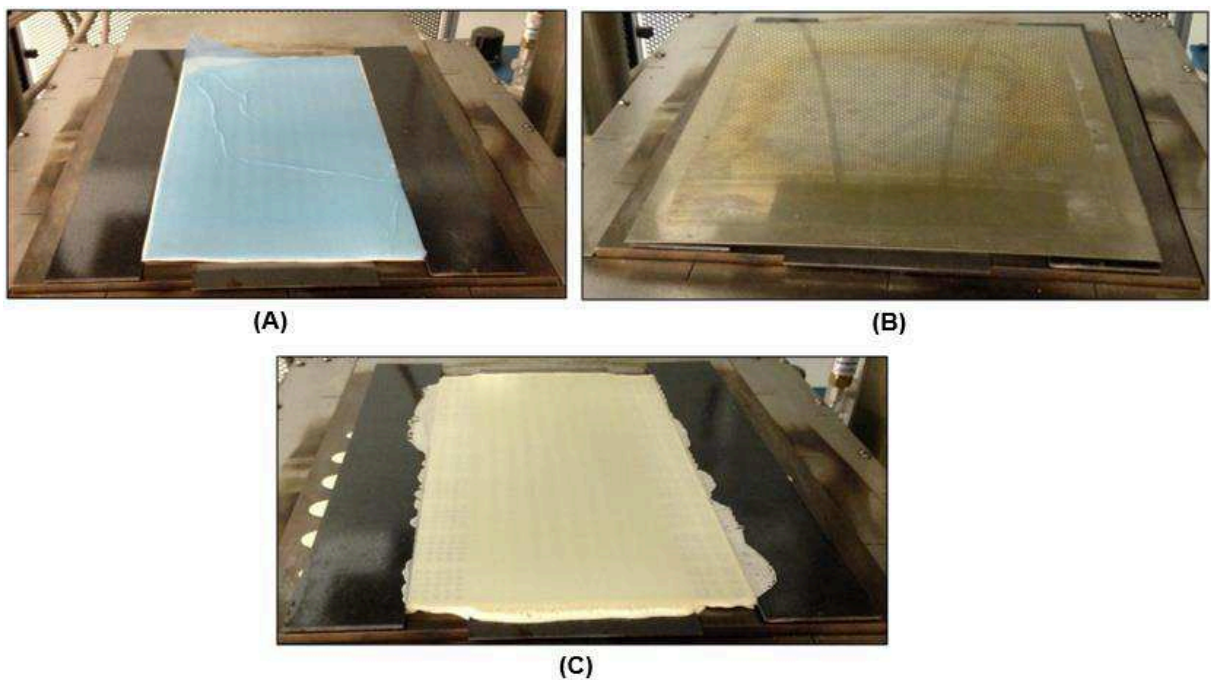


Figura 4.10- (A) Montagem logo após a laminação das camadas de compósito sobre as chapas metálicas pinadas; (B) detalhe da chapa auxiliar superior, já com desmoldante, posicionada e (C) placa com 18 CPs logo após a prensagem e cura.

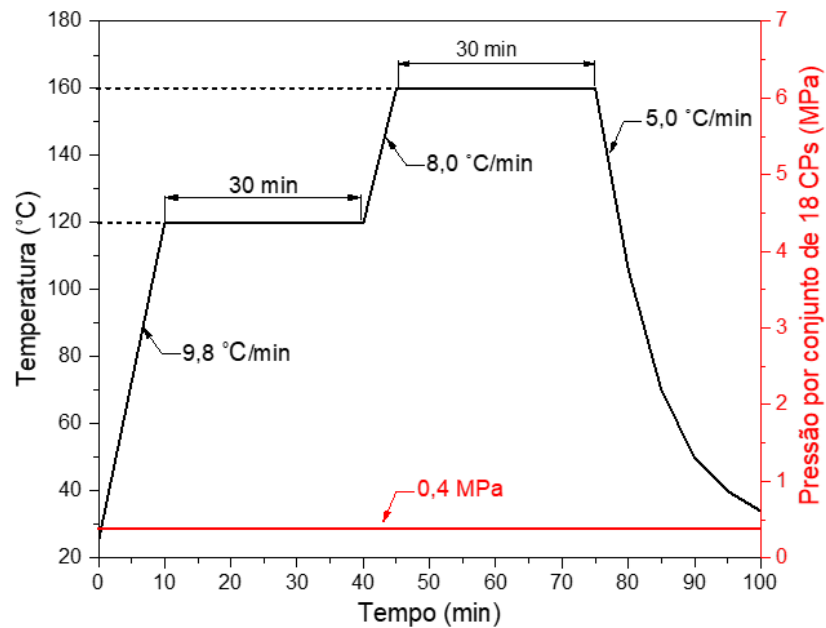


Figura 4.11 - Ciclo de cura utilizado na fabricação do composto das juntas híbridas.

Para a conclusão da parte de fabricação, fez-se necessário ainda a separação e remoção do excesso de material composto presente nas bordas e entre os CPs. Estes últimos processos conclusivos foram executados com auxílio de uma serra de fita vertical e com uma lixa rotativa de 80 *mesh*, respectivamente. A Figura 4.12 apresenta exemplo de três CPs após o processo completo de fabricação.

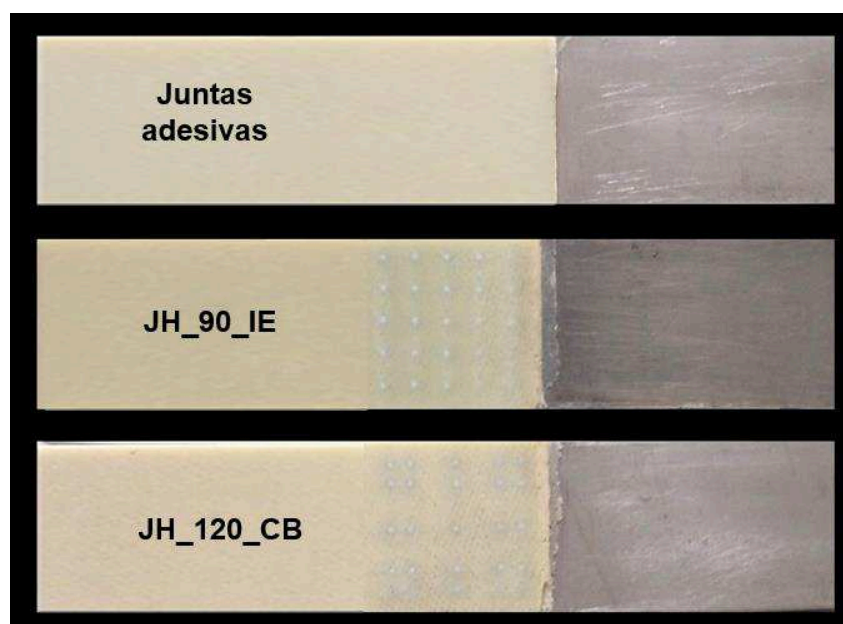


Figura 4.12 – CPs com pinos *CMT-PIN* e sem pinos (juntas adesivas), após processo completo de fabricação.

CAPÍTULO V

CARACTERIZAÇÃO DAS JUNTAS METAL-COMPÓSITO

5.1 Características dos Pinos *CMT-PIN*

Para caracterizar os pinos utilizados em termos geométricos, levantou-se as dimensões médias baseadas em 3 pinos tomados na linha diagonal da disposição de deposição de cada um dos CPs. As medidas foram executadas por meio de micrômetro calibrado e são apresentadas na Tab. 5.1. Observa-se que o diâmetro médio da cabeça dos pinos divergiu em 0,05 mm. Para a inclinação, a divergência foi de apenas 2° e para a altura média foi de 0,36 mm (entre os diferentes tipos de pinos). Entretanto, levando-se em conta a quantidade de pinos depositados (2750 pinos) e os desvios nas medidas, pode-se afirmar que se obteve similaridade de geometrias.

Tabela 5.1 – Dimensões geométricas dos pinos depositados.

Tipos de pinos	Altura média [mm]	Diâmetro médio de cabeça [mm]	Inclinações médias [°]
Inclinados em 60°	2,93 ± 0,03	1,50 ± 0,02	62,0 ± 2,0
Inclinados em 90°	2,57 ± 0,13	1,45 ± 0,03	90,0 ± 2,0
Inclinados em 120°	2,64 ± 0,05	1,50 ± 0,02	122,0 ± 2,0

As Figuras 5.1 até 5.3 apresentam o aspecto final das chapas de aço AISI 304 pinadas com detalhe dos pinos depositados, nas três diferentes inclinações e para a distribuição igualmente espaçada, logo após a soldagem pelo processo *CMT-PIN*. As imagens foram feitas utilizando uma câmera fotográfica (chapas pinadas) e um microscópio ótico (detalhe dos pinos). Notam-se, em todos os casos, que os pinos ficaram similares, cabeças esféricas e bases bem formadas, mesmo com a imposição das diferentes inclinações. Além disso, é

possível perceber a presença de manchas escuras provenientes do processo de soldagem, que foram removidas antes da laminação do compósito. Pelas vistas em perspectiva é possível inferir que todos os pinos foram depositados no local correto e com geometrias semelhantes. No caso dos pinos a 90° com a superfície e igualmente distribuídos (Fig. 5.1), é mais visível a leve estricção que ocorre logo acima da base dos pinos. A estricção, provavelmente, se deve a característica de deposição do pino por *CMT-PIN*; após a base ser fundida, esta região se mantém ainda aquecida, o arame eletrodo é puxado e então é gerada a leve estricção.

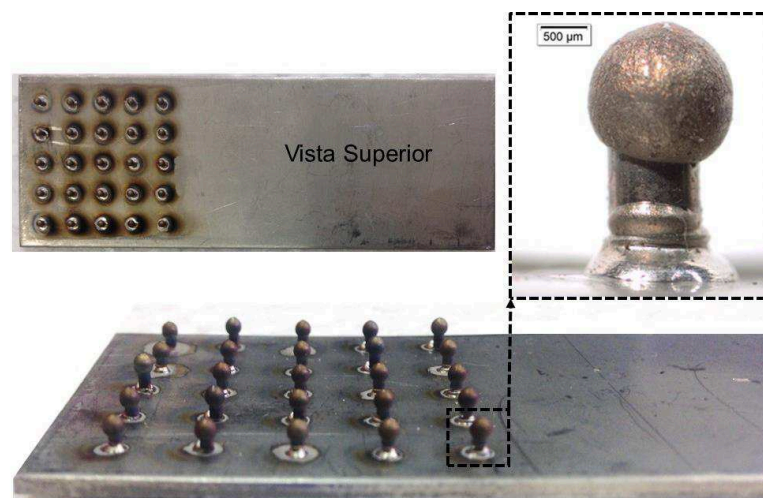


Figura 5.1 – Pinos *CMT-PIN* de um CP do grupo JH_90_IE.

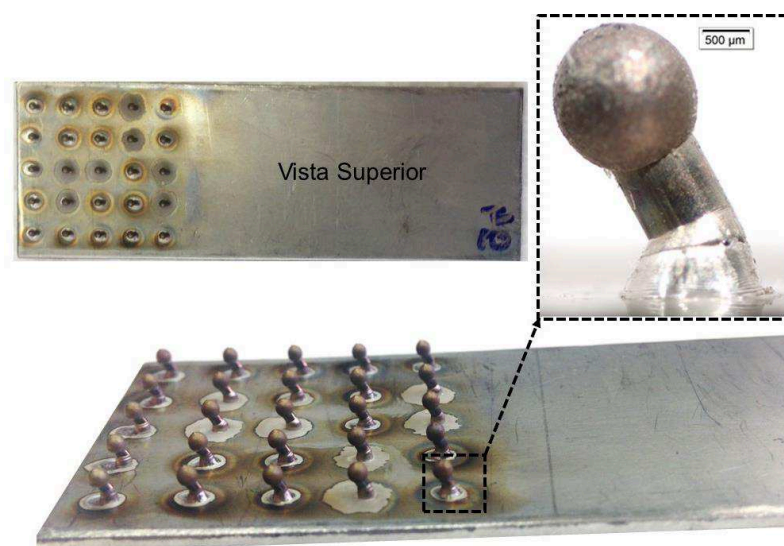


Figura 5.2 – Pinos *CMT-PIN* de um CP do grupo JH_120_IE.

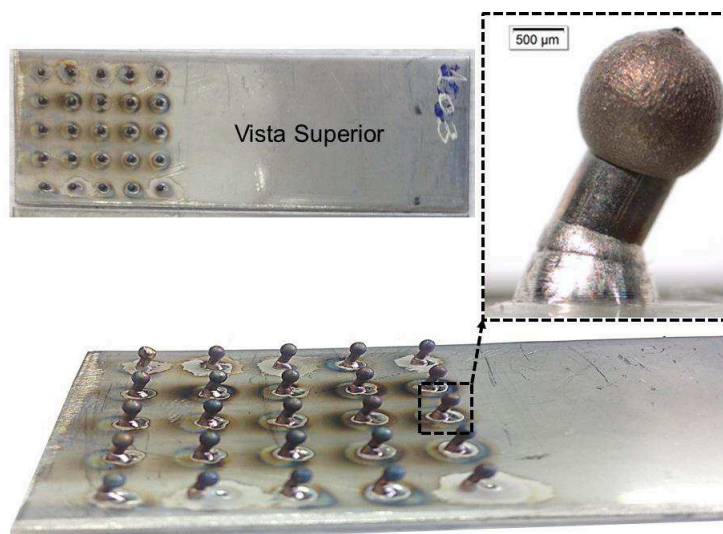


Figura 5.3 – Pinos *CMT-PIN* de um CP do grupo JH_60_IE.

5.2 Características das Secções Transversais das Juntas Híbridas

Para possibilitar um estudo qualitativo da interface (chapa metálica – pino – compósito) dos CPs fabricados, fez-se necessário a utilização de processos de corte, lixamento e análises em microscópio ótico. Primeiramente, por meio de uma serra de fita de arco, a região da junta dos CPs foi cortada no mesmo alinhamento longitudinal como ilustrado no Capítulo III (Fig. 3.1 - secção longitudinal B-B'). Em seguida, as secções transversais foram preparadas por sucessivos lixamentos em 80, 150, 240, 400 e 600 *mesh*. Por fim foram feitas imagens com aumentos variados entre 0,67 e 2,4 vezes.

As Figuras 5.4 até 5.9 apresentam as interfaces típicas das secções longitudinais e detalhes da região dos pinos de cada uma das diferentes disposições de deposição utilizadas nas juntas híbridas fabricadas. Nota-se em todos os casos que houve o envolvimento do compósito tanto em torno da cabeça quanto da base dos pinos (sem vazios de separação entre metal e compósito), o que pode favorecer um melhor efeito de ancoramento nas juntas híbridas. Mesmo com a aplicação da pressão durante o processo de cura do compósito, não houve mudança na inclinação dos pinos. Além disso, houve incidência de leve porosidade, provavelmente pelo processo de cura não ter sido feito sob vácuo.

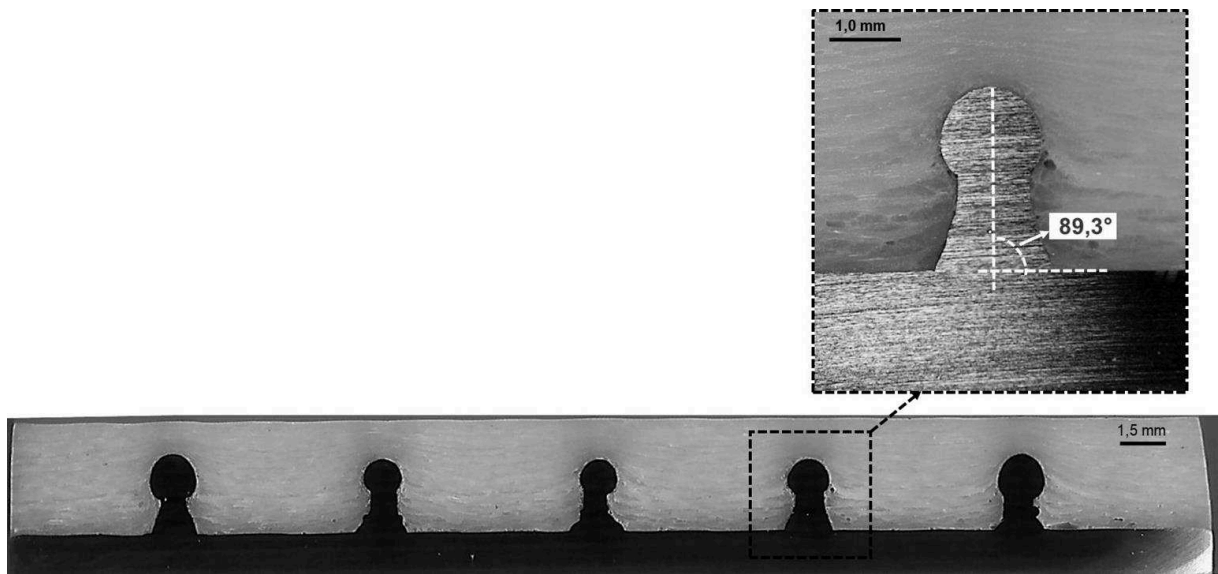


Figura 5.4 - Secção longitudinal típica e detalhe da região do pino do grupo de CPs JH_90_IE.

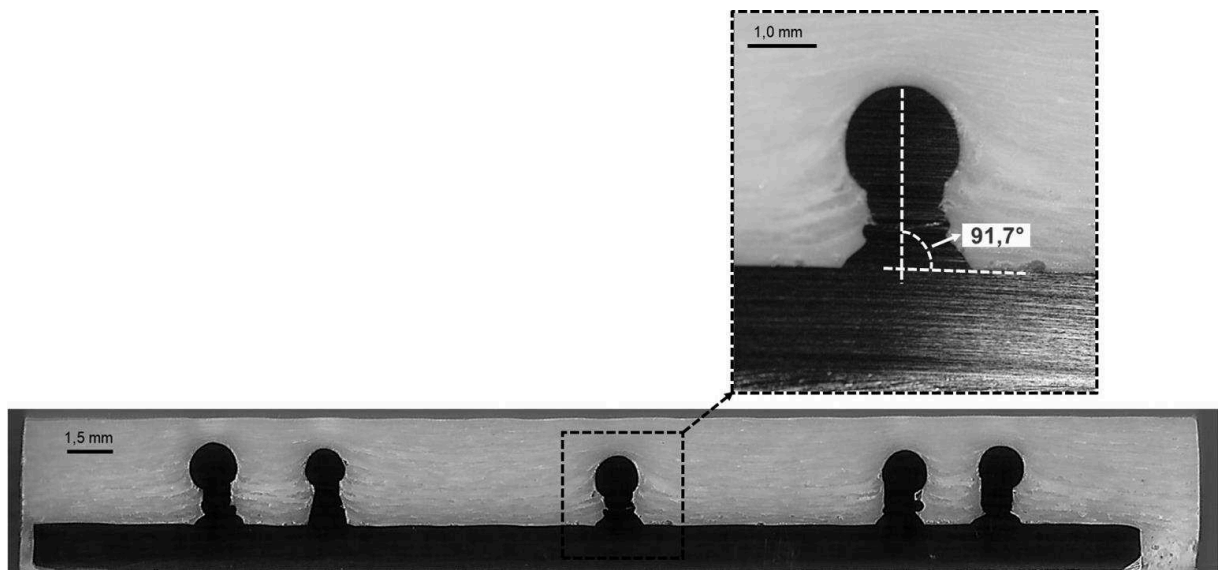


Figura 5.5- Secção longitudinal típica e detalhe da região do pino do grupo de CPs JH_90_CB.

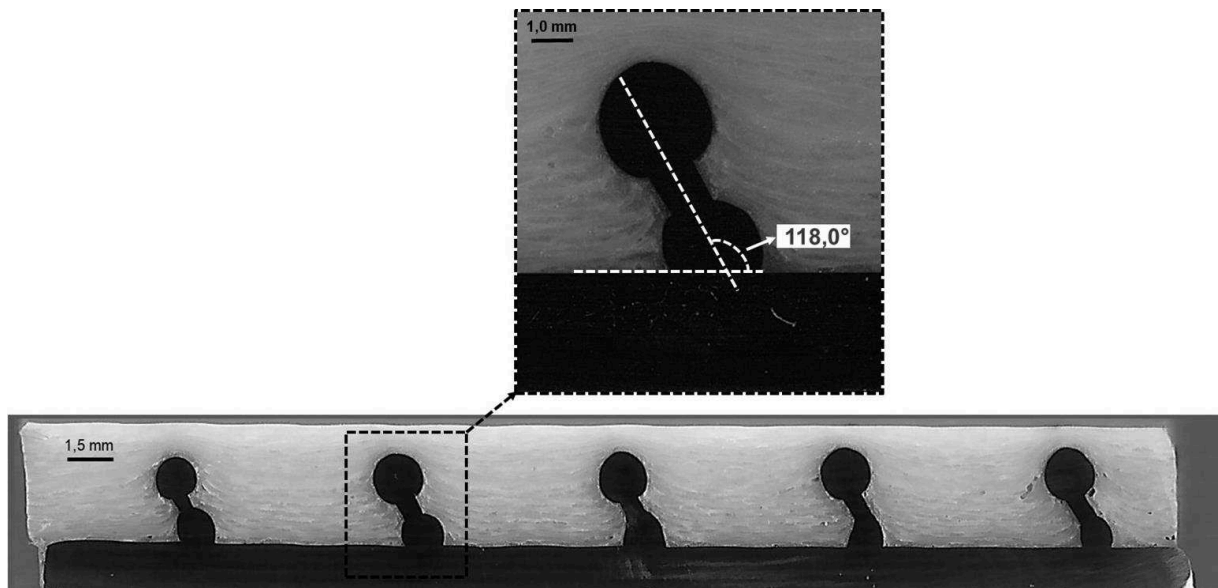


Figura 5.6 - Secção longitudinal típica e detalhe da região do pino do grupo de CPs JH_120_IE.

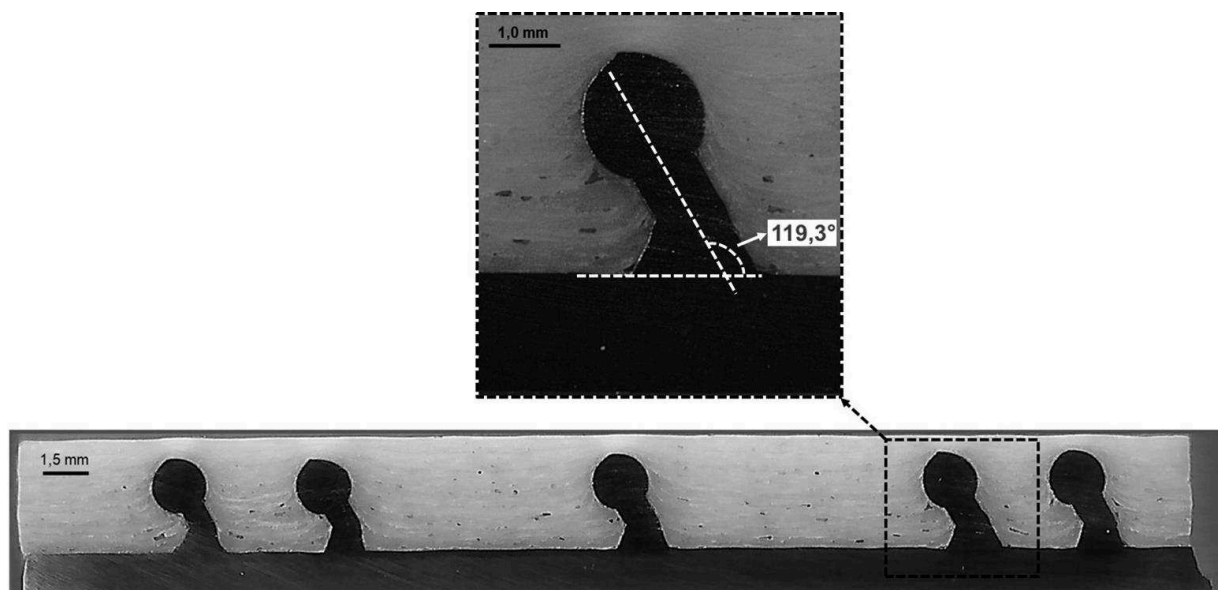


Figura 5.7 - Secção longitudinal típica e detalhe da região do pino do grupo de CPs JH_120_CB.

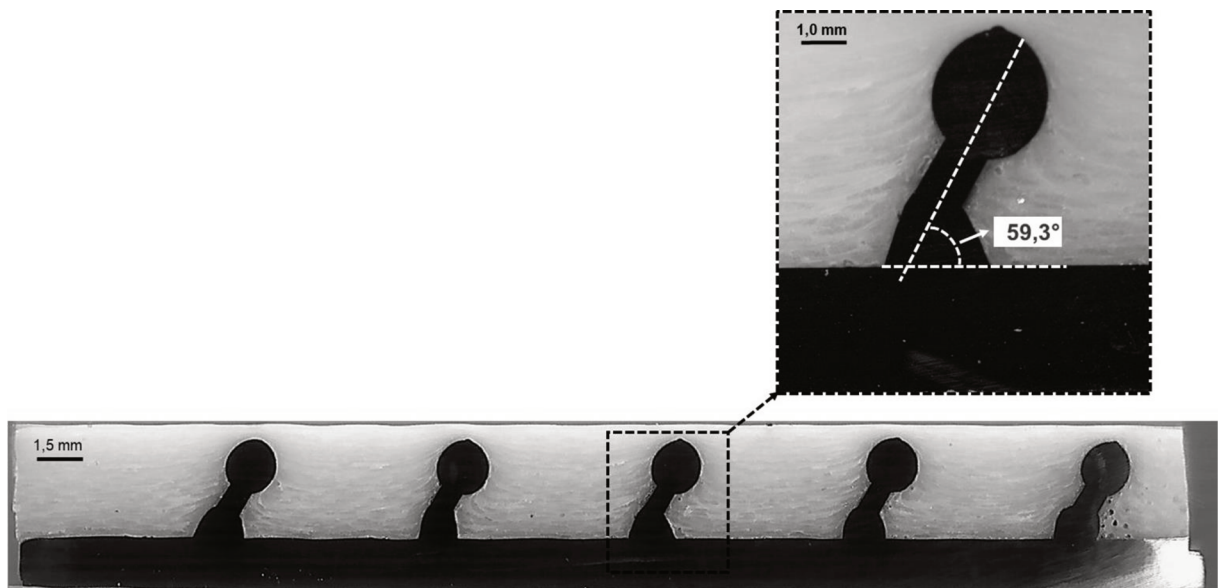


Figura 5.8 - Secção longitudinal típica e detalhe da região do pino do grupo de CPs JH_60_IE.

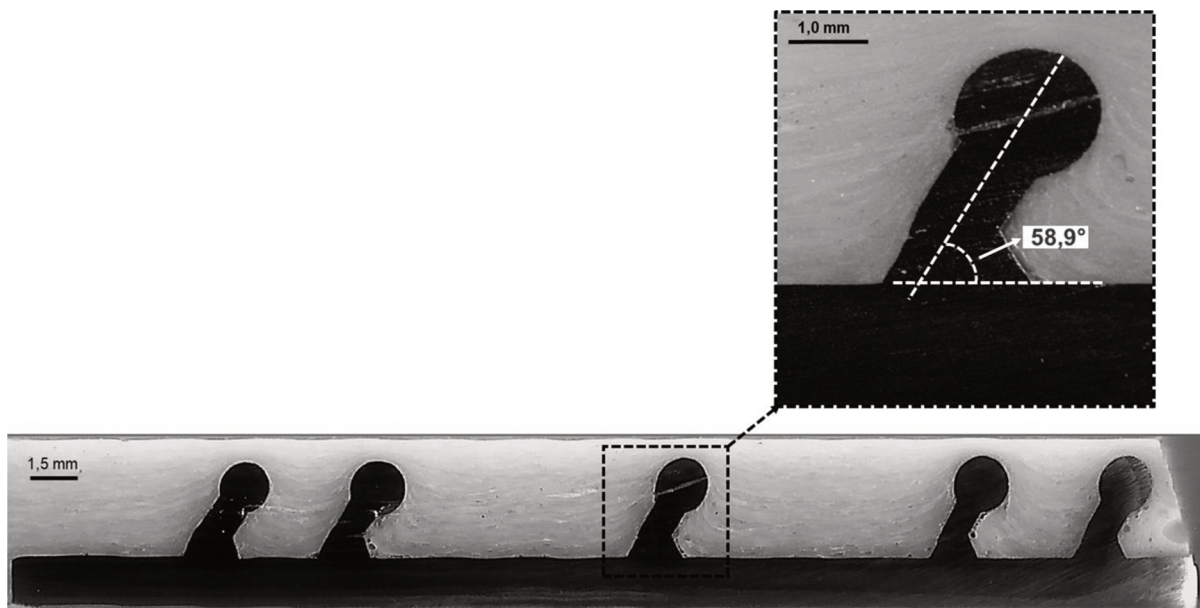


Figura 5.9 - Secção longitudinal típica e detalhe da região do pino do grupo de CPs JH_60_CB.

5.3 Caracterização de Massa dos Corpos de Prova

Com intuito de determinar a massa de cada parte dos CPs, foram feitas pesagens em diferentes momentos do trabalho: 1) chapas metálicas; 2) chapas metálicas com pinos e 3) chapas metálicas com pinos e compósito (CPs). Para tal utilizou-se uma balança de precisão

calibrada *Shimadzu UX6200H* com resolução de 0,01 g. Com base nestes três valores de massa, foram determinados o ganho de massa médio com a deposição dos pinos, a massa média de cada pino e a massa média de compósito. A Tabela 5.2 apresenta todos os valores de massa obtidos.

Tabela 5.2 – Massas médias das diversas partes dos CPs.

Grupos (Tipos de CPs)	Massa média do constituinte metálico [g]	Massa média do const. metálico e pinos [g]	Massa dos CPs [g]	Ganho de massa médio com a deposição dos pinos [g]	Massa média de cada pino [g]	Massa média do constituinte compósito [g]
JH_90_IE	41,47	42,02	64,43	0,55	0,02	22,41
JH_90_CB	41,12	41,68	64,33	0,56	0,02	22,65
JH_120_IE	41,09	41,58	64,03	0,48	0,02	22,45
JH_120_CB	41,22	41,86	64,31	0,64	0,02	22,46
JH_60_IE	42,14	42,73	64,46	0,59	0,02	21,73
JH_60_CB	40,68	41,33	63,80	0,65	0,03	22,47
Valores médios globais	41,29 ± 0,48	41,87 ± 0,48	64,23 ± 0,24	0,58 ± 0,06	0,02 ± 0,00	22,36 ± 0,32

Analisando a Tab. 5.2, observa-se principalmente que o ganho de massa com a deposição dos pinos *CMT-PIN* é muito baixo, representando apenas 0,90% da massa final média dos CPs. Considerando-se a distribuição com 25 pinos em uma área de 35 mm x 35 mm e o respectivo ganho de massa médio global com a deposição dos pinos, isso equivaleria a um acréscimo de massa de 408 g/m². Levando-se em conta as aplicações na indústria aeronáutica, por exemplo, pode-se concluir que o ganho de massa pelo acréscimo dos pinos como ancoradores nas juntas híbridas, não influencia significativamente no aumento de massa do conjunto.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS JUNTAS METAL-COMPÓSITO NÃO ENVELHECIDAS

Para realização do ensaio mecânico de cisalhamento utilizou-se uma máquina universal de ensaios do tipo servo-hidráulica *MTS Landmark 647* de forma a tracionar os CPs e implicar um esforço de cisalhamento nas juntas. A pressão das garras foi ajustada em 1200 PSi e a velocidade de deslocamento em 1 mm/min. A temperatura do laboratório estava em 25 °C. Empregaram-se também duas chapas (1,5 mm e 3,17 mm espessura) como igualadoras de espessura para os CPs, fazendo com que o plano de união (interface entre chapa metálica e o compósito) dos mesmos coincidissem com o plano central de aplicação de carga pelas garras. Estes ensaios tiveram o objetivo de avaliar a resistência e rigidez gerais e os modos de falha das juntas híbridas. Utilizaram-se também duas câmeras durante o ensaio de cisalhamento; uma câmera fotográfica digital de alta resolução (16 megapixels) e uma térmica (fabricante *FLIR®* modelo A325 com resolução de 320 × 240 pixels), posicionadas de maneira a gravar todo o ensaio de dois pontos de vistas distintos. A câmera convencional foi responsável por filmar a parte lateral (perfil) dos CPs e a câmera térmica a parte frontal (região da junta) dos CPs. Um esquema ilustrativo da montagem utilizada para realização do ensaio de cisalhamento é apresentado na Fig. 6.1.

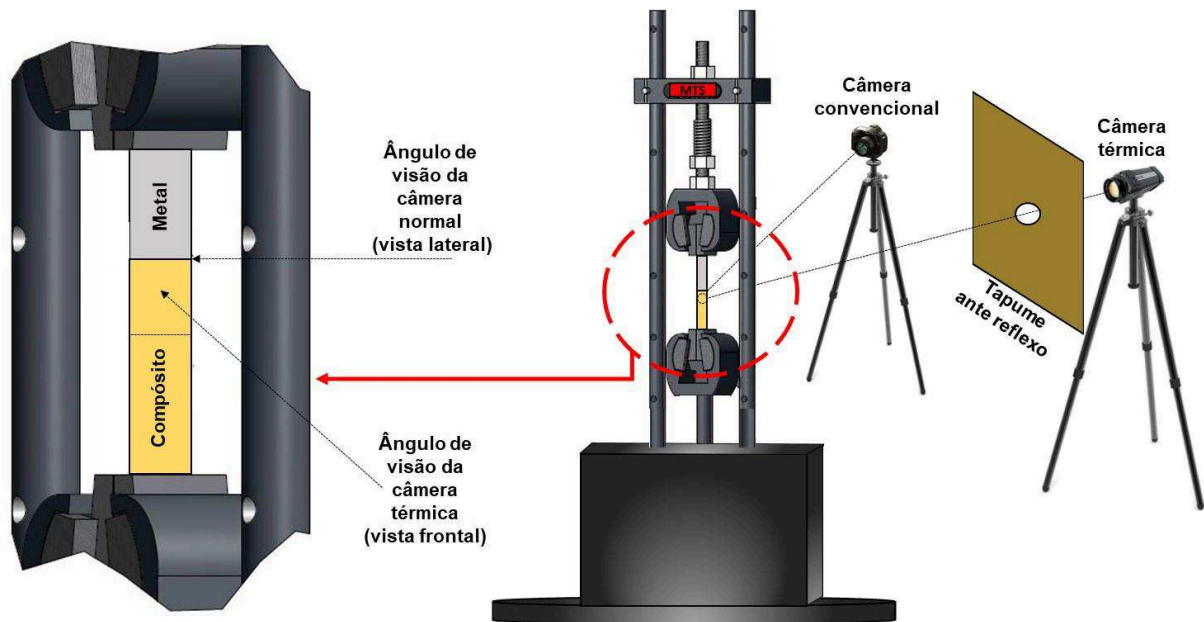


Figura 6.1 – Ilustração do aparato experimental utilizado no ensaio de cisalhamento das juntas.

As curvas a seguir (Figs. de 6.2 até 6.8) apresentam os resultados de deslocamento *versus* carga obtidos para os testes de cisalhamento das juntas metal-compósito na condição sem envelhecimento. Executaram-se cinco repetições para todos os testes, por questões de repetitividade estatística, sendo que destes cinco, através dos critérios de melhor repetitividade e tipo de fratura, escolheu-se três que foram considerados para as análises. A seguir, primeiramente faz-se uma análise geral e descritiva e posteriormente uma análise específica e quantitativa para cada um dos tipos de juntas.

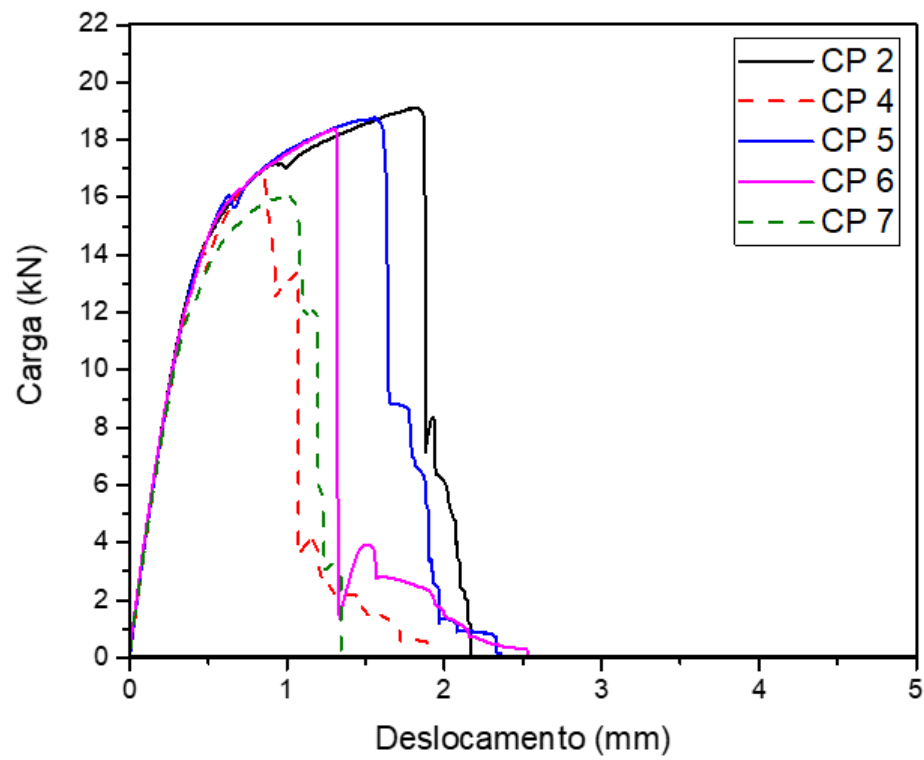


Figura 6.2 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_90_IE.

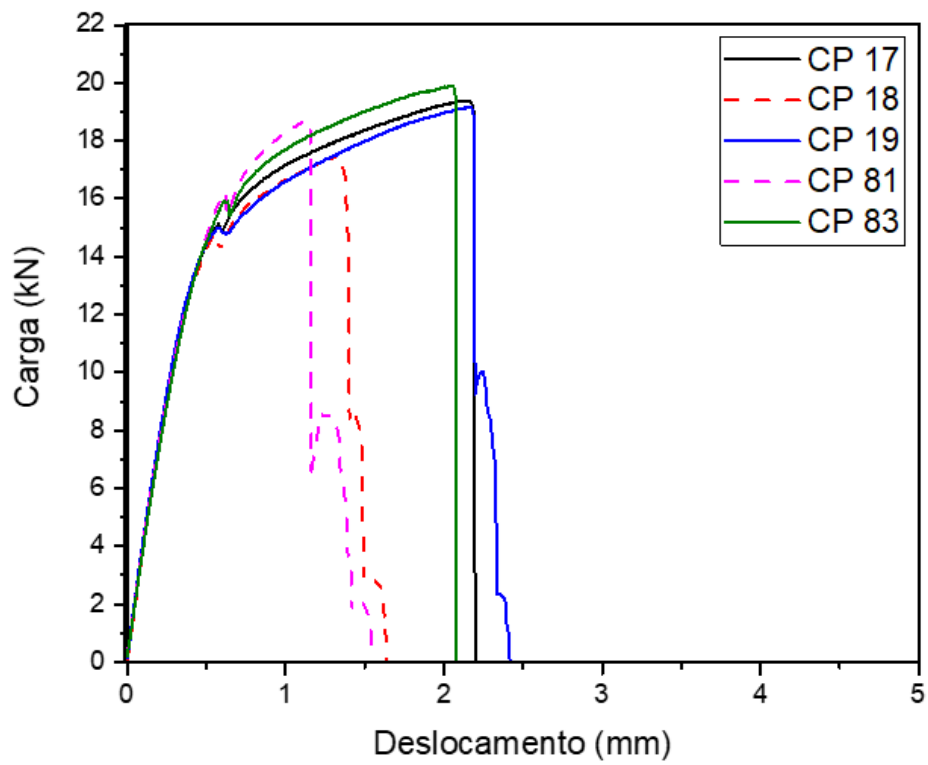


Figura 6.3 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_90_CB.

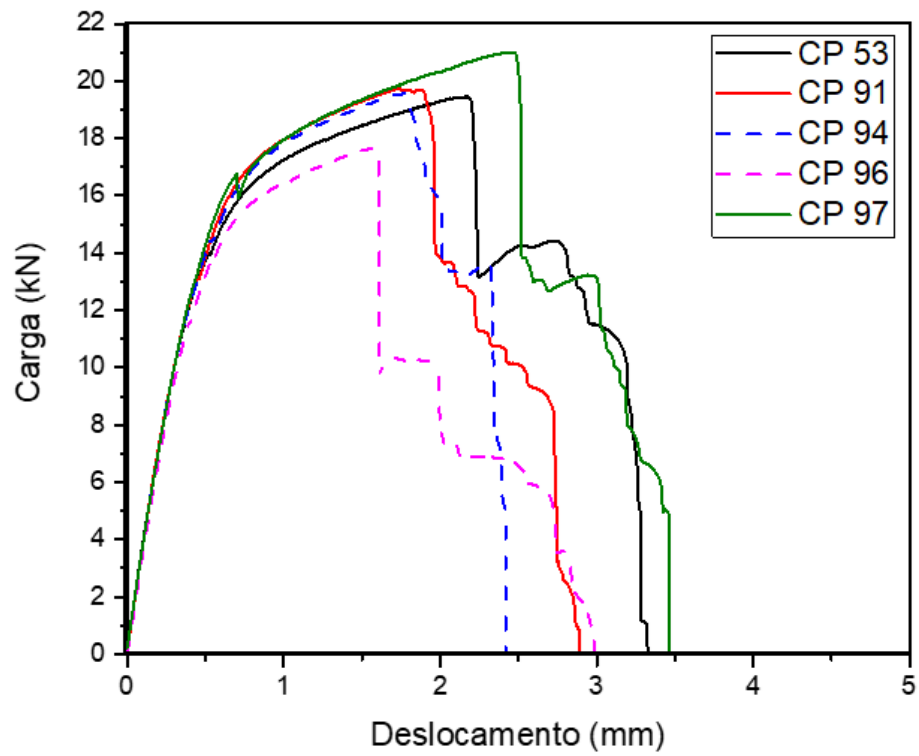


Figura 6.4 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_120_IE.

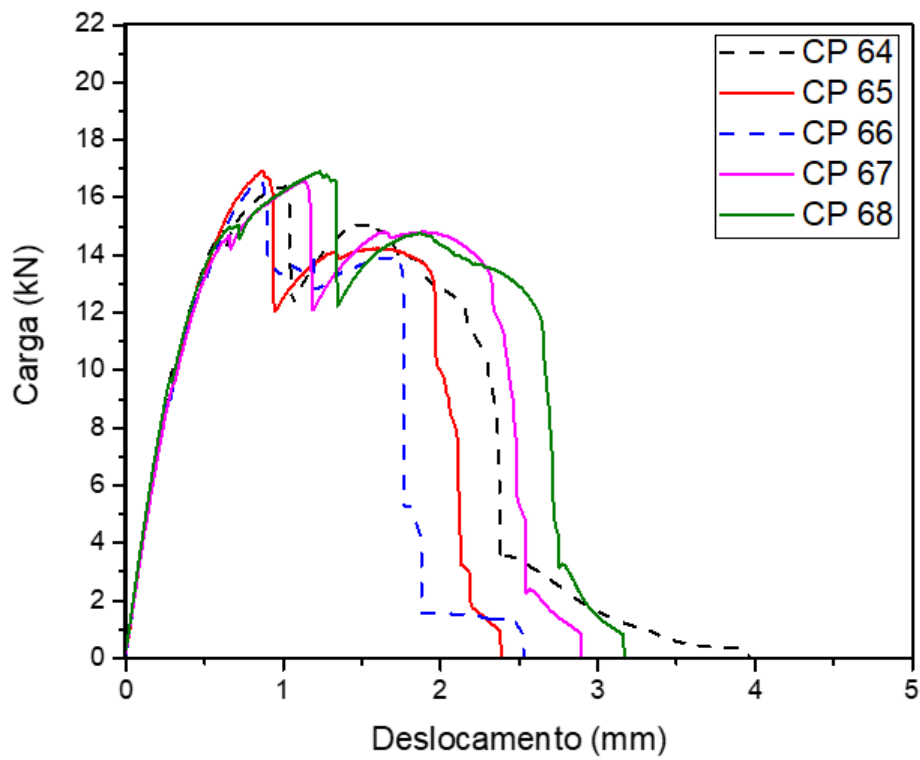


Figura 6.5 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_120_CB.

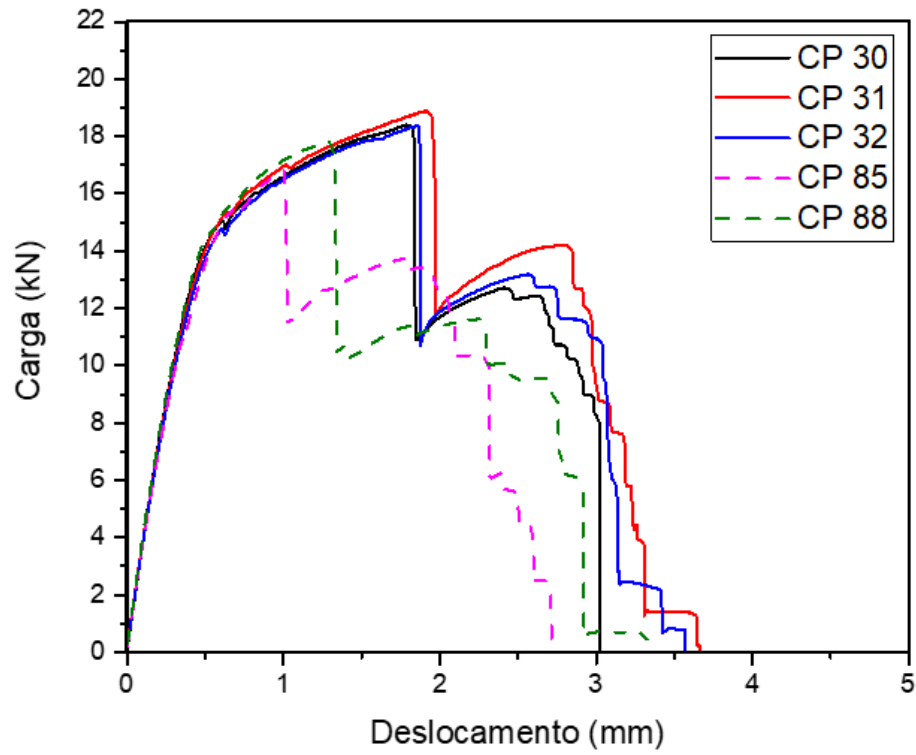


Figura 6.6 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_60_IE.

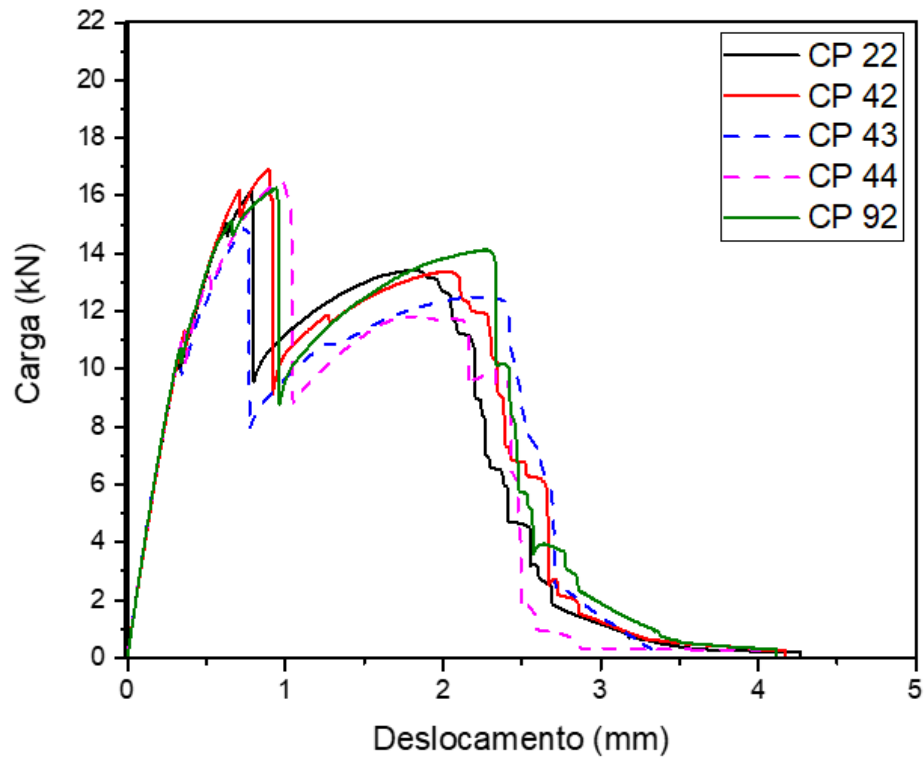


Figura 6.7 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_60_CB.

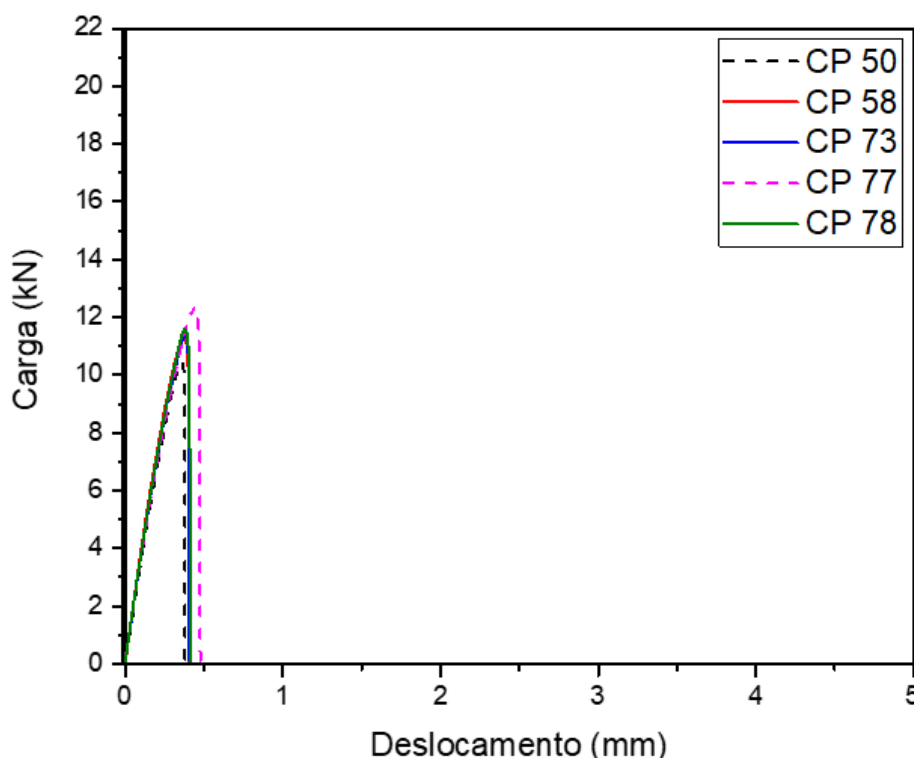


Figura 6.8 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo Juntas Adesivas.

A Figura 6.2 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas do grupo JH_90_IE - corpos de prova com pinos a 90° com a superfície metálica e distribuídos de forma igualmente espaçada. Considerando como critério de exclusão o tipo de fratura, os resultados dos CPs de nº 4 e 7 foram descartados da análise, pois apresentaram rompimento da parte em compósito e não da junta híbrida, devido provavelmente a falha de fabricação. Para o caso dos CPs de nº 2, 5 e 6 o rompimento ocorreu na região da junta híbrida. A carga máxima obtida variou entre 18,36 e 19,12 kN e o deslocamento final (total/até a falha) entre 2,16 e 2,53 mm. Observa-se, neste caso (CPs 2, 5 e 6), que a junta híbrida resiste até uma carga de $\approx 18,5$ kN quando sofre uma primeira queda abrupta de carga suportada, entretanto, não catastrófica (brusca). Para o CP de nº 5, como exemplo, entre $\approx 9,5$ e 0 kN (rompimento total) percebe-se uma queda de resistência da junta de forma escalonada (em degrau), proporcionada pela resistência remanescente gerada pela presença das fileiras de pinos, as quais evitam a falha catastrófica.

A Figura 6.3 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas do grupo JH_90_CB - corpos de prova com pinos a 90° com a superfície metálica e distribuídos de forma concentrada nas bordas. Considerando, neste caso, como critério de exclusão a repetitividade, os resultados dos CPs de nº 18 e 81 foram descartados da análise. Para os CPs de nº 17, 19 e 83 as juntas romperam-se de forma similar, sem rompimento da

parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 19,17 e 19,89 kN e o deslocamento total entre 2,08 e 2,42 mm. Os CPs de nº 17 e 83 tiveram um rompimento aparentemente catastrófico das juntas, diferentemente do CP de nº 19 que, após o primeiro rompimento (queda na carga de 19,17 para ≈ 10 kN) exibiu queda de resistência da junta de forma escalonada. Mesmo sendo desconsiderados da análise, é importante ressaltar que os CPs de nº 18 e 81 também obtiveram a queda na carga de maneira escalonada, proporcionada pela presença dos pinos.

A Figura 6.4 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas do grupo JH_120_IE - corpos de prova com pinos a 120° com a superfície metálica e distribuídos de forma igualmente espaçada. Para este caso, a exclusão de curvas foi baseada considerando tanto o critério de repetitividade quanto o critério de tipo de fratura; o CP de nº 96 foi desconsiderado por falta de repetitividade e o CP de nº 94 por ter tido rompimento no compósito e não da junta. As juntas dos CPs de nº 53, 91 e 97 romperam-se similarmente e sem rompimento da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 19,46 e 21,01 kN e o deslocamento final entre 2,89 e 3,46 mm. Novamente nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica, ou seja, todas as quedas de carga foram do tipo escalonada, o que, por exemplo, é muito importante para a indústria aeronáutica, pois em uma situação hipotética de falha em voo, uma junta com queda de carga do tipo escalonada poderia proporcionar uma resistência remanescente até a aeronave chegar em solo.

A Figura 6.5 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas do grupo JH_120_CB - corpos de prova com pinos a 120° com a superfície metálica e distribuídos de forma concentrada nas bordas. Como no caso anterior (Fig. 6.4), a exclusão de curvas foi baseada considerando tanto o critério de repetitividade quanto o critério de tipo de fratura; o CP de nº 64 foi rejeitado por falta de repetitividade e o CP de nº 66 por ter exibido rompimento no compósito e não da junta. Para os demais CPs (nº 65, 67 e 68) houve repetitividade e não ruptura da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 16,58 e 16,91 kN e o deslocamento máximo entre 2,38 e 3,96 mm. Nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica, ou seja, todas as quedas de carga foram do tipo escalonada. De maneira mais acentuada que nos resultados anteriores, percebe-se nestas curvas (Fig. 6.5) que após a primeira falha (queda da carga do ponto máximo até ≈ 12 kN), provavelmente devido ao descolamento da parte adesiva entre as bordas da junta e a primeira fileira de pinos, há um ganho de resistência (subida da carga suportada), passando de ≈ 12 para ≈ 15 kN, e então um segundo momento de falha de forma escalonada.

A Figura 6.6 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas do grupo JH_60_IE - corpos de prova com pinos a 60° com a superfície metálica e distribuídos de forma igualmente espaçada. Considerando, como critério de exclusão a

repetitividade, os resultados dos CPs de nº 85 e 88 foram descartados da análise. Para os CPs de nº 30, 31 e 32 o rompimento ocorreu de maneira análoga, sem falha da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 18,36 e 18,89 kN e o deslocamento final entre 3,03 e 3,66 mm. Nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica. Similarmente à Fig. 6.5 anterior, percebe-se nestas curvas (Fig. 6.6) que após a primeira falha (queda da carga do ponto máximo até ≈ 11 kN), há um ganho de resistência, passando de ≈ 11 para ≈ 13 kN, e então um segundo momento de falha de forma escalonada.

A Figura 6.7 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas do grupo JH_60_CB - corpos de prova com pinos a 60° com a superfície metálica e distribuídos de forma concentrada nas bordas. A exclusão de curvas foi baseada considerando, novamente, tanto o critério de repetitividade quanto o critério de tipo de fratura; o CP de nº 43 foi excluído por falta de repetitividade e o CP de nº 44 por ter tido rompimento no compósito e não da junta. As juntas dos CPs de nº 22, 42 e 92 romperam-se similarmente, sem ruptura da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 16,16 e 16,90 kN e o deslocamento máximo entre 4,12 e 4,27 mm. Nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica. Novamente percebe-se nestas curvas (Fig. 6.7) que após a primeira falha (queda da carga do ponto máximo até ≈ 9 kN), há um ganho de resistência, passando de ≈ 9 para ≈ 14 kN, e então um segundo momento de falha de forma escalonada, como anteriormente já verificado.

Por fim, a Fig. 6.8 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas adesivas, ou seja, sem a presença de pinos. O critério de exclusão foi somente a repetitividade, sendo que as curvas dos CPs de nº 50 e 77 foram retiradas da análise. Para os CPs de nº 58, 73 e 78 não houve falha da parte em compósito e o rompimento ocorreu de maneira semelhante. A carga máxima obtida variou entre 11,28 e 11,60 kN e o deslocamento final ficou estável em 0,41 mm. As curvas apresentam um comportamento de falha catastrófica, conforme já indicado na literatura (STELZER et al., 2016).

Ainda das Fig. 6.2 até 6.8 é possível notar que a região elástica das diferentes configurações das juntas híbridas apresentou limites similares aos da junta puramente adesiva; tanto a carga (≈ 10 kN) quanto o deslocamento ($\approx 0,4$ mm) do limite elástico foram parecidos para todas as juntas. Provavelmente, isso se deve ao fato do adesivo ser o responsável pela resistência inicial das juntas, com os pinos agindo logo no início da falha adesiva para prover resistência complementar pelo efeito de macro ancoramento.

Utilizando-se de um software comercial foi possível calcular, das Figs. 6.2 até 6.8, as áreas sob as curvas de carga *versus* deslocamento escolhidas como representativas em cada caso, equivalentes às energias consumidas no cisalhamento, as cargas máximas com seus deslocamentos correspondentes e os deslocamentos finais (totais) (exemplo na Fig.

6.9). Estes valores (acompanhados de desvio padrão) estão apresentados na Tab. 6.1 e são médias retiradas das três curvas escolhidas de cada tipo de junta. Para facilitar a análise comparativa, tais valores são apresentados graficamente nas Figs. 6.10 a 6.13.

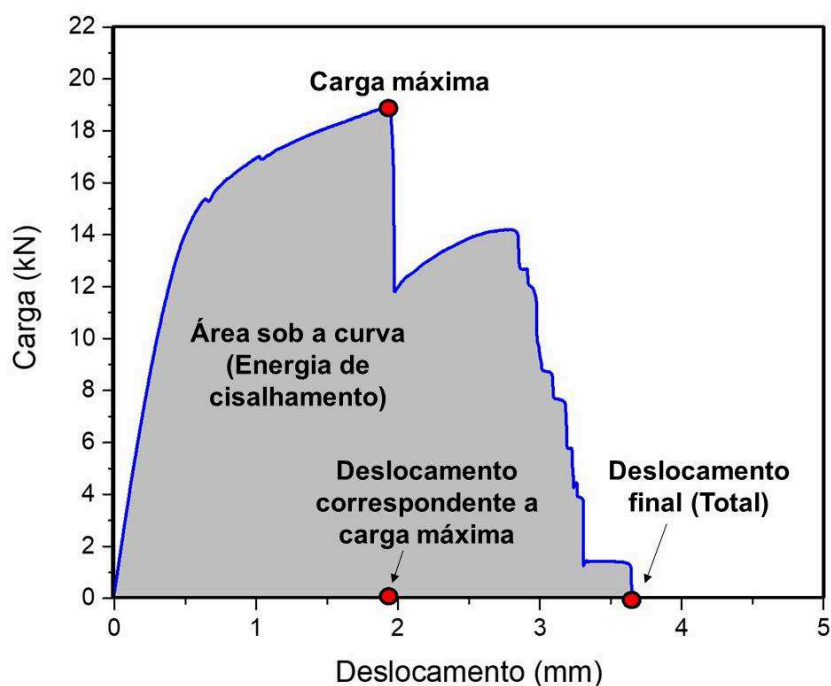


Figura 6.9 - Exemplo de curva típica de carga *versus* deslocamento de uma junta híbrida indicando os parâmetros quantitativos coletados para análise dos resultados.

Tabela 6.1 – Dados quantitativos referentes aos resultados dos ensaios com as juntas metal-compósito não envelhecidas.

Tipos de juntas	Dados médios			
	Carga máxima [kN]	Deslocamento em carga máxima [mm]	Deslocamento final [mm]	Energia de cisalhamento [J]
JH_90_IE	18,95 ± 0,18	1,65 ± 0,16	2,23 ± 0,06	28,42 ± 1,70
JH_90_CB	19,48 ± 0,30	2,11 ± 0,05	2,23 ± 0,14	34,09 ± 0,95
JH_120_IE	19,61 ± 0,67	2,12 ± 0,29	3,23 ± 0,25	43,89 ± 5,34
JH_120_CB	16,73 ± 0,19	1,06 ± 0,14	3,01 ± 0,62	32,64 ± 3,62
JH_60_IE	18,55 ± 0,24	1,85 ± 0,05	3,42 ± 0,28	42,94 ± 2,14
JH_60_CB	16,08 ± 0,69	0,84 ± 0,07	3,98 ± 0,36	30,45 ± 1,33
Juntas adesivas	11,42 ± 0,13	0,37 ± 0,01	0,41 ± 0,01	2,77 ± 0,03

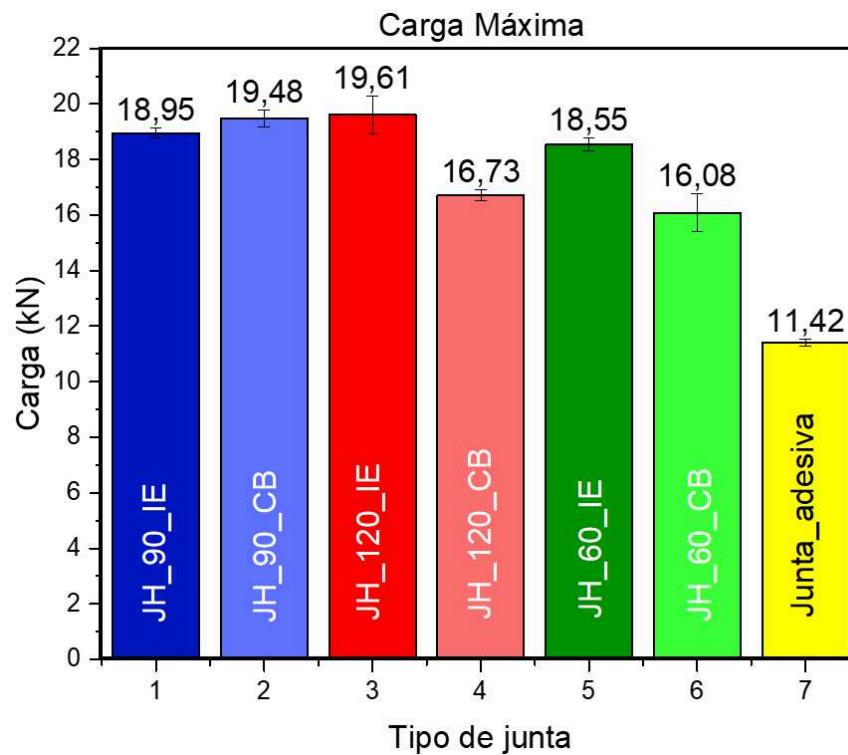


Figura 6.10 – Comparação entre cargas máximas médias para as juntas metal-compósito não envelhecidas.

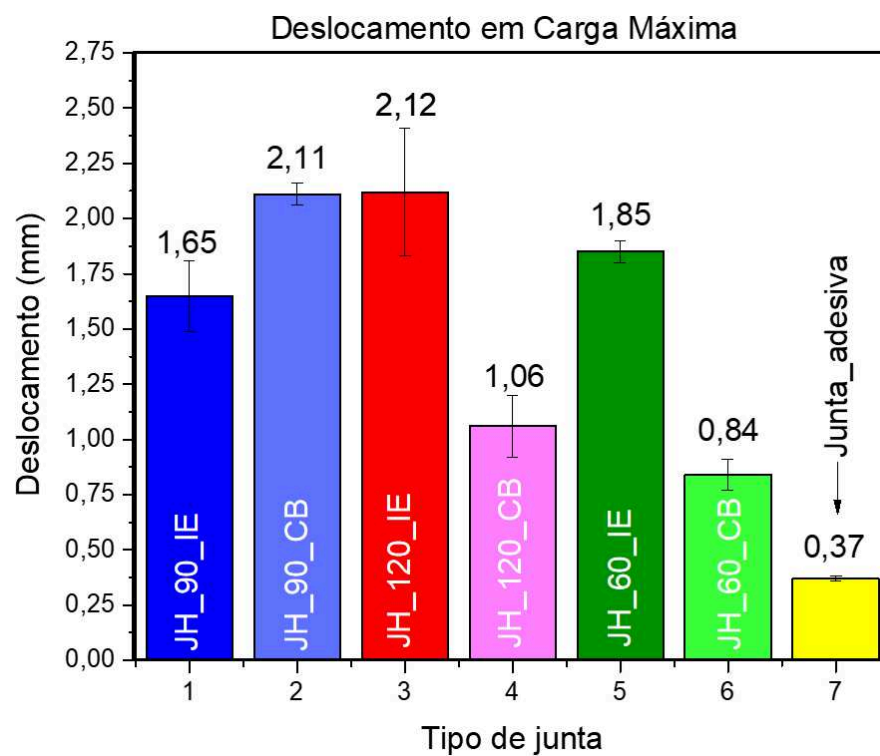


Figura 6.11 – Comparação entre os deslocamentos médios em carga máxima para as juntas metal-compósito não envelhecidas.

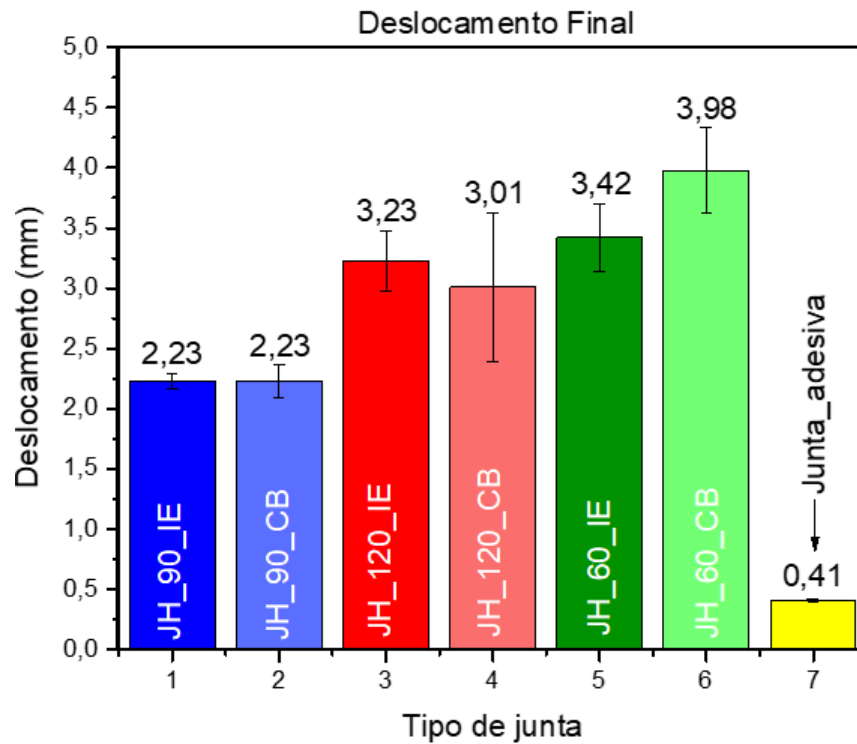


Figura 6.12 – Comparação entre os deslocamentos médios finais para as juntas metal-compósito não envelhecidas.

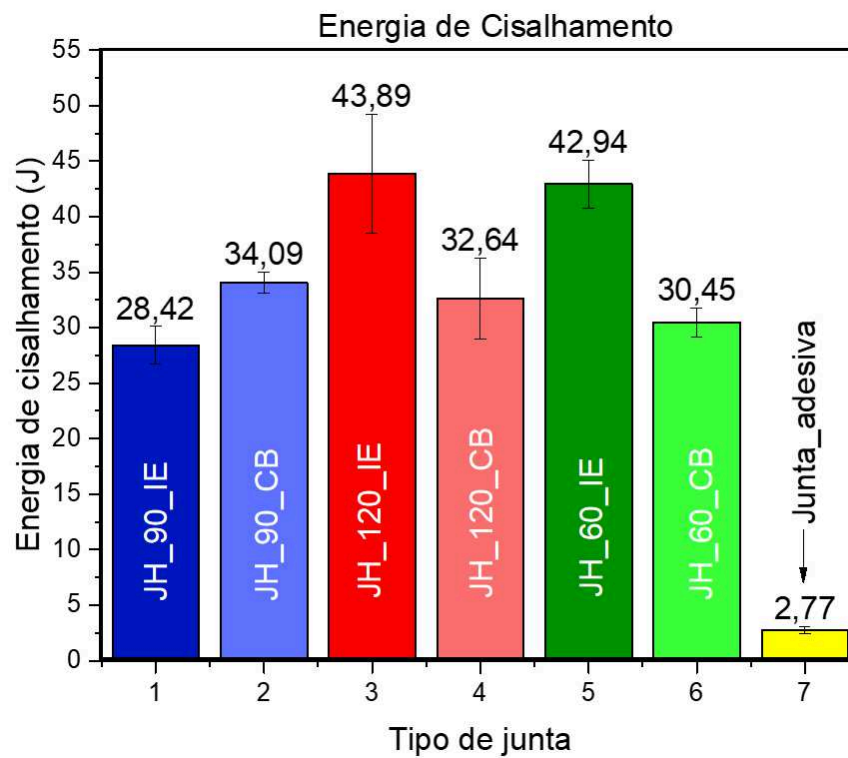


Figura 6.13 – Comparação entre as energias de cisalhamento médias para as juntas metal-compósito não envelhecidas.

Uma breve comparação entre os resultados obtidos (Tab. 6.1 e na Fig. 6.10), mostra primeiramente que a carga máxima suportada por uma junta híbrida foi entre 4,66 kN e 8,19 kN maior do que a carga máxima suportada pela junta adesiva. A configuração de junta híbrida que apresentou a maior carga máxima foi a JH_120_IE e a configuração que apresentou a menor carga máxima foi a JH_60_CB. Uma possível explicação para tal fato é que quando os CPs com pinos inclinados a 60° (no sentido contrário ao de aplicação da força de cisalhamento) são tracionados, os pinos tendem a desinclinarem-se na direção da força cisalhante, forçando o descolamento da parte adesiva ao seu redor e assim enfraquecendo a junta. Conforme o pino é desinclinado ele tende a aumentar a cavidade em que está alojado no sentido contrário ao da aplicação da carga. Isso deixa a cavidade ovalada e expõe a região onde antes estava alojado o pino no compósito. Ao mesmo tempo o pino deixa a cavidade para trás e é levado a comprimir o compósito no lado oposto.

A Figura 6.14 apresenta três imagens típicas da região que antes formava a interface de união híbrida, feitas logo após a ruptura, uma do grupo JH_90_CB, outra do grupo JH_120_IE e outra do grupo JH_60_CB, nas quais é possível comprovar o movimento de desinclinação dos pinos. Além disso, pode-se notar que o rompimento dos pinos ocorreu na região logo acima da base dos mesmos. Esta região, base dos pinos, ficou caracterizada pela presença de uma leve estricção (efeito do processo de deposição – Figs. 5.1 a 5.3). Além do mais, mesmo o processo *CMT-PIN* sendo um processo de soldagem mais frio, quando comparado a outros processos (*MIG/MAG*, por exemplo), pode ter ocorrido o enfraquecimento da base dos pinos devido ao calor da gota fundida que dá origem à base, ou seja, logo acima da mesma existe uma estreita zona afetada pelo calor com provável crescimento de grão, o que facilita sua ruptura.

Para melhor ilustrar os pontos discutidos anteriormente, a Fig. 6.15 apresenta detalhes de regiões típicas da interface de união híbrida, obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura *TM 3000*, depois do rompimento de juntas com as três inclinações de pinos avaliadas (o comportamento descrito independe da distribuição dos pinos).

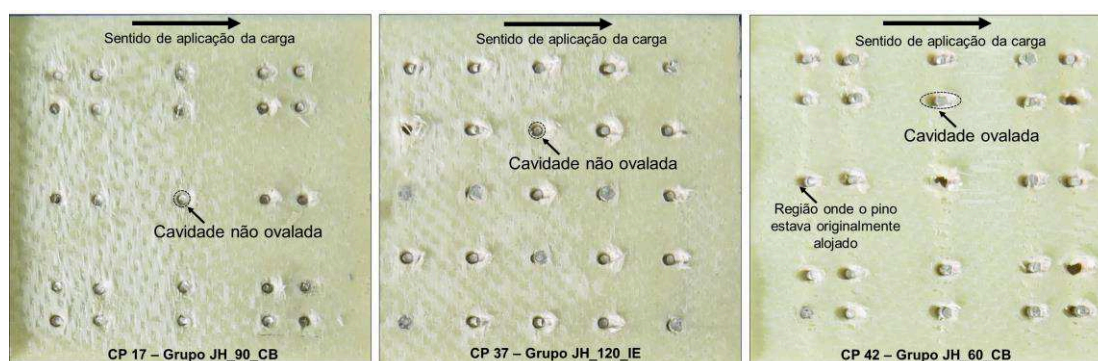


Figura 6.14 – Região da junta após o rompimento – detalhe para as cavidades dos pinos.

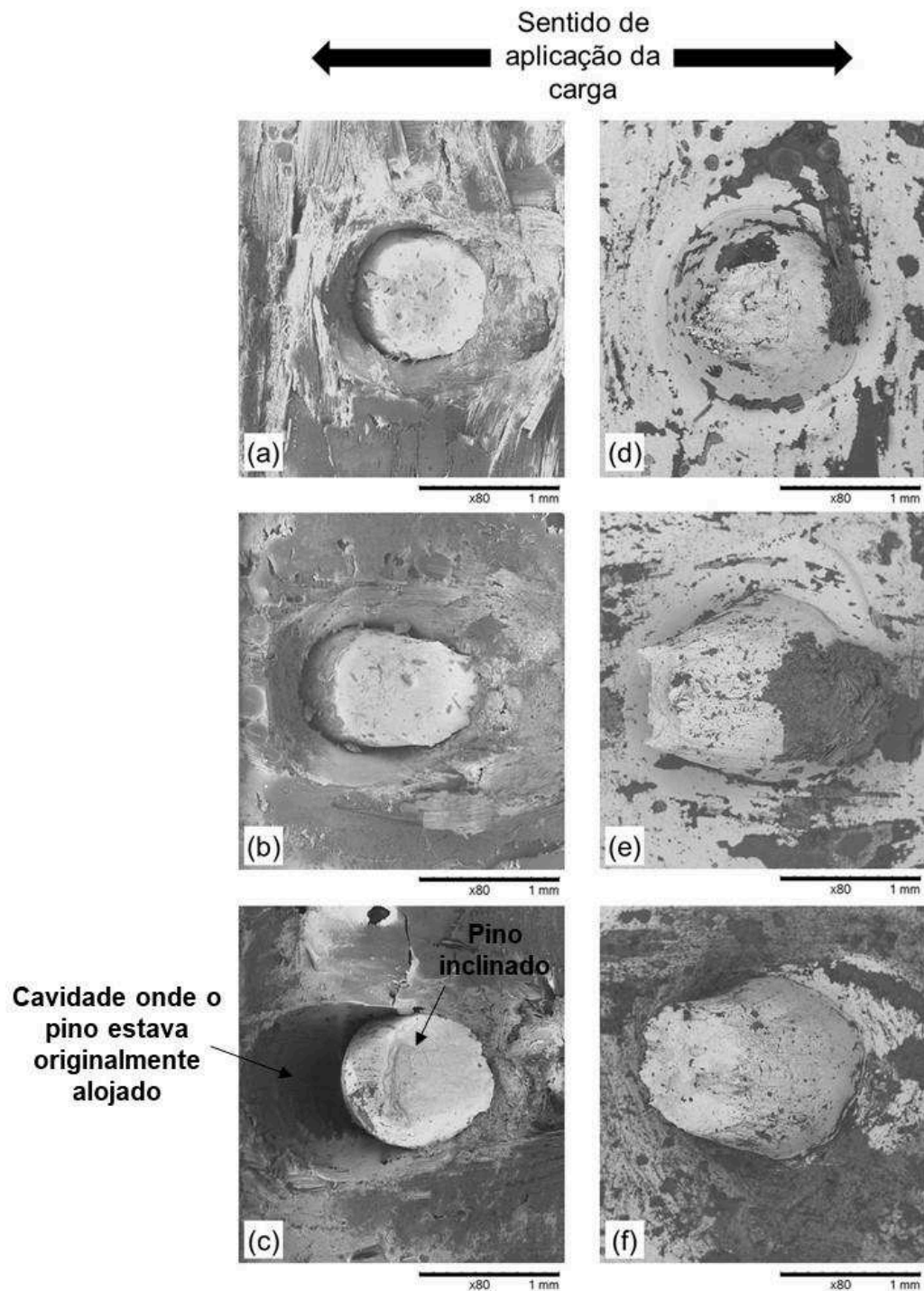


Figura 6.15 - Detalhes de regiões típicas da interface de união híbrida depois do rompimento de juntas com as três inclinações de pinos avaliadas, onde: (a) JH_90_CB parte em compósito; (b) JH_120_IE parte em compósito; (c) JH_60_CB parte em compósito; (d) JH_90_CB parte metálica; (e) JH_120_IE parte metálica e (f) JH_60_CB parte metálica.

Quanto aos deslocamentos correspondentes as cargas máximas e totais (Figs. 6.11 e 6.12), cabe salientar primeiramente que para o caso específico do deslocamento final/total

o seu término foi determinado pela chegada ou oscilação da carga a zero. O tipo de junta que apresentou o maior deslocamento final foi a JH_60_CB que alcançou um valor médio de 3,98 mm, e o caso com menor deslocamento foi a junta sem pinos (adesiva) com 0,41 mm. Já em termos de deslocamento correspondente à carga máxima, percebe-se que para o caso das juntas híbridas, em geral, este valor corresponde a aproximadamente 1,61 mm, valor este 1,24 mm acima do deslocamento em carga máxima de uma junta apenas adesiva. Estes números correspondem a um aumento de até 5,7 vezes na capacidade de deformação das juntas híbridas em relação às juntas adesivas, pois os pinos forçam o metal a ficar aderido por mais tempo ao compósito.

A Figura 6.13 compara as energias médias de cisalhamento para os diversos tipos de juntas, tendo as juntas híbridas, como esperado, alcançado níveis de absorção de energia de pelos menos cerca de 10 vezes superior (JH_90_IE), mas chegando até em torno de 15 vezes acima (JH_120_IE), em comparação com o desempenho das juntas adesivas.

As Figuras 6.16 e 6.17 apresentam a comparação geral entre os resultados dos testes de cisalhamento das juntas sem envelhecimento, separando-as por tipo de distribuição de pinos, igualmente espaçados (IE) ou concentrados nas bordas (CB).

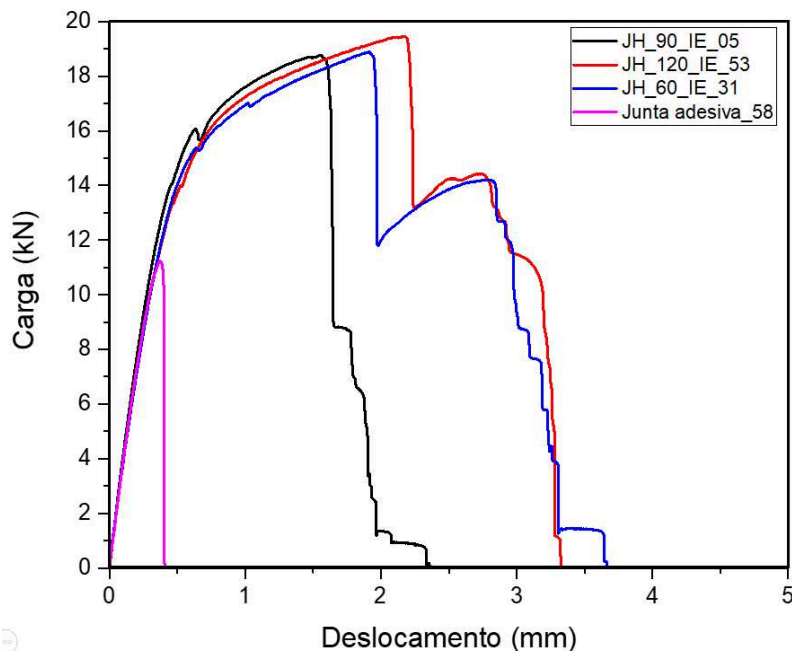


Figura 6.16 – Comparação entre comportamentos típicos das juntas não envelhecidas (juntas híbridas com pinos igualmente espaçados (IE)).

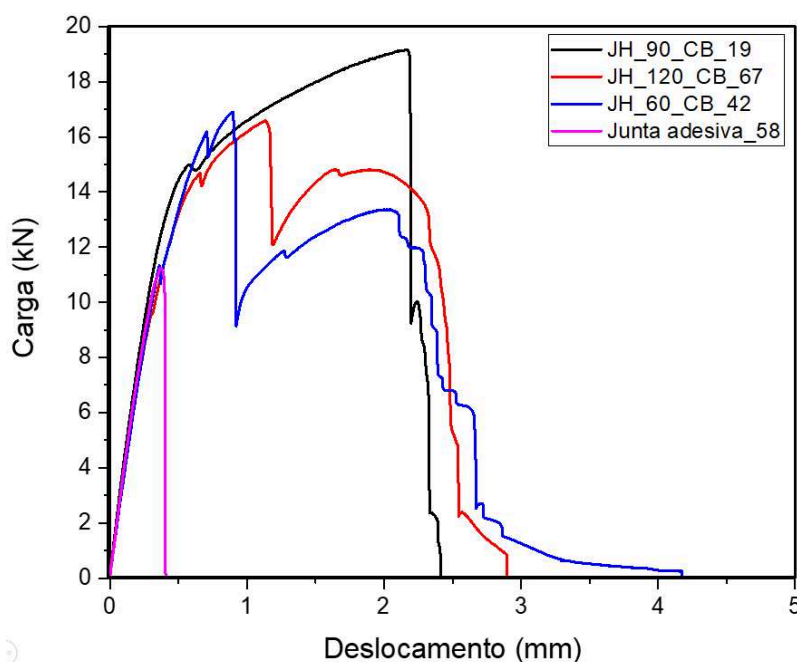


Figura 6.17 – Comparação entre comportamentos típicos das juntas não envelhecidas (juntas híbridas com pinos concentrados nas bordas (CB)).

No caso das juntas híbridas não envelhecidas com distribuição de pinos igualmente espaçada, a simples presença dos pinos parece determinar a carga máxima suportada pelas juntas, independentemente da inclinação dos mesmos (Fig. 6.16). Em termos de deslocamento em carga máxima, que também pode ser tomado como indicação da ocorrência da falha adesiva, este é significativamente postergado em relação à junta puramente adesiva. Além disso, a inclinação dos pinos estendeu ainda mais o deslocamento em carga máxima, algo provavelmente relacionado ao modo de deformação dos pinos. Considerando que os pinos permanecem por algum tempo totalmente envolvidos pelo compósito, podem-se cogitar algumas hipóteses. No caso dos pinos inclinados a 60° (contrários ao sentido de aplicação da carga), pode ter ocorrido como que uma desinclinação dos mesmos, resultado de uma deformação angular (pivotamento) dos pinos em sua base. Para esta deformação acontecer seria preciso, como parece ser o caso, aplicação de mais carga. No caso dos pinos a 120° (alinhados ao sentido de aplicação da carga), pode ter ocorrido algo semelhante a um tracionamento dos mesmos, consequência de uma deformação linear (longitudinal) ao longo do corpo dos pinos. Esta deformação deve ter também demandado mais carga. Em relação ao deslocamento final/total, o desempenho superior das juntas híbridas, com destaque para os casos com pinos inclinados, pode ser justificado devido ao fato de nem todos os pinos falharem simultaneamente. Por algum motivo ainda desconhecido, o fato de inclinar os pinos promoveu maior resistência residual às juntas, com os pinos sendo rompidos de maneira mais esparsa (queda de carga mais

escalonada). Para o caso das juntas híbridas com distribuição de pinos concentrados nas bordas (Fig. 6.17), ocorreu tendência bastante semelhante, com exceção do momento do deslocamento em carga máxima para a junta com pinos a 90° , que aconteceu para além dos casos com pinos inclinados. Comparando as duas distribuições de pinos percebe-se, no geral, que os resultados de carga máxima foram inferiores para a distribuição do tipo concentrada nas bordas. Isso se deve provavelmente à concentração de tensões devido a uma maior proximidade/agrupamento dos pinos nesses casos.

Com as filmagens realizadas durante o ensaio mecânico, em termos ilustrativos, foi possível sincronizar imagens extraídas dos vídeos obtidos com as curvas de deslocamento em função das cargas aplicadas. As filmagens foram iniciadas ao mesmo tempo dos testes mecânicos, que por serem muito lentos, não implicaram em prejuízos na sincronia, mesmo que aproximada. Cabe ressaltar que os vídeos foram obtidos com resolução elevada com intuito de propiciar uma análise detalhada do comportamento de falha das juntas. Assim, foi possível visualizar melhor o comportamento das juntas metal-compósito durante o cisalhamento por tração. As Figuras de 6.18 até 6.24 mostram, respectivamente, os comportamentos típicos das juntas híbridas e puramente adesivas observados por meio desta abordagem. Uma descrição detalhada, apresentando os valores exatos de tempo em momentos específicos da separação entre metal e compósito, é mostrada na Tab. 6.2.

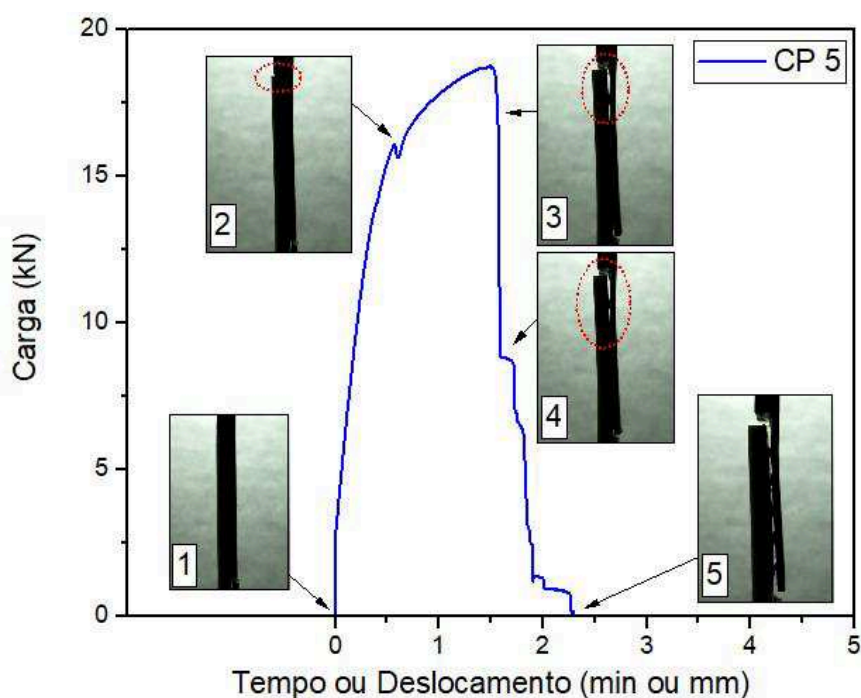


Figura 6.18 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas do grupo JH_90_IE (CP de nº 5).

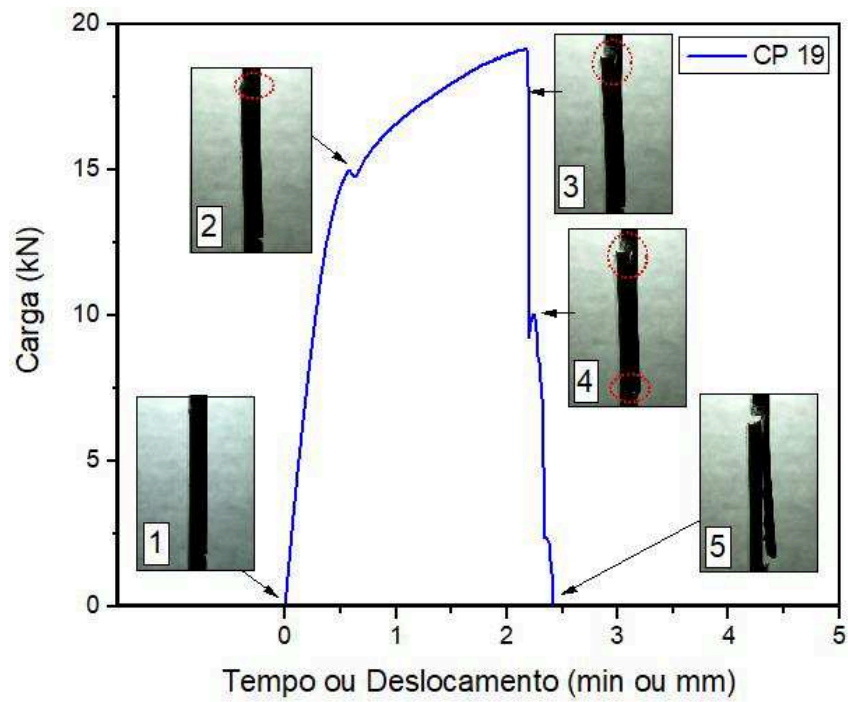


Figura 6.19 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas do grupo JH_90_CB (CP de nº 19).

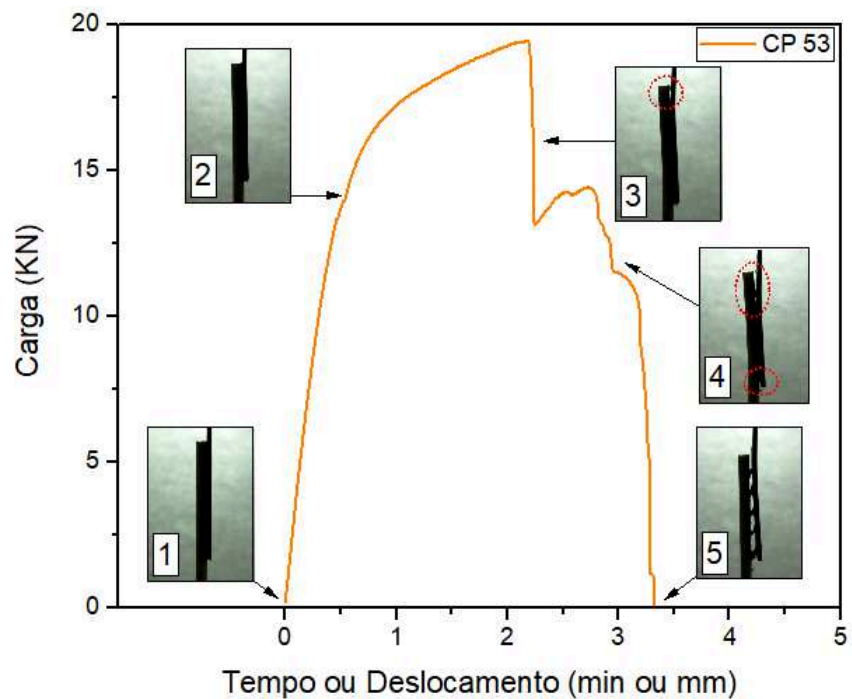


Figura 6.20 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas do grupo JH_120_IE (CP de nº 53).

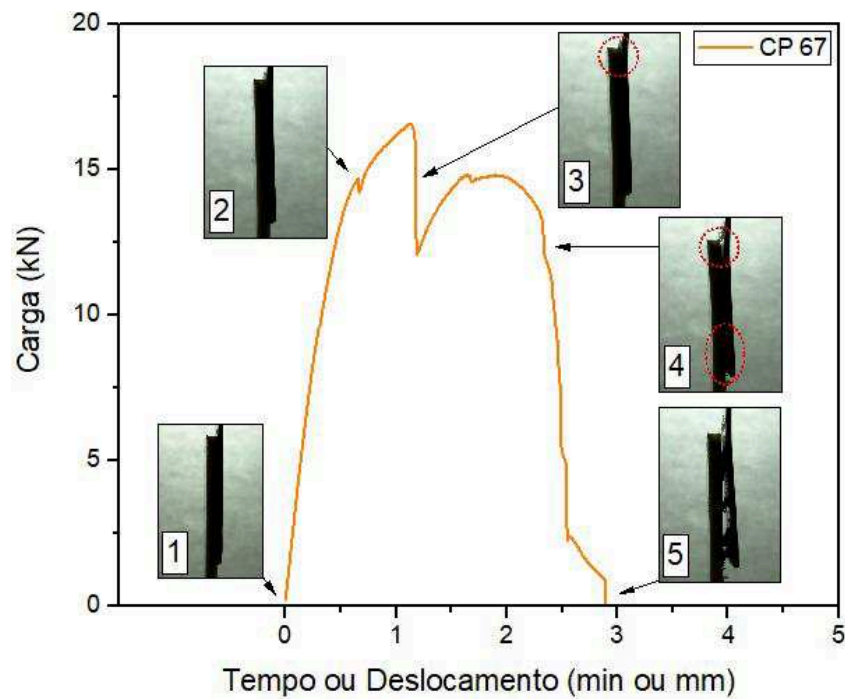


Figura 6.21 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas do grupo JH_120_CB (CP de nº 67).

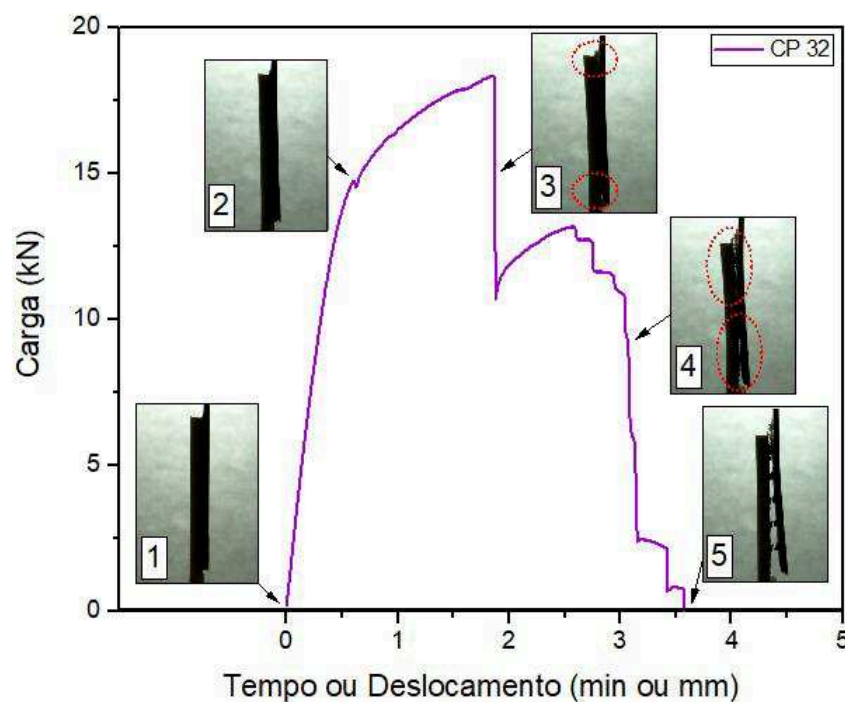


Figura 6.22 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas do grupo JH_60_IE (CP de nº 32).

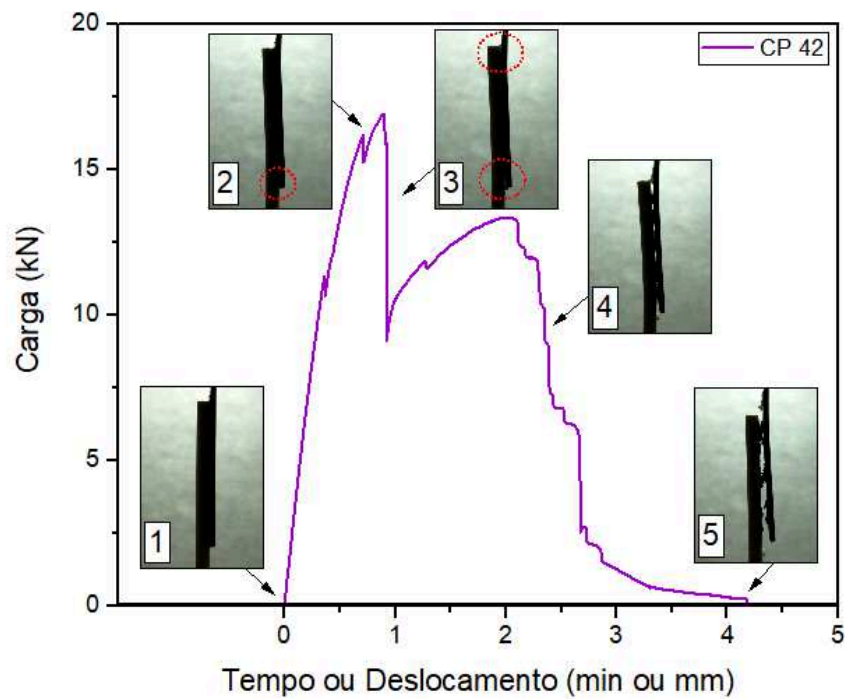


Figura 6.23 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas híbridas do grupo JH_60_CB (CP de nº 42).

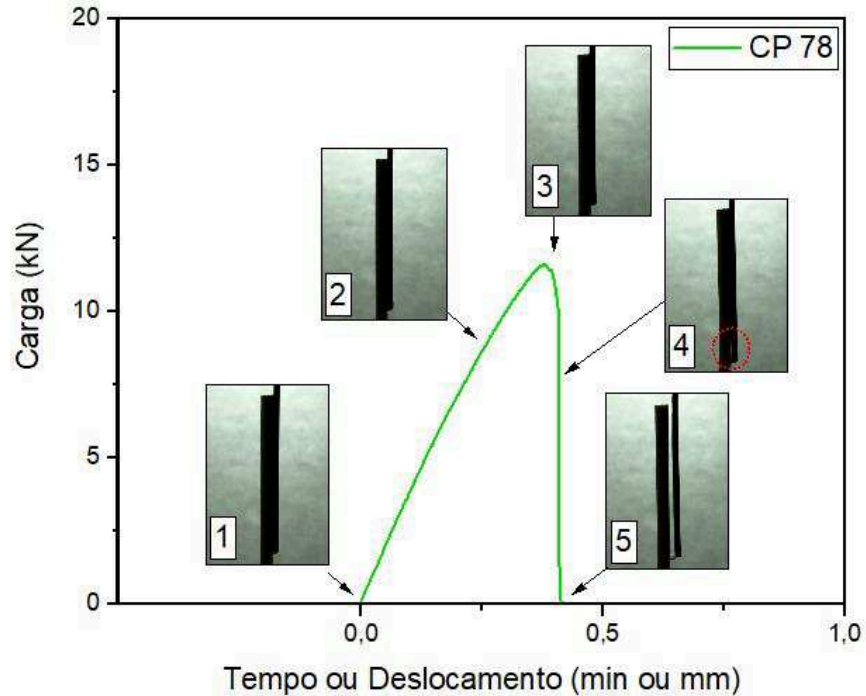


Figura 6.24 – Sincronização de imagens e curva tempo/deslocamento em função das cargas adquiridas típicas das juntas adesivas (CP de nº 78).

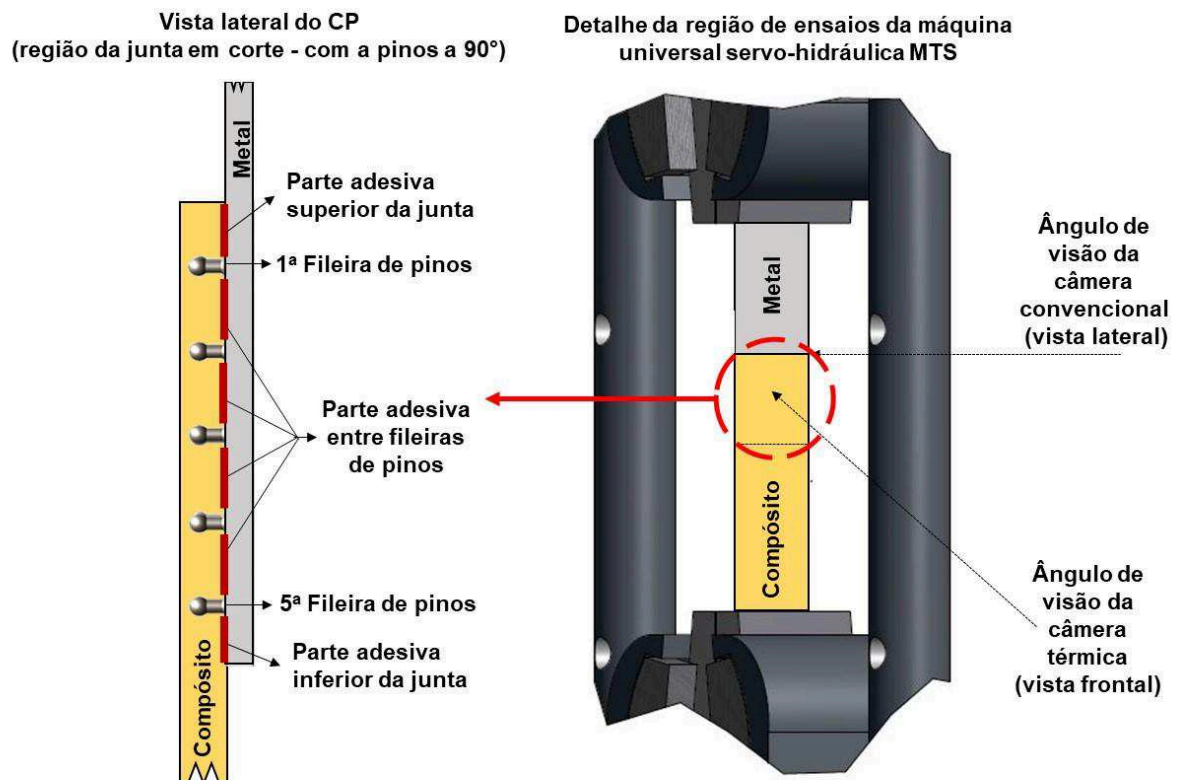


Figura 6.25 – Ilustração da região de ensaios de cisalhamento por tração das juntas detalhando, em corte, a região de uma junta híbrida.

Tabela 6.2 - Descrição detalhada da sincronização das imagens e curva tempo em função das cargas.

Nº CPs	Descolamentos			Rompimentos
	Parte adesiva superior da junta	Parte adesiva inferior da junta	Parte adesiva entre fileiras	Final (Quebra ou escape dos pinos)
05	0,56 min (início) e 1,50 min (fim) -	1,39 min	1,48 min (entre 1° e 2°); 2,06 min (entre a 2° e 3°); 2,33 min (entre a 3° e 4°)	2,36 min
19	0,58 min (início) e 1,24 min (fim) -	2,25 min	Não foi possível verificar	2,42 min
53	0,45 min (início)	2,18 min	2,53 min (entre 1° e 2°); 3,02 min (entre a 2° e 3°); 3,12 min (entre a 3° e 4° e 5°)	3,32 min
67	1,01 min (início)	2,30 min	2,35 min (entre a 2° e 3° e 4°)	2,89 min
32	1,87 min (início)	1,48 min	2,14 min (entre 1° e 2°); 2,25 min (entre 4° e 5°); 2,39 min (2° e 3°)	3,57 min
42	1,00 min (início)	0,49 min	1,17 min (entre 1° e 2°); 1,22 min (entre a 2° e 3° e 4° e 5°)	4,17 min
78	Rompimento instantâneo em 0,27 min			

Nota-se, a partir da análise das Figs. 6.18 até 6.24 e da Tab. 6.2, que o modo de fratura das juntas híbridas é diferente do modo de falha das adesivas. Para o caso das juntas híbridas, a presença dos pinos faz com que a fratura ocorra de forma fracionada (em três partes distintas, como apresentado na Tab. 6.2) e em blocos (adesivo e por ancoramento dos pinos). Inicialmente, caso híbrido, o descolamento, separação adesiva entre a parte metálica e o compósito no plano de união, ocorre entre a primeira ou quinta fileira de pinos e a borda superior ou inferior da junta (Fig. 6.25). Este descolamento então se propaga para o restante do bloco adesivo das juntas (Fig. 6.25 - parte adesiva entre as fileiras de pinos). Em seguida, o bloco de união por ancoramento dos pinos, que já atuava retardando o descolamento do bloco adesivo, alcança a falha com rompimento total das juntas. Já para o caso das juntas adesivas, a fratura ocorre de forma instantânea já que apenas um bloco de união está presente, não havendo qualquer resistência residual atuante. Verificou-se também que a parte inferior metálica de todas as juntas tende a se deslocar para o lado direito (se afastando do compósito em comportamento típico de uniões adesivas) entre aproximadamente 0,40 min e 1,13 min. Logo após este momento surgem os primeiros descolamentos de partes adesivas entre os pinos, seguido, por fim, do rompimento dos pinos, de maior resistência, e culminando com a ruptura total da junta.

Notou-se também, através dos vídeos gravados, que todos os pinos inclinados contrários ao sentido de aplicação da carga (CPs dos grupos JH_60_IE e JH_60_CB) desinclinaram-se durante o ensaio, ou seja, no começo dos testes os CPs tinham pinos depositados a 60° em relação a superfície da chapa, mas ao final dos ensaios (após o rompimento), foi possível verificar pelos pinos rompidos, presentes dentro da parte em compósito, que a inclinação passou a estar entre 90° e 120°. Especificamente as Figs. 6.22 e 6.23 mostram no quarto momento em destaque, que para o caso de juntas com pinos a 60°, o descolamento da parte adesiva entre as fileiras de pinos é maior, mais uma vez comprovando o movimento de rotação (desinclinat) dos pinos.

Foi executada também uma análise da variação de temperatura, por meio de termografia, na região da junta durante os testes de cisalhamento. Diversos estudos mostraram a eficácia da termografia infravermelha para inspeção de estruturas em compósitos (GUILLAUMAT et al., 2004, KATUNIN et al., 2015 e SKHABOVSKYI et al., 2017) inclusive em tempo real, sendo que as falhas podem ser consideradas como descontinuidades na junta, sendo assim, passível de detecção. O intuito desta abordagem foi corroborar a análise feita anteriormente com a imagens reais e auxiliar no entendimento do modo de falha das juntas híbridas. Por motivo de montagem dos CPs na máquina de ensaios (bloqueio do campo de visão por uma das colunas de movimentação da garra

superior), a câmera foi colocada ligeiramente na diagonal. A Figura 6.26 ilustra o campo de visão captado pela câmera térmica, com destaque para o centro do CP (junta metal-compósito). Como *setup* da câmera adotou-se uma emissividade de 0,6 (que melhor se adequou ao ensaio), um intervalo de captação entre 20 e 120°C e uma frequência de aquisição de 60 Hz.

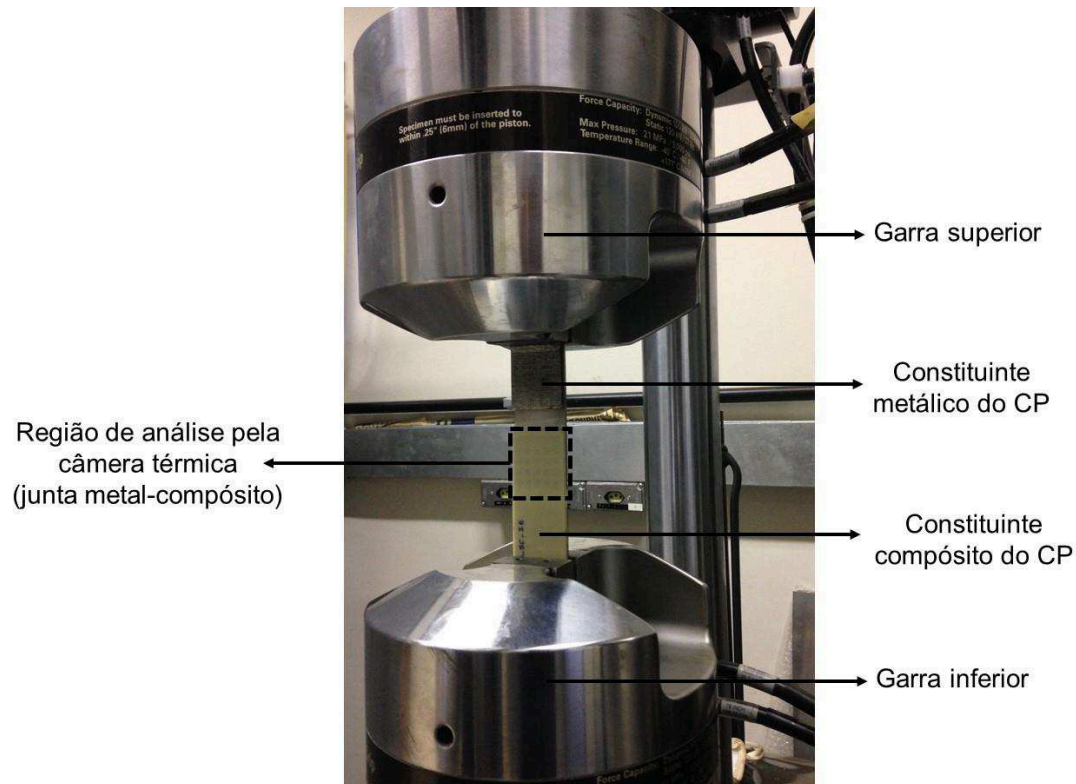


Figura 6.26 – Campo de visão da câmera térmica.

As Figuras de 6.27 até 6.29 apresentam termografias de momentos distintos do ensaio de cisalhamento por tração, partindo do início até a falha total da junta, de três CPs representativos do comportamento típico observado: um com distribuição de pinos igualmente espaçada (CP 32), outro com distribuição de pinos concentrada nas bordas (CP 19) e por fim um sem pinos, ou seja, junta puramente adesiva (CP 78).

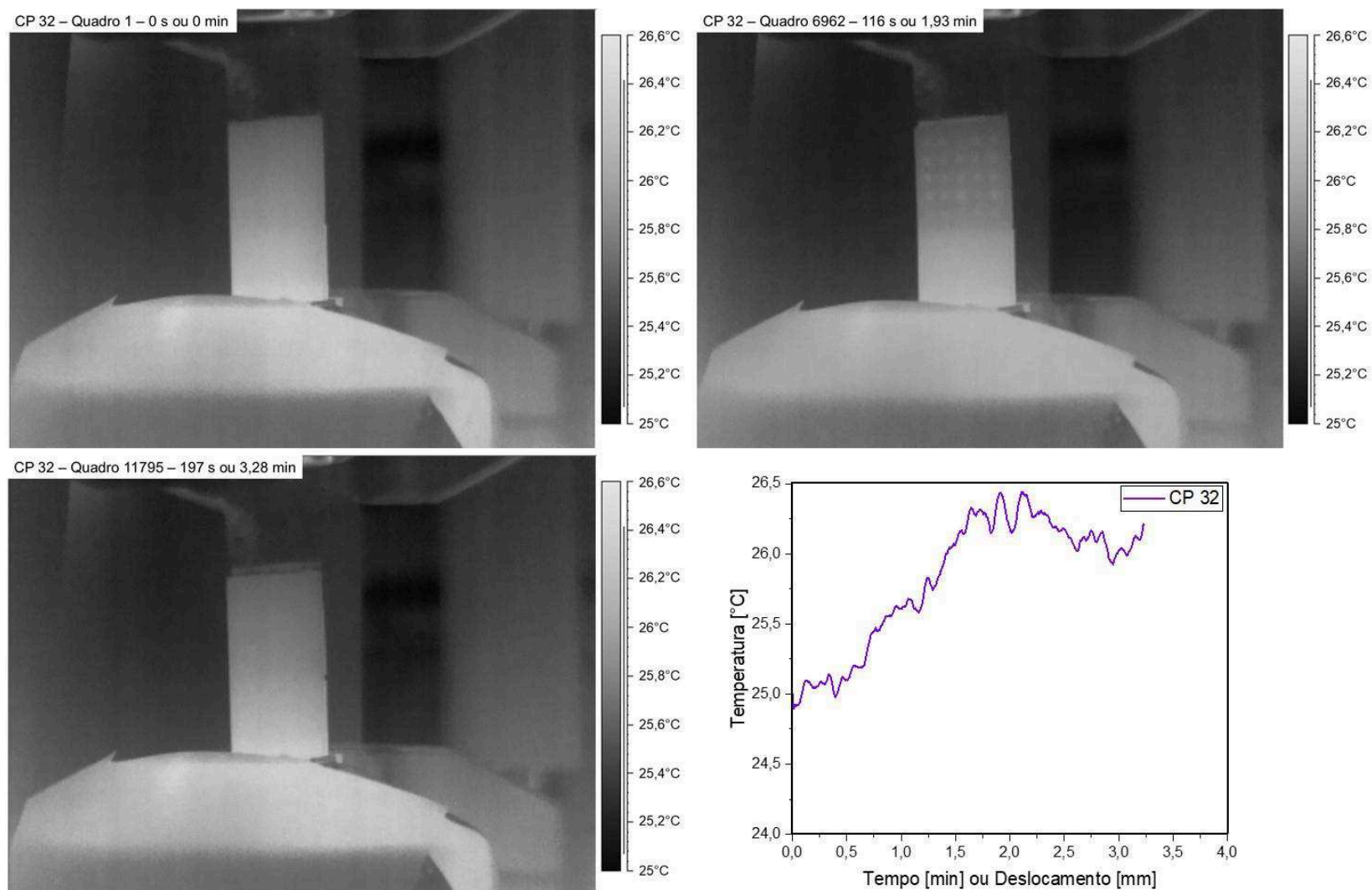


Figura 6.27 - Imagens térmicas do CP 32 (JH_60_IE) e gráfico de variação de temperatura máxima, correspondente da região da junta metal-compósito durante o ensaio de cisalhamento por tração.

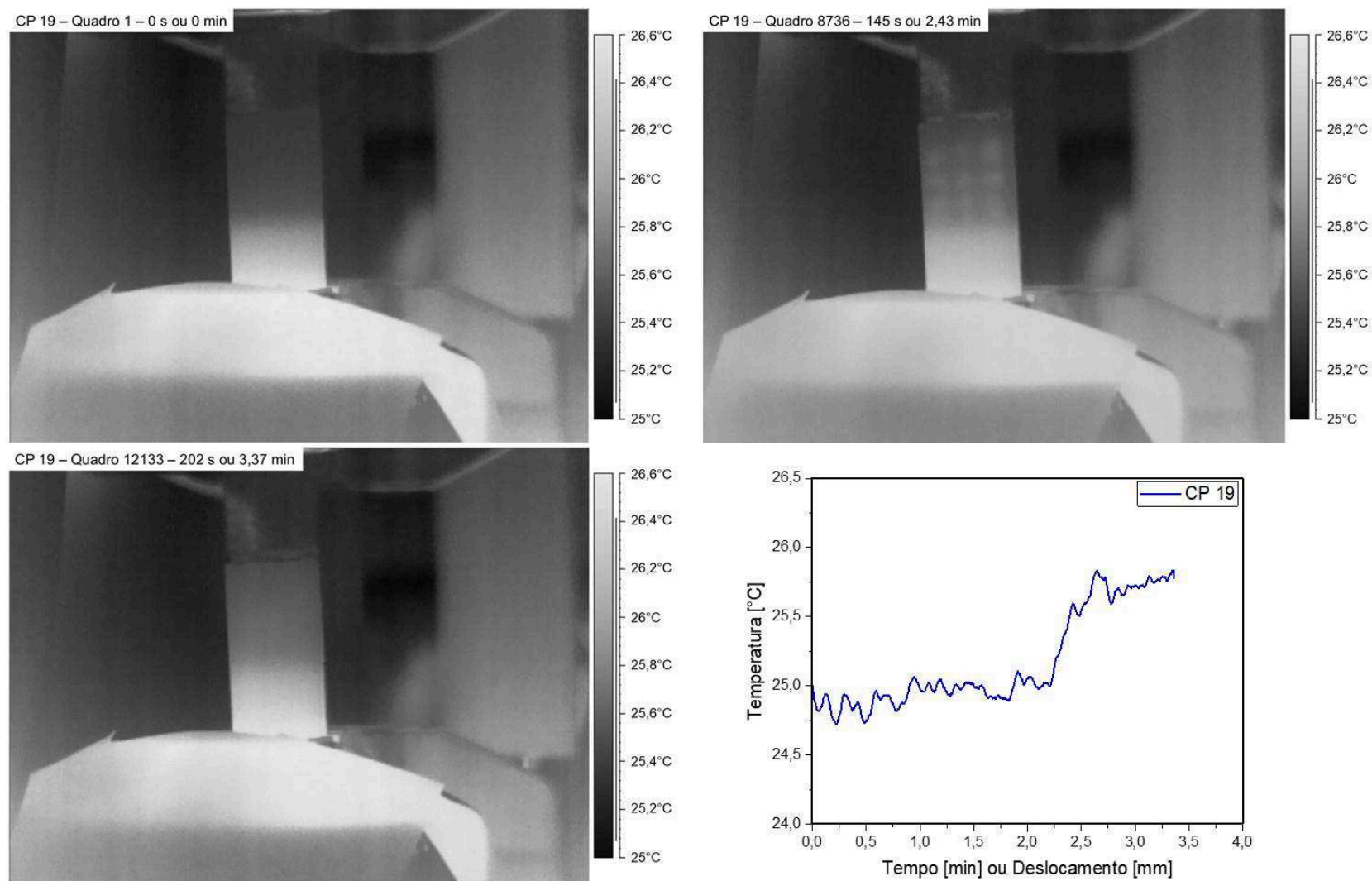


Figura 6.28 – Imagens térmicas do CP 19 (JH_90_CB) e gráfico de variação de temperatura máxima, correspondente da região da junta metal-compósito durante o ensaio de cisalhamento por tração.

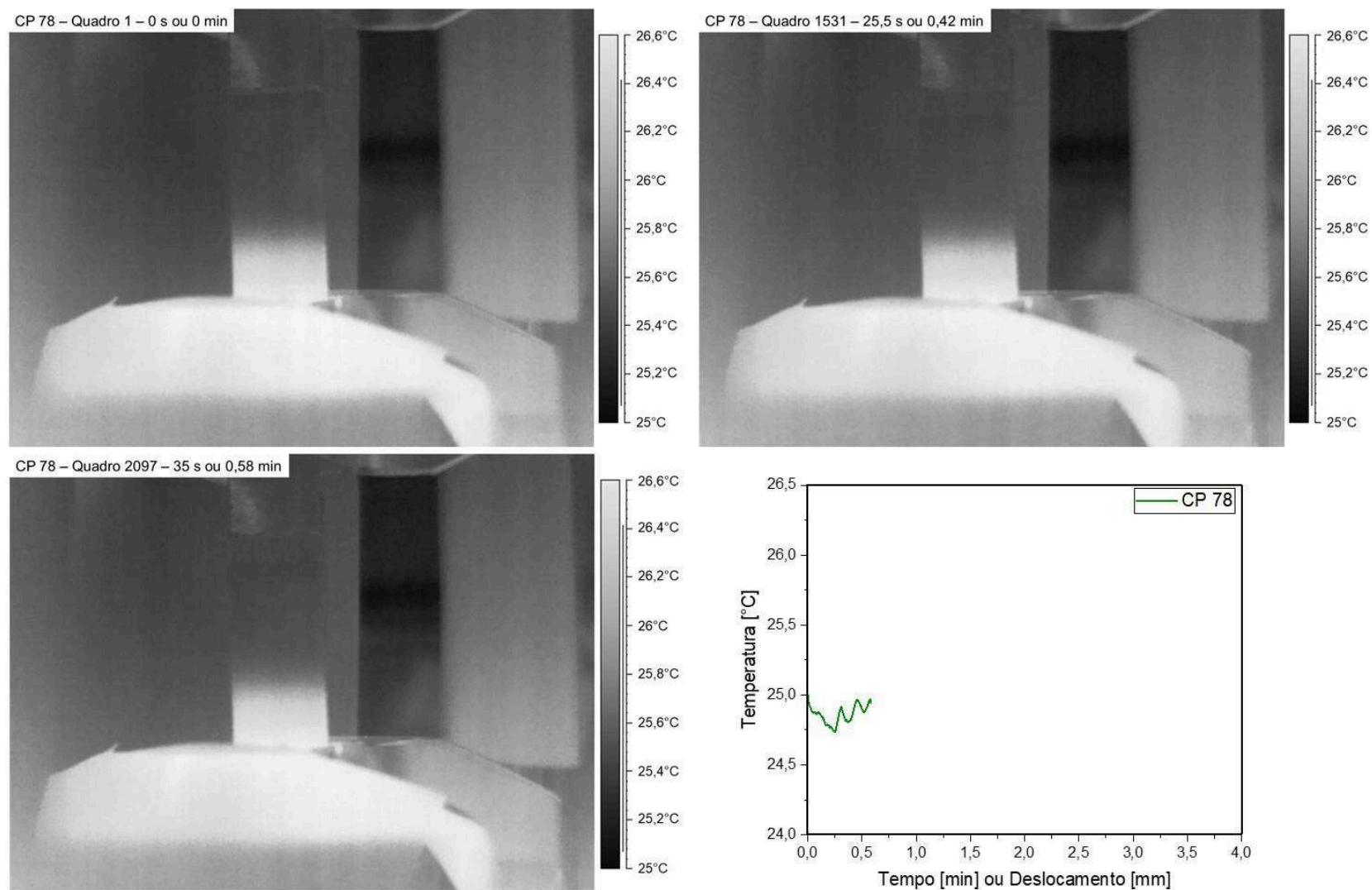


Figura 6.29 - Imagens térmicas do CP 78 (Junta adesiva) e gráfico de variação de temperatura máxima, correspondente da região da junta metal-compósito durante o ensaio de cisalhamento por tração.

Em todos os casos a temperatura inicial da região de análise (Fig. 6.26) foi a ambiente e a houve pequena variação de temperatura pelo calor gerado devido à deformação durante a aplicação da carga. Para o caso da junta híbrida com pinos a 60° com a superfície e igualmente espaçados (Fig. 6.27) foram gravados 197 s, sendo que em torno de 116 s (1,93 min) é possível observar manchas térmicas correspondentes às posições dos pinos dentro da junta. Essas marcas térmicas indicam regiões de máxima temperatura nas curvas de tempo ou deslocamento *versus* temperatura. A partir do momento que as regiões adesivas superiores e inferiores da junta (Fig. 6.25) se rompem, os pinos assumem repentinamente maior função no provimento de resistência da junta, com a diferença de temperatura entre eles e as demais regiões da junta se intensificando (o descolamento adesivo inibe a condução de calor ao redor dos pinos), gerando-se assim as manchas térmicas no local dos pinos. Para o caso da junta híbrida com pinos a 90° com a superfície e concentrados nas bordas (Fig. 6.28) foram gravados 202 s, sendo que em torno de 145 s (2,43 min) é possível observar novamente manchas térmicas correspondentes às posições dos pinos dentro da junta. Já que os tempos decorridos para aparecimento destas indicações térmicas coincidem com os momentos de ruptura adesiva observados na Fig. 6.22 (correspondente à Fig. 6.27) e na Fig. 6.19 (correspondente à Fig. 6.28), pode se considerar que a indicação térmica da presença dos pinos se traduz como evidência do momento de falha adesiva nas juntas híbridas, pois os pinos passaram a ser mais solicitados, desta forma aquecendo-os mais. Finalmente, para a junta apenas adesiva (sem pinos - Fig. 6.29) foram gravados apenas 35 s, suficientes para cobrir a falha da junta, e não foi possível observar qualquer mancha térmica ou mesmo acréscimo significativo de temperatura, o que provavelmente está relacionado ao tempo curto de ensaio e ao aquecimento homogêneo deste tipo de junta.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS JUNTAS METAL-COMPÓSITO ENVELHECIDAS

7.1 Envelhecimento Hidrotérmico

Para realização do envelhecimento hidrotérmico dos CPs, o qual busca simular experimentalmente as condições climáticas que a junta estará sujeita a sofrer, desenvolveu-se um aparato experimental (cuba com suportes), conforme ilustrado pela Fig. 7.1, com capacidade de acomodar até 40 CPs dispostos verticalmente e espaçados entre si. Por meio deste aparato, metade das juntas metal-compósito fabricadas foi submetida a 2112 horas (88 dias) de envelhecimento em água destilada (100% de umidade) a uma temperatura ambiente média de 24°C. O ensaio foi finalizado nas 2112 horas devido estabilização da curva massa x tempo.

Como já se conhecia a massa inicial dos CPs do Capítulo V, a análise mássica dos mesmos foi feita em intervalos de 10 a 15 dias, com a retirada unitária de cada um deles da cuba, secagem com papel e imediata pesagem (três medidas) em uma balança de precisão calibrada *Shimadzu UX6200H* com resolução de 0,01 g.

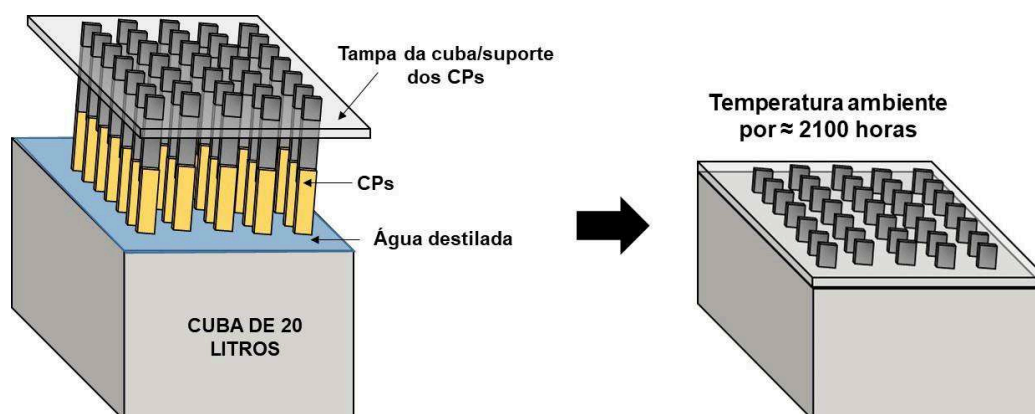


Figura 7.1 – Ilustração esquemática do aparato experimental utilizado no envelhecimento hidrotérmico das juntas metal-compósito.

A Figura 7.2 apresenta os resultados de ganho acumulado médio de massa *versus* tempo. Lembrando que, por questões de repetitividade, cinco CPs de cada um dos tipos de junta foram submetidos ao envelhecimento. Nota-se que as juntas híbridas metal-compósito apresentam um comportamento semelhante quanto ao ganho de massa (absorção de água). Houve no início uma absorção de água mais significativa ($\approx 0,07$ g nas primeiras 360 horas). Em seguida, ocorreu uma de absorção menor e mais gradual ($\approx 0,03$ g entre 600 e 840 horas). Por fim, acima de 840 horas, chegou-se à provável estabilização da umidade absorvida (saturação). Em termos quantitativos, ao final do tempo de envelhecimento, as juntas híbridas metal-compósito obtiveram um ganho médio de massa de 0,10 gramas (0,15%).

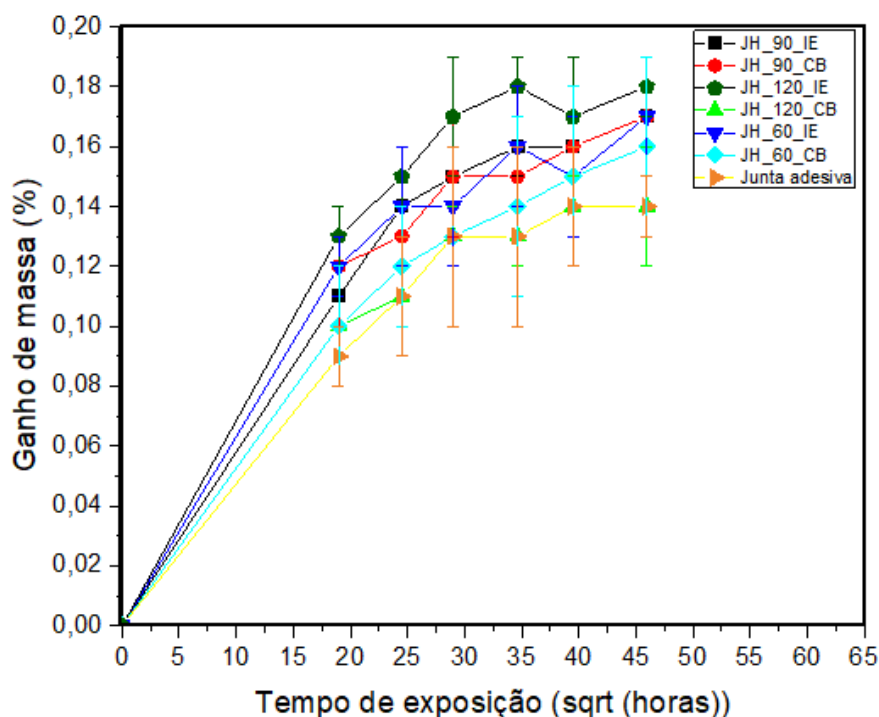


Figura 7.2 – Resultado de ganho acumulado médio de massa *versus* tempo para as juntas metal-compósito.

As curvas a seguir (Figs. de 7.3 até 7.9) apresentam os resultados de deslocamento *versus* carga obtidos para os testes de cisalhamento das juntas metal-compósito na condição envelhecidas. Para tal, utilizou-se a mesma montagem experimental já detalhada no Capítulo VI. Dos testes realizados, por meio dos critérios de melhor repetitividade e tipo de fratura (mesmos do Capítulo VI), escolheram-se três que foram considerados para as

análises. A seguir, fez-se uma análise geral e descritiva e, posteriormente, uma análise específica e quantitativa para cada um dos tipos de juntas.

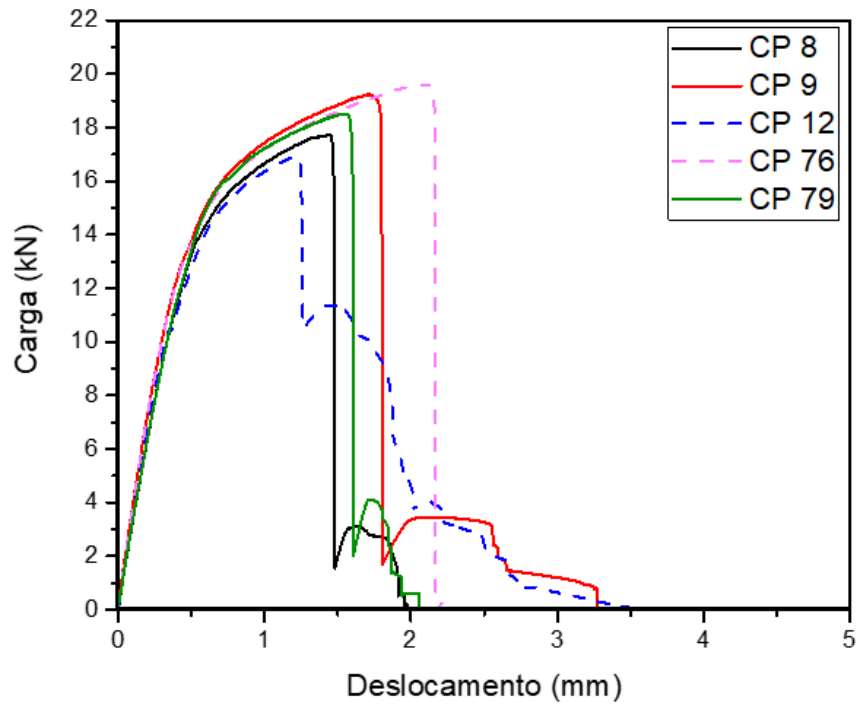


Figura 7.3 - Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_90 _IE após envelhecimento.

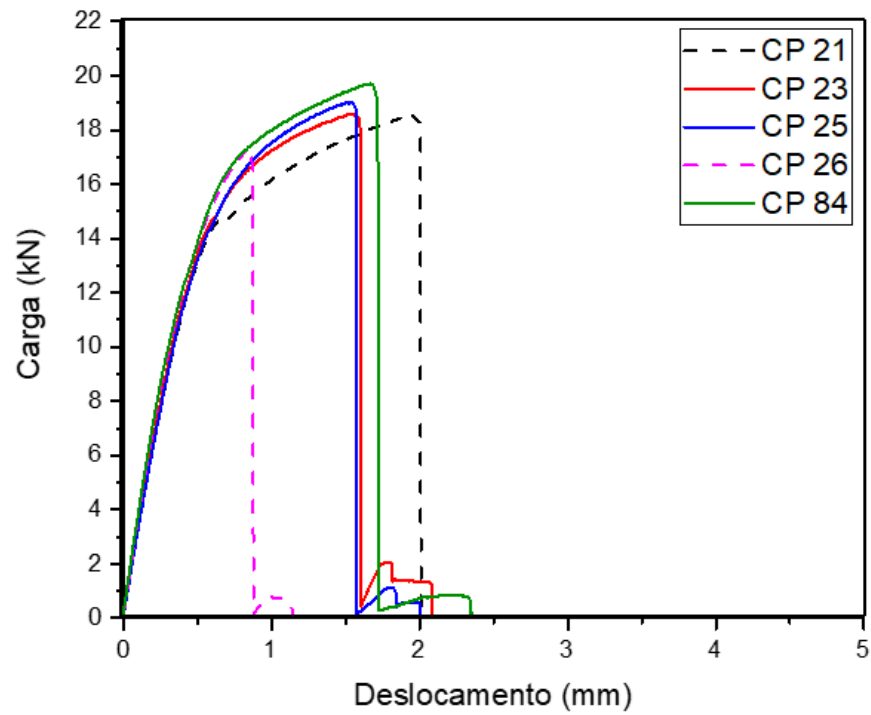


Figura 7.4 - Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_90_CB após envelhecimento.

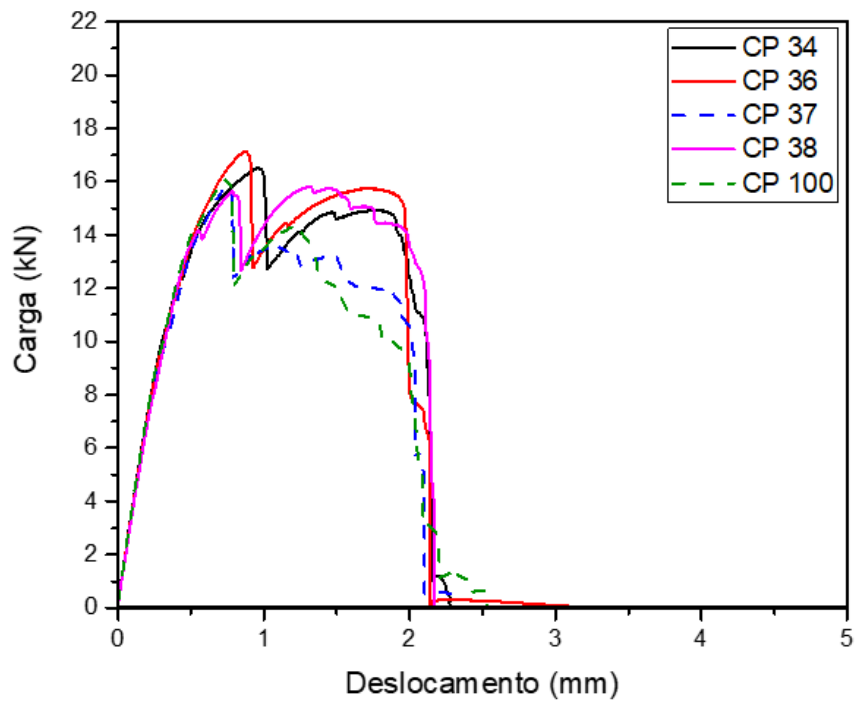


Figura 7.5 - Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_120_IE após envelhecimento.

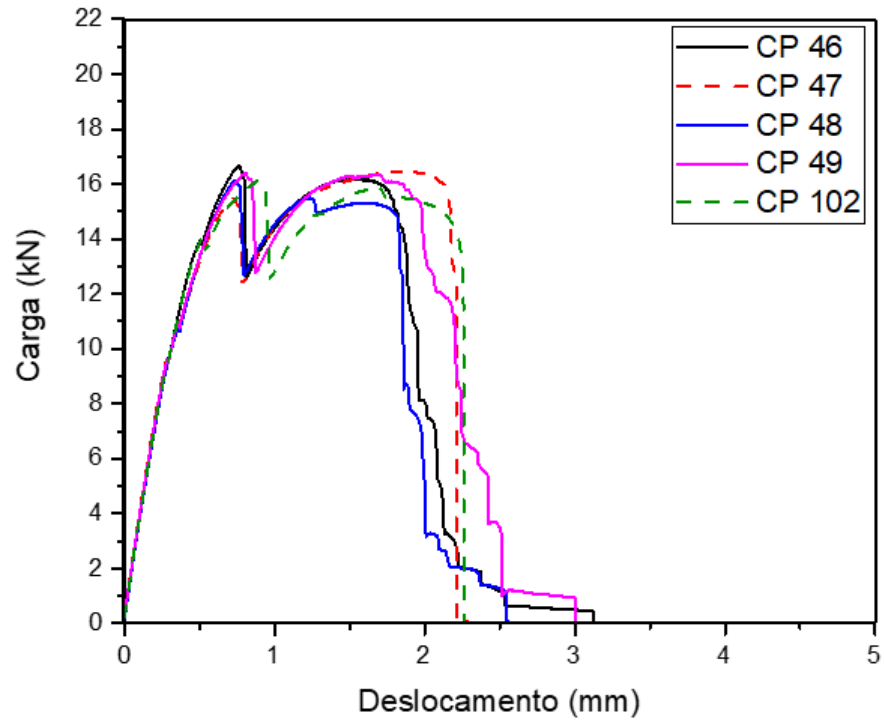


Figura 7.6 - Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_120_CB após envelhecimento.

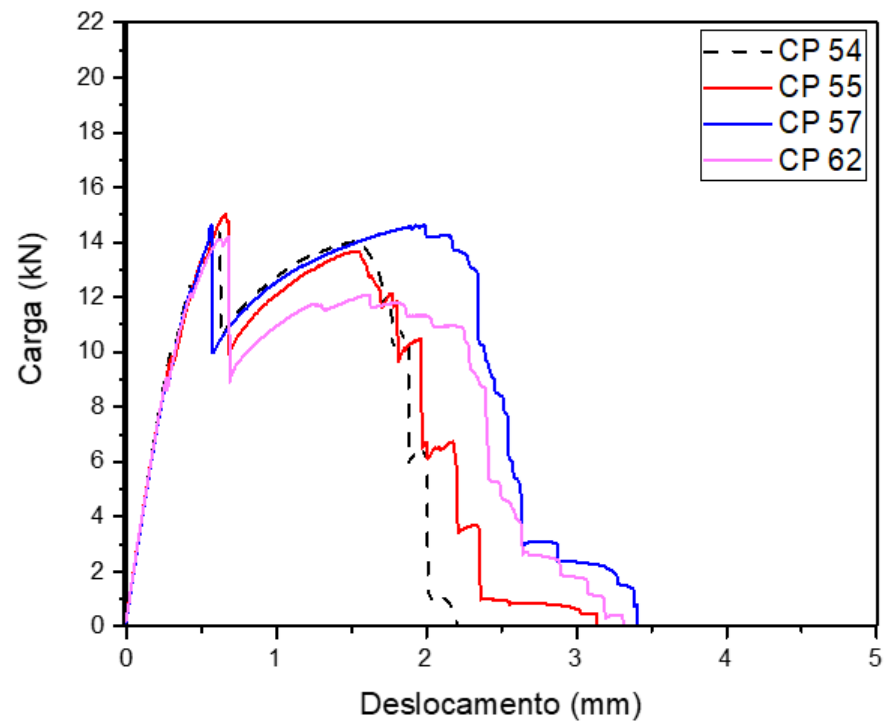


Figura 7.7 - Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_60_IE após envelhecimento.

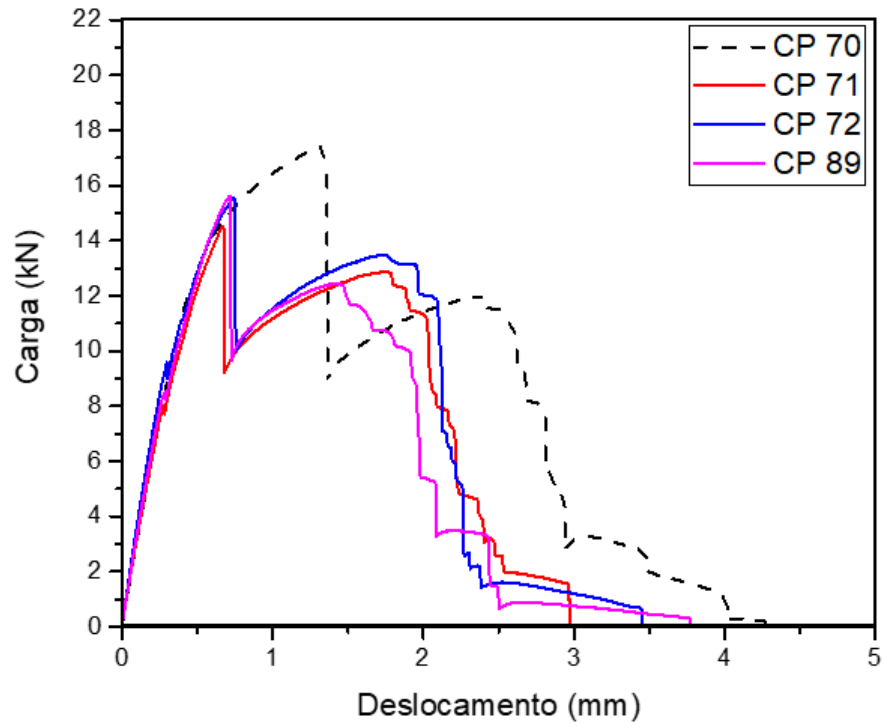


Figura 7.8 - Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo JH_60_CB após envelhecimento.

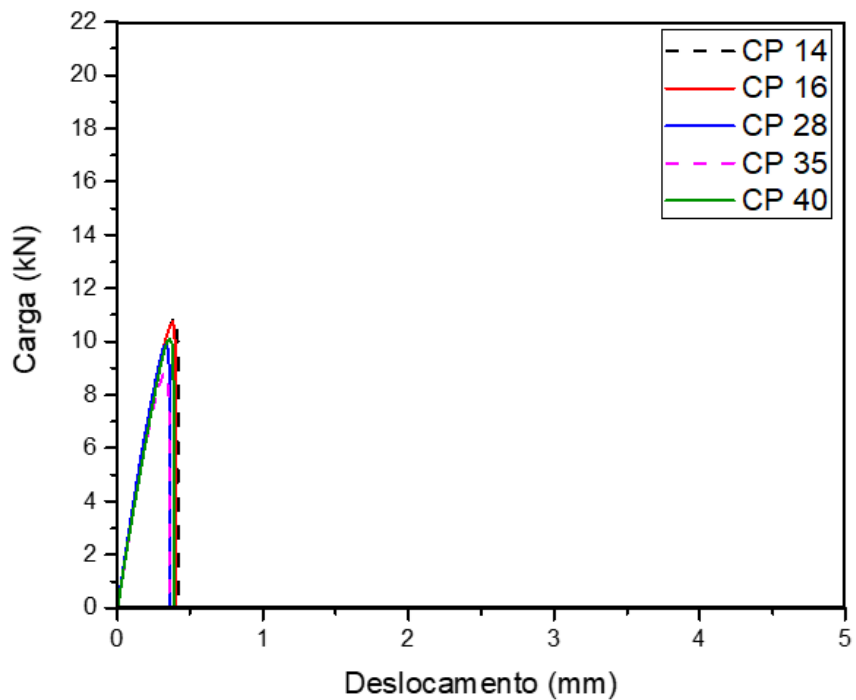


Figura 7.9 – Curvas de deslocamento *versus* carga para os CPs do grupo Juntas Adesivas após envelhecimento.

A Figura 7.3 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas envelhecidas do grupo JH_90_IE. Considerando, como critério de exclusão a repetitividade, os resultados dos CPs de nº 12 e 76 foram descartados da análise. Para os CPs de nº 8, 9 e 79 as juntas romperam-se de forma similar, sem rompimento da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 17,74 e 19,23 kN e o deslocamento final (total/até a falha) entre 1,98 e 3,27 mm. Da mesma maneira que para as juntas não envelhecidas, percebe-se, nestas juntas envelhecidas, uma queda de resistência de forma escalonada (em degrau), proporcionada pela resistência remanescente gerada pela presença das fileiras de pinos, as quais evitam a falha catastrófica.

A Figura 7.4 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas envelhecidas do grupo JH_90_CB. Considerando, novamente, como critério de exclusão a repetitividade, os resultados dos CPs de nº 21 e 26 foram descartados da análise. Para os CPs de nº 23, 25 e 84 as juntas romperam-se de forma similar, sem rompimento da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 18,59 e 19,70 kN e o deslocamento total entre 2,00 e 2,36 mm. Os CPs de nº 23, 25 e 84 tiveram um rompimento quase catastrófico das juntas, entretanto pouco antes de atingirem a carga nula (após o primeiro rompimento), exibiram resistência residual seguida de uma queda de forma escalonada.

A Figura 7.5 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas envelhecidas do grupo JH_120_IE. Os resultados dos CPs de nº 37 e 100 foram descartados da análise, pois não cumpriram o critério de repetitividade. As juntas dos CPs de nº 34, 36 e 38 romperam-se similarmente e sem rompimento da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 15,80 e 17,13 kN e o deslocamento final entre 2,17 e 3,09 mm. Outra vez nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica, ou seja, todas as quedas de carga foram do tipo escalonado.

A Figura 7.6 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas envelhecidas do grupo JH_120_CB. Do mesmo modo que nas juntas anteriores, o critério de exclusão considerado foi a repetitividade, assim, os resultados dos CPs de nº 47 e 102 foram descartados da análise. Para os demais CPs (nº 46, 48 e 49) houve repetitividade e não ruptura da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 16,11 e 16,68 kN e o deslocamento máximo entre 2,55 e 3,12 mm. Nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica, ou seja, todas as quedas de carga foram do tipo escalonada. Seguindo o mesmo padrão das juntas não envelhecidas, percebe-se nestas curvas (Fig. 7.6) que após a primeira falha (queda da carga do ponto máximo até ≈ 13 kN), possivelmente devido ao descolamento da alguma parte adesiva, há um ganho de resistência (subida da carga suportada), passando de ≈ 13 para ≈ 16 kN, e então um segundo momento de falha de forma escalonada.

A Figura 7.7 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas envelhecidas do grupo JH_60_IE. Considerando, diferentemente dos outros casos, como

critério de exclusão o tipo de fratura, o resultado do CP de nº 54 foi rejeitado da análise. Nota-se que para este caso não se tem cinco repetições, pois houve uma falha do sistema de aquisição durante o ensaio. Para os CPs de nº 55, 57 e 62 o rompimento ocorreu de maneira análoga, sem falha da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 14,20 e 15,02 kN e o deslocamento final entre 3,14 e 3,41 mm. Nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica. Similarmente à Fig. 7.6 precedente, percebe-se nestas curvas (Fig. 7.7) que após a primeira falha (queda da carga do ponto máximo até ≈ 10 kN), há um ganho de resistência, passando de ≈ 10 para ≈ 14 kN, e então um segundo momento de falha de forma escalonada.

A Figura 7.8 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas envelhecidas do grupo JH_60_CB. A exclusão de curvas foi baseada levando-se em conta, o critério de repetitividade, posto isto, o resultado do CP de nº 70 foi eliminado. Mais uma vez, não se tem cinco repetições, e isso se deve a uma falha de operação durante o ensaio. As juntas dos CPs de nº 71, 72 e 89 romperam-se similarmente, sem ruptura da parte em compósito. A carga máxima obtida variou entre 14,51 e 15,62 kN e o deslocamento máximo entre 2,97 e 3,77 mm. Nenhum dos CPs sofreu falha catastrófica. A maneira como estas juntas resistiram ao teste de cisalhamento por tração seguiu o mesmo padrão das juntas apresentadas nas Figs. 7.5 a 7.7.

Enfim, a Fig. 7.9 exhibe os resultados obtidos nos testes de cisalhamento das juntas adesivas envelhecidas. O critério de exclusão foi somente a repetitividade, sendo que as curvas dos CPs de nº 14 e 35 foram retiradas da análise. Para os CPs de nº 16, 28 e 40 não houve falha da parte em compósito e o rompimento ocorreu de maneira semelhante. A carga máxima obtida variou entre 9,94 e 10,74 kN e o deslocamento final variou entre 0,37 e 0,40 mm. Da mesma forma que na condição não envelhecida, estas juntas envelhecidas apresentam novamente um comportamento de falha catastrófica, conforme já indicado na literatura (STELZER et al., 2016).

Utilizando-se novamente do software comercial foi possível calcular em termos médios, das Figs. 7.3 até 7.9, as áreas sob as curvas de carga *versus* deslocamento escolhidas como representativas em cada caso, equivalentes às energias consumidas no cisalhamento, as cargas máximas com seus deslocamentos correspondentes e os deslocamentos finais (totais). Estes valores (acompanhados de desvio padrão) estão apresentados na Tab. 7.1. Para facilitar a análise comparativa, os resultados são agrupados graficamente das Figs. 7.10 até 7.13.

Tabela 7.1 – Dados quantitativos referentes aos resultados dos ensaios com as juntas metal-compósito envelhecidas.

Tipos de juntas	Dados médios			
	Carga máxima [kN]	Deslocamento em carga máxima [mm]	Deslocamento final [mm]	Energia de cisalhamento [J]
JH_90_IE	18,49 ± 0,61	1,56 ± 0,11	2,44 ± 0,60	24,89 ± 3,99
JH_90_CB	19,01 ± 0,46	1,58 ± 0,06	2,16 ± 0,15	23,99 ± 1,71
JH_120_IE	16,48 ± 0,54	1,05 ± 0,19	2,52 ± 0,53	28,01 ± 0,06
JH_120_CB	16,39 ± 0,23	0,77 ± 0,01	2,89 ± 0,25	28,80 ± 2,31
JH_60_IE	14,62 ± 0,34	0,64 ± 0,05	3,29 ± 0,11	28,29 ± 3,19
JH_60_CB	15,22 ± 0,51	0,71 ± 0,03	3,39 ± 0,33	25,20 ± 1,54
Juntas adesivas	10,26 ± 0,35	0,36 ± 0,02	0,38 ± 0,02	2,31 ± 0,16

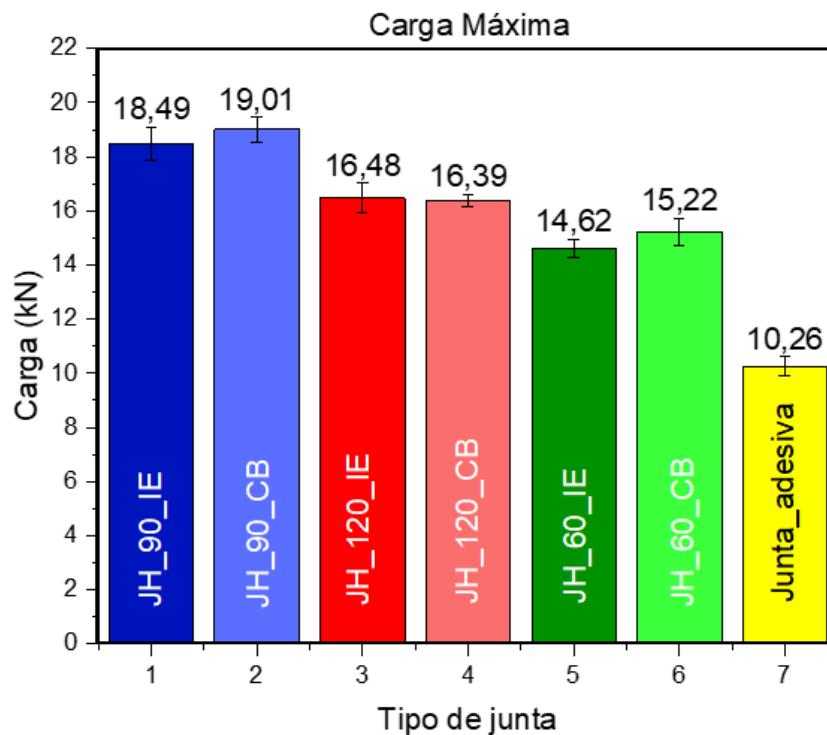


Figura 7.10 – Comparação entre cargas máximas médias para as juntas metal-compósito envelhecidas.

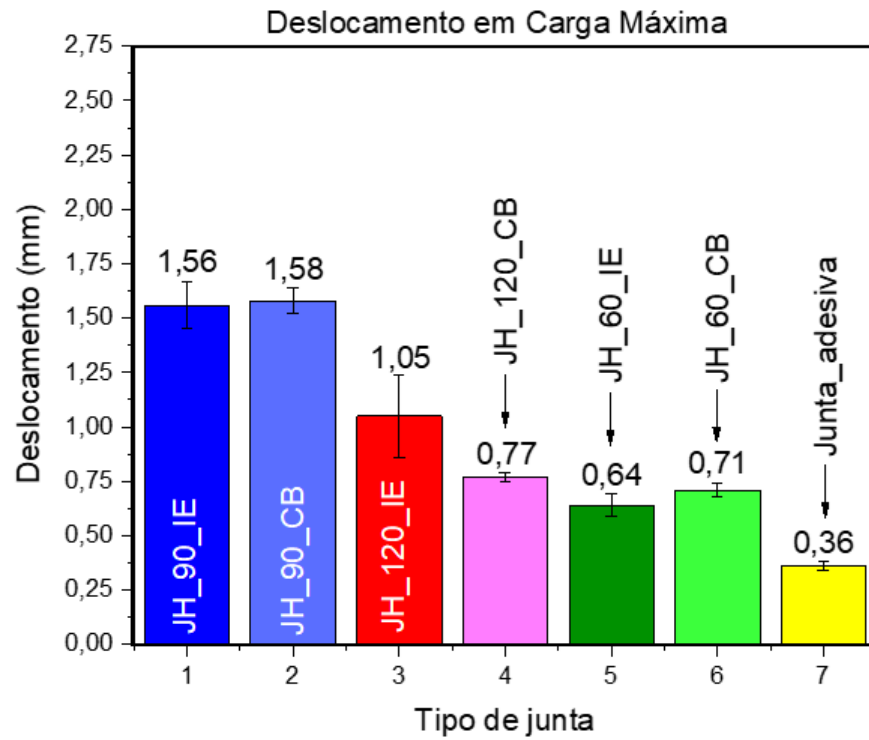


Figura 7.11 – Comparação entre os deslocamentos médios em carga máxima para as juntas metal-compósito envelhecidas.

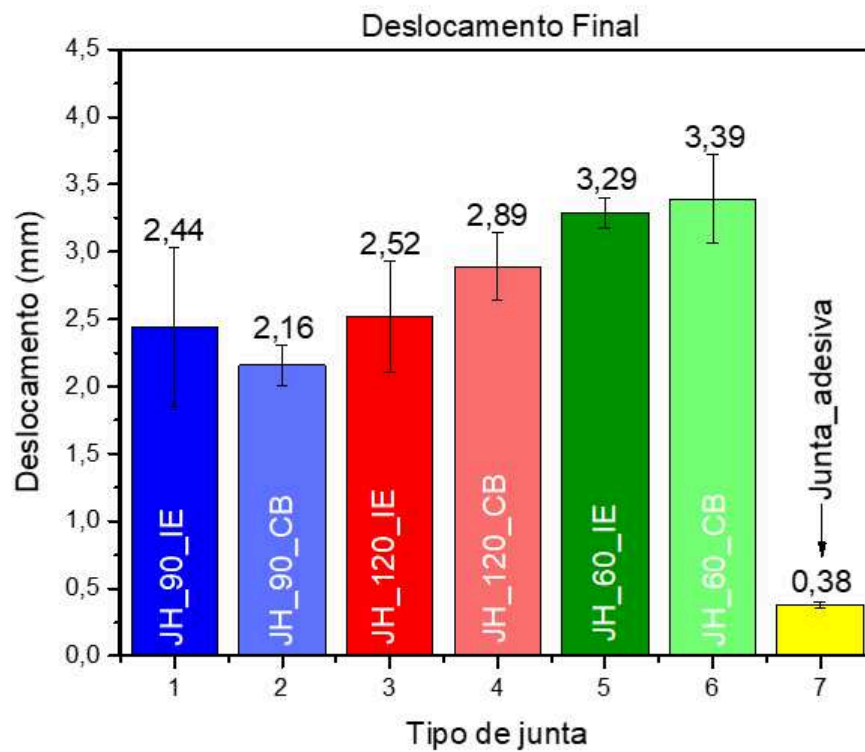


Figura 7.12 – Comparação entre os deslocamentos médios finais para as juntas metal-compósito envelhecidas.

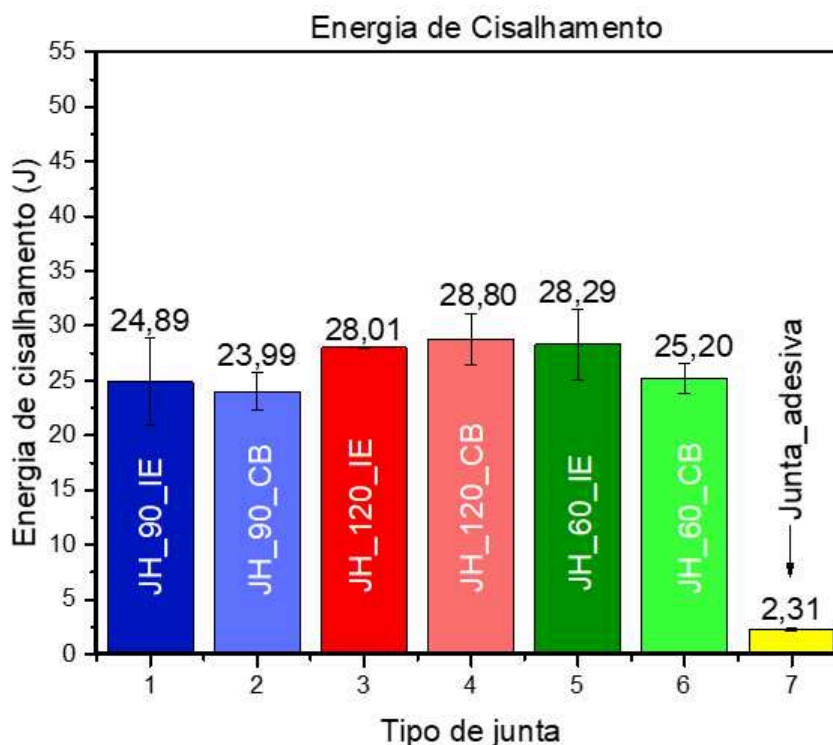


Figura 7.13 – Comparação entre as energias de cisalhamento médias para as juntas metal-compósito envelhecidas.

Uma sucinta comparação entre os resultados obtidos (Tab. 7.1 e na Fig. 7.10), mostra primeiramente que a carga máxima suportada por uma junta híbrida envelhecida foi entre 4,36 e 8,75 kN maior do que a carga máxima suportada pela junta adesiva também envelhecida. Para este caso, a distribuição dos pinos não surtiu qualquer efeito significativo. A configuração de junta híbrida envelhecida que apresentou a maior carga máxima foi a JH_90_CB e a configuração que apresentou a menor carga máxima foi a JH_60_IE. A explicação para os pinos a 90° terem apresentado performance superior aos pinos a 120° neste caso, contrariando os resultados das juntas não envelhecidas, pode estar relacionado ao acúmulo de umidade maior (Fig. 7.2), provavelmente causado pela região à sombra do pino (próxima ao constituinte metálico da junta) que dificultaria o total envolvimento por parte do constituinte compósito da junta; um região vazia poderia atrair mais umidade e está fragilizar a interface metal-compósito ao redor (Figs. 5.6 e 5.8). No mais, o comportamento de falha das juntas envelhecidas seguiu o mesmo padrão das juntas não envelhecidas, com o efeito de inclinação dos pinos provavelmente podendo ser explicado seguindo a mesma linha de raciocínio desenvolvida no Capítulo VI.

Para o caso dos deslocamentos correspondentes às cargas máximas e totais (Figs. 7.11 e 7.12), da mesma maneira que para as juntas não envelhecidas, o seu término foi determinado pela chegada ou oscilação da carga a zero. O tipo de junta que apresentou o

maior deslocamento final foi a JH_60_CB que alcançou um valor médio de 3,39 mm, e o caso com menor deslocamento foi a junta sem pinos (adesiva) com 0,38 mm. Logo em termos de deslocamento correspondente à carga máxima, percebe-se que para o caso das juntas híbridas, em geral, este valor corresponde à média aproximada de 1,05 mm. A capacidade de deformação das juntas híbridas chegou a ser 9 vezes superior em relação às juntas adesivas. Isso corrobora o efeito dos pinos de manter o metal aderido por mais tempo ao compósito, como já verificado para as juntas não envelhecidas.

A Figura 7.13 compara as energias médias de cisalhamento para os diversos tipos de juntas envelhecidas, tendo as juntas híbridas, como esperado, alcançado desempenho superior, absorvendo entre 10 (JH_90_CB) e 12 vezes (JH_120_CB) mais energia que as juntas adesivas.

As Figuras 7.14 e 7.15 abaixo apresentam a comparação geral entre os resultados dos testes de cisalhamento das juntas com envelhecimento, separando-as por tipo de distribuição de pinos, igualmente espaçados (IE) ou concentrados nas bordas (CB).

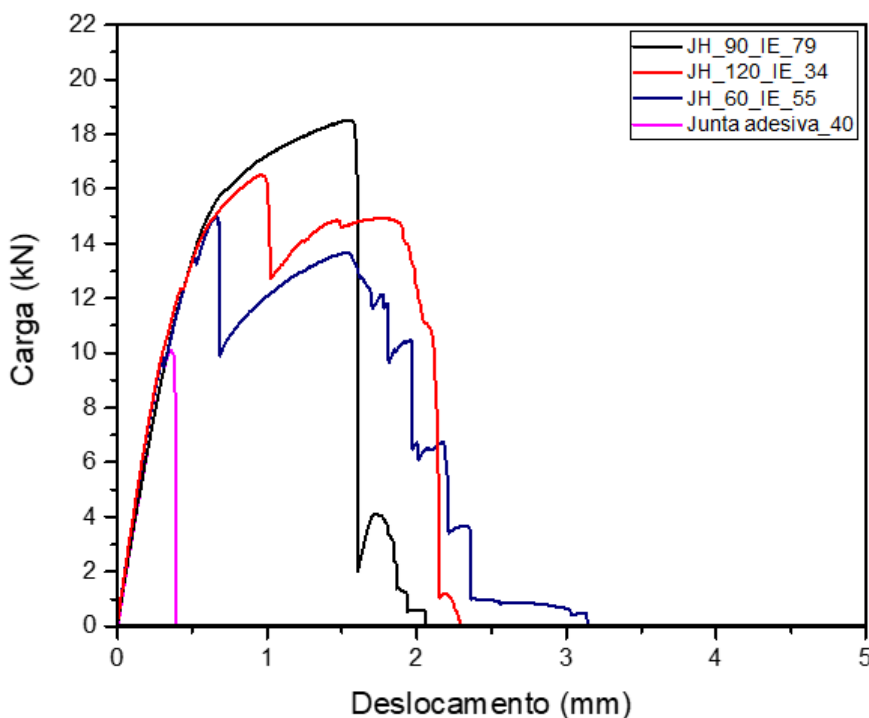


Figura 7.14 – Comparação entre comportamentos típicos - CPs com distribuição de pinos igualmente espaçados (IE) após envelhecimento.

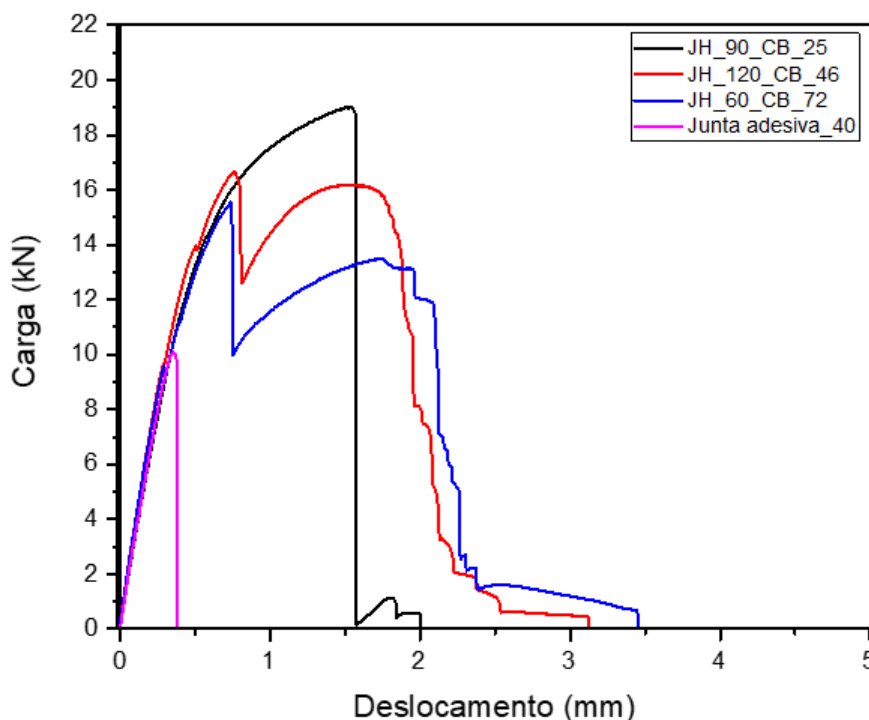


Figura 7.15 – Comparação entre comportamentos típicos - CPs com distribuição de pinos concentrados nas bordas (CB) após envelhecimento.

No caso das juntas híbridas envelhecidas, tanto com distribuição de pinos igualmente espaçada quanto com distribuição concentrada nas bordas, a simples presença dos pinos parece mais uma vez determinar a carga máxima tolerada pelas juntas, independentemente da inclinação dos mesmos (Figs. 7.14 e 7.15). Em termos de deslocamento em carga máxima, que também pode ser tomado como indicação da ocorrência da falha adesiva, este é, novamente, bastante postergado em relação à junta adesiva. Em relação ao deslocamento final/total, as juntas híbridas proporcionam desempenho elevado, com destaque para os casos com pinos inclinados. As hipóteses que explicam tais fatos podem ser consideradas as mesmas já apresentadas no Capítulo VI para as juntas não envelhecidas. Comparando as duas distribuições de pinos percebe-se, no geral, que os resultados de carga máxima foram similares para ambas as distribuições de pinos, algo que não aconteceu para o caso das juntas não envelhecidas. Ainda das Figs. 7.14 e 7.15 é possível notar que a região elástica das diferentes configurações das juntas híbridas apresentou limites similares aos da junta adesiva. Supostamente, isso é fruto de o adesivo ser o responsável pela resistência inicial das juntas, como já inferido para as juntas não envelhecidas, com os pinos atuando logo no começo da falha adesiva para somar resistência complementar pelo efeito de macro ancoramento.

7.2 Juntas Envelhecidas *versus* Juntas Não Envelhecidas

Por fim, para possibilitar uma discussão geral e resumida dos resultados obtidos, faz-se um paralelo do desempenho das juntas tanto envelhecidas quanto não envelhecidas (Figs. 7.16 a 7.19). Foram confrontados os resultados de carga máxima, deslocamento em carga máxima, deslocamento final e energia de cisalhamento.

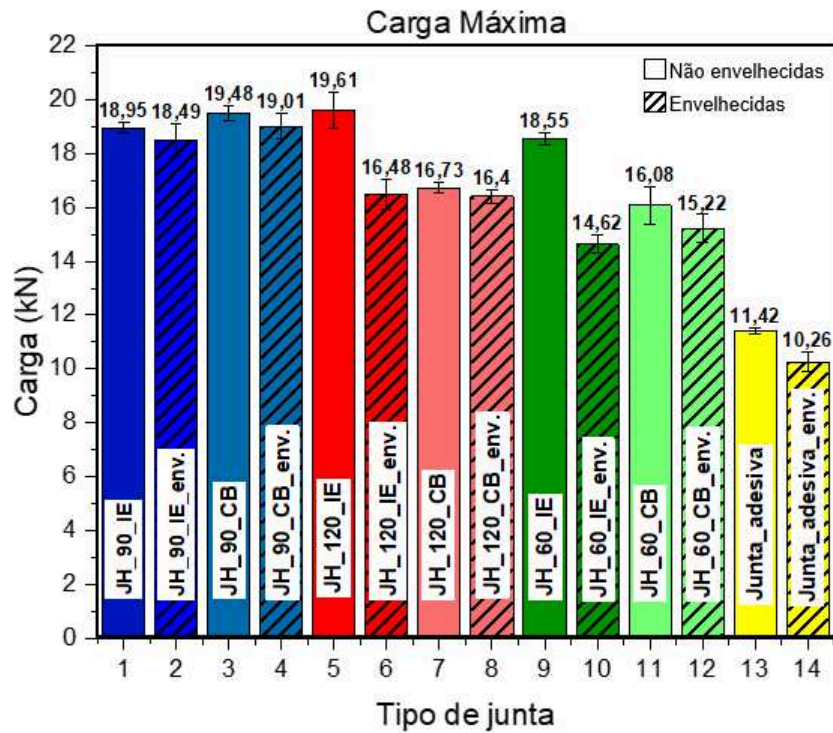


Figura 7.16 – Comparação entre cargas máximas médias para juntas envelhecidas e não envelhecidas.

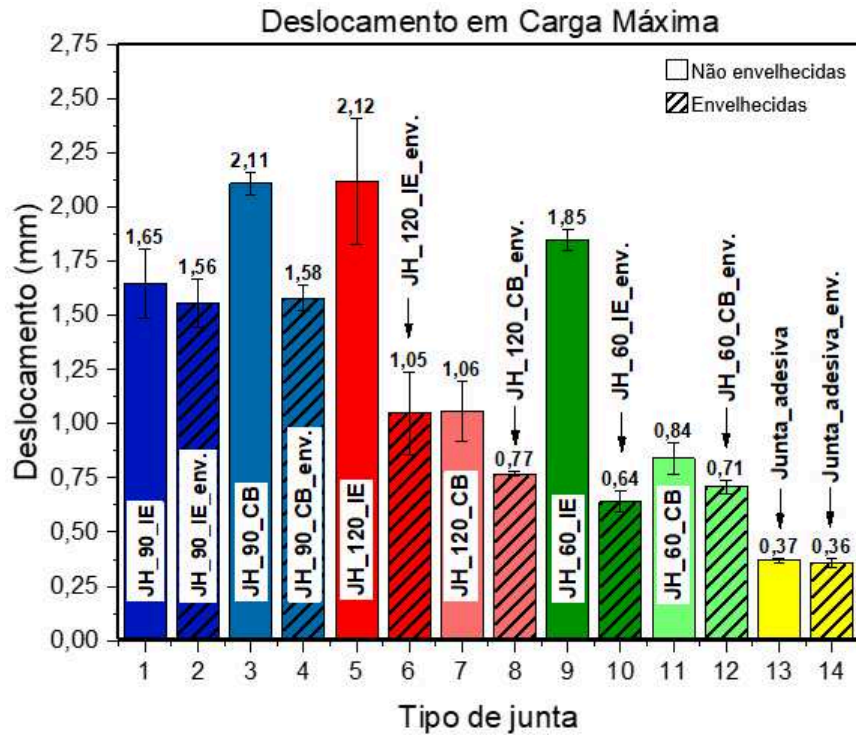


Figura 7.17 – Comparação entre deslocamentos médios em carga máxima para juntas envelhecidas e não envelhecidas.

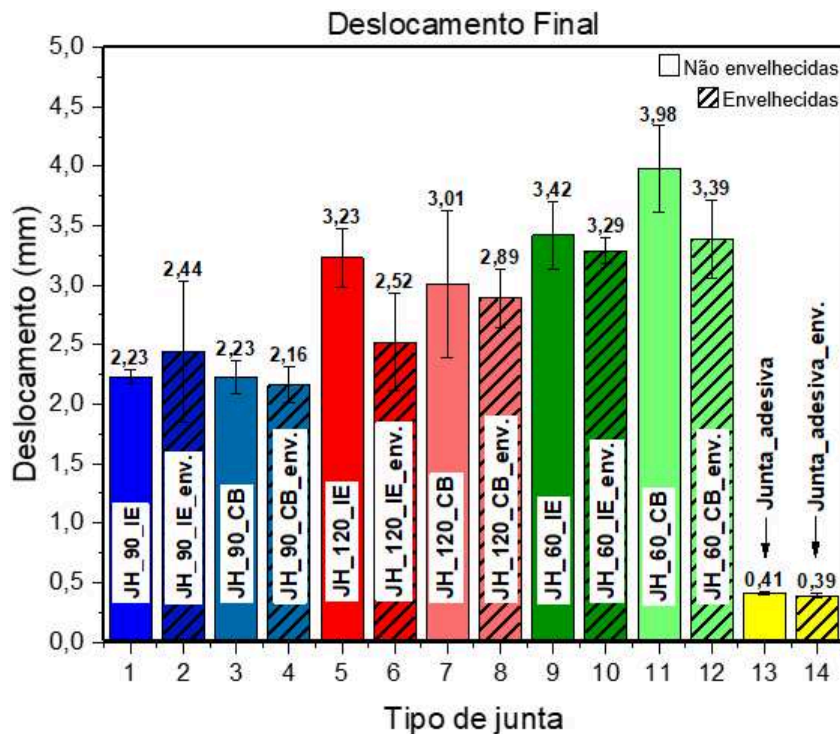


Figura 7.18 – Comparação entre deslocamentos médios finais para juntas envelhecidas e não envelhecidas.

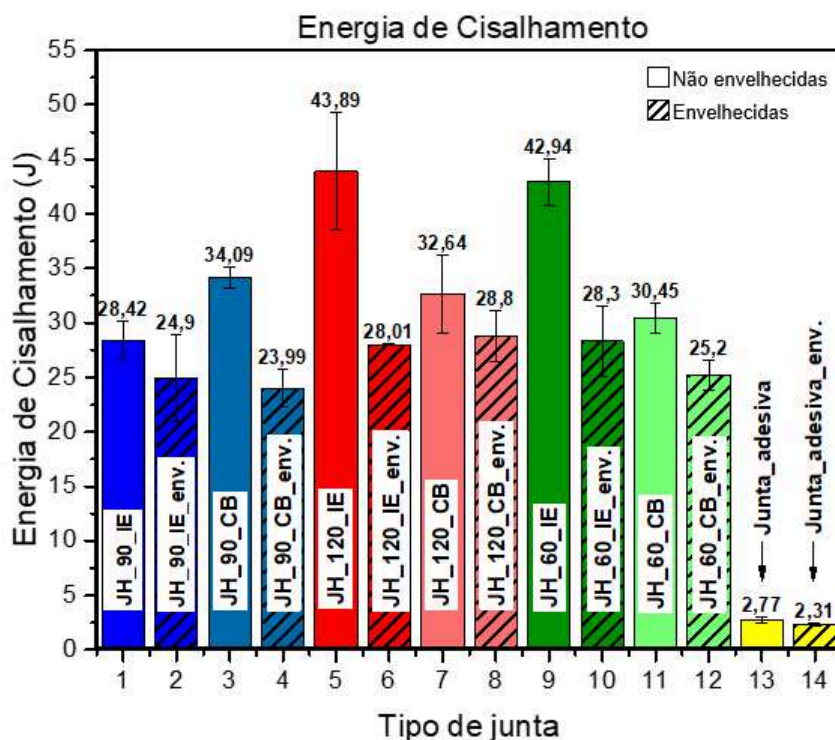


Figura 7.19 – Comparação entre energias de cisalhamento médias para juntas envelhecidas e não envelhecidas.

Primordialmente verifica-se, considerando seus respectivos desvios padrões, que houve, em maior ou menor grau, um decaimento nos patamares de carga máxima, deslocamento em carga máxima, deslocamento final e na energia de cisalhamento depois do envelhecimento hidrotérmico das juntas. Isto revela que de alguma maneira a absorção de água enfraqueceu as juntas, devido provavelmente, a plastificação da matriz, enfraquecimento da interface ou ainda devido a formação de microtrincas (Botelho et al., 2007). Analisando caso a caso, a carga máxima chegou a cair 3,93 kN no caso da junta do tipo JH_60_IE. Para o deslocamento em carga máxima, vinculado ao descolamento do adesivo, a queda foi de até 1,21 mm, também ocorrida com as juntas do tipo JH_60_IE. A resistência residual, relacionada ao deslocamento final, reduziu em até 0,71 mm, caso das juntas do tipo JH_120_IE. Por fim, a energia necessária para cisalhar as juntas reduziu em até 15,88 kN, também para as juntas do tipo JH_120_IE. Além de tudo, as juntas híbridas (com pinos), mesmo em condição mais adversa (envelhecidas), tem desempenho superior em relação às juntas adesivas, ainda que estas não tenham passado pelo envelhecimento.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Neste trabalho estudaram-se as uniões híbridas metal-compósito com a presença de pinos depositados pelo processo *CMT-PIN*. Uma das principais justificativas para o desenvolvimento deste estudo é o fato de que, como descrito no Capítulo I, a utilização de materiais compósitos na indústria, principalmente aeronáutica, está em pleno crescimento. Entretanto, no processo de fabricação, certos componentes metálicos (isotrópicos) ainda não podem ser substituídos por materiais compósitos (ortotrópicos), fazendo com que as uniões metal-compósito tenham grande relevância. Portanto, destaca-se a necessidade de se estabelecer uma união eficaz entre estruturas metálicas e em compósitos adjacentes por meio de processos de união avançados.

Com o objetivo de contribuir para o entendimento do desempenho de juntas híbridas avançadas avaliou-se experimentalmente a utilização de 25 pinos depositados com três inclinações diferentes (90°, 60° e 120° com a superfície metálica); duas distribuições de pinos (igualmente distribuídos e concentrados nas bordas) e duas condições de envelhecimento (hidrotérmico e sem envelhecimento). Como consequência da deposição dos pinos *CMT-PIN*, das condições de envelhecimento, e dos ensaios executados para avaliar o comportamento das juntas híbridas metal-compósito quando submetidas ao carregamento de cisalhamento por tração, as conclusões encontradas foram:

- O ganho de massa com a deposição dos pinos é muito baixo, representando apenas 0,9% da massa final média dos CPs utilizados.

Para a condição de juntas não envelhecidas:

- A carga máxima suportada por uma junta híbrida ficou entre a JH_60_CB com 41% (4,66 kN) e a JH_120_IE com 72% (8,19 kN), maior do que a carga máxima suportada pela junta adesiva;
- Quanto ao deslocamento em carga máxima o resultado obtido para as juntas híbridas é 5,7 vezes superior ao resultado das juntas adesivas, levando-se em conta a JH_120_IE que apresentou o maior deslocamento em carga máxima;
- Quanto ao deslocamento final os números mostraram um aumento de aproximadamente 9,7 vezes na resistência residual das juntas híbridas em relação às

juntas adesivas, levando-se em conta a JH_60_CB que apresentou o maior deslocamento total;

- Para as energias de cisalhamento, foram alcançados níveis de absorção de energia de pelos menos 10 vezes superior (JH_90_IE), mas chegando até em torno de 15 vezes acima (JH_120_IE) da performance das juntas adesivas.

Para a condição de juntas envelhecidas hidricamente:

- A carga máxima suportada por uma junta híbrida ficou entre a JH_60_IE com 42% (4,36 kN) e a JH_90_CB com 85% (8,75 kN) maior do que a carga máxima suportada pela junta adesiva;
- Quanto ao deslocamento em carga máxima o resultado obtido para as juntas híbridas é 4,4 vezes superior ao resultado das juntas adesivas, levando-se em conta a JH_90_CB que apresentou o maior deslocamento em carga máxima;
- Quanto ao deslocamento final os números mostraram um aumento aproximado de 9 vezes na resistência residual das juntas híbridas em relação às juntas adesivas, levando-se em conta a JH_60_CB que apresentou o maior deslocamento total;
- Para as energias de cisalhamento, foram alcançados níveis de absorção de energia de pelo menos 10 vezes superior (JH_90_CB), mas chegando até em torno de 12 vezes acima (JH_120_CB) do desempenho das juntas adesivas.

Por fim ressalta-se o avanço no conhecimento a respeito de juntas híbridas avançadas, especialmente as juntas acrescidas de ancoradores metálicos depositados por *CMT-PIN*, em contribuição para o meio acadêmico e industrial. Especificamente, o trabalho realizado contribuiu nos seguintes aspectos:

- A avaliação da inclinação dos pinos *CMT-PIN*, até então não realizada, mostrou que os pinos depositados a 90° com a superfície da parte metálica são, no geral, a solução mais adequada, por serem de mais simples deposição (sem inclinação da tocha ou da mesa de deposição) e por não ter ocorrido mudanças tão significativas por efeito de travamento mecânico com os pinos realmente inclinados (60° e 120°);
- Mesmo com o envelhecimento hidrotérmico as juntas híbridas (com pinos) tiveram performance sempre acima dos melhores resultados obtidos para as juntas apenas adesivas não envelhecidas, o que ressalta a eficácia da utilização dos pinos;
- Melhor entendimento da evolução da falha metal-compósito com a presença dos pinos, onde os quais provém resistência residual às juntas em relação à contribuição do adesivo nas juntas híbridas.

No geral os resultados corroboram o fato de que os pinos metálicos depositados pela soldagem *CMT-PIN* são viáveis para utilização em juntas híbridas metal-compósito. E por fim,

considerando os diversos fatores envolvidos, esse trabalho aponta para o melhor desempenho das juntas híbridas com pinos depositados a 90° com a superfície da chapa e de maneira igualmente espaçada (JH_90_IE), pois devido a sua maior facilidade de deposição aliado ao seu desempenho similar, quando comparado aos melhores resultados obtidos pelas juntas pinadas, conclui-se que para aplicações industriais de maior intensidade de fabricação, as juntas JH_90_IE serão as mais vantajosas.

CAPÍTULO IX

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para que os projetos abarcando uniões híbridas sejam adotados pela indústria, inclusive aeronáutica, são necessários ainda mais desenvolvimentos. Neste sentido, com o objetivo de aprimorar e complementar os estudos relacionados a juntas híbridas metal-compósito com pinos depositados pelo processo *CMT-PIN*, apontam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar juntas híbridas metal-compósito com pinos depositados por *CMT-PIN* utilizando ligas de alumínio aeronáutico como constituinte metálico e pré-impregnados como constituinte compósito, tendo como desafio principal conseguir utilizar pinos metálicos de alta resistência/rigidez;
- Estudar a inclusão de tratamentos superficiais para chapas metálicas visando proporcionar uma maior adesão da parte adesiva do pré-impregnado sobre a superfície metálica com pinos;
- Implementar métodos de simulação numérica (*FEM*), de modo a estudar e otimizar diversos parâmetros de aplicação dos pinos nas juntas híbridas, de forma a minimizar custos e o tempo despendido experimentalmente;
- Submeter as juntas híbridas a outros tipos de ensaios e estudos, tais como, fadiga mecânica e térmica, torção, flexão, envelhecimento ultravioleta, etc.
- Ensaiar as juntas em um envelope de utilização com temperaturas reais para indústria aeronáutica, ou seja, -60°C até +80°C.

CAPÍTULO X

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRBUS A350XWB SPECIFICATIONS. Disponível em: http://modernairliners.com/Airbus_A350_files/Specifications.html. Acessado em 29/04/2017.

ALFANO, M.; FURGIUELE, F.; LUBINEAU, G., PAULINO, G.H., Study on the role of laser surface irradiation on damage and decohesion of Al/epoxy joints, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 39, 2012, 33-41.

AMANCIO, F. S.T.; BUENO C.; DOS SANTOS J.F.; HUBER N.; HAGE JR. E., On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures, **Materials Science and Engineering: A**, Volume 528, Issues 10–11, 25 April 2012, Pages 3841-3848, ISSN 0921-5093.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1002**. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading, West Conshohocken, PA, 2010.

BABURAJ, E.G.; STARIKOV, D.; EVANS, J.; SHAFEEV, G.A.; BENSOUULA, A., Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 27(4), 2007, 268-276.

BANDEIRA, C., F., **Obtenção e Caracterização de Compósitos de Benzoxazina/fibra de Carbono**, Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP, 2015, 206 páginas.

BASHFORD, D.P., Basic Aspects of Joining Technology for Fibre Reinforced Plastics, in: G. Pritchard (Ed.), **Developments in Reinforced Plastics 5 – Processing and Fabrication**, Elsevier, London 1986, 205-232.

BERTLING, D.; KAPS, R.; MULUGET, E., Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process, **German Aerospace Congress**, 7, 2016, 577–585.

BOEHM Volker, Hybrid Manufacturing of Turbine Components - Laser metal deposition (LMD) and adaptive repair for higher precision and shorter production time, **Laser Technik Journal**, 2016.

BOEING - 787 Dreamliner - Program fact Sheet. Disponível em: <http://www.boeing.com/boeing/commercial/787family/programfacts.page>. Acessado em 29/04/2017.

BORGES, M. F., **Desenvolvimento de nova geometria de rebite para uso em estruturas híbridas compósito-metal obtidas através do processo de rebiteagem por fricção**. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BOTELHO, E., C., SILVA, R., A., PARDINI, L., C., REZENDE, M., C., A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. **Mater Res** 9(3), 2006, 247–56.

BOTELHO, E., C., ALMEIDA, R., S., PARDINI, L., C., REZENDE, M., C., Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate. **International Journal of Engineering Science** 45, 2007, 163–172.

BROCKMANN W.; HENNEMANN, O.D.; KOLLEK, H.; MATZ, C., Adhesion in bonded aluminium joints for aircraft construction, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 6(3), 1986, 115-143.

BROCKMANN, W.; GEIß, P. L.; KLINGEN, J.; SCHRÖDER, B., Adhesive Bonding - Materials, **Applications and Technology**, Wiley-VCH, 2009.

BUSCH, M., G., **Análise experimental do comportamento mecânico de juntas híbridas metal-compósito**, Trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de engenheiro mecânico, CEFET- RJ, 2016, 56 páginas.

BUXTON, A.L.; DANCE, B.G.I., The potential of EB surface processing within the aerospace industry, **Rare Met. Mater. Eng.** 40, 2011, 155.

CAIRES, F., C., apostila 2 – **Tecnologia dos polímeros**, Centro universitário Padre Anchieta, 2009, 30 páginas.

CAMPBELL FC. Manufacturing technology for aerospace structural materials, **Elsevier**, 2016.

CARNIO, L. P. **Um Estudo da Influência do Tratamento Superficial em União Híbrida Metal-Compósito**. 2017. 62 f. Projeto de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Aeronáutica. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

CARRINO, L.; NAPOLITANO, G.; SORRENTINO, L., Wettability improving of 2024 aluminium alloy by oxygen cold plasma treatment, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006, 31(5-6), 465-473.

CARTIÉ, D.R.; TROULIS, M.; PARTRIDGE, I. K., Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates, **Composites Science and Technology** 66, 2006, 855-861.

CENTEA, T.; GRUNENFELDER, L.K.; NUTT, S.R., A review of out-of-autoclave prepregs - material properties, process phenomena, and manufacturing considerations, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 70, 2015, 132-154.

CHUTIMA, S.; BLACKIE, A. P., Effect of pitch distance, row spacing, end distance and bolt diameter on astened composite joints. **Composites- Part A: Applied Science and Manufacturing** 27 2, 1996, 105-190.

CIAMPONI, A.L.; BALLESTER, R.Y.; GARONE, W.F., Princípios de adesão para o cirurgião dentista, **Revista Inst. Ciências da Saúde**, 7(2), 1989, 29 – 34.

CLEARFIELD, H.M; MCNAMARA, D.K; DAVIS, G.D., Adhesive bonding. **New York: Plenum Press**, 1990.

CRITCHLOW, G.W.; BREWIS, D.M., Review of surface pretreatments for aluminium alloys, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 16(4), 1996, 255-275.

CRITCHLOW, G.W.; YENDALL, K.A.; BAHRANI, D.; QUINN, A.; ANDREWS, F., Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 26(6), 2006, 419-453.

DA COSTA, A., A., DA SILVA, D., F., N., R., TRAVESSA, D., N., BOTELHO, E., C., The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber–metal laminates. **Materials and Design** 42, 2012, 434–440.

DANTULURI, V.; MAITI, S.; GEUBELLE, P. H.; PATEL, R.; KILIC, H., Cohesive modeling of delamination in Z-pin reinforced composite laminates, **Composites Science and Technology** 67, 2007, 616–631.

DAS, S.; WARREN, J.; WEST, D.; SCHEXNAYDER, S., M., Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis, **Technical Report, OAK RIDGE National Laboratory**, 2016, 116 páginas.

DAVIS, M.; BOND, D., Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 19, 1999, 91-105.

EARL, C.; HILTON, P.; O'NEILL, B., Parameter influence on Surfi-Sculpt processing efficiency, **Physics Procedia**, 39, 2012, 327-335.

EUROFIGHTER TYPHOON - Technical Guide. Disponível em: <http://www.eurofighter.com/>. Acessado em 29/04/2017.

FELICE, I. O. **Um Estudo da Influência da Inclinação de Pinos em União Híbrida Metal-Compósito**. 2017. 74 f. Projeto de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

FRANZONI, P.A. **Um Estudo da Influência da Quantidade de Pinos em União Híbrida Metal-Compósito**. 2017. 56 p. Projeto de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Aeronáutica. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

FRONIUS, Fronius CMT Welding Technology "**Current Welding Practice: CMT Technology**", English Edition Volume 11, DVS Media GmbH, Dusseldorf, 1st Edition 2014, Fronius International GmbH, 2014.

FURLAN, R. Audi revela TT ultra quattro concept, 2013. Disponível em: <http://quatorrodas.abril.com.br/noticias/fabricantes/audi-revela-tt-ultra-quattro-concept-739649.shtml>. Acessado em: 29/04/2017.

GRAHAM, D.P.; REZAI, A.; BAKER, D.; SMITH, P.A.; WATTS, J.F., The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures, **Composites: Part A**, 64, 2014, 11-24.

GRASSI, M.; COX, B.; ZHANG, X., Simulation of pin-reinforced single-lap composite joints, **Composites Science and Technology** 66, 2006, 1623–1638.

GUILLAUMAT L, BATSALE JC, MOURAND D., Real time infra-red image processing for the detection of delamination in composite plates. **Composites Part A: Appl Sci Manuf**, 1359-835X July 2004;35(7-8):939–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.021>.

HABENICHT, G., Applied Adhesive Bonding - A Practical Guide for Flawless Results, **Wiley-VCH**, 2006.

HARRIS, A.F.; BEEVERS, A., The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 19(6), 1999, 445-452.

HART, S. L. J., Adhesive-bonded double-lap joints: **NASA/CR-1973-112235**, NASA Langley Research Centres, Hampton Virginia; 1973.

HOLMES, M., Global carbon fibre market remains on upward trend, **Reinforced Plastics**, volume 58, 2014, páginas 38 – 45.

JAHN, J., WEEBER, M., BOEHNER, J., STEINHILPER, R., Assessment strategies for composite-metal joining technologies – A review. **26th CIRP Design Conference**. Procedia CIRP 50, 2016, 689 -694.

JAHANI, H.R.; MOFFAT, B.; MUELLER, R.E.; FUMO, D.; DULEY, W.; NORTH, T.; GU, B., Excimer laser surface modification of coated steel for enhancement of adhesive bonding, **Applied Surface Science**, 127-129, 1998, 767-772.

KATUNIN A, DRAGAN K, DZIENDZIKOWSKI M. Damage identification in aircraft composite structures: a case study using various non-destructive testing techniques. **Compos Struct**, 0263-8223 September 2015; 127:1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.080>.

LAMBIASE, F., PAOLETTI, A., Mechanical behavior of AA5053/polyetheretherketone (PEEK) made by Friction Assisted Joining, **Composite Structures**, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.045>

LIN, H.J.; TSAI, C.C., Failure analysis of bolted connections of composites with drilled and moulded-in hole **Composite Structures** 30, 1995, 159- 168.

MATUSZEWSKI, J., Fastener Guidelines for Composite Materials, **Materials Technology**, 19:4, 2004, 203-210, DOI: 10.1080/10667857.2004.11753086.

MOLITOR, P.; BARRON, V.; YOUNG, T., Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 21(2), 2001, 129-136.

MOLLERA, F.; THOMYA C.; VOLLERTSENA, F.; SCHIEBEL, P.; HOFFMEISTER, C.; HERRMANN, A. S., Novel method for joining CFRP to aluminium, **Physics Procedia** 5, 2010, 37– 45.

MOLYNEUX, M., Prepreg, tape and fabric technology for advanced composites. **COMPOSITES. VOL 14**, n° 2, 1983.

MOURITZ, A.P., Compression properties of z-pinned composite laminates. **Composites Science and Technology** 67, 2007, 3110–3120.

PARK, S.Y.; CHOI, W.J.; CHOI, H.S.; KWON, H.; KIM, S.H., Recent trends in surface treatment technologies for airframe adhesive bonding processing: a review (1995–2008). **The Journal of Adhesion**, 86(2), 2010, 192-221.

PIRCH, N.; LINNENBRINK, S.; GASSER, A.; WISSENBAACH, K.; POPRAWA, R., Analysis of track formation during laser metal deposition, **Journal of laser applications**, 29, 2017.

RECHNER, R.; JANSEN, I.; BEYER, E., Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 30(7), 2010, 595-601.

RIBEIRO, M. L., **Programa para análise de juntas coladas: compósito-compósito e metal-compósito**. 163p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SCALEA, F.L.; BONOMO, M.; TUZZEO, D., Ultrasonic guided wave inspection of bonded lap joints: noncontact method and photoelastic visualization. **ResNondestr Eval** 13(3), 2001, 153–71.

SILVA, L.F.M.; MAGALHÃES A.G.; MOURA M.F.S.F.; Juntas Adesivas Estruturais, **Publindústria**, ISBN 978-972-8953-21-8, 1ª edição, 2007.

SINKE, J., **Manufacturing Principles for fiber metal laminates**, Relatório técnico, Faculty of Aerospace Engineering, University of Delft, 2008.

SINMAZÇELİK T.; AVCU, E.; BORA, M.Ö.; ÇOBAN, O., A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, **Materials & Design**, 32(7), 2011, 3671-3685.

SKHABOVSKIY, I. **Avaliação da Aplicação de Acoradores por Soldagem em Laminados Metal-Fibra Visando a Indústria Aeronáutica**. 2018. 227 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

SKHABOVSKIY, I.; BATISTA, N. L.; DAMATO, C. A.; REIS, R. P.; BOTELHO, E. C.; SCOTTI, A., Appraisal of fiber-metal laminate panels reinforced with metal pins deposited by CMT welding, **Composite Structures**, 180, 2017, 263-275.

SKHABOVSKIY, I.; GARTNER, N.; RODRIGUES, C. F.; REIS, R. P.; SCOTTI, A., Parametrização da técnica cmt (cold-metal transfer) pin visando sua aplicação em trocadores de calor, **POSMEC – UFU**, 2015.

SMITH, F., COMELD - An innovation in composite to metal joining. Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/comeld-an-innovation-in-composite-to-metal-joining/> - 2015. Acessado em 29/04/2017.

STELZER, S.; UCSNIK, S.; PINTER, G., Fatigue behaviour of composite-composite joints reinforced with cold metal transfer welded pins. **Int. Journal of Fatigue** 81, 2015, 37-47.

STELZER, S.; UCSNIK, S.; PINTER, G., Strength and damage tolerance of composite–composite joints with steel and titanium through the thickness reinforcements, **Composites: Part A** 88, 2016, 39–47.

TWI, World Centre for Materials Joining - Cambridge Vacuum Engineering (CVE). Disponível em: http://www.camvaceng.com/assets/uploads/documents/Surfi-Sculpt_UK_05.pdf. Acessado em 11/04/2017.

UCSNIK, S.; SCHEERER, M.; ZAREMBA, S.; PAHR, D.H.; Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. **Composites: Part A**, 41, 2010, 369-74.

VENTURINI, S. N., **Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente**. 2010. 177 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

WANG X.; AHN J.; BAI Q.; LU W.; LIN J., Effect of forming parameters on electron beam Surfi-Sculpt protrusion for Ti–6Al–4V. **Materials and Design** 76, 2015, 202–206.

WANG X.; AHN J.; KABOGLU C.; LU L.; BLACKMAN, B.R.K., Characterisation of composite-titanium alloy hybrid joints using digital image correlation. **Composite Structures** 140 (2016) 702-711.

WANG, G.E.X.; SHUILI, G.; DANCE, B., Study of Electron Beam Surfi-sculpt during Composite Materials Joining. **Rare Metal Materials and Engineering**, 40(S4), 2011.

WITTEWER, L.; ENZINGER, N., Simulating the welding process of pin structures, **SYSWELD Forum**, 2011.

WONG, E. C. P.; HOULT, A. P.; KIM, J. K.; YU, T. X., Improvement of adhesive bonding in aluminium alloys using a laser surface texturing process, **Journal of Materials Processing Technology**, 63, 1997, 579-584.

XIONG, W.; BLACKMAN, B.; DEAR, J.P.; WANG, X., The effect of composite orientation on the mechanical properties of hybrid joints strengthened by surfi-sculpt, **Composite Structures** 18, 2015.

YAN, Y.; WEN, W-D.; CHANG, F -K., Experimental study on clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole. **Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing** 30, 1999, 215- 229.