

PEDRO ALBERTINASE FRANZONI

**UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE PINOS EM
UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

PEDRO ALBERTINASE FRANZONI

**UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE PINOS EM
UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO**

Orientador

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

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

UBERLÂNDIA – MG

2017

UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE PINOS EM UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO

PEDRO ALBERTINASE FRANZONI

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis - Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dra. Núbia dos Santos Saad
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Tobias Souza Morais
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA, JULHO de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço de maneira geral a todos os que se envolveram, direta ou indiretamente, colaborando para que este trabalho fosse possível.

Ao Prof. Ruham Pablo Reis, meus agradecimentos por toda paciência e ensinamentos voltados a essa monografia. Agradeço a Iaroslav Skhabovskyi, doutorando em engenharia mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia, por sua disposição no auxílio dos preparativos envolvendo a soldagem dos pinos. À Profa. Núbia dos Santos Saad, agradeço por toda solicitude e comprometimento em auxiliar no andamento dos testes mecânicos. Meus sinceros agradecimentos aos funcionários envolvidos na realização direta ou indireta deste trabalho, os quais se empenham diariamente para que a educação em nosso país siga sempre se desenvolvendo.

O meu principal agradecimento à minha família e minha namorada, Laura Issa, pelo apoio não somente para a realização desta monografia, mas durante todas as fases da graduação.

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.

RESUMO

Visando à redução de massa e, conseqüentemente, de consumo de combustível, a indústria aeronáutica e aeroespacial vêm implementando o uso de materiais compósitos em seus projetos. Entretanto, poucas são as aplicações onde estes podem substituir totalmente os materiais metálicos. Quando ambos estão presentes, estes dois materiais distintos necessitam ser unidos para que uma estrutura maior seja formada. Neste sentido, as chamadas uniões híbridas, combinação de mais de um tipo de união em uma mesma junta, vem ganhando destaque. Uma forma recente de união híbrida é a combinação da junção adesiva com pinos metálicos soldados pelo processo CMT-Pin no lado metálico que atuam como ancoradores de carga no lado compósito. Por ser um método recente, existe ainda muito o que investigar e entender. Assim, o objetivo principal deste trabalho é estudar a influência da quantidade de pinos em união híbrida metal-compósito. Corpos de prova com junta sobreposta e diferentes quantidades de pinos foram fabricados por soldagem CMT-Pin e por laminação manual de compósito de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro e, em seguida, testados sob tração/cisalhamento. Verificou-se que a utilização de uma quantidade intermediária de pinos melhora o desempenho da junta metal-compósito em termos de carga suportada e rigidez. Entretanto, uma grande quantidade de pinos parece dificultar a correta adesão do compósito ao redor dos pinos, o que leva a desempenho similar ao de uma junta sem pinos. A utilização dos pinos soldados por CMT-Pin, como esperado, praticamente não eleva a massa resultante dos componentes, o que reforça a potencialidade deste método de união combinada para aplicação em estruturas leves que são típicas da indústria aeronáutica e de outros setores da indústria dos transportes.

PALAVRAS CHAVE: *união híbrida avançada, união metal-compósito, CMT-Pin, quantidade de pinos.*

FRANZONI, P.A. **A Study on the Influence of Pin Quantity in Metal-Composite Hybrid Joining**. 2017. 56 f. Undergraduate Thesis, Graduate course in Aeronautical Engineering, Federal University of Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

In order to reduce the mass and therefore the fuel consumption, the aerospace industry have been implementing the use of composite materials in their airframes. However, there are few examples where the metals can be entirely replaced by composite materials. Therefore, when there are both materials (composite and metals) they must be joined to become one larger structure. In this line, hybrid advanced joining is one of several ways to achieve that and it is getting close attention over the past years. A more recent hybrid joining method is the combination of adhesive bonding and small pin-like protuberances welded on the metal side by CMT-Pin process, that act holding the load on the composite side. Being recent, this hybrid joining method still demands further investigation and study. Therefore, the objective of this work is to study the influence of pin quantity in metal-composite hybrid joining. Samples with single lap joint configuration were fabricated with different amounts of pins by CMT-Pin welding and by manual lamination of fiber glass reinforced polymer and then tested under tensile/shear loading. The results showed that the samples containing intermediary quantity of pins had superior performance in terms of both strength and stiffness. However, a larger quantity of pins seems to avoid the proper adhesion between the composite and the surroundings of the pins, which drives to a performance similar to that of joints with no pins. As expected, the use of pins made by CMT-Pin welding does not increase the final mass of the components in a significant way, which reinforces the potential of this combined joining approach for lightweight structures typically found in the aerospace and other transport industries.

KEYWORDS: *advanced hybrid joining, metal-composite joining, CMT-Pin, quantity of pins.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Introdução a materiais compósitos.....	17
2.2	Materiais compósitos em aeronaves	19
2.3	Junção metal-compósito híbrida avançada	21
2.4	Processo de produção da junta híbrida.....	23
3	METODOLOGIA	29
3.1	Geometria e massa das chapas.....	29
3.2	Tratamento das chapas.....	32
3.3	Soldagem dos pinos.....	34
3.4	Laminação do material compósito.....	37
3.5	Acabamento dos CP's.....	40
3.6	Testes de tração	42
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	44
4.1	Processo de soldagem CMT-Pin.....	44
4.2	Análise qualitativa dos resultados de tração-cisalhamento	46
4.2.1	Junta sem pinos.....	47
4.2.2	Junta com seis pinos.....	48
4.2.3	Junta com quinze pinos.....	48
4.3	Análise quantitativa das configurações de junta	49
4.4	Fator de rigidez	54
4.5	Análise da adição de massa	56
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
6	TRABALHOS FUTUROS E POTENCIALIDADES	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VISTA DE UM BOEING 737 APÓS ACIDENTE CAUSADO POR CONCENTRAÇÃO DE TRINCAS ESTRUTURAIS EM JUNTAS REBITADAS. FONTE: FAA NTSB/AAR-89/03 REPORT (2016).	15
FIGURA 2 – SEQUÊNCIA DE EXECUÇÃO DAS ATIVIDADES DO TRABALHO.	16
FIGURA 3 - FASES PERSENTES EM UM MATERIAL COMPÓSITO FONTE: DANIEL; ISAH. (2006).....	17
FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DE COMPÓSITOS EM RELAÇÃO AO REFORÇO. FONTE: CALLISTER (2007).	18
FIGURA 5 - AERONAVE BOEING 787. FONTE: BOEING INDUSTRY (2012).	19
FIGURA 6 – PRINCIPAIS TIPOS DE JUNTAS ADESIVAS EMPREGADAS NA INDÚSTRIA. FONTE: ADHESIVEMAG’S (2017).....	21
FIGURA 7 – (A) NA PARTE SUPERIOR: REPRESENTAÇÕES E FOTOS VIA RAIOS-X DE JUNÇÕES CONTENDO PROTUBERÂNCIAS. (B) NA PARTE INFERIOR: GRÁFICO COMPARANDO ESFORÇO ENTRE ESTRUTURA COM E SEM PROTUBERÂNCIAS. FONTE: SMITH (2004)	22
FIGURA 8 – (A) EFEITO DO DESGASTE NATURAL COMPARANDO A RESPOSTA A TRAÇÃO ENTRE JUNTAS HÍBRIDAS E JUNTAS ADESIVAS. (B) COMPARAÇÃO DE JUNTAS HÍBRIDAS E ADESIVAS NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO. (GRAHAM, D.P.; REZAI, A.; BAKER, D.; SMITH, P.A.; WATTS, J.F., (2014)	23
FIGURA 9 – TOCHA ESPECIAL DO PROCESSO CMT OU CMT PIN QUE POSSIBILITA O RECUO DO ARAME. FONTE: FRONIUS INTERNATIONAL GMBH (2017)	24
FIGURA 10 - ETAPAS DO PROCESSO CMT. A) ABERTURA DE ARCO VOLTAICO. B) ARCO VOLTAICO APAGADO E CURTO CIRCUITO. C) REVERSÃO DO MOVIMENTO E DEPOSIÇÃO DE MATERIAL. D) RECOMEÇO DO PROCESSO, JÁ COM MATERIAL DEPOSITADO. FONTE: ADAPTADO DE FRONIUS INTERNATIONAL GMBH (2017).	24
FIGURA 11 – APROXIMAÇÃO PELO ARAME DA PEÇA NO CMT PIN. FONTE: IAROSLAV SKHABOVSKIY (2016).....	25
FIGURA 12 – CONTATO DO ARAME COM A PEÇA E FUSÃO DO MATERIAL NO CMT PIN. FONTE: IAROSLAV SKHABOVSKIY (2016).	25
FIGURA 13 – SOLIDIFICAÇÃO DO MATERIAL FUNDIDO DEVIDO À QUEDA DA CORRENTE NO CMT PIN. FONTE: IAROSLAV SKHABOVSKIY (2016).....	26
FIGURA 14 – AUMENTO DA CORRENTE E GERAÇÃO DE TENSÃO MECÂNICA NO ARAME NO CMT PIN. FONTE: IAROSLAV SKHABOVSKIY (2016).....	26
FIGURA 15 – ROMPIMENTO DO ARAME PELO MOVIMENTO DE RETROCESSO E QUEDA NA CORRENTE NO CMT PIN. FONTE: IAROSLAV SKHABOVSKIY (2016).....	27
FIGURA 16 - DIFERENTES FORMATOS E DIMENSÕES POSSÍVEIS DE SEREM REALIZADOS PELO MÉTODO DE SOLDAGEM CMT PIN. FONTE: FRONIUS CMT (2016).....	27
FIGURA 17 – À ESQUERDA: DISPOSITIVO DE AVANÇO E RECUO DE ARAME NA TOCHA CMT PIN. À DIREITA: BUFFER DE ARAME QUE PERMITE SUA REVERSÃO. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	28
FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM CMT E CMT PIN: (1) FONTE DE ENERGIA; (2) PAINEL DE CONTROLE; (3) RACK; (4) CONTROLADOR DO ROBÔ; (5) ALIMENTAÇÃO DO ARAME-ELETRODO; (6) TOCHA ESPECIAL COM REVERSÃO DO ARAME-ELETRODO; (7) “PULMÃO” (BUFFER) QUE PERMITE A REVERSÃO DO ARAME; (8) DEPÓSITO DE ARAME. FONTE: FRONIUS INTERNATIONAL GMBH (2016)	28
FIGURA 19 - DIAGRAMA DA METODOLOGIA. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	29
FIGURA 20 – PROPRIEDADES DO AÇO 1020 EM COMPARAÇÃO COM OUTROS METAIS. FONTE: EBAH,(2016)	30
FIGURA 21 - DIMENSÕES DA CHAPA DE AÇO 1020 PARA CP’S.	31
FIGURA 22 – BALANÇA UTILIZADA PARA MEDIÇÃO DE MASSA DE TODAS AS CHAPAS. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	32
FIGURA 23 - DISCO DE LIXA UTILIZADO E TRATAMENTO SUPERFICIAL SENDO REALIZADO EM UMA CHAPA DE AÇO 1020. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	33
FIGURA 24 - DETALHE DA CHAPA DE AÇO 1020 APÓS PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL. OS TRAÇOS EM AZUL FORAM FEITOS PARA REFERÊNCIA DA PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA DO ROBÔ. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	33
FIGURA 25 – (A) GÁS UTILIZADO NO PROCESSO DE SOLDAGEM CMT PIN; (B) TOCHA E ROBÔ UTILIZADOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	34

FIGURA 26 – ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS PINOS. À ESQUERDA A CHAPA COM 6 PINOS E À DIREITA CONTENDO 15 PINOS (DIMENSÕES EM MM).	35
FIGURA 27 – ESQUEMA UTILIZADO PARA MONTAGEM DA CÂMERA E CAPTURA DE IMAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM. FONTE: LUCAS CARIO (2017).	35
FIGURA 28 – À ESQUERDA: TOCHA DE SOLDAGEM INICIANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM. À DIREITA: PROCESSO FINALIZADO COM DEPOSIÇÃO DE QUINZE PINOS ESPAÇADOS IGUALMENTE ENTRE SI. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	36
FIGURA 29 – CHAPA COM DEPOSIÇÃO DE 6 PINOS FINALIZADA. FONTE: LUCAS CARNIO (2017).	36
FIGURA 30 – À ESQUERDA: RESINA E CATALISADOR UTILIZADOS NA LAMINAÇÃO DO COMPÓSITO. À DIREITA: MANTA DE FIBRA DE VIDRO UTILIZADA. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	37
FIGURA 31 – CHAPAS POSICIONADAS E PRONTAS PARA A LAMINAÇÃO. FONTE: LUCAS CARNIO (2017)	38
FIGURA 32 – ROLO DE POLIÉSTER AUXILIANDO NA DISTRIBUIÇÃO DA RESINA E ENVOLVIMENTO DAS FIBRAS EM TORNO DOS PINOS. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	39
FIGURA 33 – COMPÓSITO APÓS FINALIZAÇÃO DA LAMINAÇÃO E INÍCIO DO PROCESSO DE CURA NATURAL. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	39
FIGURA 34 – CP’S DE UNIÃO HÍBRIDA AVANÇADA DESMOLDADAS E MARCADAS PARA CORTE. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	40
FIGURA 35 – SEPARAÇÃO DOS CP’S UTILIZANDO SERRA DE FITA. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	40
FIGURA 36 – (A) LIXA DE DESBASTE; (B) LIXA D’ÁGUA PARA ACABAMENTO DOS CP’S. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	41
FIGURA 37 – VISTA SUPERIOR DETALHANDO TRÊS CP’S PRONTOS PARA O TESTE DE TRAÇÃO. FONTE: LUCAS CARNIO (2017).	42
FIGURA 38 – DETALHE DA VISTA LATERAL DA UNIÃO HÍBRIDA AVANÇADA APÓS RECEBER PROCESSO DE LIXA. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	42
FIGURA 39 - MÁQUINA UTILIZADA NO ENSAIO DE TRAÇÃO. FONTE: MTS (2016).	43
FIGURA 40 - VISTA GLOBAL DO CP PRESO ÀS GARRAS HIDRÁULICAS DA MÁQUINA DE TRAÇÃO. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	43
FIGURA 41 – SEQUÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DE PINO POR SOLDAGEM CMT PIN. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	44
FIGURA 42 – GRÁFICO EVIDENCIANDO AS DIFERENTES FASES E VALORES DE TENSÃO E CORRENTE PARA UM PROCESSO DE SOLDA UTILIZANDO MÉTODO CMT-PIN. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	45
FIGURA 43- GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE DIÂMETRO E ALTURA DA PONTA DOS PINOS PARA CADA CP.....	46
FIGURA 44 – CURVA CARGA X DESLOCAMENTO PARA JUNTA SEM PINOS.	47
FIGURA 45 – CURVA CARGA X DESLOCAMENTO PARA JUNTA COM 6 PINOS.	48
FIGURA 46 - CURVA CARGA X DESLOCAMENTO PARA JUNTA COM 15 PINOS.	49
FIGURA 47 - DETALHE DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO PARA JUNTA SEM PINOS.....	50
FIGURA 48- DETALHE DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO PARA JUNTA COM SEIS PINOS.....	50
FIGURA 49 - DETALHE DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO PARA JUNTA COM QUINZE PINOS.	51
FIGURA 50 – RESUMO DOS VALORES DE CARGA SUPORTADA PARA TODOS OS CP’S NO DESLOCAMENTO DE 0,2 MM.	52
FIGURA 51 – ILUSTRAÇÃO REPRESENTANDO EFEITO DE FALTA DE CONTATO ENTRE MATERIAL COMPÓSITO E METAL DEVIDO À PRESENÇA DOS PINOS.....	53
FIGURA 52 – CP CONTENDO QUINZE PINOS APÓS ENSAIO E CONTRA A LUZ.....	53
FIGURA 53 – CP CONTENDO SEIS PINOS APÓS ENSAIO E CONTRA A LUZ.	54
FIGURA 54 – GRÁFICO DE CARGA X DESLOCAMENTO DA AMOSTRA 3, SEM PINOS, EXEMPLIFICANDO O PROCESSO DE OBTENÇÃO DO FATOR DE RIGIDEZ.	55
FIGURA 55 – RESUMO DOS VALORES DE FATOR DE RIGIDEZ PARA AS CONFIGURAÇÕES DE JUNTAS AVALIADAS.	56
FIGURA 56 – GRÁFICO DE INCREMENTO PERCENTUAL DE MASSA VERSUS FATOR DE RIGIDEZ PARA CADA CORPO DE PROVA.	57
FIGURA 57 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA E FATOR DE RIGIDEZ ESPECÍFICOS DOS TRÊS GRUPOS.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

CMT	<i>COLD METAL TRANSFER</i>
CMT-PIN	<i>COLD METAL TRANSFER - PIN</i>
CP	CORPO DE PROVA
GMAW	<i>GAS METAL ARC WELDING</i>
LAPROSOLDA (UFU)	CENTRO PARA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
LMD	<i>LASER METAL DEPOSITION</i>
LMEST (UFU)	LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE ESTRUTURAS "PROF. JOSÉ EDUARDO TANNÚS REIS" DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
LSM (UFU)	LABORATÓRIO DE SISTEMAS MECÂNICOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
MIG/MAG	<i>METAL INERT GAS/METAL ACTIVE GAS</i>

1 INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica tem cada vez mais desenvolvido pesquisas relacionadas à redução de massa das aeronaves visando obter maior eficiência propulsiva e, conseqüentemente, reduzir o consumo de combustíveis e emissão de gases poluentes. Além disso, com a redução de peso das estruturas é possível aumentar também a carga paga. Responsável pela maior porcentagem de massa presente nas aeronaves, a área estrutural possibilita mudanças em seus diversos componentes com o objetivo de manter as propriedades mecânicas necessárias reduzindo suas dimensões.

No quesito redução de peso, os materiais compósitos tem sido um grande avanço por apresentarem alta resistência mecânica e significativa redução de massa. Várias modificações podem ser feitas nos materiais compósitos a fim de se obter a relação desejada entre resistência mecânica e massa do componente. Entretanto diversas partes das aeronaves ainda são feitas de metais por questões tais como custo e confiabilidade. Portanto torna-se necessário unir materiais metálicos e compósitos.

Uma aeronave possui diversas estruturas que necessitam ser unidas de uma forma segura e eficiente, garantindo a resistência às esforços durante todo envelope de voo, o qual possui variações devido a rajadas de ventos, vibração e amplitudes térmicas. Assim, além de resistir aos esforços devido ao próprio peso das estruturas e cargas devido à sustentação da aeronave, as uniões entre componentes estruturais devem resistir e transferir todos estes esforços sem comprometer a integridade estrutural da mesma. As juntas mais encontradas em aeronaves comerciais e militares possuem geralmente parafusos e/ou rebites.

Apesar de estas juntas serem reforçadas pelo número de rebites ou parafusos, estes componentes são concentradores de tensão e, muitas vezes, os responsáveis por falhas estruturais.

A Figura 1 retrata um exemplo de falha estrutural em uma aeronave Boeing 737 operado pela Aloha Airlines em 1988, a qual teve parte da fuselagem desintegrada. Investigações atrelaram o acidente à presença de várias trincas concentradas nos rebites da região afetada (FAA NTSB/AAR-89/03, 2016).



Figura 1 – Vista de um Boeing 737 após acidente causado por concentração de trincas estruturais em juntas rebetadas. Fonte: FAA NTSB/AAR-89/03 report (2016).

Torna-se necessário desenvolver novas formas de união. Uma forma mais recente de interligar metais e compósitos tem sido por meio de uniões híbridas, ou seja, a combinação de duas ou mais técnicas de junção visando produzir juntas com melhores propriedades. Neste contexto, a utilização de pinos soldados na parte metálica antes da laminação do compósito tem ganhado destaque (GRADINGER, 2011).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência da quantidade de pinos em união híbrida metal-compósito em junta sobreposta simulando um carregamento comum presente nas juntas de aeronaves. São objetivos específicos:

- Estimar, com base nos dados colhidos, o incremento de resistência e rigidez gerado pela deposição dos pinos.
- Verificar percentualmente a variação de massa proveniente da deposição dos pinos.

Para atingir os objetivos, foi utilizada a sequência de execução de atividades resumidamente apresentada na Figura 2.

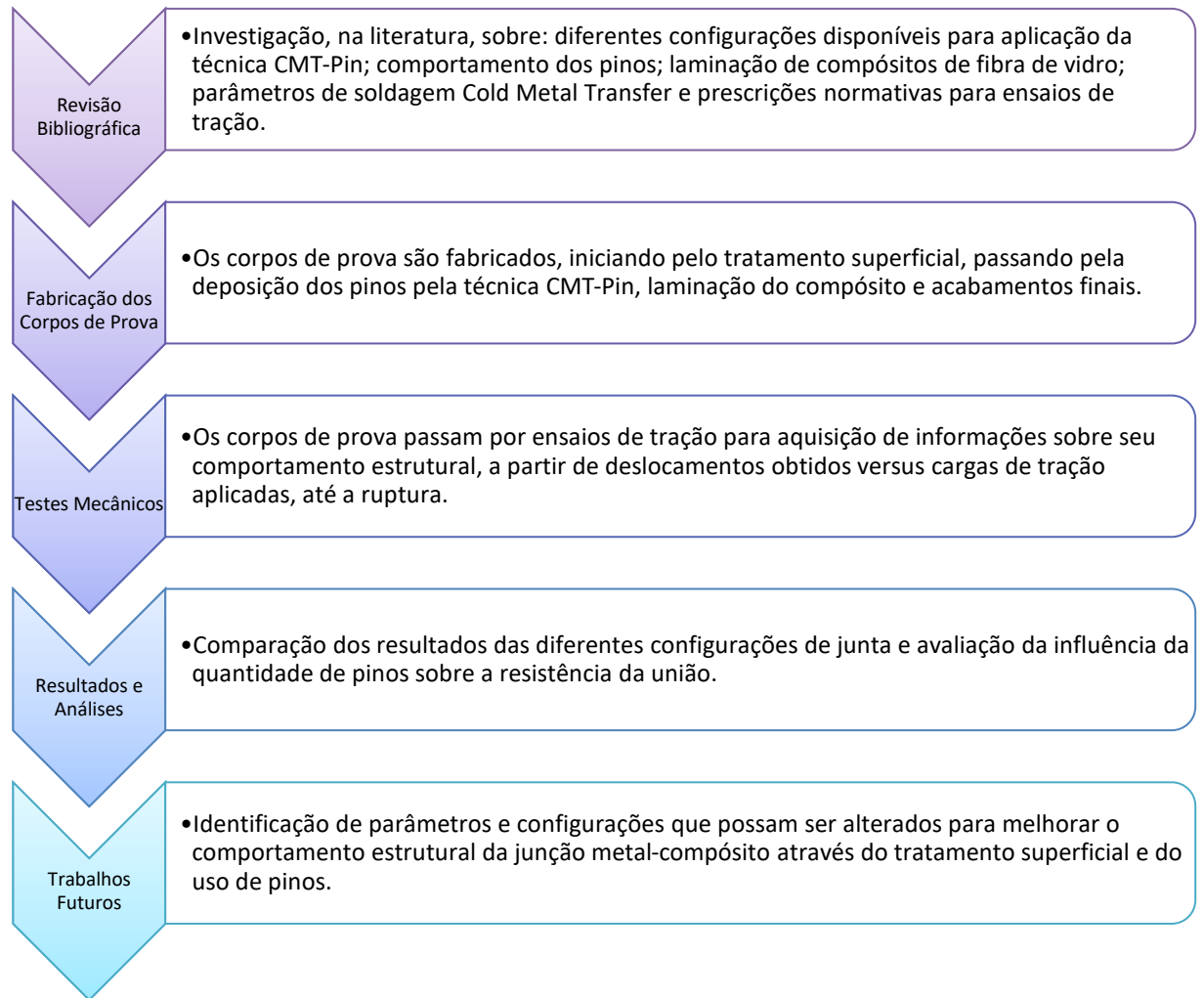


Figura 2 – Sequência de execução das atividades do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução a materiais compósitos

Rethwisch Callister definiu, em seu livro *“Introdução à ciência dos materiais”*, materiais compósitos como “qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades” (CALLISTER, 2002, p.359). Portanto, suas fases constituem-se de materiais com diferentes estruturas moleculares, cada uma com suas propriedades mecânicas particulares que, quando combinadas, resultam em uma melhor propriedade, como resistência à tração, à flexão, ao impacto, resistência térmica e ao meio ambiente (corrosão), dureza, dentre outras.

Para Daniel e Ishai (2006), em sua forma mais simples, os materiais compósitos possuem um material de fase contínua, chamado de matriz, o qual envolve sua outra fase descontínua ou dispersa, chamada de fase dispersa ou reforço. Panzera (2012) complementa que o compósito é a combinação destas duas fases sem que ocorra a formação química de uma nova fase, exceto na região de interface entre as fases dispersa e matriz. A Figura 3 ilustra a distinção entre a fase matriz e a fase dispersa do material compósito.

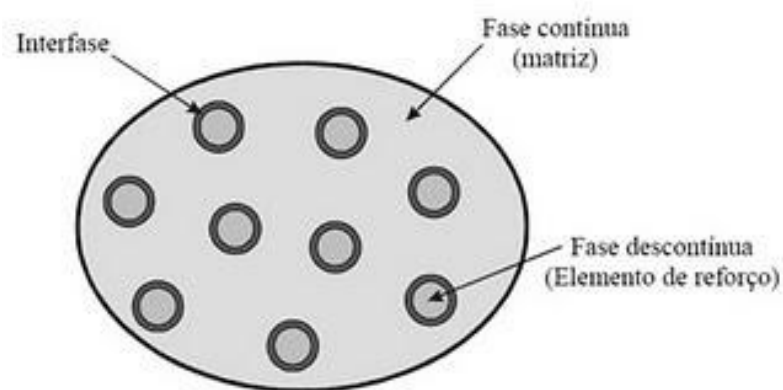


Figura 3 - Fases presentes em um material compósito Fonte: Daniel; Isahi. (2006).

Apesar de sua produção artificial, exemplos naturais de materiais compósitos podem ser encontrados na natureza, como é o caso da madeira. A madeira possui fibras de celulose resistentes e flexíveis, que são envolvidas por uma matriz rígida denominada “lignina”. O osso humano também pode ser considerado um material

compósito, uma vez que possui o colágeno (proteína forte, porém mole) e a apatita (mineral mais duro e frágil). Combinando a matriz e reforço, pode-se chegar a características desejadas atendendo às necessidades do projeto.

Ainda de acordo com Panzera (2012), existem várias propriedades que direcionam a aplicação dos compósitos, não necessariamente apenas mecânicas, mas também elétricas, térmicas, óticas, magnéticas e químicas. Estes devem ser projetados para uma finalidade, visando maximizar a combinação das propriedades das duas fases distintas. Para Callister (2007) os vários tipos possíveis de compósitos se resumem no esquema de classificação, de acordo com o reforço, apresentado na Figura 4.

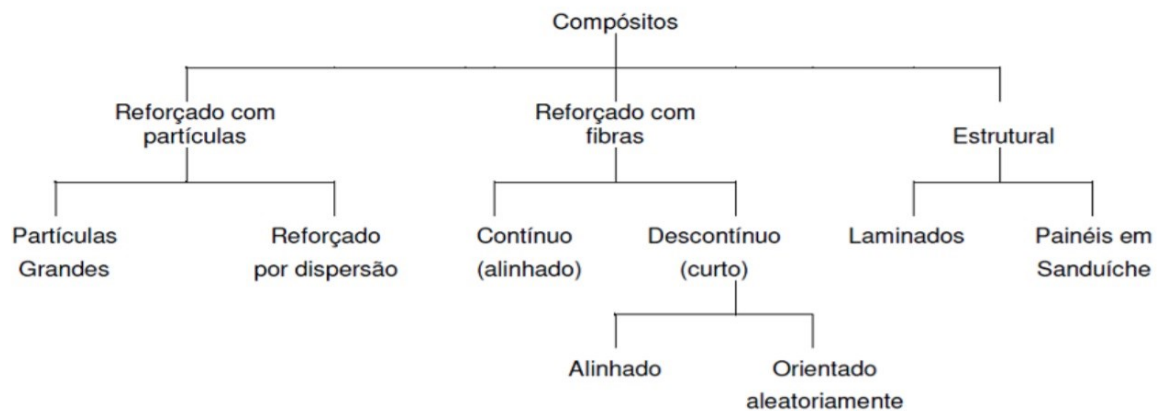


Figura 4 – Classificação de compósitos em relação ao reforço. Fonte: Callister (2007).

Os compósitos reforçados com fibras, alvo deste presente trabalho, possibilitam atingir alta resistência mecânica e rigidez. Podem ter fibras contínuas e descontínuas, sendo esta última podendo ser distribuída de forma alinhada ou aleatória. Os principais materiais de reforço fibroso utilizados são fibras de vidro, de carbono e Kevlar (aramida). Sua orientação depende do projeto e processo de fabricação, e pode ser unidirecional ou bidirecional, como é o caso de mantas, onde as fibras são intercaladas entre si em um ângulo geralmente de 90 graus. Para os compósitos estruturais do tipo laminado, várias camadas do reforço de fibras são adicionadas e laminadas com um aglomerante (geralmente alguma resina, como epóxi), formando um componente rígido.

Dentre as propriedades destes materiais, as que são previsíveis do ponto de vista de projeto são: densidade, módulo de elasticidade e condutividade térmica (CALLISTER, 2007). Porém, propriedades importantes do ponto de vista estrutural

não são lineares e bem definidas como nos metais, tornando necessário muitos estudos, geralmente experimentais, acerca dos materiais compósitos para que os cientistas e profissionais saibam com precisão definir a vida útil de um componente, garantindo maior confiabilidade e segurança.

2.2 Materiais compósitos em aeronaves

Os materiais compósitos têm-se mostrado cada vez mais presentes na indústria, em geral, por apresentarem uma ótima combinação de alta resistência mecânica com densidade reduzida. Na indústria aeronáutica, em que a segurança deve ser rígida e, ao mesmo tempo, busca-se reduzir o máximo possível o peso das aeronaves por questões ambientais e de eficiência energética, este material tem sido cada vez mais adotado. Na Figura 5 podemos observar que a aeronave Boeing 787, uma das mais recentes lançadas pela indústria aeronáutica *Boeing*, possui a maior parte de sua estrutura feita com materiais compósitos.

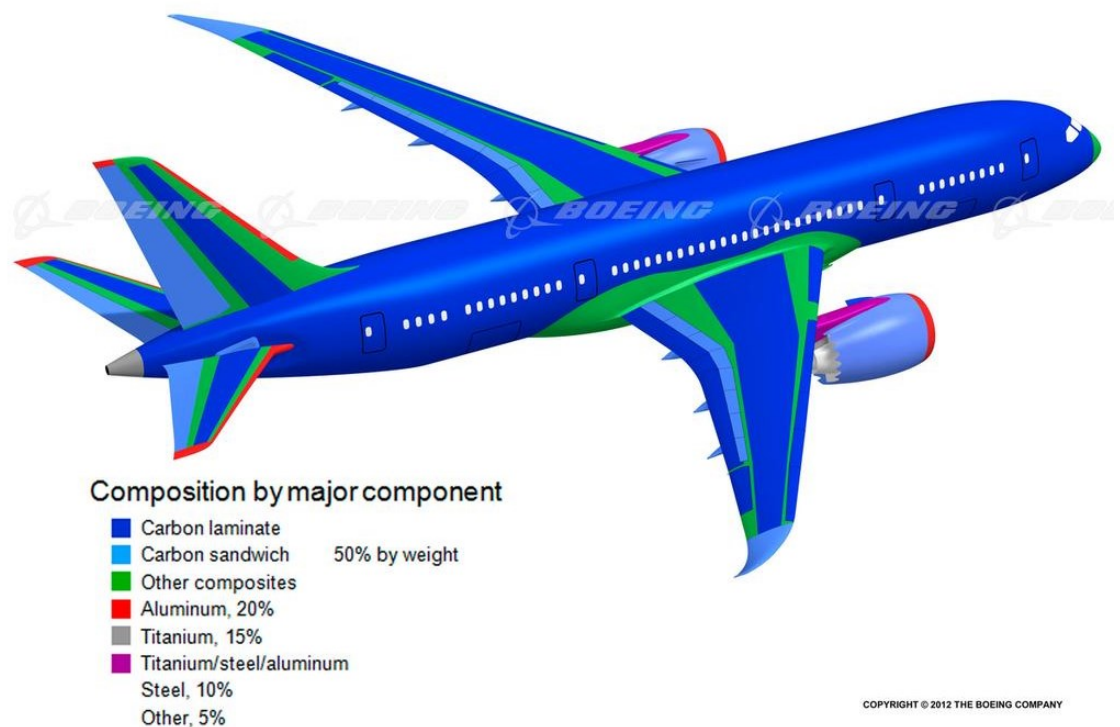


Figura 5 - Aeronave Boeing 787. Fonte: Boeing Industry (2012). ¹

¹ Disponível em: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html;

Acessado em: Jan 2017.

Apesar de não apresentarem previsibilidade como os metais, os materiais compósitos têm recebido muita atenção de pesquisadores e cientistas, os quais buscam prever seu comportamento e, conseqüentemente, evitar falhas estruturais. Um dos principais pontos suscetíveis à falha estrutural através de geração e propagação de trincas está nas juntas das estruturas por propiciar uma maior concentração de tensão, que tem valores de carga alternados (fadiga) durante o envelope de voo.

Mesmo com a tendência de que a maior parte das estruturas aeronáuticas serão fabricadas em materiais compósitos de matriz polimérica, existem partes em que estes materiais não podem ser utilizados. Componentes suscetíveis à altas temperaturas, como a saída da turbina dos motores e nacele, bem como componentes sujeitos a variações constantes de cargas, como pilone, devem ser projetados e fabricados ainda utilizando materiais metálicos. Mesmo partes de asas e fuselagens ainda são feitas em maior ou menor grau em metais, dependendo da aeronave. A necessidade de utilizar concomitantemente estes dois tipos de materiais leva ao desenvolvimento de juntas para uni-los, garantindo segurança e baixo peso.

Segundo Ribeiro (2009) a indústria aeronáutica tem utilizado primordialmente meios de fixação através de parafusos e rebites, garantindo sua resistência. Porém, como citado na Seção 1 deste trabalho, estes parafusos e rebites além de serem grandes concentradores de tensão, podem levar à ocorrência de sérios danos e falhas estruturais para a aeronave, possuindo resistência mecânica limitada apenas ao cisalhamento do componente de junção.

No livro *“Structural Adhesive Joints in Engineering”*, Adams e Wake (1997) propuseram outra forma de fixação utilizando junções adesivas. Estas têm vantagens de não apresentar protuberâncias na superfície (não há rebites e parafusos), não concentrar tensões provindas de algum dos componentes e apresentar maior resistência mecânica e confiabilidade. A Figura 6 ilustra os cinco principais tipos de juntas adesivas utilizadas pela indústria aeronáutica.

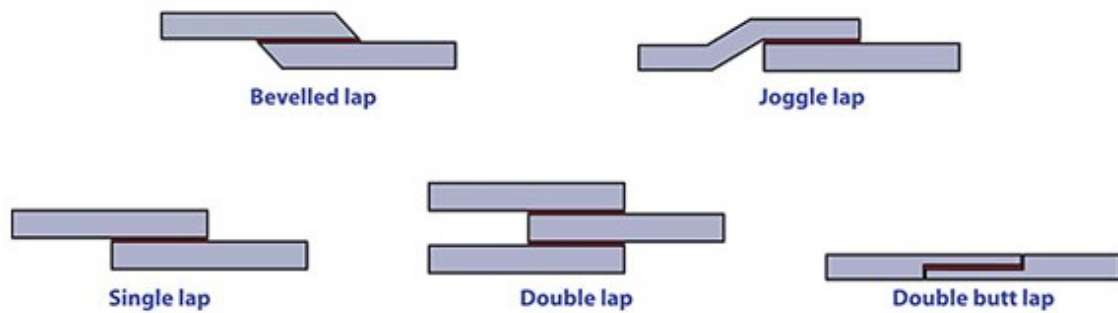


Figura 6 – Principais tipos de juntas adesivas empregadas na indústria. Fonte: AdhesiveMag's (2017)².

2.3 Junção metal-compósito híbrida avançada

Dentre as diversas possibilidades de junção entre materiais metálicos e compósitos, o principal método investigado e empregado nos últimos anos tem sido relacionado à produção de pequenas estruturas metálicas na superfície do metal à ser unido, como mostrado na Figura 7(a). Estas estruturas, geralmente no formato de pinos, funcionam como pequenas travas, aumentando a interação entre metal e compósito, não limitando o componente apenas à falha por cisalhamento do adesivo, mas sim distribuindo as tensões nas pequenas estruturas. Mesmo na ocorrência de cisalhamento total do material compósito com a parte metálica, o componente não irá falhar totalmente pois a carga será toda transferida às pequenas estruturas, aumentando a margem de segurança e confiabilidade do componente. A Figura 7(b) mostra a comparação de uma junta híbrida com e sem pinos. Observa-se que a estrutura com pinos se destaca com um valor aproximadamente 30% maior de carga máxima antes de falhar quando comparado ao controle (sem pinos), evidenciando que o método em questão apresenta resultados efetivos.

² Disponível em: www.adhesivemag.com; Acesso em Jan. 2017.

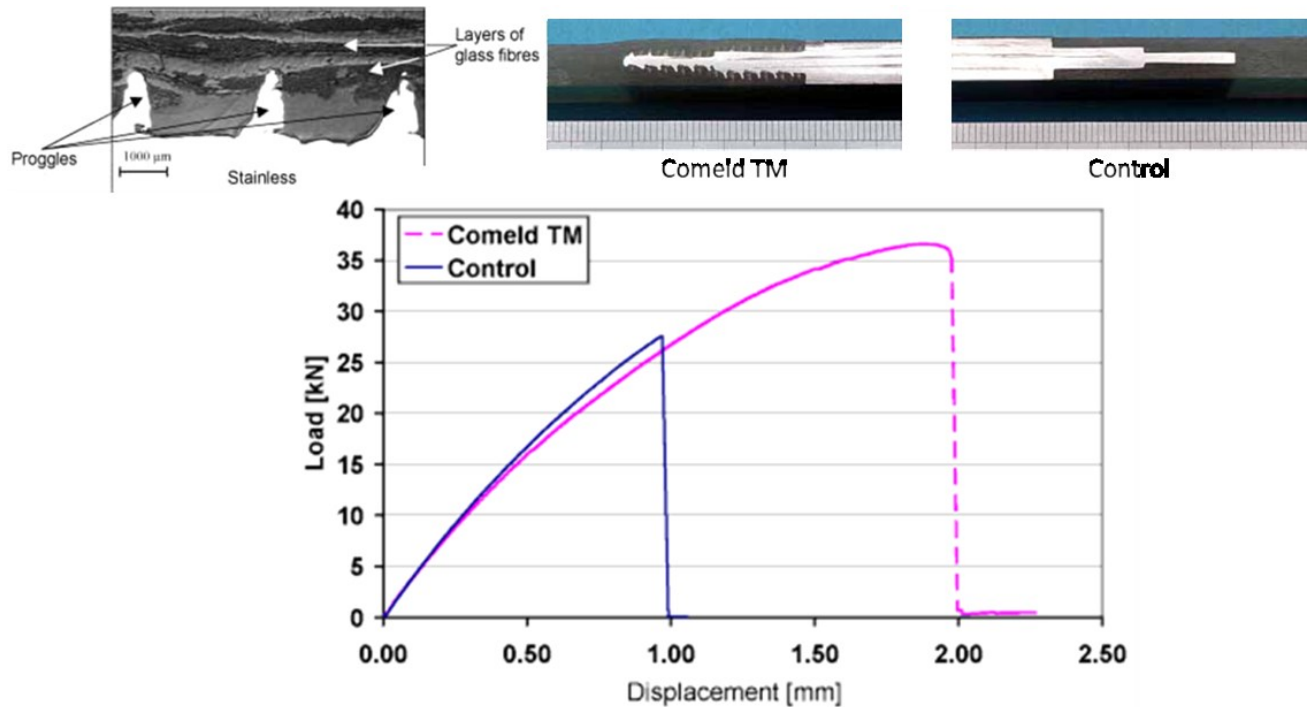


Figura 7 – (a) Na parte superior: Representações e fotos via Raio-X de junções contendo protuberâncias. (b) Na parte inferior: gráfico comparando esforço entre estrutura com e sem protuberâncias. Fonte: SMITH (2004)

Propriedades como resistência ao desgaste ambiental e resistência ao impacto também têm se destacado quando comparando juntas híbridas com juntas adesivas. A Figura 8(a) mostra o gráfico de um ensaio de tração versus deslocamento de amostras desgastadas por fatores ambientais de juntas adesivas e juntas híbridas e evidencia um melhor desempenho para juntas híbridas após sofrerem efeitos do meio ambiente. Já a Figura 8(b) compara a resistência ao impacto dos dois tipos juntas, comprovando mais uma vez a melhor eficiência da junta híbrida, a qual exibe boa tolerância ao dano, pois a resistência ao cisalhamento não diminui mesmo com o aumento da energia de impacto (nível de dano) antes do teste de tração/cisalhamento.

“Pinned joint” significa a junta com união híbrida avançada, já “Control joint” representa um controle puramente adesivo, isto é, sem pinos. “Aged” entre parênteses representa juntas com desgaste devido ao tempo.

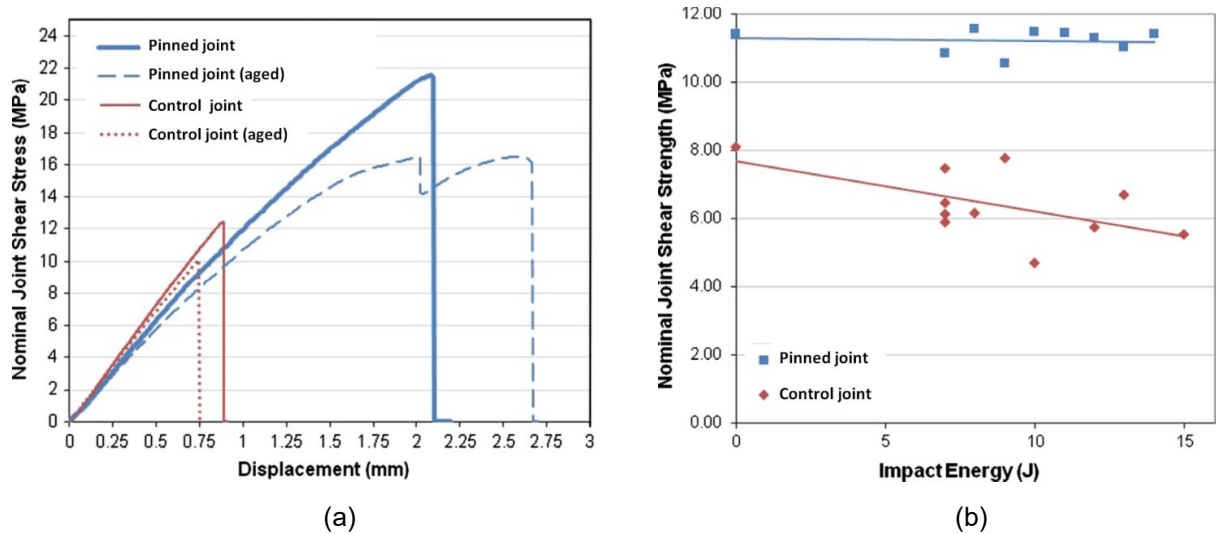


Figura 8 – (a) Efeito do desgaste natural comparando a resposta a tração entre juntas híbridas e juntas adesivas. (b) Comparação de juntas híbridas e adesivas na resistência ao impacto. (GRAHAM, D.P.; REZAI, A.; BAKER, D.; SMITH, P.A.; WATTS, J.F., (2014)

As propriedades mecânicas da junção dependem da interação entre estes pinos com a estrutura metálica e também com a estrutura do compósito. Os principais parâmetros dos pinos que podem ser variados de modo a otimizar a resistência são: material, formato, dimensões e tratamento superficial. Verificar-se-á na próxima seção as diferentes geometrias possíveis para fabricação destes pinos.

2.4 Processo de produção da junta híbrida

Uma das formas mais econômicas utilizadas para deposição destas protuberâncias, aqui denominadas de pinos, em chapas metálicas é por meio de soldagem GMAW (do inglês *Gas Metal Arc Welding*), popularmente conhecido como MIG/MAG. A empresa austríaca “Fronius International GmbH” desenvolveu o processo MIG/MAG CMT (do inglês *Cold Metal Transfer*) o qual tem como características alternar ciclos de temperatura entre quente e frio, possibilitando fazer uniões muito mais precisas que as tradicionais soldagens MIG/MAG. Assim como no CMT, na versão CMT-PIN, responsável por criar os pinos de diferentes geometrias, o eletrodo tem a possibilidade de recuar devido ao uso de uma tocha especial (Figura 9). A Figura 10 ilustra resumidamente o processo de soldagem CMT.

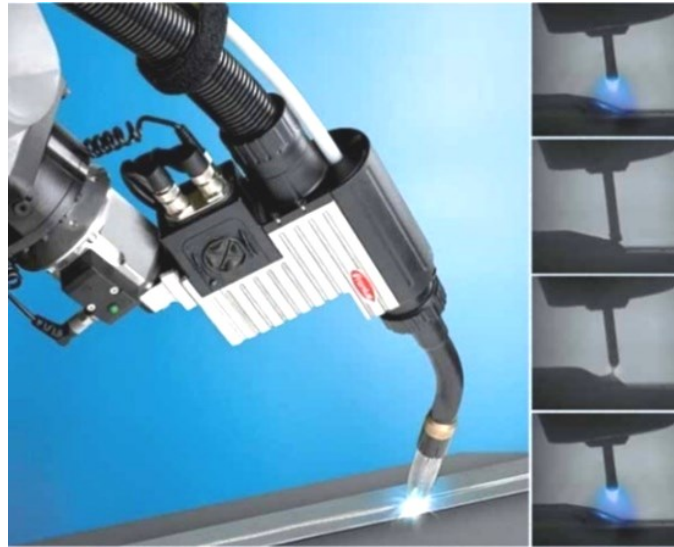


Figura 9 – Tocha especial do processo CMT ou CMT Pin que possibilita o recuo do arame. Fonte: Fronius International GmbH (2017)

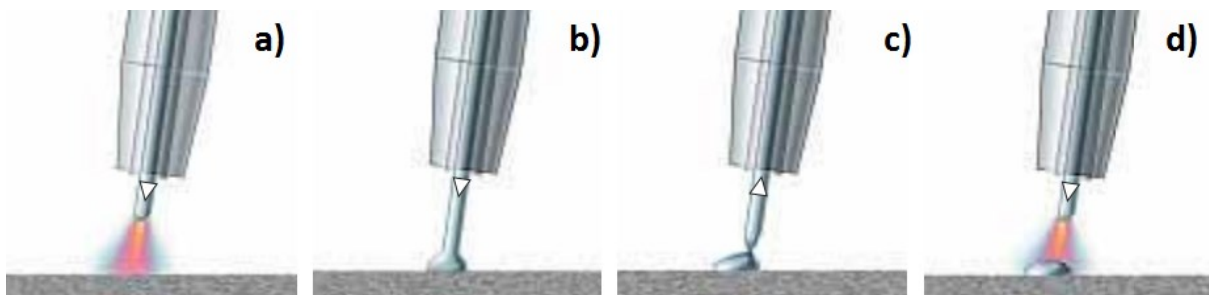


Figura 10 - Etapas do processo CMT. a) abertura de arco voltaico. b) arco voltaico apagado e curto circuito. c) reversão do movimento e deposição de material. d) recomeço do processo, já com material depositado. Fonte: Adaptado de Fronius International GMBH (2017).

O funcionamento do processo CMT Pin pode ser resumidamente descrito como a seguir. Inicialmente, o arame se aproxima da peça, onde corrente e tensão elétrica são mantidas baixas (Figura 11). A deposição acontece quando o material de aporte entra em contato com a peça gerando um aumento instantâneo da corrente e fusão do material (Figura 12). Tão logo ocorra o contato, a alimentação do arame é interrompida e o arco voltaico é apagado, a corrente também é reduzida, gerando solidificação na região de contato (Figura 13). A corrente então é elevada pelo software (Figura 14). Após este intervalo do momento “frio” há o movimento de retrocesso do arame, gerando uma pequena tensão mecânica que combinada com o aumento da corrente faz o arame se partir na altura desejada (Figura 15).

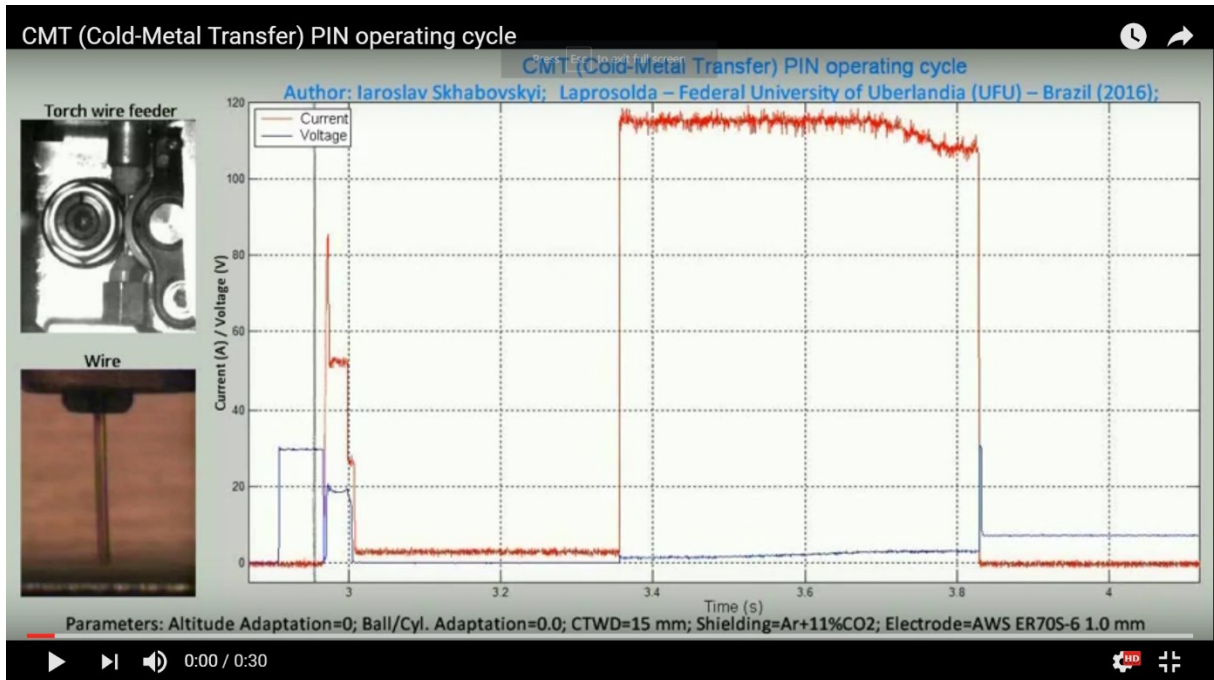


Figura 11 – Aproximação pelo arame da peça no CMT Pin. Fonte: Iaroslav Skhabovskiy (2016).

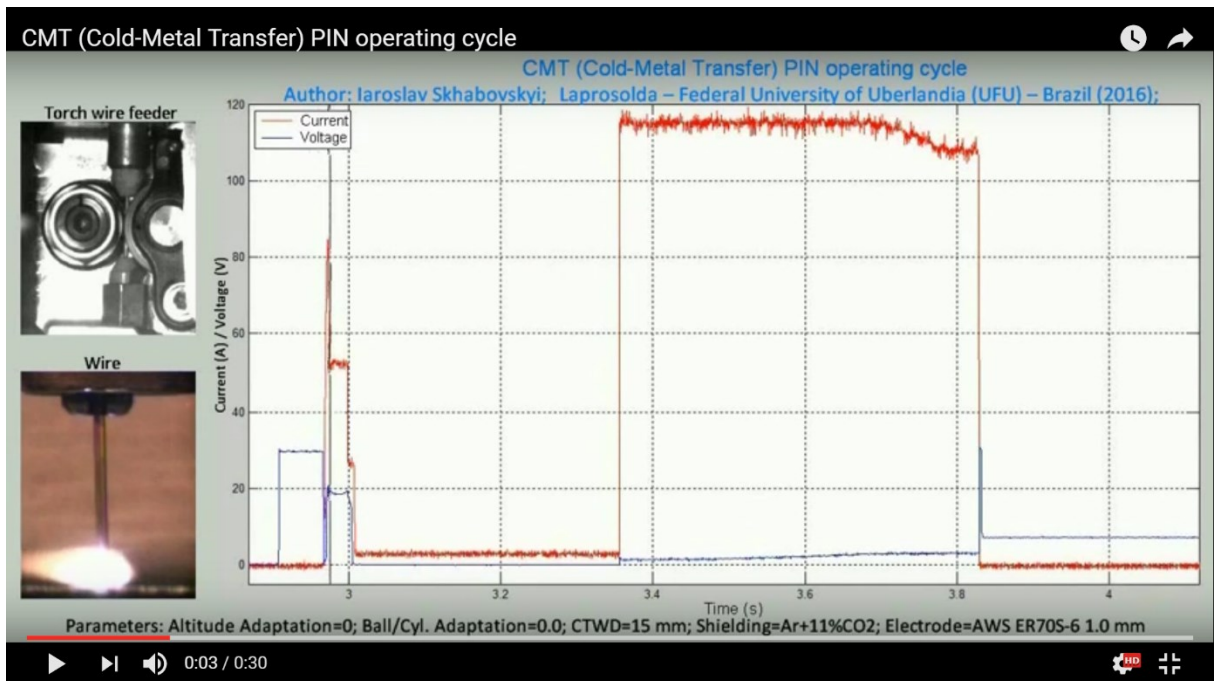


Figura 12 – Contato do arame com a peça e fusão do material no CMT Pin. Fonte: Iaroslav Skhabovskiy (2016).

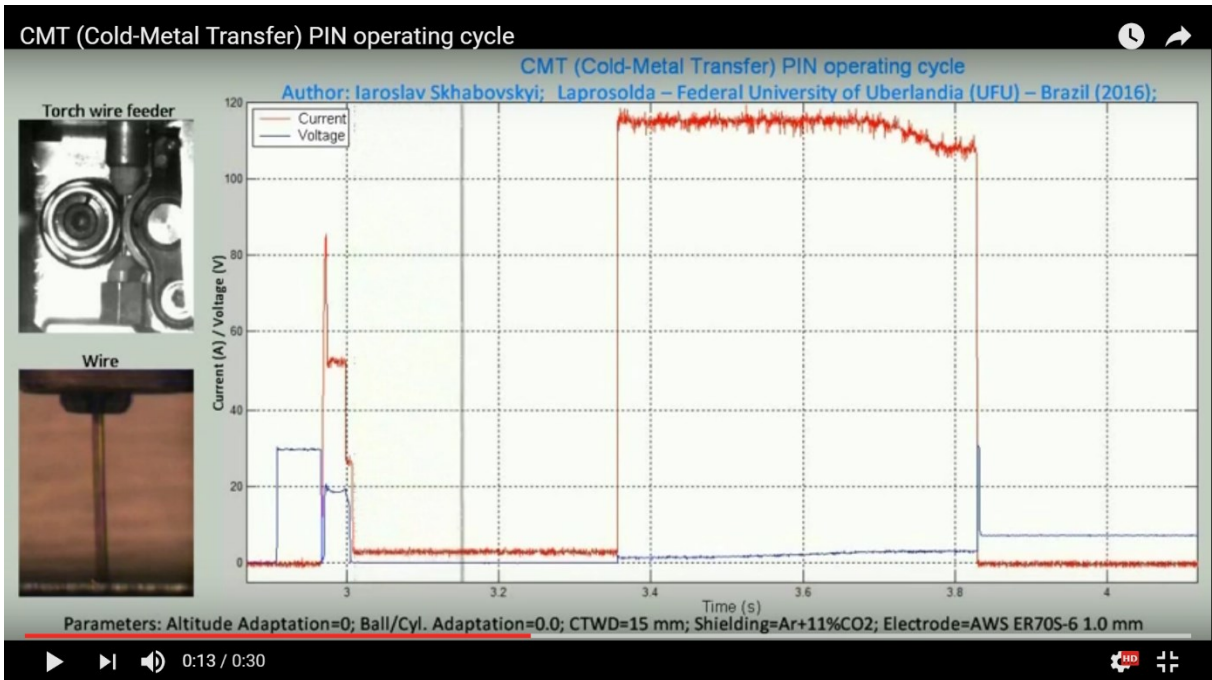


Figura 13 – Solidificação do material fundido devido à queda da corrente no CMT Pin. Fonte: Iaroslav Skhabovskiy (2016).

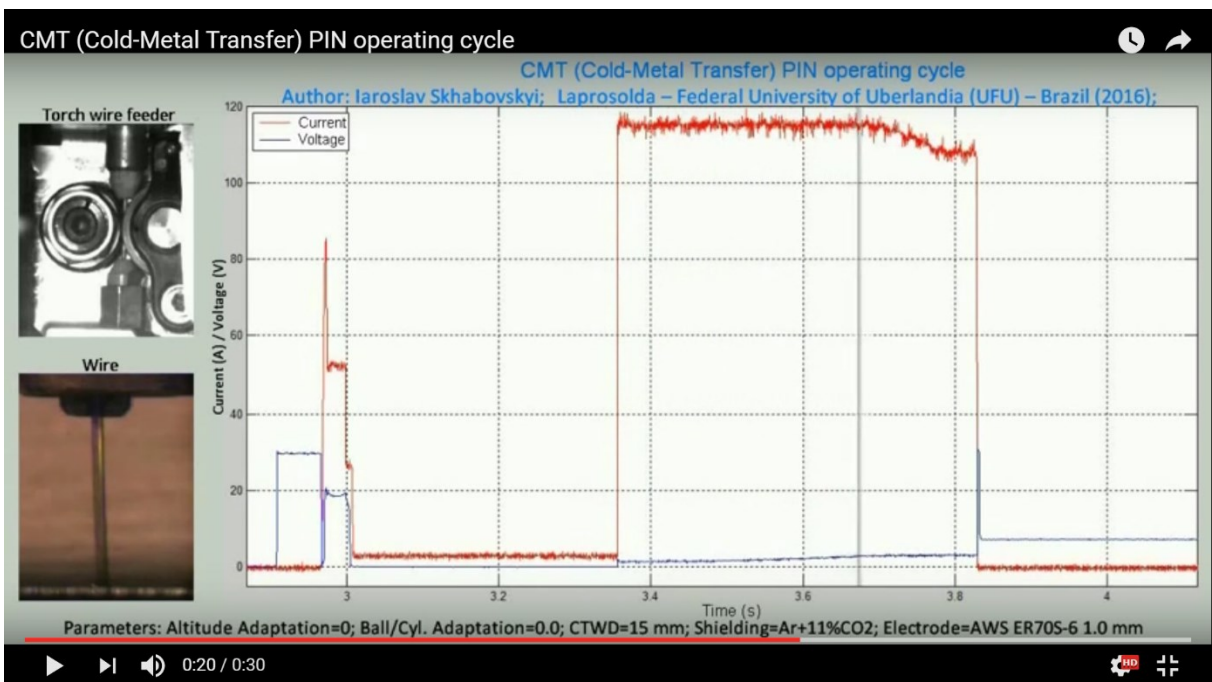


Figura 14 – Aumento da corrente e geração de tensão mecânica no arame no CMT Pin. Fonte: Iaroslav Skhabovskiy (2016).

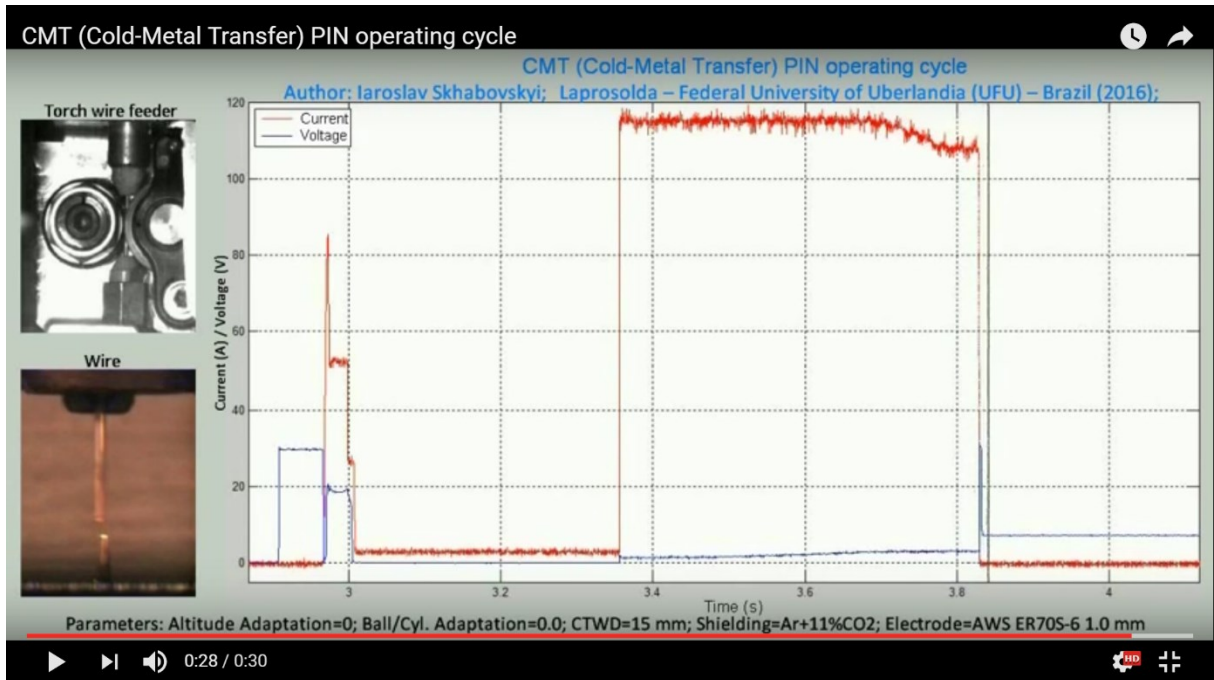


Figura 15 – Rompimento do arame pelo movimento de retrocesso e queda na corrente no CMT Pin.
Fonte: Iaroslav Skhabovskyi (2016).

Ressalta-se que para este presente trabalho foram obtidas imagens em alta velocidade (240 fps) do processo de soldagem, bem como feita aquisição de dados de corrente e tensão elétrica, como será apresentado na Seção 4.

As dimensões dos pinos obtidos pelo CMT Pin, bem como geometria de sua parte superior, são definidas com alterações nos valores de corrente, tensão elétrica e velocidade do movimento do arame. A Figura 16 representa as quatro principais possibilidades geométricas dos pinos produzidos.

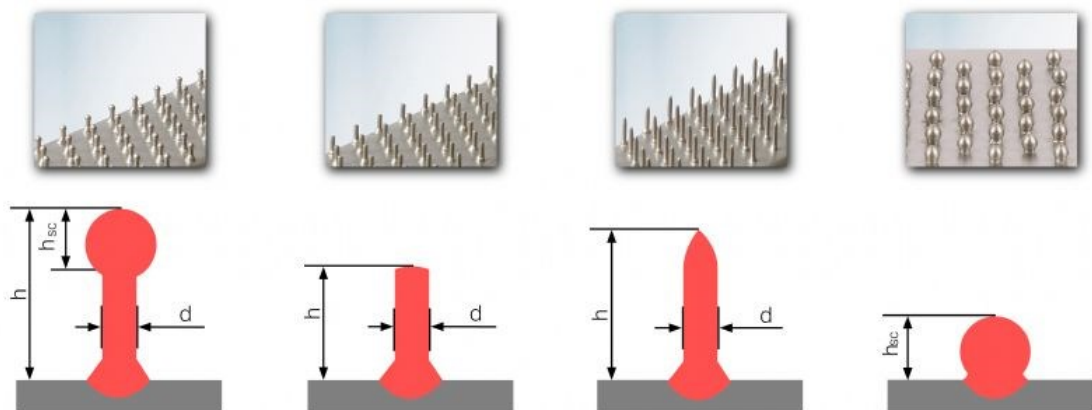


Figura 16 - Diferentes formatos e dimensões possíveis de serem realizados pelo método de soldagem CMT Pin. Fonte: Fronius CMT (2016).

Os dois dispositivos essenciais responsáveis pelo funcionamento do CMT e CMT Pin são mostrados na Figura 17. O sistema de tração e retração do arame na tocha (Figura 17a) faz o avanço e recuo do arame-eletrodo junto ao arco-poça. Já *buffer* de arame (Figura 17b) isola o acionamento dianteiro (feito pela tocha) do acionamento traseiro (feito pelo alimentador) do arame, isentando a alimentação de material de potenciais problemas e possibilitando o retrocesso preciso do arame.

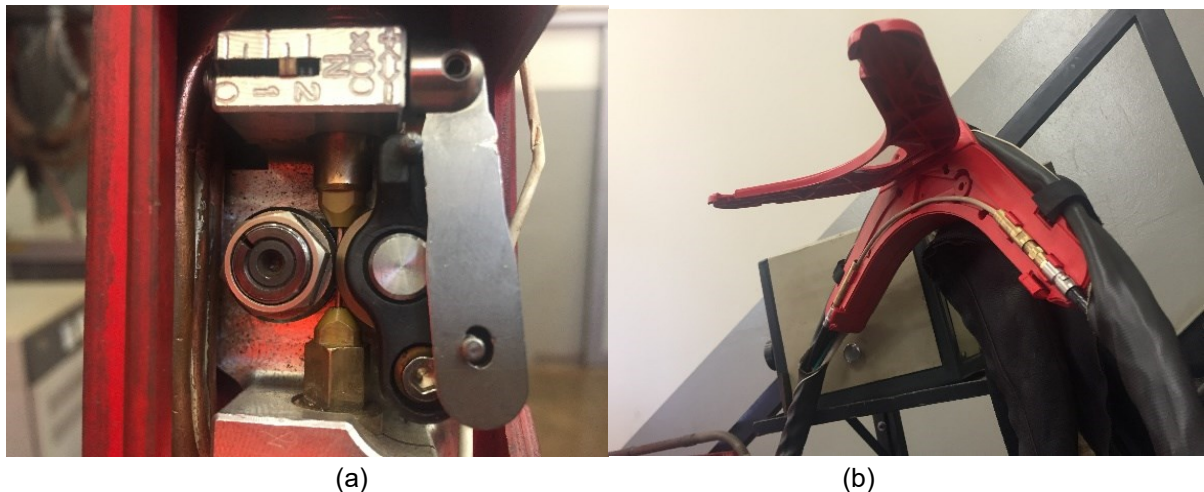


Figura 17 – À esquerda: dispositivo de avanço e recuo de arame na tocha CMT Pin. À direita: buffer de arame que permite sua reversão. Fonte: Autoria própria.

De modo geral, a Figura 18 esquematiza todos os componentes para soldagem por CMT. O robô MOTOMAN HP20 pode levar a tocha de soldagem com precisão ao longo da peça, resultando em pinos espaçados dentro das tolerâncias especificadas e com precisão.

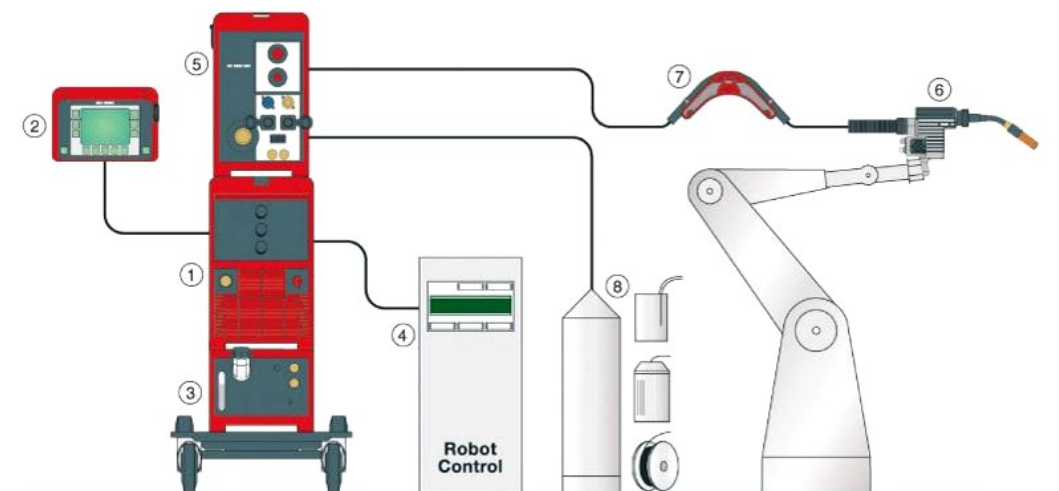


Figura 18 – Ilustração do equipamento para soldagem CMT e CMT Pin: (1) Fonte de energia; (2) Painel de controle; (3) Rack; (4) Controlador do robô; (5) Alimentação do arame-eletrodo; (6) Tocha especial com reversão do arame-eletrodo; (7) “Pulmão” (*buffer*) que permite a reversão do arame; (8) Depósito de arame. Fonte: Fronius International GmbH (2016)

3 METODOLOGIA

A fim de cumprir o objetivo proposto neste trabalho, utilizou-se a metodologia de produção e ensaio dos corpos de prova (CP's) segundo o diagrama da Figura 19. Mais detalhes sobre as etapas estão nas próximas Subseções deste capítulo.

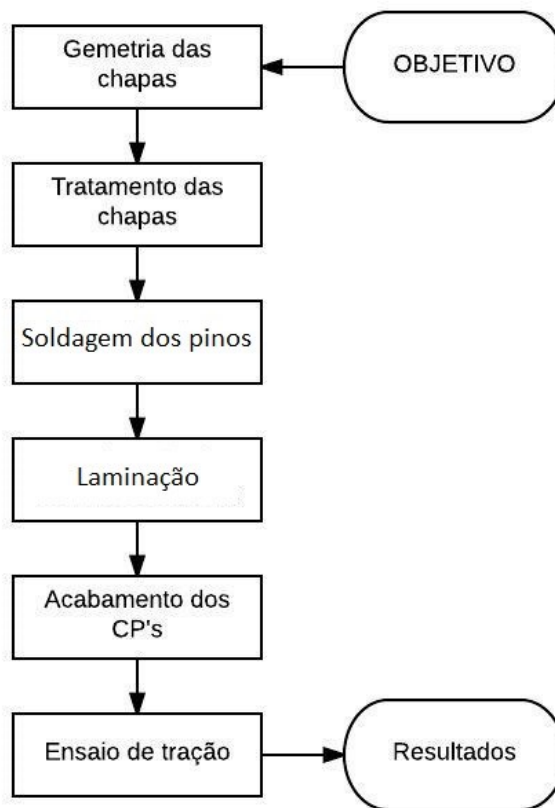


Figura 19 - Diagrama da metodologia. Fonte: autoria própria.

3.1 Geometria e massa das chapas

O material utilizado foi o Aço carbono 1020, largamente utilizado na indústria devido ao seu custo benefício e por apresentar ótima soldabilidade. Valer ressaltar que apesar de não ser um material de construção aeronáutica, o mesmo foi escolhido como prova de conceito. Assim, o papel dos pinos em juntas híbridas pode ser estudado com um material de baixo custo e depois no futuro os resultados estendidos

a materiais mais nobres e tipicamente utilizados em aeronaves. A Figura 20 mostra as principais características do aço 1020 em comparação com outros metais.

Tipo de aço	Teor de Carbono (%)	Limite de elasticidade $f_{el} (GPa)$	Limite de escoamento $f_y (MPa)$	Limite de resistência à tração $f_u (MPa)$	Alongamento (%)
ASTM-A-36	0,25 a 0,30	200	250	400 a 500	20
Comercial	–	± 190	± 240	370 a 520	20
ASTM-A570	0,25	185	230	360	23
SAE 1008	0,08	135	170	305	30
SAE 1010	0,10	145	180	325	28
SAE 1020	0,20	170	210	380	25
SAE 1045	0,45	250	310	560	17
ASTM-A242	< 0,22	250	290 a 350	435 a 480	18
ASTM-A441	–	220 a 275	275 a 345	415 a 485	± 18
ASTM-A572	–	220 a 275	290 a 345	415 a 450	± 18
ASTM-A588	–	230 a 280	290 a 350	415 a 450	± 18
COR-TEN A/B	–	275	345	480	± 19
COR-TEN C	–	330	415	550	± 19
ABNT MR250	–	200	250	400	
ABNT MR290	–	230	290	415	
ABNT MR345	–	275	345	450	

Figura 20 – Propriedades do aço 1020 em comparação com outros metais. Fonte: eBah,(2016)

Devido à disponibilidade de várias chapas de aço 1020 no laboratório de soldagem da UFU, utilizaram-se as dimensões pré-estabelecidas mostradas na Figura 21. É importante salientar que, conforme planejamento da construção dos CP's, cada chapa poderia resultar em dois CP's, agilizando o processo de laminação e evitando desperdício de material. Como indicado Figura 21, cada chapa em questão possui comprimento de 250 mm, largura de 60 mm e 1.5 mm de espessura.

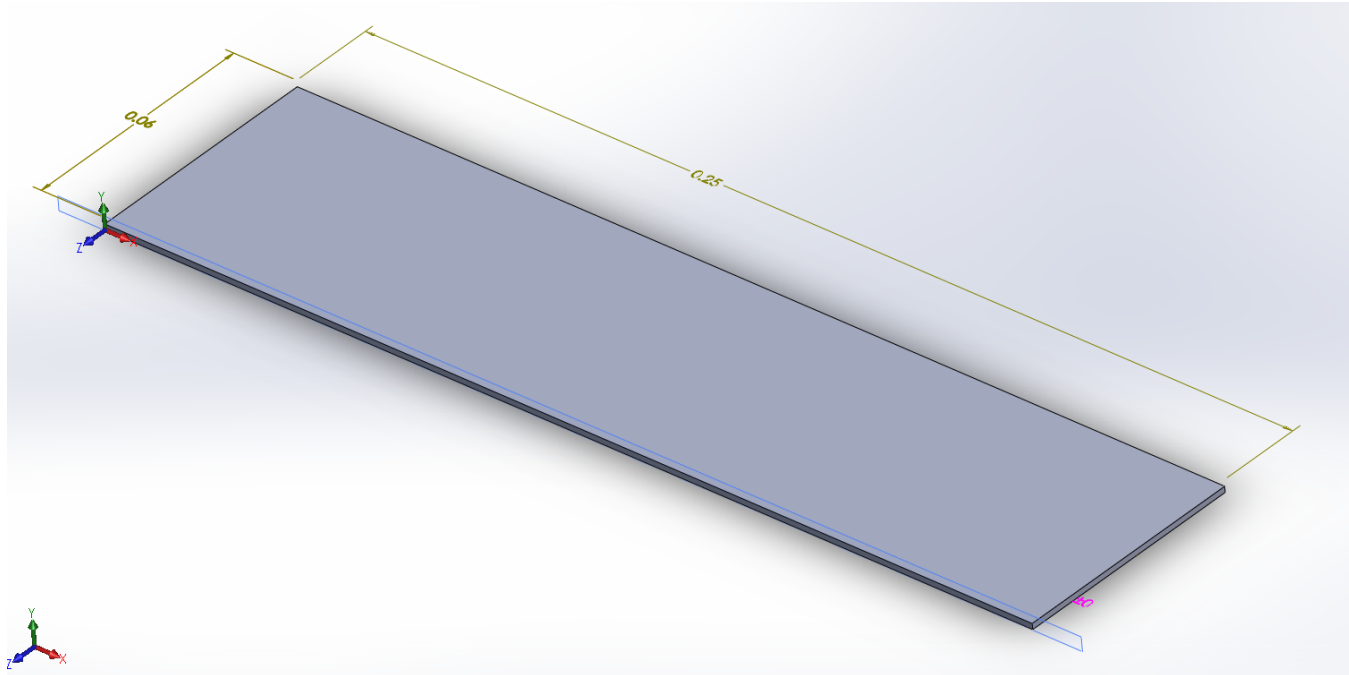


Figura 21 - Dimensões da chapa de aço 1020 para CP's.

Mediu-se a massa de todas as chapas utilizadas antes e depois da soldagem dos pinos para que fosse possível determinar o acréscimo de peso devido à presença dos mesmos. Assim, pôde-se relacionar os possíveis ganhos de propriedades mecânicas da junta com o incremento de massa do componente e verificar se a abordagem híbrida não penaliza o peso das estruturas mesmo diante de possíveis ganhos de resistência na união meta-compósito. A medição de massa consistiu em zerar a tara da balança e colocar as chapas delicadamente em seu prato, aguardar os números se estabilizarem e anotá-los, repetindo o processo para todas as chapas. A balança de precisão utilizada (Figura 22) é da marca SHIMADZU modelo UX6200H, com resolução de 0,01 *gramas* e capacidade máxima de 6200 grâmas.



Figura 22 – Balança utilizada para medição de massa de todas as chapas. Fonte: autoria própria.

As chapas foram medidas em seu tamanho original, conforme ilustra a Figura 21, antes do processo de soldagem dos pinos. Conforme será visto com mais detalhes no capítulo 4, estas passaram então pelo processo de soldagem dos pinos em suas extremidades, sendo sua massa também medida logo após esta etapa.

3.2 Tratamento das chapas

Inicialmente, previa-se fazer a comparação entre as chapas com e sem tratamento superficial. Após o processo de soldagem, identificou-se que as chapas sem tratamento não tinham aderência dos pinos, sendo estes facilmente removidos com pouco esforço. Decidiu-se, então, que todas as chapas passariam por tratamento superficial a fim de aumentar a resistência ao cisalhamento entre os pinos e a chapa.

O processo de tratamento escolhido foi feito manualmente por meio de lixadeira rotativa realizando movimentos repetitivos, buscando obter o mesmo tratamento ao longo de toda a extensão das chapas onde os pinos seriam depositados. O disco de lixa utilizado foi o SMT 619 Extra, com granulação 40, representado na Figura 23. A Figura 24 mostra em detalhe uma das chapas após o processo de tratamento superficial através de lixadeira.



Figura 23 - Disco de lixa utilizado e tratamento superficial sendo realizado em uma chapa de aço 1020. Fonte: autoria própria.



Figura 24 - Detalhe da chapa de aço 1020 após processo de tratamento superficial. Os traços em azul foram feitos para referência da programação geométrica do robô. Fonte: autoria própria.

3.3 Soldagem dos pinos

Após receber o tratamento superficial, as chapas de aço foram submetidas ao processo de soldagem dos pinos. O processo utilizado foi MIG/MAG CMT PIN, o qual realiza a soldagem por arco elétrico utilizando gás de proteção entre o consumível (neste caso um arame de aço inoxidável ER70S-6 com diâmetro de 1 mm) e a peça que receberá a adição de material. O gás utilizado (Figura 25a) foi uma mistura de Argônio (96,4%) e Dióxido de Carbono (3,6%) a uma vazão de 8,9 L/min. Para a deposição dos pinos, foram utilizados uma fonte FRONIUS TPS50000CMT e um robô para soldagem MOTOMAN HP20 (Figura 25b). A distância entre o bico de contato da tocha de soldagem e a peça foi de 6 mm. A “Atitude Adaption”, parâmetro do CMT Pin que permite regulagem da altura do pino, foi programada em -30 para obter pinos curtos. Já o “Ball/Cyl. Adaption”, parâmetro do CMT Pin que permite regulagem da forma da extremidade superior do pino entre abaulada e cilíndrica, foi ajustada em +1,0 para obter uma ponta abaulada.

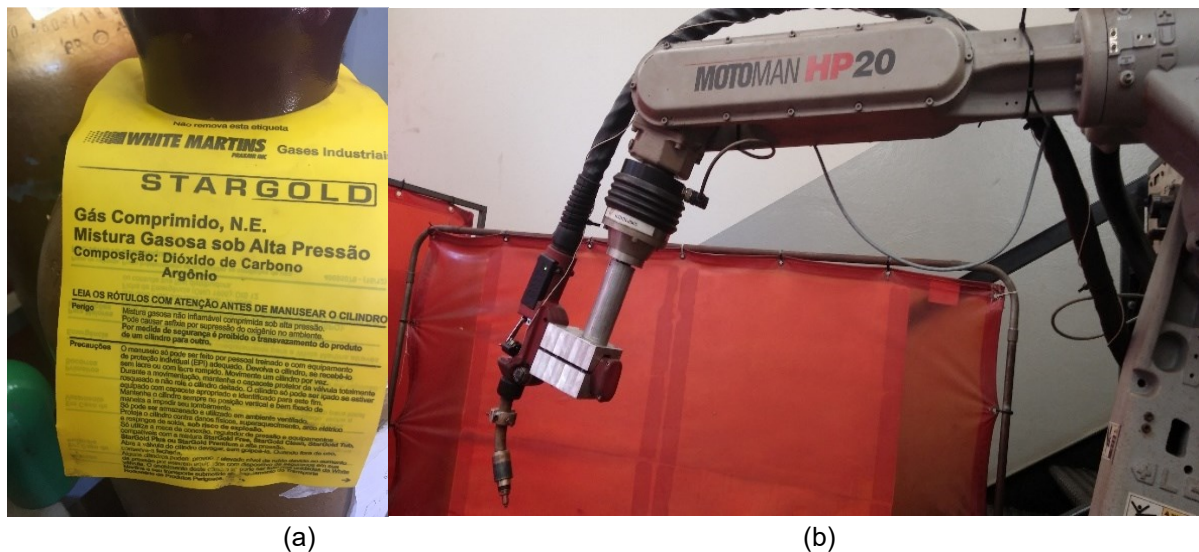


Figura 25 – (a) Gás utilizado no processo de soldagem CMT Pin; (b) tocha e robô utilizados no processo de soldagem. Fonte: autoria própria.

Dependendo dos valores de corrente e velocidade de retrocesso do arame, o formato da extremidade superior do pino é ajustado, bem como suas dimensões. Conforme Figura 16, para este trabalho, utilizou-se pinos com altura (h) de 3 mm,

extremidade superior no formato abaulado com diâmetro (hsc) de 1 mm e ângulo de 90° com relação à chapa (perpendicular).

Para a análise completa proposta, necessitou-se de duas configurações de espaçamento entre os pinos. Ambas estão mostradas na Figura 26, com medidas em milímetros.

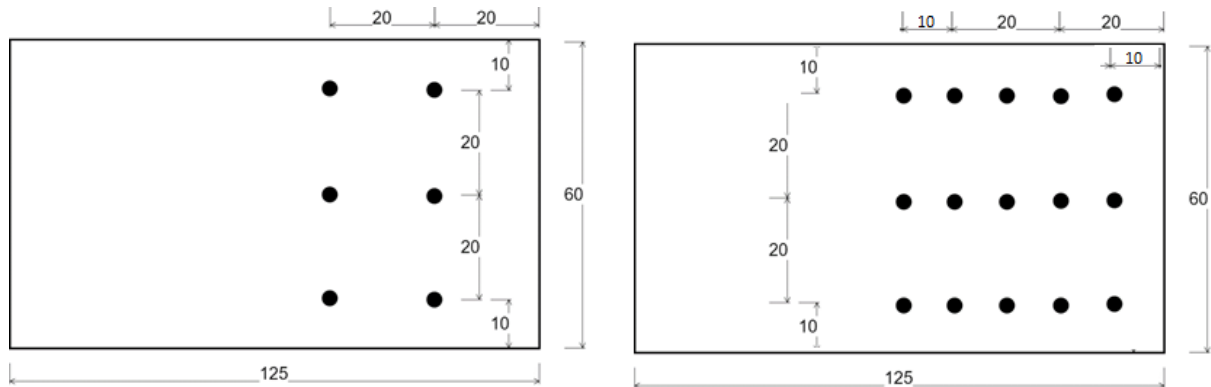


Figura 26 – Esquema de distribuição dos pinos. À esquerda a chapa com 6 pinos e à direita contendo 15 pinos (dimensões em mm).

A fim de comparar o processo de deposição dos pinos com a literatura, foram obtidas imagens do processo de soldagem por meio de uma câmera da marca GoPro modelo Hero3, posicionada a aproximadamente quarenta cm do arame e a uma altura de aproximadamente vinte centímetros da chapa através de um suporte da própria câmera adaptado no robô. As imagens foram capturadas através de um vídeo de alta velocidade (240 *fps*) e quadros (imagens) de momentos específicos extraídos depois. A Figura 27 mostra uma ilustração esquemática da montagem da câmera.

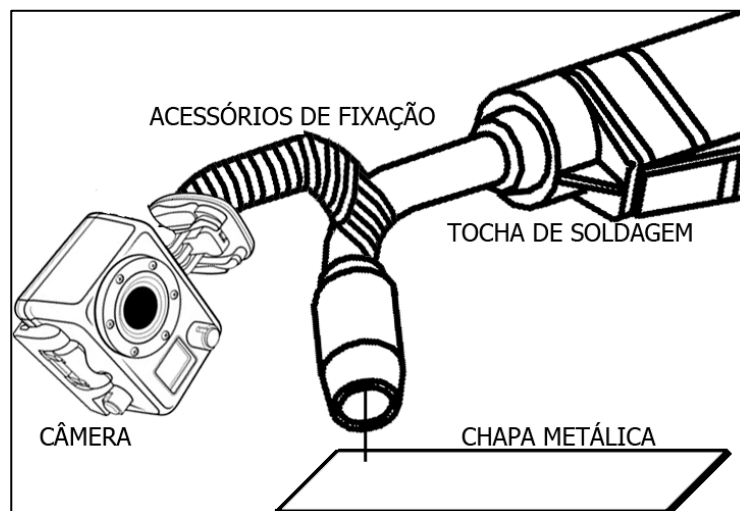


Figura 27 – Esquema utilizado para montagem da câmera e captura de imagens do processo de soldagem. Fonte: Lucas Cario (2017).

Após todas as configurações especificadas anteriormente, bem como coordenadas para a soldagem serem programadas no robô, o processo foi feito conforme mostra a Figura 28a. A Figura 28b mostra a deposição dos pinos, neste caso com a quantidade de 15 pinos. Para maior detalhamento, a Figura 29 mostra com mais proximidade o formato dos pinos em uma chapa com seis deposições. Aquisições de corrente e tensão elétricas foram feitas e serão apresentadas na seção 4.

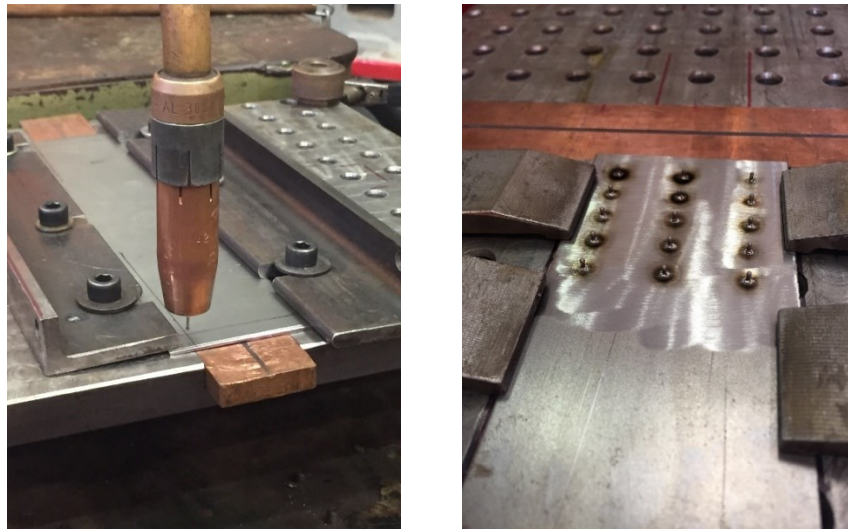


Figura 28 – À esquerda: Tocha de soldagem iniciando o processo de soldagem. À direita: processo finalizado com deposição de quinze pinos espaçados igualmente entre si. Fonte: Autoria própria.

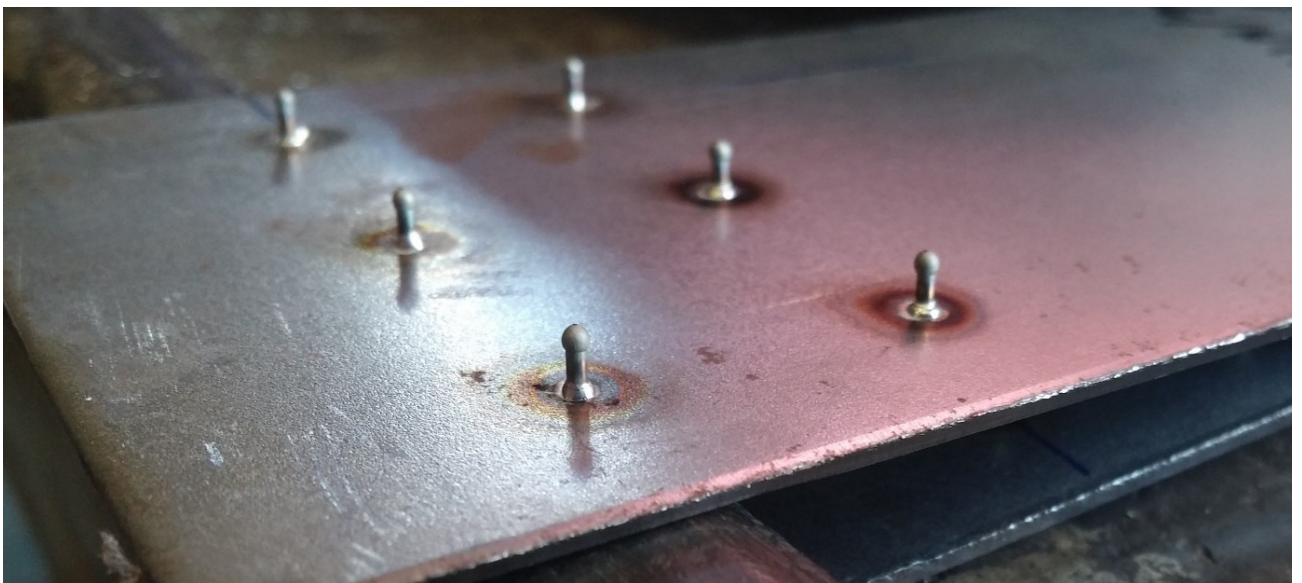


Figura 29 – Chapa com deposição de 6 pinos finalizada. Fonte: Lucas Carnio (2017).

Tendo sido depositados, mediu-se a altura e diâmetro da esfera individual de cada pino para verificação das tolerâncias obtidas utilizando paquímetro MITUTOYO com faixa de medição de até 150 *mm* e resolução 0,02 *mm* e micrômetro MITUTOYO com faixa de medição de até 25 *mm* e com resolução de 0,001 *mm*. Nesta etapa também foi feita a remedição da massa das chapas, conforme descrito na Seção 3.1, obtendo-se o incremento de massa devido à introdução dos pinos.

3.4 Laminação do material compósito

O próximo passo após a soldagem dos pinos foi a laminação do compósito. O processo de laminação foi feito manualmente utilizando resina de poliéster insaturada da marca “Max Rubber” para laminação (monômero de estireno com concentração de 30 a 40%) juntamente com um catalisador (aproximadamente 10 gotas do catalisador para cada 100 gramas da resina). Em função do baixo custo e disponibilidade, o material de reforço escolhido foi a fibra de vidro do tipo E com densidade de 200 g/m² e trama do tipo “plain weave”. O tipo de junta utilizado entre o material compósito e material metálico foi a “single lap” (ver Figura 6).

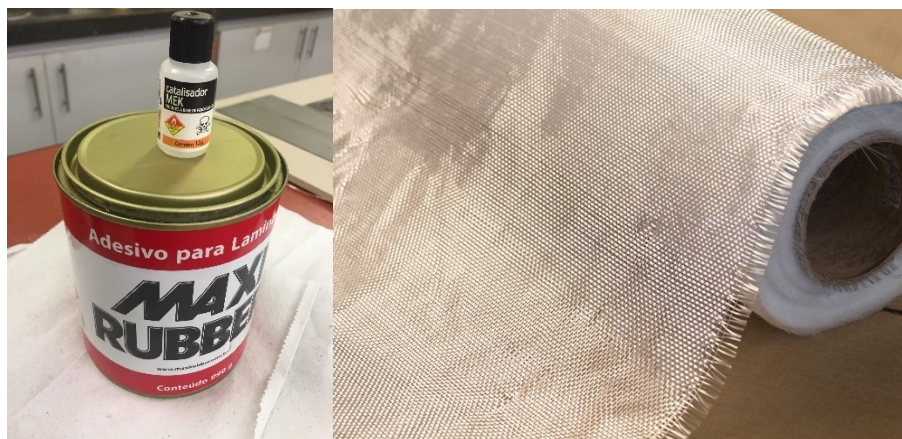


Figura 30 – À esquerda: resina e catalisador utilizados na laminação do compósito. À direita: manta de fibra de vidro utilizada. Fonte: autoria própria.

A fim de otimizar o processo de laminação, bem como evitar desperdício de material, seis chapas foram posicionadas paralelamente sobre uma placa de cerâmica lisa (porcelanato) revestida com desmoldante (cera de carnaúba) para facilitar a remoção após a cura da resina. Outras chapas de aço 1020 de mesma espessura foram utilizadas como apoio para o compósito a fim de nivelar a altura e obter um

formato de “single lap” para os CP’s. Estas chapas inferiores foram revestidas com o mesmo desmoldante, permitindo que fossem removidas após a cura da resina. A Figura 31 esquematiza a montagem para laminação do compósito.



Figura 31 – Chapas posicionadas e prontas para a laminação. Fonte: Lucas Carnio (2017)

A laminação foi feita manualmente com nove camadas da manta de fibra de vidro intercaladas com a mistura da resina com catalisador. Este número foi obtido após notar visualmente que a espessura das camadas tinha atingido o topo das estruturas de pinos, encobrindo-os totalmente. Visando uniformizar a distribuição da resina, bem como evitar a formação de bolhas entre as camadas, foi utilizado um rolo com espuma poliéster (Figura 32), que também auxiliou para que os pinos penetrassem totalmente entre as fibras da manta. Também é importante salientar que apenas uma pessoa ficou responsável por utilizar o rolo de poliéster para que uma tentativa de padrão fosse estabelecida entre os CP's. Outra pessoa ficou responsável por aplicar a mistura de resina e catalisador, padronizando também, teoricamente, a quantidade utilizada entre as camadas da fibra.



Figura 32 – Rolo de poliéster auxiliando na distribuição da resina e envolvimento das fibras em torno dos pinos. Fonte: autoria própria.

Após atingir o número de camadas necessárias para cobrir os pinos (Figura 33), o compósito passou por 24 horas em cura, que ocorreu de maneira natural (sem autoclave e aplicação de vácuo) devido a limitações dos recursos disponíveis. Após este tempo, as chapas então foram desmoldadas e marcadas para corte e acabamento, conforme demonstra a Figura 34.

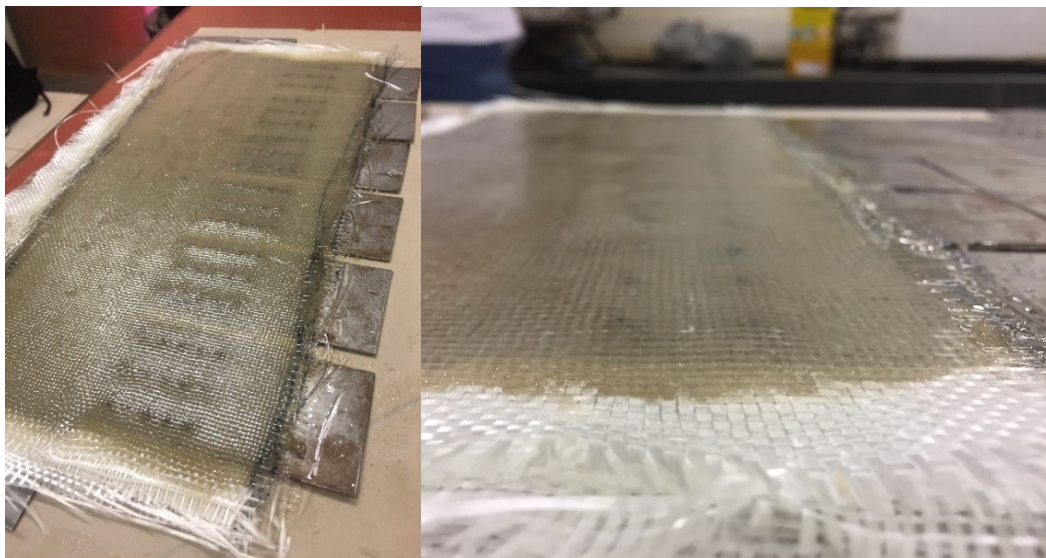


Figura 33 – Compósito após finalização da laminação e início do processo de cura natural. Fonte: autoria própria.

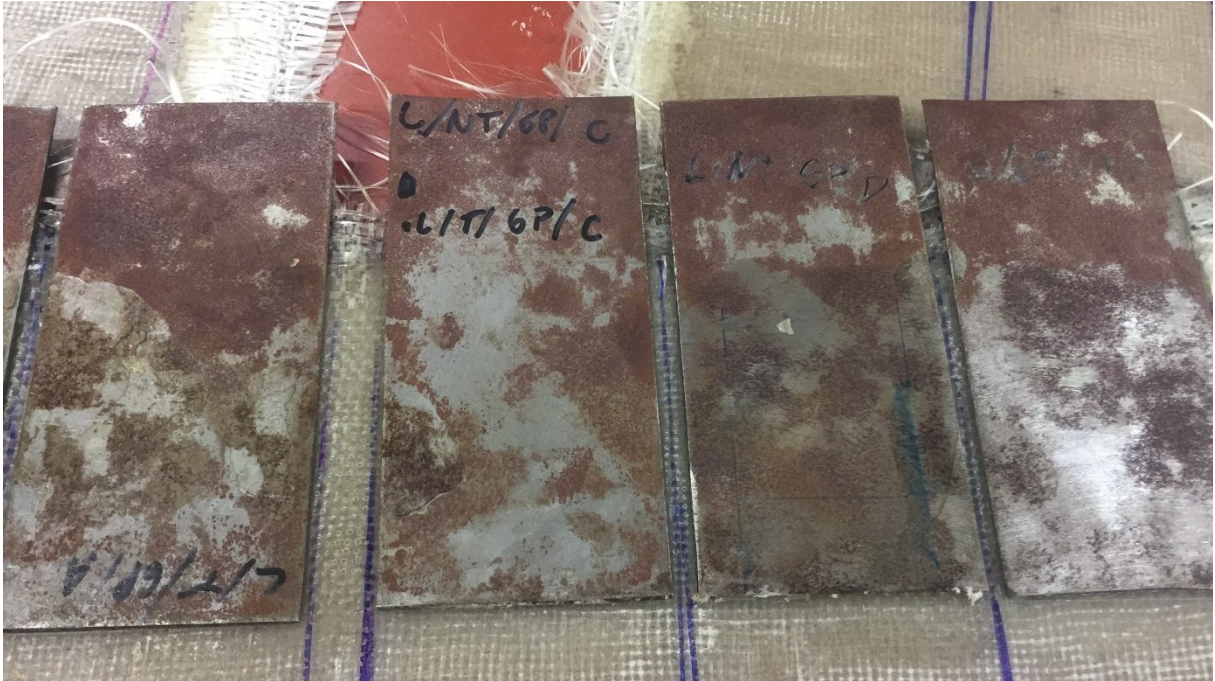


Figura 34 – CP's de união híbrida avançada desmoldadas e marcadas para corte. Fonte: autoria própria.

3.5 Acabamento dos CP's

Como a laminação dos CP's foi feita em série, isto é, seis CP's foram laminados por vez, foi necessária a separação e acabamentos destes. Assim, o compósito foi cortado utilizando uma máquina de corte com serra de fita do LSM (UFU), conforme mostra a Figura 35.



Figura 35 – Separação dos CP's utilizando serra de fita. Fonte: autoria própria.

Realizados os cortes, os CP's passaram por acabamento lateral manual para que ficassem alinhados e tivessem a mesma largura das chapas de aço. Para isso foi utilizada uma lixa de desbaste de metais (marca Carborundum, modelo PANO METAL CAR41 e granulação A40), Figura 36a, e uma lixa d'água (Marca 3M, modelo 231Q e granulação P80), Figura 36b.

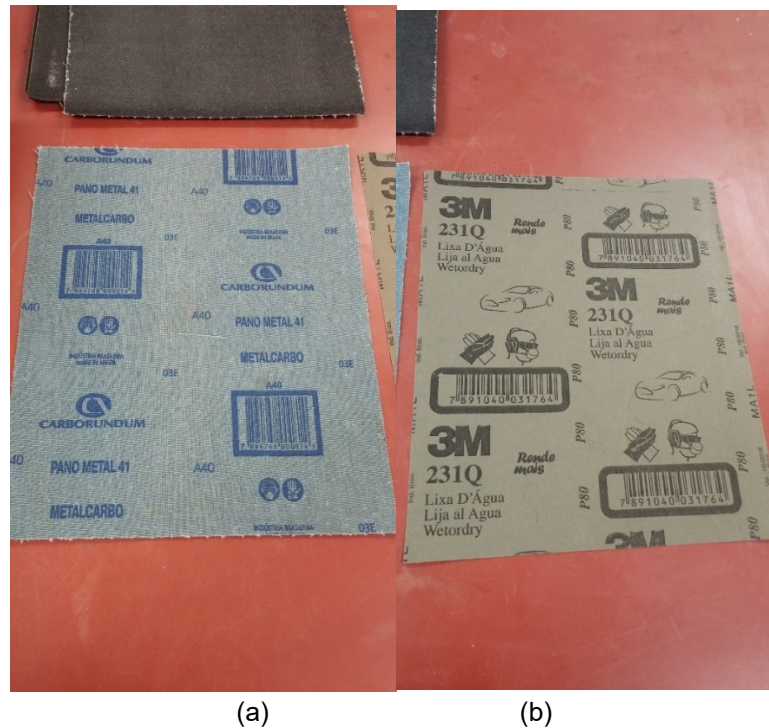


Figura 36 – (a) Lixa de desbaste; (b) lixa d'água para acabamento dos CP's. Fonte: autoria própria.

Após passarem pelo processo de lixamento, os CP's ficaram com a mesma largura do metal e prontos para o teste de tração. A Figura 37 mostra a vista superior dos corpos de prova cortados e lixados. Já a Figura 38 mostra detalhes laterais após o processo de acabamento, evidenciando a união entre compósito e metal.

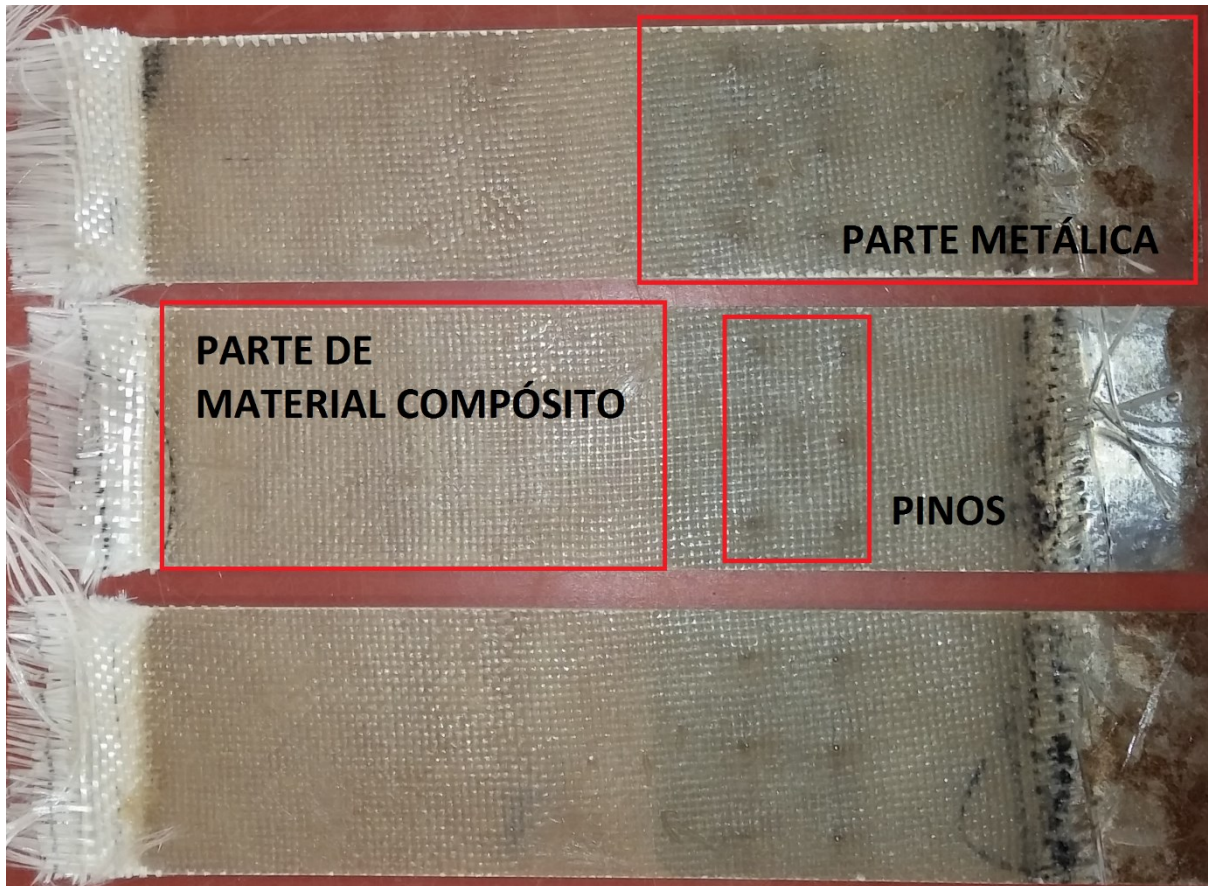


Figura 37 – Vista superior detalhando três CP's prontos para o teste de tração. Fonte: Lucas Carnio (2017).

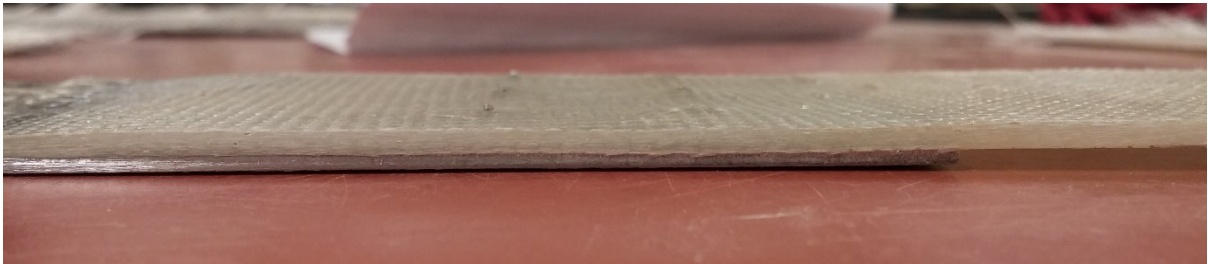


Figura 38 – Detalhe da vista lateral da união híbrida avançada após receber processo de lixa. Fonte: autoria própria.

3.6 Testes de tração

Para os testes de tração dos CP's com união metal-compósito utilizou-se uma máquina de ensaios mecânicos MTS Landmark® Servohydraulic do laboratório LMEst (UFU), conforme mostra a Figura 39. A Figura 40 apresenta um dos CP's preso às garras hidráulicas do equipamento, sendo a parte superior prendendo a parte metálica e a inferior prendendo a parte do compósito laminado. Dos quatro CP's disponíveis, foram ensaiados três de cada tipo, sendo o quarto reservado para possíveis cortes e

análises em microscopia eletrônica, ou para futura repetição do ensaio de tração caso necessário.

No ensaio, a parte de contato dos CP's com as garras hidráulicas da máquina foram revestidas com lixa d'água de granulação P80 (marca 3M e modelo 231Q) voltadas para os CP's, para evitar o escorregamento. A velocidade de ensaio definida foi de $2\text{ mm}/\text{minuto}$ e os testes foram realizados até que se atingisse a ruptura total da junta (decaimento da curva tensão versus deformação) ou até que não houvesse mais travamento entre os pinos e material compósito. Ao final de todos os testes, foram gerados arquivos no formato *txt* contendo informações de tempo (s) e carga aplicada (kN) durante o ensaio.



Figura 39 - Máquina utilizada no ensaio de tração. Fonte: MTS (2016).



Figura 40 - Vista global do CP preso às garras hidráulicas da máquina de tração. Fonte: autoria própria.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Processo de soldagem CMT-Pin

Utilizando o equipamento e método descritos na seção 2.4, foram fabricados um total de 12 corpos de prova, sendo que quatro destes não passaram pelo processo de soldagem dos pinos, por se tratar de CP's para teste puramente de juntas adesivadas. Assim, os testes foram divididos por grupos, como descrito abaixo:

1. 4 CP's sem pinos;
2. 4 CP's com 6 pinos;
3. 4 CP's com 15 pinos;

A Figura 41 mostra, da esquerda superior para a direita inferior, imagens da sequência do processo de soldagem CMT-Pin capturadas pela filmagem de alta velocidade (ver seção 2.4).

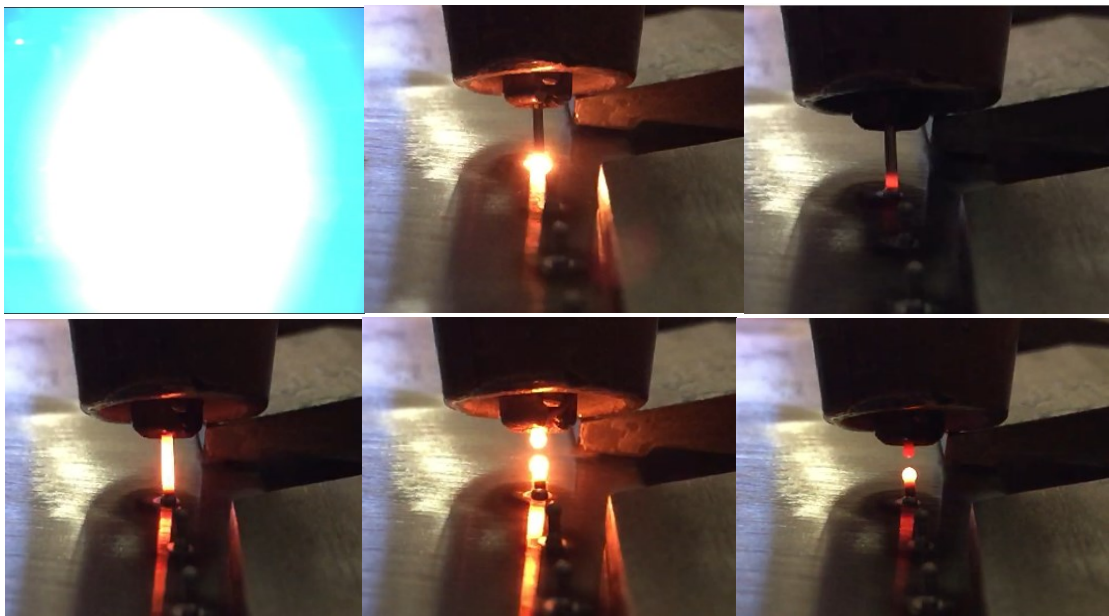


Figura 41 – Sequência de deposição de pino por soldagem CMT Pin. Fonte: autoria própria.

Para comprovar o embasamento teórico deste processo, também foram adquiridos dados de tensão e corrente elétrica durante todo o processo de soldagem. Destes dados selecionou-se aleatoriamente um ciclo desde a aproximação do arame na peça até o rompimento do mesmo para formação do pino.

A Figura 42 mostra o gráfico de um ciclo de solda CMT-Pin, com imagens dos respectivos quadros retirados da filmagem, a fim de ilustrar as principais fases da soldagem de um pino. A primeira imagem no tempo inicial mostra o contato do arame com a peça, onde nota-se uma elevação abrupta da corrente devido ao contato entre arame e peça. Em seguida, o gráfico mostra a queda da corrente, sendo possível ver, na segunda imagem o metal em contato com a peça perdendo energia térmica e se solidificando. Posteriormente, a corrente é elevada, o que causa aumento da temperatura do arame por efeito Joule, conforme pode ser visto pela incandescência deste na terceira imagem. A corrente permanece alta até o rompimento do arame em uma posição pré-determinada conforme nota-se na última imagem. O ciclo se repete para os outros pinos. É importante notar que os resultados, tanto gráficos quanto em termos de imagens, se assemelham muito aos referenciados na Seção 2.4, comprovando a eficácia do processo.

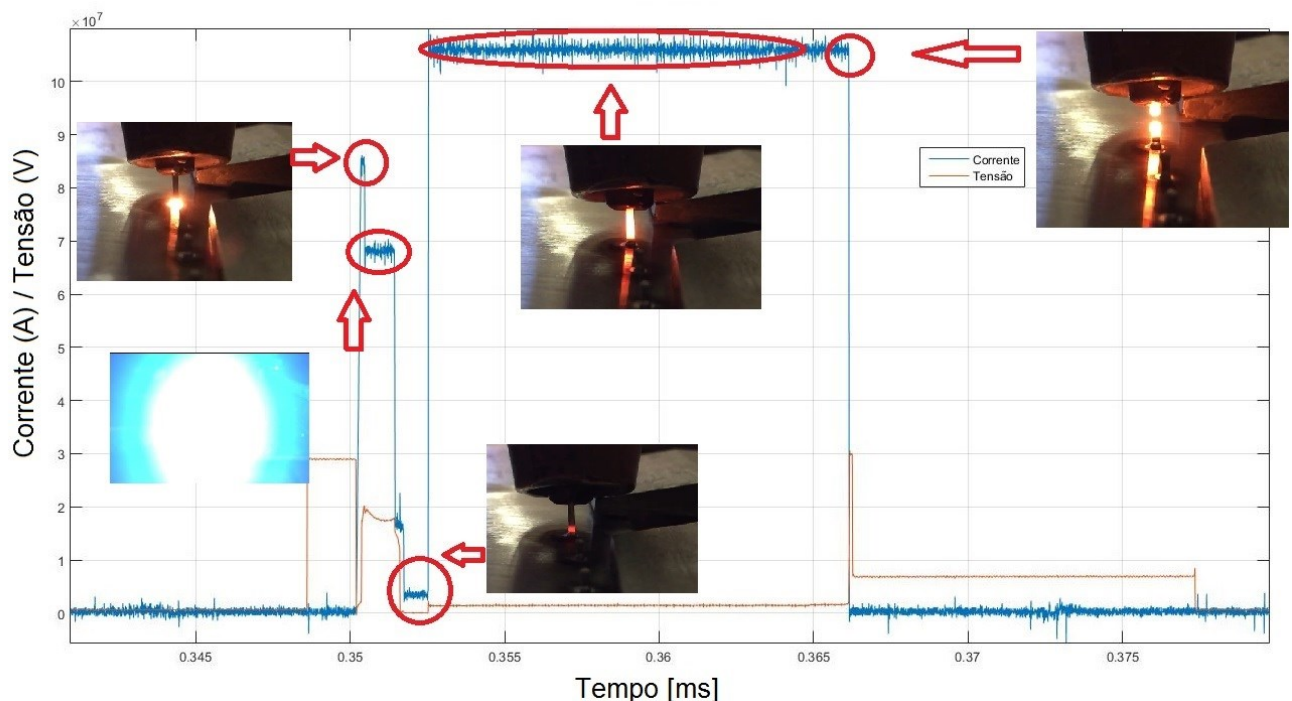


Figura 42 – Gráfico evidenciando as diferentes fases e valores de tensão e corrente para um processo de solda utilizando método CMT-Pin. Fonte: autoria própria.

Conforme descrito na Seção 3.2, mediu-se a altura vertical e diâmetro da ponta dos pinos para fins de verificação de repetitividade. A Tabela 1 resume as medições, as quais apresentam valores de média próximo ao planejado e com desvio padrão baixo. Na Figura 43, os resultados são mostrados de forma gráfica, apresentando a

média e desvio padrão para cada CP. Observa-se que houve pouca variação, podendo ser desconsiderada pelos valores de desvio padrão, portanto não houve contaminação dos resultados do ponto de vista das variações de diâmetro e altura.

Tabela 1 - Resultados de medições da altura e diâmetros da ponta de cada pino.

DIÂMETRO DA ESFERA SUPERIOR DO PINO																	
	[mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	MÉDIA
6 PINOS	CP1	0,99	1,01	1,02	1,01	1,00	0,99										1,00
	CP2	0,99	0,99	1,03	1,01	1,02	1,00										1,01
	CP3	1,03	0,99	1,01	1,01	1,03	1,01										1,01
	CP4	1,02	1,01	1,01	1,01	1,03	1,03										1,02
15 PINOS	CP1	1,02	1,03	1,02	1,02	1,00	1,02	0,99	1,03	1,00	1,02	1,01	1,03	0,99	0,99	0,99	1,01
	CP2	1,00	0,99	1,01	1,03	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,02	1,00	1,02	1,01	1,01	1,01
	CP3	1,00	0,99	1,00	1,00	0,98	1,00	0,98	0,98	1,01	0,99	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	0,99
	CP4	1,01	0,99	1,01	0,99	1,01	1,02	1,00	1,00	0,99	0,99	1,03	1,01	1,00	1,02	1,03	1,01
ALTURA DO PINO																	
	[mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	MÉDIA
6 PINOS	CP1	3,01	3,02	3,00	3,00	2,99	3,01										3,01
	CP2	2,99	3,03	3,04	3,01	2,99	2,98										3,01
	CP3	3,02	3,03	3,03	2,99	3,01	3,03										3,02
	CP4	3,04	3,02	3,03	3,02	3,04	3,00										3,03
15 PINOS	CP1	3,01	3,04	3,01	3,02	3,04	3,03	2,98	3,04	2,98	3,00	2,99	2,99	3,02	3,01	3,03	3,01
	CP2	3,04	3,02	2,99	3,00	3,04	3,04	3,00	3,02	2,99	3,02	3,02	3,04	3,03	3,04	3,01	3,02
	CP3	3,03	2,99	3,03	3,03	3,04	3,00	3,03	3,00	2,99	3,02	2,99	3,01	3,04	3,03	3,04	3,02
	CP4	3,02	2,98	3,01	3,02	3,03	3,04	2,98	3,01	3,03	2,99	2,99	2,98	3,04	3,00	3,04	3,01

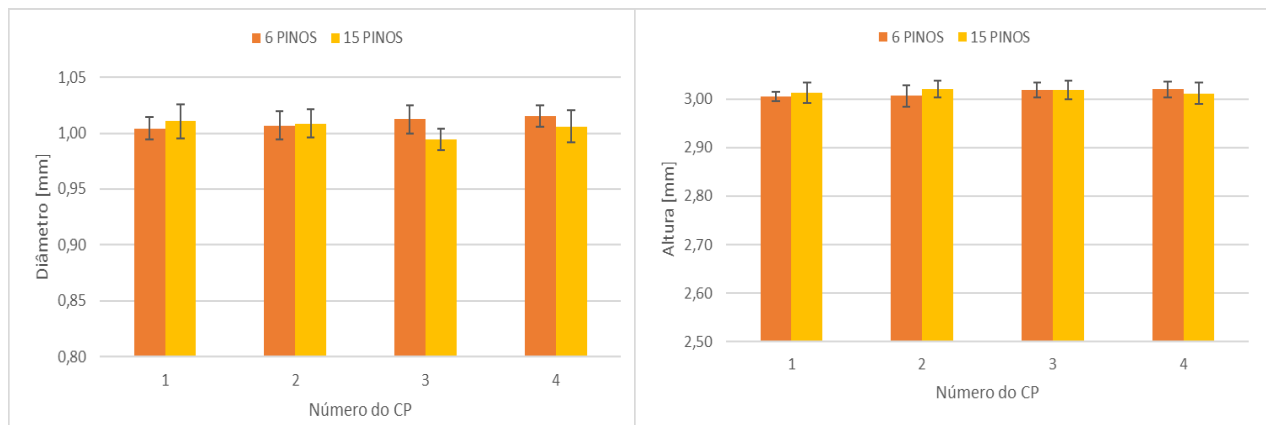


Figura 43- Gráfico de variação de diâmetro e altura da ponta dos pinos para cada CP.

4.2 Análise qualitativa dos resultados de tração-cisalhamento

Cada um dos três grupos possui três amostras que foram ensaiadas sob tração-cisalhamento (com exceção do grupo 3 (15 pinos), para qual se tiveram apenas duas amostras devido a erros na execução do teste). Após os ensaios, os dados resultantes foram carregados no programa MatLab e tratados para que pudessem ser plotados em gráficos visando obter uma melhor visualização. Para cada grupo de tipo de CP's, foi gerado um gráfico contendo curvas dos respectivos tipos de junta. Para efeito de

comparação, a escala dos três gráficos (um para cada grupo de CP's) foi mantida a mesma.

4.2.1 Junta sem pinos

Analisando o gráfico da Figura 44, observa-se que os três CP's com juntas sem pinos responderam relativamente da mesma maneira à carga de tração-cisalhamento exercida. Porém, nota-se também que apenas o primeiro CP apresentou falha estrutural total com decaimento nítido da carga gerada pelo desacoplamento entre resina e a chapa. Ambos os outros CP's não apresentaram um decaimento expressivo, porém observa-se que ao longo do crescimento da carga há pequenas regiões onde a carga decai momentaneamente. Por se tratar do grupo sem pinos ancoradores, toda a carga é transferida para a junção adesiva entre o material compósito e metálico, sendo a resina sujeita a cisalhamento, com apresentação de pequenas quedas na carga, que voltam a ser suportadas logo após o decaimento momentâneo.

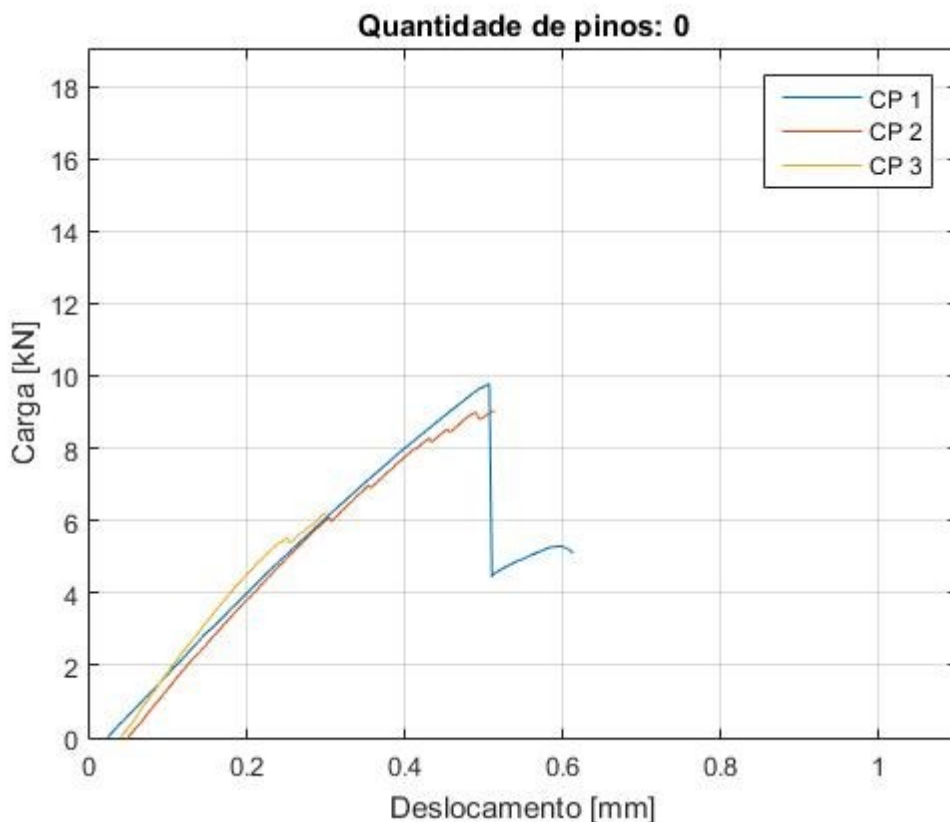


Figura 44 – Curva carga x deslocamento para junta sem pinos.

4.2.2 Junta com seis pinos

Em comparação com os CP's sem pinos, claramente observa-se na Figura 45 um aumento da carga suportada pelo componente com a utilização de 6 pinos na junta. Os dois primeiros CP's apresentaram bons resultados, tendo comportamento inicial próximo ao deslocamento do CP3, porém com valores de carga final suportada superior. O CP3 apresentou fratura total logo antes de 0,8 mm, porém observa-se uma queda por volta de 0,45 mm antes de retomar o crescimento. Este acontecimento provém, possivelmente, de um início de descolamento da união adesiva na região da resina, gerando queda momentânea da carga suportada, que logo após volta a crescer devido a transferência de carga para os pinos. Verificou-se durante os testes que inicialmente o descolamento acontecia nas extremidades do material compósito, sendo este uma região distante dos pinos.

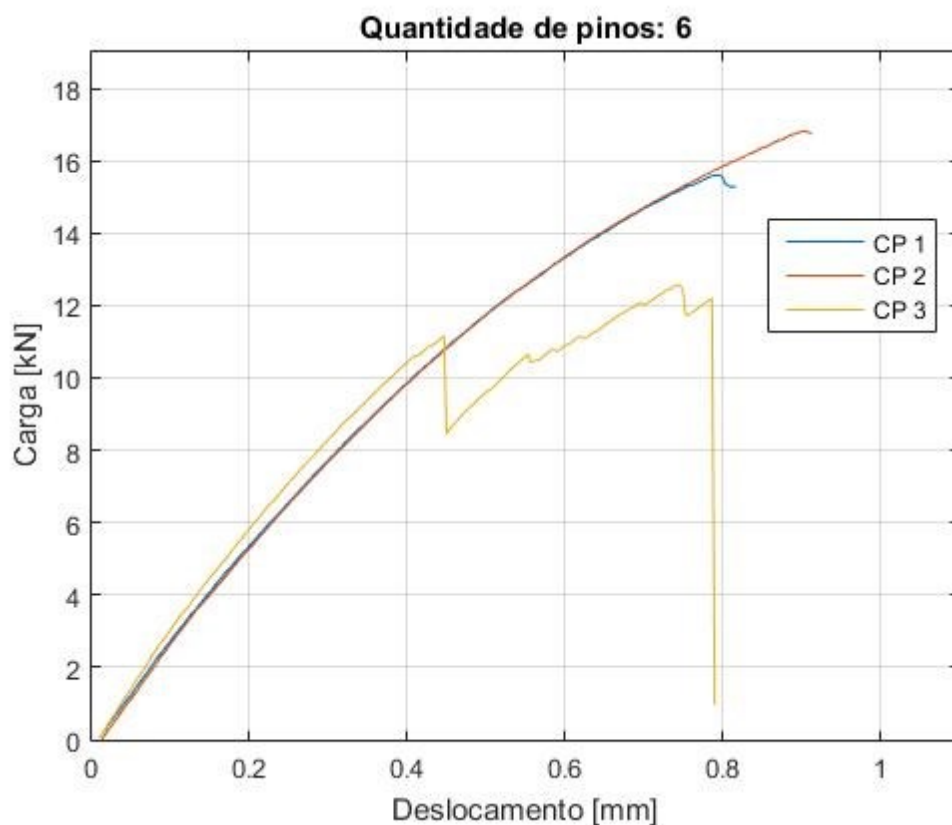


Figura 45 - Curva carga x deslocamento para junta com 6 pinos.

4.2.3 Junta com quinze pinos

Devido a problemas com a identificação dos CP's, apenas duas amostras deste grupo foram submetidas ao ensaio de tração-cisalhamento. Pela análise da Figura 46,

ambos os CP's neste caso apresentaram muita similaridade na resposta à carga, atingindo a falha total em valores próximos de carga e com a mesma resposta ao deslocamento. Observa-se, novamente, uma leve queda no CP 1 antes de sua fratura total, quando possivelmente a parte adesiva que suportava parte da carga falhou, transferindo a carga para os pinos, que logo após não mais suportam e deixam de impedir a falha total da junta.

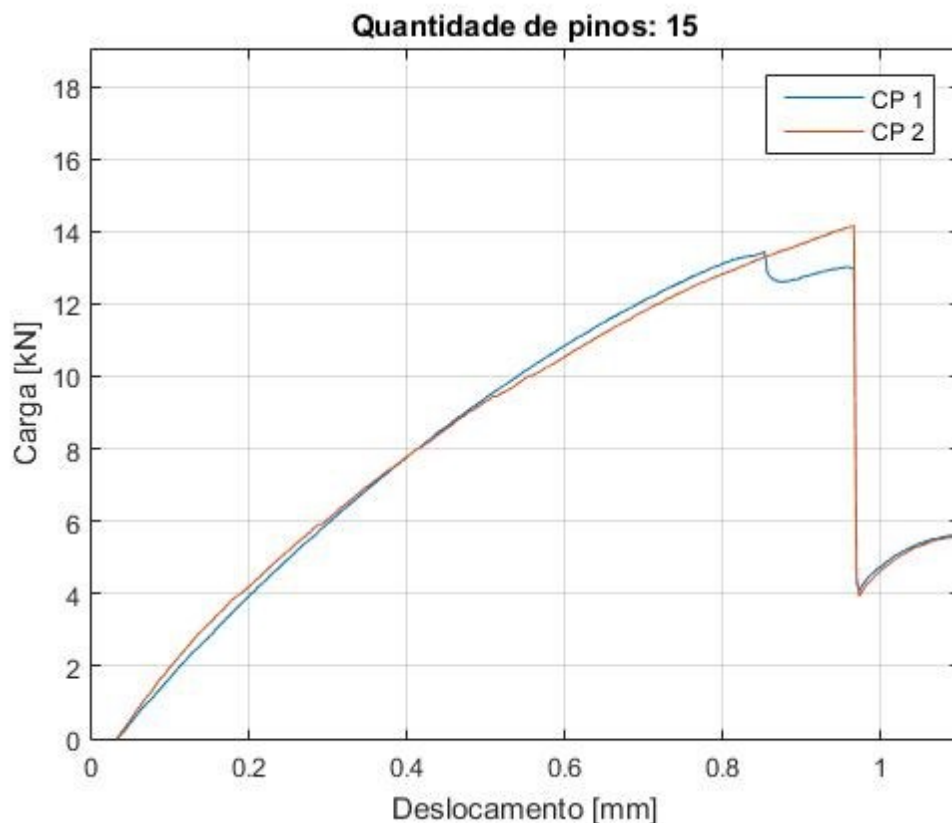


Figura 46 - Curva carga x deslocamento para junta com 15 pinos.

4.3 Análise quantitativa das configurações de junta

Devido ao fato de os resultados obtidos para as diferentes configurações de juntas não terem se mostrado consistentes, isto é, com curva bem definida na região de falha estrutural total, bem como, em alguns casos, não haver uma região exatamente linear de resposta, decidiu-se comparar os três grupos através dos valores de carga correspondentes para um mesmo deslocamento. Este valor de deslocamento foi selecionado observando-se todas as curvas para que pudessem ser adquiridos valores antes de qualquer sinal de fratura total ou parcial do componente. Assim, foi tomado um deslocamento de $0,2\text{ mm}$ para comparação. Para isso,

novamente mostram-se os gráficos dos três casos com mais detalhes na região de interesse, mas com mesma escala. As Figuras 47, 48 e 49 mostram os detalhes para cada grupo de junta.

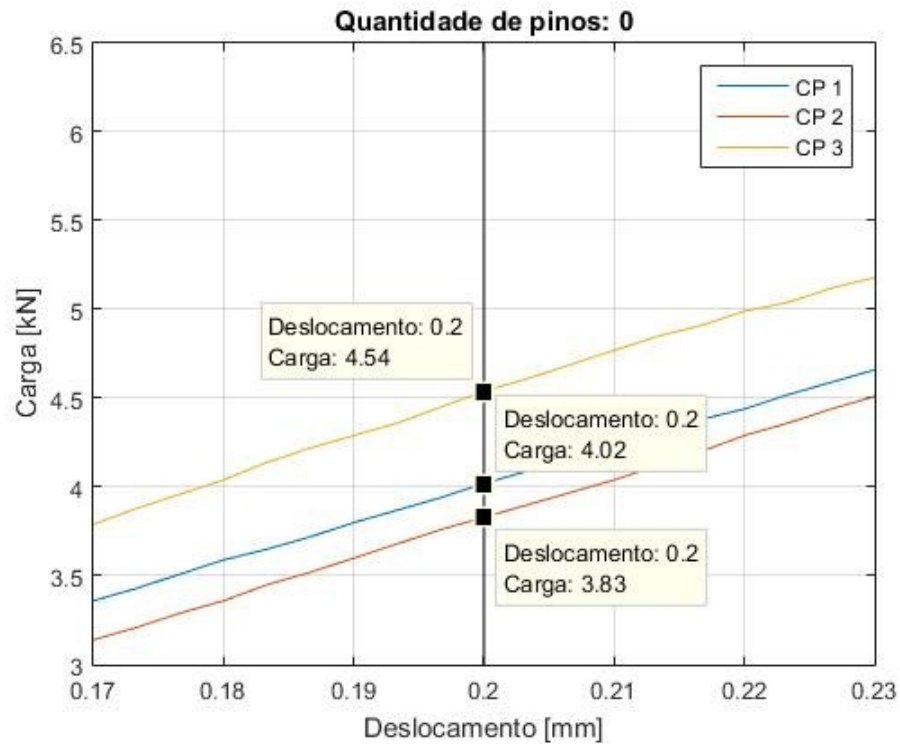


Figura 47 - Detalhe da curva carga x deslocamento para junta sem pinos.

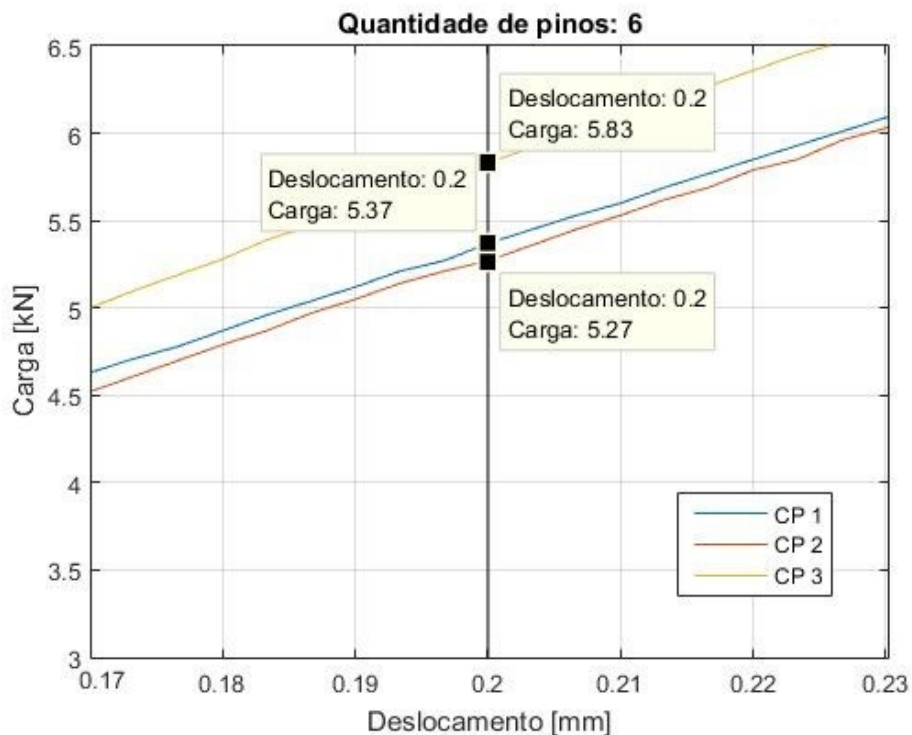


Figura 48- Detalhe da curva carga x deslocamento para junta com seis pinos.

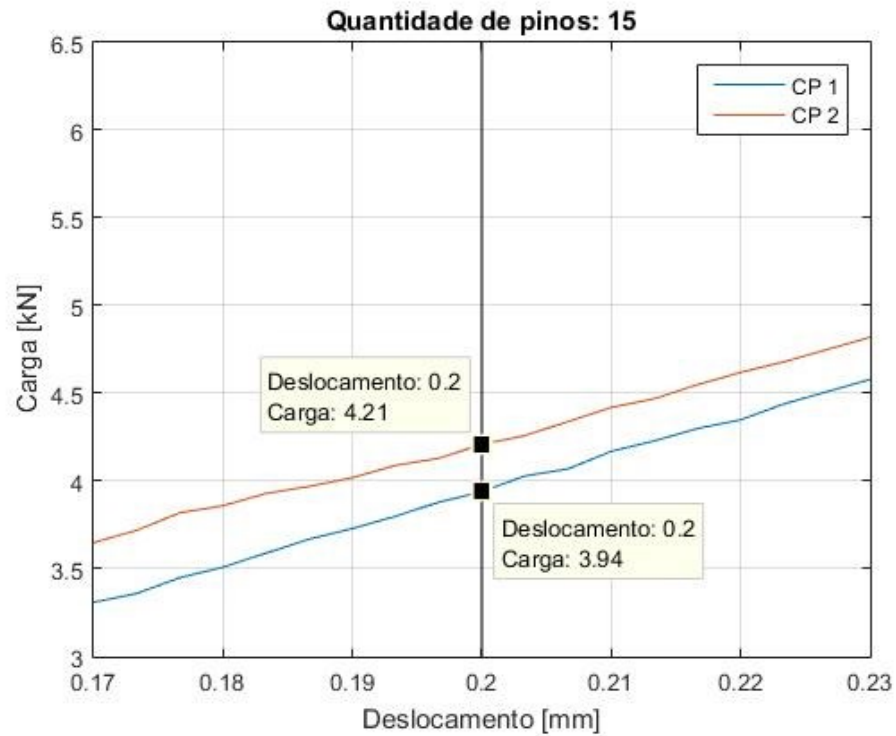


Figura 49 - Detalhe da curva carga x deslocamento para junta com quinze pinos.

De posse de todos os resultados mostrados acima, criou-se a Tabela 2 contendo os resultados dos valores de carga suportada para todos os CP's no deslocamento de 0,2 mm. A Figura 50 compila graficamente os resultados contidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de carga suportada para todos os CP's para o deslocamento de 0,2 mm.

	CP's	Carga [kN]	Média [kN]	Desvio padrão [kN]
Grupo 1 (0 pinos)	1	4,02	4,13	0,3676
	2	3,83		
	3	4,54		
Grupo 2 (6 pinos)	1	5,37	5,49	0,2987
	2	5,27		
	3	5,83		
Grupo 3 (15 pinos)	1	3,94	4,08	0,2121
	2	4,21		

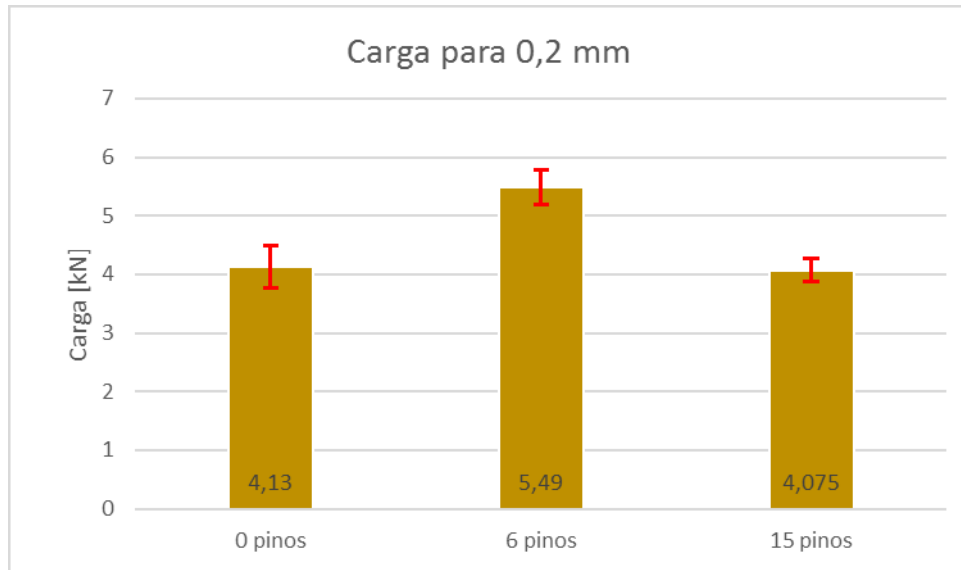


Figura 50 – Resumo dos valores de carga suportada para todos os CP's no deslocamento de 0,2 mm.

Os valores de desvio padrão, mesmo sendo baixos, certamente estão relacionados com o fato de o processo de laminação ter sido feito manualmente, o qual fica obviamente sujeito a variações de aplicação de força na laminação, quantidade de resina entre as camadas e desgaste do material compressor (rolo de espuma) por parte do operador. Surpreendentemente, os valores de carga suportada para um deslocamento de 0,2 mm das amostras sem pinos e com 15 pinos foram próximos à 4 kN, evidenciando que a adição de 15 pinos no material metálico neste caso não agregou valor de resistência mecânica na junta híbrida. A configuração de junta contendo seis pinos mostrou-se mais eficiente, suportando no mesmo deslocamento uma carga extra de aproximadamente 1,38 kN, ou seja, 33% maior.

Algumas hipóteses podem ser levantadas para explicar estes comportamentos. Para as amostras contendo seis pinos, o incremento de 33% no valor da carga se dá pelo travamento do material compósito por parte dos pinos, que agrega maior resistência à junta que sofreria cisalhamento puro se só adesivada, como no caso das amostras sem pinos. Portanto, pode-se inferir que os pinos, neste caso, foram responsáveis por travar/ancorar a parte compósita na chapa metálica.

O comportamento das amostras contendo quinze pinos se mostrou contrário às expectativas de que o aumento do número de ancoradores mecânicos levaria a uma resistência ainda maior da junta. Uma possível explicação para este comportamento é que a área de contato entre o material compósito e o material metálico pode ter sido efetivamente menor do que nas outras amostras (sem pinos e com seis pinos). Como

ilustrado na Figura 51, infere-se que a laminação manual, mesmo com os cuidados tomados não deve ter sido adequada no sentido de garantir a compactação total das camadas junto aos pinos. Isso pode ter deixado a junta com uma menor resistência devido ao incompleto contato entre adesivo e metal. Neste caso, quanto mais pinos, mais difícil seria garantir essa compactação junto à base dos pinos. Assim, o ideal seria fazer este tipo de junta com máquinas que aplicassem grandes pressões uniformes por toda a região da junta, como seria o caso de autoclaves e prensas a quente.

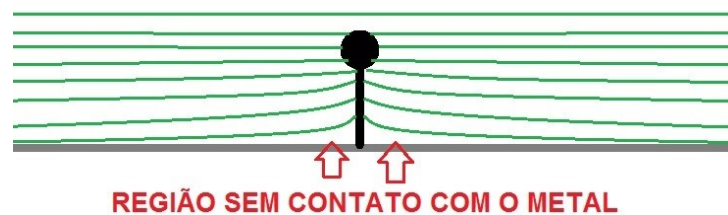


Figura 51 – Ilustração representando efeito de falta de contato entre material compósito e metal devido à presença dos pinos.

A Figura 52a mostra a vista lateral de um corpo de prova com quinze pinos após o ensaio contra a luz a fim de evidenciar que houve o descolamento total entre metal e compósito. Já a Figura 52b mostra outro CP contendo também quinze pinos que foi totalmente separado durante os testes, onde o material compósito, após entortar os pinos, deslizou-se por cima destes.

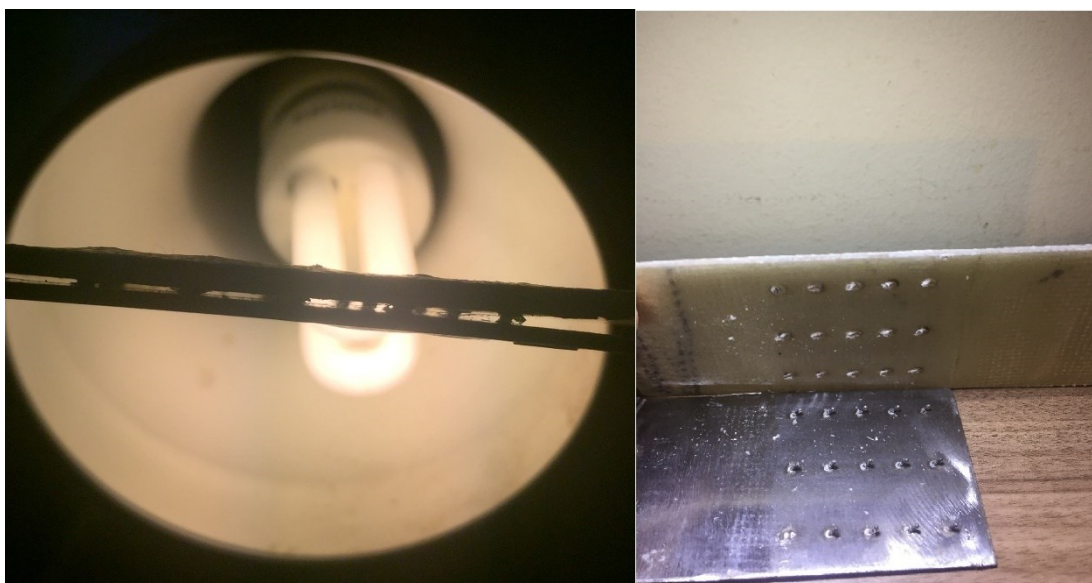


Figura 52 – CP contendo quinze pinos após ensaio e contra a luz.

Por outro lado, a análise dos corpos de prova contendo seis pinos mostrou consistência com os dados adquiridos. Como observado na Figura 53, os CP's neste caso não se romperam totalmente e apresentaram um descolamento parcial quando comparados às amostras contendo quinze pinos, reforçando a hipótese de que a presença de uma grande quantidade de pinos pode resultar em menor aderência adesiva entre o compósito e o metal.

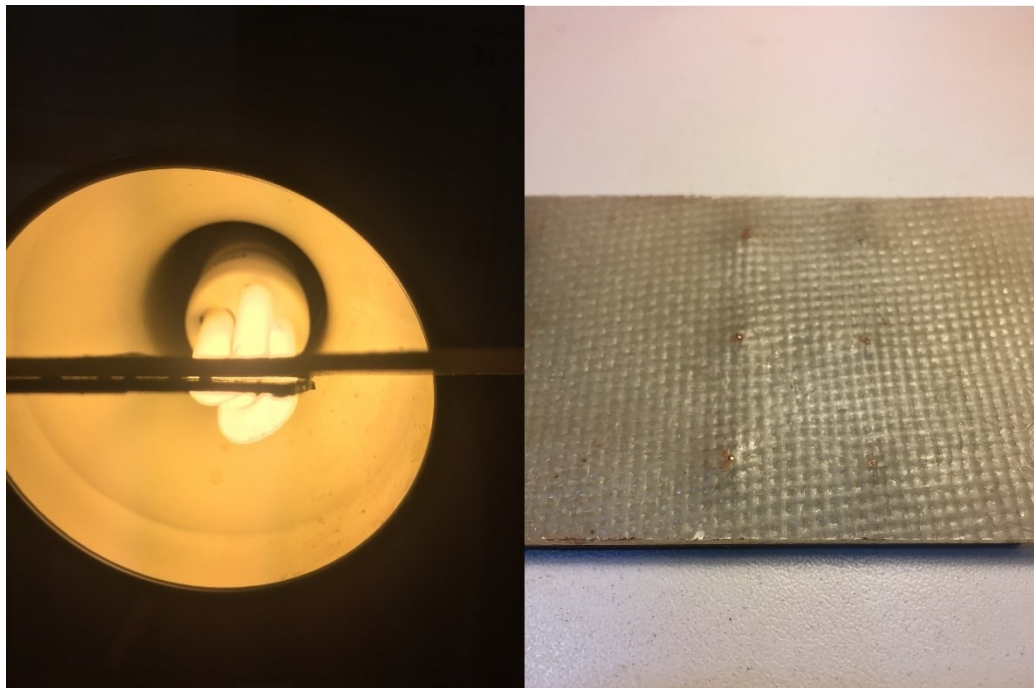


Figura 53 – CP contendo seis pinos após ensaio e contra a luz.

4.4 Fator de rigidez

Um fator de rigidez foi calculado para cada amostra, buscando comparar a rigidez mecânica de cada configuração de junta testada. Este fator de rigidez foi tomado como sendo o fator de inclinação (coeficiente angular) da curva carga versus deslocamento obtida da regressão linear em MATLAB® até um deslocamento de $0,3\text{ mm}$ (exemplo na Figura 54). Este valor de deslocamento foi utilizado pois é o máximo deslocamento comum entre todas as 8 amostras ensaiadas. A Tabela 3 agrupa os resultados do fator de rigidez para todas as configurações de junta testadas. Os resultados são compilados graficamente na Figura 55.

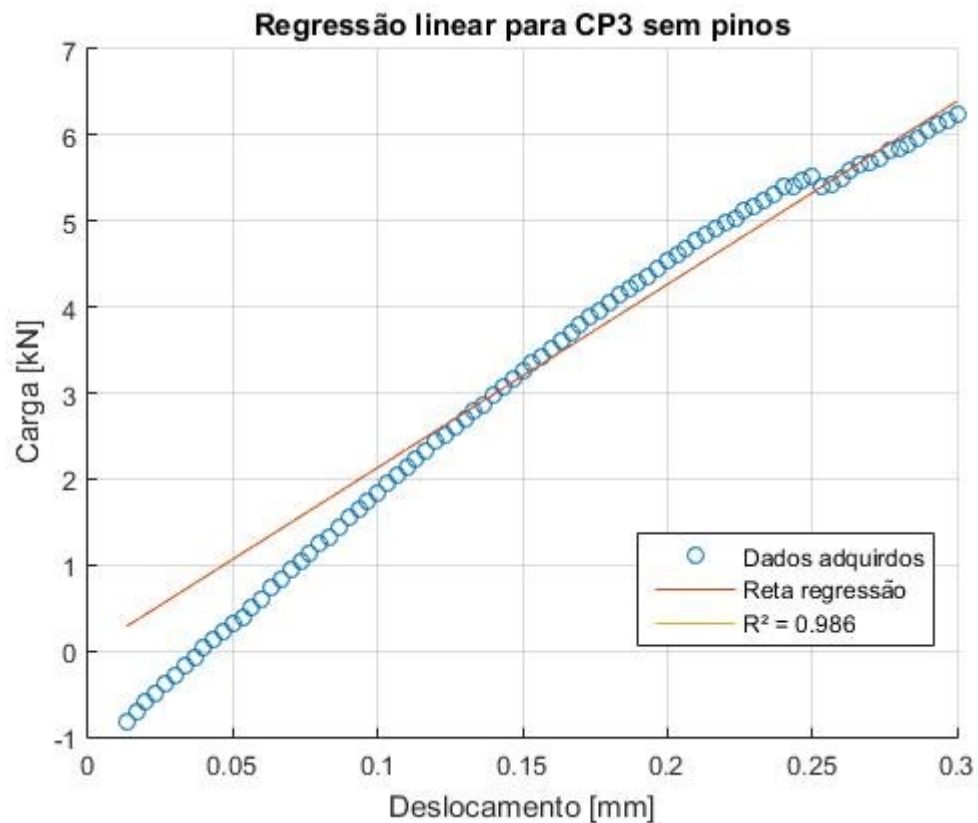


Figura 54 – Gráfico de carga x deslocamento da amostra 3, sem pinos, exemplificando o processo de obtenção do fator de rigidez.

A Tabela 3 comprova os dados apresentados e discutidos na seção 4.3, evidenciando que as amostras contendo seis pinos possuem uma rigidez maior do que as dos outros dois grupos de juntas analisados. O desvio padrão foi consistente para as amostras sem pinos e com seis pinos e baixa para as amostras com quinze pinos devido à serem analisadas apenas duas amostras para este grupo, enquanto três para os outros casos

Tabela 3 – Valores de fator de rigidez para todos os CP's.

	CP's	Carga [kN]	Fator de Rigidez [kN/mm]	Média [kN/mm]	Desvio padrão [kN/mm]
Grupo 1 (0 pinos)	1	4,02	19,549	19,7808	1,4300
	2	3,83	18,481		
	3	4,54	21,313		
Grupo 2 (6 pinos)	1	5,37	26,045	26,6650	1,3917
	2	5,27	25,691		
	3	5,83	28,259		
Grupo 3 (15 pinos)	1	3,94	19,086	19,7031	0,8727
	2	4,21	20,320		

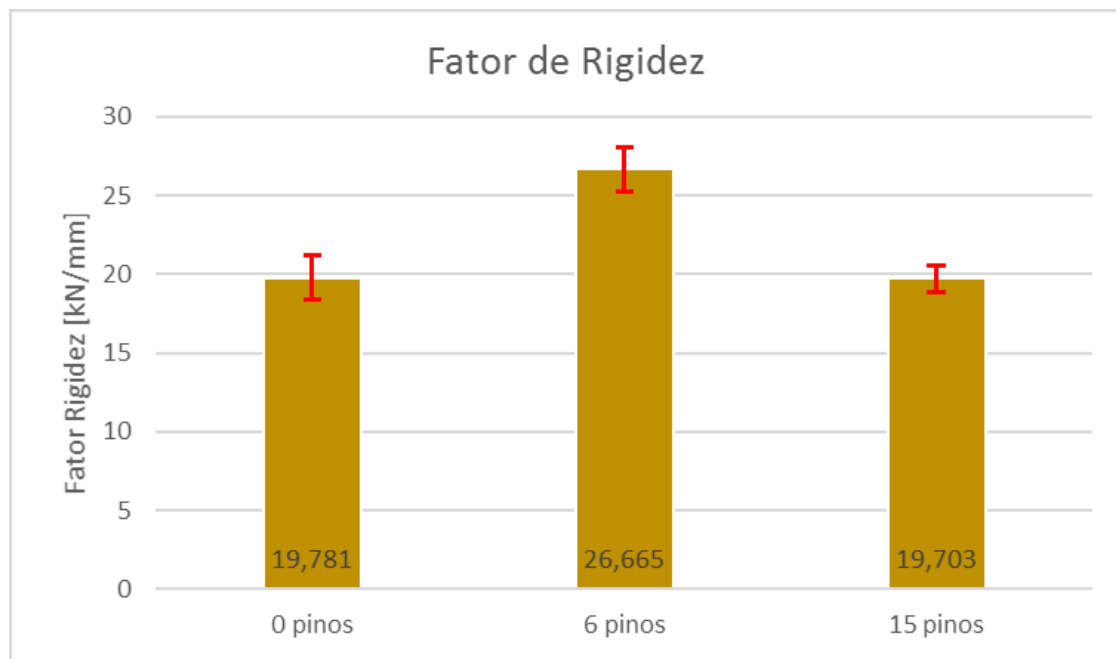


Figura 55 – Resumo dos valores de fator de rigidez para as configurações de juntas avaliadas.

4.5 Análise da adição de massa

Conforme descrito na Seção 3.1, todos os CP's tiveram sua massa medida antes e depois da adição dos pinos. A Tabela 4 incorpora todos os dados apresentados anteriormente, como carga para deslocamento de 0,2 mm e fator de rigidez, bem como os valores de massa obtidos. Como os CP's sem pinos tiveram valores de carga suportada mais baixos, estes foram utilizados como controle (parâmetro de comparação). A Figura 56 resume graficamente estes resultados.

Tabela 4 – Acréscimo de massa, fator de rigidez e carga média para os três tipos de junta.

	0 PINOS				6 PINOS				15 PINOS		
	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CP1	CP2	MÉDIA
Carga em 0,2 mm [kN]	4,02	3,83	4,54	4,13	5,37	5,27	5,83	5,49	3,94	4,21	4,08
Fator Rigidez [kN/mm]	19,55	18,48	21,31	19,78	26,05	25,69	28,26	26,67	19,09	20,32	19,70
Massa Inicial[g]	85,43	85,98	84,60	85,34	87,17	87,76	86,93	87,29	85,94	86,26	86,10
Massa Finais [g]	85,43	85,98	84,60	85,34	87,29	87,95	87,12	87,45	86,32	86,64	86,48
Diferença de massa [%]	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,137%	0,216%	0,218%	0,191%	0,440%	0,439%	0,439%

Figura 56 – Gráfico de incremento percentual de massa *versus* fator de rigidez para cada corpo de prova.

Nota-se que houve um incremento de apenas 0,5% em massa no caso de 15 pinos. Para a junta com 6 pinos este incremento de massa foi de 0,2%. Isso foi condizente com o acréscimo médio de massa por pino que foi respectivamente de 0,032% e 0,029%. Assim, além de ter sido possível aumentar a resistência e o fator de rigidez da junta com seis pinos, isso praticamente não alterou o peso resultante.

Isso fica ainda mais evidente ao se considerar a resistência e fator de rigidez específicos, ou seja, divididos pelas respectivas massas da parte metálica depois da deposição dos pinos, como apresentado na Figura 57. Neste caso, a junta com 15 pinos teve desempenho até inferior ao da junta sem pinos.

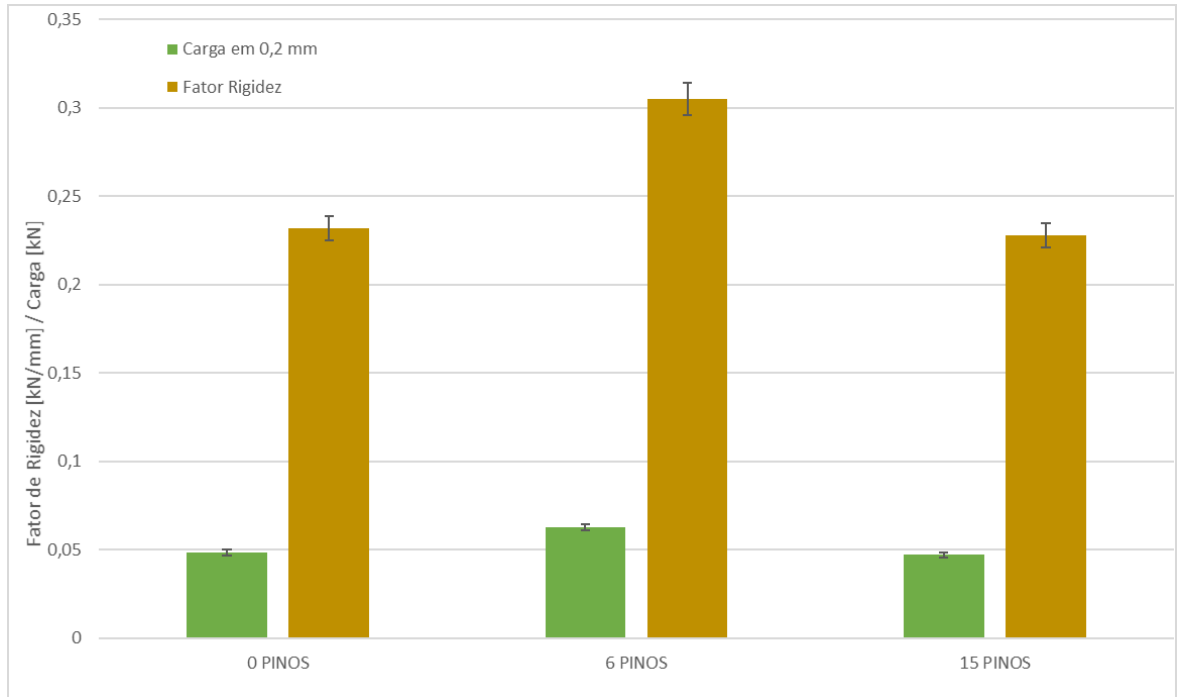


Figura 57 – Gráfico da resistência e fator de rigidez específicos dos três grupos.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica tem perspectivas de crescimento acelerado na próxima década pois visa atingir eficiências energéticas e estruturais cada vez maiores. A união metal-compósito é de extrema importância pois determinados componentes metálicos não podem ser substituídos por materiais compósitos, necessitando-se de uma junção confiável desses os dois distintos materiais. Estudos como estes serão cada vez mais necessários para garantir o aumento da confiabilidade de projetos com tais junções e, ao mesmo tempo, favorecer à economia, sobretudo em seus processos de fabricação.

Em se tratando dos resultados obtidos, os dados mostraram comportamento um pouco diferente do esperado. Amostras contendo quinze pinos responderam à resistência mecânica com valores muito próximos das amostras que não continham

pinos, revelando que talvez não haja uma relação linear entre quantidade de pinos e resistência mecânica e/ou que o processo de laminação manual do compósito teve interação determinante com as quantidades de pinos utilizadas. Uma possível explicação para tal fato é que uma grande quantidade de pinos diminui a área superficial de contato entre os materiais compósito e o metálico e possivelmente esta diferença de área contribua para a redução da resistência mecânica.

Por outro lado, o incremento do valor de carga de ruptura e rigidez para as amostras contendo seis pinos alcançou valores 33% maiores quando comparados às juntas puramente adesivas (sem pinos), ao passo que o aumento de massa que resultou da inserção dos pinos foi da ordem de apenas alguns décimos percentuais.

Por fim, conclui-se que o objetivo concebido para este estudo foi alcançado e os resultados fomentam a necessidade e alguma prévia percepção para a realização de outras investigações, dando continuidade a esta linha de investigação sobre uniões híbridas metal-compósito.

6 TRABALHOS FUTUROS E POTENCIALIDADES

Ao longo da realização deste trabalho, verificaram-se diversas possibilidades de alterações de parâmetros e configurações dos processos e análise de modo que influenciariam o resultado final, comentadas aqui.

Quanto ao processo de soldagem, podem ser alterados tanto o material utilizado nas chapas, quanto o arame de solda, para se perceber tal impacto na resistência de contato entre pinos e chapa.

A quantidade de pinos, assunto principal desta monografia, foi escolhida com base em estudos teóricos e distribuições homogêneas na chapa (espaçamentos iguais), porém pode-se intercalar fileiras de pinos, bem como diminuir gradativamente seu espaçamento, inclusive com espaçamentos diferenciados, menores para regiões com maior esforço cisalhante.

Parâmetros de deposição do pino, como altura, diâmetro da esfera superior e inclinação também podem ser modificados, buscando analisar a influência das dimensões dos pinos no comportamento estrutural da junta.

Com relação à laminação, acredita-se que a cura em autoclave, por exemplo, poderia reduzir o aparecimento de porosidade no material compósito e garantir

compactação adequada do compósito em locais com maior quantidade de pinos, o que poderia melhorar ainda mais o desempenho das juntas híbridas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. D.; Comyn, J.; Wake, W. C.. **Structural Adhesives Joints in Engineering**. 2. ed. Londres: Chapman & Hall, 1997.

CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

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.

Daniel, O.; Ishai, O. **Engineering Mechanics Of Composite Materials**. 2d. New York: Oxford University Press, 2006.

Fronius International GMBH. **CMT: Cold Metal Transfer**: Processo de solda MIG / MAG com arco voltaico em curto circuito. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf>. Acesso em: 08 mar. 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: Applied Science And Manufacturing**. Guildford, p. 11-24. maio 2014.

GRANDINGER, R. **Innovative Principles of Design for Lightweight Composite Compounds in Aeronautical Structures**. 2011. Disponível em: <<http://www.cdti.es/recursos/doc/eventoscdti/aerodays2011/1g3.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2017

PANZERA T. H et al1,., **Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos à Base de Cimento Portland e Resina Epoxi**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de S. João del-Rei - UFSJ, Campus S. Antônio Praça Frei Orlando 170, S. J. del-Rei, MG, Brasil 36307-352, 2012

RIBEIRO, Marcelo Leite. **Programa Para Análise de Juntas Coladas: Compósito/Compósito e Metal/Compósito**. 2012. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SMITH, F., COMELD - **An Innovation In Composite To Metal Joining** - <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/comeld-an-innovation-in-composite-to-metal-joining/> - 2015.