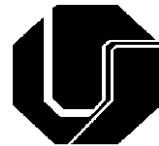


IAROSLAV SKHABOVSKYI

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE ANCORADORES
POR SOLDAGEM EM LAMINADOS METAL-FIBRA
VISANDO A INDÚSTRIA AERONÁUTICA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

IAROSLAV SKHABOVSKYI

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE ANCORADORES POR SOLDAGEM
EM LAMINADOS METAL-FIBRA VISANDO A INDÚSTRIA
AERONÁUTICA**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

UBERLÂNDIA – MG

2018

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

S627A Skhabovskyi, Iaroslav, 1989-
2018 Avaliação da aplicação de ancoradores por soldagem em laminados
metal-fibra visando a indústria aeronáutica / Iaroslav Skhabovskyi. -
2018.
225 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.
Coorientador: Edson Cocchieri Botelho.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.783>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Placas
(Engenharia) - Teses. I. Scotti, Américo, 1955- II. Botelho, Edson
Cocchieri. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



ALUNO: Iaroslav Skhabovskyi

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11413EMC006

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

LINHA DE PESQUISA: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL DOUTORADO

TÍTULO DA TESE:

“Avaliação da Aplicação de Ancoradores por Soldagem em Laminados Metal-Fibra Visando a Indústria Aeronáutica”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Américo Scotti

COORIENTADOR: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

A Tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro A do Bloco 50, Campus Santa Mônica, em 11 de junho de 2018, às 09 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME

Prof. Dr. Américo Scotti (Orientador)

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho (Coorientador)

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

Prof. Dr. Antonio Marcos Gonçalves de Lima

Profª. Drª. Ana Sofia Clímaco Monteiro d’Oliveira

Prof. Dr. José Ricardo Tarpani

ASSINATURA

UFU

UNESP

UFU

UFU

UFPR

USP

Uberlândia, 11 de junho de 2018.

*Aos meus pais, Galina e Vitalii.
À minha querida irmã Irina e namorada Raiana.
À toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Américo Scotti e ao meu coorientador Prof. Edson Cochieri Botelho pelo exemplo de trabalho, orientação, paciência, apoio e oportunidade que me foi dada.

Ao colaborador Prof. Ruham Pablo Reis, pela orientação, discussões e críticas construtivas, ensinamento, amizade e, acima de tudo, pela credibilidade e paciência.

Ao Prof. José Antônio Ferreira Borges, pela organização, análise e apoio para realizar o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico).

Ao Prof. Leonardo Sanches pelo auxílio, orientação e apoio da análise modal em Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC).

Aos Profs. Volodymyr Ponomarov, Douglas Bezerra de Araújo, Louriel Oliveira Vilarinho e Valtair Antônio Ferraresi pelos ensinamentos, apoio e amizade.

À minha namorada, Raiana Roland Seixas, pelo companheirismo, por estar ao meu lado durante todo este período, pelo apoio e pela compreensão.

Aos pós-graduandos Nicolas Gartner e Darlan Machado de Souza pela amizade e apoio para a realização deste trabalho e aos colegas da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG/UNESP) Natassia Lona Batista e Alberto Lima Santos, pela ajuda na fabricação dos corpos de prova (PLMC) e todo auxílio e apoio durante as visitas técnicas.

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade de realizar este trabalho.

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo suporte financeiro e para desenvolvimento da pesquisa.

Ao LAPROSOLDA/UFU pelo apoio técnico e laboratorial e aos amigos do LAPROSOLDA/UFU e da Pós-graduação da FEMEC/UFU, pelo apoio, dicas e amizade.

Aos engenheiros e técnicos de laboratório Douglas Trindade Mazer, Diandro Bailoni Fernandes, Diego Augusto Costa Alves, Lazaro Henrique Alves Vieira (Lazinho), Jonas Profeta Borges e Carlos Humberto Vieira (Carlão). E a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação profissional, acadêmica e pessoal.

À empresa ALLTEC Materiais Compostos® pela doação dos materiais compósitos utilizados neste trabalho.

SKHABOVSKYI, I. Avaliação da Aplicação de Ancoradores por Soldagem em Laminados Metal-Fibra Visando a Indústria Aeronáutica. 2018. 225 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

RESUMO

Painéis laminados metal-compósito são alternativas modernas e eficientes para obtenção de estruturas leves e de alta resistência aplicáveis na indústria de transportes, sobretudo na aeronáutica. Tradicionalmente, esses painéis são formados por camadas intercaladas de chapas finas de metal e lâminas de compósito, combinando as melhores propriedades de ambos materiais em uma única estrutura. Assim, a união entre o metal e o compósito é fundamental para o bom desempenho da estrutura. A melhoria deste tipo de união tem sido recentemente testada através de ancoradores fixados nas superfícies das chapas metálicas que funcionam mini estruturas de acoplamento entre os constituintes do painel. Normalmente se utiliza processos de fabricação sofisticados, como LASER, para produzir micro nervuras ou texturização. Entretanto, o foco desta prática tem sido juntas metal-compósito e não painéis laminados.

Este trabalho teve como objetivo propor e avaliar um novo conceito de ancoradores para painéis laminados, que consiste na deposição de mini pinos metálicos por soldagem a arco para atuar na interface metal-compósito. Para tal, usou-se a técnica de soldagem CMT PIN, já testada com sucesso em juntas híbridas metal-compósito. Inicialmente estudou-se a técnica CMT PIN com o intuito de produzir um tipo de pino adequado para aplicação desejada. Em seguida, painéis miniaturizados foram manufaturados com diferentes disposições e densidades de pinos e avaliados comparativamente a painéis convencionais de mesmo material e dimensões similares, por meio de ensaios mecânicos com carregamento quase-estático (dobramento a três pontos, flambagem e cisalhamento), ensaios de impacto (baixa e alta velocidades) e análise modal. Os ensaios mecânicos visaram avaliar comparativamente os painéis quanto a esforços de flexão, compressão e cisalhamento, esforços típicos que sofre, por exemplo, a estrutura de uma aeronave em operação. Já os ensaios de impacto tentam simular o comportamento destas estruturas em colisões com objetos na sua trajetória, ou mesmo ao ser alvo de projéteis lançados sobre elas. O ensaio para se aplicar análise modal visou determinar a capacidade dos pinos em conferir amortecimento aos painéis. Finalmente, uma avaliação da qualidade superficial das paredes externas dos painéis foi implementada, propondo-se evitar limitações de acabamento externo da fabricação dos painéis por soldagem.

Verificou-se que os painéis com ancoradores tiveram resistência similares à flambagem e até menor resistência à flexão, quando comparados com o painel laminado

convencional. Porém, tais painéis apresentaram um comportamento menos catastrófico após a falha e uma maior resistência ao cisalhamento. No ensaio de impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*), os pinos não tornaram os painéis mais frágeis e nem alteraram sua capacidade de absorver a energia de impacto, mas quando submetido ao ensaio de impacto de alta velocidade (Balístico), os painéis com pinos exibiram uma maior capacidade de absorção de energia. Verificou-se, pela análise modal, que os pinos não alteraram a frequência natural de vibração dos painéis, mas aumentaram consideravelmente o fator de amortecimento dos mesmos, emprestando a eles uma maior capacidade de absorver vibrações e ruídos. Estas características positivas estão relacionadas ao ancoramento entre o metal e o compósito promovido pelos pinos, que ocorreram com leve acréscimo de massa e sem alterações superficiais significantes das paredes externas dos painéis. Desta forma, a ancoragem conseguida das lâminas de compósitos através de pinos depositados por soldagem mostrou ser uma forma viável de melhorar o desempenho de painéis laminados metal-compósito.

Palavras-Chave: painéis estruturais, laminados metal-compósito, ancoradores soldados, CMT PIN, união híbrida metal-compósito

SKHABOVSKYI, I. **Evaluation of the Application of Anchorages Welded to a Fiber-Metal Laminate Aiming at the Aeronautical Industry.** 2018. 225 f. Ph.D Thesis, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil.

ABSTRACT

Fiber-metal laminate panels are modern and efficient alternatives for obtaining light and high strength structures applicable in the transport industry, especially in aeronautics. Traditionally, these panels are formed interlaying thin metal and composite components, combining the best properties of both materials into a single structure. Thus, the adhesion between the metal and the composite layers is critical for the good performance of the structure. Anchorages fixed to the metal sheet surfaces have proved to be beneficial for the adhesion. Typically, sophisticated manufacturing processes, such as LASER, are used for this purpose producing micro-edging or texturing. However, such techniques are usually applied for metal-composite joints rather than for laminate panels.

The aim of this work was to propose and evaluate a new concept of anchorages for laminate panels, which consists of the deposition of metallic mini pins by arc welding to act as anchorages of the metal-composite interface. For this, the CMT PIN welding process, already successfully tested in hybrid metal-composite joints, was used. Initially the CMT PIN process was studied in order to produce the best type of pin geometry for the intended application. Then, miniaturized panels were fabricated with different arrangements and pin densities and then evaluated by comparing to conventional panels of the same material and similar dimensions by means of quasi-static mechanical loading tests (three-point bending, buckling and shearing), low- and high-speed impact and modal analysis. In order to evaluate the panels against flexure, compression and shear stresses (which are typical stresses suffered by the aircraft structure in operation), appropriate mechanical tests were carried out. Impact tests were intended to simulate the behavior of these structures in collisions with objects in their trajectory, or even when being the target of projectiles launched on them. The modal analysis assay was aimed to determine the pins ability to impart damping to the panels. Finally, an evaluation of the surface quality of the panel outer walls was implemented in order to avoid cosmetic limitations of the panels manufacturing by welding.

The panels with anchorages were found to have similar strength to buckling, but lower bending strength, as compared to the conventional laminate panel. However, these panels presented a less catastrophic behavior after failure and a higher resistance to shear. The Drop-Weight Test showed that the pins did not make the panels more fragile neither altered their ability to absorb the impact energy, moreover when subjected to the high-speed (Ballistic) impact test, panels with pins exhibited a greater energy absorption capacity. It was verified by

modal analysis that the pins did not change the natural vibration frequency but they considerably increased the damping factor of the panels, giving them a greater capacity to absorb vibration and noise. These positive features are related to a better anchoring between the metal and the composite promoted by the pins, which accompanied by a slight increase of mass and without significant surface alterations of the panel external walls. Thus, anchoring achieved from composite layers through pins deposited by welding has proved to be able of improving the performance of fiber-metal laminate panels.

Keywords: structural panels, fiber-metal laminates, welded anchorages, CMT PIN, hybrid metal-composite joint

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	<i>Altitude Adaptation</i>
ARALL®	<i>Aramid Reinforced Aluminum Laminate</i>
BA	<i>Base Adaptation</i>
BCA	<i>Ball/Cyl. Adaptation</i>
CARALL®	<i>Carbon Reinforced Aluminum Laminate</i>
CFRP	<i>Carbon Fibre Reinforced Polymer</i>
CMT	<i>Cold-Metal Transfer</i>
CP	Corpo(s) de prova
DBCP	Distância(s) Bico de Contato Peça
dc	diâmetro da cabeça do pino
DMT/UNESP	Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FML	<i>Fiber-Metal Laminate</i>
FMLs	<i>Fiber-Metal Laminates</i>
GLARE®	<i>Glass Reinforced Aluminum Laminate</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
h	altura do pino
Hex.	Padrão de deposição dos pinos do tipo Hexagonal
laq	corrente de aquecimento
Isolpp	corrente de solidificação do pé do pino
Ispp1	corrente 1 de soldagem do pé do pino
Ispp2	corrente 2 de soldagem do pé do pino
Ispp3	corrente 3 de soldagem do pé do pino
JHA	Junta(s) Híbrida Avançada
JMC	Junta(s) Metal-Compósito
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LC	Laminado(s) de Compósito(s)
LMC	Laminado(s) Metal-Compósito
LMF	Laminado(s) Metal-Fibra
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
MMC	Máquina Manual de Medição

PLMC	Painel/Painéis Laminado(s) Metal-Compósito
Quad.	Padrão de deposição dos pinos do tipo Quadrático
tacom	tempo de acomodação térmica após rompimento
taq	tempo de aquecimento
tlspp	tempo total de soldagem do pé do pino
tromp	tempo de rompimento
tsolpp	tempo de solidificação do pé do pino
tspp1	tempo de ligação da corrente 1
tspp2	tempo de ligação da corrente 2
tspp3	tempo de ligação da corrente 3
tUspp	tempo de soldagem do pé do pino
Uacom	tensão em vazio durante acomodação térmica após rompimento
Uaq	tensão durante aquecimento
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Uromp	tensão durante rompimento
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
Usolpp	tensão durante solidificação do pé do pino
Uspp	tensão durante soldagem do pé do pino
Uvaz	tensão em vazio
σ	desvio padrão médio

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
CAPÍTULO I - Introdução	1
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	4
2.1 Laminados de Compósito (LC)	5
2.2 Laminados Metal-Compósito (LMC)	7
2.3 Ligação do metal no compósito em Laminados Metal-Compósito (LMC)	17
2.3.1 Co-coladas e co-curadas	18
2.3.2 Juntas híbridas auxiliadas por ancoradores	20
2.4 Propriedades mecânicas de LMC	29
2.4.1 Ensaio para avaliar as propriedades mecânicas	30
2.5 Técnica de deposição de pinos CMT PIN	43
CAPÍTULO III - Metodologia, Equipamentos e Insumos	48
3.1 Metodologia fundamental	48
3.2 Bancada experimental	51
3.2.1 Célula para deposição dos pinos	51
3.2.2 Célula para produção (prensagem e cura) dos painéis	56
3.3 Equipamentos de ensaio e medição	57
3.3.1 Aparelho de ensaio de impacto de baixa velocidade (Drop-Weight Test)	57
3.3.2 Máquina universal de ensaios mecânicos	59
3.3.3 Câmeras-filmadoras de alta velocidade	60
3.3.4 Máquina de medição por coordenadas (MMC) 3D	61
3.3.5 Câmera infravermelha (termográfica)	62
3.4 Insumos	63
3.4.1 Gás de proteção	63
3.4.2 Metais de base e de adição	63
3.4.3 Material compósito (pré-impregnado)	63
CAPÍTULO IV - Deposição dos Pinos pela Técnica CMT PIN	65
4.1 Ação de cada parâmetro de regulagem da técnica CMT PIN	66
4.1.1 Caracterização e classificação dos parâmetros	66
4.1.2 Planejamento experimental	70
4.1.3 Resultados e análises	71
4.2 Ação de outros parâmetros operacionais da técnica CMT PIN	79
4.2.1 Influência da DBCP sobre as características geométricas dos pinos	79

4.2.2 Influência do material e da espessura mínima da chapa metálica	82
4.2.3 Efeito da temperatura da chapa.....	86
4.2.4 Efeito do parâmetro “Base Adaptation” (BA) na resistência da união entre pino e folha metálica.....	88
4.3 Discussão parcial	91
CAPÍTULO V - Avaliação dos Painéis Laminados Metal-Compósito Reforçados por Pinos: 1^a Fase.....	94
5.1 Fabricação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC)	94
5.2 Caracterização dos painéis fabricados	102
5.3 Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis laminados.....	105
5.3.1 Ensaio de dobramento de três pontos	105
5.3.2 Ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo Drop-Weight Test.....	112
5.3.3 Quantificação dos danos nos painéis após o ensaio de impacto	117
5.3.4 Ensaios de Compressão e Flambagem após o ensaio de impacto – tolerância ao dano.....	125
5.3.5 Ensaio de cisalhamento (Iosipescu)	134
5.4 Discussão parcial	140
CAPÍTULO VI - Avaliação dos Painéis Laminados Metal-Compósito Reforçados por Pinos: 2^a Fase.....	142
6.1 Fabricação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC)	142
6.2 Caracterização dos painéis fabricados	145
6.3 Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis laminados.....	148
6.3.1 Ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo Drop-Weight Test.....	148
6.3.2 Quantificação dos danos nos painéis após ensaios de impacto – perfil de profundidade do dano	152
6.3.3 Ensaio de flambagem após o ensaio de impacto – tolerância ao dano.....	154
6.3.4 Ensaio de cisalhamento (Iosipescu)	157
6.3.5 Análise modal dos painéis	162
6.3.6 Ensaio de impacto de alta velocidade (balístico)	168
6.4 Avaliação de características “cosméticas” dos painéis	180
6.5 Discussão parcial dos resultados da 2 ^a fase de avaliação e comparação com os da 1 ^a fase	183
CAPÍTULO VII - Conclusões	186
CAPÍTULO VIII - Recomendações para Trabalhos Futuros	189
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
Apêndice.....	202

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Componentes e estruturas empregadas em meios de transporte têm quase sempre como demanda a redução de peso (aumento da capacidade de carga e redução do consumo de combustível, etc.) e volume, o que pode ser atendido pela seleção de materiais de maior resistência específica (compósitos, por exemplo) e redução de espessuras, mantendo-se a rigidez às custas de enrijecedores ou formatos favoráveis. Um tipo de material compósito que foi criado para atender esta demanda e já encontrou a sua aplicação no setor aeronáutico é o Laminado Metal-Compósito (LMC), também conhecidos na literatura como Laminado Metal-Fibra (*Fiber-Metal Laminates*). De acordo com Asundi e Choi (1997), os LMC consistem de chapas finas de ligas de alumínio de alta resistência, unidas a lâminas de compósitos de pré-impregnados (*prepregs*) de forma alternada (combinação metal-compósito sobre outras). Esta definição pode ser expandida para chapas de outros materiais e com somente uma camada de pré-impregnado entre duas chapas finas de metal. Por sua vez, este pré-impregnado é um compósito de matriz polimérica (normalmente resina epóxi) reforçado com fibras (normalmente de carbono, vidro, aramida ou boro). Sinmazçelik et al. (2011) listam os LMC mais comuns: ARALL® (*Aramid Reinforced Aluminum Laminate*); GLARE® (*Glass Reinforced Aluminum Laminate*) e CARALL® (*Carbon Reinforced Aluminum Laminate*).

Botelho et al. (2006) citam que a combinação de chapas metálicas e lâminas de compósito de matriz polimérica, como em um LMC, podem criar um efeito sinérgico em muitas propriedades, quando comparado a ligas metálicas e materiais compósitos individualmente. Também para Asundi e Choi (1997), os LMC combinam as melhores características de compósito com as das chapas finas de metal, sem compartilhar as desvantagens individuais. De acordo com as revisões feitas por Sinmazçelik et al. (2011), os LMC trazem diversas vantagens relacionadas ao comportamento do material (tais como alta resistência à fadiga e à tenacidade à fratura, elevada resistência estrutural - resistência mecânica e rigidez, alta resistência ao impacto, alta capacidade de absorção de energia), a propriedades físicas (baixa densidade), a durabilidade (baixa absorção de umidade, alta resistência à corrosão e degradação do material), à segurança (resistência ao fogo) e ao custo comparado à estrutura

metálica (redução de peso, menor tempo de uso de mão de obra, menor número de reparos e intervenções para manutenções). Em resumo, os LMC são caracterizados por um equilíbrio de baixo peso estrutural e alta resistência e rigidez, em comparação com os metais, incluindo as ligas de alumínio aeronáutico. Como consequência destas vantagens, os LMC são amplamente empregados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial.

Ainda segundo Sinmazçelik et al. (2011), a adesão (acoplamento) entre o metal e o compósito é o fator chave para melhorar a eficiência dos LMC. Para este fim, existem vários métodos, técnicas e processos, normalmente através da modificação das características da superfície metálica. Também pensando em melhorar a adesão (acoplamento) de metais e compósitos, pode-se citar o desenvolvimento das chamadas Juntas Híbridas Avançadas (JHA). A principal diferença para juntas metal-compósitos (JMC) convencionais (coladas ou com resina adesivada) é que na superfície da parte metálica da JHA existem pequenos ancoradores (pinos) também metálicos, para interligar a camada de compósito. Islam e Tong (2016), citando Hart-Smith (1985) e Tong et al. (2002), explicam que as JHA usam a fixação mecânica (ancoradores) e adesiva (uso de resina adesivadas na matriz do compósito) para unir componentes estruturais semelhantes ou diferentes, com maior resistência e desempenho à fadiga, menor peso e concentração de tensões.

Graham et al. (2014) revelam que os pinos acima mencionados podem ser produzidos por diferentes processos, tais como fusão seletiva por LASER (SLM - *Selective LASER Melting*) e soldagem por descarga capacitiva (CDSW - *Capacitor Discharge Stud Welding*). Xiong et al. (2015), por exemplo, aplicou a técnica Surfi-Sculpt® em JHA, usando uma fonte de feixe de elétrons (LASER também é usado nessa técnica). Eles transformaram a superfície metálica plana em pequenos ancoradores (pinos), sem adição de material. Uma outra técnica para depositar pinos, agora baseada no processo de soldagem a arco MIG/MAG CMT®, denominada como MIG/MAG CMT (*Cold-Metal Transfer*) PIN®. A técnica CMT PIN permite adicionar pinos metálicos a partir do arame-eletrodo, de movimentos programados de avanço e recuo do arame-eletrodo e de uma sincronização da imposição de corrente. Os pinos são formados através da tração (recuo) e rompimento do arame aquecido, que se torna soldado na chapa durante o avanço do mesmo e a existência de um arco. Modificações de alguns parâmetros permitem formar pinos de diferentes tamanhos e geometrias (Fronius, 2014). A técnica CMT PIN tem como vantagens um equipamento e consumíveis de menor custo com uma maior flexibilidade (mesmos de um processo de soldagem MIG/MAG convencional), em comparação com SLM e Surfi-Sculpt®.

Ucsnik et al. (2010) mostraram que o uso de pinos depositados pela CMT PIN na parte metálica melhorou a resistência de JHA, quando comparadas às coladas (JMC). Ucsnik et al. (2014) também mostraram que os pinos poderiam ser utilizados para melhorar o

desempenho das juntas compósito-compósito (JCC), aplicando folhas finas de metal com pinos em ambas as suas superfícies entre as placas de compósito a ser unidas. De acordo com Graham et al. (2014), a JHA com ancoradores feitos por CMT PIN superou as JMC concavadas (unidas através da própria resina polimérica do compósito) em termos de força e absorção de energia em taxas elevadas e quase estáticas de carga, bem como em aspectos da tolerância ao dano após o ensaio de impacto, durabilidade ambiental e desempenho quanto à fadiga mecânica. Em trabalhos derivados, também usando CMT PIN, Stelzer et al. (2015) e Stelzer et al. (2016) mostraram que o comportamento à fadiga de juntas entre compósitos (polímeros reforçados com fibra de carbono) foi melhorado pela inserção de uma chapa fina de titânio com pinos depositados em ambas as superfícies.

A técnica CMT PIN parece ter encontrado sua principal aplicação no aprimoramento do desempenho de JMC, mas sua potencialidade também poderia ser explorada além das uniões, como em estruturas feitas de LMC; os pinos depositados nas superfícies de chapas metálicas em LMC poderiam atuar como ancoradores para camada de compósito, melhorando acoplamento metal-compósito e o consequente desempenho da estrutura. Entretanto, não foi encontrado na literatura a utilização de ancoradores com este propósito. Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o uso de ancoradores (pinos) depositados pela técnica CMT PIN em estruturas em forma de painéis LMC como meio de melhorar suas propriedades, tais como, resistência mecânica e rigidez. Como objetivos específicos, têm-se o de entender o funcionamento da técnica CMT PIN, visando achar seus limites operacionais, e a proposição e desenvolvimento de ensaios mecânicos para estudar o efeito da aplicação de ancoradores por CMT PIN sobre o desempenho de painéis LMC.

Nota do autor: apesar da aplicação alvo desta proposta ser a indústria aeronáutica, como se verá adiante, será utilizado no desenvolvimento do presente trabalho uma folha de aço inoxidável como constituinte metálico do LMC, que tipicamente não é utilizada neste ramo. A razão principal foi a de que este trabalho trata-se apenas de uma prova de conceito. Portanto, espera-se que os resultados possam ser transportados para outros constituintes metálicos caracteristicamente utilizados na indústria aeronáutica, como, por exemplo, ligas de alumínio e titânio. Além disto, folhas finas de aço inoxidáveis são de maior disponibilidade no mercado e, no caso das ligas de titânio, significativamente de menor custo. Além disto, a competência e experiência do grupo de soldagem da UFU é maior com o aço inoxidável. Por último, mas não menos importante, LMC poderia ser aplicado em outras áreas, como a automobilística (blindagem), defesa (veículos de combate), transporte (carcaças de trens e barcos), construção civil (módulos portáteis de central de dados, hospitais de campanha, plataformas marítimas, etc.), energia (caixa de transformadores de alta potência), etc. Assim, as conclusões poderiam se expandidas para estas aplicações.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em geral, materiais compósitos são combinações de uma matriz com um reforço, ambos podendo ser de natureza polimérica, metálica ou cerâmica. Callister (2002) define material compósito como qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que seja obtida uma melhor combinação de propriedades. Estendendo um pouco esta definição, para Rezende et al. (2011), compósitos baseiam-se em uma ideia simples de combinar e colocar em serviço dois ou mais materiais macroconstituintes distintos que, geralmente, diferem em composição química e/ou física, com o objetivo de obter propriedades específicas, diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente, tendo uma interface reconhecível entre os componentes. Assim, ao se criar novos materiais compósitos, busca-se a melhoria de propriedades mecânicas seletivas, tais como, tração, flexão, dureza e impacto, ou resistência às solicitações térmicas ou a outros fatores do meio ambiente. Existem inúmeros tipos de materiais compósitos. Uma das classes de materiais compósitos é a de laminados, que, de acordo com Neto e Pardini (2006), são constituídos por uma matriz (polimérica, metálica, cerâmica, etc.) que aglomera um reforço (fibras longas, fibras curtas, partículas, etc.).

Nesta revisão bibliográfica, deu-se ênfase para os compósitos laminados de alto desempenho, utilizados principalmente pela indústria aeronáutica. Abordagem motivada por citações como as de Damato (2010) e Michaels (2013), para quem a proporção de compósitos em aeronaves civis modernas pode superar a 50 % do total de materiais aeroembarcados (Figura 2.1), como demanda por redução de peso (aumento da carga tarifada para uma dada potência motora ou redução do consumo de combustível, etc.). A redução de peso de uma estrutura pode ser alcançada pela seleção de materiais de maior resistência específica (Laminados de Compósitos ou Laminados Metal-Compósito, por exemplo), com a consequente redução de sua espessura.

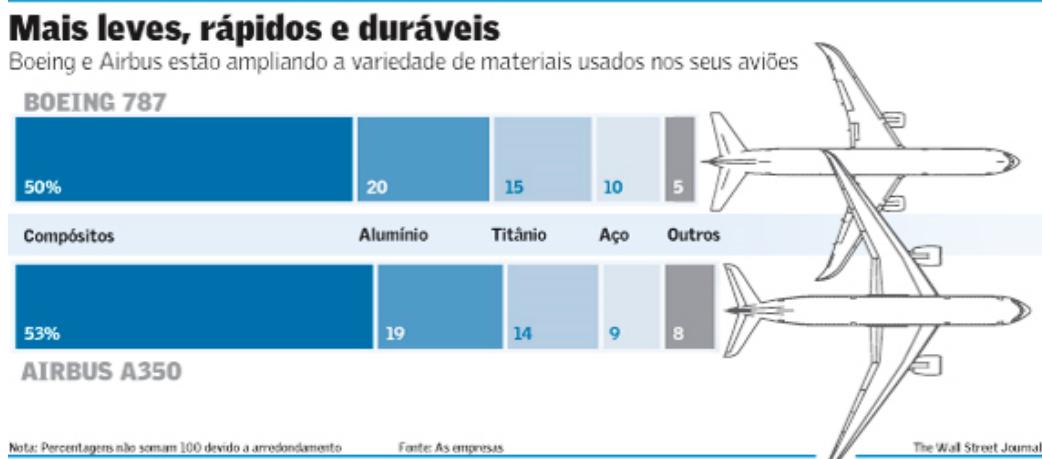


Figura 2.1 – Percentual dos materiais utilizados em aeronaves de última geração (MICHAELS, 2013)

2.1 Laminados de Compósito (LC)

a) Definição

De acordo com Rezende et al. (2011), os compósitos aplicados no setor aeroespacial são exigidos em seus limites, sendo necessário utilizar fibras de alto desempenho, como fibras de carbono, de poliamida aromática (aramida), de vidro ou de boro, impregnadas por sistemas poliméricos que podem ser termorrígidos (epóxi, fenólica, bismaleimidas, poliimidas, benzoxazina, entre outros) ou termoplásticos, como poliéster-éter-cetona, poliéster-imidas e polisulfonas, entre outros. Ainda de acordo com esses autores, estes compósitos poliméricos avançados, classificados como Laminados de Compósitos (LC), têm alta resistência específica (relação resistência-densidade), elevadas resistências à corrosão e à fadiga, expansão térmica controlada e baixo custo de fabricação em comparação a ligas metálicas. Nesses LC, a fibra fornece reforço à matriz polimérica, enquanto esta mantém o reforço unido, distribui a carga aplicada no material e protege a fibra de danos físicos e químicos. Definições, composições e métodos e fabricação dessas fibras podem ser encontradas na literatura, como por exemplo Neto e Pardini (2006), Rezende et al. (2011), Callister (2013). Em particular, por ser menos popular, a aramida (poliamida aromática) pode ser resumidamente descrita, de acordo com Palola et al. (2017), como fibras sintéticas termoplásticas de alta resistência, alto módulo com estrutura química com anéis aromáticos ligados do esqueleto do polímero que induzem alta cristalinidade e rigidez. Callister (2013) menciona existir uma variedade de aramidas, sendo Kevlar® e Nomex® umas das mais famosas marcas registradas da aramida. Elas encontram sua aplicação na fabricação de pneus, cintos de segurança, construções aeronáuticas, coletes à prova de bala, linhas de pesca, etc.

b) Aplicação

De acordo com Ucsnik et al. (2014), vários setores de transporte começaram a colocar os LC em suas estruturas, como por exemplo, o setor aeronáutico (Airbus A380/350, Boeing 787), de indústrias navais e automotivo (Porsche Supercup, Bentley Mulsanne). De acordo com Cândido et al. (2000), componentes estruturais de aeronaves para fins civil e militar, tais como, flapes, leme, carenagens, empenagens, naceles, aileron, tanques de combustível, profundor e cone de cauda, entre outros, que anteriormente eram fabricados em ligas de alumínio, titânio e aços especiais, estão hoje sendo fabricados na sua grande maioria em estruturas laminadas de materiais pré-impregnados de compósitos poliméricos avançados como mostra a Figura 2.2.

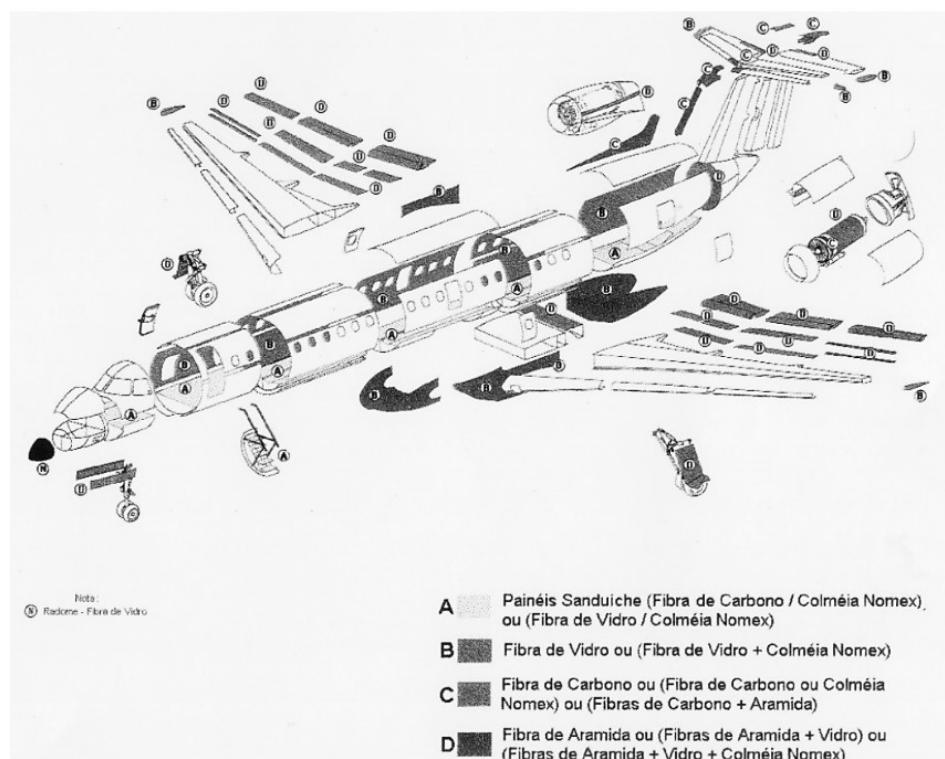


Figura 2.2 – Vista explodida da aeronave EMB-145, mostrando as partes fabricadas em compósitos poliméricos avançadas (CANDIDO et al., 2000)

Nos últimos anos, a indústria naval também começou a utilizar os LC nas suas estruturas. Por exemplo, Mathijsen (2016) dá exemplos de como os LC começaram a revolucionar a indústria naval nos últimos anos. O autor destaca que os LC têm vantagens claras em relação aos metais, tais como, redução de peso para economizar combustível ou transportar maiores cargas, maior ciclo de vida combinando com custo da construção e manutenção menor, manobrabilidade e estabilidade através do baixo centro de gravidade. No caso dos navios militares, a estrutura de compósitos torna os mesmos menos “visível” aos

radares em comparação com uma estrutura de liga metálica leve. As marinhas do mundo ainda não mudaram massivamente para compósitos, mas agora é o momento de realmente fazer essa mudança acontecer, destaca o autor. Ainda, hoje em dia é economicamente viável fabricar a estrutura dos navios de até 25 m de comprimento de LC em série, comparando com a de alumínio. A Figura 2.3 mostra a produção (moldagem e desmoldagem) de casco de LC de um navio.

Williams e Calder (2015) mencionam que a indústria automobilística também já começou a usar laminados de compósito (fibra de carbono) para fabricar carros para o mercado de massa. Citam que a BMW foi um dos primeiros, em seus modelos i3 e i8.

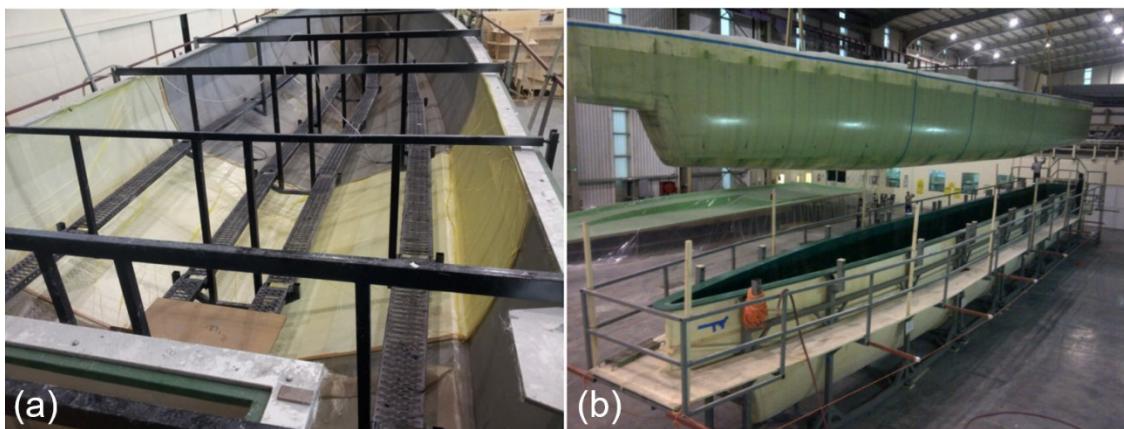


Figura 2.3 – Produção de casco de um navio de LC, onde: (a) Processo de moldagem/aplicação do compósito; (b) Desmoldagem/retirada do molde (adaptado de MATHIJSSEN, 2016)

2.2 Laminados Metal-Compósito (LMC)

a) Definição

Outro grupo dos materiais compósitos é o formado pelos Laminados Metal-Compósito (LMC), que são conhecidos na literatura também como Laminados Metal-Fibra (*Fiber Metal Laminates*) ou Painéis Sanduíche, ilustrado na Figura 2.4. De acordo com Asundi e Choi (1997), consistem de chapas finas de ligas de alumínio de alta resistência, alternadamente unidas a lâminas de compósitos pré-impregnado. Esta definição pode ser expandida para chapas de outros materiais e com somente uma camada de pré-impregnado entre duas chapas finas de metal. Por sua vez, este pré-impregnado (muitas vezes referenciados apenas como *prepreg*) é um compósito polimérico composto de fibras de reforço (carbono, vidro, aramida ou boro) com resina epóxi. Botelho et al. (2006) citam que esta combinação de chapas metálicas e lâminas de compósito de matriz polimérica pode criar um efeito sinérgico em muitas propriedades. Por exemplo, as propriedades mecânicas dos LMC mostraram melhorias sobre as propriedades de ambas as ligas de alumínio e materiais

compósitos individuais. Devido às suas excelentes propriedades, os LMC estão sendo usados como materiais de estruturas da fuselagem da próxima geração de aeronaves comerciais.

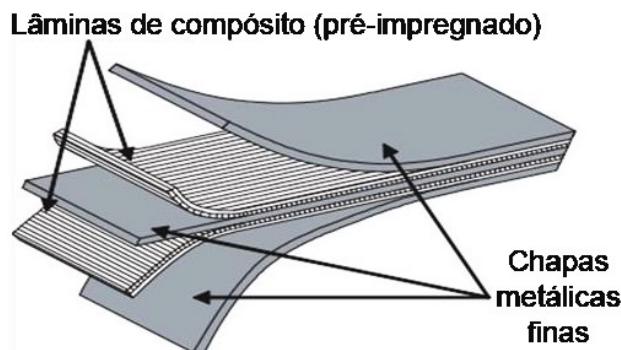


Figura 2.4 – Ilustração do Laminado Metal-Compósito (LMC) - observar que as chapas metálicas ficam externas (adaptado de ASUNDI e CHOI, 1997)

De acordo com Remmers e Borst (2001) e Vermeeren (2003), os primeiros LMC foram desenvolvidos na década de 70, buscando a substituição de uma liga de alumínio tradicional em estruturas de aeronaves. Oficialmente, os LMC foram criados na Universidade Tecnológico de Delft (*Delft University of Technology*) na Holanda, a fim de aumentar o desempenho quanto à fadiga das estruturas de aeronaves. Além de planejado, os LMC mostraram excelentes propriedades de impacto e resistência ao fogo, junto com sua aplicação na estrutura da mesma forma que os painéis tradicionais de alumínio.

b) Tipos dos LMC

Sinmazçelik et al. (2011) e Salve et al. (2016), em artigos de revisão bibliográfica sobre os Laminados Metal-Compósito (LMC), apresentaram uma classificação dos mesmos baseando em chapas metálicas, apresentado na Figura 2.5. Como visto, os autores dividiram os LMC em dois grupos, um deles inclui as ligas de alumínio e o outro ligas de metais alternativos, como titânio, magnésio ou aço. Os autores destacam que os LMC baseados em placas de alumínio são mais comuns no mercado, patenteados e são industrialmente produzidos, como, por exemplo, o ARALL®, baseado em fibras de aramida, o GLARE®, baseado em fibras de vidro de alta resistência, e o CARALL®, baseado em fibras de carbono. A Figura 2.6 apresenta ilustrações esquemáticas dos LMC do tipo ARALL®, GLARE® e CARALL®.

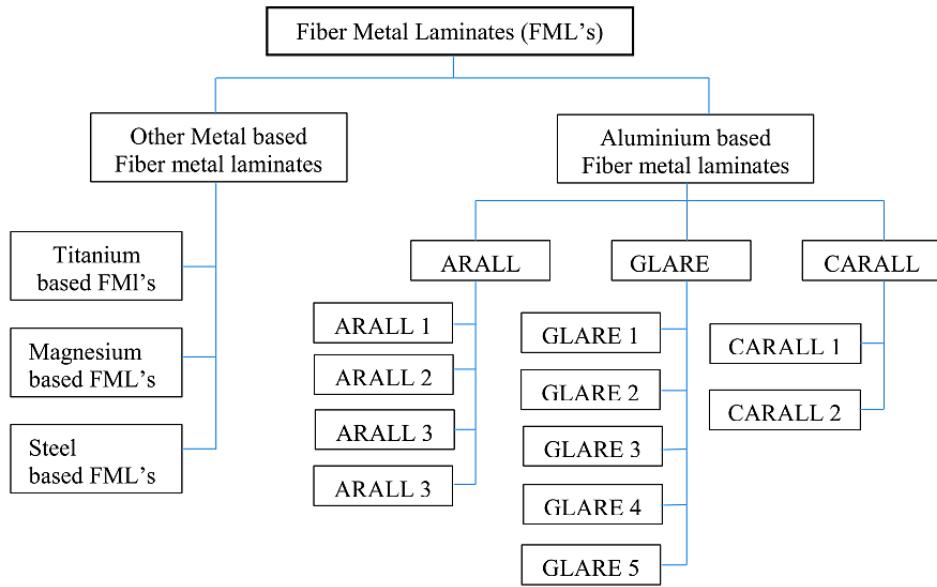


Figura 2.5 – Classificação dos Laminados Metal-Compósito (LMC) típicos pelo material das chapas metálicas (SALVE et al., 2011)

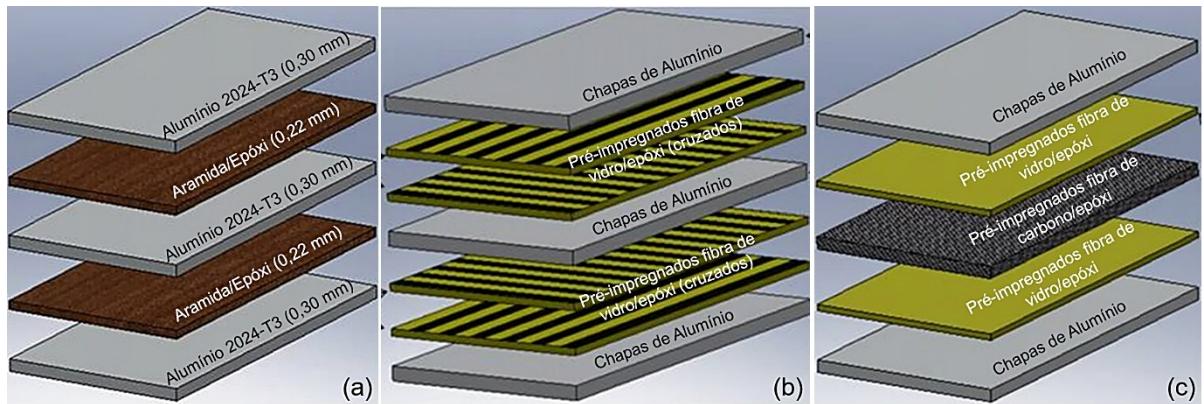


Figura 2.6 – Ilustrações esquemáticas dos Laminados Metal-Compósito (LMC), onde: (a) ARALL®; (b) GLARE®; (c) CARALL® (adaptado de SINMAZÇELIK et al., 2011)

Khan et al. (2009) mostraram algumas características dos LMC do tipo ARALL® (1, 2, 3, 4 e 5) e GLARE® (1, 2, 3, 4, 5 e 6), apresentados na Tabela 2.1. É possível perceber que a principal diferença entre os tipos do ARALL® é a liga de alumínio utilizada, que vai influenciar nas suas principais características (respostas mecânicas), também apresentadas na Tabela 2.1. A liga 7475, por exemplo, tem alta resistência mecânica, mas com baixas propriedades de resistência à fadiga, ao contrário da liga de alumínio 2024. Já no caso do GLARE®, a principal diferença é a direção de empilhamento da fibra (lâminas de pré-impregnado fibra de vidro/epóxi), utilizando na maioria dos seus tipos liga de alumínio do tipo 2024-T3, com uma faixa de espessuras de 0,2 a 0,5 mm. Excetua-se o GLARE® 1, que usa 7475-T61 com uma faixa de espessura de 0,3 a 0,4 mm.

Tabela 2.1 – Características dos tipos de ARALL® e GLARE® industrialmente produzidos (KHAN et al., 2009)

	Grade	Metal type	Metal thickness (mm)	Fibre layer (mm)	Fibre direction (°)	Stretched (%)	Characteristics
ARALL	1	7075-T6	0.3	0.22	0/0	0.4 stretched	Fatigue, strength
	2	2024-T3	0.3	0.22	0/0	0.0 as-cured	Fatigue, formability
	3	7475-T76	0.3	0.22	0/0	0.4 stretched	Fatigue, strength, exfoliation
	4	2024-T8	0.3	0.22	0/0	0.0 as-cured	Fatigue, elevated temperature
GLARE	1	7475-T61	0.3-0.4	0.266	0/0	0.4 stretched	Fatigue, strength, yield stress
	2	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/0, 90/90	0.0 as-cured	Fatigue, strength
	3	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/90	0.0 as-cured	Fatigue, impact
	4	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/90/0, 90/0/90	0.0 as-cured	Fatigue, strength in 0/90 direction
	5	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/90/90/0	0.0 as-cured	Impact
	6	2024-T3	0.2-0.5	0.266	±45, ±45	0.0 as-cured	Shear, off-axis properties

Almeida Jr et al. (2014) estudaram como uma simples orientação de empilhamento de fibras (reforço) dos LC influencia no comportamento de cisalhamento interlaminar e no plano dos LC de fibra de vidro/epóxi. Os laminados foram produzidos por moldagem por transferência de resina com auxílio de bolsa de vácuo, variando as orientações de fibra. As amostras com orientação aleatória mostraram resistência ao cisalhamento no plano mais do que duas vezes maior. O módulo de cisalhamento dinâmico foi maior para as amostras com as fibras orientadas longitudinalmente.

c) Vantagens e desvantagens dos LMC

Vogelesang e Vlot (2000) descrevem o desenvolvimento desta nova família de materiais LMC para estruturas aeroespaciais avançadas. Esses autores destacam que os principais motivos para que a indústria aeronáutica tenha empregado os LMC do tipo GLARE® são as vantagens de redução de peso e custo de fabricação, juntamente com aumento de tolerância ao dano e segurança. Ao mesmo tempo este material tem uma boa resistência à fadiga, facilidade de fabricação, inspeção e reparabilidade juntos com boa resistência à corrosão que aumentam a probabilidade da sua aplicação estrutural, principalmente do setor aeroespacial.

Salve et al. (2016) em sua revisão listaram e descreveram as principais vantagens dos LMC, apresentadas na Tabela 2.2, comparando os mesmos com metal e com os LC. Resumindo, os LMC trazem diversas vantagens, tais como, melhorias no comportamento de material (maior resistência de fadiga, elevada resistência, alta resistência a fratura, alta resistência ao impacto, alta capacidade de absorção de energia), propriedades físicas (baixa densidade), segurança (resistência ao fogo), durabilidade (excelente resistência a umidade, a corrosão e baixa degradação do material) e economia de custo (menor peso e número de peças de uma estrutura, menor número de reparos e inspeções).

Tabela 2.2 – Vantagens dos Laminados Metal-Compósito (LMC) (SALVE et al., 2016)

Key Parameters	Ref.	Details
High strength	[4,5]	FML's are hybrid structures based on thin metal alloy sheets and plies of fiber-reinforced polymeric materials. Metal and fiber reinforced composites both which have high strength and stiffness result in high strength and stiffness FML's.
Low density	[7]	Due to the presence of thin layers of metals and composite piles, it has low density. So, FML's are a weight saving structural material compare to others.
Excellent corrosion resistance	[7-10]	FML's gives excellent moisture resistance and high corrosion resistance because of polymer based.
Excellent moisture resistance	[1,10]	Due to the presence of metal layers at outer surface the moisture absorption in FML's composites is slower when compared with polymer composites, even under the relatively harsh conditions. Additionally pregreg layers are able to act as moisture barriers between the various aluminium layers inside of the FML's.
High fatigue resistance	[5,10]	It gives high fatigue resistance because of intact bridging fibers in the wake of the crack, which restrain crack opening. FML's have excellent fatigue characteristics over conventional metal and composite.
High energy absorbing capacity	[6,10]	Based on investigation data, FML's are absorbing significant energy through localized fiber fracture and shear failure in the metal plies.
High impact resistance	[8,11]	Impact deformation is actually a significant advantage of FML's, especially when compared to composites.

Da Costa et al. (2012) avaliaram o efeito de ciclos de choque térmico nas propriedades mecânicas dos LMC (alumínio AA2024/fibra de vidro/epóxi). Os resultados mostraram que os ciclos de choque térmico (-50 e +80 °C) não resultaram em alterações microestruturais significativas dos corpos de prova de LMC, particularmente na camada de compósito. Similarmente, não foi observado efeito apreciável nas propriedades mecânicas de LMC pelos ciclos de choque térmico. Para Botelho et al. (2007), a absorção de humidade em LMC é mais lenta quando comparada com LC poliméricos, mesmo sob as condições relativamente duras, devido à barreira das camadas exteriores de metal (em maiores dos seus casos é alumínio) como apresentado na Figura 2.4.

Lin et al. (1991) destacam que foi desenvolvido um novo tipo de LMC (CARALL®), constituído por finas camadas de fibra de carbono/epóxi pré-impregnado entre folhas de alumínio. Os autores são um dos primeiros a apresentar e avaliar este novo material na época, esquematicamente apresentado na Figura 2.6(c). Em sua avaliação, este novo material híbrido mostrou elevado módulo de elasticidade, maior resistência à tração e menor densidade do que a liga de alumínio 2024-T3. O CARALL® também apresentou excelente resistência de propagação de trincas de fadiga, superior na direção longitudinal das fibras de carbono. Foi demonstrado que a redução do crescimento de trinca é relacionada com aumento da espessura da camada de compósito (fibra de carbono/epóxi). Os autores mencionam que resistência à propagação de trincas por fadiga do CARALL® poderia ser reduzida através de alívio de tensões residuais nas chapas de alumínio após o processo de fabricação (laminação).

Na revisão de Asundi e Choi (1997), é descrito que esta combinação de materiais metálicos (chapas finas de liga de alumínio de alta resistência) coladas com lâminas de compósitos (fibra de carbono/epóxi) dá uma combinação ideal. Os LMC oferecem uma massa menor em comparação com a mesma estrutura de metal. Ainda o número de peças necessárias para construir um componente pode ser drasticamente menor do que o número de peças necessárias para construir o mesmo componente de liga metálica. Isso pode levar a economias de mão-de-obra, assim, compensando elevado preço de materiais compósitos. Estas características, juntamente com boa resistência a fadiga, alta resistência estrutural, uma excelente tolerância ao dano, resistência à corrosão, boa resistência ao fogo, produção mais simplificada e com custo menor tornam este material muito atraente para futuras estruturas de aeronaves.

Burianek et al. (2003) explicaram o denominado efeito de ponte (*bridging*), através do qual os LMC conseguem minimizar a taxa de crescimento de trincas por fadiga, como apresentado na Figura 2.7. Neste caso, as trincas nas chapas metálicas se iniciam em bordas livres, parecido com as áreas de alta concentração de tensão, como furos e entalhes. Os pré-impregnados da camada de compósito transferem as cargas, diminuindo a intensidade de tensão na trinca e reduzindo a taxa de crescimento da mesma. Como resultado, através deste efeito de ponte, o crescimento de trincas nos LMC é significativamente reduzido em comparação com um metal monolítico. Os autores destacam que este comportamento pode levar a uma melhoria de cem ou mais vezes na taxa de crescimento de trincas, em comparação com as chapas de liga de alumínio monolítico.

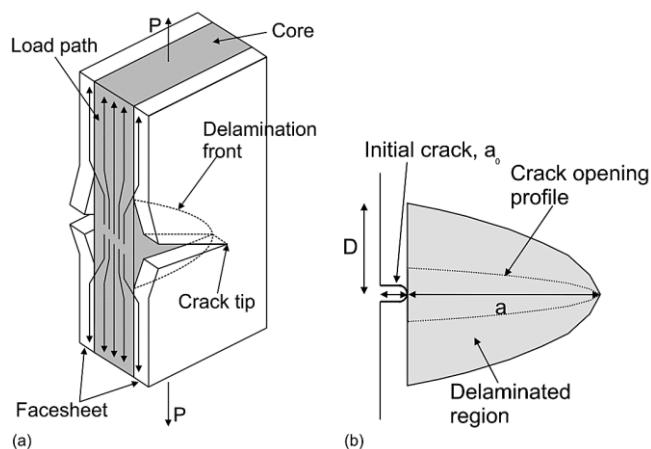


Figura 2.7 – Esquema de efeito de ponte (*bridging*) nos LMC, onde: (a) Vista 3D; (b) Vista no plano 2D (BURIANEK et al., 2001)

Roebroeks (1994) afirmou já naquela época que os LMC eram uma alternativa atraente para substituir as ligas de alumínio monolítico em estruturas de aeronaves. No seu artigo, o autor apresenta alguns benefícios dos LMC, focando na aplicação em aeronaves das

próximas gerações. Por exemplo, propagação e crescimento de trinca por fadiga de LMC em juntas sob condições de carregamento são bem superiores em comparação com as ligas de alumínio. A tolerância aos danos das estruturas de GLARE® é significativamente melhor do que a das ligas de alumínio. Os LMC podem reduzir o custo de uso através do menor peso da estrutura de uma aeronave ainda combinando com economia de custos na produção. No entanto, LMC poderiam ser uma excelente opção, do ponto de vista de segurança, para muitas partes da nova geração de aeronaves. Uma nova filosofia de projeto baseada em um maior nível de segurança (resistência ao fogo e redução do número de inspeções) em comparação com os padrões atuais pode aumentar drasticamente o uso dos LMC. O crescimento mais lento de trincas indica a possibilidade de menor frequência entre as inspeções e maior horas de voo de uma aeronave.

Já Cortes e Cantwell (2006) descreve que uma das principais desvantagens dos LMC é associada ao ciclo de processamento para curar a matriz polimérica nas camadas de compósito. Isso aumenta o tempo de ciclo da produção total e diminui a produtividade, consequentemente aumentando o custo final dos LMC.

Em resumo, a partir desta revisão, pode-se dizer que as vantagens e desvantagens dos LMC estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Algumas vantagens e desvantagens dos LMC encontradas na literatura

Características	Efeito	Citações
Resistência à fadiga	Elevada	Lin et al. (1991); Remmers e Borst (2001); Vermeeren (2003); Sinmazçelik et al. (2011)
Resistência à corrosão	Elevada	Asundi e Choi (1997); Vogelesang e Vlot (2000); Botelho et al. (2006); Cortes e Cantwell (2006); Salve et al. (2016)
Resistência ao impacto	Elevada	Vogelesang e Vlot (2000); Chai e Manikandan (2014); Sinmazçelik et al. (2011)
Densidade	Baixa	Silva (2006); Botelho et al. (2006); Salve et al. (2016)
Facilidade de fabricação	Elevada	Vogelesang e Vlot (2000)
Tempo de fabricação	Elevado	Cortes e Cantwell (2006)

d) Aplicação

Devido a estas vantagens dos LMC grandes empresas do setor aeronáutico, como EMBRAER (Figura 2.2), Aerospatiale, Boing e Airbus (Figura 2.8) começaram a trabalhar com este tipo de materiais e aplicá-los como alternativa para economizar despesas de fabricação e garantir a segurança de seus aviões.

Marsh (2004) destaca que um dos primeiros a aplicar a tecnologia de LMC (do tipo GLARE®) foi a Airbus, em seu modelo A380, conforme apresenta a Figura 2.8. Esta aplicação dos LMC nos revestimentos superiores da fuselagem, de acordo com Silva (2006), que tem

uma área da estrutura primária superficial de aproximadamente 400 m², permitiu uma redução de peso de 25 %, com uma economia de US\$ 280 por kg reduzido. Ainda de acordo com Silva (2006), desde 1990 que empresas, como a Aerospatiale, a Boeing e a Airbus, têm utilizado os LMC em suas aeronaves, por exemplo, em parte da fuselagem, pisos e comprimentos de porão de cargas, portas de inspeção, revestimento de *flaps* e cavernas de pressão. Vlot et al. (1999) destacam que devido aos bons resultados obtidos com a utilização dos LMC, especialmente em estruturas aeronáuticos, outras empresas deste setor que ainda não implantaram os LMC e materiais compósitos vão investir em fabricação e aplicação destes materiais estruturais. A Tabela 2.4, feita por Laliberte et al. (2000), apresenta as principais aplicações dos LMC em componentes e estruturas de aeronave.

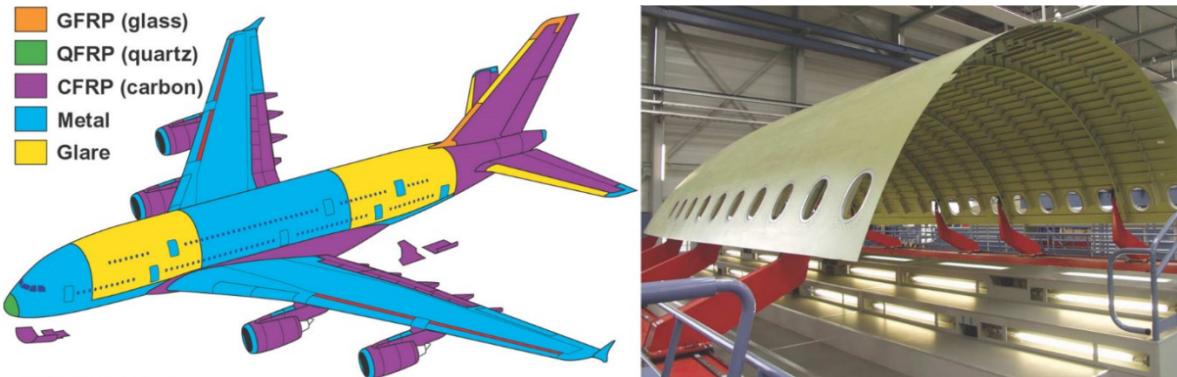


Figura 2.8 – Exemplo de aplicação dos Laminados Metal-Compósito (GLARE®) na aeronave da Airbus modelo A380-800 (adaptado de MARSH, 2004)

Tabela 2.4 – Algumas aplicações dos LMC em produção e desenvolvimento (LALIBERTE et al., 2000)

Manufacturer/Operator	Aircraft and Component	Status	FML
BOMBARDIER AEROSPACE	DHC 8 LOWER FLAP SKINS	Development	ARALL
LOCKHEED	C130 LOWER FLAP SKINS	Development	ARALL
BOMBARDIER AEROSPACE	FUSELAGE TEST BARREL	Development	ARALL/GLARE
DEUTSCHE AEROSPACE	AIRBUS FUSELAGE TEST BARREL	Development	GLARE
CESSNA	FUSELAGE TEST BARREL	Development	GLARE
DEUTSCHE AEROSPACE	AIRBUS REAR PRESSURE BULKHEAD	Development	GLARE
AEROSPATIALE	A330/A340 COCKPIT CROWN	Development	GLARE
USAF	C-5 FUSELAGE REPAIR PATCHES	Development	GLARE
US AIRWAYS	737 BULK CARGO FLOOR	Development	GLARE
GARUDA	MD-11 CARGO FLOOR	Development	GLARE
NORTHWEST AIRLINES	A320/321 CARGO FLOOR	Development	GLARE
AIR CANADA	A320 CARGO FLOOR	Development	GLARE
BOEING 737	LOWER FLAP SKINS	Development	GLARE
USAF	AFT CARGO DOOR ON C17	Application	ARALL
USAF	T38 DORSAL COVERS	Application	ARALL
US GOVERNMENT	MISSLE LOAD PLATFORM (SANDIA)	Application	ARALL
FOKKER	EARLY F100, CRACK STOPPERS	Application	ARALL
BOEING 777 (NEW)	BULK CARGO FLOORS	Application	GLARE
UNITED 737 and 757 (RETROFIT)	BULK CARGO FLOORS	Application	GLARE
QUANTAS ALL BOEING AIRCRAFT (RETROFIT)	BULK CARGO FLOORS	Application	GLARE
MIDWEST EXPRESS DC9 (RETROFIT)	BULK CARGO FLOORS	Application	GLARE
AVIATION EQUIPMENT STRUCTURES	EXPLOSION HARDENED LD3 CONTAINERS	Application	GLARE
BOMBARDIER AEROSPACE	LEAR 45 FORWARD BULKHEAD	Application	GLARE
AT&T	AIRCRAFT ELECTRONICS CABINETS	Application	GLARE

e) *Fabricação dos LMC*

Botelho et al. (2006) e Sinmazcelik et al. (2011) revelam que o processo mais utilizado para produzir os LMC normalmente envolve o uso da autoclave para o processamento dos mesmos. Os autores destacam cinco etapas principais de fabricação dos LMC:

1. Preparação de ferramentas e materiais. Durante esta etapa, as superfícies das chapas de alumínio são pré-tratadas por ácido crômico ou ácido fosfórico, a fim de melhorar a adesão entre a resina (adesivo) e a liga de alumínio usada;
2. Disposição de material, incluindo corte, empilhamento das chapas e lâminas de compósito;
3. Preparação da cura, incluindo a limpeza do ferramental e a montagem do saco/bolsa de vácuo. O último tem papel de um “molde flexível” dentro do qual se posiciona a peça de LMC/LC e através do uso de bombas de vácuo cria-se uma pressão negativa dentro deste saco/bolsa. Isso possibilita tirar grande parte do ar atmosférico junto com a sua humidade para evitar os defeitos de porosidade da resina-matriz do material compósito, obtendo uma peça de boa qualidade;
4. Processo de cura, incluindo o processo de consolidação do fluxo, as reações químicas de cura, bem como a ligação compósito-metal;
5. Pós-estiramento, após o ciclo de cura a quente (aproximadamente 200 °C) na autoclave, para minimizar as tensões residuais nos laminados metal-fibra que fazem tracionar as folhas de alumínio e comprimir as fibras do compósito (pré-impregnado);

Obs: Essa etapa é necessária para aumentar a vida útil dos LMC, principalmente a resistência de fadiga;

6. Inspeção, geralmente por ultrassom, raio X, técnicas visuais e ensaios mecânicos.

Domingues et al. (2003) estudaram o processo de anodização nas chapas de liga de alumínio 2024-T3, utilizando um banho de ácido borato-bórico-sulfúrico. Segundo os autores, a anodização de ácido cromático é atualmente utilizada na indústria aeroespacial para formar filmes de óxido em ligas de alumínio de alta resistência, como Al 2024-T3. O uso de banhos de ácido sulfúrico não é recomendado para esses tratamentos, pois são prejudiciais para a vida à fadiga do material. Os resultados deste estudo foram satisfatórios para aplicações práticas e a resistência de fadiga após tratamento não foi significantemente diferente dos obtidos pelos métodos tradicionais de tratamento (anodização com ácido crômico).

Os LMC industrialmente produzidos utilizam compósito do tipo pré-impregnado (*prepreg*) na sua camada de compósitos (também utilizados neste trabalho).

Rezende et al. (2011) descrevem que os pré-impregnados consistem na combinação de uma matriz de resina polimérica termorrígida com reforços de fibra, em um estágio parcialmente curado. Os pré-impregnados caracterizam-se pelo fato da impregnação ser homogênea por todo o reforço (fibras), com um rígido controle da relação reforço/matriz, normalmente atendendo aos valores volumétricos 60/40, respectivamente. Ainda, de acordo com os autores, a utilização de pré-impregnados traz vantagens como:

- Maior controle de quantidade de fibras nos compósitos finais (laminados);
- Menor toxicidade para o usuário, já que não é necessário impregnar o reforço com a resina no estado viscoso;
- Possibilidade de empilhamentos de acordo com a orientação e propriedades mecânicas finais desejadas;
- Possibilidade de realização de reparos de estruturas danificadas;
- Tempos de armazenagem em freezers por vários meses, no caso da matriz polimérica termorrígida;
- Menor consumo de energia na laminação, pois os pré-impregnados já se encontram no estágio B (parcialmente curados), no caso dos termorrígidos.

Costa et al. (2003) destacam que as matrizes poliméricas termorrígidas mais utilizadas na impregnação de fibras são as resinas epóxi, fenólica e poliamida. Matrizes termoplásticas também têm sido consideradas na obtenção de compósitos com fibras de vidro, carbono ou aramida, tanto na forma de tecidos quanto na de fitas unidirecionais (*tapes*). Ainda a utilização de pré-impregnados no processamento de compósitos permite manter a integridade física do reforço durante o seu manuseio para a moldagem, controlar previamente a fração volumétrica de fibras e ajustar o grau de cura da matriz impregnante, de modo a facilitar o processamento.

Uma das maiores fabricantes de pré-impregnados, a Hexcel Corporation® (2017), em seu manual de usuário denominado como “*Reinforcement for Composites*”, mostra os principais tipos de reforços utilizados pela fabricante, apresentados na Figura 2.9. Cada um destes seis tipos de reforços tem recomendação do próprio fabricante para ser aplicado em diversos casos. Por exemplo, o *Plain wave* é um tecido menos flexível com boa estabilidade de fabricação, comparando com o *Basket wave* que é mais flexível, flutuante e mais forte, mas não é tão estável. O *Leno* é usado onde o número de fios envolvidos é relativamente baixo. Já os reforços do tipo *Four Harness Satin (Crofoot)* e *Eight Harness Satin* têm boa flexibilidade e, por isso, recomendados para aplicar nas superfícies curvadas. O último, por ter menor número de cruzamentos trava-urdume, é ainda mais flexível. Finalmente, o tecido-reforço do tipo *Twill weave* é mais flexível do que o *Plain wave* e possui uma maior estabilidade de fabricação do tecido do que um *Four* ou *Eight Harness Satin*.

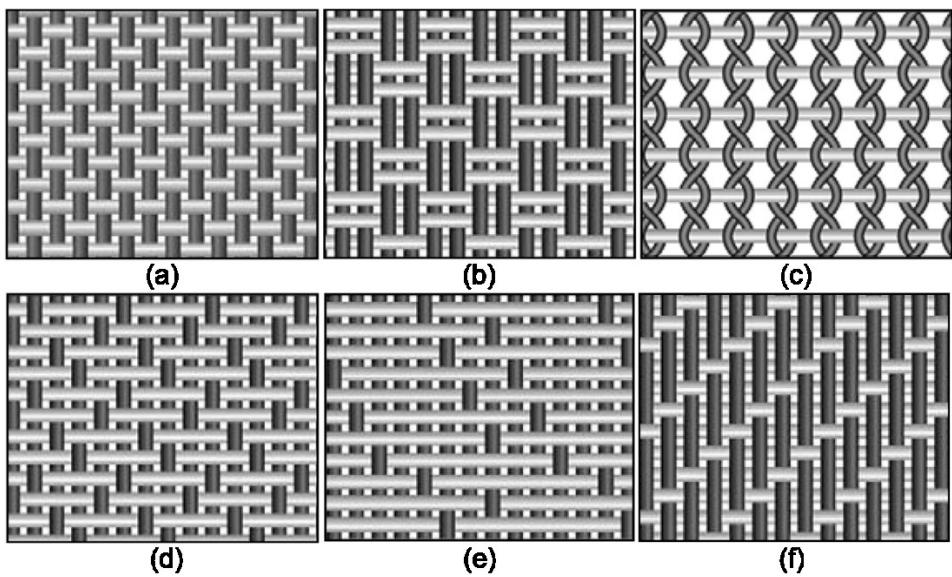


Figura 2.9 – Esquema dos tipos de deposição de trama e urdume das fibras de reforço de pré-impregnados, onde: (a) *Plain wave*; (b) *Basket wave*; (c) *Leno wave*; (d) *Four Harness Satin (Crofoot)*; (e) *Eight Harness Satin*; (f) *Twill weave* (adaptado de HEXCEL CORPORATION®, 2010)

Pozegic et al. (2016) aplicaram nanotubos de carbono na superfície de reforço (fibra de carbono) do material compósito de matriz polimérica. Assim, melhorando adesão interfacial e molhabilidade entre o reforço e a matriz. Ao mesmo tempo, aumentou-se drasticamente condutividade elétrica e térmica do compósito. O compósito com os nanotubos de carbono, em comparação com os sem, mostrou melhorias de 300, 450 e 230 % na condutividade elétrica nas direções ao longo da superfície, espessura e volume, respectivamente. Além disso, os cálculos de condutividade térmica por espessura revelam um aumento de 107 %. Essas melhorias mostram seu potencial da sua aplicação dos nanotubos de carbono nos reforços (fibras de carbono) para melhorar a eficiência das atuais soluções de degelo empregadas na indústria aeroespacial.

2.3 Ligação do metal no compósito em Laminados Metal-Compósito (LMC)

Os LMC necessitam uma união resistente e robusta entre chapas metálicas e camadas de compósito para garantir seu bom desempenho estrutural. A seguir, estão apresentados diversos processos, técnicas e métodos que podem garantir esta ligação, visando sua aplicação em LMC e em juntas compósito-compósito e metal-compósito também.

2.3.1 Co-coladas e co-curadas

Budhe et al. (2017) apresentaram uma revisão atualizada das juntas coladas em materiais compósitos, que abrange artigos publicados de 2009 a 2016. Os autores detalhadamente discutem os principais parâmetros que afetam o desempenho e durabilidade de juntas coladas, tais como, preparação da superfície (remoção de todos os contaminantes, ativação físico-química e próprio tratamento), parâmetros geométricos (espessura da camada colada, configuração de junta colada, comprimento de sobreposição), parâmetros dos materiais (propriedades de adesivo/cola e materiais a serem colados), modo de falha da junta colada, fatores ambientais (efeitos de humidade pré e pós-colagem e temperatura). Segundo os autores, muitas falhas foram resolvidas nos últimos anos através do desenvolvimento de novos materiais, novos métodos e modelos. No entanto, existe um potencial para avaliar e identificar a melhor combinação possível de parâmetros que dariam um desempenho máximo otimizado de juntas coladas aplicadas em compósitos.

Budhe et al. (2017) definiram quatro métodos mais comuns de colagem entre os compósitos, ilustrados na Figura 2.10. Por exemplo, o co-colado (*co-bonding*) é quando um aderente é curado com o adesivo-cola, enquanto no método de co-curado (*co-curing*) ambas as partes são curadas simultaneamente. Já colagem secundária (*secondary bonding*) é quando o adesivo é aplicado entre dois painéis compósitos curados. Finalmente, o método de colagem multi material (*multi material bonding*) é o mesmo que a colagem secundária, mas com uma combinação de metal (por exemplo, aço, Al, Ti, etc.) e laminados de compósito (normalmente de matriz polimérica). Os autores destacam que os métodos co-curado ou co-colado são mais utilizados, em comparação com o método de colagem secundária, pois, o número de partes e os ciclos de cura são reduzidos. Por sua vez, o co-colado é mais utilizado para o reparo de estruturas compósitas. No entanto, para estruturas grandes e complexas, o processo de colagem secundária é mais adequado, por causa do tamanho limitado das autoclaves.

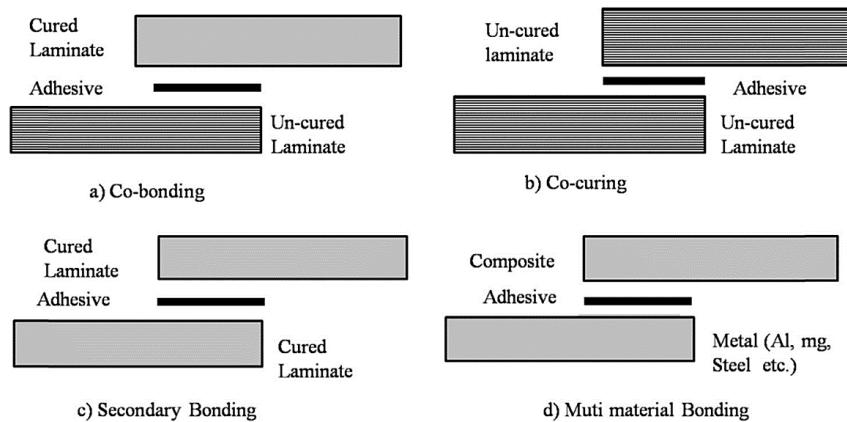


Figura 2.10 – Ilustração dos quatro métodos mais utilizados de colagem aplicados em materiais compósitos (BUDHE et al., 2017)

De Freitas e Sinke (2017) fizeram um estudo da resistência da junta colada de laminado metal-compósito (GLARE® 5-3/2-0,3)¹ e laminados de polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*) com efeito de temperatura (-55; 22 (temperatura ambiente) e 100 °C) e tipo de adesivo/cola (AF163-2 e EA9696). Para isso, os autores empregaram os ensaios de tração quase-estático (3 mm/min de deslocamento da garra) e fadiga (com relação das forças mínima e máxima de 0,1 e forma de onda sinusoidal com frequência de 5 Hz) nos corpos de prova fabricados (Figura 2.11). Os resultados do ensaio de tração mostraram que com aumento da temperatura, diminuiu a rigidez das juntas (40 % em relação à temperatura ambiente) e a redução da temperatura diminuiu a carga máxima (50 % quando comparada com a temperatura ambiente). A iniciação de trinca por fadiga das juntas apresenta uma dispersão muito grande, mas já a propagação de trinca por fadiga apresenta resultados mais estáveis. Para uma vida segura (sem iniciação de trinca) a carga cíclica deve variar de 1200 N a 1500 N, correspondente a 30 % do nível máximo de carga com 2,5 milhões de ciclos. Os resultados mostraram que a propagação de trinca acontece na interface fibra-reforço dos laminados de compósito (polímero reforçado com fibra de carbono) e não na própria linha de colagem. Portanto, a influência do tipo de cola/adesivo e temperatura usadas neste estudo não foram significativas.

¹ O primeiro número (5) após GLARE® significa tipo do LMC, conforme a Tabela 2.1. O segundo/terceiro número (4/3) é relação entre chapas metálicas e camadas de compósito polimérico, respectivamente. Finalmente o terceiro (0,3) espessura da chapa metálica (neste caso é alumínio)

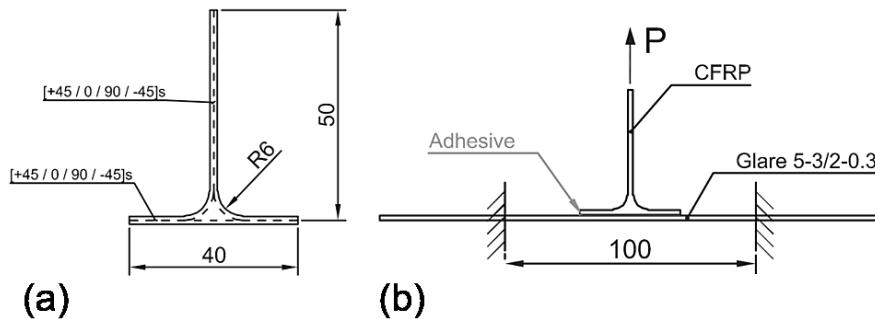


Figura 2.11 – (a) Característica da parte de laminados de compósito (CFRP = *Carbon Fibre Reinforced Polymer*); (b) Características dos ensaios realizados (as dimensões em mm e P é a carga aplicada) (adaptado de DE FREITAS e SINKE, 2017)

2.3.2 Juntas híbridas auxiliadas por ancoradores

A literatura corrente só apresenta a aplicação de reforços (denominados também como ancoradores e/ou pinos) em juntas compósito-compósito e metal-compósito, conhecida ainda como junta híbrida avançada (JHA), apresentada na Figura 2.12. A diferença para outras juntas é que a JHA conta na superfície metálica com pequenos reforços (pinos), agindo como ancoradores mecânicos. Islam e Tong (2016), citando Hart-Smith (1985) e Tong et al. (2002), explicam que as JHA usam simultaneamente a fixação mecânica e a adesão para juntar componentes estruturais semelhantes ou diferentes, com maior resistência e desempenho de fadiga, menor peso e concentração de tensões. A seguir, estão apresentados trabalhos relacionados às JHA, com foco em possíveis processos e técnicas para fabricar e ensaiar este tipo de junta.

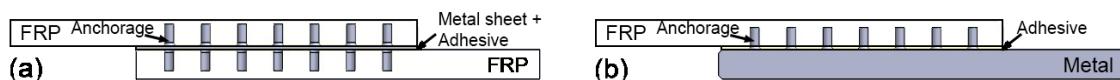


Figura 2.12 – Ilustrações das seções transversais das juntas híbridas avançadas (JHA) do tipo: (a) Compósito-compósito e (b) Metal-compósito (FRP = *fiber-reinforced polymer*)

Earl et al. (2012) aplicaram a técnica Surfi-Sculpt®, utilizando LASER sem material de adição, sobre chapa de Ti-6Al-4V. Os próprios autores destacam que foi possível realizar este trabalho somente após entender o comportamento do calor imposto na chapa (base) e otimização dos parâmetros do LASER. A Figura 2.13(a) apresenta uma ilustração do mecanismo descrito pelo autores para fundir e deslocar material para obter diferentes formatos na superfície de chapa. Observe-se que o metal fundido se desloca na direção oposta aos movimentos repetitivos de feixe do LASER, assim, formando uma “cratera” no final com excesso (“colina”) do material no início. Isto acontece pela combinação da pressão de vapor resultante do *keyhole* e um gradiente da força devido a tensão superficial acionada termicamente ao longo do comprimento de superfície tratada por laser. A Figura 2.13(b) - (e)

mostra a aplicação da técnica para modificar a superfície da chapa para criar diversos formatos.

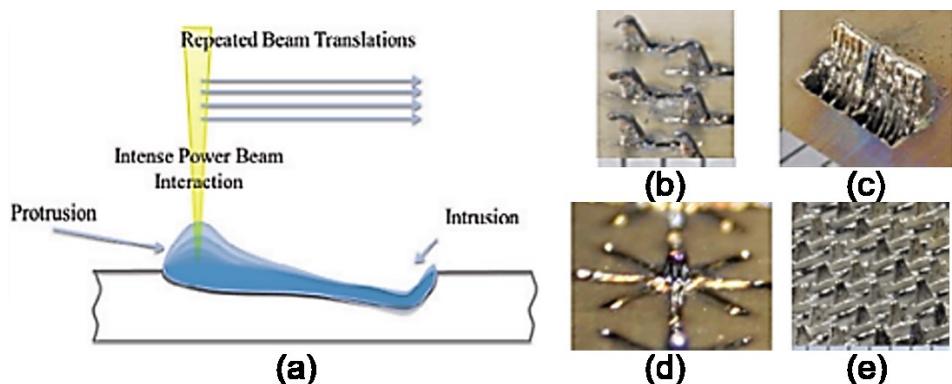


Figura 2.13 – (a) Mecanismo de formação de uma cratera pela técnica Surfi-Sculpt® e suas possíveis aplicações, onde: (b) Formação de ganchos; (c) Formação de parede; (d) Formação de pinos; (e) Formação de vários pinos (adaptado de EARL et al., 2012)

Wang et al. (2015) mostraram um procedimento para transformar uma superfície plana, utilizando a Surfi-Sculpt® com fonte de feixe de elétrons, de uma ampla gama de materiais metálicos em vários tipos/formas de uma alta precisão (Figura 2.14). Os autores destacam que o processo de transferência do metal fundido para um formato depende do ciclo de aquecimento e resfriamento, do gradiente de tensão superficial e da viscosidade do metal fundido. A Surfi-Sculpt® pode ser usada para fabricar muitos tipos de formas na superfície metálica de diferentes materiais. No entanto, uma vez que o processo envolve ciclos de aquecimento e resfriamento, a deformação pode ocorrer durante a fabricação, especialmente em chapas finas.

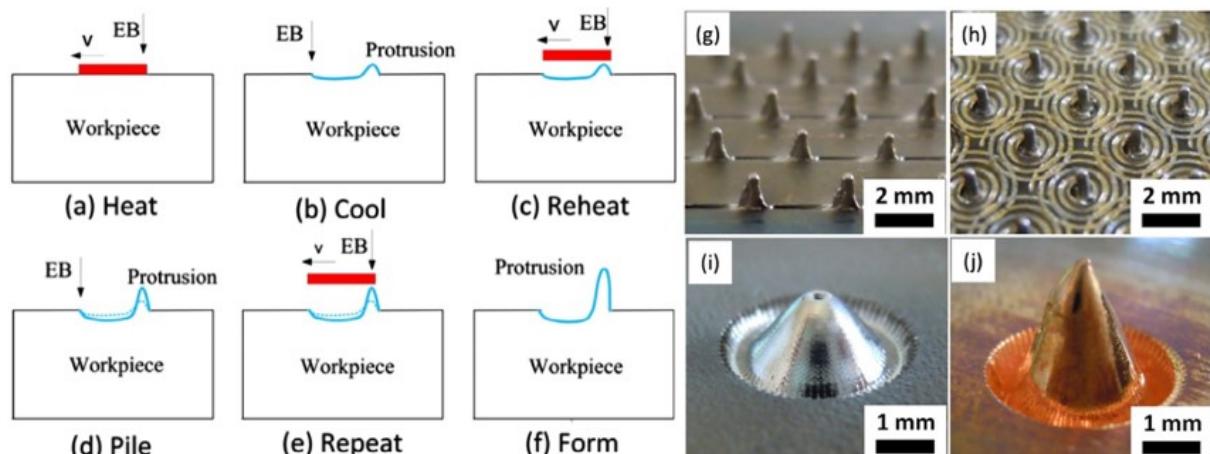


Figura 2.14 – (a) - (f) Uma ilustração de funcionamento da técnica Surfi-Sculpt® utilizando o feixe de elétrons (electron beam = EB); (g) - (j) Tipos de formas de diferentes materiais feitos com a Surfi-Sculpt®, onde: (g) e (h) Ti-6Al-4V; (i) Aço; (j) Cobre (WANG et al., 2015)

Xiong et al. (2015) também aplicaram a técnica Surfi-Sculpt® utilizando um feixe de elétrons (*electron beam*) como fonte de calor. Neste trabalho experimental, os autores estudaram o efeito de orientação de empilhamento das fibras das lâminas de compósito nas propriedades mecânicas da junta de Ti-6Al-4V/compósito (fibra de carbono/epóxi).

Ucsnik et al. (2010) depositaram ancoradores (pinos) pela técnica CMT (*Cold-Metal Transfer*) PIN, numa JHA do tipo metal (aço AISI 304) - compósito (fibra de carbono/epóxi) e compararam a mesma com a junta simples colada. Os ensaios de tração, feitos pela norma ASTM D3528 (ASTM, 2016), mostraram que na JHA com o pino cilíndrico a carga final cresceu em 11,13 %, a força máxima aumentou em até 470 % e a capacidade de absorção da energia aumentou por um fator de 27. As juntas com os pinos do tipo cabeça abaulada mostram um aumento de 52,30 % na carga final, ocorrendo um aumento da força máxima em até 1 000 %, com um fator de 30 na capacidade de absorção de energia. Os autores mencionaram que a JHA com pinos é uma das mais eficientes formas para a união metal-compósito, comparando com os demais (rebitadas, parafusadas e coladas).

Ucsnik (2014) na apresentação do seu trabalho mostrou um estudo da influência da forma do pino na resistência de cisalhamento da JHA do tipo metal-compósito. O autor fez experimentos com quatro tipos de pinos, apresentados na Figura 2.15. A Figura 2.16 mostra a curva Deformação × Tensão dos quatro tipos dos pinos testados através do ensaio de tração. O que chama atenção nessas curvas são que os dois tipos de pinos (cabeça abaulada e cabeça abaulada-pontiaguda) mostraram melhor resultado de resistência à tração, mas foram cisalhados. As outras (cabeça cilíndrica e cabeça pontiaguda) foram simplesmente dobrados no sentido de aplicação de carga. Tentando analisar o motivo pelo qual os ancoradores do tipo cabeça abaulada e abaulada-pontiaguda apresentam maior resistência ao cisalhamento das suas juntas metal-compósito, os autores citam que os mesmos fazem um maior obstáculo pelas suas “cabeças” (forma arredondada do pino) de delaminação do material compósito aplicado e assim não deixando o mesmo dobrar e sair por cima do pino.



Figura 2.15 – Tipos dos pinos que foram depositados por Ucsnik (2014), onde da esquerda para direita: pino cabeça cilíndrica (*cylindrical*); pino cabeça pontiaguda (*pike*); pino cabeça abaulada (*ball-head*) e pino cabeça abaulada-pontiaguda (*ballhead spike pin*) (UCSNIK, 2014)

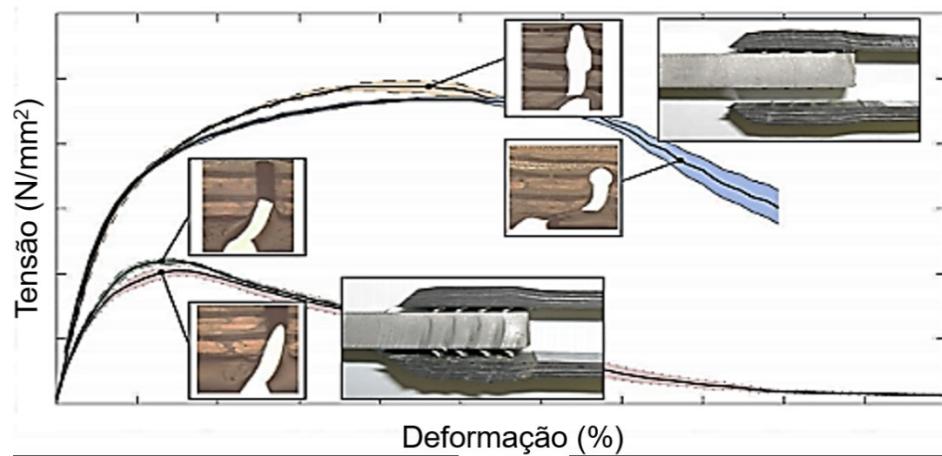


Figura 2.16 – Curva Deformação × Tensão dos quatro tipos de pinos com suas características geométricas após o ensaio de tração (adaptado de UCSNIK, 2014)

Stelzer et al. (2015) testaram o comportamento à fadiga de JHA do tipo compósito-compósito com pinos depositados através da técnica CMT PIN. Para fins de comparação, foram produzidas juntas simples co-curadas. A Figura 2.17(a) ilustra as características geométricas do corpo de prova da junta utilizada neste trabalho. As partes de compósito foram feitas de resina epóxi reforçada por fibras de carbono. As lâminas do compósito foram empilhadas na sequência de $[0^\circ/90^\circ/\pm45^\circ]_{5s}$. Já as chapas metálicas para unir as partes de compósito foram feitas de aço AISI 304 e Ti-6Al-4V de 0,6 e 0,4 mm de espessura, respectivamente. Os pinos na parte superior e na parte inferior de cada chapa foram depositados com a matriz de 4×6 pinos, conforme mostrado na Figura 2.17(b). Na chapa de aço AISI 304 foram depositados pinos do tipo cabeça abaulada-pontiaguda (Figura 2.18(a)) de arame-eletrodo AISI 316L com diâmetro de 0,8 mm. A geometria deste pino resultou em altura final de 3,3 mm e diâmetro da cabeça abaulada-pontiaguda de 1,2 mm. Já na chapa de Ti-6Al-4V depositou-se os pinos do tipo cabeça abaulada (Figura 2.18(b)), utilizando o mesmo material de arame-eletrodo com diâmetro de 0,8 mm. A altura do pino foi aproximadamente de 1,85 mm com diâmetro de cabeça de 1,3 mm. Depois do processo de deposição dos pinos as chapas foram tratadas por jato de areia para aumentar rugosidade e consequentemente a adesão entre compósito e chapa.

Outros dois tipos de uniões compósito-compósito encontrados na literatura foram feitos por meio de grampos (denominados de Z-pinos) de titânio por Stelzer et al. (2015), como mostrado na Figura 2.18(c) e (d). A diferença entre os mesmos está no diâmetro dos Z-pinos (0,76 e 1,14 mm). Estes grampos foram colocados nos furos das chapas, feitos antes, com a mesma quantidade e nas mesmas posições que os pinos depositados pela técnica CMT PIN. Os resultados dos ensaios de fadiga em todos os tipos de junta foram analisados pela norma ASTM E739 (ASTM, 2015) e mostrados na Figura 2.19 (Número de ciclos × Tensão de cisalhamento) com 50 % de probabilidade de falha. Juntas reforçadas por pinos

de aço inoxidável e com Z-pinôs de titânio com diâmetro de 1,14 mm mostram melhores resultados do ensaio em comparação com coladas e reforçadas por Z-pinôs com diâmetro de 0,76 mm. O comportamento de fadiga nas juntas coladas e reforçadas com os Z-pinôs (0,76 mm de diâmetro) foi semelhante. Percebeu-se que somente o aumento de diâmetro dos Z-pinôs de 0,76 para 1,14 mm levou-se para um desempenho de fadiga semelhante com a junta com os pinos de aço inoxidável. Por sua vez, os pinos de Ti-6Al-4V apresentaram menor eficiência na junta compósito-compósito. Provavelmente, por causa das suas características geométricas que não conseguem transmitir a carga igual ao outro. Os autores observarem que durante os ensaios com os Z-pinôs de 0,76 mm de diâmetro os mesmos furaram o material compósito, assim, reduzindo a resistência da junta.

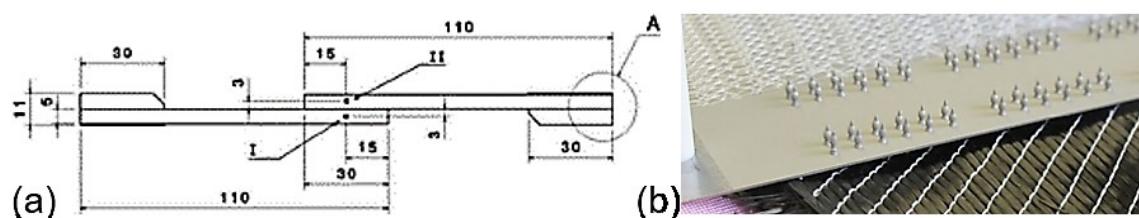


Figura 2.17 – (a) Características geométricas de corpos de prova utilizados; (b) Fixação da chapa metálica de aço AISI 304 com os pinos no molde juntos com a fibra de carbono (reforço) (destaca-se que foi moldada uma chapa com pinos e após a moldagem e a cura foi cortada nos corpos de prova) (adaptado de STELZER et al., 2015)

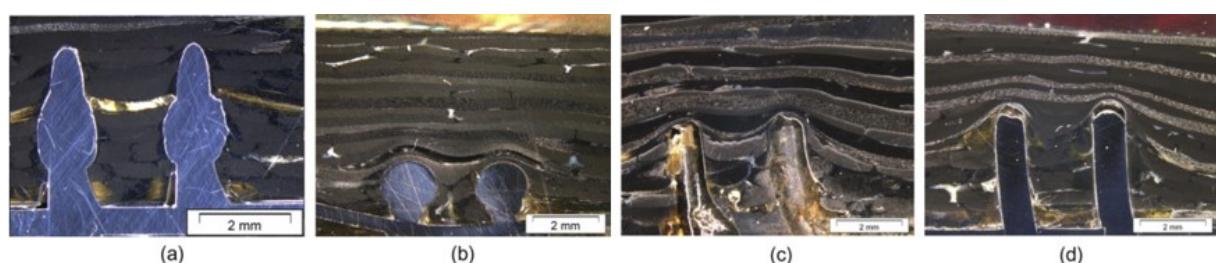


Figura 2.18 – Macrografias das partes falidas após o ensaio de fadiga das juntas híbridas avançadas (JHA), onde: (a) Pinos do tipo cabeça abaulada-pontiaguda de AISI 316L depositados pela CMT PIN; (b) Pinos do tipo cabeça abaulada de Ti-6Al-4V depositados pela CMT PIN; (c) Z-pinôs de Ti-6Al-4V com diâmetro de 0,76 mm; (d) Z-pinôs de Ti-6Al-4V Ti com diâmetro de 1,14 mm (adaptado de STELZER et al., 2015)

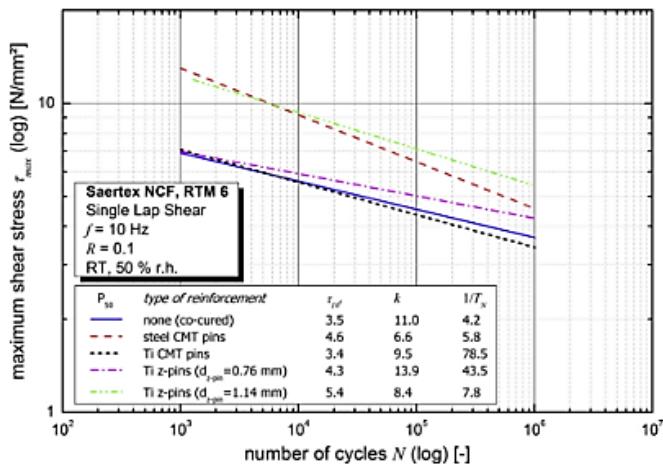


Figura 2.19 – Curvas S-N (Número de ciclos × Tensão de cisalhamento máximo) com 50 % de probabilidade de falha para juntas híbridas avançadas (JHA) e co-curadas (STELZER et al., 2015)

Em outro trabalho, Stelzer et al. (2016) seguiu a mesma linha de pesquisa do trabalho apresentado no parágrafo anterior (Stelzer et al., 2015), trabalhando com a mesma JHA do tipo compósito-compósito (Figura 2.17(a)). Neste caso, os autores investigaram o efeito da distribuição dos pinos, ilustrados na Figura 2.20, testando através do ensaio de tração esta configuração comparativamente com JHA com Z-pinos (de 0,76 e 1,14 mm de diâmetro), simples colada e co-curada. Os autores usaram fibra de carbono/resina epóxi como material compósito e chapas finas de aço inoxidável (AISI 304) e liga de titânio (Ti-6Al-4V) como ligação das JHA compósito-compósito. Este trabalho mostra que o uso de pinos aumentou as tensões de ruptura e altera a tolerância ao dano em comparação com juntas coladas e co-curadas. Isto é alcançado sem a necessidade de cortar fibras ou fazer furos (juntas com Z-pinos), portanto sem um aumento significativo do peso estrutural. A posição com maior número dos pinos nas laterais da chapa (Figura 2.20(c)), depositados através da técnica CMT PIN, mostrou melhores resultados em termos de força máxima e falha comparando com as demais juntas. O alinhamento de pinos próximo ao centro (Figura 2.20(a)) resultou em maiores tensões de falha final. O arranjo de pinos não mostrou influência relevante no nível de energia de deformação total.



Figura 2.20 – Ilustração das três diferentes distribuições de pinos sobre chapa fina em ligação da junta híbrida avançada (JHA) do tipo compósito-compósito (STELZER et al., 2016)

Nguyen et al. (2016) investigaram JHA (Ti-6Al-4V–pré-impregnado do tipo epóxi/fibra de carbono) usando métodos experimental, elementos finitos (FE) e analítico. As partes metálicas com pinos foram impressas/fabricadas por processo fusão seletiva por LASER (*Selective LASER Melting*), fundindo pó metálico camada por camada para construir um formato desejado (neste caso pino). Posteriormente na superfície com pinos foram aplicadas as lâminas de pré-impregnado (unidireccionais) e efetuado o ciclo de cura na autoclave (120 °C, 620 kPa, 1 h). Foi testado o desempenho da junta através de corpos de prova reforçados com único e múltiplos pinos. Nos corpos de prova com único pino, variou-se a geometria do pino (comprimento, L, e diâmetro, D, Figura 2.21(a)), sem alteração do formato/tipo de pino, com objetivo de otimizar estas características. Neste caso foi feito um ensaio de tração do tipo *pull-out*, tracionando as duas partes (metálica com pino e compósito) paralelo ao eixo do pino, conforme mostrado na Figura 2.21(a). Já o gráfico da Figura 2.21(b) revela os resultados do ensaio de tração dos corpos de prova com um único pino, onde percebe-se que o pino com diâmetro (D) de 1,0 mm e altura (L) de 3,5 mostrou resistir maior força. Os autores também estudaram a resistência e crescimento de trinca, preparando corpos de prova pela norma ASTM D5528 (ASTM, 2013) (Figura 2.22) com múltiplos pinos com espaçamento de 6,27 mm e aplicando ensaio de tração do tipo viga em bi-apoiada (*Double Cantilever Beam*). Neste caso, três diferentes tipos de corpos de prova foram testados, sendo um deles sem pinos e outros dois com mesmo diâmetro (0,5 mm) e duas alturas (2 e 4 mm) dos pinos. A Figura 2.23 mostra os resultados, onde percebe-se que os corpos de prova com pinos mostraram-se mais resistentes em comparação com os sem.

Nguyen et al. (2016) ainda compararam os próprios resultados com a junta do tipo Z-pinôs do trabalho de Pingkarawat e Mouritz (2014) (Figura 2.23(b)). É importante destacar que os Z-pinôs tinham as mesmas características geométricas ($D = 0,5\text{ mm}$ e $L = 2\text{ mm}$), mas mostraram uma resistência à fratura menor em comparação com a junta com pinos feitos por processo fusão seletiva por LASER. Os ensaios com múltiplos pinos mostraram que integração dos mesmos, em apenas 0,5 % de nominal volume da amostra, aumentou a carga máxima, a tenacidade à fratura por iniciação e a tenacidade à fratura em estado estacionário em 270, 250 e 370 %, respectivamente. Os modelos de elementos finitos, usando a resposta *pull-out* caracterizada em testes com único pino, fornecem excelentes previsões de comportamento experimental em juntas múltiplos pinos sem calibração adicional.

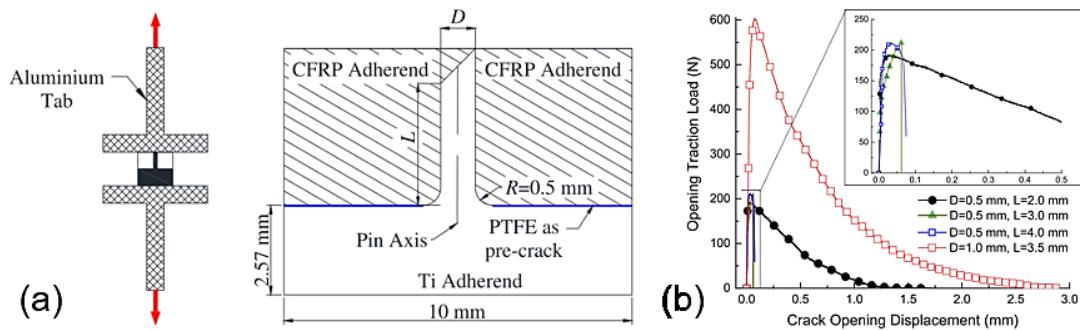


Figura 2.21 – (a) Ilustração das características do ensaio de tração do tipo *pull-out* em amostra com único pino com sua seção transversal; (b) Resultados do ensaio de tração do tipo *pull-out* nos corpos de prova com único pino com diferentes diâmetros (D) e alturas (L) (adaptado de NGUYEN et. al, 2016)

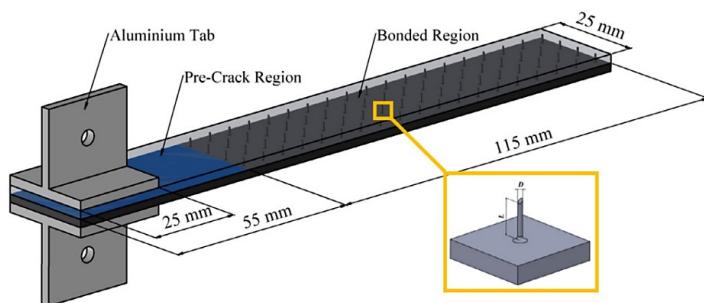


Figura 2.22 – Ilustração das características de corpo de prova do tipo viga em arco duplo (*Double Cantilever Beam*) feito pela norma ASTM D5528 (NGUYEN et. al, 2016)

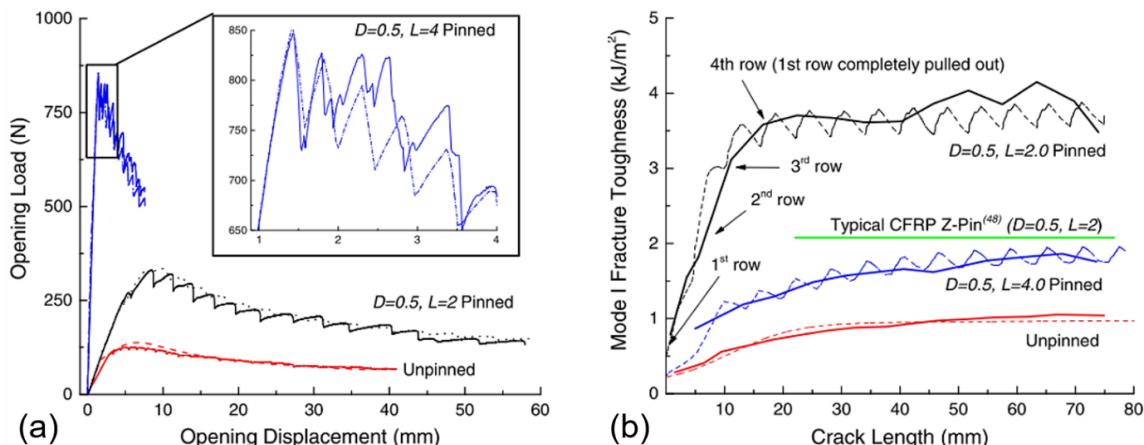


Figura 2.23 – Resultados experimentais (linhas sólidas) e numéricos (linhas tracejadas) do ensaio de tração dos corpos de prova com múltiplos pinos com diferentes diâmetros (D) e alturas (L), onde: (a) Deslocamento × Carga; (b) Comprimento de trinca × Resistência à fratura (adaptado de NGUYEN et. al, 2016)

Em outro trabalho, Nguyen et al. (2017) fizeram um estudo variando o ângulo de inclinação do pino (*offset angle*) em corpos de prova reforçados com único pino (Figura 2.24(a)). Os autores utilizaram os mesmos materiais, equipamentos, ensaios e metodologia do trabalho apresentado no parágrafo anterior (Nguyen et al. (2016)). Os ângulos de inclinação do pino foram de 0°, 10°, 20° e 30° e os mesmos foram testados através do ensaio

de tração do tipo *pull-out*. O gráfico da Figura 2.24(b) apresenta os resultados deste ensaio, onde percebe-se que os pinos com maior ângulo de inclinação mostraram força máxima ligeiramente maior em comparação com o pino reto (0°). Em outra parte do trabalho, os autores estudaram o efeito de diferentes formatos de pinos (sem inclinação, 0°) impressos/fabricados por processo fusão seletiva pó LASER (*Selective Laser Melting*), apresentados na Figura 2.25. A Figura 2.26 mostra os resultados do ensaio de tração do tipo *pull-out* (Deslocamento × Força), onde observa-se que alteração do formato do pino faz uma diferença significativa. A resposta do pino ranhurado (*grooved*) foi semelhante ao pino cilíndrico (*cylindrical*), mas com maior carga máxima (14 % a mais) e a curva mais linear após o pico máximo que resultou em 60 % maior a absorção de energia. Provavelmente, este aumento da força máxima foi causado por aumento da área de contato pino-compósito em 30 % e bloqueio mecânico através das características da superfície mais “rugosa”. Já no caso dos pinos do tipo pirâmide (*pyramid*) e helicoidal (*helical*), observou-se uma trinca no compósito, o que provocou um comportamento catastrófico (inclinação da curva de deslocamento da carga) durante o ensaio. A carga máxima dos pinos do tipo pirâmide e helicoidal foi cerca de 20 % maior do que do pino cilíndrico. Em termos de energia absorvida, o pino helicoidal absorveu uma quantidade de energia próxima ao pino cilíndrico, enquanto o pino do tipo pirâmide aumentou a sua energia na cerca de 30 % sobre o pino cilíndrico.

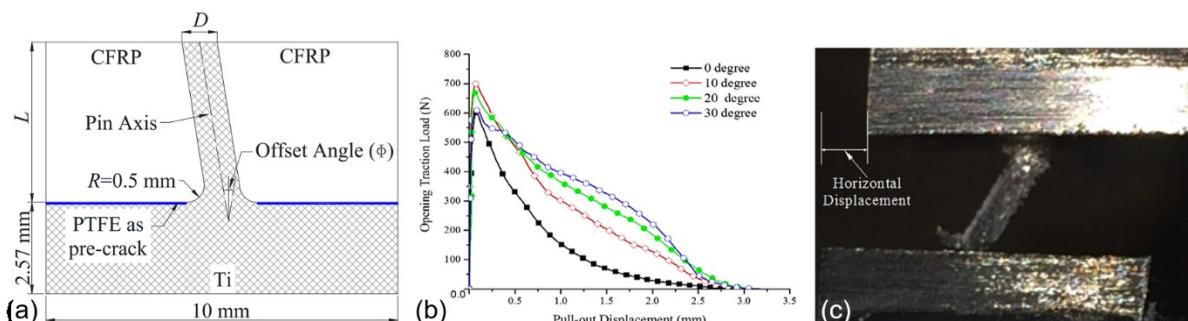


Figura 2.24 – Características do ensaio de tração do tipo *pull-out* com inclinação de único pino: (a) Ilustração da seção transversal das características do corpo de prova; (b) Resultados do ensaio Deslocamento × Força; (c) Exemplo de corpo de prova com pino inclinado após o ensaio (adaptado de NGUYEN et al., 2017)

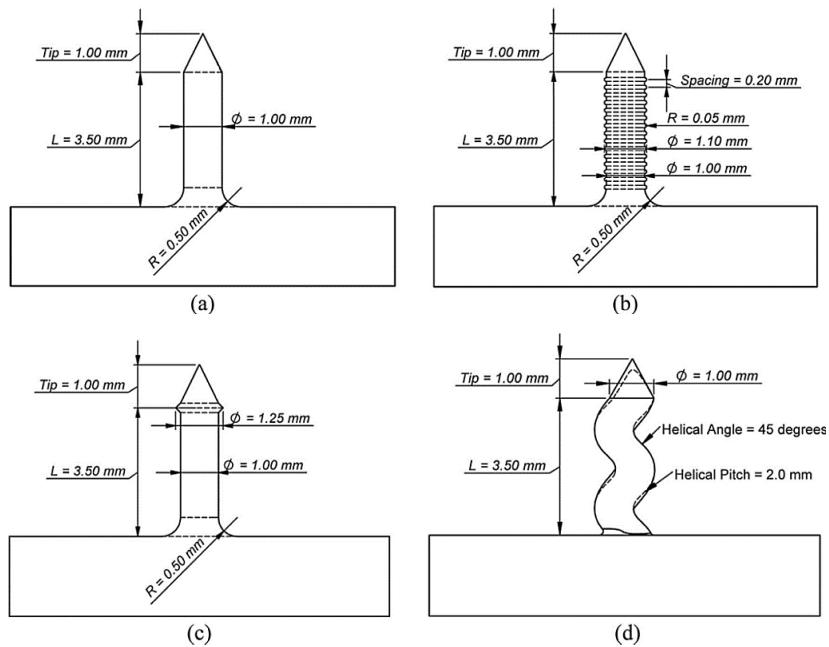


Figura 2.25 – Ilustração dos corpos de prova com diferentes formatos de único pino para o ensaio de tração do tipo *pull-out*, onde: (a) Cilíndrico (*cylindrical*); (b) Ranfurado (*grooved*); (c) Pirâmide (*pyramid*); (d) Helicoidal (*helical*) (NGUYEN et al., 2017)

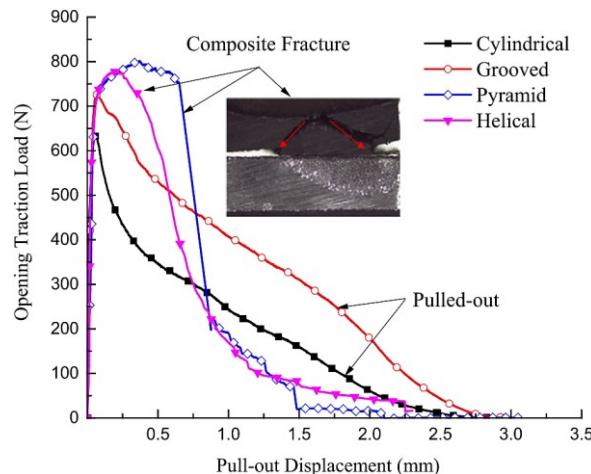


Figura 2.26 – Resultados do ensaio de tração do tipo *pull-out* nos corpos de prova com único pino, variando o formato do mesmo (NGUYEN et al., 2017)

2.4 Propriedades mecânicas de LMC

Sabe-se que nas partes estruturais ou estruturas que podem afetar a saúde ou a vida de seres humanos é necessário executar diversos ensaios mecânicos. Como os LMC em sua maior parte estão aplicados nas partes estruturais de uma aeronave, é necessário aplicar ensaios mecânicos para testar/simular diversas situações críticas durante o seu uso. Nesta seção da revisão bibliográfica estão apresentados alguns ensaios para avaliar as

propriedades mecânicas dos LMC encontrados na literatura. Por exemplo, ensaio de dobramento (flexão), fadiga, tração, impacto de baixa e alta velocidade, etc.

2.4.1 Ensaio para avaliar as propriedades mecânicas

a) Ensaio de flexão (dobramento)

A norma ASTM D790 (ASTM, 2017) determina as propriedades de flexão como a resistência à flexão e o módulo. Neste ensaio, um corpo de prova de seção transversal retangular é carregado em um modo de flexão de três, quatro ou de cinco pontos, conforme mostrado na Figura 2.27. De acordo com Sinmazçelik et al. (2011), as propriedades mecânicas dos laminados de compósitos são determinadas por adesão entre fibra e matriz. As mesmas propriedades dos LMC são dependentes da ligação de interface entre a camada de compósito e chapas finas de metal. A determinação desta adesão não é uma tarefa fácil, portanto, vários métodos de teste foram propostos e mostrados na literatura. Por exemplo, um deles é o ensaio de dobramento de cisalhamento interlaminar e de fratura interfacial.

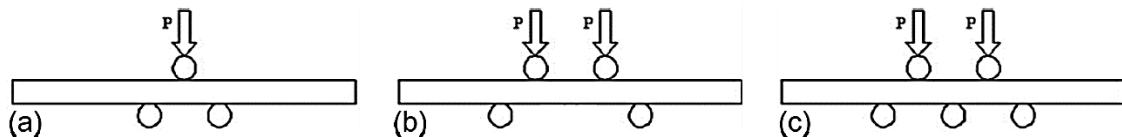


Figura 2.27 – Ilustração do princípio do ensaio de dobramento, onde: (a) Três; (b) Quatro e (c) Cinto pontos (adaptado de SALVE et al., 2016)

Khalili et al. (2005) testaram os LMC de fibra de vidro/epóxi com chapas finas de aço AISI 316 L e/ou alumínio AA1050 através do ensaio de dobramento de três pontos, seguindo a norma ASTM D790 (ASTM, 2017). Os resultados obtidos com LMC foram comparados com metais monolíticos, resina epóxi pura e laminados de compósito (LC) vidro/epóxi com objetivo de estudar a aplicação dos LMC na indústria aeroespacial. A Figura 2.28(a) e (b) mostram diagrama Deslocamento × Carga do ensaio de dobramento de três pontos e deformação dos quatro tipos dos LMC após o ensaio, respectivamente. Os resultados mostram que todos os LMC testados são mais flexíveis do que a resina epóxi (RESIN) pura e laminado de compósito de fibra de vidro/epóxi (GRP). Uma vez que o alumínio e o aço monolíticos são mais flexíveis do que a resina e o LC, novas estruturas flexíveis e leves foram obtidas para aplicações aeroespaciais avançadas, empilhando chapas metálicas e camadas de compósito, criando os LMC. Os LMC do tipo Aço/LC/AI/LC/Aço ($St/GRP/AI/GRP/St = 2ST/AL$) e Aço/LC/Aço/LC/Aço ($St/GRP/St/GRP/St = 3ST$), não apresentaram quebras ou fraturas nas camadas de compósito, somente a delaminação foi a única causa da sua falha, enquanto os LMC do tipo

Al/LC/Aço/LC/AL (Al/GRP/St/GRP/Al = 2AL/ST) e Al/LC/Al/LC/Al (Al/GRP/Al/GRP/Al = 3AL) falharam rapidamente devido ao rompimento (falha) das chapas externas de Al. O deslocamento máximo do LMC do tipo Aço/LC/Aço/LC/Aço (St/GRP/St/GRP/St = 3ST) é inferior à do Aço/LC/Al/LC/Aço (St/GRP/Al/GRP/St = 2ST/AL), devido à ductilidade da chapa de alumínio no meio. Os autores concluíram que os LMC mostram um comportamento mais flexível do que os LC. Ainda levando em consideração a força e a rigidez específicas, também mostraram resultados melhores do que os LC. O LMC com três chapas de aço AISI 316 L mostrou melhores resultados entre os demais LMC no ensaio de dobramento de três pontos.

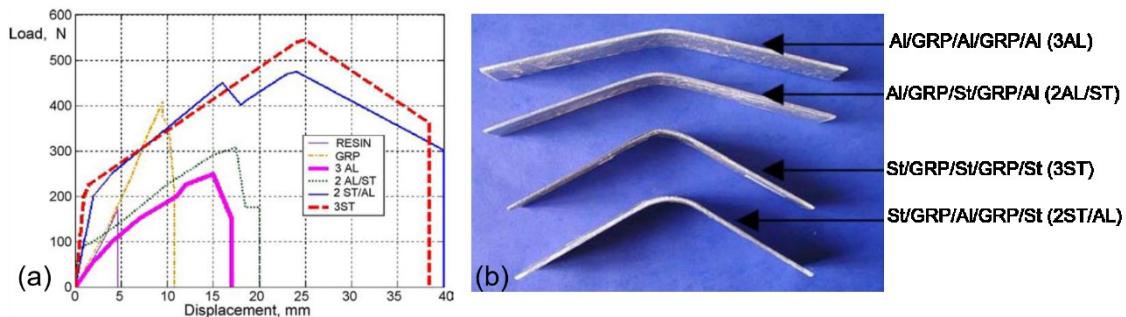


Figura 2.28 – Ensaio de dobramento de três pontos, onde: (a) Diagrama Deslocamento × Carga; (b) Deformação dos quatro tipos dos LMC após o ensaio (KHALILI et al., 2005)

Carrillo e Cantwell (2009) caracterizaram as propriedades mecânicas de um novo tipo de LMC de matriz termoplástica com base em um compósito de polipropileno auto-reforçado e liga de alumínio 2024-0. Para investigar este novo tipo de LMC os autores usaram o ensaio de dobramento de quatro pontos, fabricando os LMC com duas diferentes orientações de empilhamento de fibras da camada de compósito, a saber, $[Al, 0^\circ/90^\circ]_s$ e $[Al, \pm 45^\circ]_s$. Ou seja, 0° as fibras são paralelas e 90° - perpendicular ao comprimento do corpo de prova. Os ensaios de dobramento de quatro pontos foram executados pela norma ASTM D790 (ASTM, 2017) com a velocidade de deslocamento do cutelo de $0,01\text{ min}^{-1}$. A distância entre os apoadores com diâmetro de 6 mm foi de 43,3 mm, já a espessura, largura e comprimento do corpo de prova foi de 3,51; 20 e 130 mm, respectivamente. A Figura 2.29 mostra os resultados do ensaio de dobramento de quatro pontos onde percebe-se que o comportamento de Deformação × Tensão para ambos os tipos de empilhamento foi semelhante, destacando a forte influência das chapas metálicas (alumínio) para este tipo de ensaio. Os valores médios de tensão e deformação máximas do LMC $[Al, 0^\circ/90^\circ]_s$ foram 163 MPa e 0,0193 mm/mm, respectivamente. A mudança na orientação das fibras nos LMC para os $[Al, \pm 45^\circ]_s$ não fez diferença significativa nas propriedades mecânicas para ensaio de dobramento, atingindo os resultados médios de tensão e deformação máximas de 164 MPa e 0,0188 mm/mm, respectivamente.

A Figura 2.30(a) e (b) mostra os resultados do ensaio de tração nos mesmos LMC com orientação da fibra de $[Al, 0^\circ/90^\circ]_s$ e $[Al, \pm 45^\circ]_s$, que foi também realizado pelos autores no mesmo trabalho, seguindo a norma ASTM D3039 (ASTM, 2017). Dos gráficos dos resultados do ensaio de tração percebe-se que o deslocamento da falha para os LMC $[Al, \pm 45^\circ]_s$ foi muito maior do que para a liga de alumínio monolítico. Já comparando os resultados do ensaio de tração para os LMC percebe-se que houve aumento da tensão máxima do LMC com orientação das fibras dos $[Al, 0^\circ/90^\circ]_s$ em comparação com os $[Al, \pm 45^\circ]_s$ com respectivos valores de 154 e 131 MPa.

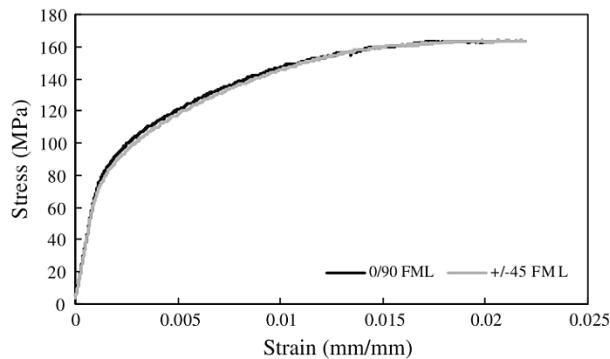


Figura 2.29 – Deformação x Tensão do ensaio de dobramento de quatro pontos nos corpos de prova de LMC com orientação de fibras $[Al, 0^\circ/90^\circ]_s$ e $[Al, \pm 45^\circ]_s$ (CARRILLO e CANTWELL, 2009)

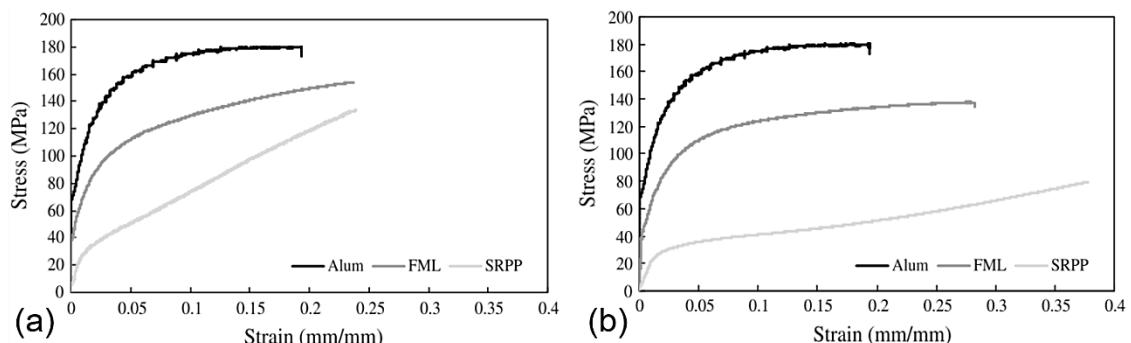


Figura 2.30 – Deformação x Tensão do ensaio de tração nos corpos de prova de LMC, onde: (a) Orientação de fibras $[Al, 0^\circ/90^\circ]_s$ e (b) $[Al, \pm 45^\circ]_s$ (adaptado de CARRILLO e CANTWELL, 2009)

b) Ensaio de cisalhamento

De acordo com Botelho et al. (2007), existem vários estudos das propriedades de cisalhamento dos compósitos propostos na literatura. Um dos ensaios de cisalhamento mais utilizados, que permite um estado de tensão de cisalhamento quase puro no plano de cisalhamento, foi proposto por N. Iosipescu. Os autores no seu trabalho usaram o ensaio de cisalhamento Iosipescu (*Iosipescu shear test*) (seguindo a norma ASTM D5379 (ASTM,

2012), ilustrado na Figura 2.31, e ensaio de cisalhamento interlaminar (*Interlaminar shear strength test*) (segundo a norma ASTM D2344 (ASTM, 2013), ilustrado na Figura 2.32, para avaliar os efeitos hidrotérmicos sobre as propriedades de cisalhamento dos LMC do tipo CARALL® (alumínio 2024-T3 com fibra de carbono/epóxi) e LC (fibra de carbono/epóxi). As dimensões dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento interlaminar foram de $24,0 \times 6,35 \times 4,10$ mm (comprimento \times largura \times espessura). Já a Figura 2.31(b) mostra as características geométricas do corpo de prova para o losipescu com a mesma espessura de 4,1 mm. Os autores simularam as condições hidrotérmicas do meio ambiente dentro de uma câmara, mantendo a temperatura de 80 °C e a umidade relativa de 90 %. A Figura 2.32(b) mostra o monitoramento periódico da taxa de umidade no compósito em função do tempo até atingir o estado de equilíbrio de umidade. Resumindo, os valores da resistência de cisalhamento avaliados através dos ensaios de cisalhamento interlaminar e losipescu para todos os corpos de prova foram semelhantes. Porém, para ambos os ensaios os valores de força de cisalhamento diminuem quando os corpos de prova foram expostos ao condicionamento hidrotérmico (LC (fibra de carbono/epóxi) apresentaram queda de 18 e 12 % e LMC (CARALL®), 4 e 6 %, quando analisados pelos ensaios de cisalhamento interlaminar e losipescu, respectivamente).

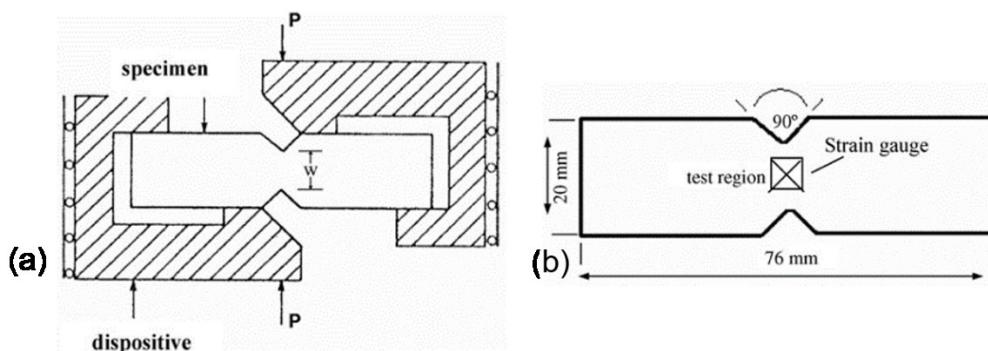


Figura 2.31 – Ilustração das características do ensaio interlaminar do tipo losipescu, onde: (a) Esquema do ensaio; (b) Características do corpo de prova do ensaio losipescu com dimensões de $76,0 \times 20,0 \times 4,1$ mm (adaptado de BOTELHO et al., 2007)

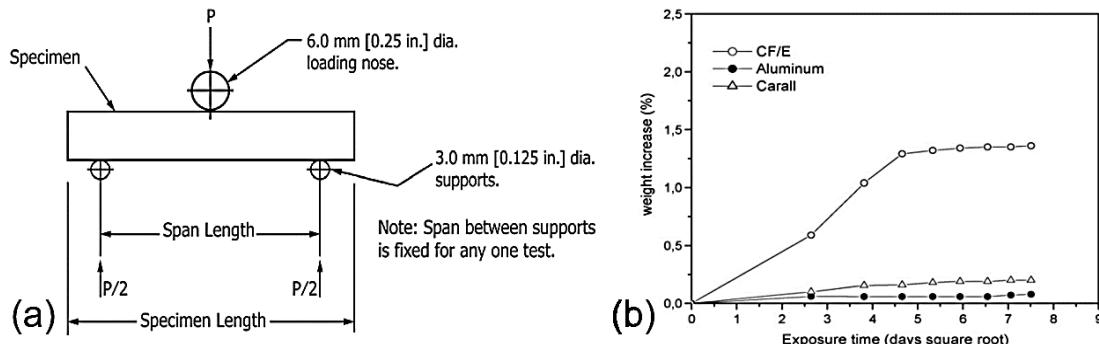


Figura 2.32 – (a) Ilustração do ensaio de cisalhamento interlaminar (*Interlaminar shear strength tests*) (ASTM D2344); (b) Aumento de peso dos LC (CF/E), alumínio e LMC (CARALL®) expostos a 80 °C e umidade relativa de 90 % (BOTELHO et al., 2007)

Hinz et al. (2009) investigaram experimentalmente propriedades de cisalhamento interlaminar de LMC do tipo GLARE® 4B-6/5-0,3 (consistindo de 6 chapas de alumínio de 0,3 mm de espessura e 5 camadas de compósito (pré-impregnado de fibra de vidro/epóxi) através do ensaio de cisalhamento de duplo entalhe (*double-notch shear test (DNS)*), ilustrado na Figura 2.33(a) e (b). Os ensaios foram feitos de acordo com a norma ASTM D3846 (ASTM, 2015) à temperatura ambiente (24 °C). A carga de cisalhamento interlaminar entre os entalhes foi aplicada principalmente por compressão em ambas as extremidades do corpo de prova do LMC (Figura 2.33(c)). Durante o ensaio foi utilizada uma velocidade de deslocamento constante de 0,06 mm/min e a carga foi medida usando uma célula de carga com capacidade de até 500 N e registrada por meio de um amplificador. Já para calcular a tensão de cisalhamento interlaminar, utilizou-se a área efetiva do plano de cisalhamento. Neste trabalho, os autores explicaram o modo de falha dos corpos de prova do LMC, mencionando que a iniciação e propagação de dano se desenvolvem dentro das lâminas de compósito transversais por descolamento de compósito, deformando plasticamente e rompimento da matriz polimérica. O modo de dano primário foi observado na interface de matriz/fibra do compósito, com surgimento das trincas da matriz durante as maiores deformações de cisalhamento. Com a propagação de trincas na matriz e de descolamento de fibra/matriz, esses danos levam a falha de cisalhamento interlaminar final por delaminação.

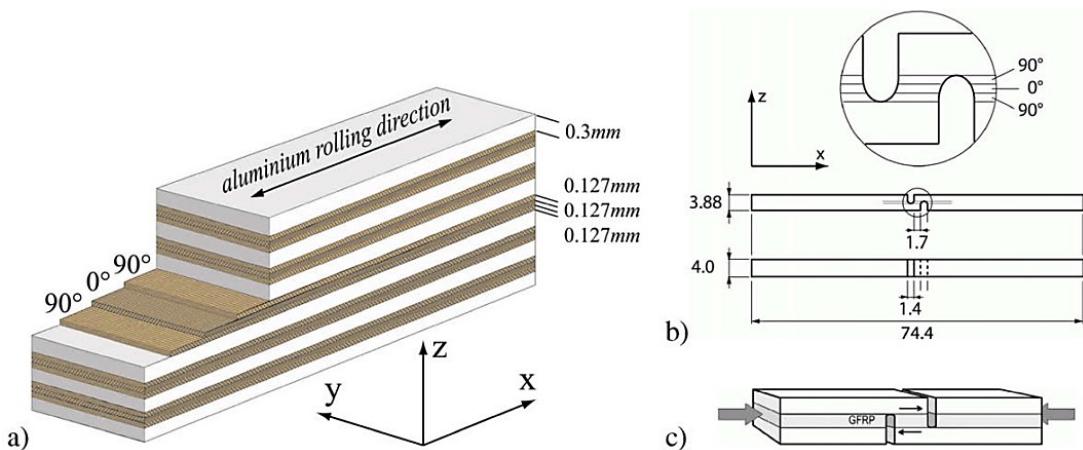


Figura 2.33 – (a) Ilustração de LMC do tipo GLARE® 4B-6/5-0,3; (b) Ilustração das características geométricas dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento de duplo entalhe (*double-notch shear test*); (c) Ilustração esquemática do carregamento de compressão no ensaio de cisalhamento de duplo entalhe em corpo de prova de LMC (setas indicam a carga aplicada) (HINZ et al., 2009)

c) Ensaio de fadiga

Salve et al. (2016) menciona que o comportamento à fadiga de um material é geralmente caracterizado por um diagrama S-N, que mostra a relação entre amplitude da tensão (ou tensão máxima) e número de ciclos para a falha, normalmente em uma escala semi-logarítmica. Este diagrama é obtido testando uma série de corpos de prova, aplicando vários níveis de tensão sob condições de carga cíclica (sinusoidal). Os autores destacam que na maioria dos ensaios de fadiga em materiais compósitos reforçados com fibra é realizado um ciclo do tipo tração-tração uniaxial. Os ciclos do tipo compressão-tração e compressão-compressão não são comuns, pois a falha por encurvamento compressivo pode ocorrer em laminados finos da camada de compósito.

Roebroeks (1994) provou experimentalmente que a resistência de iniciação de trinca por fadiga nos LMC do tipo GLARE® 3-3/2-0,2 em juntas rebitadas é superior aos das ligas de alumínio monolítico do tipo 2024-T3 (Figura 2.34). A Figura 2.35 apresenta esquematicamente a junta utilizada nos ensaios do tipo sobreposta com 3 rebites com indicação do início de crescimento da trinca para todas as juntas. O autor destaca que as trincas por fadiga sempre começaram na superfície da junta por causa de atrito em torno dos rebites combinando com as maiores tensões de flexão nesse local.

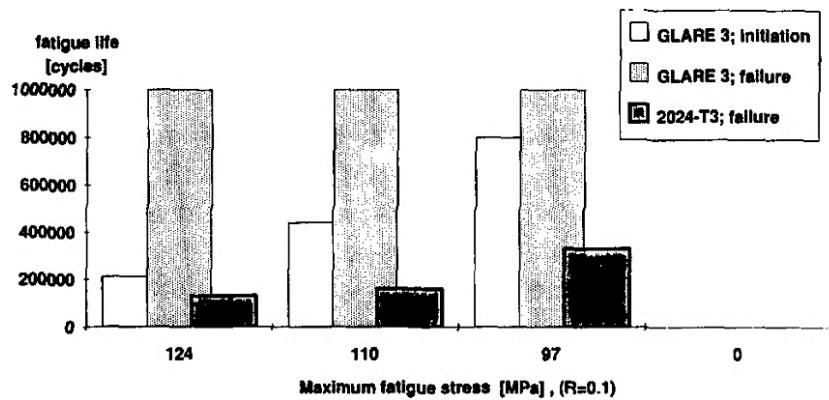


Figura 2.34 – Os resultados do ensaio de fadiga de alumínio 2024-T3 e GLARE® 3-3/2-0,2 nas juntas rebitadas (ROEBROEKS, 1994)

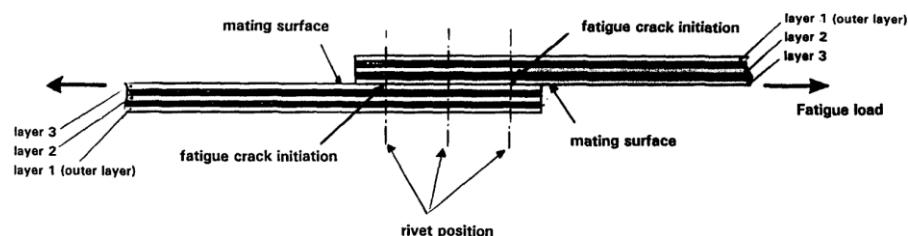


Figura 2.35 – Ilustração da iniciação da trinca por fadiga nas juntas do tipo sobrepostas rebitadas (ROEBROEKS, 1994)

Chang et al. (2008) estudaram a propagação de trincas durante ensaio de fadiga em LMC do tipo boro/vidro/alumínio, que consistiram de chapas de liga de alumínio 2024-T3 e uma mistura de pré-impregnados fibras de boro e fibras de vidro nas camadas de compósito. Para o primeiro tipo, as fibras de boro/pré-impregnado e de vidro/pré-impregnado foram utilizadas separadamente na camada de compósito (Figura 2.36(a)). Já para o segundo tipo, as fibras de boro e as de vidro foram misturadas para formar uma camada de compósito híbrida – boro/vidro de pré-impregnados (Figura 2.36(b)). Estes LMC foram fabricados utilizando um processo de cura em autoclave. Os resultados experimentais do ensaio de fadiga, realizado pela norma ASTM D3479 (ASTM, 2012), claramente mostraram que a iniciação da trinca por fadiga para ambos os tipos de LMC híbridos de boro/vidro/alumínio eram superiores em relação à liga de alumínio monolítico e LMC do tipo GLARE® sob as mesmas condições do ensaio. Os autores explicam que este efeito aconteceu devido ao maior módulo de Young da camada de compósito que efetivamente reduz o nível de tensões, “adiando” a iniciação da trinca por fadiga na chapa de alumínio. Por outro lado, o LMC do tipo boro/vidro/alumínio (com as fibras de boro misturadas uniformemente com as de vidro na camada de compósito) mostraram uma vida mais longa durante o ensaio de fadiga do que o LMC do tipo boro/vidro/alumínio (sem mistura das fibras de boro/vidro dentro da camada de compósito). Ainda os autores apesentaram o modelo analítico para calcular as vidas de

propagação de trincas por fadiga de LMC boro/vidro/alumínio, obtendo uma boa correlação entre o modelo e os resultados experimentais.

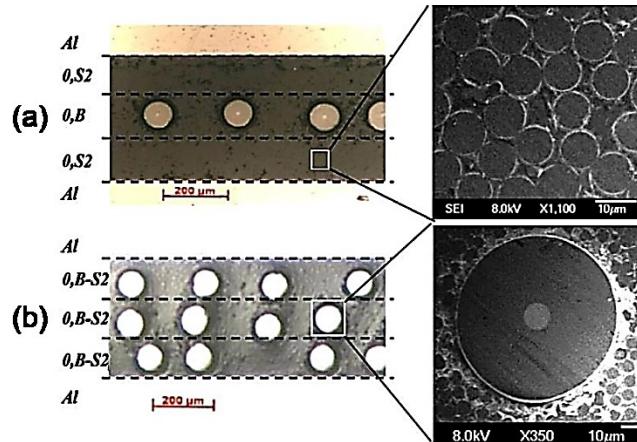


Figura 2.36 – Seção transversal dos LMC do tipo boro/vidro/alumínio, onde: (a) Sem mistura das fibras de boro/vidro dentro da camada de compósito; (b) Com as fibras de boro misturadas uniformemente com as de vidro na camada de compósito (adaptado de CHANG et al., 2008)

d) Ensaio de tração

Da Costa et al. (2012) avaliaram o efeito de ciclos de choque térmico nas propriedades mecânicas dos LMC. Estes LMC foram compostos por duas chapas de liga de alumínio AA2024 (1,6 mm de espessura) por fora e uma camada de compósito formada por duas lâminas de pré-impregnado (fibra de vidro/epóxi (unidirecional)) e duas camadas de fita adesiva epóxi, conforme mostrado na Figura 2.37. Este LMC foi processado utilizando infusão na bolsa de vácuo. A cura do material compósito foi feita numa autoclave mantendo uma temperatura de 125 ± 5 °C e pressão de 400 kPa durante 90 min. Os corpos de prova retirados da placa fabricada foram submetidos a variações de temperatura entre -50 e +80 °C, com uma rápida transição entre estas temperaturas. A resistência à tração (ensaio de tração) e cisalhamento interlaminar (ensaio de três pontos) com corpos de prova foram avaliados após 1 000 e 2 000 ciclos e comparada com corpo de prova que não sofreu variação da temperatura (Figura 2.38). 2000 ciclos correspondem ao intervalo de verificação típica para programas de manutenção de aeronaves comerciais. Os resultados mostraram que os ciclos de choque térmico não resultaram em alterações microestruturais significativas dos corpos de prova de LMC, particularmente na camada de compósito. Similarmente, não foi observado efeito apreciável nas propriedades mecânicas de LMC pelos ciclos de choque térmico.

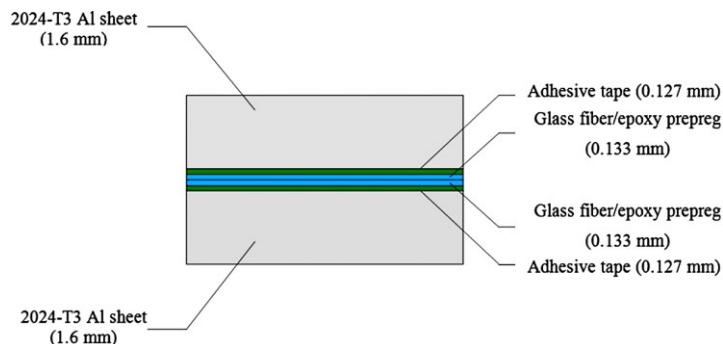


Figura 2.37 – Configuração esquemática da seção transversal de LMC (DA COSTA et al., 2012)

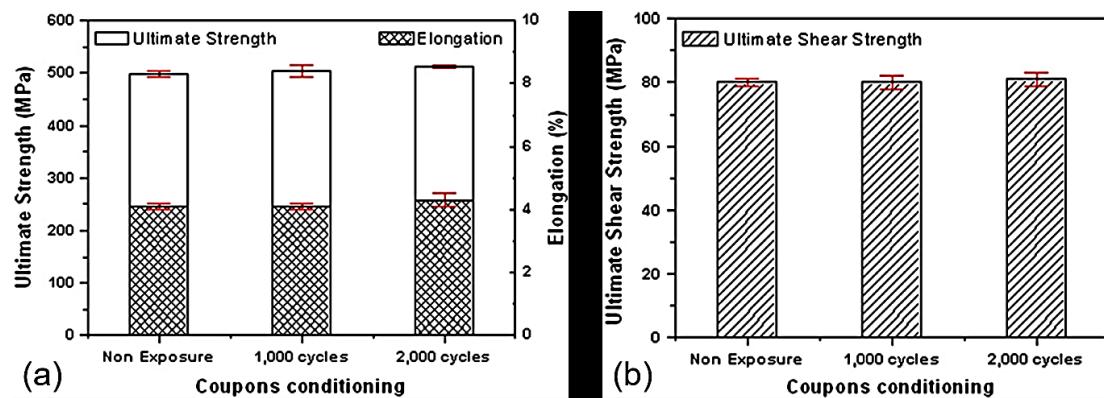


Figura 2.38 – (a) Resistência à tração e alongamento; (b) Resistência ao cisalhamento interlaminar dos corpos de prova dos LMC sem e com ciclos de temperatura (-50 a +80 °C) (adaptado de DA COSTA et al., 2012)

Gonzalez-Canche et al. (2017) avaliaram as propriedades dos LMC feitos de uma liga de alumínio de baixa ductilidade (An 1100-H14) e compósito de fibra de aramida/polipropileno (PP), utilizando o ensaio de tração. Na fabricação dos LMC as chapas metálicas de 0,3 mm de espessura foram empilhadas com duas laminas de compósito de 0,1 mm cada e depois moldadas, conforme mostrado na Figura 2.39(a). Os autores compararam o comportamento do LMC no ensaio de tração com liga de alumínio monolítico (An 1100-H14) e LC (fibra de aramida/polipropileno (resina termoplástica)). Os ensaios de tração nos corpos de prova (Figura 2.39(b)) foram realizados pela norma ASTM D5035 (ASTM, 2015). A Figura 2.40(a) apresenta as curvas tensão-deformação típicas do LMC (FML), alumínio monolítico (Al 1100-H14) e LC (Aramid/PP composite). Já a Figura 2.40(b) e (c) mostram os corpos de prova em alumínio monolítico e LMC após o ensaio de tração, respectivamente. Resumindo, pelos resultados do ensaio é possível perceber que a força máxima do LMC é menor, mas o deslocamento máximo do LMC cresceu em 230 %, comparando com LC. Também pode ser observado da Figura 2.40(a) que tanto a força máxima como o deslocamento máximo cresceram para o LMC, quando comparados aos do alumínio monolítico. É importante

destacar que o deslocamento máximo do LMC é cerca de cinco vezes maior que a do alumínio, ou seja, há um aumento de quase 400 %.

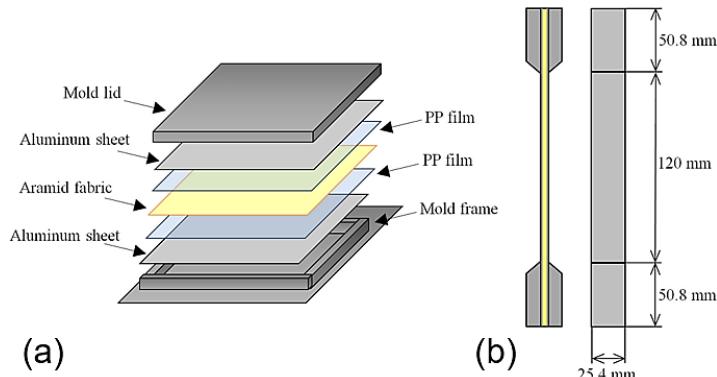


Figura 2.39 – (a) ilustração de configuração de empilhamento dos LMC; (b) ilustração das características geométricas dos corpos de provas utilizados nos ensaios de tração dos LMC (adaptado de GONZALEZ-CANCHE et al., 2017)

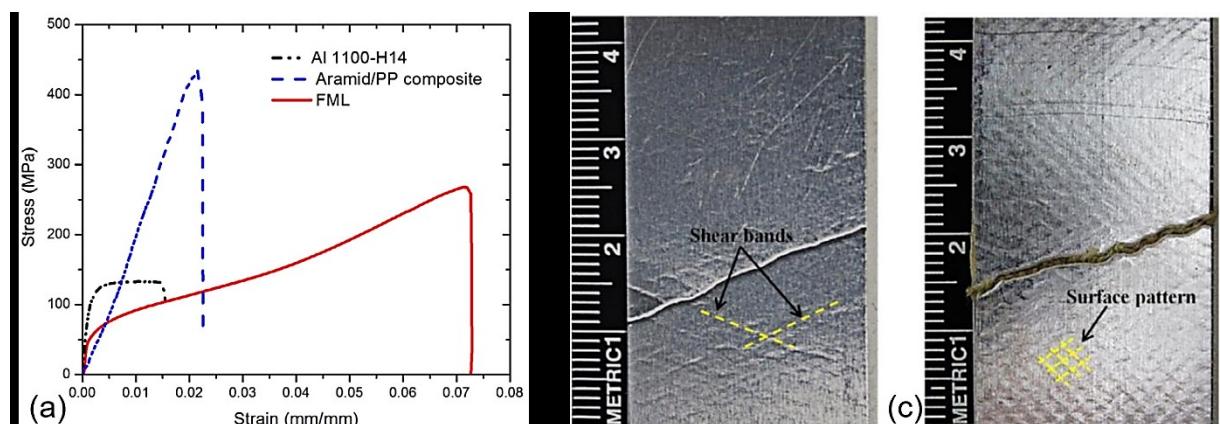


Figura 2.40 – (a) Curva Deformação x Tensão do ensaio de tração em alumínio monolítico (Al 1100-H14), LC (Aramid/PP composite) e LMC (FML); (b) Corpo de prova de alumínio monolítico após ensaio de tração; (c) Corpo de prova de LMC após ensaio de tração (adaptado de GONZALEZ-CANCHE et al., 2017)

e) Ensaio de impacto de baixa e alta (balístico) velocidades

Farooq e Myler (2016) revelam uma classificação amplamente utilizada para definir as velocidades de impacto nos compósitos, apresentada na Figura 2.41. Esta classificação das velocidades de impacto foi feita em função da velocidade do objeto do impacto (impactador) em relação ao objeto a ser impactado. Ainda os autores definem que o impacto de baixa velocidade é um evento simples que ocorre quando um impactador atinge um objeto (normalmente corpo de prova), mas não o penetra.

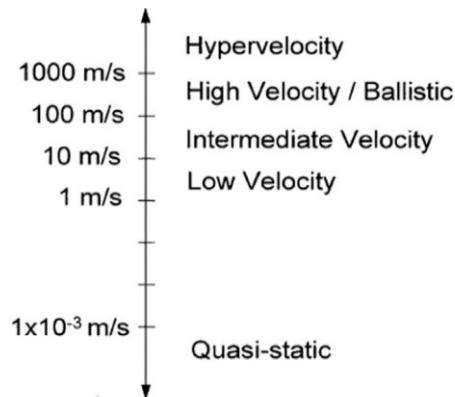


Figura 2.41 – Classificação das velocidades de impacto em função da velocidade do objeto do impacto (FAROOQ e MYLER, 2016)

Chai e Manikandan (2014) no seu artigo apresentaram uma revisão abrangente sobre a resposta dinâmica de LMC sujeitos a impacto de baixa velocidade, incluindo trabalhos experimentais, numéricos e analíticos publicados. Os autores destacam que a resposta de LMC ao impacto de baixa velocidade envolve muitos parâmetros, tais como, o tipo de metal, fibra, matriz, sequência de empilhamento, fração de volume de metal, geometria do impactador, forma do objeto impactado (painele LMC), etc. Essa variedade dos parâmetros dificulta otimizar um LMC, justificando se usar planejamento experimental (*Design of Experiments (DOE)*) e ferramentas de análise do tipo ANOVA. Os autores destacam que o LCM do tipo GLARE® possui um comportamento de impacto de baixa velocidade superior em comparação com outros LMC disponíveis no mercado. Este é um motivo para aplicação deste tipo de LMC na fuselagem da aeronave A380 da Airbus. Ainda o GLARE®, em comparação com alumínio monolítico e pré-impregnado de fibra de vidro, é menos sensível à taxa de deformação. Os autores mencionam que não encontraram nenhum trabalho relacionado ao efeito da temperatura e matriz polimérica (termoplástica ou termorrígida) do compósito na resistência ao impacto de baixa velocidade dos LMC.

Vlot (1993) realizou estudos para determinar as características de impacto estático, de baixa e de alta velocidades de LMC do tipo GLARE® 3 e ARALL® 2. Para fins de comparação foram realizados os mesmos ensaios de impacto no alumínio monolítico (Al 2024-T3) e LC (fibra de carbono com matriz termoplástica). Os corpos de prova com uma área de $125 \times 125 \text{ mm}^2$ e espessura de $1,37 \pm 0,2 \text{ mm}$ foram fixados entre duas placas por 8 parafusos apertados com torque de 50 Nm, formando uma janela de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Os ensaios estáticos de impacto foram realizados utilizando uma massa do impactador de 2333 g com ponta esférica de 7,5 mm de diâmetro e uma velocidade de impacto de 1 ms^{-1} . Já para ensaio de baixa velocidade, a massa do mesmo impactador foi reduzida para 575 g e a velocidade de impacto cresceu próximo de 10 ms^{-1} . Finalmente os ensaios de impacto de alta velocidade foram realizados com uma arma a ar comprimido, utilizando a massa de projétil

de 23,3 g e uma velocidade de aproximadamente 100 ms^{-1} . A Figura 2.42 apresenta os resultados dos impactos (estático, baixa e alta velocidade) na forma de comparação de energia mínima de aparecimento de trinca em alumínio monolítico (2024-T3), GLARE® 3, ARALL® 2 e LC (c/PPEK). Os autores notaram que o LMC do tipo GLARE® 3 possui um tamanho de dano menor que o LC e o GLARE® 3 exige um valor maior da energia mínima para começar a trinca em comparação com o alumínio monolítico, o ARALL® 2 e LC (c/PPEK), considerando a mesma espessura. Ou seja, o LMC do tipo GLARE® 3 conseguiu resistir todos os tipos de ensaios de impacto realizados nesse trabalho, principalmente de baixa e alta velocidades. Os autores notaram que a profundidade do corpo de prova após o impacto para GLARE® 3 é aproximadamente igual a Al 2024-T3, que vai facilitar a detecção dos locais com possíveis danos por impacto.

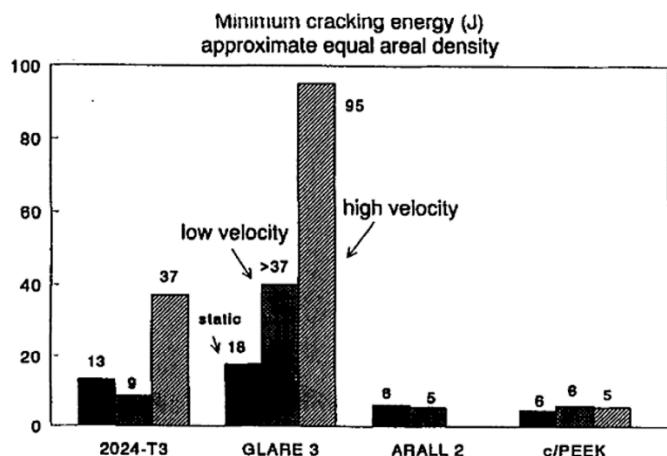


Figura 2.42 – Comparação da energia mínima de aparecimento de trinca durante ensaios estáticos, baixa e alta velocidades em alumínio monolítico (2024-T3), GLARE® 3, ARALL® 2 e LC (c/PPEK) (VLOT, 1993)

Yaghoubi e Liaw (2014) estudaram as influências de espessura e sequência de empilhamento sobre o comportamento de impacto de alta velocidade (balístico) nos painéis LMC do tipo GLARE® 5 (liga de alumínio 2024-T3 e compósito de fibra de vidro unidirecional/epóxi). A Tabela 2.5 mostra 8 tipos de painéis LMC testados pelos autores com diferentes configurações de empilhamento (*lay-up configuration*) de camadas de metal/compósito, orientação de empilhamento das lâminas de pré-impregnado e espessura total dos painéis LMC. Como exemplo, a Figura 2.43(a) mostra a configuração de empilhamento do LMC do tipo GLARE® 5 com relação ao número de camadas de metal/compósito de 3/2, respectivamente, e a orientação de empilhamento das lâminas de pré-impregnado de $[0^\circ/90^\circ]$ em cada camada de compósito. Lembrando que a orientação de empilhamento de 0° significa que as fibras das lâminas de pré-impregnado estão paralelas a borda de referência (por exemplo comprimento do corpo de prova) e 90° - perpendicular à

borda de referência. É importante destacar que os autores estudaram a influência de orientação de empilhamento das lâminas de pré-impregnado em comportamento de impacto de alta velocidade apenas nos painéis LMC com relação do número de camadas de metal/compósito de 3/2. A Figura 2.43(b) e (c) ilustram o esquema da instalação experimental e fixação do painel LMC do ensaio de alta velocidade (balística), respectivamente. Uma câmera de alta velocidade foi usada para medir as velocidades de impacto e rebote de um projétil de cobre de calibre 0,22 e massa de 3 g. A Figura 2.44(a) e (b) apresentam resultados da velocidade do limite balístico (V_{50}) em função da espessura de painel LMC e orientação de empilhamento das lâminas de pré-impregnado na camada de compósito, respectivamente. Os autores usaram esta velocidade do limite balístico (V_{50}) como uma representação da relação entre as velocidades de impacto e rebote do projétil. Concluiu-se que com aumento do número de chapas de metal e camadas de compósito e consequentemente a espessura por painel LMC, aumentou a velocidade do limite balístico (V_{50}) exponencialmente. Por outro lado, a orientação de empilhamento das lâminas de pré-impregnado houve pouca influência (V_{50}), mas painel LMC do tipo quase-isotrópico $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ mostrou melhores resultados, absorvendo maior energia do impacto.

Tabela 2.5 – LMC do tipo GLARE® 5 com diferentes espessuras e sequências de empilhamento ensaiados através o ensaio de alta velocidade (YAGHOUBI e LIAW, 2014)

Lay-up configuration (m/n)	Prepreg plies and orientation	Total thickness	MVF
2/1	$[0^\circ/90^\circ]_s$ cross-ply	1.117 mm (0.044")	0.546
3/2	$[0^\circ]_4$ unidirectional	1.930 mm (0.076")	0.474
3/2	$[0^\circ/90^\circ]_s$ cross-ply	1.930 mm (0.076")	0.474
3/2	$[\pm 45^\circ]_s$ angle-ply	1.930 mm (0.076")	0.474
3/2	$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ quasi-isotropic	1.930 mm (0.076")	0.474
4/3	$[0^\circ/90^\circ]_s$ cross-ply	2.743 mm (0.108")	0.445
5/4	$[0^\circ/90^\circ]_s$ cross-ply	3.556 mm (0.140")	0.429
6/5	$[0^\circ/90^\circ]_s$ cross-ply	4.368 mm (0.172")	0.419

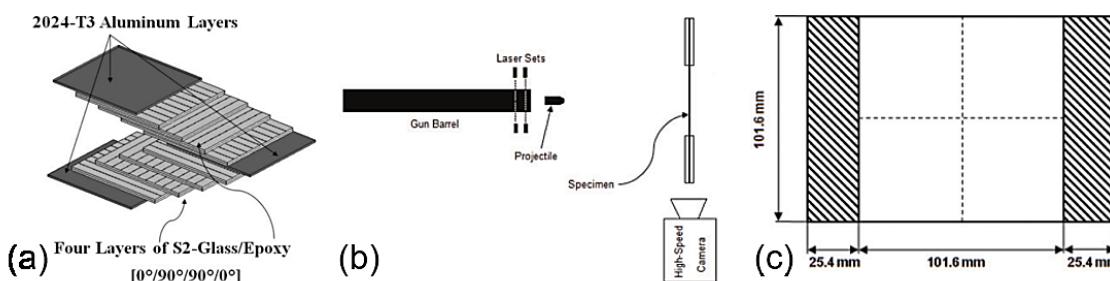


Figura 2.43 – (a) Esquema de configuração de empilhamento do LMC do tipo GLARE® 5 com número de camadas de metal/compósito de 3/2; (b) Esquema da instalação experimental do ensaio de alta velocidade (balística); (c) painel LMC durante o ensaio de balística fixado nas laterais de 25,4 mm (1") de cada lado (adaptado de YAGHOUBI e LIAW, 2014)

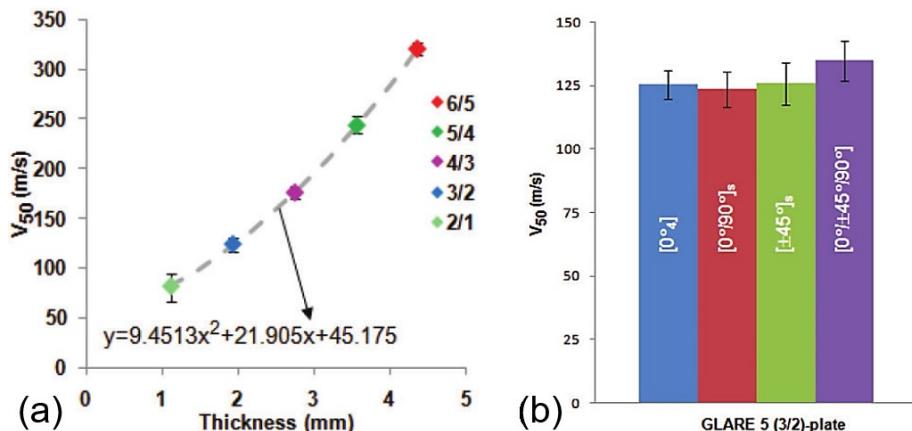


Figura 2.44 –Resultados relação entre as velocidades de impacto e rebote do projétil (V_{50}) em função da espessura (a) e orientação de empilhamento das lâminas de pré-impregnado na camada de compósito (b) de painel LMC do tipo GLARE® 5 (adaptado de YAGHOUBI e LIAW, 2014)

2.5 Técnica de deposição de pinos CMT PIN

A técnica de deposição de pinos CMT PIN é uma derivação do processo de soldagem CMT, com diversos programas-sinérgicos de controle, com possibilidade de alteração de alguns dos seus parâmetros de deposição dos pinos. Uma das principais diferenças entre a técnica CMT PIN e o processo de soldagem CMT se mostra no momento em que há a reversão do arame-eletrodo, quando no CMT PIN se faz com que o mesmo fique um tempo mais longo encostado na poça (com o arco apagado), permitindo um esfriamento, através de um tempo de corrente desligada, e uma consequente soldagem da ponta do arame no metal de base (Figura 2.45). Logo em seguida, uma corrente é imposta, de tal forma a aquecer e amolecer o arame soldado. Com o movimento de reversão iniciado, o arame fica sujeito a uma força trativa e é rompido próximo do centro da distância entre o bico de contato e a peça, como num ensaio de tração, formando pinos sobre a chapa. No momento de rompimento do arame-eletrodo, há uma rápida descarga, para acender o arco e controlar a geometria da cabeça do pino. Modificações de alguns parâmetros permitem formar pinos de diferentes tamanhos e geometrias, apresentados na Figura 2.46. Estes parâmetros são descritos com mais detalhes no Capítulo IV deste trabalho.

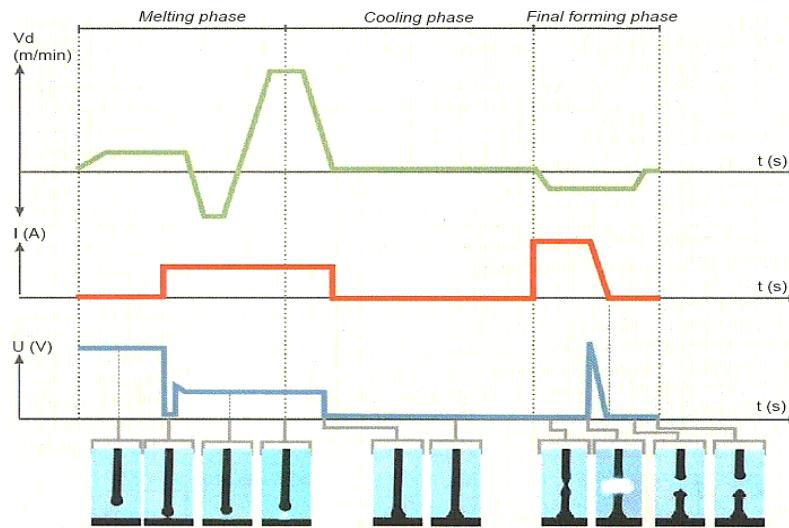


Figura 2.45 – Ilustração da sequência de alimentação do arame-eletrodo (V_d), corrente (I) e tensão (U) com as imagens durante a deposição do pino do tipo cabeça abaulada (*ball-head*) com suas principais fases (adaptado de FRONIUS, 2014)

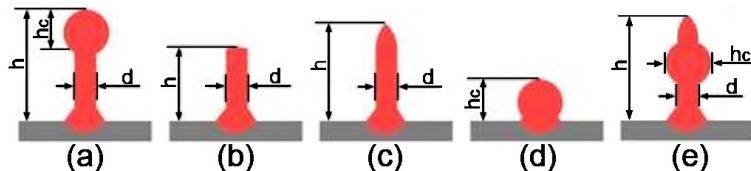


Figura 2.46 – Ilustração de possíveis tipos de pino depositados pela técnica CMT PIN: (a) Cabeça abaulada (*ball-head*); (b) Cabeça cilíndrica (*cylindrical*); (c) Cabeça pontiaguda (*pike*); (d) Impressão (*print*); (e) Cabeça abaulada-pontiaguda (*ball-head & pike*), onde: h - altura do pino; hc - diâmetro da cabeça do pino; d - diâmetro do corpo do pino (adaptado de FRONIUS, 2014)

De acordo com a fabricante Fronius (2014), a técnica CMT PIN foi desenvolvida com o objetivo de unir materiais metálicos com plásticos (por exemplo, laminados de fibra de carbono ou outros materiais não metálicos). Ainda a fabricante destaca que a união deve ser realizada sem remoção de material das partes unidas, por exemplo, corte, fresamento ou furação. A Figura 2.47 apresenta alguns exemplos de aplicação dos pinos em juntas de metal-plástico, metal-madeira ou metal-metal. De acordo com a fabricante, a altura dos pinos depende da condutividade térmica do material. Por exemplo, para alumínio e cobre (materiais de alta condutividade térmica) é possível depositar um pino de 3 a 10 mm de altura, já no caso do aço ou aço inoxidável (materiais de baixa condutividade térmica) de 1,5 a 7 mm. Atualmente é possível depositar os pinos pela técnica CMT PIN utilizando arame-eletrodo de aço, aço inoxidável (CrNi), alumínio e cobre. A fabricante destaca que é necessário de 0,5 a 1 s para depositar um pino, este tempo depende do tipo e aplicação do pino.

Por causa da CMT PIN ser uma técnica relativamente nova e/ou não foi aplicada ainda amplamente na indústria, existem poucas fontes da literatura, além da própria fabricante, relacionados à avaliação, descrição detalhada ou alguma caracterização da técnica.

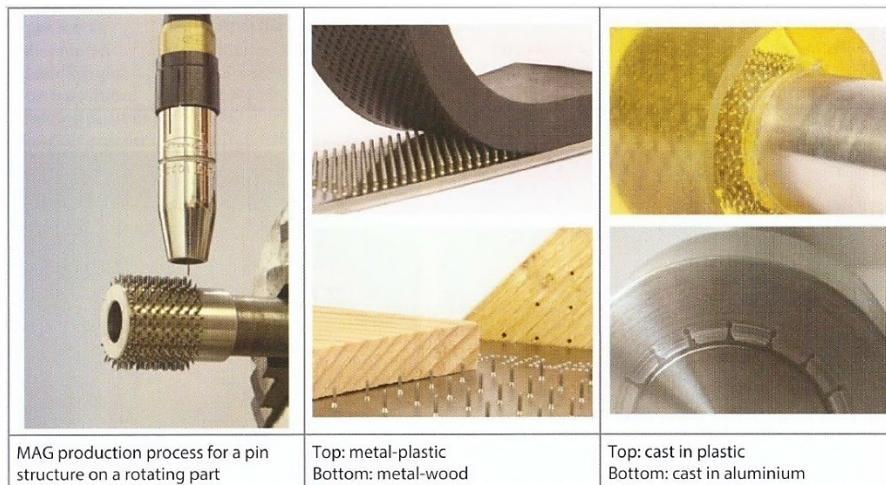


Figura 2.47 – Exemplos de aplicação dos pinos em diversas uniões através a técnica CMT PIN (FRONIUS, 2014)

Wittwer e Enzinger (2012) destacam que o processo de deposição de um pino pela técnica CMT PIN consiste de três fases, são eles, aquecimento (*warm up*), resfriamento (*cooling*) e formação do pino (*shaping*). Durante a fase de aquecimento, o arame-eletrodo é soldado no metal de base. Na fase de resfriamento, a região de temperatura máxima está migrando dentro do arame soldado na chapa em direção ao bico de contato da tocha. Finalmente, durante a fase de formação do pino, é ligada a passagem da corrente pelo arame soldado, a resistência elétrica é mais alta na região de temperatura máxima, consequentemente o aquecimento ôhmico é maior nesta parte do arame-eletrodo. Com uma parte mais aquecida do arame, o mesmo é tracionado mecanicamente através da tocha especial CMT, rompendo o arame-eletrodo em uma certa distância da junta, assim, formando um pino. Neste trabalho os autores simularam ciclo de deposição do pino do tipo cilíndrico de arame-eletrodo de aço inoxidável (AISI 308) numa chapa de aço AISI 304, comparando com resultado experimental. A Figura 2.48 mostra os resultados desta simulação numérica x experimental dos cortes transversais das zonas fundidas (ZFs) da base do pino. Para realizar esta simulação numérica, os autores utilizaram o modelo da fonte de calor de Goldak (1984), levando em consideração as correntes e tensão que ocorreram por meio de uma análise electro - termo - mecânica durante a deposição. Tudo isso promoveu que as características geométricas dos pinos depositados coincidiram com os da simulação numérica.

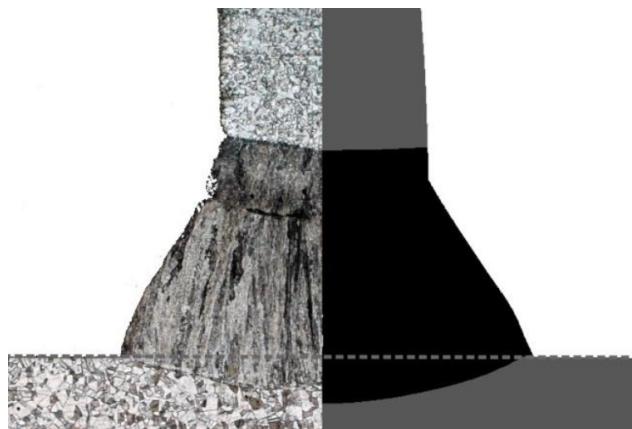


Figura 2.48 – Comparação dos resultados das zonas fundidas das bases do pino depositado através da técnica CMT PIN, onde: (esquerda) experimental e (direita) simulação numérica (WITTWER et al., 2012)

Em outro trabalho, Wittwer et al. (2012) investigaram o impacto do uso da técnica CMT PIN nas propriedades mecânicas da chapa de liga de alumínio da classe 6XXX (2 mm de espessura) devido ao calor imposto presente durante processo de deposição dos pinos. Os autores utilizaram o ensaio de tração nos corpos de prova (CP) com diferente número de pinos e também sem pinos, para comparar os resultados. A Figura 2.49(a) ilustra três CP (1R, 2R e 3R) com diferente número de pinos depositados. O ensaio de tração foi feito 5 vezes em cada tipo de CP. Já a Figura 2.49(b) e (c) mostram os resultados do ensaio de tração com os CP na forma de histogramas. Observa-se que o valor da tensão máxima, independentemente do número de pinos, não mostrou nenhuma mudança significativa, mas a deformação máxima dos CP com os pinos caiu. Para estudar melhor a técnica de deposição dos pinos CMT PIN, os autores fizeram uma simulação por elementos finitos (FEM), usando modelo de Glodak et al. (1984), obtendo mais informações sobre distribuição da temperatura na chapa devido à deposição dos pinos. Para isso, foi criado um modelo da chapa com a área de 250 × 150 mm (Figura 2.50(a)) onde foram depositados 15 pinos com espaçamento de 5 mm. A Figura 2.50(b) mostra a distribuição da temperatura na seção transversal da chapa durante processo de deposição dos pinos, com sua maior concentração perto dos pinos. Os autores mencionam que a queda do valor da deformação máxima nos CP com pinos, provavelmente, foi causada pelas irregularidades da superfície de metal de base de CP devido a deposição dos pinos.

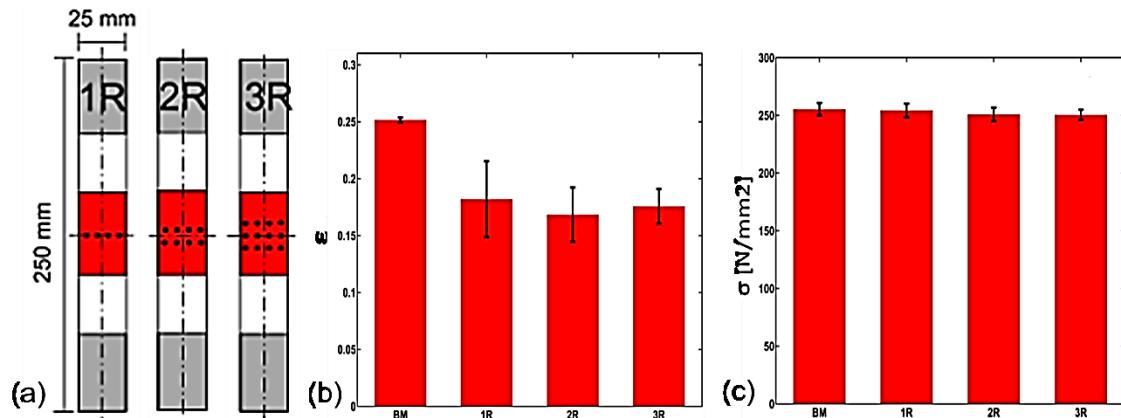


Figura 2.49 – (a) Ilustração de três CP com diferente número de pinos (1R = 4, 2R = 8 e 3R = 12 pinos); (b) e (c) Deformação (*ultimate strain*) e Tensão máximas (*ultimate stress*) do ensaio de tração nos CP 1R, 2R, 3R e BM (sem pinos), respectivamente (adaptado de WITTWER et al., 2012)

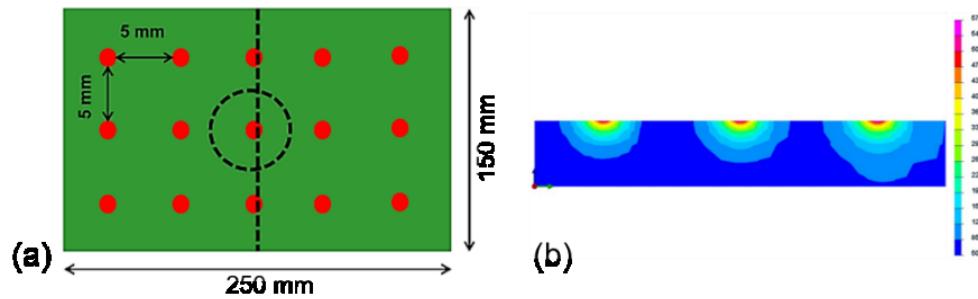


Figura 2.50 – Simulação do processo de deposição dos pinos pela técnica CMT PIN, onde: (a) Vista superior da chapa com espaçamento de 5 mm entre os pinos (pontos vermelhos); (b) Seção transversal da distribuição da temperatura na seção transversal da chapa (adaptado de WITTWER et al., 2012)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E INSUMOS

3.1 Metodologia fundamental

Como já foi mencionando no Capítulo I, o objetivo principal do trabalho é avaliar o uso de ancoradores (pinos) depositados pela técnica CMT PIN em Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC) como forma de melhorar suas propriedades, tais como, resistência mecânica e rigidez. Para atingir este objetivo, escolheu-se como estudo de caso um tipo de PLMC composto por duas folhas metálicas externamente à uma camada de compósito. No caso dos PLMC reforçados, pinos são colocados dentro da camada de compósito, agregados às folhas externas, conforme ilustra a Figura 3.1.

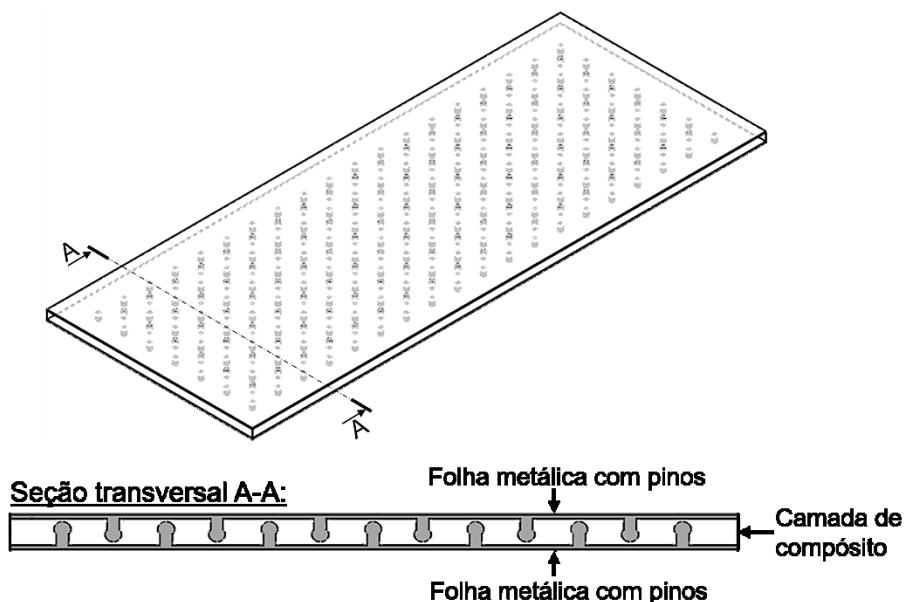
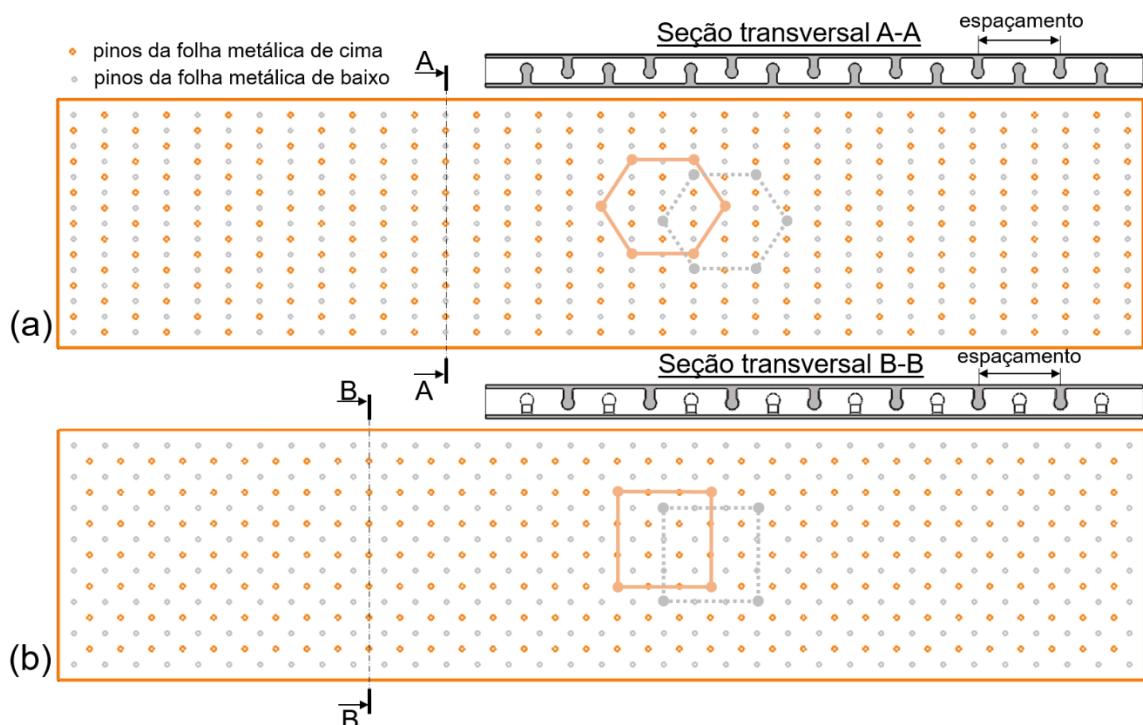


Figura 3.1 – Ilustração da ideia de aplicação de pinos sobre folhas metálicas para formação de Painéis Laminado Metal-Compósito (PLMC) com pinos (ancoradores)

Escolheu-se folhas metálicas de aço AISI 430 de 0,4 mm de espessura, já prevendo uma dimensão compatível com possíveis aplicações de PLMC (elevada resistência

específica) e tomando como base os bons resultados prévios e próprios de deposição/soldabilidade dos pinos pela técnica CMT PIN neste material. Já para construir a camada de compósito do PLMC, escolheu-se lâminas de pré-impregnado (*prepreg*) de fibra de vidro/epóxi comercial, as quais são amplamente utilizadas em diversas indústrias de transporte, principalmente aeronáutica.

Destaca-se que, neste trabalho, os PLMC foram fabricados de forma miniaturizada, para reduzir custo e tempo de fabricação, mas levando-se também em conta os diversos ensaios mecânicos (destrutivos e não-destrutivos) que serão aplicados sobre os painéis para avaliar o desempenho dos PLMC. Para permitir estudar o efeito da distribuição e densidade dos pinos, adotou-se dois tipos de padrão de deposição dos pinos na superfície da folha metálica do painel, a saber, Hexagonal e Quadrático, com diferentes valores de espaçamento (distância entre os centros dos pinos depositados no mesmo plano (folha metálica)), ilustrados na Figura 3.2. Procurou-se manter a mesma espessura dos PLMC para todas as combinações.



Para depositar os ancoradores (pinos) nas folhas metálicas, empregou-se a técnica CMT PIN (maiores detalhes nos Capítulos I e IV). A parametrização do processo permite formar pinos de diferentes tamanhos e geometrias, como apresentado na Figura 2.46 no Capítulo II. Desta forma, foi proposto um estudo detalhado desta parametrização como será apresentado no Capítulo IV. O pino do tipo cabeça abaulada foi escolhido, levando em

consideração o trabalho de Ucsnik et al. (2010), que demostrou melhores resultados em Junta Híbrida Avançada (JHA) em comparação com o de cabeça cilíndrica. De acordo com esses autores, o formato abaulado da cabeça do pino dificulta a sua saída da camada de compósito da JHA, assim, necessitando maior esforço no ensaio de tração para separar as partes da junta. Para minimizar a espessura dos PLMC, visou-se os pinos com menor altura possível.

Conforme mencionado no Capítulo I, as possíveis aplicações previstas dos PLMC com pinos (ancoradores), depositados por CMT PIN, são defesa (blindagens), transporte, construção civil, energia, etc. Desta forma, para testar o desempenho dos PLMC pinados, utilizam-se diversos ensaios mecânicos que capazes de avaliar alguns esforços predominantes em função das aplicações previstas. A avaliação (inclusive a fabricação) dos painéis foi realizada em duas fases. Os painéis da 1^a fase de avaliação (maiores detalhes no Capítulo V) foram testados através do ensaio de dobramento de três pontos, impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*) seguido de compressão ou flambagem e ensaio de cisalhamento (Iosipescu). Na 2^a fase de avaliação (maiores detalhes no Capítulo VI), em comparação com a 1^a fase, conseguiu-se fabricar os painéis com a espessura homogênea e número de lâminas com o uso dos limitadores especiais. Os painéis da 2^a fase foram testados por meio de ensaios mecânicos, alguns já utilizados na 1^a fase (impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*) seguido de flambagem e ensaio de cisalhamento (Iosipescu)) e outros utilizados de maneira complementar (análise modal e ensaio de impacto de alta velocidade (balístico)). Também foram avaliadas nos painéis da 2^a fase de avaliação aspectos de ondulação e rugosidade das suas superfícies. Todos os resultados dos ensaios de ambas as fases foram comparados com os painéis convencionais (sem pinos).

Para realizar diversos ensaios mecânicos e medições foram usados alguns equipamentos auxiliares, sendo que os mais utilizados serão apresentados na Seção 3.3 deste capítulo. Por exemplo, para o ensaio de impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*) foi utilizado um aparelho propriamente construído. A máquina universal de ensaios mecânicos foi utilizada para ensaios de dobramento de três pontos, compressão, flambagem e cisalhamento com acessórios específicos instalados na máquina. As câmeras-filmadoras de alta velocidade foram utilizadas durante o estudo de deposição dos pinos pela técnica CMT PIN permitindo quantificar as energias, sabendo as velocidades, durante o impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*). Por fim, a câmera infravermelha (termográfica) e a máquina de medição por coordenadas (MMC) 3D foram, respectivamente, utilizadas para quantificar a área e a profundidade do dano causado nos PLMC após o ensaio de impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*).

3.2 Bancada experimental

A bancada experimental para fabricação dos PLMC é constituída por uma célula para deposição dos pinos e outra para produção (prensagem e cura) dos PLMC.

3.2.1 Célula para deposição dos pinos

A Figura 3.3 apresenta o grupo de equipamentos da célula para deposição dos pinos pela técnica CMT PIN.

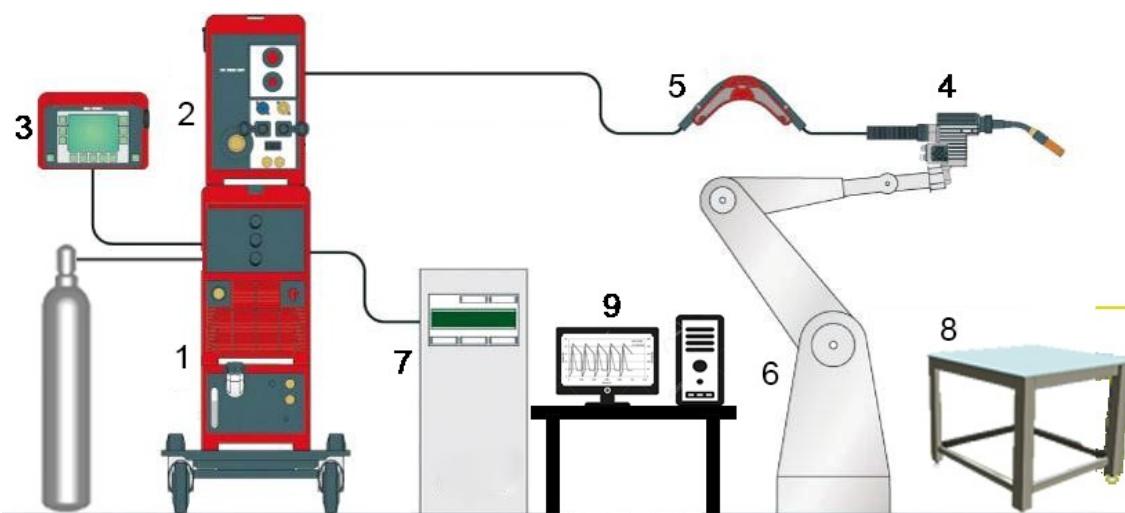


Figura 3.3 – Ilustração da célula de deposição dos pinos pela técnica CMT PIN, onde: 1 - fonte de energia da fabricante Fronius®, modelo TPS 5000 CMT; 2 - cabeçote alimentador de arame, modelo VR 7000 CMT, com rolo de arame-eletrodo dentro; 3 - controle remoto RCU 5000i para programar e ajustar diversas linhas sinérgicas; 4 - tocha de soldagem PullMig CMT; 5 - buffer de arame para permitir a reversão da alimentação do arame, realizada pela tocha; 6 - robô industrial com 6 eixos da fabricante MOTOMAN®, modelo HP20-A0; 7 - controlador do robô modelo NX100; 8 - mesa de soldagem; 9 - computador do sistema de aquisição de dados (adaptado de FRONIUS, 2017)

a) Fonte de energia, cabeçote e tocha CMT

A Figura 3.4(a) apresenta a fonte de energia TPS 5000 CMT, juntamente com o cabeçote VR 7000 CMT e a tocha de soldagem PullMig CMT refrigerada à água. A fonte de energia é capaz de fornecer uma corrente entre 3 A e 500 A. A diferença da tocha CMT para outras tochas MIG/MAG convencional é que o sistema de alimentação do arame-eletrodo da mesma possui dois alimentadores, um instalado na própria tocha (Figura 3.4(b)) e o outro dentro do cabeçote. A tocha CMT, através do seu tracionador de arame interno, permite movimentos rápidos e precisos de avanço e recuo do arame-eletrodo (essencial para o

processo de deposição de pinos, que é conseguido soldando-se o arame na folha metálica, quando avançado, e rompido a uma certa distância da folha por tração, resultado do recuo). Enquanto o outro alimentador (convencional) dentro do cabeçote, só movimenta o arame-eletrodo para frente. O cabo da tocha possui um buffer (“pulmão”) (Figura 3.4(c)) que tem a função de impedir tensão de compressão sobre o arame-eletrodo quando o alimentador interno à tocha reverte seu movimento.

Utilizou-se um bico de contato especial, Contec MD®, desenvolvido pelo próprio fabricante Fronius®. O mesmo é composto por duas partes (móvel e fixa), lembrando um “bico de pato”. A parte móvel é montada de tal forma que se consegue manter o contato elétrico em um ponto único e em um determinado lugar (na saída do bico), deixando a DBCP real sempre constante.



Figura 3.4 – (a) Fonte comercial TPS 5000 CMT juntamente com cabeçote alimentador VR 7000 CMT e a tocha de soldagem PullMig CMT; (b) alimentador interno à tocha CMT; (c) buffer (“pulmão”) do arame-eletrodo da tocha CMT

Segundo o manual do fabricante (Fronius, 2012), antes de realizar a deposição dos pinos, é recomendado fazer procedimentos de *VR alignment* (*alingning wirefeeder or push-pull unit*) e *L/R alignment* (*align welding circuit induvtivity and welding circuit resistance*). O *VR alignment* se realiza entre os alimentadores do arame-eletrodo do cabeçote e da tocha CMT após mudanças no sistema de alimentação do arame-eletrodo (por exemplo, quando da troca de conduíte do cabo da tocha e/ou roletes de ambos os alimentadores em função do diâmetro e do material do arame-eletrodo). Para tal, primeiro é necessário desacoplar ambos os alimentadores do sistema de alimentação do arame-eletrodo e em seguida escolher a opção “*VR alignment*” (termo utilizado no manual do fabricante do equipamento de soldagem) no

controle remoto RCU 5000i. Assim, o sistema consegue automaticamente sincronizar ambas as unidades de alimentação do arame entre si.

Já para o *L/R alignment*, recomenda-se fazer após qualquer mudança no circuito elétrico de soldagem que influenciará na sua resistência e indutância, por exemplo, alterar a espessura de chapa e/ou tipo de material a ser soldado, troca de cabos de energia, troca de tocha e/ou bico de contato, etc. Para tal, primeiro retira-se o bocal da tocha e, em seguida, encosta-se o bico de contato no centro da chapa/folha metálica devidamente posicionada e fixada no lugar onde vai ser realizado o processo de deposição dos pinos. Finalmente, escolhe-se a opção “*L/R alignment*” (termo utilizado no manual do fabricante do equipamento de soldagem) no controle remoto RCU 5000i, e o sistema da fonte vai medir os valores da indutância (μH) e da resistência (mOhm), com o objetivo de utilizá-los nos seus programas-sinérgicos para deposição dos pinos.

b) Braço robótico

O deslocamento da tocha CMT durante a deposição dos pinos foi feito através do robô modelo HP20-A0, da fabricante MOTOMAN®, ilustrado na Figura 3.5. O mesmo possui seis graus de liberdade com a capacidade de deslocar a tocha CMT na extremidade do seu braço. Na Seção 5.1 do Capítulo V será descrita a trajetória de movimento do robô, consequentemente a sequência e outros parâmetros de deposição dos pinos por CMT PIN. Este robô é controlado pelo pedante, onde estão programados e gravados os comandos na própria linguagem de programação do fabricante do robô. É importante destacar que há comunicação entre o pedante do robô e a fonte. O pendante envia sinais direto para fonte CMT, para poder ligar/desligar o processo de deposição de um pino quando chegar na posição desejada da folha metálica.



Figura 3.5 – Braço robótico utilizado para a manipulação da tocha CMT durante deposição dos pinos

c) *Fixadores das folhas metálicas durante a deposição dos pinos*

Para evitar elevadas deformações nas folhas metálicas do aço AISI 430 de 0,4 mm de espessura durante a deposição dos pinos pela técnica CMT PIN, foi necessário elaborar fixadores-enrijecedores para impedir o movimento das folhas metálicas durante a deposição. A Figura 3.6 ilustra os fixadores, compostos por 4 barras-chatas que prendiam a folha metálica próximo das suas bordas em todo o seu perímetro. As barras-chatas de fixação foram fixadas na mesa de soldagem por meio dos parafusos (os mesmos não são vistos na Figura 3.6).



Figura 3.6 – Fixação das folhas metálicas de aço AISI 430 durante a deposição dos pinos pela técnica CMT PIN para mitigar macro deformação das folhas

d) *Aparelho de monitoramento de vazão de gás de proteção*

Durante a deposição dos pinos pela técnica CMT PIN, utilizou-se um medidor de vazão de gás (Figura 3.7(a)) do fabricante SPS® (Sistemas e Processos de Soldagem), modelo MVG-3, que opera com um sensor do tipo mássico em uma faixa de medição de 0 a 20 L/min. Esse medidor mede a vazão mássica diretamente do fluido com alta precisão, com sensibilidade e tempo de resposta, independente das variações de pressão e temperatura, e permite a saída de sinal analógico (cabo de conexão da sua saída analógica com o sistema de aquisição dos sinais elétricos) convertido para vazão volumétrica. De acordo com o fabricante (MANUAL DE INSTRUÇÕES MVG-3, 2012), o equipamento realiza a medição da vazão instantânea e acumulada de quatro tipos de gases (Ar, N₂, O₂ e CO₂).



Figura 3.7 – Medidor de vazão de gás modelo MVG-3 com seus elementos, onde: 1 - entrada de gás; 2 - saída de gás; 3 - conector DB9 (fêmea) de saídas analógicas para conexão com o sistema de aquisição de sinais elétricos; 4 - tela; 5 - cabo de alimentação (adaptado de MANUAL DE INSTRUÇÕES MVG-3, 2012)

e) *Sistema de aquisição de sinais elétricos*

O monitoramento de corrente, tensão e vazão de gás de proteção foram realizados de forma sincronizada, utilizando-se uma placa de aquisição da National Instruments®, modelo NI USB-6009, ilustrada na Figura 3.8. Sua conexão com o computador foi feita via USB (*Universal Serial Bus*). Um programa desenvolvido em linguagem LabVIEW® permitiu a interface gráfica com o usuário, apresentando os sinais adquiridos com diferentes frequências de aquisição (neste trabalho utilizou-se entre 2 e 5 kHz) com 14 bits de resolução e com a opção de salvá-los em formato texto para posterior análise e tratamento. O tempo desejado para a aquisição foi introduzido em segundos.

A placa de aquisição recebia os sinais analógicos da corrente através de um sensor do efeito Hall (fabricante LEM® modelo HAT-600), preso na mesa de soldagem. Com passagem do cabo de “terra” por dentro do sensor, gera-se uma tensão na saída dele proporcional à corrente. Já para conseguir monitorar a tensão durante a deposição dos pinos e não danificar a placa de aquisição de sinais elétricos (dados), utilizou-se uma interface (divisor de tensão com isolamento) antes de passar o sinal para placa, já que a placa de aquisição permite entrada de até 10 V (por exemplo, uma fonte tem tensão em vazio na faixa de 70 V). Por sua vez, um dos conectores para medir a tensão foi preso na mesa de soldagem (próximo à folha metálica) e o outro na tocha CMT (cabos brancos da Figura 3.4(b)), o mais próximo possível do bico de contato. Finalmente, o sinal de vazão de gás foi adquirido direito de saída analógica do aparelho de monitoração de vazão de gás de proteção, que possui uma tensão de saída proporcional a vazão de gás de até 5 V.

É importante destacar que todos os sistemas de medição deste trabalho, inclusivo o sistema de aquisição de sinais elétricos, foram calibrados antes do seu uso.



The image shows the NI USB-6009 data acquisition board. It is a white rectangular module with a central printed circuit board. On the left and right sides, there are black metal brackets with multiple circular mounting holes. The central board has several components, including a blue integrated circuit and some surface-mount resistors. The National Instruments logo is printed on the board.

Entradas analógicas	
Canais single-ended	8
Canais diferenciais	4
Resolução	14 bits
Taxa de amostragem	48 kS/s
Throughput (todos canais)	48 kS/s
Faixa máxima de tensão	-10 V, 10 V
Exatidão na faixa máxima de tensão	138 mV
Faixa mínima de tensão	-1 V, 1 V
Exatidão na faixa mínima de tensão	37,5 mV
Quantidade de faixas	8
Amostragem simultânea	Não
Memória on-board	512 B

Saídas analógicas	
Canais	2
Resolução	12 bits
Tensão máxima	5 V
Faixa máxima de tensão	0 V, 5 V
Exatidão na faixa máxima de tensão	7 mV
Faixa mínima de tensão	0 V, 5 V
Taxa de atualização	150 S/s
Drive de corrente, individual	5 mA
Drive de corrente,	10 mA

Figura 3.8 – Placa de aquisição da National Instruments® modelo NI USB-6009 com suas principais características (adaptado de NATIONAL INSTRUMENTS®, 2012)

3.2.2 Célula para produção (prensagem e cura) dos painéis

Para produção dos PLMC, que inclui prensagem dos painéis pré-montados e execução do ciclo de cura da camada de compósito (lâminas de pré-impregnados de fibra de vidro/epóxi) dos mesmos, utilizou-se uma prensa de cura a quente do fabricante CARVER®, modelo CMG100H-15-C, ilustrada na Figura 3.9, com uma área de trabalho de cada uma de 400 × 400 mm. A força aplicável entre as suas placas é de até 100 Ton. A mesma possui aquecimento (por resistência elétrica) e resfriamento (à água) controlados de modo independente nas placas superior e inferior. Maiores detalhes do ciclo de cura (força/tensão aplicada, temperatura e tempo) realizado pela prensa de cura a quente serão descritos nas seções de fabricação dos PLMC (Seções 5.1 e 6.1 dos Capítulos V e VI, respectivamente)

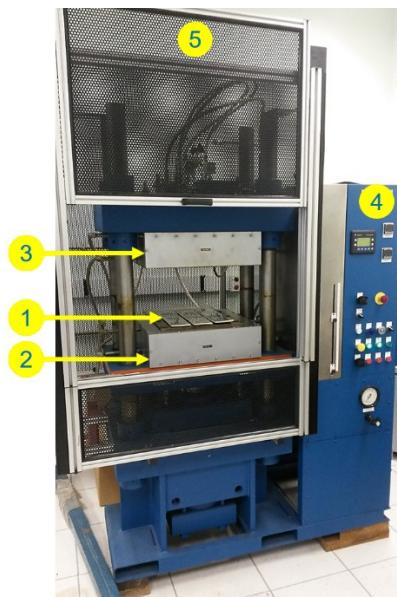


Figura 3.9 – Prensa de cura a quente do fabricante CARVER®, modelo CMG100H-15-C com resfriamento e aquecimento controlados, onde: 1 - PLMC a serem montados e curados; 2 - placa superior; 3 - placa inferior; 4 - painel de controle; 5 - grade de proteção (é fechada quando o ciclo de prensagem e cura está em execução)

3.3 Equipamentos de ensaio e medição

Foi utilizada uma variedade de equipamentos de ensaio e medição, com objetivo de avaliar o efeito dos pinos sobre as propriedades mecânicas dos PLMC. Os equipamentos mais utilizados estão apresentados nas seções a seguir.

3.3.1 Aparelho de ensaio de impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*)

Segundo Farooq e Myler (2016) apud Ursenbach (1995), o ensaio do tipo *Drop-Weight Test* é da classe de baixa velocidade (até 10 m/s) e geralmente não causa uma destruição completa ou perfuração do material ensaiado, havendo um ricocheteio (rebote) do impactador. Para poder realizar o ensaio do tipo *Drop-Weight Test* neste trabalho, foi construído um aparelho seguindo a norma ASTM D7136 (ASTM, 2015), conforme apresenta a Figura 3.10. O aparelho se baseia na queda livre de um impactador com massa fixa de uma altura previamente determinada, liberando sua energia potencial de impacto numa face/superfície do corpo de prova. Para realizar o ensaio de impacto neste aparelho, primeiramente foram colocados gatilhos de disparo do impactador e do retentor de duplo impacto (posições 12 e 13 da Figura 3.10, respectivamente) em furos passantes feitos nos tubos-guia (o gatilho do impactador numa altura desejada e o do retentor contra duplo impacto numa posição fixa). Depois de colocados o impactador e o retentor contra duplo impacto pela parte superior nos seus tubos-guia, o operador primeiro precisa tirar o gatilho que fica dentro

do tubo-guia do impactador e quando o impactador bater no corpo de prova, logo em seguida, tirar o gatilho do tubo-guia de retentor contra duplo impacto. Neste caso, o operador precisa ficar atento e agir rapidamente. Para isto, recomenda-se treinar antes, colocando um material de menor custo no lugar do corpo de prova.

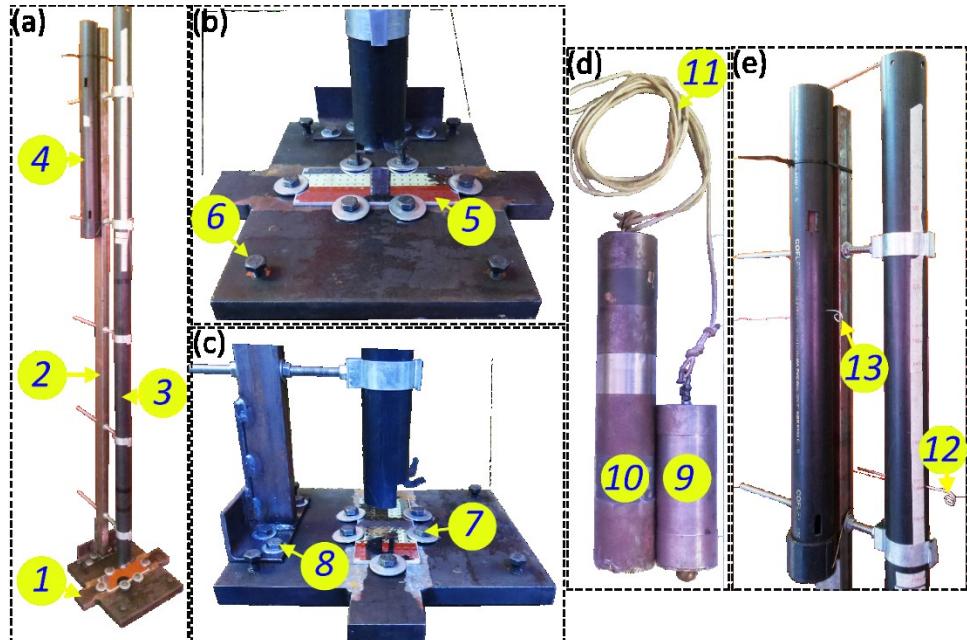


Figura 3.10 – Aparelho construído para realização do ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test* em painéis, conforme a norma ASTM D7136 (ASTM, 2015): (a) vista geral, com destaque para a base de elevada inércia (1), para coluna-suporte dos tubos-guia (2), para o tubo-guia do impactador (3) e para o tubo-guia do retentor contra duplo impacto (4); (b) e (c) vistas frontal e lateral, respectivamente, da base do aparelho, onde: 5 - corpo de prova; 6 - parafusos niveladores da base (4 unidades); 7 - parafusos de fixação do corpo de prova (6 unidades); 8 - parafusos de fixação da coluna-suporte dos tubos-guia com a base de elevada inércia (4 unidades); (d) aspecto do impactador (9) e do retentor contra duplo impacto (10) ligados pela corda de atuação do retentor de duplo impacto contra o impactador (11); (e) seção dos tubos-guia com destaque para os gatilhos do impactador (12) e do retentor contra duplo impacto (13)

A base de elevada inércia (posição 1 da Figura 3.10) foi feita de aço ASTM A36 com 20 mm de espessura, onde foi montada a coluna-suporte dos tubos-guia (2), o tubo-guia do impactador (3) e o tubo-guia do retentor contra duplo impacto (4). A base de elevada inércia contém um orifício com dimensões de $75 \pm 1 \text{ mm} \times 125 \pm 1 \text{ mm}$. Pela norma ASTM D7136 (ASTM, 2015), o corpo de prova (5) posiciona-se sobre essa abertura, fixados por 6 parafusos M10 × 1,5 (7), com arruelas para aumentar a área de contato dos parafusos-fixadores com o corpo de prova. A força de aperto dos parafusos de fixação foi controlada por meio de um torquímetro manual, com valor de torque igual a 5 Nm durante todos os ensaios. Foram feitos 4 furos rosqueados para parafusos niveladores (M10 × 1,5, posição 6). Para fixar a coluna-

suporte dos tubos-guia (8) com a base de elevada inércia do aparelho foram feitos 4 furos rosqueados passantes (M10 × 1,5).

O impactador (posição 9 da Figura 3.10) pode ter uma massa variável conforme necessário (por exemplo, 2,024 e 2,326 kg utilizados neste trabalho) através da adição de cilindros de peso no seu corpo inalterado feito de aço ABNT 1045, com diâmetro de 51 mm e comprimento de 130 mm. O impactador possui uma esfera de rolamento soldada no centro do diâmetro do cilindro do impactador (17,0 e 28,5 mm utilizadas no presente trabalho). Já o retentor contra duplo impacto (posição 10) com massa fixa de 4,206 kg, foi feito de aço ABNT 1020, com diâmetro de 51 mm e comprimento de 275 mm. O comprimento dos tubos-guia do impactador e do retentor contra duplo impacto foram de 2,0 e 0,7 m, respectivamente, com diâmetro interno e externo de 52 e 60 mm, respectivamente. O retentor contra duplo impacto foi conectado ao impactador por meio de uma corda (posição 11), já que, como próprio nome sugere, tem a função de evitar duplo impacto do impactador com o corpo de prova (painel), assim, dando somente um único impacto com uma determinada energia (neste caso dependendo da altura de queda e massa do impactador). A altura máxima de queda livre do impactador permitida neste aparelho é de até 1,90 m.

3.3.2 Máquina universal de ensaios mecânicos

Foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos do fabricante Shimadzu®, série Autograph AG-X, apresentada na Figura 3.11. Essa máquina com capacidade de aplicação de força de compressão/tração de até 300 kN e resolução de 0,1 N foi empregada para ensaios de dobramento de três pontos, compressão, flambagem e cisalhamento de Iosipescu dos painéis. Dependendo do tipo do ensaio foram instalados diversos suportes/acessórios dentro da máquina, os quais com mais detalhes serão mostrados nas seções dos Capítulos V e VI. É importante destacar que por um software do próprio fabricante do equipamento, denominado *TrapeziumX*, o usuário consegue parametrizar/programar e controlar/monitorar os ensaios. O software da máquina permite também construir as curvas do tipo Deslocamento × Força dos ensaios executados em tempo real, tendo ainda a opção de salvá-los em formato texto para posterior análise e tratamento.



Figura 3.11 – Máquina universal de ensaios da Shimadzu®, série Autograph AG-X 300 kN

3.3.3 Câmeras-filmadoras de alta velocidade

Duas câmeras de alta velocidade foram utilizadas para diversas finalidades no presente trabalho, por exemplo, deposição dos pinos durante o estudo da técnica CMT PIN e para poder observar o impacto e quantificar as energias, baseadas nas velocidades de impacto e retorno do impactador durante o ensaio de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*). Para estudar a deposição dos pinos pela técnica CMT PIN foi utilizada uma câmera do fabricante NAC Corporation®, modelo Memrecam Ci (colorida), apresentada na Figura 3.12(a), com capacidade de gravação de até 2 000 quadros por segundo (qps) e tempo de abertura do obturador (*shutter*) mecânico de até 41,67 μ s e resolução de 252×186 pixels em 2 000 qps (utilizados neste trabalho). E para o ensaio de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*), utilizou-se a outra câmera da fabricante Fastec Imaging® modelo HiSpec 5 8 Gb (monocromática), apresentada na Figura 3.12(b), que tem capacidade de gravação de até 20 000 qps e tempo de abertura do obturador (*shutter*) elétrico (CMOS sensor) de até 2 μ s e resolução de $528 \times 1 160$ pixels em 2 000 qps (utilizados neste trabalho). Cada câmera possui seu próprio software que possibilita controlar/operar as mesmas e ainda gravar e editar os vídeos.

A utilização da câmera Memrecam Ci, que é colorida, foi necessária para o estudo da deposição dos pinos pela técnica CMT PIN. Através da mudança de coloração, foi possível observar a mudança de temperatura no arame-eletrodo, indicando as regiões mais/menos aquecidas. Já a câmera monocromática (Fastec), por ser mais moderna, permitiu gravar as

imagens com maior taxa de amostragem e resolução, assim, permitindo obter uma melhor quantificação (análise) das velocidades/energias durante o impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*) a partir das imagens capturadas.

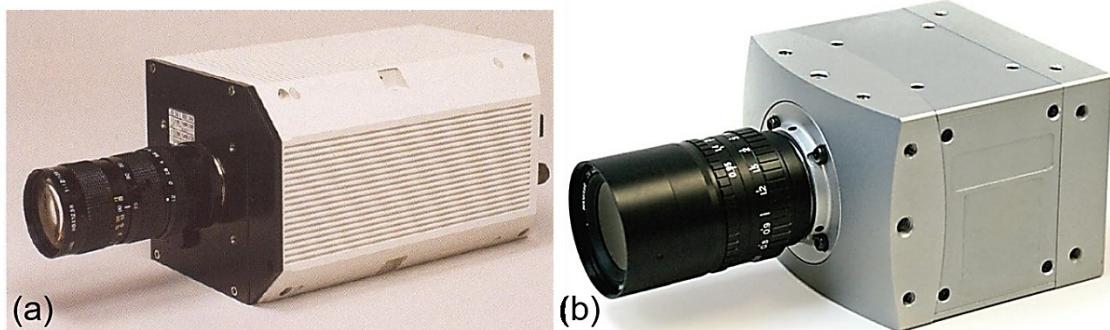


Figura 3.12 – Câmeras de alta velocidade utilizados durante trabalho, onde: (a) modelo Memrecam Ci (colorida) do fabricante NAC Corporation®; (b) modelo HiSpec 5 8 Gb (monocromática) do fabricante Fastec Imaging®

3.3.4 Máquina de medição por coordenadas (MMC) 3D

Foi empregada uma máquina de medição por coordenadas (MMC) 3D da fabricante Mitutoyo® modelo BR-M443 (Figura 3.13) para medição do perfil de profundidade do dano (deformação permanente) antes e após os testes de ensaio de impacto de baixa velocidade (*Drop-Weight Test*) nos PLMC. A MMC é manual, ou seja, o operador precisa deslocar o apalpador digital 3D (cabeça tocante) ponto por ponto no objeto de medição (neste caso painel). As faixas de medição da máquina em sistemas de coordenadas cartesianas são 700 (eixo X) × 1 000 (eixo Y) × 600 (eixo Z) mm, respectivamente, com uma resolução de 1 µm. À máquina MMC está incorporado um computador com software de medição da fabricante do equipamento, permitindo medir estruturas complexas e efetuar o controle simultâneo de diversas características metrológicas de uma peça. Por meio da determinação de coordenadas (X, Y e Z) sobre a superfície de uma peça, a partir dos quais é definida a dimensão.



Figura 3.13 – Máquina Manual de Medição por Coordenadas (MMC) 3D da fabricante Mitutoyo® modelo BR-M443 com um computador com software de medição

3.3.5 Câmera infravermelha (termográfica)

Para tentar quantificar a área de dano causada após o ensaio de impacto nos painéis laminados, utilizou-se uma câmera infravermelha (termográfica). A mesma foi utilizada porque faz a medição de um campo de temperatura, ou seja, faz várias medições de temperatura ao mesmo tempo sobre uma área, enquanto os termopares fazem apenas uma medição por vez. As câmeras infravermelhas utilizam sensores que transformam a intensidade de radiação (neste caso na faixa do infravermelho) em sinal de temperatura. A Figura 3.14 apresenta a câmera infravermelha da fabricante FLIR Systems® modelo A325, que foi empregada neste trabalho. Sua análise é dividida em três níveis de temperatura (-20 a 120 °C, 0 a 350 °C e 300 a 2 000 °C). Segundo o datasheet da fabricante (FLIR Systems, 2009), esta câmera possui uma resolução de 320 × 240 pixels, uma taxa de aquisição de até 60 Hz (quadros por segundo) e uma precisão de ± 2 °C. O próprio software da câmera chamado *Thermocam Research 2.9* tem a função de controle da mesma, e da filmagem e análise da temperatura de objeto de medição através dos termogramas capturados.



Figura 3.14 – Câmera infravermelha do fabricante FLIR Systems® modelo A325 (FLIR Systems, 2009)

3.4 Insumos

3.4.1 Gás de proteção

Para a soldagem CMT PIN, foi utilizada uma mistura de gás de proteção de Ar+2%CO₂ (composição nominal), classe industrial. A composição química dessa mistura gasosa foi verificada 5 vezes através de um analisador comercial de gás (Oxybaby®), resultando em $3,7 \pm 0,1\%$ CO₂, mas considerando a inacurácia deste medidor para CO₂, A composição química do gás de proteção ao longo do foi apresentada como composição nominal, ou seja, Ar+2%CO₂. A vazão adotada durante as deposições foi em cerca de 8 L/min, verificada por um fluxômetro (bibímetro).

3.4.2 Metais de base e de adição

Para deposição dos pinos nos PLMC, da mesma forma buscando um material facilmente encontrado no mercado e de custo reduzido, foram utilizadas folhas de aço inoxidável do tipo AISI 430 com espessuras 0,4 mm. Estas foram escolhidas por terem menor custo, pequena espessura e ao mesmo tempo ter uma boa soldabilidade (verificada na Seção 4.3 do Capítulo IV), em comparação com o AISI 304. Para deposição dos pinos, foi utilizado arame-eletrodo do tipo AWS ER 309 L, do fabricante Sandvik®, com diâmetro de 1,0 mm.

3.4.3 Material compósito (pré-impregnado)

Foram utilizados pré-impregnados (*prepregs*) de fibra de vidro/epóxi com tecido de reforço de 8HS (*eight Harness Satin wave*). No manual da fabricante (Hexcel Corporation®, 2016), este material compósito é especificado como 7781-38"-F155, contendo 50 % (mínimo) em volume de reforço de fibra de vidro e a matriz de resina epóxi modificada do tipo F-155.

Este material foi doado pela empresa ALLTEC Materiais Compostos®, da cidade de São José dos Campos, estado de São Paulo. Os tecidos 8HS apresentam uma configuração onde um fio de urdume passa sobre sete fios de trama e por baixo do oitavo, conforme apresenta a Figura 3.15. De acordo com Silva (2006), a configuração 8HS propicia o aumento na resistência à tração e à compressão, além de conferir maior flexibilidade ao tecido durante seu manuseio na conformação de contornos. A Tabela 3.1 revela principais propriedades do pré-impregnado utilizado neste trabalho, conforme a fabricante (Hexcel Composites®, 2017).

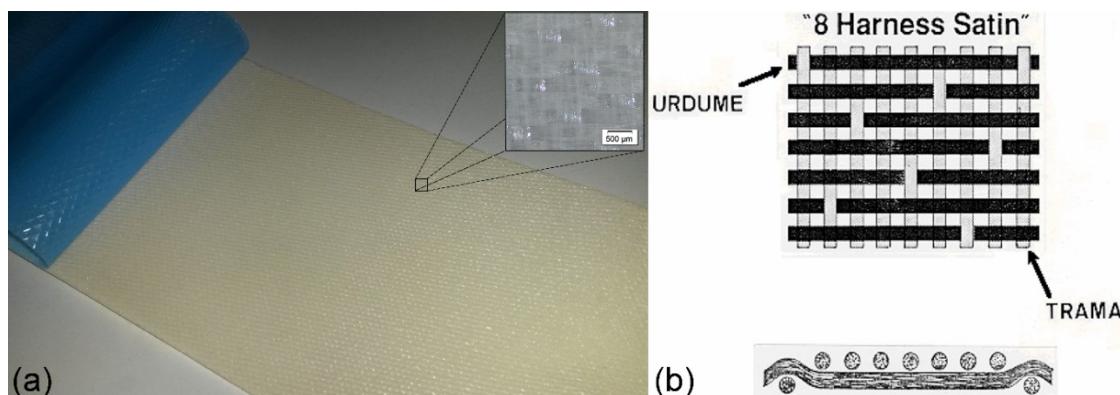


Figura 3.15 – Lâmina de pré-impregnado de fibra de vidro/epóxi da fabricante Hexcel Corporation® do tipo 7781-38"-F155, utilizado neste trabalho, onde: (a) Vista geral e (b) esquema do tecido 8HS (*eight Harness Satin wave*) do pré-impregnado (adaptado de SILVA, 2006)

Tabela 3.1 – Principais propriedades do pré-impregnado utilizado (HEXCEL CORPORATION®, 2016)

Propriedades	Valores
Massa específica	1,335 g/cm ³
Temperatura de cura (T_g (seco))	121 °C
Equilíbrio de absorção de umidade	9,4 %
Coeficiente de expansão térmica linear	$5,27 \times 10^{-5}$ cm/cm/0 °C
Tensão de ruptura	80 MPa
Módulo de tensão	3,24 GPa

CAPÍTULO IV

DEPOSIÇÃO DOS PINOS PELA TÉCNICA CMT PIN

A técnica CMT PIN foi desenvolvida a fim de depositar pinos metálicos de vários formatos e dimensões em superfícies metálicas. Portanto, essa técnica não se caracteriza como uma soldagem contínua, lembrando mais um processo de soldagem a ponto. A animação postada em https://youtu.be/PTe93p_RVH8 e a Figura 4.1 (ambas do presente autor) ilustram um ciclo operacional da técnica CMT PIN, como descrito a seguir. Durante a abertura do arco (quadro (a) ao (d)), uma pequena gota e poça de fusão são formadas, respectivamente na ponta do arame-eletrodo e na superfície da chapa. À medida que o arame-eletrodo continua a ser alimentado, a ponta do arame-eletrodo se aproxima e toca a superfície da poça, quando a corrente é cortada (apagando o arco) e acontece a parada de alimentação do mesmo (quadro (e)), permanecendo assim por um período de tempo (quadros (e) ao (f)). Durante este tempo sem fonte de calor (corrente e tensão próximas de zero), acontece a solidificação e se intensifica o resfriamento do contato arame-superfície metálica, consequentemente soldando o arame na chapa. Ao fim desta etapa, inicia-se outro período (quadro (f) ao (g)), no qual uma corrente é imposta ao arame, de modo a aquecer e amolecer a extensão do mesmo, especialmente numa região próxima ao meio de sua extensão (onde mais se aquece, por dissipar menos calor). Mesmo com corrente atuando, não há abertura do arco, caracterizando este período pela baixa tensão (relativo apenas a resistência ôhmica). Antes de terminar o período de aquecimento, um movimento de recuo é aplicado ao arame, mas como o mesmo está soldado na superfície da chapa, esse fica sujeito a um esforço de tração (quadros (g) até (h)). Ao final de um intervalo curto tempo (em (h)), o arame é rompido a uma certa distância (definida de acordo com os parâmetros) entre o bico de contato e a chapa, de forma análoga a um ensaio de tração, deixando um pino depositado sobre a superfície da chapa (quadro (i)).

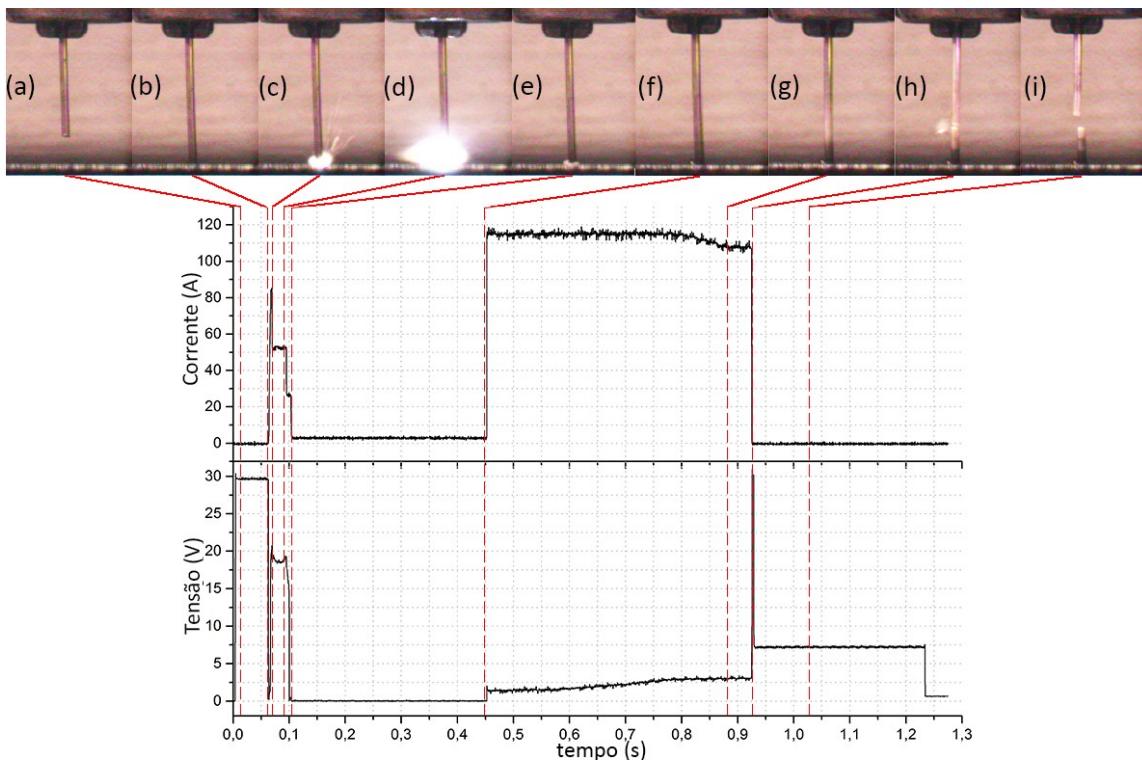


Figura 4.1 – Quadros sequenciais de deposição dos pinos pela técnica CMT PIN em fase com os oscilogramas de corrente e tensão: de (a) a (d) = abertura do arco; de (e) a (f) = resfriamento e solidificação do contato arame-superfície da poça; de (f) a (g) = aquecimento do arame soldado na superfície da poça; de (g) a (h) = tracionamento do arame aquecido e soldado na superfície da poça; (h) = rompimento do arame; (i) = pino depositado na superfície da chapa

Nas seções seguintes deste capítulo, o funcionamento da técnica CMT PIN foi verificado do ponto de vista prático, estudando-se o comportamento de seus parâmetros operacionais e a influência dos mesmos sobre a geometria dos pinos. Assim, procurou-se um melhor entendimento sobre o funcionamento da técnica CMT PIN com foco em sua aplicação nos PLMC.

4.1 Ação de cada parâmetro de regulagem da técnica CMT PIN

4.1.1 Caracterização e classificação dos parâmetros

Para entender melhor como a técnica de deposição dos pinos CMT PIN consegue controlar as características geométricas dos pinos (tipo cabeça cilíndrica e cabeça abaulada), os parâmetros estudados foram divididos em três grupos, a saber:

1º Grupo - Parâmetros de Entrada (regulagem): parâmetros que o usuário consegue regular/ajustar e, assim, controlar as características geométricas do pino depositado. Conforme o livro-manual do fabricante (Fronius, 2014), os parâmetros de entrada são

disponíveis no controle remoto do equipamento (RCU 5000i) e denominados como “*Ball/Cyl. Adaptation*” (BCA), “*Altitude Adaptation*” (AA) e “*Base Adaptation*” (BA). O parâmetro BCA permite variar a forma da cabeça e, consequentemente, o tipo do pino (neste caso, cabeça abaulada ou cabeça cilíndrica); um maior valor de BCA (mínimo -5.0 e máximo 5.0) corresponde a um maior abaulamento (cabeça) do pino. Já o parâmetro AA, como sugere o nome, foi concebido para permitir a regulagem da altura do pino depositado; quanto menor o seu valor (mínimo -30 e máximo 30), menor a altura. Finalmente, o parâmetro BA controla o tamanho da base (pé) do pino na região de solda pino-chapa; maior o valor da regulagem desse parâmetro (mínimo -0.20 e máximo 0.20), maior a base (pé) do pino.

2º Grupo - Parâmetros de Saída: parâmetros de características geométricas do pino depositado, tais como, altura, diâmetro da cabeça e pé (base) do pino, ilustrados na Figura 4.2. Esses parâmetros não são referenciados pelo fabricante, como em seu livro-manual (Fronius, 2014), e foram estabelecidos neste trabalho como forma de desenvolver uma relação entre regulagem e resposta.

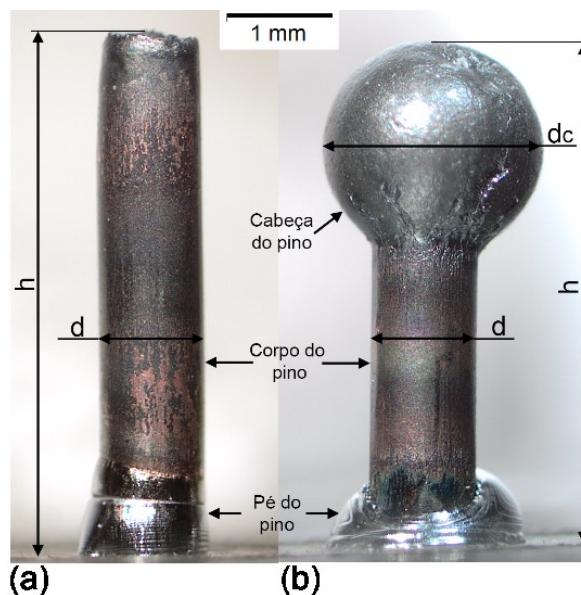


Figura 4.2 – Parâmetros geométricos dos pinos (parâmetros de saída): (a) cabeça cilíndrica (*cylindrical*); (b) cabeça abaulada (*ball-head*), onde: h = altura do pino; dc = diâmetro da cabeça do pino e d = diâmetro do corpo do pino (igual ao diâmetro do arame-eletrodo usado)

3º Grupo - Parâmetros Intermediários: são consequência dos parâmetros de entrada, ou seja, valores resultantes do comando do equipamento em resposta às regulagens dos parâmetros de entrada, aqui representados pela corrente, tensão e tempo, em forma de oscilogramas da corrente e da tensão típicos do processo de deposição. Pode-se imaginar que o controle deste processo se baseia na equação de aquecimento por efeito Joule, ou seja, $Q = I^2Rt$. Pode-se ainda esperar que dos 3 parâmetros citados, corrente e tempo são

impostos pelo algoritmo de controle, enquanto a tensão é resultante da resistência ôhmica (portanto dependente da geometria e do material do pino e da intensidade da corrente). Corrente é com certeza o parâmetro de maior sensibilidade (uma pequena variação representa grande resposta). Já o tempo controla a intensidade de calor imposta. Porém, esse mesmo tempo afeta também a resistência indiretamente, pela dependência da resistividade com a temperatura, e torna-se um parâmetro secundário e não linear. Esses parâmetros também não são citados ou fornecidos pelo fabricante (Fronius, 2014) e foram estabelecidos neste trabalho como forma de entender o fenômeno ocorrente durante a operação.

Em linha com o exposto, a Figura 4.3 mostra o oscilograma típico de corrente e tensão durante a deposição de um pino do tipo cabeça cilíndrica (de um teste com parâmetros de entrada de $BCA = 1.0$; $AA = 0$ e $BA = 0$). O ciclo de deposição de um pino foi dividido nesta figura em 4 regiões, visando melhor entender como e quando cada parâmetro de entrada age para alterar algumas características geométricas do pino. A abertura do arco acontece na 1^a região do ciclo de deposição de um pino, quando a ponta do arame-eletrodo é fundida e uma pequena poça de fusão é formada pelo arco-voltaico aberto por um curto tempo (aproximadamente 35 ms), região que se conclui com o contato da gota com a poça formada na superfície da chapa metálica. Na 2^a região ocorre a solidificação do pé do pino sobre a chapa metálica, durante um tempo (que depende de outros parâmetros) sem ação de corrente e tensão. Já na 3^a região, o arame-eletrodo soldado na chapa metálica é aquecido pela passagem de um valor relativamente alto da corrente (de aproximadamente 100 A), sob, aparentemente, a imposição de uma potência elétrica constante, sendo, neste caso, a tensão consequência da reatância do sistema. O objetivo da 3^a região é diminuir a resistência mecânica do arame-eletrodo pelo aquecimento por efeito Joule do mesmo. Finalmente, na 4^a região o arame-eletrodo devidamente aquecido é puxado pelo motor da tocha e se rompe, formando um pino. Nessa região, por um curto período de tempo há um crescimento da tensão, mas um decaimento da corrente existente na 3^a região, para não abrir um arco. Em seguida, a corrente é mantida em zero, mas a tensão, por algum motivo, permanece com valor baixo (aproximadamente 7 V).

Cada uma das regiões da Figura 4.3 foi ampliada e foram definidos para fins deste estudo alguns parâmetros aqui chamados de intermediários, como mostra a Figura 4.4. Para quantificar os valores dos parâmetros intermediários automaticamente, foi desenvolvido um programa no ambiente MATLAB[®], apresentado em apêndice.

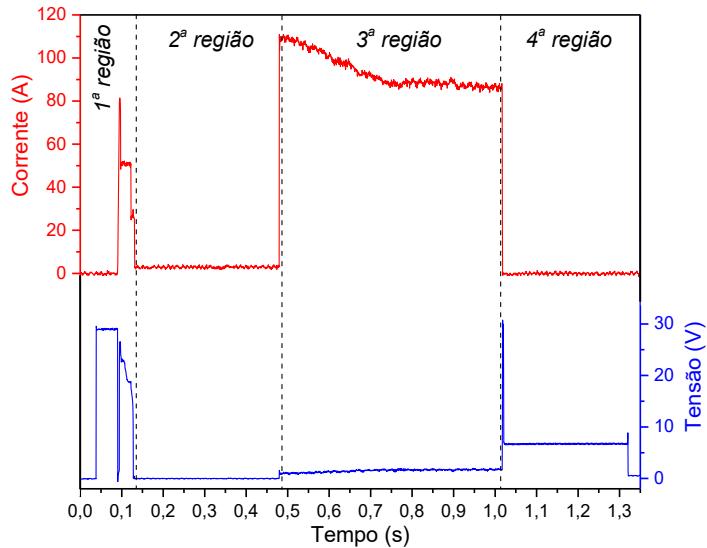


Figura 4.3 – Oscilograma de corrente e tensão durante um ciclo de deposição do pino com suas regiões (típico para todos os tipos de pinos deste trabalho)

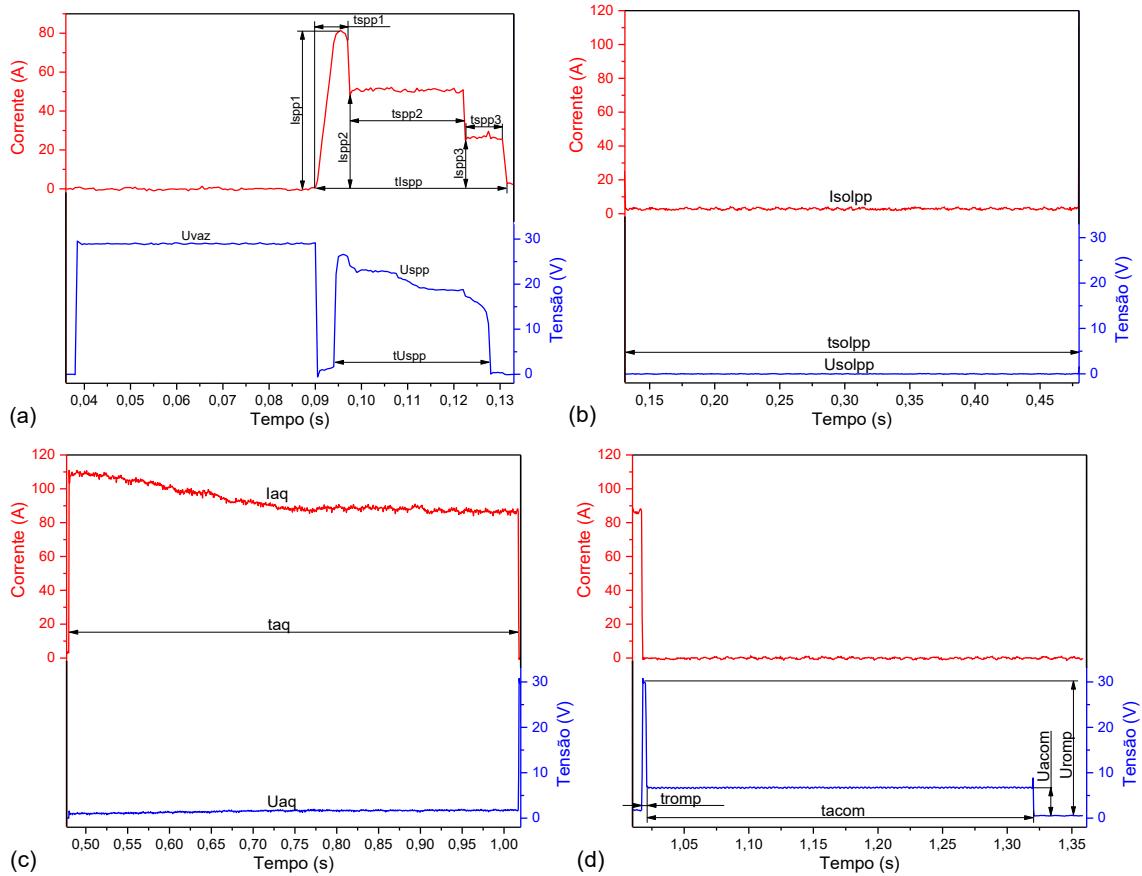


Figura 4.4 – Detalhes ampliados das regiões da Figura 4.3 com a identificação dos parâmetros intermediários dentro de cada região; (a) 1^a região, onde U_{vaz} = tensão em vazio (V); U_{spp} = tensão durante soldagem do pé do pino (V); t_{Uspp} = tempo de soldagem do pé do pino (s); I_{spp1} = corrente 1 de soldagem do pé do pino (A); I_{spp2} = corrente 2 de soldagem do pé do pino (A); I_{spp3} = corrente 3 de soldagem do pé do pino (A); t_{spp1} = tempo de ligação da corrente 1 (s); t_{spp2} = tempo de ligação da corrente 2 (s); t_{spp3} = tempo de ligação da corrente 3 (s); t_{lspp} = tempo total de soldagem do pé do pino (s); (b) 2^a região, onde t_{solpp} = tempo de solidificação do pé do pino (s); I_{solpp} = corrente de solidificação do pé do pino (A); (c) 3^a região, onde I_{aq} = corrente de aquecimento (A); t_{aq} = tempo de aquecimento (s); U_{aq} = tensão de aquecimento (V); (d) 4^a região, onde U_{acom} = tensão de aquecimento (V); U_{romp} = tensão de rompimento (V); t_{romp} = tempo de rompimento (s); t_{acom} = tempo de aquecimento (s).

Usolpp = tensão durante solidificação do pé do pino (V); (c) 3^a região, onde taq = tempo de aquecimento (s); Iaq = corrente de aquecimento (A); Uaq = tensão durante aquecimento (V); (d) 4^a região, onde tromp = tempo de rompimento (s); tacom = tempo de acomodação térmica após rompimento (s); Uromp = tensão durante rompimento (V); Uacom = tensão em vazio durante acomodação térmica após rompimento (V)

4.1.2 Planejamento experimental

Para se estudar a ação de cada parâmetro da técnica CMT PIN na deposição dos pinos, foram utilizadas chapas de aço ABNT 1020 com dimensões de 30,0 × 60,0 × 1,5 mm como material de base e um arame-eletrodo da classe AWS ER70S-6, de 1,0 mm de diâmetro (valor verificado como 0,99 ± 0,00 mm). Outros parâmetros do processo de deposição, tais como, DBCP (igual a 11 mm), temperatura da chapa (temperatura ambiente, cerca de 25 °C), gás de proteção (Ar+2%CO₂, valor verificado como 3,7%CO₂) e sua vazão de 8 L/min, foram mantidos inalterados. Para depositar os pinos foi utilizado o arquivo de base de dados DB0875 do fabricante do equipamento para diversos materiais e tipos de pinos. Dentro desta base de dados foi selecionado um programa-sinérgico apropriado para o arame-eletrodo de aço ao carbono do tipo G3Si1 (similar à classe AWS ER70S-6) com diâmetro de 1,0 mm. Antes de realizar a deposição dos pinos, as superfícies das chapas metálicas foram homogeneousmente limpadas com auxílio de uma lixadeira manual com disco de 80 *mesh*, para remover óxidos e outras partículas indesejadas, e foram efetuados os procedimentos de “*L/R alignment*” e “*VR alignment*”, procedimentos esses mencionados na Seção 3.1 do Capítulo III e descritos com detalhes no manual do controle remoto RCU 5000i do fabricante do equipamento (Fronius, 2012).

Foi feito um planejamento experimental do tipo fatorial completo, levando-se em consideração 3 parâmetros de entrada (parâmetros de regulagem) e dividindo-se a faixa de regulagem de cada parâmetro em 5 níveis. A faixa de regulagem para cada parâmetro de entrada foi encontrada através dos testes preliminares, escolhendo-se como critério para limite das faixas pinos com união do arame com a chapa e com aparência sem defeitos visuais, tais como, cabeça inclinada por causa do elevado volume. Assim, para os parâmetros de entrada AA e BA foi possível utilizar toda a faixa de regulagem do equipamento, de -30 até 30 e -0.20 até 0.20, respectivamente. Porém, para o parâmetro de entrada BCA, somente parte da faixa disponível foi utilizada no planejamento, ou seja, de 1.0 até 5.0, pois com valores inferiores à 1.0 o sistema não conseguiu cortar o arame-eletrodo soldado na chapa ou cortava com elevado esforço. Estas combinações de parâmetros, considerando os 3 parâmetros de entrada com 5 níveis de regulagem, BCA (1.0; 2.0; 3.0; 4.0 e 5.0), AA (-30; -15; 0; 15 e 30) e BA (-0.20; -0.10; 0; 0.10 e 0.20), resultaram em uma matriz com 125 conjuntos de parâmetros, apresentada na Tabela 4.1(a) em apêndice.

Todas as deposições dos pinos foram realizadas em uma célula robótica, com 7 repetições (pinos) de cada conjunto de parâmetros, como ilustrado na Figura 4.5. O tempo entre cada deposição dos 7 pinos foi de aproximadamente 5 s, mas o mesmo não foi otimizado neste trabalho, como poderia. É importante destacar que a deposição dos pinos foi obtida com estabilidade do processo e com repetitividade.

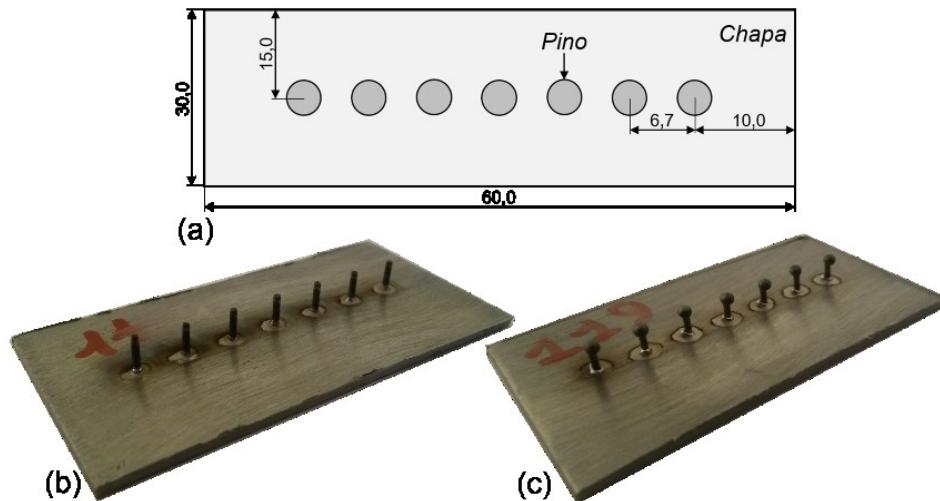


Figura 4.5 – (a) Ilustração do posicionamento dos 7 pinos de cada conjunto de parâmetros depositados numa chapa de aço ABNT 1020 de $60,0 \times 30,0 \times 1,5$ mm; (b) exemplo de deposição dos pinos do tipo cabeça cilíndrica e (c) do tipo cabeça abaulada

A medição das características geométricas dos pinos foi realizada através de um software de tratamento digital de imagem em perfis dos pinos obtidas por estereoscópio óptico (3 a 4 x de aumento). Para essas medições foram selecionados os últimos 3 dos 7 pinos depositados por cada conjunto de parâmetros (para garantir estabilização do processo de deposição), medindo a altura e diâmetro da cabeça dos pinos (parâmetros ilustrados na Figura 4.2). Já pela dificuldade de se medir o pé do pino, foi feita apenas uma análise qualitativa visual, levando-se em conta observações dos aspectos de tamanho e forma do pé do pino.

4.1.3 Resultados e análises

Nas Figuras 4.6 a 4.10 estão apresentados os mapas dos valores geométricos dos pinos depositados, conforme o planejamento experimental, ou seja, 5 níveis dos parâmetros de entrada “*Ball/Cyl. Adaptation*” (BCA, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 e 5.0), nas abscissas, e “*Base Adaptation*” (BA, -0.20, -0.10, 0, +0.10 e +0.20), nas ordenadas, por cada valor de “*Altitude Adaptation*” (AA, -30, -15, 0, +15 e +30). Para fins de registro, a Tabela 4.1(a) em apêndice apresenta as combinações de todos os conjuntos de parâmetros de entrada com os valores médios dos parâmetros de saída (parâmetros geométricos dos pinos). Já a Tabela 4.2(a),

também em apêndice, apresenta todos os parâmetros intermediários médios em função da combinação dos parâmetros de entrada.

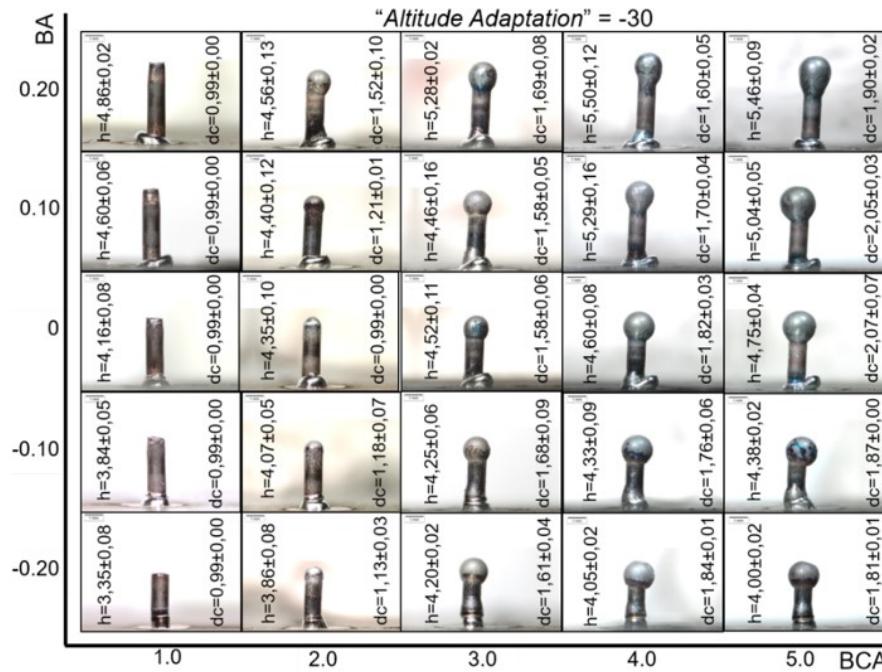


Figura 4.6 – Mapa das geometrias (médias e desvios padrão) dos pinos depositados em função dos parâmetros de entrada “Ball/Cyl. Adaptation” (BCA), na abscissa, e “Base Adaptation” (BA), na ordenada, para “Altitude Adaptation” (AA) = -30, onde: h = altura do pino; dc = diâmetro da cabeça do pino (diâmetro do arame de 1 mm)

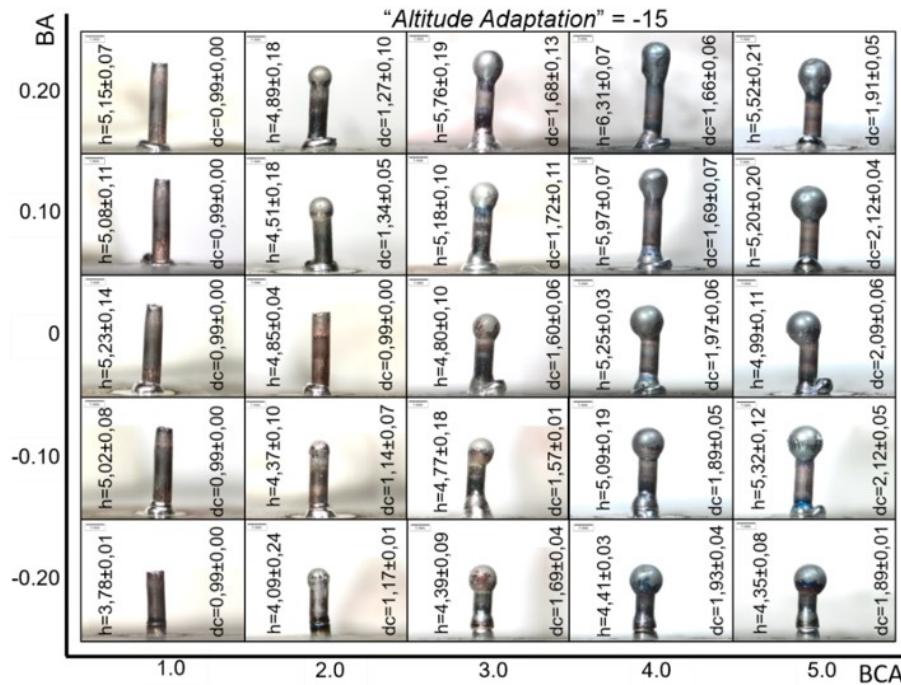


Figura 4.7 – Mapa das geometrias (médias e desvios padrão) dos pinos depositados em função dos parâmetros de entrada “Ball/Cyl. Adaptation” (BCA), na abscissa, e “Base Adaptation” (BA), na ordenada, para “Altitude Adaptation” (AA) = -15, onde: h = altura do pino; dc = diâmetro da cabeça do pino (diâmetro do arame de 1 mm)

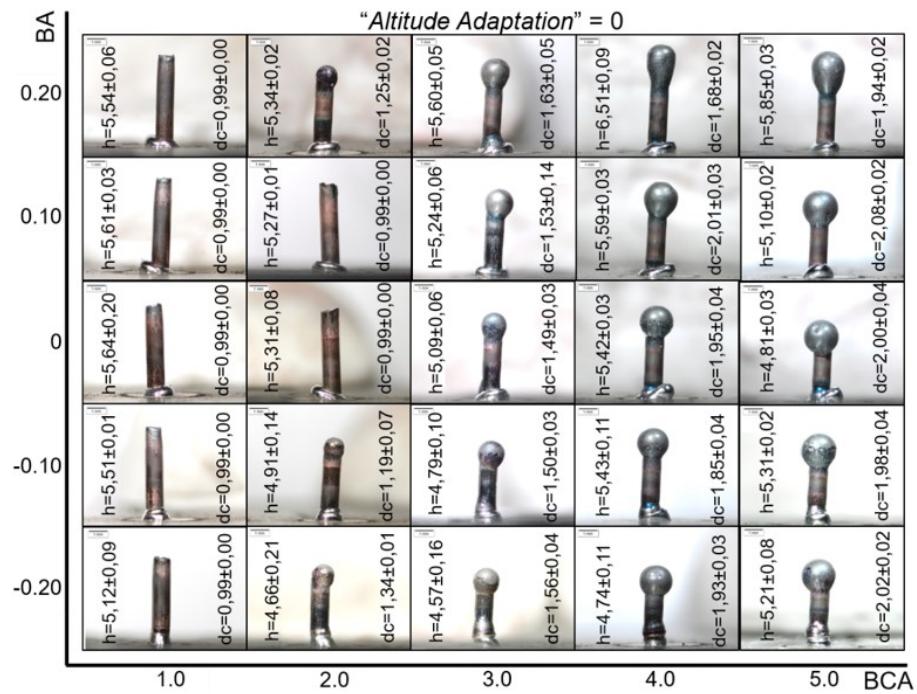


Figura 4.8 – Mapa das geometrias (médias e desvios padrão) dos pinos depositados em função dos parâmetros de entrada “Ball/Cyl. Adaptation” (BCA), na abscissa, e “Base Adaptation” (BA), na ordenada, para “Altitude Adaptation” (AA) = 0, onde: h = altura do pino; dc = diâmetro da cabeça do pino (diâmetro do arame de 1 mm)

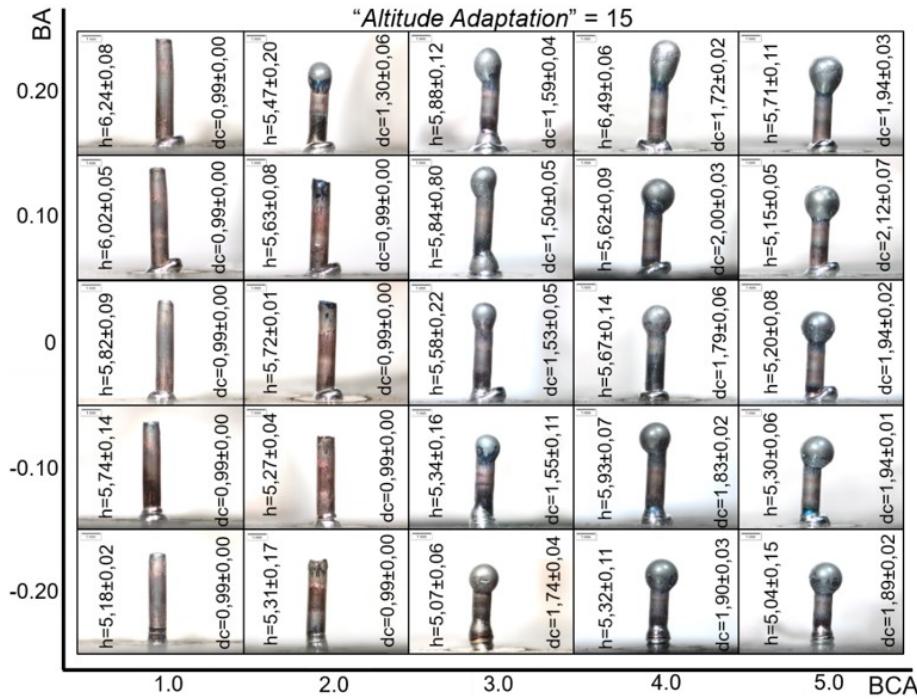


Figura 4.9 – Mapa das geometrias (médias e desvios padrão) dos pinos depositados em função dos parâmetros de entrada “Ball/Cyl. Adaptation” (BCA), na abscissa, e “Base Adaptation” (BA), na ordenada, para “Altitude Adaptation” (AA) = 15, onde: h = altura do pino; dc = diâmetro da cabeça do pino (diâmetro do arame de 1 mm)

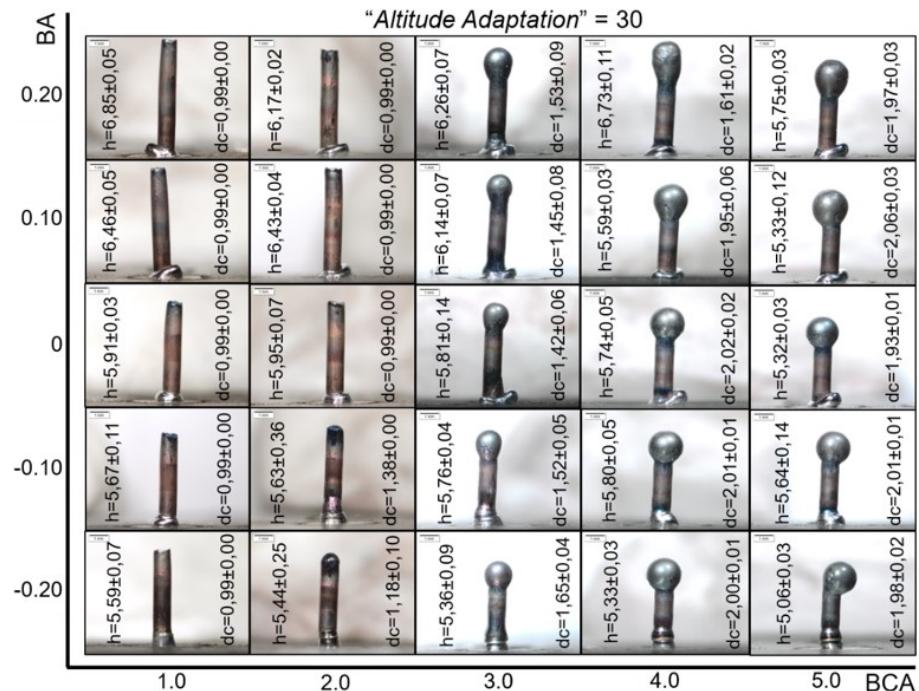


Figura 4.10 – Mapa das geometrias (médias e desvios padrão) dos pinos depositados em função dos parâmetros de entrada “Ball/Cyl. Adaptation” (BCA), na abscissa, e “Base Adaptation” (BA), na ordenada, para “Altitude Adaptation” (AA) = 30, onde: h = altura do pino; dc = diâmetro da cabeça do pino (diâmetro do arame de 1 mm)

A Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresentam os gráficos dos efeitos principais de cada parâmetro de entrada (BCA, AA e BA) sobre os parâmetros de saída (altura e diâmetro de cabeça do pino) e parâmetros intermediários (análise dos oscilogramas de corrente e tensão), respectivamente. Estes gráficos foram feitos usando a análise de variância (ANOVA) no software MINITAB® 17 (Estat > ANOVA > Gráfico de Efeitos Principais) com um nível de confiança de 95 %. Pela Figura 4.11(a), é possível perceber que a altura do pino é mais sensivelmente controlada através dos valores de regulagem de AA e BA, ou seja, os mesmos têm grande influência para regular a altura do pino. Por sua vez, a parte (b) da Figura 4.11 mostra que o BCA é o único parâmetro significante para controlar o diâmetro da cabeça do pino e, consequentemente, o tipo de pino (cabeça abaulada ou cilíndrica) depositado.

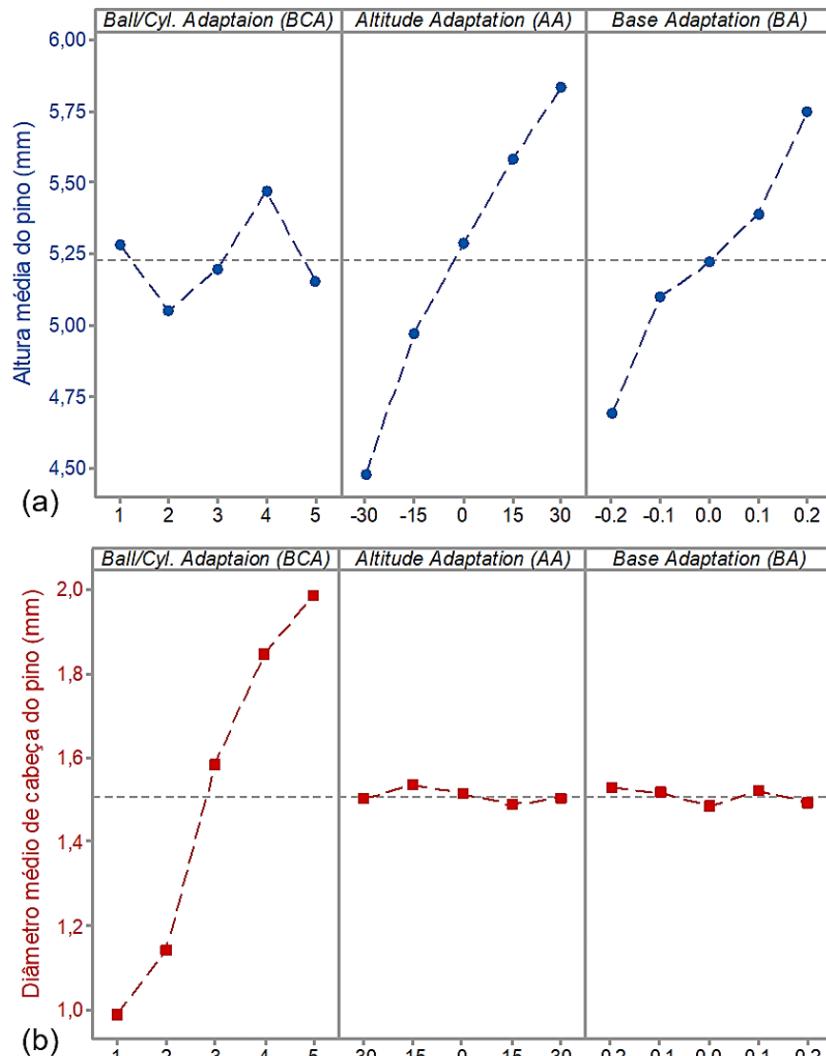


Figura 4.11 – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros de entrada (BCA, AA e BA) sobre os parâmetros de saída (características geométricas dos pinos): (a) altura média do pino e (b) diâmetro médio de cabeça do pino

Somente dois parâmetros intermediários se alteraram em função dos três parâmetros de entrada BCA, AA e BA, a saber tsolpp (tempo de solidificação do pé do pino) e taq (tempo de aquecimento) da 2^a e 3^a regiões (Figura 4.4), respectivamente. A Figura 4.12(a) claramente revela que o parâmetro tsolpp depende só do parâmetro AA, tendo uma regulagem quase linear. Já o parâmetro taq (Figura 4.12(b)) dependeu de dois outros parâmetros de entrada BCA e BA, com maior efeito do primeiro.

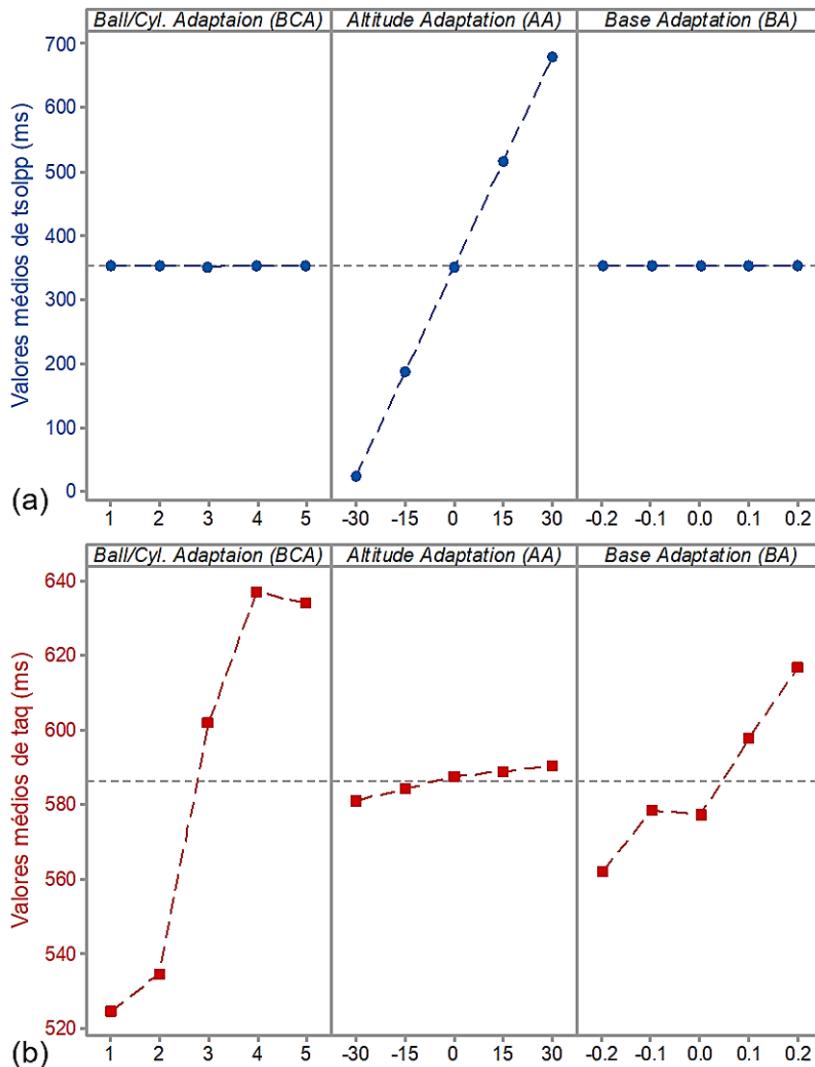


Figura 4.12 – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros intermediários: (a) tsolpp (tempo de solidificação do pé do pino) e (b) taq (tempo de aquecimento)

A Figura 4.13 apresenta um modelo para explicar como, provavelmente, a técnica regula a altura do pino, alterando apenas o tsolpp, quando se ajusta o AA. Depois do arame-eletrodo estar soldado no metal de base (1^a região, Figura 4.3), a corrente é desligada (2^a região, Figura 4.3). O arame é resfriado através de ambas as extremidades, mas acredita-se de forma mais eficiente (maior taxa de resfriamento) pelo bico de contato (resfriado por água fria). No entanto, a chapa é capaz de resfriar a extremidade do arame soldada nela mais rapidamente do que o centro do arame. Assim, com maior tempo tsolpp, o lugar mais quente do arame tende a ficar no meio (entre o bico de contato e a chapa). Quando a corrente (laq) é novamente ligada (3^a região, Figura 4.3), a parte mais quente tem maior resistência elétrica, aquecendo ainda mais a mesma. Durante a 4^a região, a direção de movimento do arame é invertida, tracionando e rompendo a parte mais quente que tem menor resistência à tração. O pino fica depositado depois desta ruptura do arame.

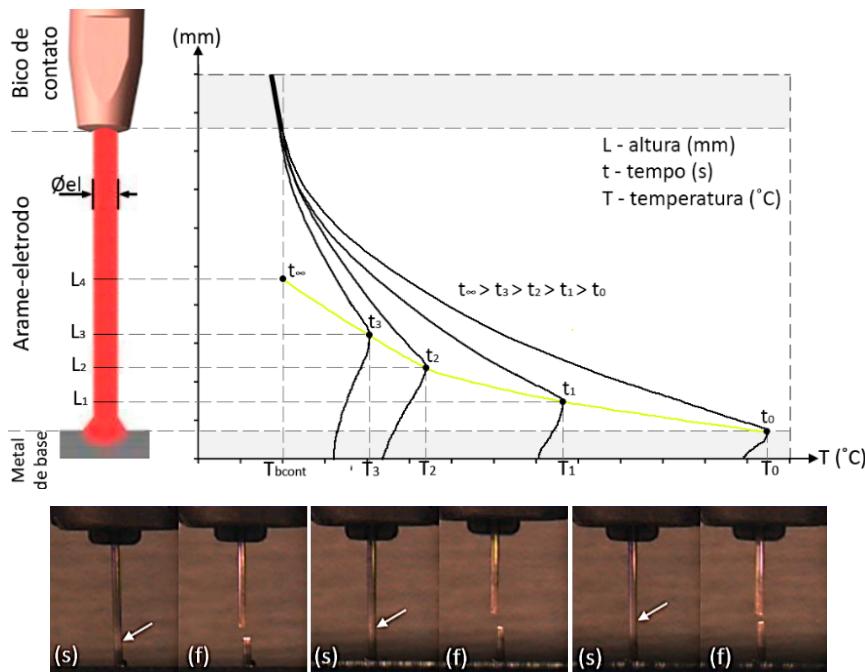


Figura 4.13 – (acima) Modelo para explicar o aumento de altura do pino, em que a maior temperatura se desloca em direção ao centro do arame com aumento do tsolpp; (abaixo) quadros da filmagem de alta velocidade com aumento do tsolpp, onde: (s) a posição do ponto mais quente e (f) região onde acontece o rompimento quando o arame é puxado com aumento do AA

Teoricamente era esperado que o parâmetro de entrada BA alterasse os valores das correntes (Ispp1, Ispp2 ou Ispp3) ou seus tempos (tspp1, tspp2 ou tspp3) durante a abertura do arco (1^a região), assim fundindo mais a ponta do arame, consequentemente aumentando o volume (tamanho) do pé (base) do pino. Mas pelos resultados da Tabela 4.2(a) em apêndice, percebe-se que isso não acontece claramente. Para entender melhor qual parâmetro intermediário é alterado através do parâmetro BA foram analisadas as filmagens de alta velocidade do processo de deposição. A Figura 4.14 apresenta uma análise dos quadros das filmagens onde percebe-se que com o aumento do parâmetro BA, o controle da técnica aumenta a velocidade do arame-eletrodo logo após fundir a ponta do arame (final da 1^a região, Figura 4.3). Ou seja, reduz o tempo de chegada do arame com a ponta fundida para encostar e soldar na chapa (metal de base). De alguma forma, isso pode explicar o aumento da altura do pino conforme aumento do BA, pois com maior velocidade do arame-eletrodo após fundir a sua ponta, a mesma encosta no metal de base mais quente com maior fase líquida (menor tempo para solidificar, transferindo o calor da ponta para o arame-eletrodo e para o gás de proteção), transformando o seu volume no pé (base) do pino. Consequentemente, o pé do pino aumenta seu tamanho. Além disso, isso cria um gradiente de temperatura maior entre o arame-eletrodo e o pé do pino que promove uma maior

velocidade de subida do ponto/lugar mais quente para o centro do arame, como resultado aquecendo e rompendo mais próximo do bico de contato (altura do pino aumenta).

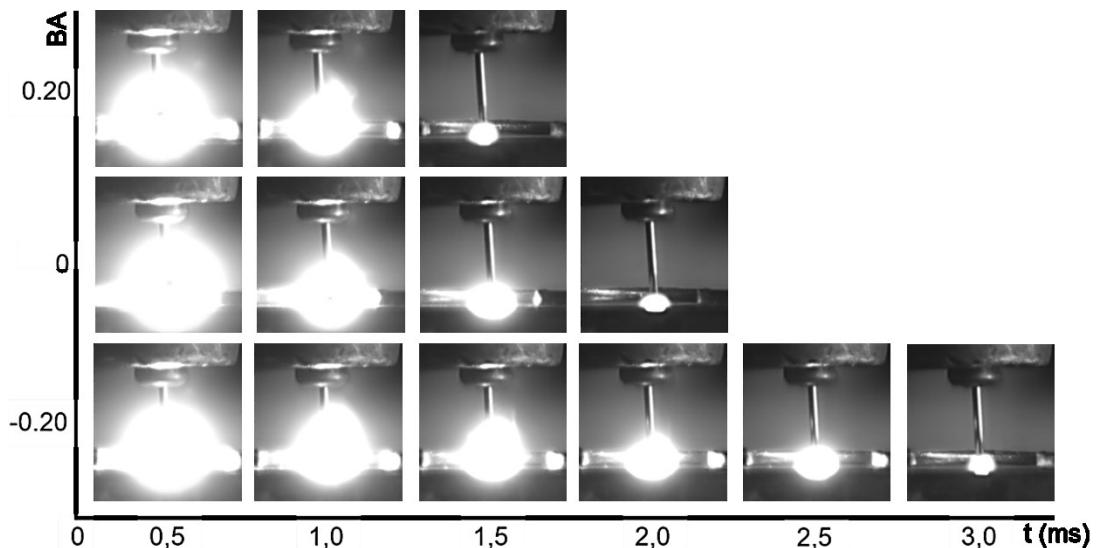


Figura 4.14 – Tempo de chegada do arame-eletrodo com a ponta fundida na chapa (metal de base) em função do parâmetro de entrada “Base Adaptation” (BA)

Os resultados mostraram que o ajuste do BCA significativamente alterou o parâmetro intermediário taq (tempo de aquecimento) da 3^a região (Figura 4.3), conforme resultados da análise estatística apresentados na Figura 4.12(b). Assim, a ação efetiva (em termos energéticos) de ajuste do BCA sobre os parâmetros intermediários é apenas em taq. Como resultado, quando maior o taq, maior o volume do arame aquecido à temperatura mais alta (próxima do ponto de fusão). Em seguida, quando o sistema liga a reversão do alimentador de arame da tocha e rompe o arame (4^a região), este volume de metal quase fundido toma uma forma de esfera, formando a cabeça do pino, pela ação da força devida à tensão superficial. O BA também teve sua influência significativa no parâmetro taq, pois da Tabela 4.2(a) em apêndice é possível perceber que com o aumento do BA o taq aumenta para um mesmo valor do BCA. Como hipótese, isso acontece porque durante o tempo maior (menor valor do BA), que leva para que a ponta fundida (ainda com arco aberto) do arame encoste na chapa (metal de base), o calor está sendo conduzido para o bico de contato (refrigerado a água) através da extensão do arame-eletrodo (*electrical stick-out*). Assim, já pré-aquecido o arame, como consequência, isso demanda menor tempo (taq) de passagem da corrente (Iaq) (potência elétrica) para amolecer e romper o arame eletrodo, formando um pino.

4.2 Ação de outros parâmetros operacionais da técnica CMT PIN

4.2.1 Influência da DBCP sobre as características geométricas dos pinos

A distância bico de contato peça (DBCP) é um dos principais parâmetros na soldagem MIG/MAG. Para estudar a influência desse parâmetro sobre as características geométricas dos pinos depositados pela técnica MIG/MAG CMT PIN, os valores da DBCP foram regulados em 5, 10, 15 e 20 mm. Neste estudo os parâmetros de entrada foram mantidos constantes, para depositar os pinos do tipo cabeça cilíndrica e cabeça abaulada. Todas as deposições dos pinos foram realizadas sobre chapas de aço ABNT 1020 de 1,5 mm de espessura. As medidas das características geométricas dos pinos (altura e diâmetro da cabeça) foram feitas por meio de um micrômetro calibrado com a resolução de 0,01 mm. Antes de executar o processo de deposição dos pinos, as superfícies das chapas foram limpas com auxílio de uma lixadeira manual com um disco de 80 *mesh* e, posteriormente, com pano limpo molhado por acetona industrial. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros de deposição (entrada) e as características geométricas dos pinos resultantes (parâmetros de saída), na forma de média considerando cinco pinos em cada condição. A Figura 4.15 mostra o aspecto típico dos pinos (um de cada teste) realizados nesta seção. Durante a deposição dos pinos observou-se boa aparência e repetitividade (baixo desvio padrão nas suas características geométricas).

Tabela 4.1 – Características geométricas dos pinos (parâmetros de saída) em função dos parâmetros de entrada para deposição

Tipo de pino	DBCP (mm)	Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída	
		BCA	AA	BA	Altura (mm)	Diâmetro de cabeça (mm)
Cabeça cilíndrica	5	1.0	-30	0	3,01 ± 0,05	-
	10				3,53 ± 0,03	-
	15				3,54 ± 0,02	-
	20				4,17 ± 0,07	-
Cabeça abaulada	5	3.0	-30	0	2,84 ± 0,02	1,20 ± 0,01
	10				3,44 ± 0,04	1,44 ± 0,04
	15				3,45 ± 0,06	1,45 ± 0,02
	20				3,95 ± 0,01	0,99 ± 0,00

Arame-eletrodo do tipo AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro; gás de proteção Ar+8%CO₂ (valor verificado como Ar+10,7%CO₂) com vazão de 8 L/min; 1,5 mm de espessura da chapa de aço ABNT 1020

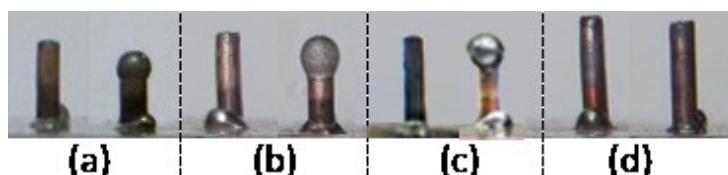


Figura 4.15 – Aspecto típico dos pinos do tipo cabeça cilíndrica e abaulada depositados nas chapas de aço ABNT 1020 com diferentes DBCP, onde: (a) DBCP = 5 mm; (b) DBCP = 10 mm; (c) DBCP = 15 mm e (d) DBCP = 20 mm

Pelo gráfico da Figura 4.16, percebe-se pouca variação geométrica na faixa intermediária da DBCP (de 10 e de 15 mm), resultando em uma altura média de 3,54 mm para um pino do tipo cabeça cilíndrica e altura e diâmetro de cabeça do pino de 3,44 e 1,45 mm, respectivamente, para o pino do tipo cabeça abaulada. Durante a deposição dos pinos com a DBCP de 20 mm não se obteve um pino do tipo cabeça abaulada (a cabeça do pino ficou igual ao diâmetro do arame-eletrodo). O motivo para tal seria que a potência aplicada foi pequena para aquecer e transformar um volume do arame de fase sólida para líquida. Neste caso, a solução deste problema passaria por aumentar o valor do parâmetro de entrada “Ball/Cyl. Adaptation”, porque o mesmo aumentaria o parâmetro intermediário taq (tempo de aquecimento), deixando mais tempo para a corrente Iaq (corrente de aquecimento) aquecer o arame-eletrodo. Quanto maior o valor da DBCP, mais longos se tornam os pinos, provavelmente porque com valores menores da DBCP a parte do calor gerada no arame-eletrodo se transfere para o bico de contato refrigerado a água. Pelos mesmos motivos, com DBCP de 5 mm obteve-se ainda o diâmetro mínimo da cabeça do pino do tipo cabeça abaulada, igual a $1,20 \pm 0,01$ mm, fundindo e transformando um menor volume do arame-eletrodo em cabeça do pino.

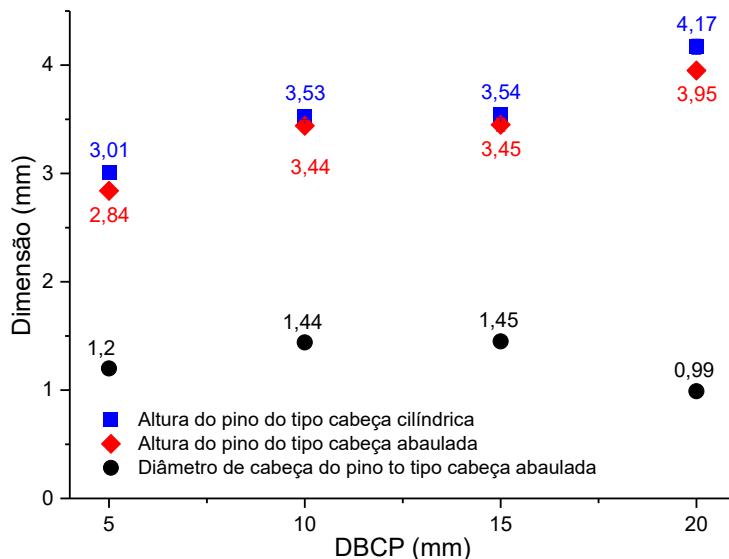


Figura 4.16 – Características geométricas dos pinos do tipo cabeça abaulada e cilíndrica em função da DBCP (os números junto aos pontos indicam as dimensões médias obtidas através de 5 medições)

Pela análise dos parâmetros intermediários (Figura 4.17), percebe-se que somente os 3 parâmetros da 3^a região do oscilograma corrente-tensão (I_{maq} , corrente média de aquecimento, U_{maq} , tensão média durante aquecimento, e taq , tempo de aquecimento) sofrem alterações sinérgicas em função da regulagem da DBCP, embora sem uma tendência uniforme. A explicação para a mudança destes parâmetros é de que uma maior DBCP

promove crescimento da resistência ôhmica, consequentemente demandando uma maior Umaq de forma quase linear. Já Imaq (corrente média de aquecimento) e taq (tempo de aquecimento) são ajustados sensivelmente somente para o valor máximo de DBCP (intencionando pinos mais longos), quando Imaq se reduz em quase 10 A (possivelmente para evitar sobreaquecimento localizado em resistor longo) e taq aumenta em quase 100 ms para pinos de cabeças cilíndricas e não se alterando para o pino do tipo cabeça abaulada.

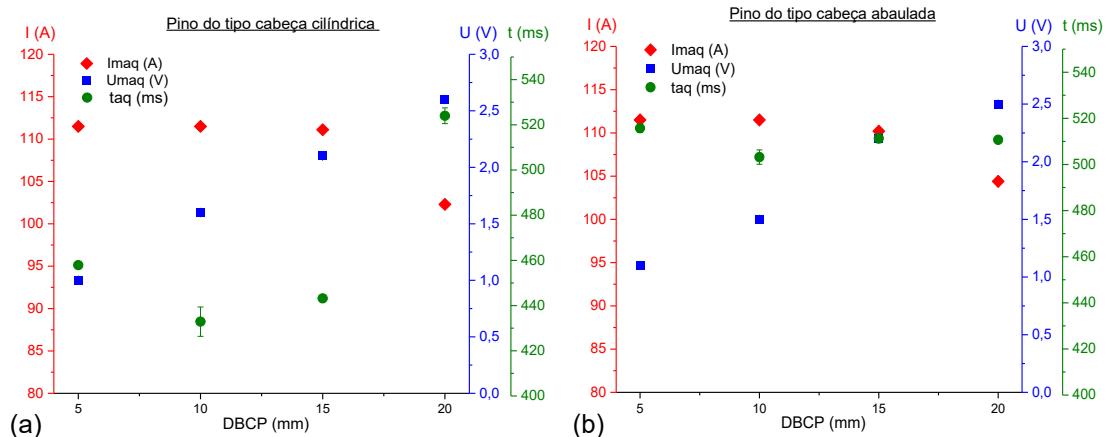


Figura 4.17 – Relação entre Imaq (corrente média de aquecimento), Umaq (tensão média durante aquecimento) e taq (tempo de aquecimento) em função da DBCP para os tipos de pino: (a) cabeça cilíndrica e (b) cabeça abaulada (os pontos indicam as médias obtidas através de 5 medições)

De forma complementar, a Figura 4.18 mostra o aspecto de ponta do arame-eletrodo após o processo de deposição dos pinos do tipo cabeça abaulada e cilíndrica com DBCP de 5, 10, 15 e 20 mm. Observa-se que a ponta do arame-eletrodo após o ciclo de deposição com DBCP de 5 e 10 mm não é deformada e o cobre (arame cobreado) não se queimou tanto em comparação com os demais casos, com pequena esfera formada após deposição do pino do tipo cabeça abaulada.

Pela curiosidade de se conseguir uma altura do pino ainda menor, visando sua aplicação nos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC) e ao mesmo tempo testar os limites da técnica em termos de altura do pino, tentou-se depositar os pinos do tipo cabeça abaulada e cilíndrica com os mesmos parâmetros de entrada (apresentados pela Tabela 4.1) com a DBCP de 3 e 4 mm. Neste caso, acontece um defeito em que o arame-eletrodo não é soldado na chapa (base), por causa da remoção de calor pelo bico de contato durante a abertura do arco e pelo fato da gota no arame-eletrodo ser pequena para poder se soldar na chapa. Desta forma (para as condições do presente trabalho), com a DBCP de 5 mm foi conseguido o pino com menor altura e ainda sem a ponta deformada do arame-eletrodo após a deposição do pino do tipo cabeça abaulada.

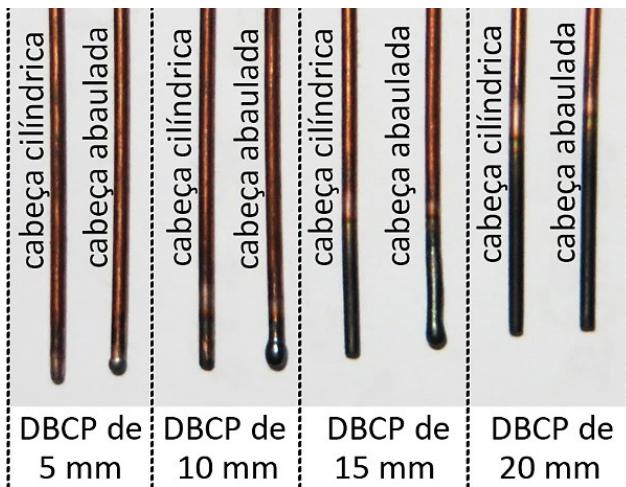


Figura 4.18 – Aspecto de ponta do arame-eletrodo de 1 mm de diâmetro após o processo de deposição dos pinos do tipo cabeça abaulada e cilíndrica pela técnica CMT PIN com diferentes níveis de DBCP

4.2.2 Influência do material e da espessura mínima da chapa metálica

Nesta seção do trabalho foram testadas combinações de espessuras de chapas finas para três tipos de materiais - ABNT 1020 (aço ao carbono), AISI 304 (aço inoxidável austenítico) e AISI 430 (aço inoxidável ferrítico). As medições das espessuras das chapas e as características geométricas dos pinos (altura e diâmetro da cabeça) foram feitas por meio de um micrômetro calibrado com a resolução de 0,01 mm. No caso do aço ABNT 1020 foram avaliadas quatro espessuras de chapas não galvanizadas de $0,45 \pm 0,00$ mm; $0,89 \pm 0,00$ mm; $1,17 \pm 0,01$ mm e $1,47 \pm 0,01$ mm. Para os aços inoxidáveis AISI 304 e 430, avaliou-se as espessuras de $0,50 \pm 0,00$ mm e $0,40 \pm 0,00$ mm, respectivamente. Antes de executar o processo de deposição dos pinos, as superfícies das chapas foram limpadas por meio de um pano embebido em acetona industrial para remoção de óleo e graxa. No caso do aço ao carbono, houve ainda uma pré-limpeza com auxílio de uma lixadeira manual com um disco de 80 mesh.

Cada teste foi repetido cinco vezes, depositando pinos do tipo cabeça cilíndrica e abaulada em cada espessura e tipo de material. A Tabela 4.2 mostra as características geométricas obtidas da deposição dos pinos nas chapas de aço ABNT 1020. Antes de realizar o processo de deposição dos pinos, foram obtidos os valores de resistência e indutância do circuito de soldagem, também mostrados na Tabela 4.2, através do procedimento de “L/R alignment”. É importante destacar que os parâmetros de entrada “Altitude Adaptation” e “Base Adaptation” foram mantidos inalterados em -30 e 0, respectivamente. Já o parâmetro “Ball/Cyl. Adaptation” foi programado para 1.0 para o pino do tipo cabeça cilíndrica e 3.0 para o pino do tipo cabeça abaulada. A DBCP foi igual a 5 mm, considerando os resultados da Seção 4.2.1, para obter os pinos de menor altura possível.

Tabela 4.2 – Características geométricas obtidas da deposição dos pinos nas chapas de aço ABNT 1020

Tipo de pino	Espessura da chapa (mm)	Parâmetros de saída		Indutância e resistência do circuito elétrico de soldagem
		Altura (mm)	Diâmetro de cabeça (mm)	
Cabeça cilíndrica	$0,45 \pm 0,00$	$2,37 \pm 0,01$	-	10 (μ H) e 21,2 (mOhm)
	$0,89 \pm 0,00$	$2,83 \pm 0,02$	-	9 (μ H) e 19,7 (mOhm)
	$1,17 \pm 0,01$	$2,99 \pm 0,02$	-	9 (μ H) e 18,9 (mOhm)
	$1,47 \pm 0,01$	$3,01 \pm 0,05$	-	9 (μ H) e 17,7 (mOhm)
Cabeça abaulada	$0,45 \pm 0,00$	$2,40 \pm 0,04$	$1,36 \pm 0,02$	10 (μ H) e 21,2 (mOhm)
	$0,89 \pm 0,00$	$2,71 \pm 0,04$	$1,23 \pm 0,05$	9 (μ H) e 19,7 (mOhm)
	$1,17 \pm 0,01$	$2,81 \pm 0,02$	$1,21 \pm 0,04$	9 (μ H) e 18,9 (mOhm)
	$1,47 \pm 0,01$	$2,84 \pm 0,02$	$1,20 \pm 0,01$	9 (μ H) e 17,9 (mOhm)

Arame-eletrodo do tipo AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro; gás de proteção Ar+8%CO₂ (valor verificado como Ar+10,7%CO₂) com vazão de 8 L/min; DBCP igual a 5 mm

A Figura 4.19 mostra o aspecto típico dos pinos de cada condição, enquanto a Figura 4.20 mostra o gráfico da variação das características geométricas dos pinos do tipo cabeça cilíndrica e abaulada em função da espessura da chapa. É possível perceber que quanto menor a espessura da chapa (metal de base) menor é a altura do pino, independentemente do tipo (cabeça cilíndrica ou abaulada). Provavelmente, isso acontece porque a chapa mais fina tem menor massa para transferir o calor gerado durante a fase de soldagem do arame na chapa (soldagem do pé do pino). Consequentemente, o calor se concentra mais próximo do pé do pino, ocorrendo maior aquecimento e amolecimento neste lugar, devido a passagem da corrente (Iaq). Por isso, o rompimento aconteceria mais próximo do pé do pino (no lugar mais aquecido), com um leve acréscimo do tamanho do pé (base) do pino (Figura 4.19), mesmo sem alteração do BA (0). Também para o pino do tipo cabeça abaulada a espessura da chapa influencia no diâmetro da cabeça, ligeiramente aumentado a mesma para chapas mais finas. Isto deve-se ao fato que o calor gerado na fase de soldagem do pé do pino se conduziu mais para o corpo do pino (menos para chapa), consequentemente o aquecendo e favorecendo transformação de um maior volume do material do arame-eletrodo de sólido para líquido, resultando em um maior diâmetro de cabeça.

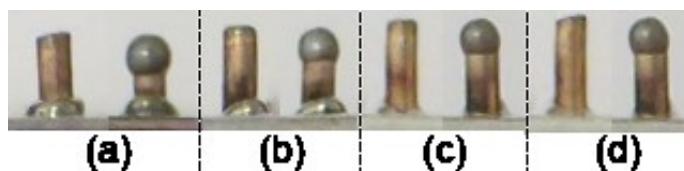


Figura 4.19 – Aspecto típico dos pinos do tipo cabeça cilíndrica e abaulada depositados nas chapas de aço ABNT 1020 com diferentes espessuras, onde: (a) $0,45 \pm 0,00$ mm; (b) $0,89 \pm 0,00$ mm; (c) $1,17 \pm 0,01$ mm; (d) $1,47 \pm 0,01$ mm

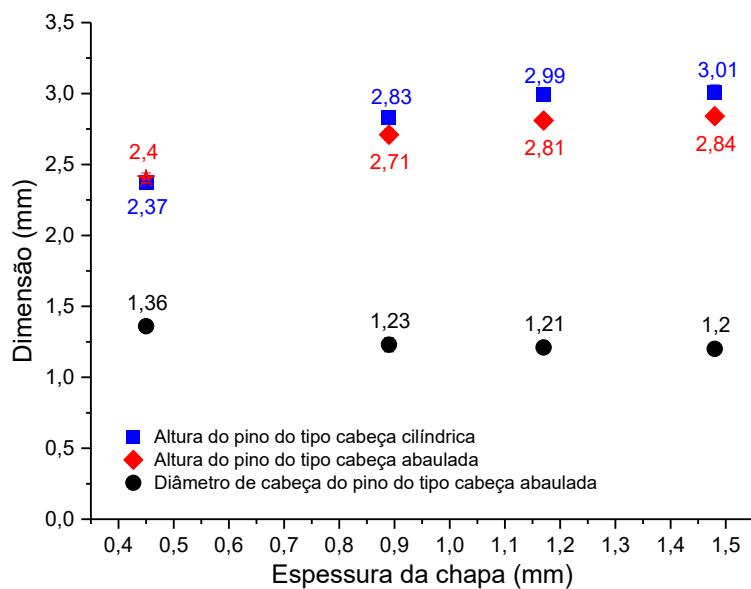


Figura 4.20 – Características geométricas dos pinos do tipo cabeça abaulada e cilíndrica em função da espessura da chapa de aço ABNT 1020 (os números junto aos pontos indicam as dimensões médias obtidas através de 5 medições)

A Figura 4.21 mostra o aspecto típico da parte inferior das chapas com diferentes espessuras de aço ABNT 1020 após o processo de deposição dos pinos. Como as chapas mais finas têm pouca massa para transferir o calor gerado durante o ciclo de deposição do pino, mais nítidas ficam as marcas no metal de base (maiores ZTA). Porém, é importante destacar que nenhuma das chapas testadas apresentou defeito de perfuração ou deformação após o processo de deposição dos pinos. Sendo assim, através dos testes com o aço ABNT 1020 foi confirmado que a técnica CMT PIN consegue depositar os pinos em chapas finas sem defeitos, mesmo com apenas 0,45 mm de espessura de chapa.

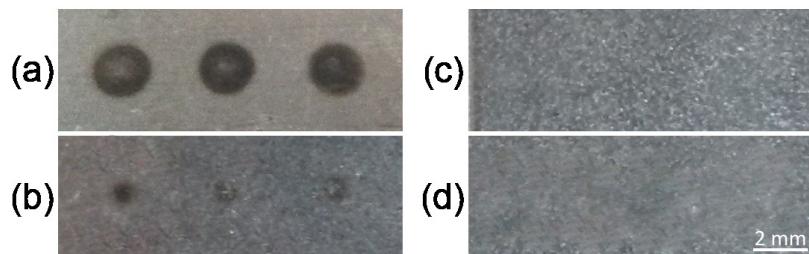


Figura 4.21 – Aspecto típico da parte inferior das chapas de aço ABNT 1020 com diferentes espessuras após o processo de deposição dos pinos, onde: (a) $0,45 \pm 0,00$ mm; (b) $0,89 \pm 0,00$ mm; (c) $1,17 \pm 0,01$ mm; (d) $1,47 \pm 0,01$ mm

A Figura 4.22 apresenta a relação entre resistência e indutância do circuito elétrico de soldagem, conforme alteração da espessura da chapa de aço ABNT 1020, medidas conforme o procedimento “*L/R alignment*”. Percebe-se que com o aumento da espessura da chapa de aço ABNT 1020 o valor da resistência do circuito de soldagem diminui.

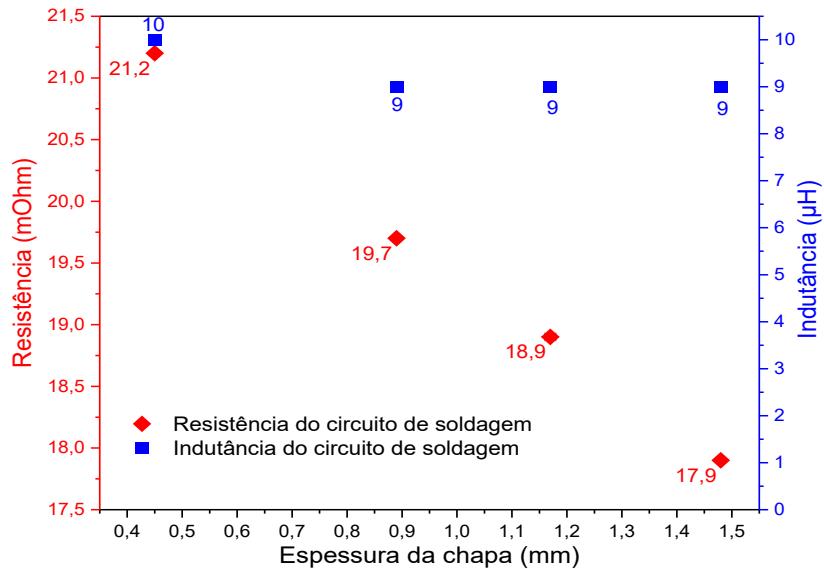


Figura 4.22 – Relação da resistência e indutância do circuito elétrico de soldagem em função da espessura das chapas de aço ABNT 1020 (os números próximos aos pontos indicam os valores de resistência e indutância)

Como mencionado no início desta seção, foi ainda avaliada a deposição dos pinos de aço AISI 309L em chapas finas de aços AISI 304 e AISI 430, respectivamente, para escolher um destes materiais para aplicação nos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC). O critério de avaliação foi através do controle visual da soldabilidade e estabilidade do processo de deposição dos pinos do tipo cabeça abaulada de altura mínima possível para reduzir a espessura dos PLMC, consequentemente os gastos com material compósito. O pino do tipo cabeça abaulada foi escolhido levando em consideração os resultados do trabalho de Ucsnik et. al. (2010), onde este tipo de pino mostrou melhor resultado em Juntas Metal-Compósito (JMC). A Tabela 4.3 apresenta as características geométricas médias dos pinos depositados nas chapas AISI 304 e 430 com seus parâmetros de deposição.

Tabela 4.3 – Características geométricas dos pinos depositados nas chapas AISI 304 e 430 com seus parâmetros de deposição

Tipo de aço inoxidável	Espessura de chapa (mm)	Altura média do pino (mm)	Diâmetro médio de cabeça do pino (mm)	Observações do processo de deposição e soldabilidade
AISI 304	$0,50 \pm 0,01$	$2,64 \pm 0,15$	$1,44 \pm 0,05$	Boa
AISI 430	$0,40 \pm 0,00$	$2,63 \pm 0,13$	$1,41 \pm 0,07$	Boa

“Ball/Cyl. Adaptation” (BCA) = 0; “Altitude Adaptation” (AA) = -30; “Base Adaptation” (BA) = 0; gás de proteção Ar+2%CO₂ com vazão de 8 L/min; DBCP igual a 5 mm; base de dados DB0875 com programa-sinérgico CrNi 19 9 PIN; arame-eletrodo do tipo AWS ER 309 L de 1,0 mm de diâmetro

A Figura 4.23 mostra as vistas superior, inferior e frontal das chapas após o processo de deposição dos pinos do tipo cabeça abaulada. Nota-se que a marca na chapa devido ao

aporte térmico do processo de deposição é menor do que com o aço ABNT 1020 em espessura similar de 0,45 mm (Figura 4.21). Pela Figura 4.23, também se observa uma deposição estável, sem perfuração ou deformação elevada da chapa, com boa aparência e repetitividade das características geométricas dos pinos, resultando em um pequeno desvio padrão (Tabela 4.3). Os pinos em ambos os casos têm pequena diferença de altura média (2,63 a 2,64 mm) e de diâmetros médios de cabeça (1,41 a 1,44 mm). Considerando esta avaliação, foi escolhido o aço AISI 430 para aplicação nos PLMC, devido menor espessura e menor custo no mercado.

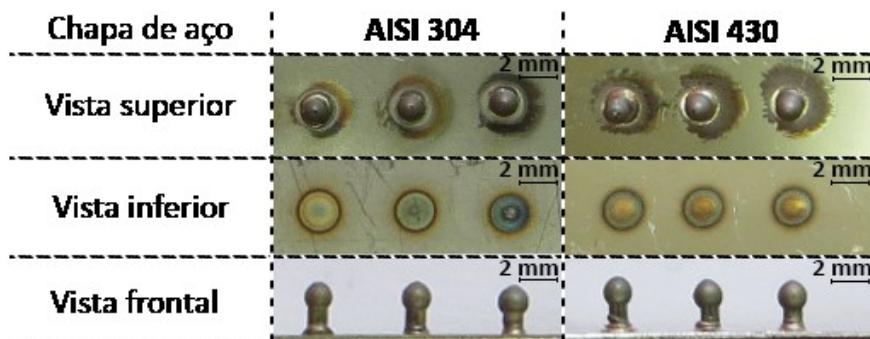


Figura 4.23 – Vistas superior, inferior e frontal das chapas de aço AISI 304 (espessura de 0,5 mm) e AISI 430 (espessura de 0,4 mm) após o processo de deposição dos pinos do tipo cabeça abaulada pela técnica CMT PIN

4.2.3 Efeito da temperatura da chapa

Como o processo de deposição dos pinos envolve transferência de calor, a variação de temperatura da chapa poderia afetar as características geométricas dos mesmos, principalmente a altura. Para verificar essa hipótese, foram feitos testes com 4 valores diferentes de temperatura da chapa depositando os pinos do tipo cabeça cilíndrica, repetindo 3 vezes cada teste. Os demais parâmetros de deposição foram mantidos fixos, conforme mostrado na Tabela 4.4. A temperatura da chapa foi medida por meio de um termopar de contato do tipo K, conforme ilustra a Figura 4.24, durante o processo de deposição dos pinos.

Para realizar os testes com a chapa em baixa temperatura (menor do que 0 °C), a mesma foi mergulhada por 90 s em nitrogênio líquido (≈ -196 °C) e em seguida rapidamente retirada e fixada para deposição de um pino. Devido à rápida troca térmica da chapa com o meio ambiente (mesa de soldagem, fixadores, ar, etc.), antes de depositar o próximo pino o processo de resfriamento da chapa foi repetido. Já para os testes com preaquecimento da chapa, utilizou-se um forno elétrico portátil, e também depositando um pino por vez após aquecimento da mesma. Para fins de comparação, a deposição dos pinos foi feita também em chapa com temperatura ambiente. A Tabela 4.4 mostra a influência da temperatura média da chapa sobre a altura média dos pinos, cujos resultados são compilados graficamente na

Figura 4.25. A Figura 4.26 apresenta o aspecto típico dos pinos depositados com 4 valores diferentes de temperatura da chapa.

Tabela 4.4 – Parâmetros de deposição dos pinos e características geométricas obtidas

Temperatura média da chapa (°C)	Parâmetros de entrada			Altura média do pino (mm)
	BCA	AA	BA	
-15 ± 4	1.0	-30	0	3,94 ± 0,01
22 ± 0				3,70 ± 0,06
83 ± 3				3,65 ± 0,04
168 ± 16				3,02 ± 0,14

Arame-eletrodo do tipo AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro; gás de proteção Ar+8%CO₂ (valor verificado como Ar+10,7%CO₂) com vazão de 8 L/min; 1,5 mm de espessura da chapa de aço ABNT 1020; DBCP igual a 15 mm

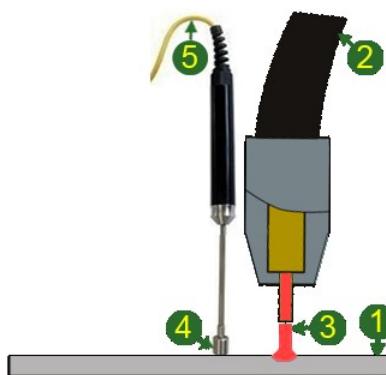


Figura 4.24 – Esquema de medição da temperatura utilizada durante testes da influência da variação de temperatura da chapa nas características geométricas dos pinos depositados pela técnica CMT PIN, onde: 1 - chapa de aço ABNT 1020 (80,0 × 30,0 × 1,5 mm); 2 - tocha CMT; 3 - pino; 4 - ponta do termopar de contato do tipo K; 5 - fio de conexão com monitor de temperatura

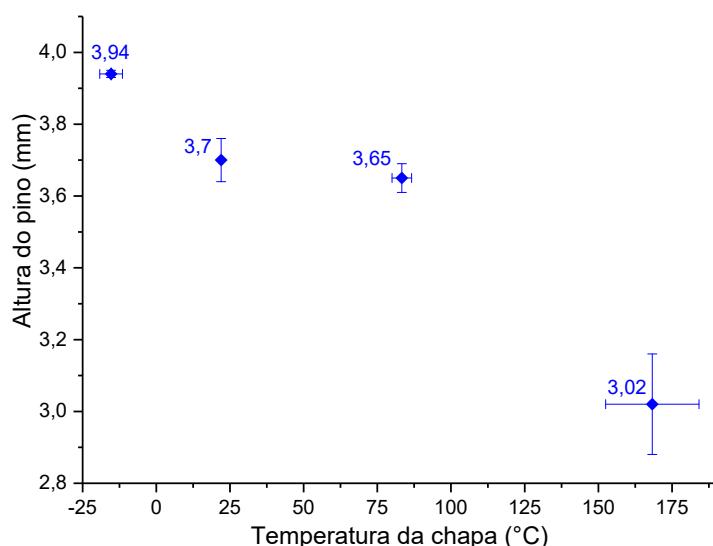


Figura 4.25 – Relação entre a altura média do pino do tipo cabeça abaulada em função da temperatura média da chapa (os números junto aos pontos indicam as dimensões médias obtidas através de 3 medições)

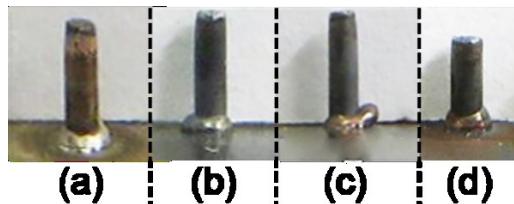


Figura 4.26 – Aspecto típico dos pinos do tipo cabeça cilíndrica depositados com diferentes temperaturas das chapas de aço ABNT 1020, onde: (a) -15 ± 4 °C; (b) 22 ± 0 °C; (c) 83 ± 3 °C; (d) 168 ± 16 °C

Pelo gráfico da Figura 4.25 pode-se verificar a tendência de redução da altura do pino do tipo cabeça cilíndrica com aumento da temperatura da chapa (metal de base). Porém, é possível observar que na faixa de 22 ± 0 °C até 83 ± 3 °C não houve influência da temperatura da chapa na altura do pino depositado. Mas com a temperatura da chapa no valor máximo testado (168 ± 16 °C) houve uma redução significativa, em cerca de 0,6 mm (20 %), na altura do pino em comparação com a obtida com a chapa em temperatura ambiente (22 ± 0 °C). É importante destacar que não ocorreram alterações nos parâmetros intermediários durante execução desta seção.

Com aumento da temperatura da chapa diminui-se o gradiente de temperatura entre o pé do pino e a chapa. Por isso, o calor se concentra perto da ZAC (pé do pino), levando mais tempo para se transferir. Assim, o ponto de maior temperatura ao longo do arame tende se localizar mais próximo da chapa, fazendo com que o rompimento do arame (formação do pino) aconteça neste ponto ou próximo dele.

4.2.4 Efeito do parâmetro “Base Adaptation” (BA) na resistência da união entre pino e folha metálica

Dos mapas de geometrias das Figura 4.6 a Figura 4.10 da Seção 4.1 é possível notar que com o aumento do parâmetro de entrada “Base Adaptation” (BA) o pé do pino aumenta. Assim, o objetivo desta seção é saber como o parâmetro BA, relacionado com o tamanho do pé do pino, influencia na resistência da união entre pino e folha metálica. Para isso, foram utilizadas folhas metálicas de aço AISI 430 de 0,4 mm de espessura e arame-eletrodo do tipo AWS ER 309 L de 1,0 mm de diâmetro (Tabela 4.3).

É importante destacar que neste estudo o arame foi soldado na folha metálica programando o equipamento CMT para executar apenas a 1^a região do ciclo de deposição do pino (Figura 4.3). Os demais parâmetros intermediários das 2^a, 3^a e 4^a regiões foram mantidos em zero. Assim, foram produzidos corpos de prova soldando um arame com comprimento de aproximadamente 50 cm no centro de cada folha metálica ($\approx 155 \times 35$ mm), conforme apresenta a Figura 4.27(a). Desta forma, foram produzidos 25 corpos de prova no total, sendo 5 corpos de prova para cada valor do parâmetro BA (-0.20; -0.10; 0; +0.10 e +0.20) para fins

de repetição do ensaio. Na Figura 4.27(b) é possível notar que com o aumento do parâmetro BA o pé do pino aumenta.

A Figura 4.28(a) ilustra o ensaio de tração utilizado como meio escolhido para avaliar a resistência da solda entre arame (pino) e folha metálica, através da carga máxima de rompimento. Como pode ser visto na Figura 4.28(b), o arame foi primeiramente enrolado em um rolete de fixação (especialmente fabricado para este fim), que então foi preso na garra superior (móvel) da máquina universal de ensaios mecânicos (Seção 3.3.2 do Capítulo III). A outra extremidade do arame com a folha metálica soldada foi presa na garra inferior (fixa) por meio de uma chapa de apoio (Figura 4.28(c)), que foi utilizada para posicionar a união arame-folha alinhada com a direção de aplicação de carga. A superfície da chapa de apoio foi texturizada (riscos cruzados feitos por fresamento) para aumentar a aderência na fixação da folha metálica. A velocidade de deslocamento da garra móvel foi de 2 mm/min para todos os testes.

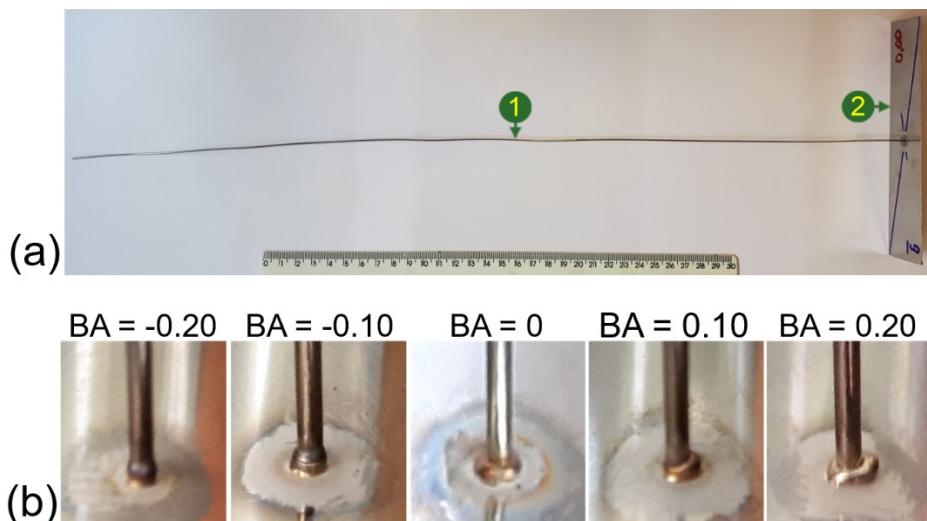


Figura 4.27 – (a) Exemplo de um corpo de prova arame-folha metálica para ensaio de tração, onde: 1 - arame AWS ER 309 L de 1,0 mm de diâmetro soldado; 2 - folha metálica de aço AISI 430 de 0,4 mm de espessura; (b) Aspecto do pé do pino com diferentes valores do parâmetro de entrada “Base Adaptation” (BA)

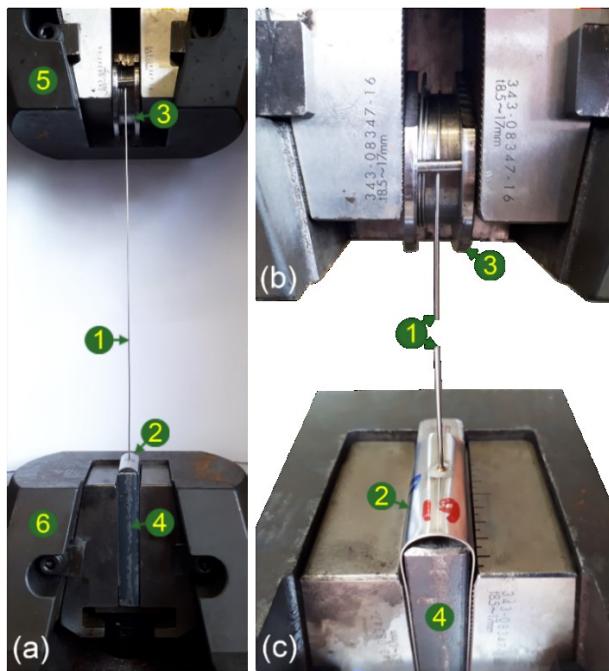


Figura 4.28 – (a) Ensaio de tração de arame-folha metálica; (b) e (c) ampliações das garras superior e inferior, respectivamente, onde: 1 - arame-eletrodo; 2 - folha metálica; 3 - rolete de fixação do arame; 4 - chapa de apoio da folha metálica; 5 - garra superior (móvel); 6 - garra inferior (fixa)

A Figura 4.29 apresenta os resultados dos testes de tração da união arame-folha metálica. Em todos os casos, a falha sempre aconteceu na solda, arrancando o arame da folha metálica e deixando para trás um furo (próximo ao diâmetro do arame) na mesma, conforme apresenta a Figura 4.30. Para fins de comparação, foi feito também testes de tração somente com o arame, através da montagem do mesmo em dois roletes de fixação presos nas garras superior e inferior da máquina de ensaios. As cargas máximas médias de rompimento (Figura 4.29(b)) mostram que o aumento do parâmetro BA eleva a resistência de solda. De tal forma que a partir do valor 0 de BA a carga de rompimento (carga máxima) mostrou-se próxima à resistência de tração do arame. Pela análise do aspecto de falha da união arame-folha metálica após o ensaio de tração (Figura 4.30), é possível afirmar que estes resultados estão relacionados com a área de solda maior conforme o aumento de BA. O elevado volume (tamanho) do pé (base) do pino, no caso dos corpos de prova com $BA = +0.20$, favoreceu os bons resultados de carga máxima no ensaio de tração, provavelmente, agindo como reforço que aumentou a área de união entre arame e folha metálica.

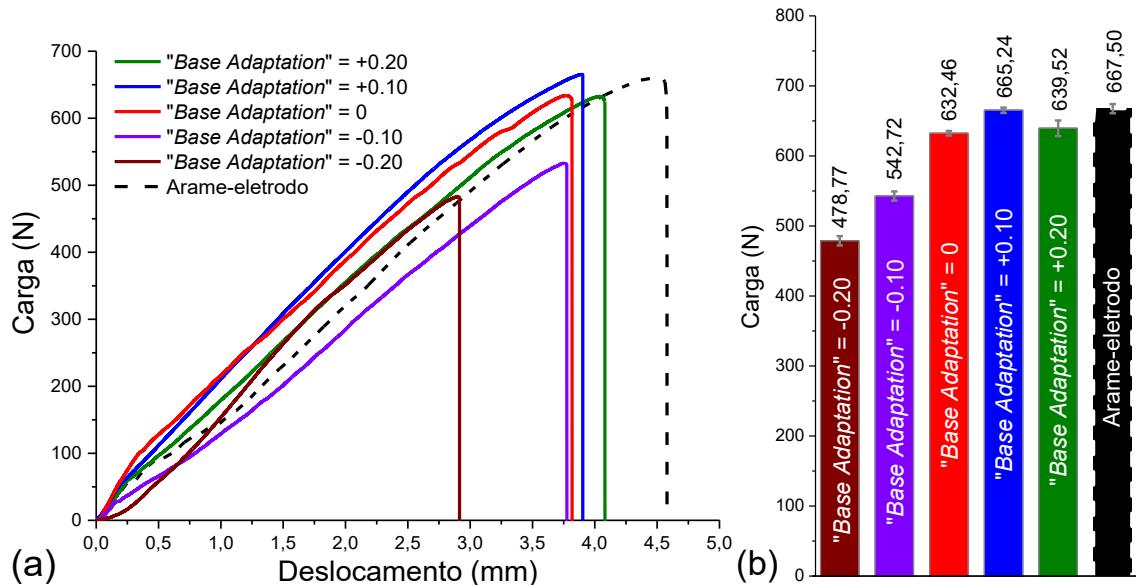


Figura 4.29 – Resultados do ensaio de tração da união arame-folha metálica, onde: (a) Curvas Deslocamento × Carga típicas; (b) Cargas máximas médias obtidas através de 5 medições

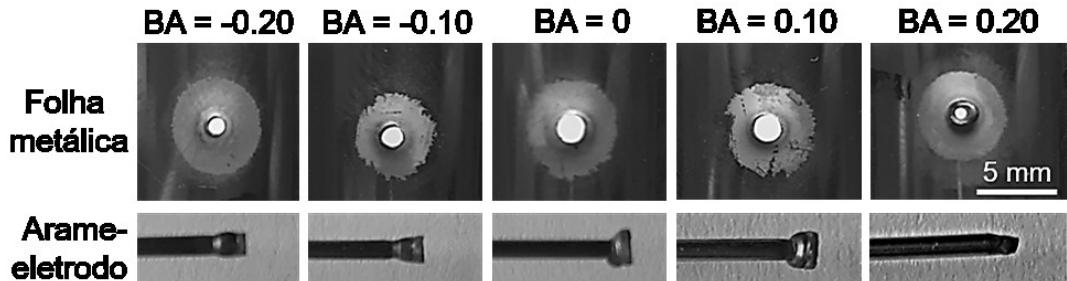


Figura 4.30 – Aspecto típico de falha da união arame-folha metálica após o ensaio de tração com diferentes valores do parâmetro de entrada “Base Adaptation” (BA)

4.3 Discussão parcial

Levando em consideração os resultados de estudo sobre diversos parâmetros de deposição dos pinos do tipo cabeça cilíndrica e abaulada pela técnica CMT PIN, destaca-se:

- O parâmetro de entrada “Ball/Cyl. Adaptation” (BCA) tem a função de definir o tipo de pino (cabeça cilíndrica ou abaulada) e ao mesmo tempo controlar o tamanho de cabeça do pino, mas como efeito colateral modifica a altura do pino. Por exemplo, o pino terá uma altura menor se o BA for ajustado para pinos do tipo cabeça abaulada, mas maior se o BCA for ajustado para pinos do tipo cabeça cilíndrica. O BCA controla o parâmetro intermediário τ_{aq} (tempo de aquecimento), que modifica o volume aquecido do arame, com possibilidade de transformar este da fase sólida para a líquida, formando então uma esfera (cabeça do pino) após o seu rompimento. Assim, o BCA define o tipo de pino (cabeça cilíndrica ou abaulada);

- O parâmetro “*Altitude Adaptation*” (AA) tem a função de controlar a altura do pino. O AA controla o parâmetro intermediário tsolpp (tempo de solidificação do pé do pino), que ajuda a conduzir a parte mais quente (após a soldagem do arame com a chapa) para o centro do arame (nesta região ocorre o rompimento após a reversão de alimentação do arame);
- O parâmetro “*Base Adaptation*” (BA) tem a função de controlar o tamanho do pé do pino, mas como efeito colateral também altera a altura do mesmo. O BA controla diretamente a velocidade do arame-eletrodo logo após fundir a ponta do mesmo e indiretamente o parâmetro intermediário taq (tempo de aquecimento). Ou seja, dependendo desta velocidade, o arame (com sua ponta fundida) consegue encostar na chapa mais lentamente ou mais rapidamente, consequentemente, com a ponta em fase mais sólida ou mais líquida, respectivamente, transformando o volume fundido no pé (base) do pino. Como hipótese, durante o movimento da ponta fundida do arame na direção da chapa, o calor é conduzido para o bico de contato (refrigerado a água) através da extensão do arame-eletrodo (*electrical stick-out*) preaquecendó-o. Como consequência, o arame preaquecido demanda menor tempo de aquecimento (taq) para ser amolecido e rompido, formando um pino. Ainda o BA, através da sua influência na região de solda arame-folha metálica, afeta a resistência entre o arame-eletrodo (pino) e a folha metálica;
- A variação da DBCP mostrou-se capaz de afetar as características geométricas dos pinos depositados pela técnica CMT PIN. Com este parâmetro é possível controlar o lugar mais aquecido/amolecido na extensão do arame-eletrodo (*electrical stick-out*), considerando o calor que se conduz para o bico de contato (refrigerado a água). De tal forma que para se conseguir um pino de altura e diâmetro de cabeça menores é recomendado utilizar a DBCP em 5 mm. É importante destacar que para os valores de DBCP menor do que 5 mm, e demais condições testadas, não foi possível depositar pinos, por causa da impossibilidade de soldagem entre arame e folha metálica. Os valores intermediários da DBCP (10 e 15 mm) entre si apresentaram pouca variação geométrica dos pinos. Já com a DBCP de 20 mm não se obteve um pino do tipo cabeça abaulada com as demais condições de deposição utilizadas, uma vez que a potência aplicada foi insuficiente para aquecer e transformar um volume do arame de fase sólida para líquida. Porém, com a DBCP em 20 mm obteve-se os pinos de maior comprimento;
- A técnica CMT PIN é capaz de depositar pinos em folhas metálicas de 0,40 e 0,45 mm de aços ABNT 1020 e AISI 430, respectivamente, sem defeito de perfuração. Mostrou-se que a espessura da chapa influencia ligeiramente as características

geométricas dos pinos; quanto menor a espessura da chapa (metal de base) menor é a altura do pino, independentemente do seu tipo (cabeça cilíndrica ou abaulada). Provavelmente, isso acontece porque a chapa mais fina (folha metálica) tem menor massa para transferir o calor gerado durante a fase de soldagem do arame com a chapa (soldagem do pé do pino). Também para o pino do tipo cabeça abaulada a espessura da chapa influencia no diâmetro da cabeça, aumentando ligeiramente a mesma para chapas mais finas. Isto deve-se ao fato de que o calor gerado na fase de soldagem do pé do pino é conduzido em maior quantidade em direção ao arame-eletrodo (menos para chapa), consequentemente transformando um maior volume do material do arame-eletrodo da fase sólida para a líquida, resultando em um maior diâmetro de cabeça;

- Com aumento da temperatura da chapa (metal de base), verificou-se a tendência de redução da altura do pino do tipo cabeça cilíndrica. Acredita-se que com o aumento da temperatura da chapa diminui-se os gradientes de temperatura entre o pé do pino e a chapa e o corpo do pino, fazendo com que o calor se concentre perto da ZAC (pé do pino), demorando, assim, mais tempo para ser transferido. Consequentemente, o ponto de maior temperatura ao longo do arame-eletrodo tende a se localizar mais próximo da chapa, fazendo com que o rompimento deste (formação do pino) aconteça neste ponto ou próximo dele.

CAPÍTULO V

AVALIAÇÃO DOS PAINÉIS LAMINADOS METAL-COMPÓSITO REFORÇADOS POR PINOS: 1^a FASE

Neste capítulo são apresentados os passos de fabricação e caracterização da 1^a avaliação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC) reforçados por pinos. Esta avaliação foi realizada por meio de ensaios mecânicos que normalmente são aplicados em materiais do tipo Laminados de Metal-Compósito (LMC) e Laminados de Compósito (LC).

5.1 Fabricação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC)

Para a fabricação dos PLMC, adotou-se uma sequência como apresentado na Figura 5.1. Destaca-se que também foram fabricados Painéis Laminados de Compósito (PLC), sem folhas metálicas, e PLMC convencionais (sem pinos) com 2 e 3 folhas metálicas por painel, para fins de comparação, adotando-se a mesma sequência de fabricação (Figura 5.1), mas obviamente não passando pela 2^a etapa.

Para a 1^a etapa de fabricação dos PLMC, as folhas metálicas de aço AISI 430 de 0,4 mm de espessura foram cortadas nas dimensões desejadas para os PLMC ($\approx 200 \times 80$ mm), utilizando-se uma guilhotina manual. Em seguida, as folhas cortadas foram limpadas com um pano embebido em acetona industrial.

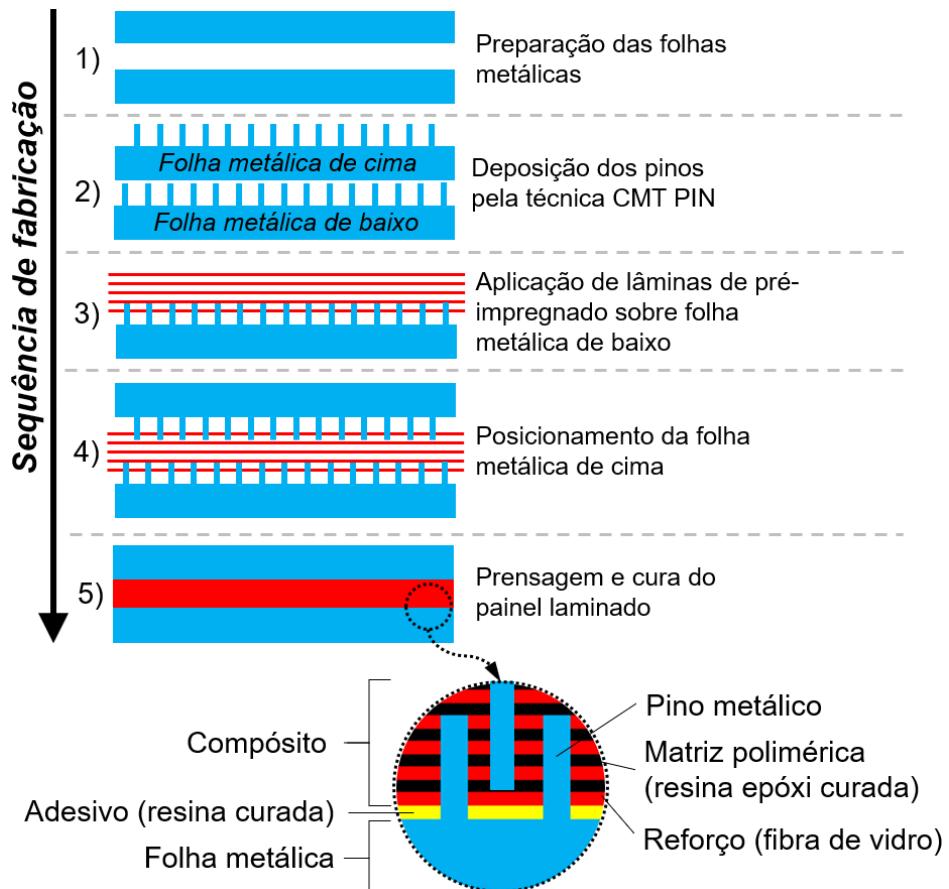


Figura 5.1 – Sequência de fabricação dos PLMC com pinos metálicos

Destaca-se que antes de executar a 2^a etapa de fabricação dos PLMC, o processo de deposição dos pinos pela técnica CMT PIN (Figura 5.2) foi estudado e parametrizado (Capítulo IV), para obter, em termos de altura, o menor pino possível do tipo cabeça abaulada (Figura 5.3), de forma a obter uma espessura mínima dos painéis. Isso permitiu reduzir a quantidade das lâminas de pré-impregnados na camada de compósito as quais têm elevado custo.

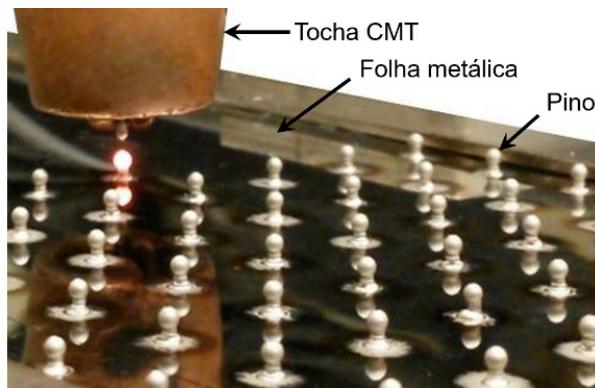


Figura 5.2 – Deposição dos pinos pela técnica CMT PIN em uma folha metálica para PLMC

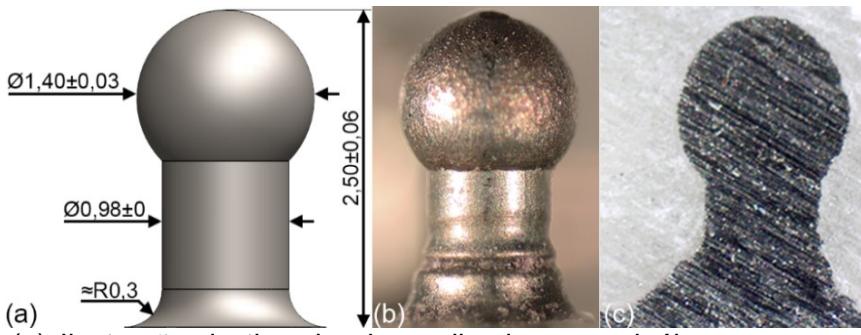


Figura 5.3 – (a) Ilustração do tipo de pino aplicado nos painéis com suas características geométricas (dimensões em mm); (b) Pino depositado em folha metálica; (c) Seção transversal de um pino dentro do compósito em um PLMC (os riscos no pino são marcas de lixamento)

A Figura 5.4 ilustra a sequência de deposição dos pinos, onde o primeiro pino depositado é indicado pelo número 1 e assim sucessivamente. Percebe-se que a sequência foi mantida em paralelo à largura da folha metálica (≈ 80 mm) sem alteração da direção de deposição dos pinos, independentemente do número da coluna. As colunas das pinos das folhas metálicas com o padrão de deposição Quadrático foram depositadas na sequência I, II, III, IV, V, etc. (Figura 5.4(a)). Para o caso do padrão de deposição Hexagonal, as colunas ímpares foram depositadas da mesma maneira que o padrão Quadrático, entretanto, os pinos das colunas pares foram deslocados pela metade do espaçamento em relação à posição dos pinos das colunas ímpares. Assim, primeiro foram depositados os pinos das colunas ímpares (I, III, V, etc. da Figura 5.4(b)) e em seguida foram depositados os pinos das colunas pares (II, IV, etc. da Figura 5.4(b)). Esse procedimento facilitou a programação da matriz de pontos da trajetória do braço robótico, pois as colunas ímpares/pares têm a mesma quantidade de pinos, apesar de não representado na Figura 5.4(b).

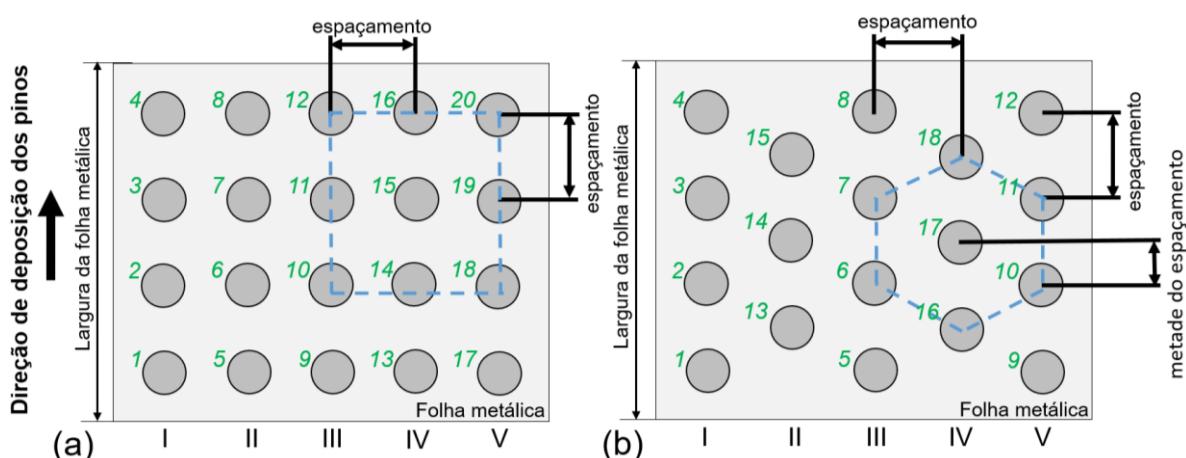
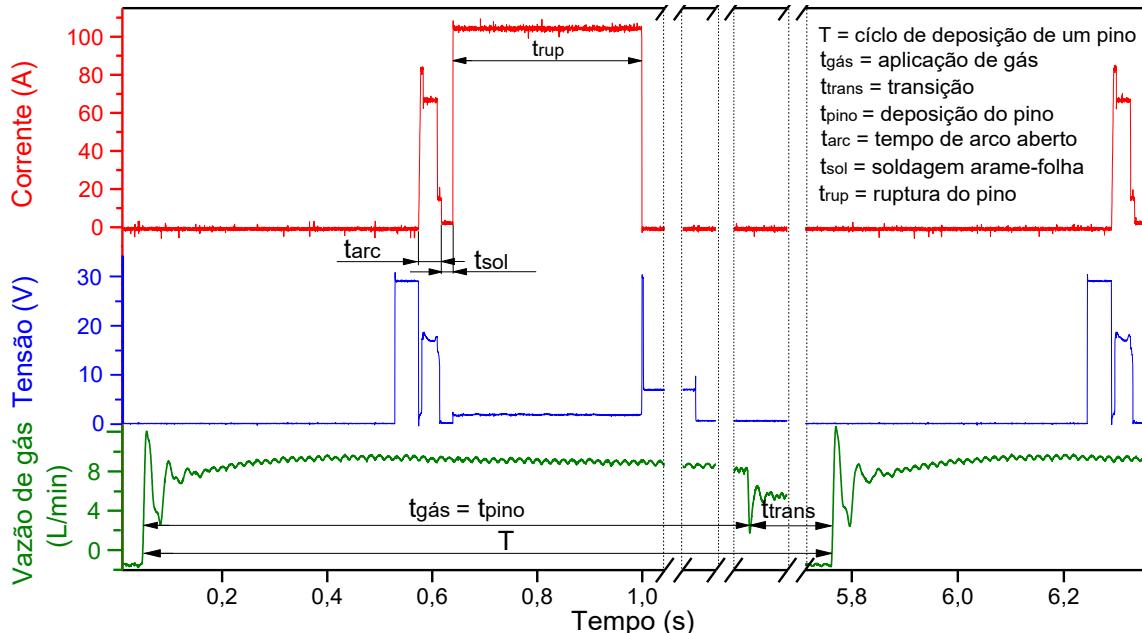


Figura 5.4 – Ilustração da vista superior da sequência de deposição dos pinos sobre folha metálica para os dois padrões de deposição utilizados, onde: (a) Quadrático; (b) Hexagonal

A Figura 5.5 mostra um oscilograma de corrente, tensão e vazão de gás de proteção do ciclo inteiro de deposição de um pino pela técnica CMT PIN (típico para demais pinos depositados nas folhas metálicas dos PLMC deste trabalho). Através da análise dos sete oscilogramas de vazão de gás de proteção (escolhido como referência, pois a deposição de um pino começa com a criação de uma atmosfera protetora), observou-se que um período de deposição (T) durou em média $5,73 \pm 0,00$ s, sendo que este período consiste no tempo de deposição do pino ($t_{pino} = 2,60 \pm 0,01$ s) e no tempo de deslocamento da tocha para a próxima posição de deposição, aqui denominado como tempo de transição ($t_{trans} = 3,14 \pm 0,00$ s). Este último tempo não foi otimizado (reduzido), o que poderia melhorar a produtividade de deposição. Ainda o tempo de deposição do pino (t_{pino}) inclui o tempo de aplicação de gás de proteção ($t_{gas} = 2,60 \pm 0,01$ s), o tempo para abrir o arco ($t_{arc} = 0,04 \pm 0,00$ s), o tempo para soldar o arame-eletrodo na folha metálica ($t_{sol} = 0,02 \pm 0,00$ s) e o tempo para aquecimento, amolecimento e ruptura do arame-eletrodo soldado ($t_{rup} = 0,36 \pm 0,01$ s). Os valores de corrente, tensão e tempo para um período de deposição (T) foram mantidos fixos para todos os pinos.



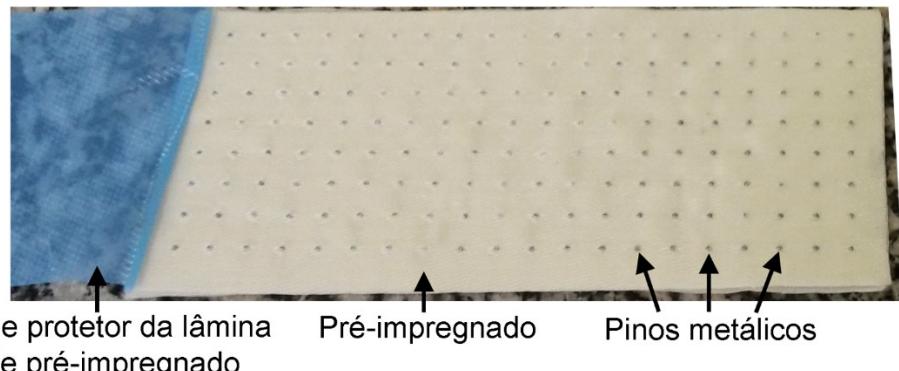
Destaca-se que já após a deposição dos pinos, foi feita uma limpeza nas superfícies das folhas metálicas utilizando uma escova de nylon macia com detergente neutro. Em seguida, foi feita limpeza ultrassônica, mergulhando e vibrando cada folha metálica por 8 min dentro de um *becker* com acetona industrial, para retirar outros possíveis contaminantes antes de aplicar as lâminas de pré-impregnado. Como exemplo, a Figura 5.6(a) mostra uma folha

metálica (de baixo do painel do tipo Quadrático 5 mm) após o processo de deposição dos pinos. Já a Figura 5.6(b) mostra esta mesma folha metálica com pinos após a limpeza. As folhas logo após a limpeza foram envolvidas por um filme de PVC para armazenar/transportar, protegendo contra contaminação até a laminação do compósito.



Figura 5.6 – Exemplo de folha metálica após deposição dos pinos, onde: (a) Antes da limpeza; (b) Após as etapas da limpeza

A seguir, durante a 3^a etapa de fabricação, imediatamente após a remoção dos filmes de PVC de proteção, foram aplicadas lâminas de pré-impregnado (fibra de vidro e resina epóxi) na folha metálica de baixo. A montagem e a cura dos painéis deste trabalho foram feitas nos Laboratórios de Análises Químicas e Térmicas do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP (UNESP-Guaratinguetá) durante uma visita técnica. A Figura 5.7 apresenta um dos momentos da montagem das lâminas de pré-impregnado em ambiente limpo (sala branca). Utilizou-se luvas com intuito de evitar ao máximo a contaminação do compósito e demais partes dos painéis. É importante destacar que cada lâmina de pré-impregnado foi cortada com auxílio de uma tesoura manual resultando em dimensões de 210 × 90 mm, deixando 5 mm de excesso em cada borda, em relação à folha metálica (200 × 80 mm), para possibilitar uma folga de corte e de montagem. Todas as lâminas de pré-impregnado foram empilhadas com a mesma orientação (0°) em relação ao comprimento das folhas metálicas.



Durante a 4^a etapa de fabricação, foi finalizado o processo de pré-montagem dos PLMC alinhando as folhas metálicas (de baixo e de cima) com as lâminas de pré-impregnados no meio. O alinhamento entre as folhas metálicas de cima e de baixo foi necessário para evitar o contato entre seus pinos e ao mesmo tempo para garantir os padrões de deposição dos pinos conforme planejado. Para isso, foi utilizado um suporte adaptado como apresentado na Figura 5.8, onde a folha metálica de baixo (posição 3), adesivada com as lâminas de pré-impregnado (posição 5), foi fixada com auxílio de bases magnéticas (posição 2). Do outro lado foi fixada somente a folha metálica de cima (posição 4). Assim, o nivelamento foi feito apoiando as bordas de maior comprimento (≈ 200 mm). Já para alinhar as bordas de menor comprimento (≈ 80 mm), tomou-se como referência a borda da mesa plana (posição 1) sobre a qual foi montado o suporte adaptado. Em seguida, o painel pré-montado foi envolto por um filme de poliamida (desmoldante) e levado para prensagem e cura na prensa a quente (mais detalhes descritos na Seção 3.2.2 do Capítulo III). As dimensões das placas (400 × 400 mm) da prensa permitiram montar (prensar e curar) três PLMC por ciclo de cura (Figura 5.9). O ciclo de cura foi executado conforme recomendado pelo fabricante do material compósito (Hexcel Corporation®). A pressão aplicada em ambas as folhas metálicas garantiu a penetração dos pinos nas lâminas de pré-impregnado.

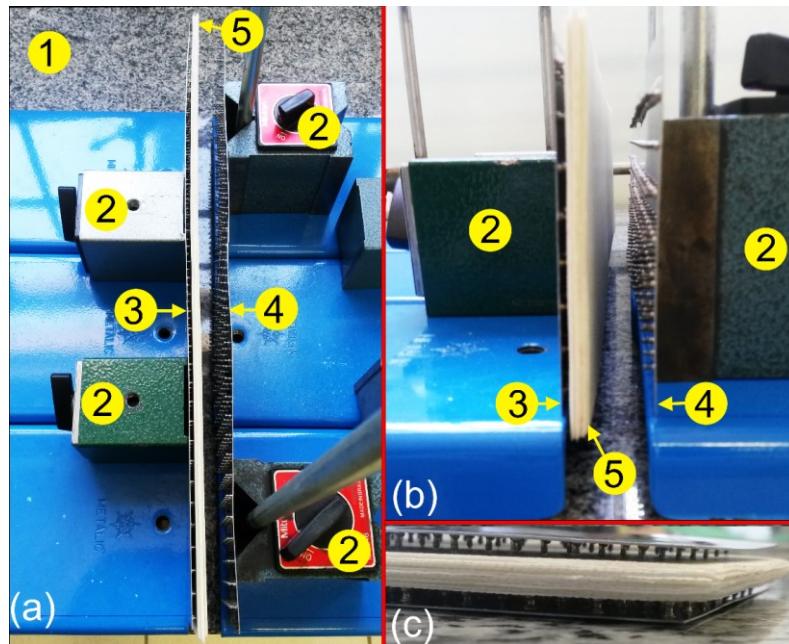


Figura 5.8 – Suporte adaptado utilizado para pré-montagem (alinhamento) dos PLMC, onde: (a) Vista superior; (b) Vista lateral; (c) Vista do PLMC pré-montado com pinos, sendo 1 - mesa plana; 2 - base magnética (4 unidades); 3 - folha metálica de baixo; 4 - folha metálica de cima; 5 - lâminas de pré-impregnado

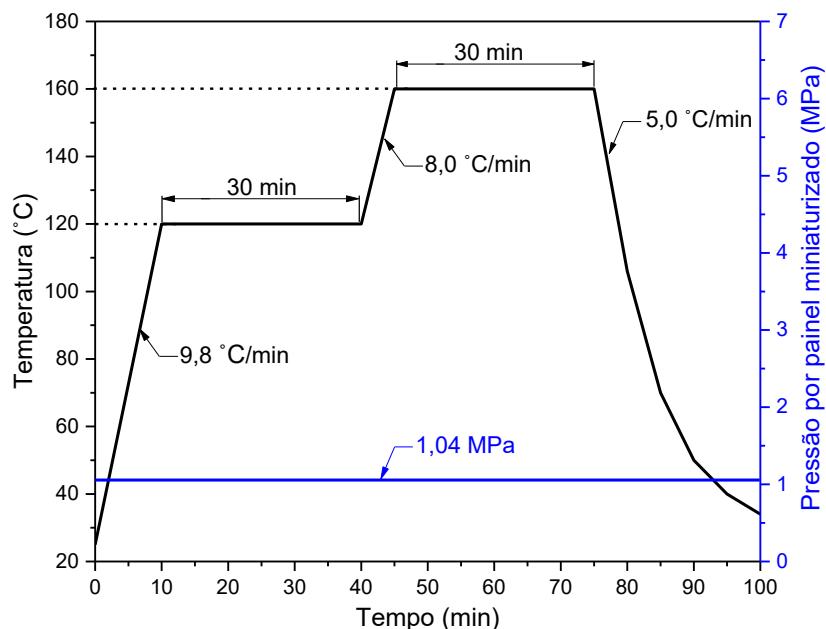


Figura 5.9 – Ciclo de cura utilizado na montagem (fabricação) dos PLMC

Por fim, durante a 5^a etapa, após o ciclo de cura e resfriamento dos painéis, o filme desmoldante foi removido juntamente com o excesso de material compósito presente nas bordas dos painéis. Esta remoção foi feita com auxílio de uma serra vertical e lixa rotativa de 80 *mesh*, chegando assim nas dimensões desejadas dos painéis ($\approx 200 \times 80$ mm). A Figura 5.10 apresenta vistas dos sete tipos de painéis, com e sem pinos, montados (um de cada) da 1^a fase de avaliação.

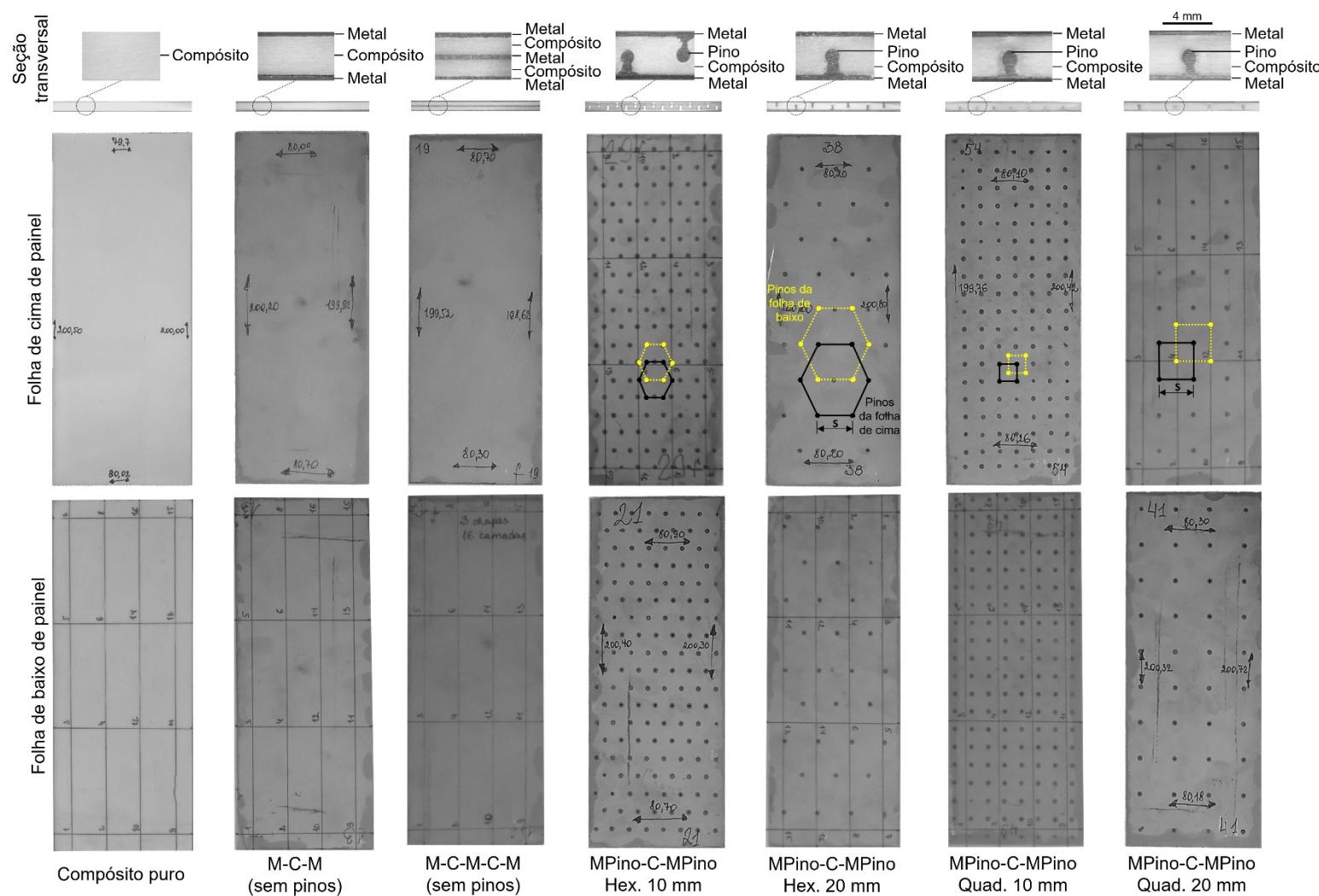


Figura 5.10 – Tipos de painéis da 1^a fase de avaliação com respectivas seções transversais e sobreposição esquemática de pinos nas folhas metálicas de cima e de baixo, onde M-C-M = metal-compósito-metal, M-C-M-C-M = metal-compósito-metal-compósito-metal, MPino-C-MPino = metal com pinos-compósito-metal com pinos Hex. e Quad. para o padrão de deposição Hexagonal e Quadrático, respectivamente, e S = distância de espaçamento entre os pinos (as marcas semelhantes a pontos nos painéis com pinos são devidas à oxidação induzida pelo calor do aço inoxidável logo abaixo da posição dos pinos depositados - este efeito estético poderia ser evitado com purga de gás inerte)

5.2 Caracterização dos painéis fabricados

A Tabela 5.1 apresenta algumas características medidas/calculadas dos painéis fabricados durante a 1^a fase de avaliação. É importante destacar que os painéis do tipo Compósito puro e M-C-M (sem pinos) contêm 22 e 19 lâminas de pré-impregnado nas suas camadas de compósito, respectivamente. Já os demais tipos de painéis (M-C-M-C-M (sem pinos), MPino-C-MPino Hexagonal 10 e 20 mm e Quadrático 10 e 20 mm) têm 16 lâminas nas suas camadas de compósito. O motivo dessa diferença de quantidade de lâminas na camada de compósito foi padronizar a espessura de todos os painéis da 1^a fase de avaliação.

Para medir o comprimento e a largura dos painéis laminados foi utilizado um paquímetro calibrado com resolução de 0,02 mm. Já para medir a espessura dos painéis laminados criou-se uma malha de 16 pontos (Figura 5.11(a)). A espessura foi então medida nestes pontos por meio de uma máquina universal de medir comprimentos (Figura 5.11(b)) com resolução de 0,2 µm. A massa dos painéis laminados foi medida em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g. Os valores médios destas medições estão apresentados na Tabela 5.1.

A Figura 5.12 apresenta graficamente a influência do aumento do número de pinos na espessura e densidade dos painéis laminados fabricados. Percebe-se que com o aumento do número de pinos, estes parâmetros mantiveram-se praticamente constantes, com apenas um leve acréscimo de espessura. Provavelmente, isso ocorreu por causa do aumento do volume total dos pinos presentes dentro do compósito dos PLMC. Devido à pequena massa do pino ($0,023 \pm 0,000$ g) e do leve acréscimo de espessura dos painéis (com maior número dos pinos) não houve influência na densidade dos painéis com duas folhas metálicas.

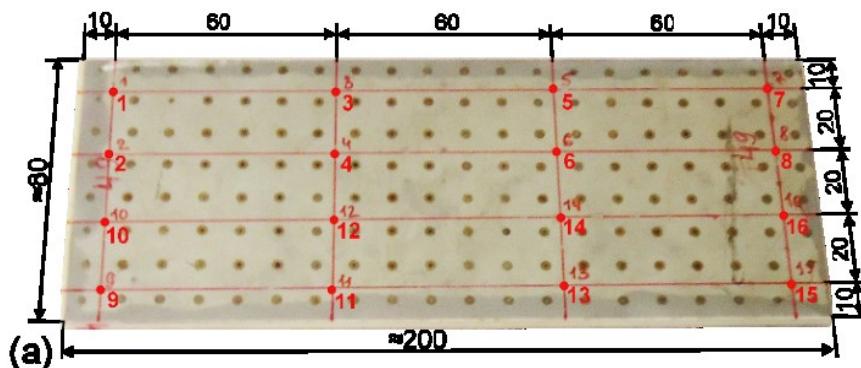




Figura 5.11 – (a) Malha para medição de espessura em um painel (os números marcados são pontos sequenciais de medição e as dimensões estão em mm); (b) Máquina utilizada para medir a espessura dos painéis

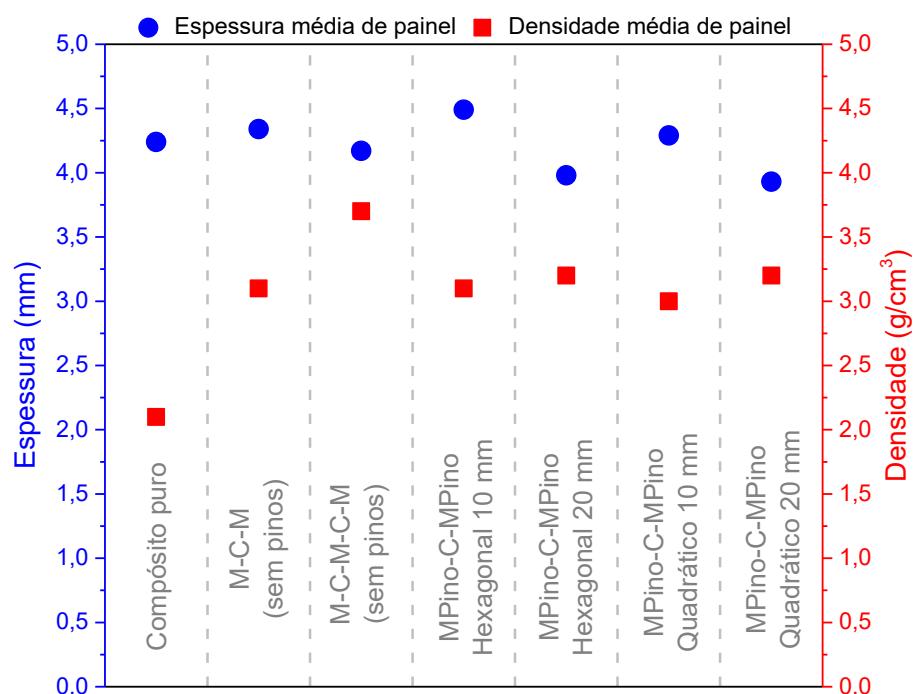


Figura 5.12 – Espessura e densidade médias dos painéis da 1^a fase de avaliação

Tabela 5.1 – Características principais dos painéis da 1^a fase de avaliação

Tipo de painel	Dimensões dos painéis (mm)			Pinos por painel	Lâminas de pré-impregnado no compósito	Densidade dos pinos (pino/cm ²)	Densidade dos painéis (g/cm ³)
	C	L	E				
Compósito puro	199,89 ± 0,43	79,96 ± 0,21	4,24 ± 0,00	0	22	0	2,1
M-C-M (sem pinos)	200,36 ± 0,28	80,45 ± 0,37	4,34 ± 0,00	0	19	0	3,1
M-C-M-C-M (sem pinos)	200,01 ± 0,62	80,25 ± 0,24	4,17 ± 0,00	0	16	0	3,7
MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm	199,80 ± 0,61	80,21 ± 0,16	4,49 ± 0,00	285	16	0,89	3,1
MPino-C-MPino Hexagonal 20 mm	200,23 ± 0,28	80,48 ± 0,17	3,98 ± 0,01	63	16	0,20	3,2
MPino-C-MPino Quadrático 10 mm	200,01 ± 0,40	80,19 ± 0,44	4,29 ± 0,00	293	16	0,92	3,0
MPino-C-MPino Quadrático 20 mm	200,19 ± 0,24	80,26 ± 0,28	3,93 ± 0,01	67	16	0,21	3,2

C = comprimento; L = largura; E = espessura; tipo de pino utilizado = cabeça abaulada; folha de aço AISI 430; tipo do arame-eletrodo = AWS ER 309 L; densidade média (real) do arame-eletrodo = 0,0078 ± 0,0000 g/mm³; Diâmetro médio do arame-eletrodo = 0,98 ± 0,00 mm; Altura média dos pinos depositados = 2,50 ± 0,06 mm; Diâmetro médio da cabeça dos pinos = 1,45 ± 0,03 mm; Massa média (real) dos pinos depositados = 0,023 ± 0,000 g; Espessura de cada lâmina de pré-impregnado antes de prensagem e cura = 0,3 mm; Densidade da lâmina de pré-impregnado medida = 1,5 g/mm³; Massa média (real) das folhas metálicas sem pinos = 47,93 ± 0,36 g; Volume de um pino depositado (calculado) = 2,39 mm³; Massa de um pino depositado (calculada) = 0,019 g; Área superficial livre de um pino antes da laminação do compósito (calculada) = 5,5 mm²

5.3 Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis laminados

Os LMC, por serem aplicados em estruturas de alta responsabilidade, como é o caso de uma aeronave, precisam ser testados antes da sua aplicação, testando diversas situações críticas que acontecem durante o seu uso. Sinmazçelik et al. (2011) e Salve et al. (2016) em seus trabalhos apresentam diversos ensaios mecânicos aplicados para avaliar os LMC e LC, tais como, dobramento de três e de cinco pontos, fadiga, tração, impacto de alta e baixa velocidades, explosão, etc. Para testar as propriedades mecânicas dos painéis laminados da 1^a fase de avaliação sob diversos esforços e condições durante o seu uso, foram feitos ensaios de dobramento de três pontos, impacto de baixa velocidade do tipo *Drop-Weight Test*, seguido de compressão ou flambagem, e cisalhamento de losipescu. A seguir, cada um destes ensaios é descrito mais detalhadamente.

5.3.1 Ensaio de dobramento de três pontos

O objetivo deste ensaio foi avaliar a resistência à flexão dos PLMC com ancoradores (pinos) depositados na superfície metálica através da técnica CMT PIN. Os resultados obtidos foram comparados com PL e PLMC convencionais (sem pinos) também ensaiados em dobramento.

A Figura 5.13 apresenta os seis tipos de painéis laminados utilizados no ensaio de dobramento com suas respectivas seções transversais. Destaca-se que neste caso foram avaliados apenas painéis com pinos padrão Hexagonal por questões de disponibilidade. Um painel do tipo MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm, estudado em mais detalhes na 2^a fase de avaliação (Capítulo VI), foi inserido neste ensaio com o objetivo de verificar a influência de uma maior densidade (número) dos pinos na resistência à flexão dos PLMC. Mesmo com algumas informações já mostradas anteriormente, a Tabela 5.2 apresenta as características dos painéis (corpos de prova) avaliados no ensaio de dobramento de três pontos.

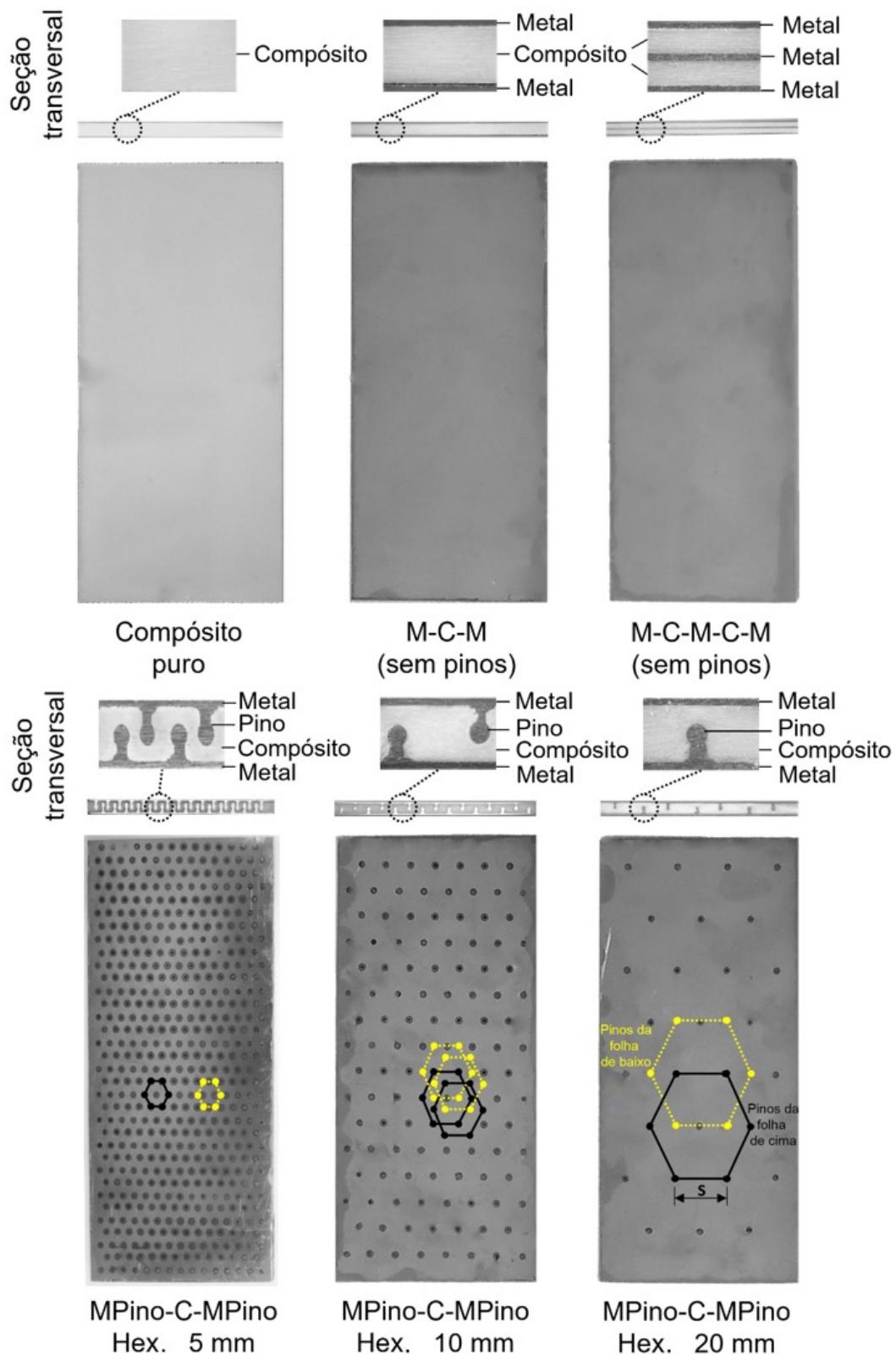


Figura 5.13 – Tipos de painéis com respectivas seções transversais e sobreposição esquemática dos pinos nas folhas de cima e de baixo avaliados no ensaio de dobramento de três pontos, onde M-C-M representa metal-compósito-metal, MPino-C-MPino Hex. para painéis pinados metal-compósito-pino com padrão de deposição Hexagonal (largura dos painéis \approx 80 mm, comprimento de todos os painéis \approx 175 mm)

Tabela 5.2 – Características médias dos painéis laminados (corpos de prova) utilizados no ensaio de dobramento de três pontos

Tipo de painel	Pinos por painel	Lâminas de pré-impregnado no compósito	Espessura (mm)	Densidade dos pinos (pino/cm ²)	Densidade dos painéis (g/cm ³)
Compósito puro	0	22	4,24 ± 0,00	0	2,1
M-C-M (sem pinos)	0	19	4,34 ± 0,00	0	3,1
M-C-M-C-M (sem pinos)	0	16	4,17 ± 0,00	0	3,7
MPino-C-MPino Hex. 5 mm	862	13	4,11 ± 0,00	3,52	3,3
MPino-C-MPino Hex. 10 mm	249	16	4,49 ± 0,01	0,92	3,1
MPino-C-MPino Hex. 20 mm	55	16	3,93 ± 0,01	0,20	3,2

Dimensões dos painéis laminados ≈ 175 × 80 mm; Hex. = padrão de deposição dos pinos Hexagonal

Na literatura a maioria dos ensaios de dobramento de três e de cinco pontos aplicados em LMC e LC seguem as normas ASTM D790 (ASTM, 2017) e ASTM D2344 (ASTM, 2013) com corpos de prova de tamanho reduzindo (≈ 24 × 8 × 4 mm) e focando na avaliação da tensão de cisalhamento interlaminar (*interlaminar shear strength*). Ou seja, o foco é a qualidade da união metal-compósito, o que pode ser avaliado em pequenas amostras (corpos de prova) de painéis. Na ausência de uma norma específica para realizar ensaios de dobramento em PLMC, mais ainda grandes comparados às dimensões dos corpos de prova indicadas, optou-se em tomar como base a norma ISO 7438 (ISO, 1985) com a montagem básica do ensaio apresentada na Figura 5.14. Os testes foram realizados em uma máquina universal de ensaios, sendo que mais detalhes estão descritos na Seção 3.3.2 do Capítulo III. Por ser um ensaio do tipo semi-estático, a velocidade de deslocamento do cutelo foi mantida constante em 1 mm/s (taxa de aquisição de dados foi igual a 10 Hz). Adotou-se dois critérios de parada do ensaio. Ou parou-se o ensaio com o cutelo atingindo o valor de deslocamento (Δd) de 30 mm em relação a posição inicial (cutelo encostado no painel sem aplicação de carga) ou quando houve uma descida brusca da carga (falha catastrófica) após o rompimento (alto grau de dobramento) do painel.

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 apresentam os resultados médios de dois testes de dobramento de três pontos realizados em cada tipo de painel. É importante destacar que durante a realização dos testes foi observada uma boa repetitividade (ver barras de erro na Figura 5.16). Através da integração das curvas da Figura 5.15 para cada tipo de painel e para cada descarregamento após o rompimento, obteve-se o trabalho realizado pela máquina de tração, ou seja, o valor da energia absorvida.

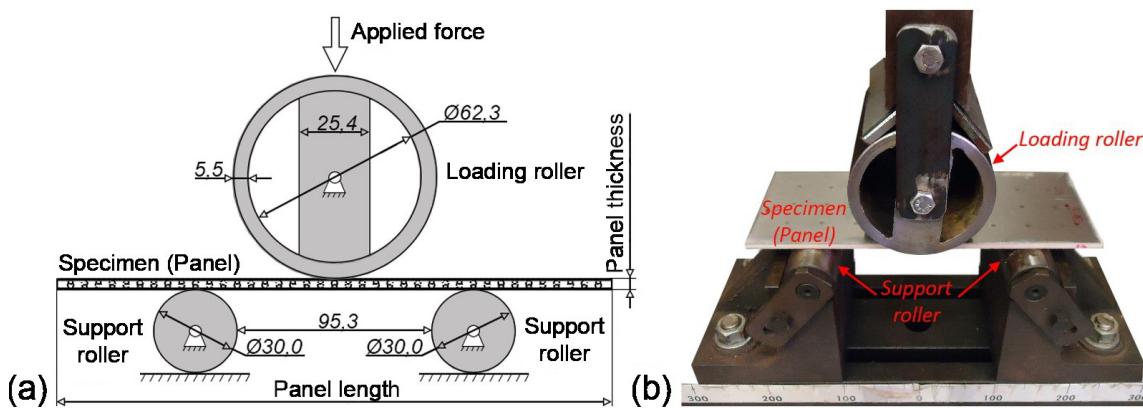


Figura 5.14 – Esquema básico do ensaio de dobramento de três pontos utilizado, onde: (a) Esquema pela norma ISO 7438 (dimensões em mm); (b) Vista real do cutelo e suportes usados

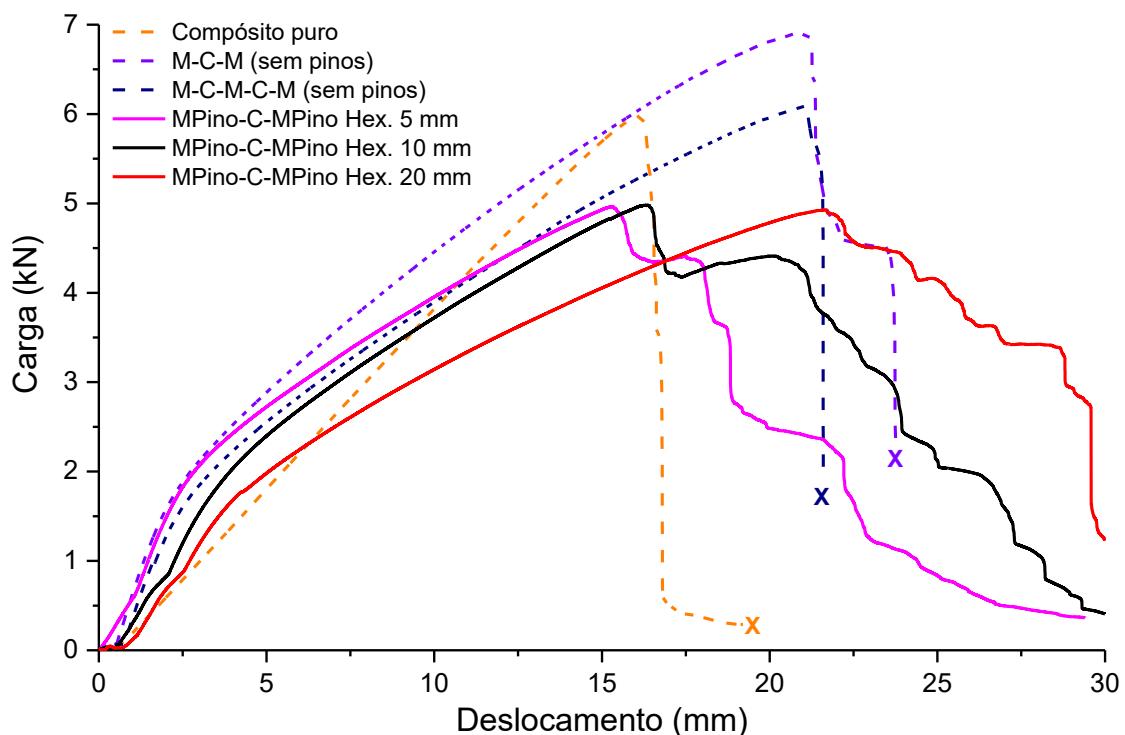


Figura 5.15 – Curvas Deslocamento x Carga típicas para cada tipo de painel no ensaio de dobramento de três pontos (x = o teste foi parado por causa da falha catastrófica (critério de parada))

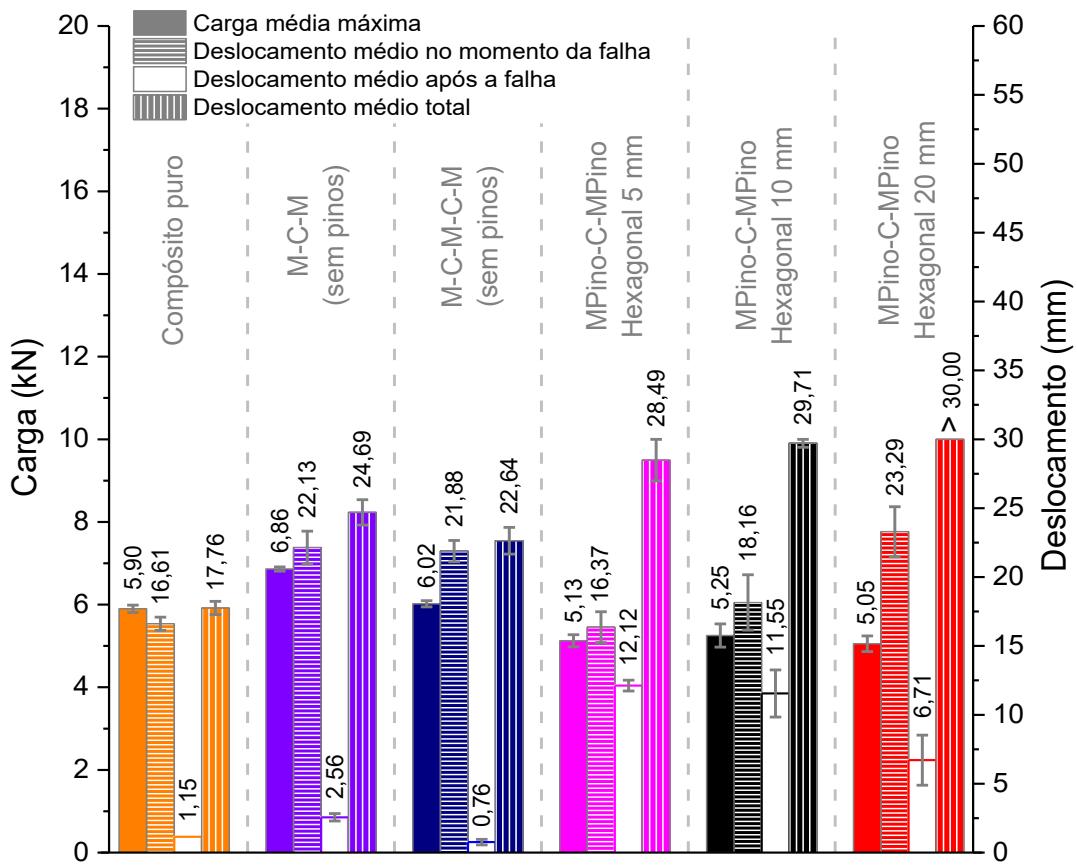


Figura 5.16 – Valores médios de carga máxima e deslocamentos do cutelo no momento da falha, após a falha e total obtidos dos testes de dobramento de três pontos

Para melhor análise, os resultados do ensaio foram divididos em três grupos:

- Antes do rompimento/falha do painel;
- Após o rompimento/falha do painel;
- Análise da energia envolvida no ensaio.

Analizando os painéis antes da falha, é possível observar que a carga e o deslocamento máximos do cutelo foram alcançados com o painel do tipo M-C-M (sem pinos). Neste caso, para romper o painel precisou-se de uma carga (F_{max}) de $6,86 \pm 0,05$ kN, o que ocorreu com um deslocamento (Δd) de $22,13 \pm 1,20$ mm. De modo geral, os painéis sem pinos mostraram maiores F_{max} e Δd de rompimento. Como pode ser visto na Figura 5.15, os painéis do tipo Compósito puro apresentaram um comportamento típico. Neste caso, a região de carregamento foi quase linear com relativamente baixos valores de deslocamento no momento de rompimento ($\Delta d = 16,61 \pm 0,48$ mm). Por outro lado, o painel do tipo Compósito puro mostrou um valor elevado de F_{max} ($5,90 \pm 0,09$ kN), próximo ao obtido com o painel M-C-M-C-M ($6,02 \pm 0,07$ kN). Em relação aos painéis com pinos, é possível notar que o valor da F_{max} não foi afetado em função da densidade (número) de pinos por painel, ficando em torno de 5,15 kN.

Mas na Figura 5.16 percebe-se que com o aumento do espaçamento entre os pinos (menor densidade dos pinos) tendeu a aumentar o valor de deslocamento no momento da falha. Provavelmente este resultado indica que os pinos depositados nas folhas metálicas dos PLMC concentraram a tensão de tração na região do espaçamento (lugar entre os pinos depositados) da folha metálica de baixo. Isso fez reduzir a carga máxima e deslocamento no momento da falha, chegando ao seu rompimento com menor energia necessária com abertura de uma trinca. Por outro lado, percebeu-se que os pinos impediram a delaminação do contato metal-compósito, como apresenta a Figura 5.17. Ou seja, isso mostra que os pinos melhoraram o acoplamento metal-compósito, impedindo a delaminação entre as folhas metálicas e a camada de compósito, como apresenta a Figura 5.18. A cabeça do pino dificultou a saída do mesmo da camada de compósito, confirmando os resultados da pesquisa de Ucsnik et al. (2010). Já no caso dos PLMC sem pinos, as folhas metálicas separaram-se com maior facilidade da camada de compósito.

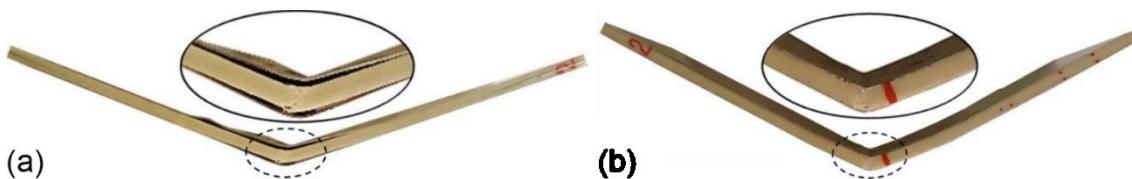
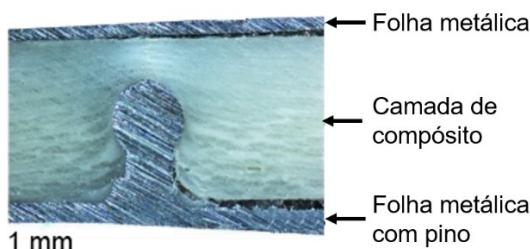


Figura 5.17 – Comparação entre vistas laterais dos painéis apóos o ensaio de dobramento de três pontos, onde: (a) M-C-M-C-M (sem pinos), típico para os demais PLMC sem pinos; (b) MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm, típico para os demais PLMC com pinos



Após a falha observou-se que todos os painéis convencionais (sem pinos) apresentaram uma queda brusca de carga (correspondente a um deslocamento em torno de 1,5 mm), conforme pode ser visto na Figura 5.15. Já os PLMC com pinos, ao contrário dos PLMC convencionais (sem pinos), apresentaram deslocamentos bem superiores apóos a ruptura (média de 10 mm), resultando em maiores valores de deslocamentos médios totais (Figura 5.16). Provavelmente os painéis laminados convencionais (sem pinos) apresentaram falhas catastróficas (rápido decréscimo da

carga aplicada pelo deslocamento do cutelo) por terem os contatos metal-compósito bem mais delaminados. No caso dos PLMC com pinos, teoricamente a falha do painel começou com abertura da fratura na folha metálica de baixo (Figura 5.19) e, conforme o deslocamento do cutelo, a trinca se propagou com maior facilidade (menor energia aplicada) para os menores espaçamentos entre os pinos, pois estes favoreceram campos de concentração de tensão mais próximos. Assim, ocorreu uma falha menos catastrófica ou descarregamento mais suave no caso dos espaçamentos maiores entre os pinos. Na Figura 5.19 observa-se que no caso de todos os PLMC com pinos houve um rompimento transversal das suas folhas metálicas de baixo, onde atuaram as cargas de tração máximas durante o ensaio de dobramento. Já no caso dos PLMC convencionais (sem pinos) não houve rompimento das folhas metálicas de cima, mas apenas delaminação da camada de compósito, com exceção do painel de Compósito puro que, por ser um material frágil, apresentou uma fratura.

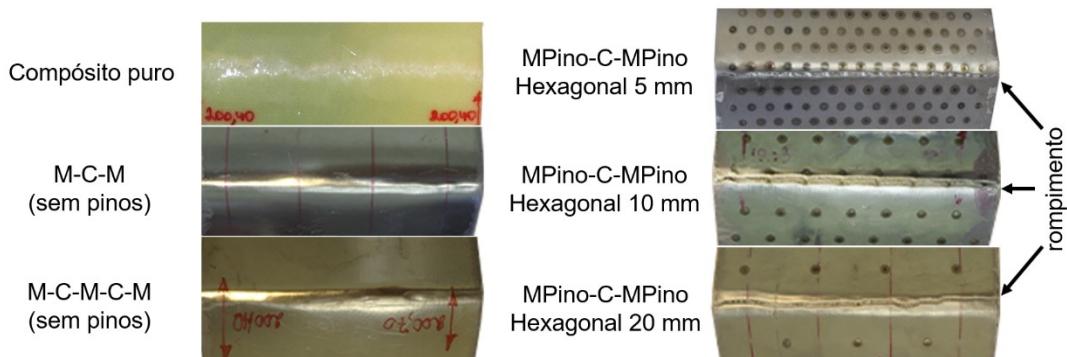


Figura 5.19 – Imagens da superfície de baixo da região de dobramento de todos os tipos de painéis após o ensaio de dobramento de três pontos

Analizando a energia envolvida no ensaio, na Figura 5.20 é possível notar que os PLMC convencionais (sem pinos) demandaram maior os níveis de energia antes da falha em comparação com os demais devido aos altos valores de carga máxima e deslocamento alcançados. Pelo mesmo motivo, os PLMC com pinos apresentaram os valores de energia bem superiores após a falha em comparação com os painéis convencionais (Figura 5.20). A partir destes resultados notou-se que os PLMC com pinos exibiram uma falha menos catastrófica após o rompimento, o que é um ponto bastante positivo tendo em vista a aplicação em estruturas que trabalham com elevados esforços e/ou que tenham consequências graves no caso de falha.

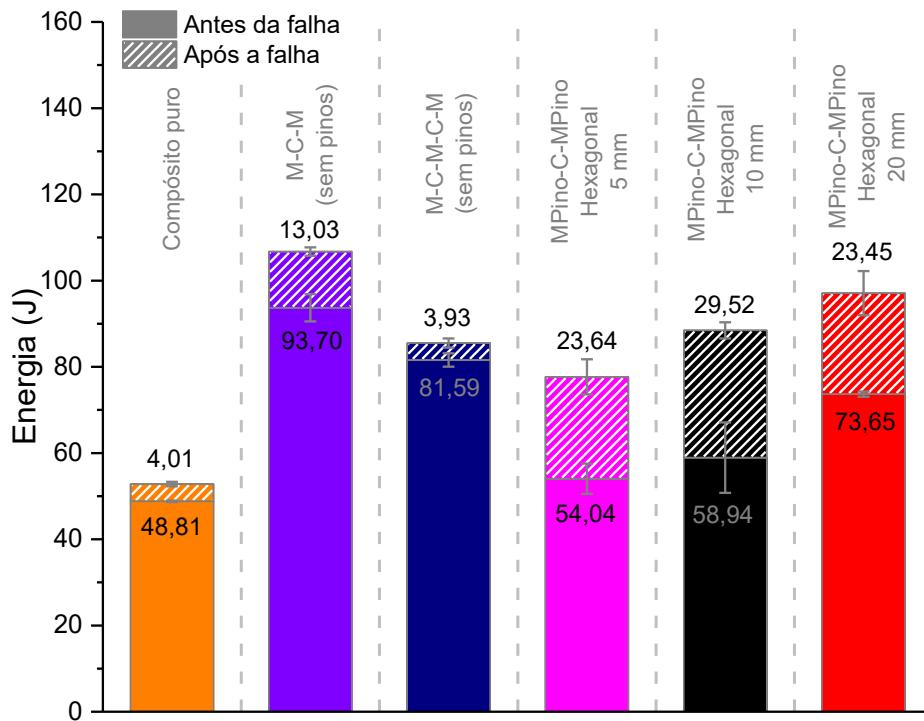


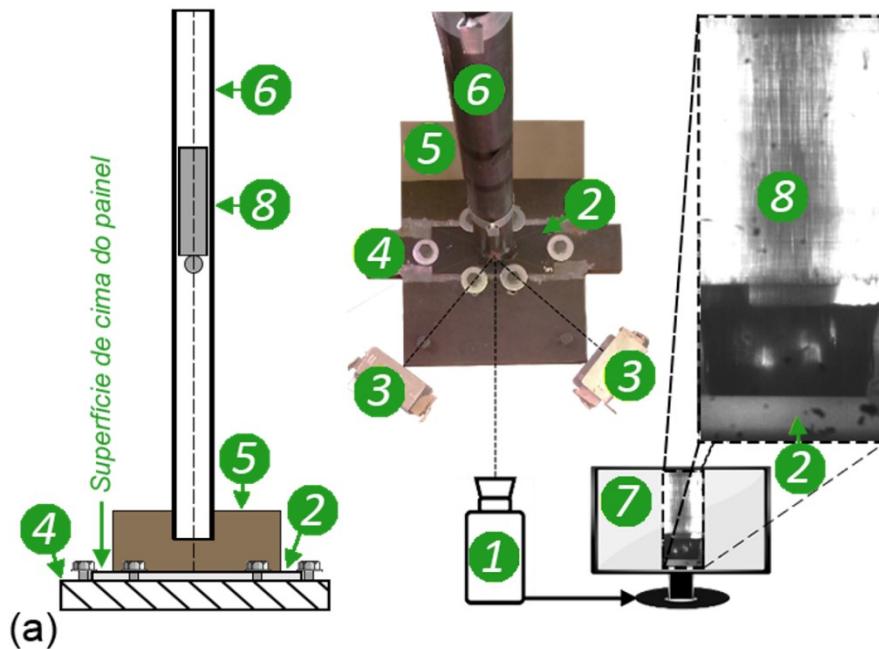
Figura 5.20 – Valores médios de energia (antes e após a falha) obtidos através da integração das curvas médias Deslocamento × Carga da Figura 5.15

5.3.2 Ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo Drop-Weight Test

Este ensaio se baseia na queda livre de um impactador com massa fixa de uma altura previamente determinada, liberando sua energia potencial de impacto em uma face/superfície do corpo de prova através de uma ponta esférica com diâmetro definido. Ursenbach (1995) enquadra o ensaio de impacto do tipo queda livre no grupo de baixa velocidade pois, segundo este autor, a velocidade do impactador em relação ao objeto ensaiado está na faixa entre 1 e 10 m/s. Já os autores Farooq e Myler (2016) consideram um ensaio de impacto de baixa velocidade quando o impactador não penetra o objeto de impacto. Assim, em função das velocidades de impacto utilizados neste trabalho, considera-se o ensaio de impacto utilizado como sendo de baixa velocidade.

Para realizar o ensaio de impacto de baixa velocidade nos PLMC reforçados com pinos e nos painéis laminados de referência (sem pinos) foi utilizado um aparelho manual construído para esta finalidade como descrito na Seção 3.3.1 do Capítulo III. O objetivo de realização deste ensaio foi verificar se a deposição dos pinos nos PLMC teve algum efeito em termos da capacidade de absorção de energia de impacto e nível de deformação resultante. Este ensaio foi realizado com base na norma ASTM D7136 (ASTM, 2015), liberando o impactador com massa constante (2,024 kg) de uma altura de cerca de 1,81 m em relação à superfície de cima do painel laminado (Figura 5.21(a)). A massa do impactador foi composta por uma cabeça de aço duro de forma esférica de

17 mm de diâmetro soldada a um cilindro de aço ao carbono (50 mm de diâmetro e 130 mm de comprimento). É importante destacar que o aparelho construído possui um retentor de duplo impacto que garantiu uma única colisão com um determinado valor de energia. Para poder observar o impacto e quantificar as energias, baseadas nas velocidades de impacto e retorno do impactador, utilizou-se uma câmera comercial CCD de alta velocidade (descrita na Seção 3.3.3 do Capítulo III). Os ensaios de impacto foram gravados com 2000 quadros por segundo com abertura de *shutter* de 498 μ s e uma lente macro de 90 mm f/2.5 e utilizando uma iluminação frontal. A altura de queda livre do impactador (energia de impacto) foi alterada de acordo com a espessura de cada painel para manter uma energia de impacto de 8,5 J por cada milímetro de espessura do painel (aceleração gravitacional considerada como $9,81 \text{ m/s}^2$ como sugerido pela norma ASTM D7136 (ASTM, 2015)). A Figura 5.21(b) mostra as superfícies de cima e de baixo de todos os tipos de painéis após o impacto.



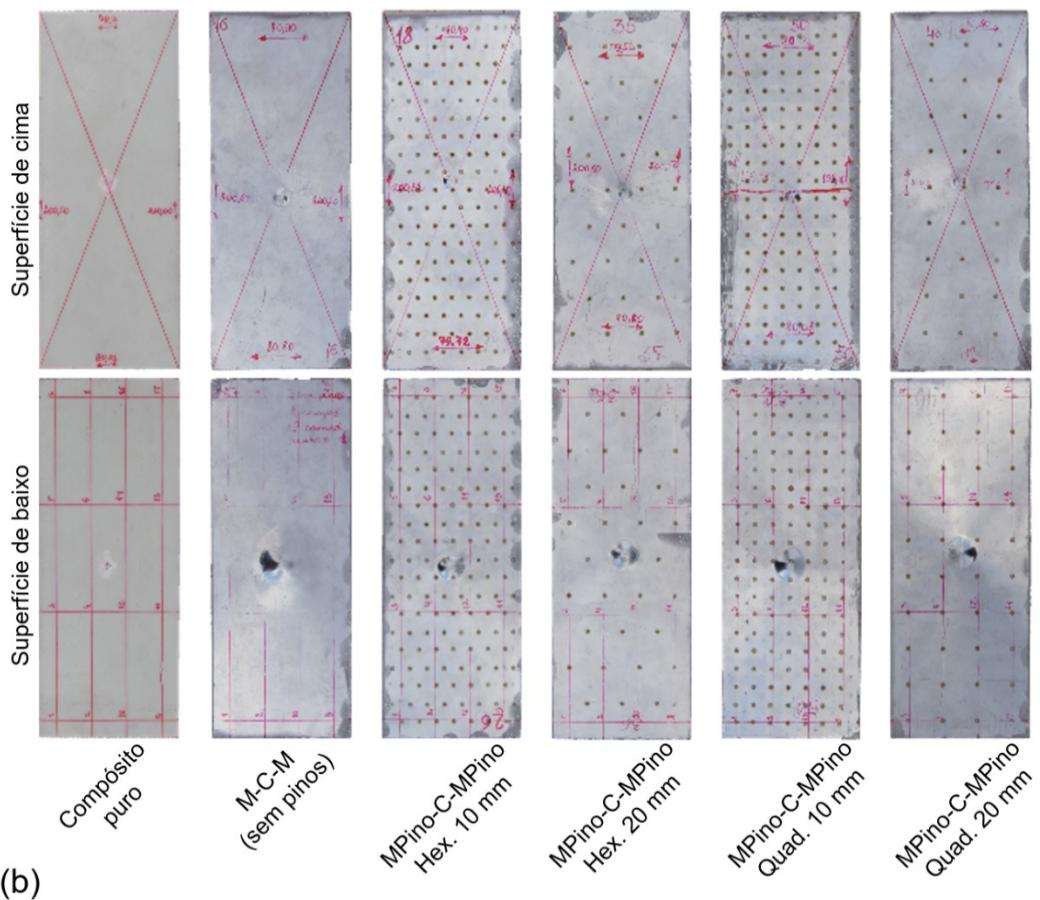


Figura 5.21 – (a) Vista frontal esquemática e vista superior do aparelho do ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test*, onde: 1 - câmera de alta velocidade com a lente; 2 - corpo de prova (painel laminado); 3 - lâmpadas halógenas de 1 kW cada; 4 - base de elevada inercia; 5 - fundo fotográfico posicionado perpendicularmente à base inercial; 6 - tubo-guia do impactador; 7 - monitor da câmera ilustrando uma imagem do impactador; 8 - impactador com cabeça esférica; (b) Aspecto das superfícies de cima e de baixo de todos os tipos de painéis laminados após o impacto da 1^a fase de avaliação

As imagens da câmera de alta velocidade foram analisadas para determinar as velocidades de impacto e retorno imediatamente antes e após o impacto tomando como base os deslocamentos do impactador (superfície esférica da cabeça inferior) quadro a quadro e respectivos tempos entre os quadros (5×10^{-4} s), como visto na Figura 5.22(a). As velocidades no momento de impacto e retorno do impactador foram calculadas usando curvas de regressão com suas respectivas equações de 2º grau. As velocidades médias de impacto variaram de 5,69 a 6,11 m/s e as velocidades de retorno de 2,69 a 4,30 m/s, como apresenta a Figura 5.22(b), provando que o ensaio realizado foi do tipo de baixa velocidade (segundo a classificação de Ursenbach (1995)) ainda sem penetração total dos painéis pelo impactador (segundo a classificação de Farooq e Myler (2016)).

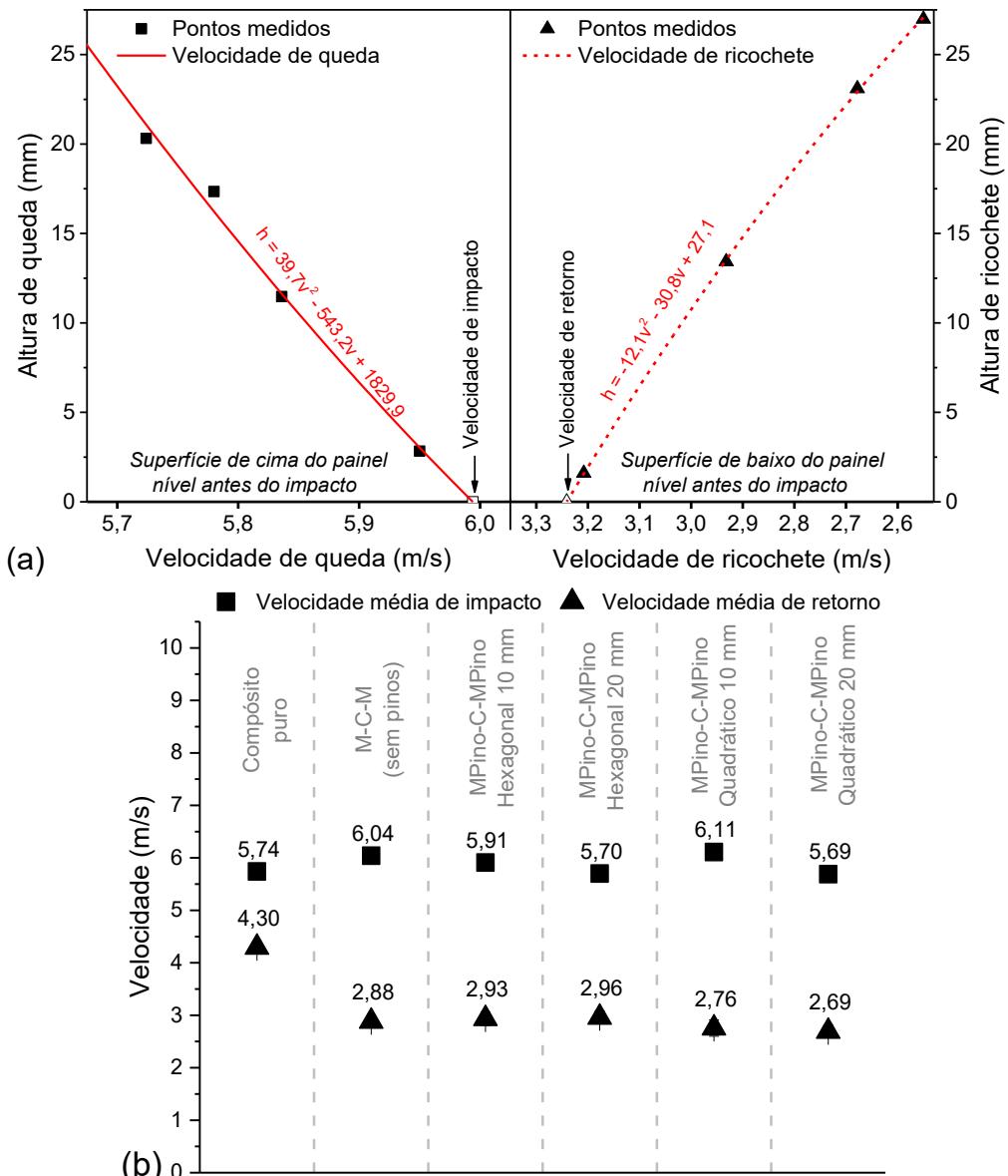


Figura 5.22 – (a) Extrapolação das velocidades de impacto e retorno do impactador no exato momento de impacto e retorno (exemplo do painel do tipo MPino-C-MPino Hexagonal 10); (b) Velocidades médias de impacto e retorno de cada tipo de painel (h = altura e v = velocidade)

Por sua vez, as velocidades calculadas foram usadas para obter as energias de impacto e retorno. A energia de impacto foi considerada como sendo a energia cinética do impactador com a altura de queda tendendo a zero (nível de superfície de cima do painel antes do impacto). A energia de retorno foi considerada como sendo a energia cinética da massa de elevação no início do rebote após o impacto (altura de rebote tendendo a zero - nível de superfície de cima do painel antes do impacto). A absorção de energia durante o impacto foi considerada como a diferença relativa das energias cinéticas antes e depois do impacto. As quantificações de energia de impacto foram representadas em três formas: energia, energia específica (considerando a densidade

dos painéis laminados) e energia por unidade de espessura do painel, conforme apresentado na Figura 5.23. Como se observa na Figura 5.23(a), a energia de impacto foi sempre em torno de 35 J, sendo flutuação devido a pequenas diferenças na espessura dos painéis (Tabela 5.1), que exigiram energias potenciais (alturas de queda) ligeiramente diferentes, como indicado anteriormente. As energias de retorno e as absorções de energia foram semelhantes para todos os PLMC ensaiados. Em geral os PLMC absorveram em torno de 80 % da energia de impacto, enquanto que os painéis de Compósito puro absorveram apenas 44 %.

Considerando que a absorção de energia durante o impacto pode ser tomada como medida para avaliar o desempenho do painel, os resultados indicam que o painel do tipo Compósito puro tem, como esperado, intenso comportamento elástico, enquanto que os PLMC absorvem mais energia durante o impacto devido à deformação plástica das suas folhas metálicas. No entanto, considerando a densidade de cada painel laminado (Tabela 5.1), conforme mostrado na Figura 5.23(b), todos os painéis, incluindo o painel de compósito puro, absorveram níveis de energia específica semelhantes durante o impacto (em cerca de 75 %). Assim, o fato de adicionar peso, como consequência de deposição dos ancoradores (pinos), não reduz a capacidade de absorção de energia de impacto. Por outro lado, se a espessura de cada painel (Tabela 5.1) for levada em consideração, conforme apresentado na Figura 5.23(c), o painel do tipo Compósito puro teria de ser quase duas vezes mais espesso para absorver a mesma quantidade de energia de impacto em comparação com todos os PLMC, incluindo os painéis com pinos. Em geral, a presença de pinos como ancoragens dentro dos PLMC não parece ter nenhum efeito significativo sobre a capacidade de absorção de energia de impacto dos PLMC. Portanto, os pinos, pelo menos para as condições de impacto aplicadas, não tornaram os PLMC mais frágeis ou sensíveis ao impacto. Além disso, a mudança do padrão de deposição e espaçamento dos pinos, pelo menos para as demais condições, não mostrou nenhum efeito sobre a capacidade dos painéis para absorver a energia de impacto.

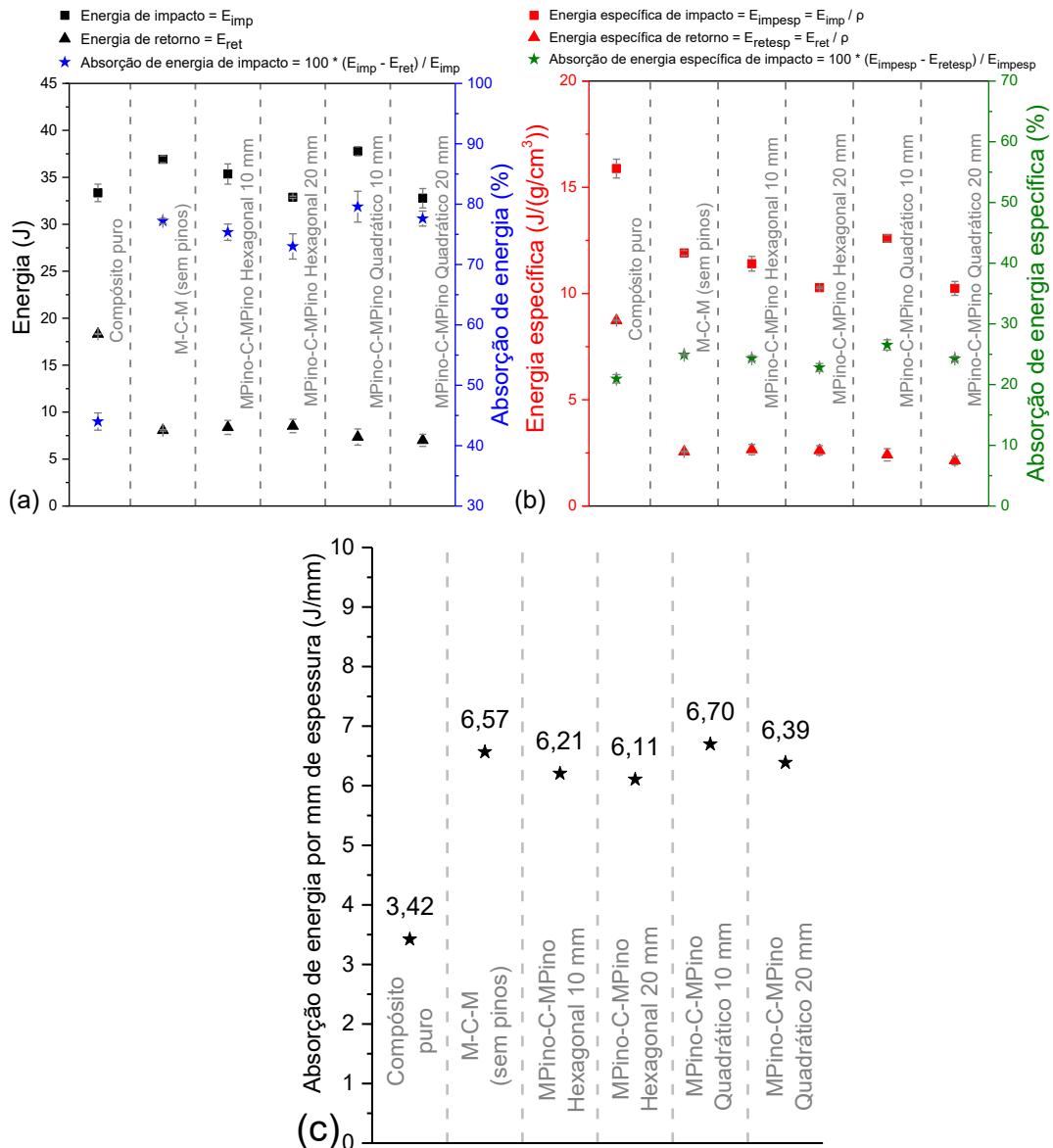


Figura 5.23 – (a) Energias médias de impacto e retorno com suas consequentes absorvações de energia durante o ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test*; (b) Energias específicas de impacto e retorno e consequentes absorvações de energia específicas durante o ensaio de impacto; (c) Energia média absorvida por unidade de espessura do painel durante o ensaio de impacto (ρ = densidade do painel)

5.3.3 Quantificação dos danos nos painéis após o ensaio de impacto

a) Perfil de profundidade do dano

A extensão do dano, ou seja, o perfil de profundidade do dano após o impacto (deformação permanente), foi encontrada por meio da medição do deslocamento vertical (em eixo Z da Figura 5.24) de linhas centrais transversal e longitudinal marcadas em todos os painéis antes do ensaio de impacto. As bordas dos painéis, tanto em comprimento como em largura, foram adotadas como referências, considerando que as

mesmas não têm deformação após o impacto. Uma máquina comercial de medição de coordenadas manual (Seção 3.3.4 do Capítulo III), com resolução de 1 μm , foi usada para realizar as medidas. O perfil de deformação foi determinado pela varredura das superfícies de cima e de baixo dos painéis, como exemplifica a Figura 5.24. Para obter mais detalhes da região de impacto, a malha de medição foi reduzida para 5 mm perto da área de dano, sendo de 10 mm no restante da superfície dos painéis.

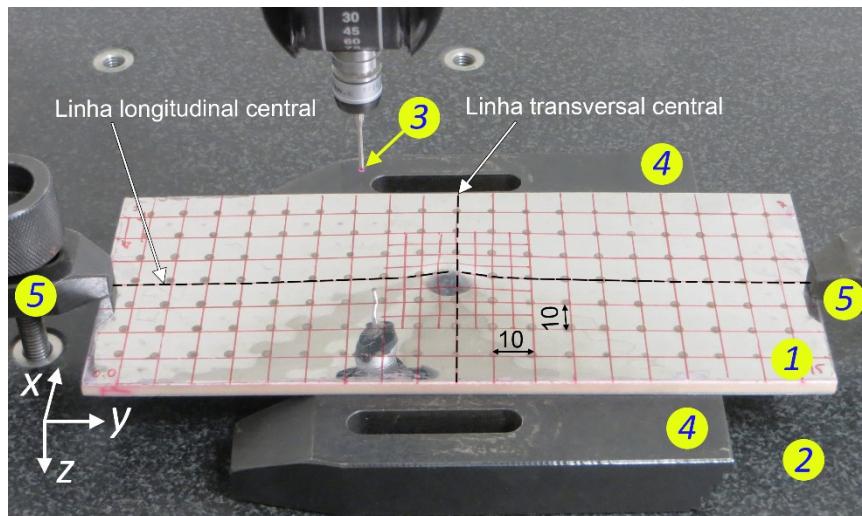


Figura 5.24 – Configuração geral para medição do perfil de profundidade de dano após impacto (superfície do painel de baixo, como exemplo), onde: 1 - painel após impacto; 2 - mesa de trabalho; 3 - apalpador digital 3D (cabeça tocante); 4 - suporte; 5 - fixador

Os perfis médios de profundidade de dano de cada painel são mostrados na Figura 5.25(a). Como os perfis eram longitudinalmente e transversalmente simétricos em relação ao ponto mais elevado, foram apresentadas apenas metade do comprimento e metade da largura dos painéis. Em geral, os perfis de superfície medidos em cada PLMC com pinos foram similares, longitudinalmente e transversalmente, aos perfis dos PLMC convencionais (sem pinos). Portanto, o aumento da densidade dos pinos tende a aumentar a deformação permanente dos painéis após o impacto, como mostrado de forma complementar na Figura 5.25(b). No caso do painel do tipo Compósito puro houve uma deformação menor, mas com um perfil concentrado no centro (típico de compósitos), por causa da delaminação extensiva em camadas de baixo quando impactadas.

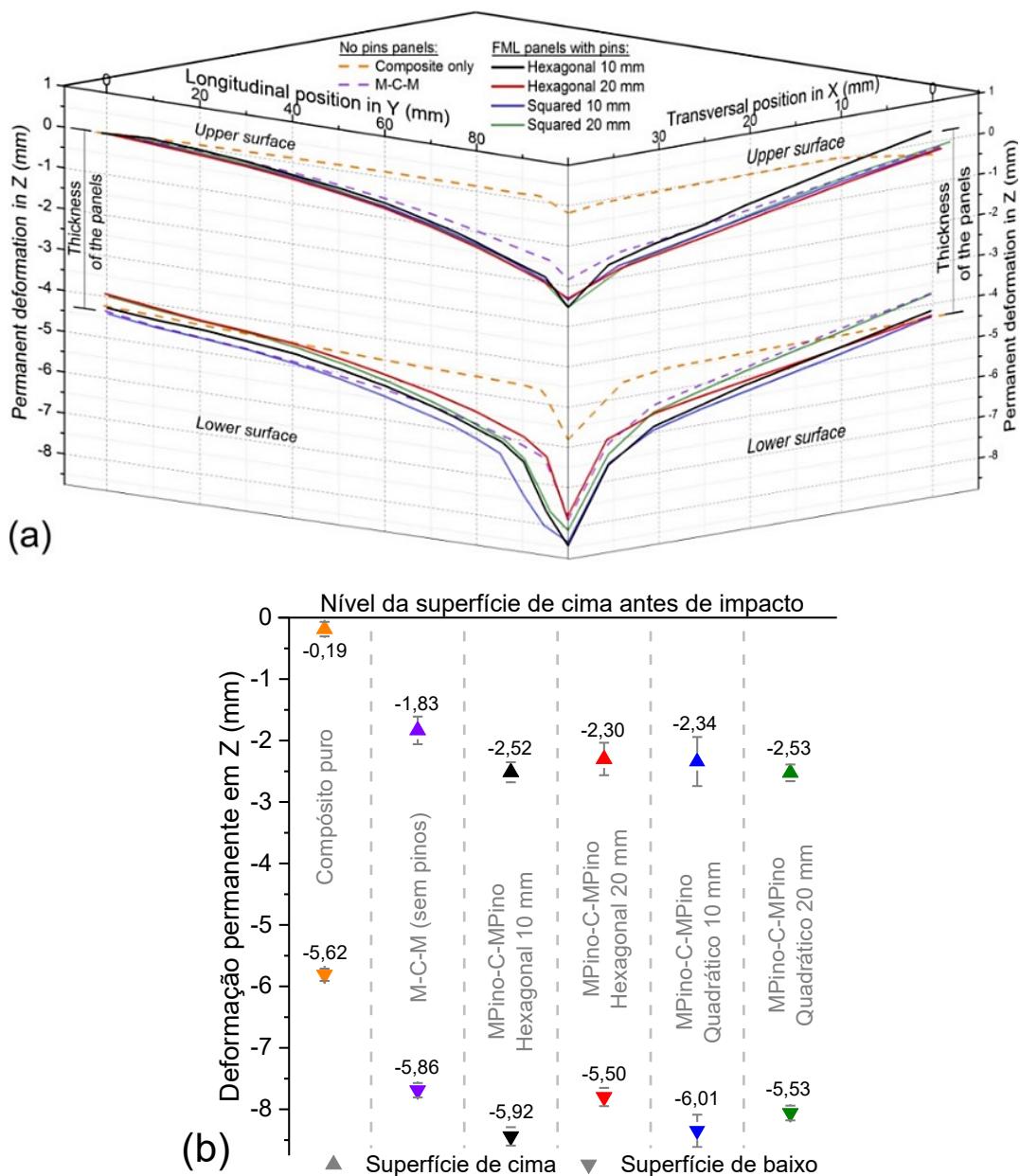


Figura 5.25 – (a) Perfis de profundidade de dano produzidos em cada painel (média de 2 corpos de prova); (b) Deformação permanente máxima média em cada tipo de painel

Estes resultados podem ser explicados abordando duas causas. A primeira diz respeito ao número de lâminas de pré-impregnado utilizadas na camada de compósito, ou seja, está relacionada à proporção de compósito em cada tipo de painel. A segunda causa tem a ver com a presença dos pinos como ancoradores. Observa-se também que as superfícies de cima e de baixo exibiram diferentes perfis típicos de deformação. Em todos os tipos de painéis, o perfil de profundidade foi mais concentrado na superfície de cima do que na de baixo. A ponta esférica do impactador foi responsável por replicar o contorno esférico na superfície de cima. A extensão de dano final na superfície de baixo, em contraste, ficou limitada pelas bordas do orifício da base de elevada inércia do

aparelho de ensaio de impacto. Também é possível observar que a mudança no perfil de profundidade de dano é mais gradual ao longo da linha longitudinal central (bordas do orifício de 125 mm de comprimento) e mais abrupta ao longo da linha transversal central (bordas do orifício de 75 mm de comprimento). Lembrando que os painéis de Compósito puro consistem em 22 camadas de pré-impregnados, este tipo de painel se comportou de forma mais elástica, como resultado absorvendo menos energia durante o impacto, conforme mostrado na Figura 5.23. Como os PLMC convencionais (M-C-M (sem pinos)) e PLMC com pinos tinham, respectivamente, 19 (13,6 % menos) e 16 (27,3 % menos) lâminas de pré-impregnados, eles se comportaram menos elasticamente, exibindo uma deformação mais permanente e consequentemente absorvendo mais energia durante o impacto (Figura 5.23).

No que se refere ao papel dos pinos como ancoradores, foco deste trabalho, os mesmos estão presentes na camada de compósito, assim, aderindo este material às folhas metálicas durante o impacto - os pinos transferem a deformação permanente (plástica) das folhas metálicas para a camada de compósito e, assim, sua respectiva capacidade de absorção da energia de impacto. Este efeito foi ligeiramente maior com aumento do número de pinos (espaçamento de 10×20 mm), o que parece fazer sentido, uma vez que uma maior densidade de pinos (espaçamento menor) aumenta o número de ancoradores que atuam dentro e ao redor da área de impacto/dano. Uma das maneiras de provar esta hipótese seria fabricar painéis com espaçamento de 5 mm (ainda com maior número de pinos) para ambos os padrões de deposição e ensaiá-los. Isso será abordado na 2^a fase de avaliação (Capítulo VI).

Foi observada uma tendência correspondente nos resultados de energia de impacto (Figura 5.23). Ou seja, os painéis com maior número de pinos absorveram uma quantidade de energia ligeiramente maior. Corroborando os resultados de energia de impacto (Figura 5.23) com a mudança no padrão de deposição dos pinos, pelo menos para as demais condições, não foi possível observar o efeito deste fator sobre os perfis de profundidade de dano.

b) Área de dano

Para quantificar a área de dano causada após o ensaio de impacto nos painéis laminados utilizou-se termografia infravermelha (dados da câmera na Seção 3.3.5 do Capítulo III) através da técnica de transmissão transitória de pulso ativo (*active pulsed transient transmission technique*). É importante destacar que todos os painéis foram inspecionados antes do impacto para a verificação de integridade na condição como

fabricado. Várias investigações mostraram a eficiência da termografia infravermelha para inspeção de estruturas de compósito, incluindo detecção de falhas de delaminação após o impacto (Guillaumat et al. (2004), Meola et al. (2010), Lizaranzu et al. (2015), Katunin et al. (2015) e Meola et al. (2017)).

A Figura 5.26 apresenta a montagem geral usada para inspecionar os painéis e estimar o tamanho dos danos. Foram capturadas imagens infravermelhas com resolução de 320×240 pixels a uma taxa de aquisição de 60 quadros por segundo. Antes de executar a inspeção termográfica infravermelha, todos os painéis foram pintados em preto fosco por meio de uma tinta-spray para evitar problemas de reflexo de luz causado pelas folhas de metal (aço AISI 430). Durante a inspeção, a câmera foi colocada perpendicular e a uma distância de 23 cm em relação à superfície de cima do painel. O centro dos painéis (região de impacto) foi sempre posicionado alinhado com a lente da câmera. O aquecimento (pulso ativo térmico) foi feito por meio de uma luz composta por duas lâmpadas halógenas (com 1 kW cada) colocadas no lado oposto da câmera térmica (atrás do painel) e a uma distância de 25 cm da superfície de baixo do painel. A temperatura da superfície de cima do painel inspecionado foi utilizada como critério de parada do aquecimento (desligamento das lâmpadas). Esta temperatura de referência foi de 75 °C e foi detectada através de um termopar de contato do tipo K. Para análises dos termogramas, utilizou-se o software comercial da câmera (*Thermocam Research 2.9*). As indicações de danos neste caso, geralmente associadas à delaminação em camadas de compósito e/ou descolamento entre as folhas metálicas e o compósito, aparecem como regiões de contraste frio nas imagens. Como a delaminação e/ou o descolamento correspondem a uma ruptura na continuidade do material (separação física), isso reduz significativamente a condutividade térmica local e, portanto, as temperaturas daquela região. De acordo com Guillaumat et al. (2004), estas falhas atuam como resistência térmica (devido à penetração do ar na região) à difusão de calor em série com a resistência global da amostra (painel).

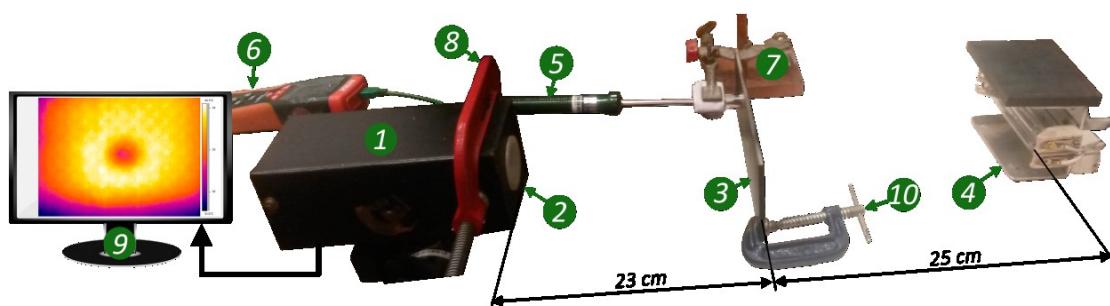


Figura 5.26 – Montagem da câmera termográfica utilizada para estimar o tamanho dos danos nos painéis antes e após o impacto, onde: 1 e 2 - câmera térmica dentro de caixa de proteção e com lente de germânio, respectivamente; 3 - painel; 4 - lâmpadas

halógenas (fonte de calor) com potência de 2 kW; 5 - termopar do tipo K; 6 - monitor de temperatura; 7 - suporte do termopar; 8 - grampo de apoio do termopar na câmera; 9 - tela da câmera termográfica mostrando PLMC do tipo MPino-C-MPino Quadrático 10 mm com dano; 10 - grampo de apoio do painel

O procedimento adotado para medição/estimativa do tamanho do dano através da termografia infravermelha não é padronizado e foi aplicado aqui de forma exploratória. O início da captura dos termogramas foi feito ao mesmo tempo em que início do aquecimento para todos os painéis (lâmpadas halógenas ligadas). O tempo para atingir a temperatura de referência (aqui assumido como 75 °C) e para interromper o aquecimento (lâmpadas halógenas desligadas) foi cerca de 180 s. Como base para a análise, todos os dados foram amostrados em 9 instantes de tempo fixos contados a partir do início do aquecimento. As imagens correspondentes relacionadas a estes tempos foram utilizadas para avaliação qualitativa, enquanto os perfis de temperatura associados foram utilizados para estimar quantitativamente os danos. Os perfis de temperatura foram traçados ao longo de duas linhas ortogonais que cruzam a indicação central da área de dano nos termogramas. Com base nesses gráficos de temperatura, a área de dano em cada caso foi estimada pela Eq. (5.1) para todos os tempos de amostragem. O comprimento em cada linha ortogonal com queda de temperatura (indicação de dano) foi medido através de um software gratuito de análise de imagem. A Figura 5.27 mostra um exemplo de análise de dano comparando imagens térmicas e perfis de temperatura de um painel antes e depois do impacto no mesmo instante de tempo. Como visto, não há indicação de queda de temperatura na região central do painel antes do impacto e, como consequência, o perfil de temperatura é praticamente inalterado ao longo das linhas centrais horizontal e vertical. O mesmo foi observado para todos os painéis inspecionados antes do impacto, o que indica integridade geral na condição como fabricada (adesão de todas as camadas de compósito e folhas de metal e inexistência de possíveis descontinuidades). Como esperado, os painéis de Compósito puro conduziram menos calor e não se mostraram tão quentes como os PLMC por causa das folhas e pinos metálicos. Os compósitos de matriz polimérica são geralmente conhecidos por sua baixa condutividade térmica. Por outro lado, nas imagens após o impacto, há contraste evidente de temperaturas com uma área centralizada menos aquecida nos painéis. Esta área é uma indicação de dano e sua extensão, como mostrado na Figura 5.27, é baseada na queda dos perfis de temperatura. Corroborando os resultados das análises de área de dano em cada tipo de painel laminado e a sua ligação com a absorção de energia de impacto durante o ensaio, as imagens térmicas revelam danos visualmente maiores para os PLMC com

pinos, intermediários para os PLMC convencionais (sem pinos) e menor para os painéis do tipo Compósito puro.

$$D_{area} = \pi \times \frac{L_H}{2} \times \frac{L_V}{2} \quad (5.1)$$

Onde: D_{area} - área de dano estimada (mm^2);
 L_H - extensão horizontal de dano (mm);
 L_V - extensão vertical de dano (mm).

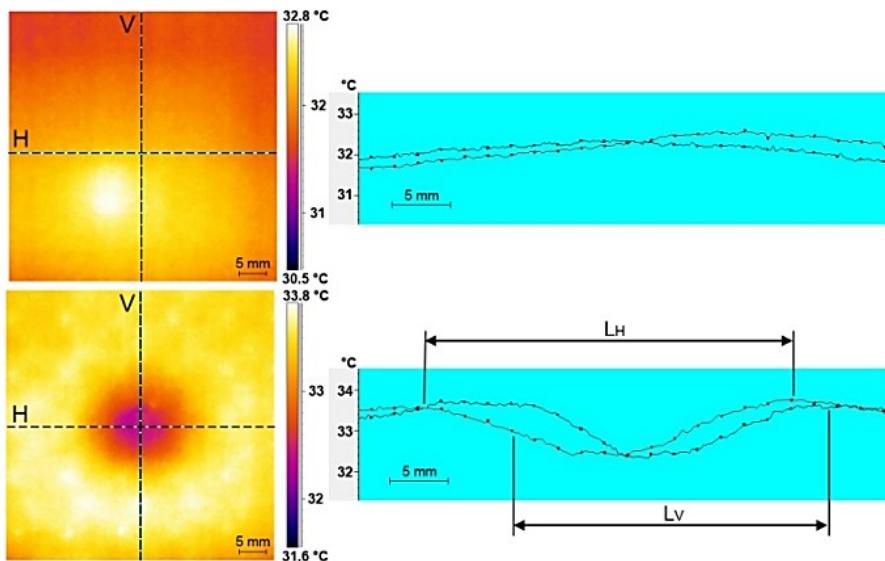


Figura 5.27 – Exemplo de análise de dano comparando imagens térmicas e perfis de temperatura de um painel antes e depois do impacto no mesmo instante de tempo (painel do tipo MPino-C-MPino Quadrático 10 mm (antes de impacto acima e após o impacto abaixo; H = linha horizontal central; V = linha central vertical; L_H - comprimento de perfil com queda de temperatura projetada na linha H (dano na horizontal); L_V - comprimento de perfil com queda de temperatura projetada na linha V (dano na vertical))

A Figura 5.28(a) mostra as áreas de dano estimadas médias em diferentes tempos de amostragem após o início do aquecimento. Percebe-se que as áreas danificadas crescem até um momento e depois diminuem à medida que o tempo de aquecimento aumenta. Primeiro, com o fluxo de calor ocorrendo e as temperaturas aumentando no painel, os perfis de temperatura e as indicações de dano equivalentes tornam-se evidentes e atingem os seus valores máximos. Depois disso, o fluxo de calor contínuo aumenta as temperaturas nas regiões danificadas (contrastos de temperatura) e as indicações tendem a ser reduzidas à medida que os painéis são saturados de calor. Portanto, as indicações máximas médias em cada caso foram tomadas como as áreas de dano. A Figura 5.28(b) ilustra representações elípticas (com base na Eq. (5.1)) desses valores máximos, onde é possível perceber que o comprimento do dano na direção do eixo Y (comprimento do painel) é maior por causa das bordas do orifício da

base de elevada inércia do aparelho de ensaio de impacto serem maiores nessa direção.

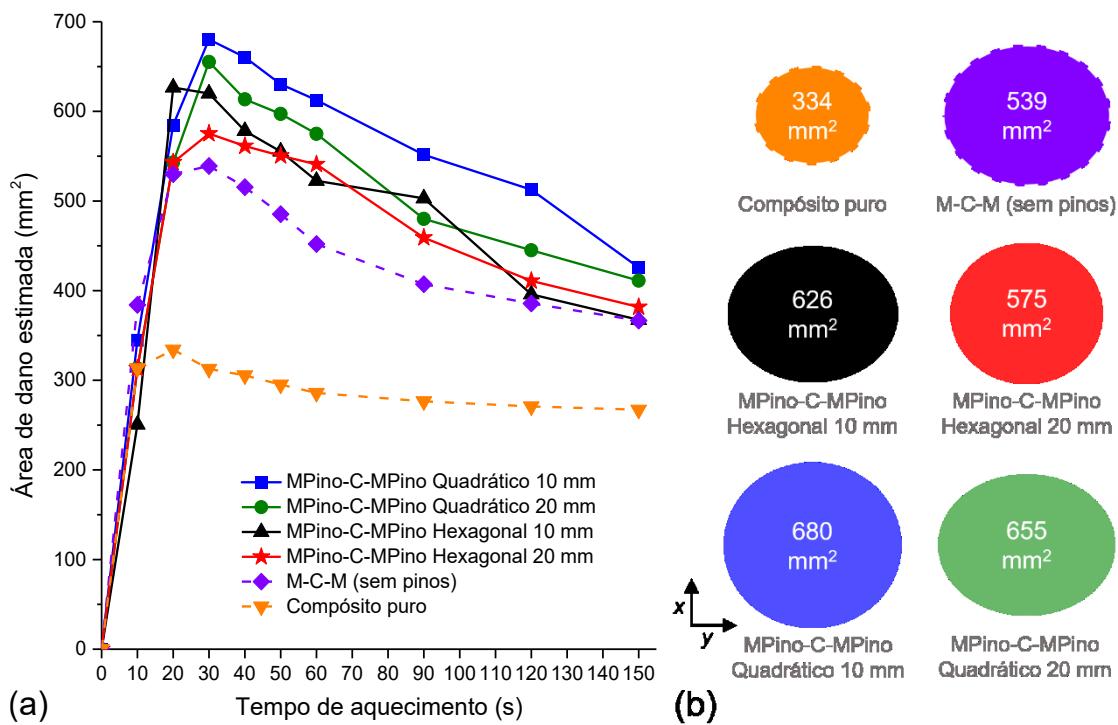


Figura 5.28 – Áreas médias de dano após o ensaio de impacto nos painéis laminados obtidas através de termografia infravermelha, onde: (a) Áreas de dano em diferentes instantes de tempo após o início do aquecimento; (b) Representação proporcional de áreas de dano máximas

Como visto, os PLMC com pinos como ancoradores, especialmente o painel do tipo MPino-C-MPino Quadrático 10 mm, tiveram maiores áreas de dano, o que parece estar ligado à sua capacidade de absorver a energia de impacto e transformá-la em maior deformação permanente. É possível notar que a área de dano dos PLMC com o padrão de deposição do tipo Hexagonal, independentemente da distância de espaçamento entre os pinos, foi menor. O painel do tipo Compósito puro apresentou danos menores, os quais devem estar relacionados à sua menor capacidade de absorver energia de impacto e de deformar permanentemente (elevada elasticidade) em comparação com os PLMC. O PLMC convencional (M-C-M (sem pinos)) exibiu um comportamento intermediário em termos da absorção de energia de impacto e seu perfil de deformação. Além da deformação permanente, como discutido anteriormente, a propagação de danos nos painéis com pinos e o descolamento das folhas metálicas do compósito parecem estar ligados a outros mecanismos para a absorção de energia de impacto. Houve uma boa repetitividade dos resultados da área de dano nos painéis laminados, com desvios padrão máximos e mínimos de 10,57 e 5,02 mm², respectivamente, e uma razoável ligação lógica com os resultados da absorção de

energia de impacto e perfil de deformação. Destaca-se que o erro relacionado à radiação térmica emitida pelo ambiente pode ter trazido incertezas para a medição do dano através da termografia infravermelha.

5.3.4 Ensaio de Compressão e Flambagem após o ensaio de impacto – tolerância ao dano

De acordo com Ishikawa et al. (1995) e De Freitas e Reis (1997), a resistência dos painéis laminados contra tensões compressivas no plano é fortemente prejudicada pela presença de danos do tipo delaminação, que resultam em reduções expressivas na resistência de flambagem dos componentes. Dessa forma, todos os tipos de painéis foram submetidos aos ensaios de compressão e de flambagem após o ensaio de impacto, como uma parte da investigação inicial sobre a influência dos pinos na tolerância ao dano. Os ensaios de compressão e flambagem foram feitos somente uma vez em cada tipo de painel (sem repetição) após impacto. Para isso, foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos (mais detalhes descritos na Seção 3.3.2 do Capítulo III). As partes superiores e inferiores dos suportes para estes ensaios foram projetadas e construídas para permitir o alinhamento e fixação adequados durante a execução dos mesmos, como mostrado na Figura 5.29(a) e (b). Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D7137 (ASTM, 2017), mantendo a velocidade de deslocamento do cutelo constante e igual a 1,25 mm/min.

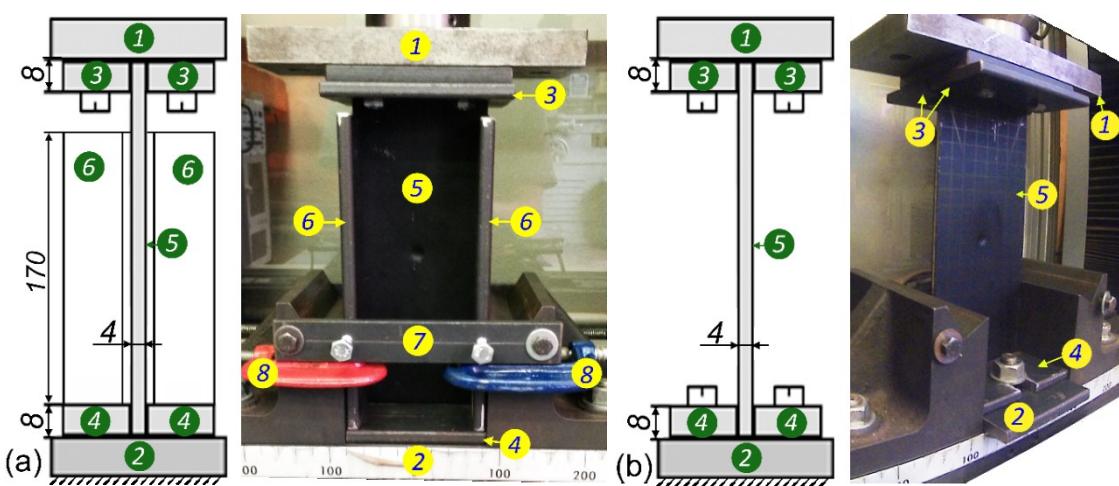


Figura 5.29 – (a) Vista lateral esquemática da configuração do ensaio de compressão e imagem do painel posicionado na máquina universal de ensaios mecânicos; (b) Vista lateral esquemática da configuração do ensaio de flambagem e imagem do painel posicionado na máquina de ensaio; onde: 1 - cutelo móvel; 2 - base fixa; 3 - fixadores (duas partes) do painel na parte superior; 4 - fixadores (duas partes) do painel na parte inferior; 5 - painel; 6 - placas laterais de fixação do suporte; 7 - barra de apoio auxiliar; 8 - grampos-fixadores auxiliares (dimensões em mm)

a) *Ensaio de compressão após o impacto*

A Figura 5.30(a) mostra o gráfico de Deslocamento Axial × Carga Compressiva como resultado do ensaio de compressão de todos os tipos de painéis após o impacto. O uso de folhas metálicas juntamente com o compósito aumenta o módulo compressivo dos painéis, comparando com o painel de Compósito puro, mas esse efeito não é tão claro com a adição dos pinos. Os valores resultantes da carga compressiva máxima e dos deslocamentos axiais correspondentes são mostrados na Figura 5.30(b). Como visto, o painel de compósito puro suportou uma das menores cargas de compressão máximas, uma indicação da sua típica baixa tolerância ao dano. O PLMC convencional (M-C-M (sem pinos)) suportou uma carga compressiva máxima similar, apesar do deslocamento axial correspondente ligeiramente inferior. Quanto aos PLMC com pinos, todos os tipos apresentaram um comportamento menos catastrófico com cargas suportadas mais elevadas ainda com maiores deslocamentos axiais atingidos no momento de falha (rompimento). Além disso, os painéis do tipo MPino-C-MPino Quadrático 20 mm e especialmente MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm exibiram valores máximos de carga compressiva significativamente maiores em comparação com os demais tipos de painéis laminados, ainda com deslocamentos axiais ligeiramente maiores. As razões por de trás desse resultado serão investigadas em futuros testes complementares fora do escopo deste trabalho. Este comportamento menos catastrófico dos painéis ancorados com pinos merece uma investigação mais aprofundada utilizando testes mais adequados para avaliar a resistência de delaminação, como, por exemplo, o ensaio de cisalhamento losipescu.

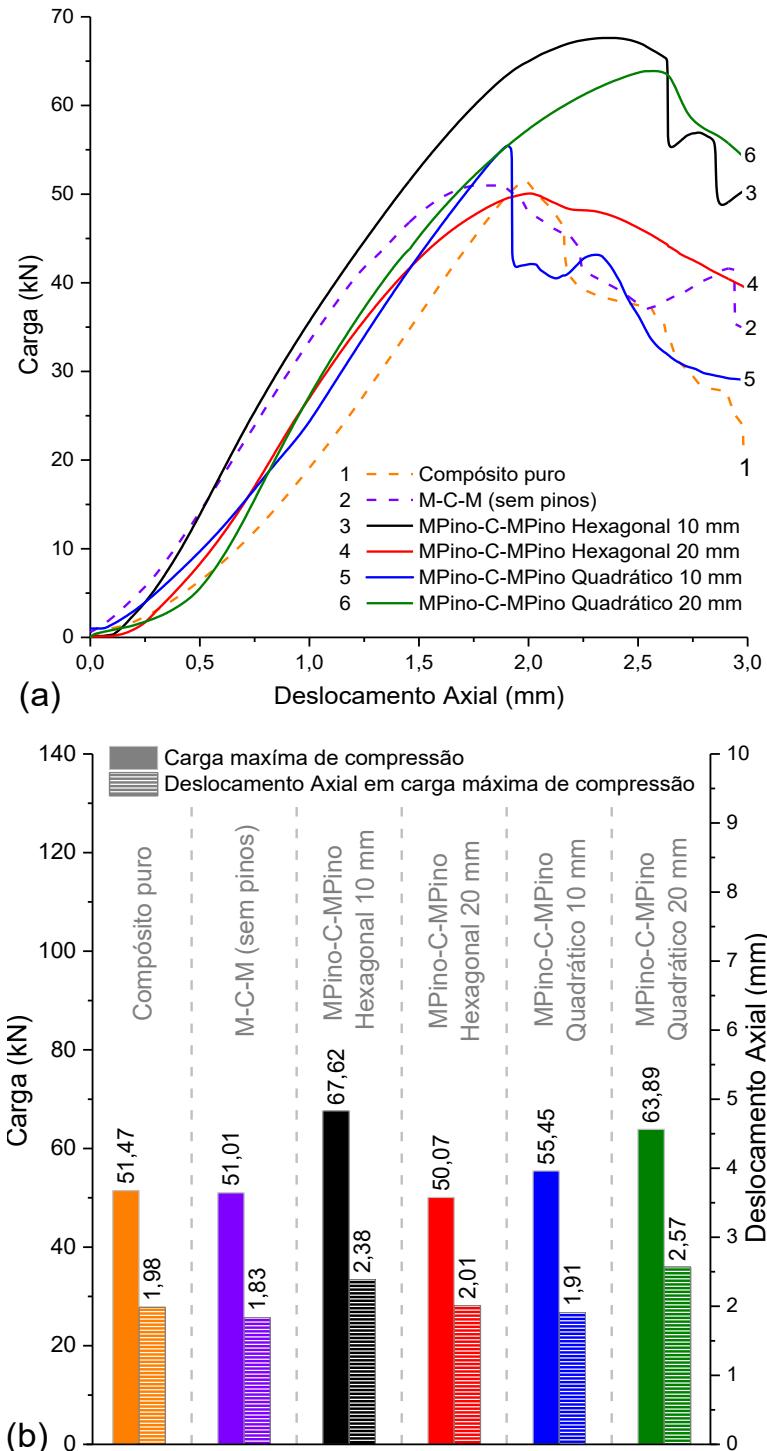


Figura 5.30 – (a) Deslocamento Axial x Carga do ensaio de compressão para todos os tipos de painéis laminados após o impacto; (b) Carga máxima de compressão e seus correspondentes deslocamentos axiais do ensaio de compressão para todos os tipos de painéis laminados após o impacto

b) Ensaio de flambagem após o impacto

Para se ter uma visão geral de como o ensaio de impacto poderia influenciar no desempenho dos painéis com pinos, ou seja, em termos de tolerância ao dano,

primeiramente, dois painéis extras, um com e outro sem ser impactado do tipo MPino-C-MPino Quadrático 20 mm, foram submetidos ao ensaio de flambagem. A Figura 5.31(a) apresenta o gráfico de Deslocamento Axial × Carga e o tempo do ensaio de cada painel. Percebe-se que os comportamentos são no início, durante a fase de compressão (1), muito semelhante, sem diferença aparente no módulo de compressão, mas o painel danificado teve uma carga compressiva máxima de 1 kN menor e um deslocamento axial também menor, com tempo correspondente mais curto. Isso indica que o dano causado não alterou o painel como um todo, mas uma carga suficientemente alta fez com que o painel se rompesse. Depois de atingir as suas cargas máximas, os painéis com e sem danos começaram a entrar na fase de flambagem (2), apresentando comportamentos semelhantes (curvas hiperbólicas decrescentes). No entanto, o painel danificado apresentou as cargas mais baixas nas fases de flambagem e chegando na fase de rompimento/falha (3) antes (comportamento mais catastrófico), enquanto o painel sem dano ainda estava na fase de flambagem. Portanto, o impacto aplicado foi suficiente para alterar significativamente a resposta do painel ao ensaio de flambagem, com uma redução de desempenho em todas as suas fases de compressão (1), flambagem (2) e falha/rompimento (3). A Figura 5.31(b) mostra imagens frontais dos painéis com e sem danos de impacto nos momentos-chave, conforme indicado na Figura 5.31(a). O painel com dano teve sua deflexão lateral deslocando-se da sua superfície de cima (lado de impacto) em direção à sua superfície de baixo durante a flambagem. Como visto, o painel danificado pelo impacto apresentou anteriormente uma deformação da folha metálica de cima a qual atravessa transversalmente sua região central. Para o painel sem dano, esta deformação provavelmente ocorre quando a flexão conduz a uma diferença significativa de deformação entre a folha metálica e a camada de compósito, o que leva ao descolamento (falha) dessas partes. Para o painel com dano, este descolamento (falha) é antecipado devido à destruição existente no local, causada previamente pelo impacto.

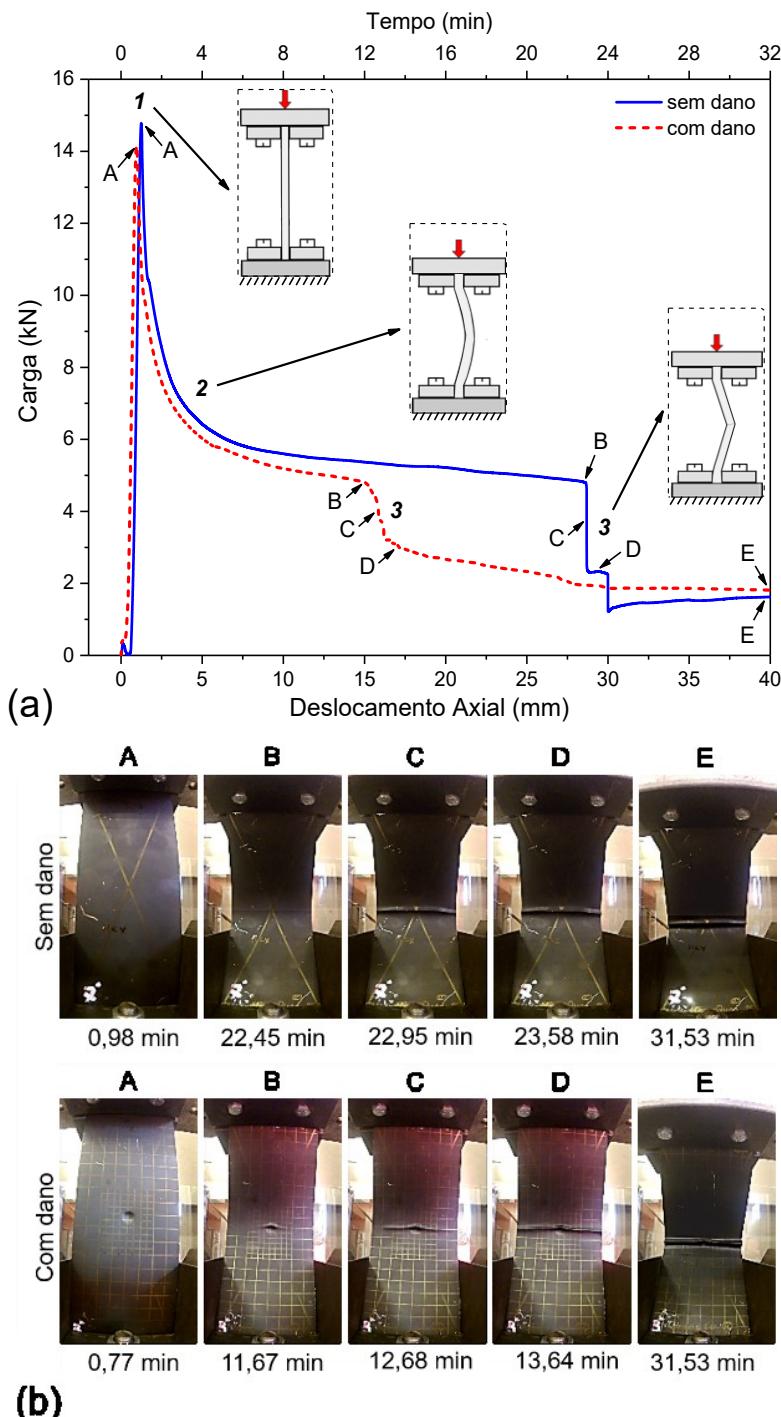


Figura 5.31 – (a) Deslocamento Axial x Carga do ensaio de flambagem dos painéis do tipo MPino-C-MPino Quadrático 20 mm com e sem dano de impacto; (b) Imagens frontais de painéis com e sem dano de impacto em momentos-chave (indicado em (a)) durante o ensaio de flambagem, onde: 1 - carga compressiva máxima; 2 - flambagem; 3 - rompimento/falha

A Figura 5.32(a) mostra o panorama geral da evolução do Deslocamento Axial x Carga nos ensaios de flambagem de todos os tipos de painéis após o dano por impacto. As partes (b), (c) e (d) da Figura 5.32 apresentam detalhadamente as fases de compressão, flambagem e falha, respectivamente. Os valores resultantes de carga

compressiva máxima, carga sob falha e deslocamentos axial no momento da falha são mostrados na Figura 5.33(a). O deslocamento axial da falha é mostrado como alternativa correlacionada com a deflexão lateral dos painéis ensaiados. Como visto, o painel do tipo Compósito puro suportou uma carga máxima menor, assim, mais uma vez provando a sua esperada baixa tolerância ao dano. O PLMC convencional (M-C-M (sem pinos)), como esperado, tolerou maior carga compressiva. Os PLMC com pinos tiveram um desempenho próximo entre si, exceto o painel MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm, que foi capaz de suportar uma carga de compressão máxima notavelmente maior. Todos os painéis com pinos alcançaram cargas de compressão máximas em torno de 1,2 mm de deslocamento axial e os demais painéis em torno de 1,5 mm. Conforme observado na Figura 5.32(c), todos os painéis comportaram-se de forma semelhante na fase de flambagem, com um comportamento da Deslocamento Axial × Carga como apresentado na Figura 5.31(a). O painel convencional (M-C-M (sem pinos)) suportou as cargas mais elevadas durante a sua deflexão, seguido pelos painéis com pinos depositados em padrões com menores espaçamentos (painéis MPino-C-MPino Quadrático 10 mm e MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm nesta ordem). Os painéis com maiores espaçamentos entre os pinos (independentemente do padrão de deposição) suportaram cargas mais baixas durante a flambagem, entretanto muito próximas umas das outras, especialmente nos maiores valores de deslocamento axial.

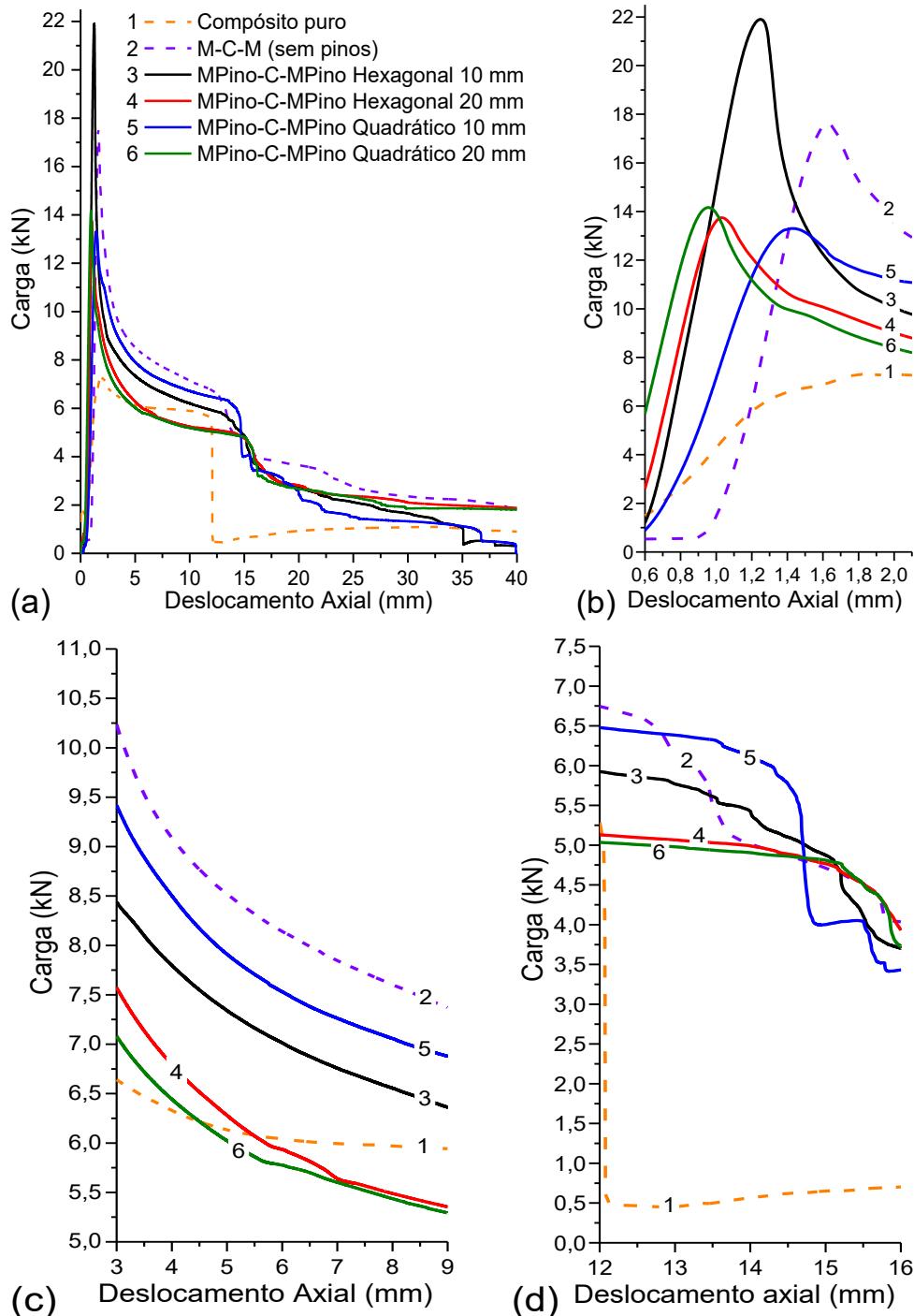


Figura 5.32 – Deslocamento Axial × Carga no ensaio de flambagem em todos os tipos de painéis laminados, onde: (a) Panorama geral; (b) Detalhe da fase de compressão; (c) Detalhe da fase de flambagem; (d) Detalhe da fase de falha

Como apresenta a Figura 5.33(a), os PLMC com pinos, apesar de atingirem menores cargas máximas, suportaram maiores deslocamentos axiais antes de romper. Mesmo tendo áreas de dano maiores, os pinos ajudaram a manter as folhas de metal e o compósito juntos por mais tempo. Os pinos tendem a adiar a propagação da delaminação entre as folhas metálicas e o compósito, pelo ancoramento dos mesmos,

e até tendem a retardar a propagação da delaminação no compósito, atuando como grampos que suportam a maior parte de suas camadas entre as folhas metálicas e pinos do tipo cabeça abaulada. O painel feito apenas de material compósito exibiu uma carga máxima menor, ainda falhando com menor deslocamento axial. Assim, conforme verificado nos testes de compressão, os painéis com pinos tendem a comportar-se de forma menos catastrófica durante flambagem após o impacto. A Figura 5.33(b) apresenta as imagens de todos os tipos de painéis laminados com os danos de impacto após o teste de flambagem. Como esperado, todos os tipos de painéis, como também aconteceu no caso mostrado na Figura 5.31(b), tiveram sua deflexão lateral da superfície de cima (lado do impacto) em direção à superfície de baixo. Todos os painéis entraram em colapso e terminaram dobrados com a presença de ondulações transversalmente cruzando as áreas de dano. Alguns dos painéis ainda tiveram a folha de metal de baixo rompida transversalmente ao meio após o ensaio de flambagem. Percebeu-se que os rompimentos das folhas metálicas aconteceram entre os pinos metálicos (seus espaçamentos), pelo fato dos pinos agirem como ancoradores das folhas metálicas e devido as tensões de tração estarem presentes nas folhas metálicas de baixo (lado oposto ao impacto) entre os pinos. Como apresenta a Figura 5.33(b), o PLMC convencional (M-C-M (sem pinos)) após o impacto terminou o ensaio de flambagem com as folhas metálicas quase totalmente separadas da camada de compósito. Em contrapartida, nos PLMC com pinos, especialmente com espaçamentos menores (maior número de pinos), houve pouco descolamento das folhas metálicas, concentrando-se próximo às áreas de dano. Este fato ratifica que os pinos efetivamente ancoraram as folhas metálicas ao compósito, mesmo após danos causados por impacto.

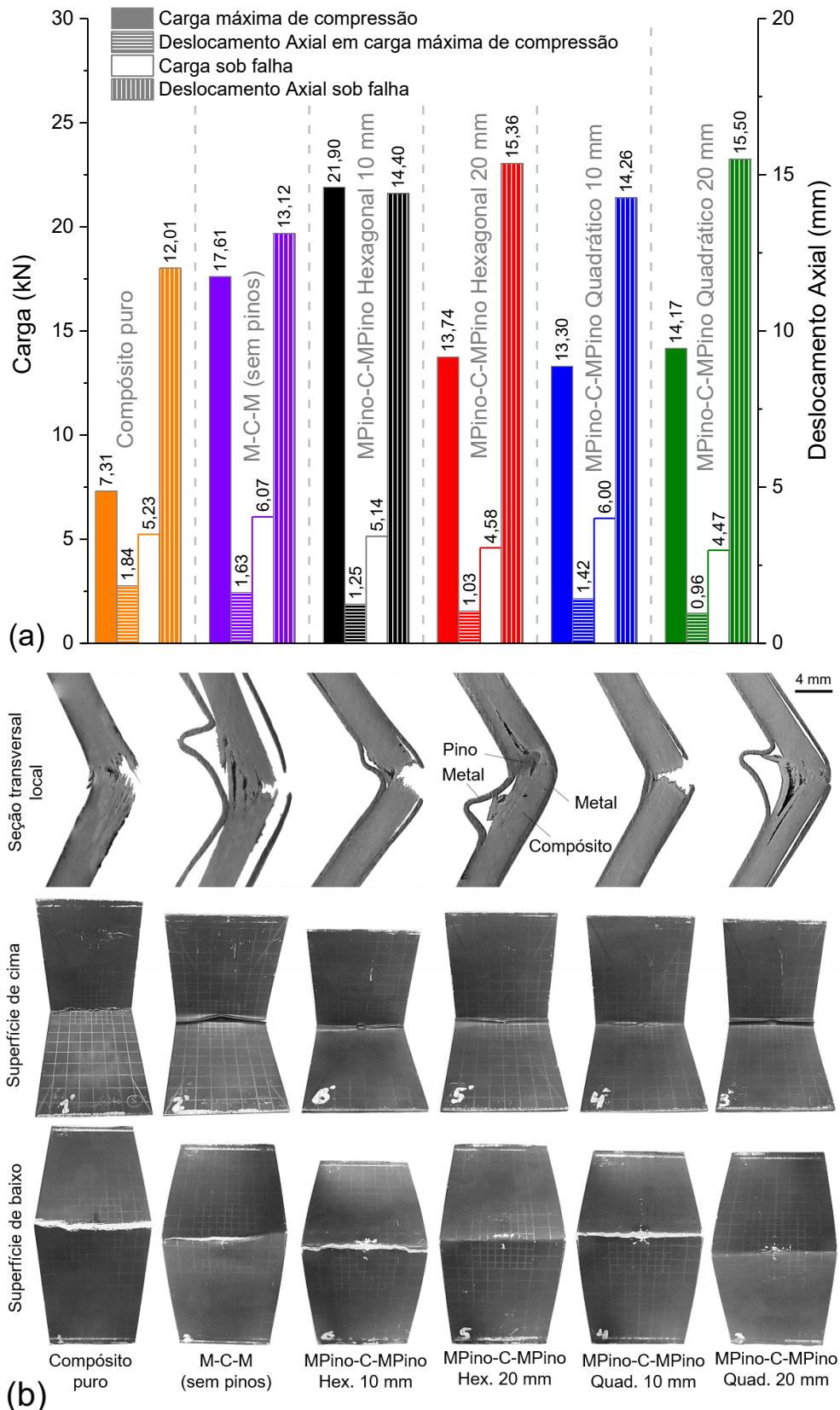


Figura 5.33 – (a) Carga máxima de compressão, carga sob falha e seus correspondentes deslocamentos axiais de todos os tipos de painéis durante o ensaio de flambagem após impacto; (b) Imagens de todos os tipos de painéis com dano por impacto após o ensaio de flambagem (os pinos não são geralmente vistos nas secções transversais longitudinais locais devido ao alinhamento de corte executado)

5.3.5 Ensaio de cisalhamento (losipescu)

Para avaliar a influência de deposição dos pinos nos PLMC na resistência ao cisalhamento e delaminação utilizou-se um ensaio de resistência ao cisalhamento como proposto pela primeira vez em 1967 por losipescu. De acordo com Le Bourlegat (2009), o ensaio de cisalhamento de losipescu utiliza um corpo de prova de construção simples, pois é plano, e atinge um estado de tensão-deformação de cisalhamento puro e uniforme na região do entalhe imposto ao corpo de prova. A Figura 5.34(a) mostra um esquema deste ensaio realizado na máquina universal de ensaios mecânicos (mais detalhes na Seção 3.3.2 do Capítulo III). A Figura 5.34(b) apresenta as dimensões do corpo de prova utilizadas e definidas pela norma ASTM D5379 (ASTM, 2012). Além disso, todo procedimento do ensaio de cisalhamento de losipescu foi baseado nesta norma, mantendo a velocidade de deslocamento da garra móvel igual a 0,5 mm/min. O ensaio foi realizado em três corpos de prova retirados de cada um dos sete tipos de painéis laminados desta 1^a fase de avaliação. As dimensões médias dos corpos de prova fabricados e os resultados do ensaio são mostrados na Tabela 5.3.

A Figura 5.35 apresenta a distribuição dos pinos nos corpos de prova dos PLMC. É possível perceber que os corpos de prova dos painéis do tipo MPino-C-MPino Hexagonal 10 e 20 mm tiveram 30 e 7 pinos dentro da sua camada de compósito, respectivamente. Já os corpos de prova dos painéis do tipo MPino-C-MPino Quadrático 10 e 20 mm tiveram 29 e 7 pinos, respectivamente. Outros três tipos de corpos de prova dos painéis laminados sem pinos (Compósito puro, M-C-M e M-C-M-C-M) foram ensaiados para fins de comparação. A Figura 5.36 ilustra a área (A) do plano entre os entalhes do corpo de prova ($w \approx 12$ mm e $t \approx 4$ mm), ao longo da qual foi aplicada a carga (F). Para calcular a tensão de cisalhamento (τ) utilizou-se a Eq. 5.2.

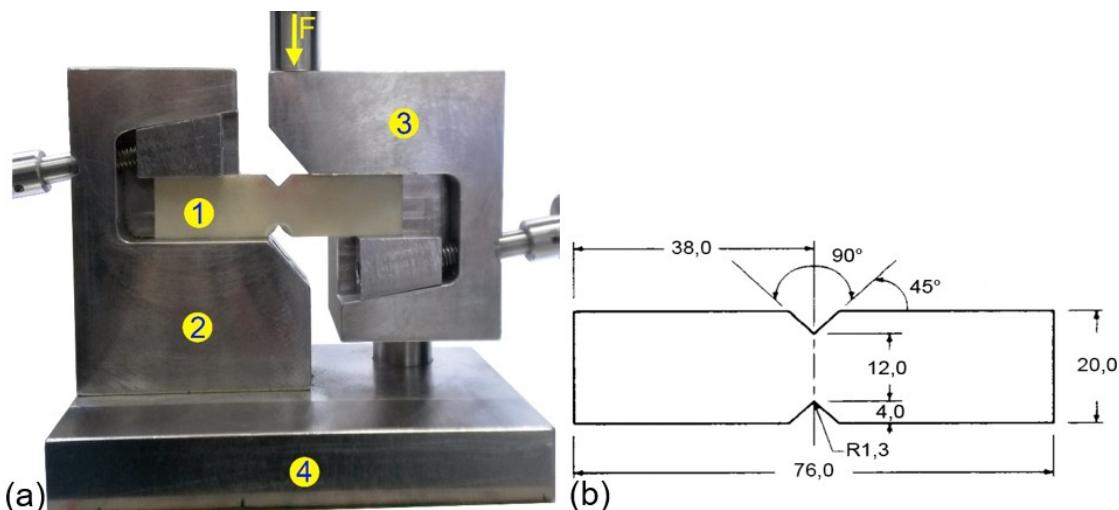


Figura 5.34 – (a) Esquema do ensaio de cisalhamento losipescu, onde: 1 - corpo de prova; 2 - garra fixa; 3 - garra móvel; 4 - base do suporte do ensaio; F - carga aplicada; (b) Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento losipescu (adaptado da norma ASTM D5379, 2012)

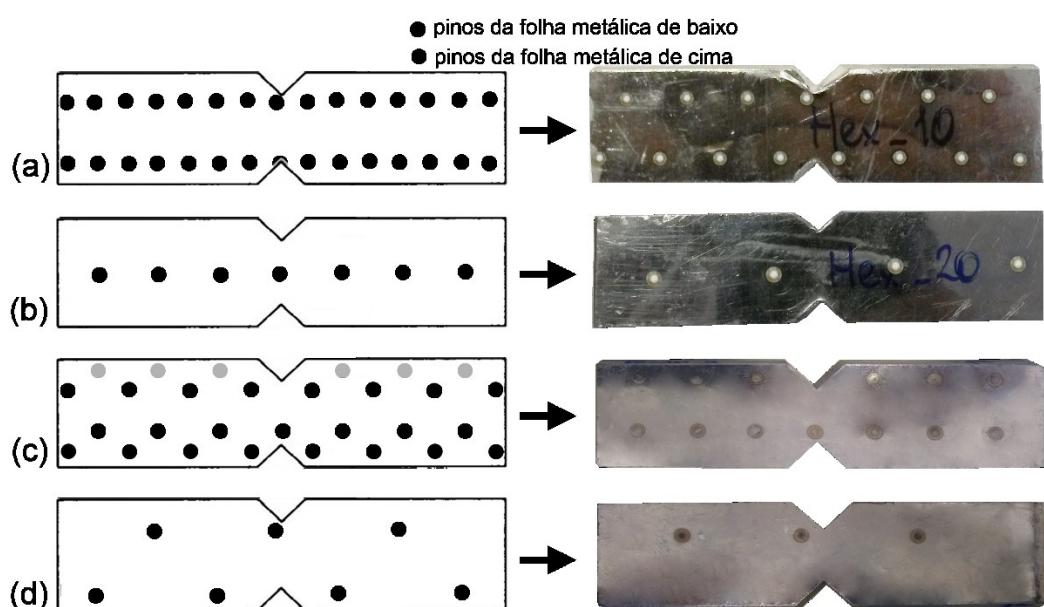


Figura 5.35 – Corpos de prova de PLMC com pinos para o ensaio de cisalhamento de losipescu (ilustrados à esquerda e reais à direita), onde: (a) MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm; (b) MPino-C-MPino Hexagonal 20 mm; (c) MPino-C-MPino Quadrático 10 mm e (d) MPino-C-MPino Quadrático 20 mm

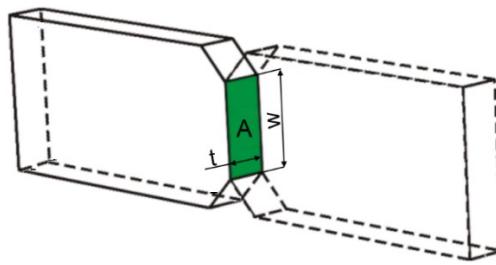


Figura 5.36 – Área do corpo de prova utilizada para cálculos de tensão de cisalhamento (adaptado de LE BOURLEGAT, 2009)

$$\tau = \frac{F}{w * t} \quad (5.2)$$

A Figura 5.37(a) e (b) apresenta as curvas típicas para cada tipo de painel no ensaio de cisalhamento de losipescu de Deslocamento × Carga e Deslocamento × Carga Específica resultantes. Durante a realização dos ensaios percebeu-se uma boa repetitividade dos resultados para cada um dos 7 tipos de painéis laminados. A Figura 5.38 apresenta diagramas de coluna com os valores médios da carga máxima, deslocamento sob carga máxima e tensão máxima. Observa-se que os corpos de prova dos painéis ancorados com pinos suportaram uma carga máxima de cerca de 7,6 kN, próxima à suportada pelo painel do tipo M-C-M-C-M (sem pinos) com 3 folhas metálicas. Já os painéis do tipo M-C-M (sem pinos) e compósito puro suportaram uma carga máxima menor, cerca de 6,8 e 5,9 kN respectivamente. Já considerando a densidade dos corpos de prova, visando a sua aplicação na área de transportes, os corpos de prova de Compósito puro exibiram uma carga específica máxima superior ($\approx 2,9$ kN/(g/cm³)) em comparação com os demais tipos de painéis. Os corpos de prova do tipo M-C-M-C-M (sem pinos), por terem uma folha metálica a mais (maior densidade), mostraram a menor capacidade de carga específica ($\approx 2,1$ kN/(g/cm³)) de todos os tipos de painéis ensaiados. Por sua vez, os corpos de prova dos painéis ancorados por pinos foram capazes de resistir uma carga de $\approx 2,5$ kN/(g/cm³). Isso mostra que o ancoramento dos PLMC por pinos tem efeito na carga máxima específica exigida para o cisalhamento. É possível notar que o deslocamento sob carga máxima (antes de acontecer o rompimento) dos PLMC com pinos é maior, ou seja, foi necessário um esforço de cisalhante maior para romper. A Figura 5.39 ilustra o aspecto típico das fraturas dos corpos de prova sem e com pinos.

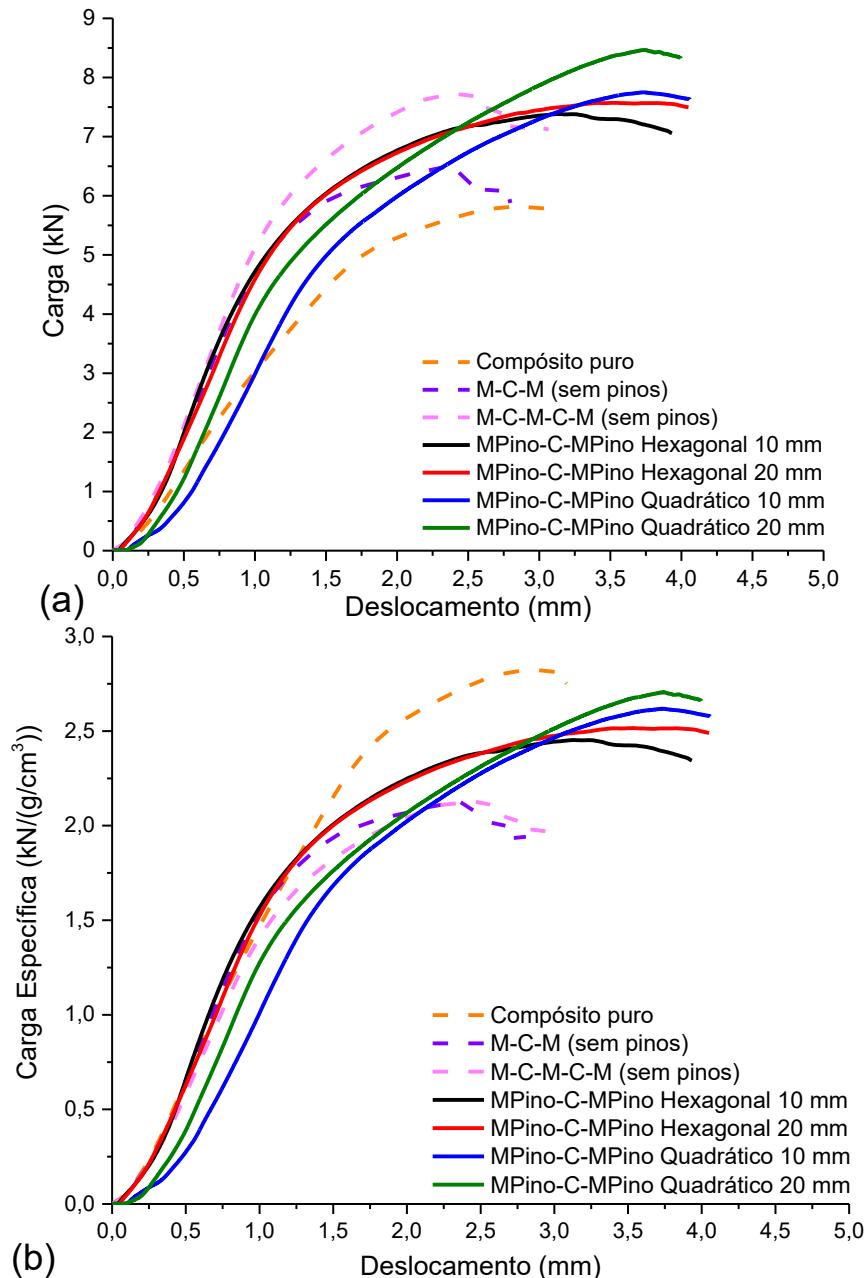


Figura 5.37 – Curvas típicas para cada tipo de painel no ensaio de cisalhamento de losipescu, onde: (a) Deslocamento x Carga; (b) Deslocamento x Carga Específica

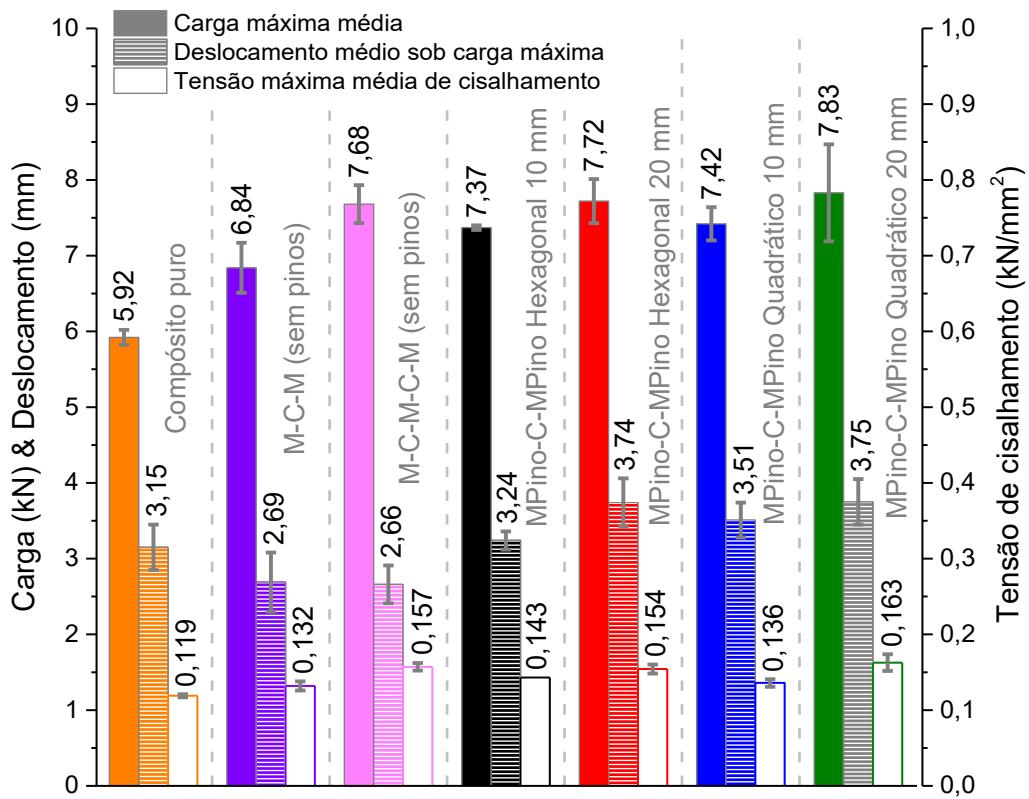


Figura 5.38 – Valores médios obtidos através de 3 medições de carga máxima, deslocamento sob carga máxima e tensão máxima de cisalhamento do ensaio de losipescu



Figura 5.39 – Aspecto típico das fraturas dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento losipescu, onde: (a) Sem (M-C-M (sem pinos)); (b) Com pinos (MPino-C-MPino Quadrático 20 mm)

Tabela 5.3 – Características dos corpos de prova dos painéis laminados da 1^a fase de avaliação do ensaio de cisalhamento de losipescu e resultados do ensaio

Tipo de painel	Dimensões dos CP (mm)			Pinos por CP	Massa do CP (g)	Densidade do CP (g/cm ³)	F _{max} (kN)	Deslocamento em F _{max} (mm)	F _{max} específica (kN/(g/cm ³))	T _{max} (kN/mm ²)
	C	L	E							
Compósito puro	75,32 ± 0,02	18,97 ± 0,03	4,14 ± 0,01	0	12,19 ± 0,01	2,06 ± 0,00	5,92 ± 0,10	3,15 ± 0,30	2,87 ± 0,05	0,119 ± 0,002
M-C-M (sem pinos)	75,55 ± 0,08	19,00 ± 0,05	4,32 ± 0,00	0	18,89 ± 0,05	3,05 ± 0,01	6,84 ± 0,33	2,69 ± 0,39	2,24 ± 0,11	0,132 ± 0,006
M-C-M-C-M (sem pinos)	75,67 ± 0,00	18,90 ± 0,05	4,07 ± 0,00	0	21,14 ± 0,18	3,63 ± 0,01	7,68 ± 0,25	2,66 ± 0,25	2,11 ± 0,07	0,157 ± 0,005
MPino-C-MPino Hex. 10 mm	75,04 ± 0,00	19,03 ± 0,03	4,29 ± 0,00	30	18,44 ± 0,08	3,01 ± 0,00	7,37 ± 0,03	3,24 ± 0,12	2,45 ± 0,01	0,143 ± 0,000
MPino-C-MPino Hex. 20 mm	75,28 ± 0,00	18,95 ± 0,01	4,17 ± 0,00	7	17,92 ± 0,05	3,01 ± 0,00	7,72 ± 0,29	3,74 ± 0,32	2,56 ± 0,10	0,154 ± 0,006
MPino-C-MPino Quad. 10 mm	75,18 ± 0,06	19,50 ± 0,05	4,60 ± 0,02	29	19,96 ± 0,09	2,96 ± 0,01	7,42 ± 0,22	3,51 ± 0,23	2,53 ± 0,08	0,136 ± 0,005
MPino-C-MPino Quad. 20 mm	75,55 ± 0,04	19,50 ± 0,02	4,10 ± 0,04	7	18,90 ± 0,10	3,13 ± 0,00	7,83 ± 0,64	3,75 ± 0,30	2,56 ± 0,17	0,163 ± 0,011

Hex. = padrão de deposição dos pinos Hexagonal; Quad. = padrão de deposição dos pinos Quadrático; C = comprimento; L = largura; E = espessura; CP = corpo de prova; Fmax = carga máxima; Tmax = tensão máxima

5.4 Discussão parcial

Levando em consideração os resultados da 1^a fase de avaliação dos painéis laminados e os ensaios realizados, destaca-se:

- Possibilidade de fabricar os PLMC com ancoradores (pinos) depositados pela técnica CMT PIN em suas partes metálicas de uma forma robusta, econômica e prática, utilizando um equipamento robotizado;
- Para o caso exclusivo do ensaio de dobramento a três pontos pode-se concluir que os PLMC sem pinos necessitam de uma energia maior para romper/falhar, assim, são mais resistentes ao rompimento por flexão pois os pinos se comportam como um concentrador de tensão. Mas por outro lado, os PLMC com pinos apresentaram uma falha menos catastrófica, necessitando de maior energia após o seu rompimento para alcançar a falha total. Os pinos, por terem as cabeças abauladas dentro da camada de compósito, melhoraram o acoplamento metal-compósito;
- Através do ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test* verificou-se que a presença de pinos nos PLMC, independentemente do padrão de deposição e espaçamento, não parece ter efeito significativo sobre a capacidade de absorção de energia de impacto dos mesmos. Ou seja, os PLMC com pinos apresentaram resultados de absorção da energia de impacto semelhantes ao painel convencional (M-C-M (sem pinos)), mas significativamente maior do que o painel do tipo Compósito puro. Portanto, os pinos, pelo menos para as condições de impacto aplicadas, não tornaram os PLMC mais frágeis ao impacto;
- Em relação a quantificação dos danos nos painéis após o ensaio de impacto, os PLMC com pinos apresentaram maiores deformações médias máximas em comparação com os painéis sem pinos. Observou-se uma tendência de aumentar a deformação máxima com maior densidade de pinos por painel (espaçamento de 10 mm). As áreas de dano, obtidas pela técnica de Termografia Infravermelha, confirmaram que os PLMC com pinos foram mais danificados em comparação com os painéis sem pinos;
- Em relação à tolerância ao dano, os PLMC com pinos apresentaram uma falha menos catastrófica após o impacto, suportando maiores cargas durante a falha no ensaio de compressão, mesmo com maior dano. Por outro lado, no ensaio de flambagem a tendência de catastrofismo não foi tão evidente, mas os pinos continuaram a retardar a delaminação entre as folhas metálicas e o compósito;

- O impacto deixou danos maiores nos PLMC com pinos, o que foi confirmado pelos maiores perfis de profundidade de danos e pelas áreas dos mesmos. Por outro lado, notou-se um comportamento menos catastrófico dos PLMC com pinos após a sua falha. Provavelmente, os pinos alteraram o modo de falha do painel, retardando a delaminação entre metal e compósito, assim, suportando os esforços aplicados por um maior período de tempo;
- Observou-se redução da delaminação na interface metal-compósito dos PLMC com pinos, onde os mesmos, por estarem presentes na camada de compósito, dificultaram a delaminação. Por isso, os PLMC com pinos, por serem uma estrutura ancorada, apresentaram maior resistência ao cisalhamento (ensaio Iosipescu). Durante o ensaio de cisalhamento, principalmente para os PLMC convencionais (sem pinos), verificou-se delaminações extensas, as quais reduziram a carga máxima suportada e deslocamento no momento de falha.

CAPÍTULO VI

AVALIAÇÃO DOS PAINÉIS LAMINADOS METAL-COMPÓSITO REFORÇADOS POR PINOS: 2^a FASE

Como visto no Capítulo V, apesar da intenção de se manter a mesma espessura entre os painéis, esta característica não foi totalmente alcançada. Assim, a comparação entre painéis por ensaios mecânicos pode ter ficado prejudicada. A razão para a variação da espessura foi, provavelmente, se ter usado pressão constante durante a etapa de montagem (prensagem e cura) e um número desigual de lâminas de pré-impregnado na camada de compósito. Nos painéis em que havia ancoradores junto ao pré-impregnado, havia a tendência do aumento da espessura, mesmo que pequena ($\approx 0,5$ mm). Por isso, nesta segunda fase procurou-se minimizar ou até eliminar este efeito, independentemente da existência e da densidade dos pinos, mas ainda se mantendo o mesmo número de lâminas de pré-impregnados na camada de compósito.

6.1 Fabricação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC)

Para fabricar os painéis, para esta 2^a fase de avaliação, com espessuras mais homogêneas, a ideia foi utilizar espaçadores de espessura fixos entre as placas da prensa de cura a quente. Esses espaçadores foram feitos de aço ABNT 1020, com dimensões de 37,0 \times 35,0 \times 4,0 mm. A escolha da espessura foi baseada nos painéis da fase anterior, que atende o valor de espessura já existente no mercado dos LMC (entre 1,12 e 4,37 mm, segundo Yaghoubi e Liaw, 2014). Operacionalmente, se faz primeiro o posicionamento de três painéis pré-montados (lado a lado) e dos espaçadores na placa inferior da prensa, conforme apresenta a Figura 6.1. Desta forma, quando a placa superior é abaixada, seu avanço é limitado ao se apoiar nos espaçadores.

O ciclo térmico de cura foi o mesmo da 1^a fase de avaliação (Figura 5.9 do Capítulo V). Com o aumento do número de pinos nas folhas metálicas dos PLMC, a carga aplicada (consequentemente a tensão) foi aumentada proporcionalmente durante o ciclo de cura, para

conseguir apoiar a placa superior da prensa nos espaçadores de espessura; o maior número de pinos exigiu maior pressão para que estes atravessassem as lâminas de pré-impregnado. Como apresenta a Figura 6.2, o ciclo de cura dos painéis sem pinos foi feito com \approx 2 toneladas de carga (0,24 MPa por painel). Para o caso da cura dos painéis com espaçamento de 10 mm (independentemente do padrão de deposição) foram aplicadas \approx 5 toneladas de carga (0,60 MPa por painel). Finalmente, para curar os PLCM com maior número de pinos (espaçamento de 5 mm) foram aplicadas \approx 10 toneladas de carga (1,19 MPa por painel). Destaca-se que materiais, métodos e equipamentos envolvidos na 2^a fase da avaliação foram os mesmos da 1^a fase.

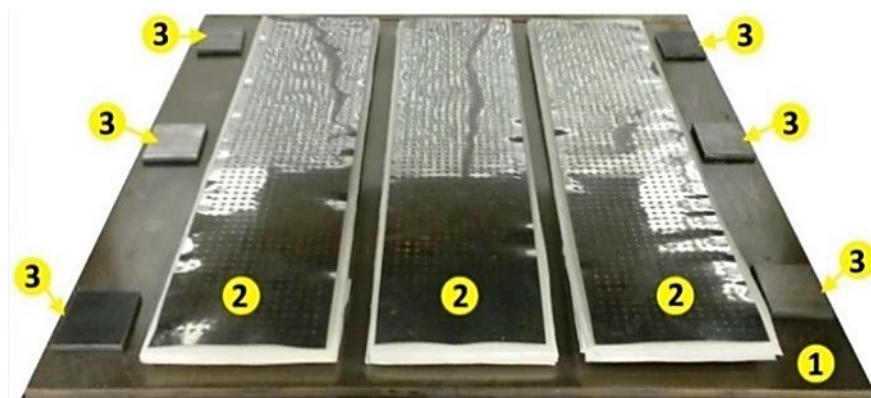


Figura 6.1 – Posicionamento dos painéis pré-montados e dos espaçadores de espessura sobre a placa inferior da prensa de cura a quente, onde: 1 - placa inferior da prensa; 2 - painéis pré-montados (3 unidades); 3 - espaçador de espessura (6 unidades)

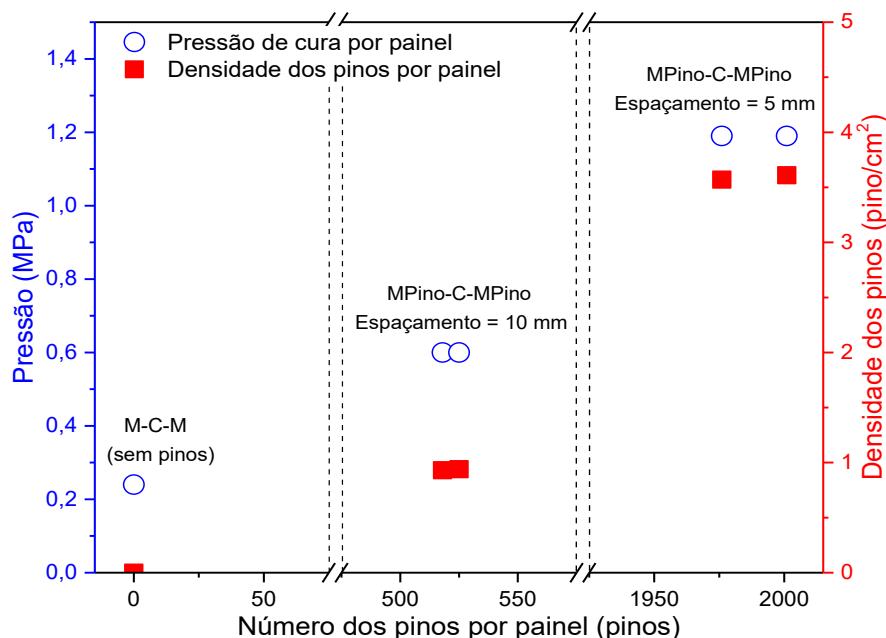


Figura 6.2 – Pressão aplicada por painel durante o ciclo de cura e densidade dos pinos por painel em função do número de pinos, onde: 0 pinos = M-C-M; 518 pinos = MPino-C-MPino Quadrático 10 mm; 525 pinos = MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm; 1976 pinos = MPino-C-MPino Quadrático 5 mm; 2001 pinos = MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm

Em geral, as etapas de fabricação dos PLMC para 2^a fase de avaliação foram basicamente as mesmas da 1^a fase (Seção 5.1 do Capítulo V), com pequenas alterações, como listadas a seguir:

1. Na fabricação dos painéis usou-se o mesmo número (13) de lâminas de pré-impregnado (na 1^a fase de avaliação foram de 16 a 19 lâminas por painel), independentemente do tipo do painel e densidade de pinos utilizados;
2. Aplicou-se diferentes pressões durante a etapa de montagem (prensagem e cura) em função da densidade (número) dos pinos por painel (Figura 6.2), enquanto na 1^a fase de avaliação essa pressão foi constante (1,04 MPa) por painel (Figura 5.9 do Capítulo V);
3. Utilizou-se espaçamentos de 5 e 10 mm para ambos os padrões de deposição dos pinos (Quadrático e Hexagonal), e não de 10 e 20 mm como na 1^a fase (a ideia foi verificar a influência de uma maior quantidade de pinos nas propriedades mecânicas dos painéis);
4. Aumentou-se o comprimento dos painéis, passando de 200 para 350 mm (largura e a espessura mantidos em 80 e 4 mm, respectivamente). Essa alteração visou utilizar melhor a capacidade de produção da prensa de cura a quente e também possibilitar o corte dos mesmos em corpos de prova para os diversos ensaios mecânicos.

A Figura 6.3 apresenta vistas dos cinco tipos de painéis fabricados (um de cada) na 2^a fase de avaliação. Os PLMC convencionais do tipo M-C-M (sem pinos) foram fabricados para fins de comparação.

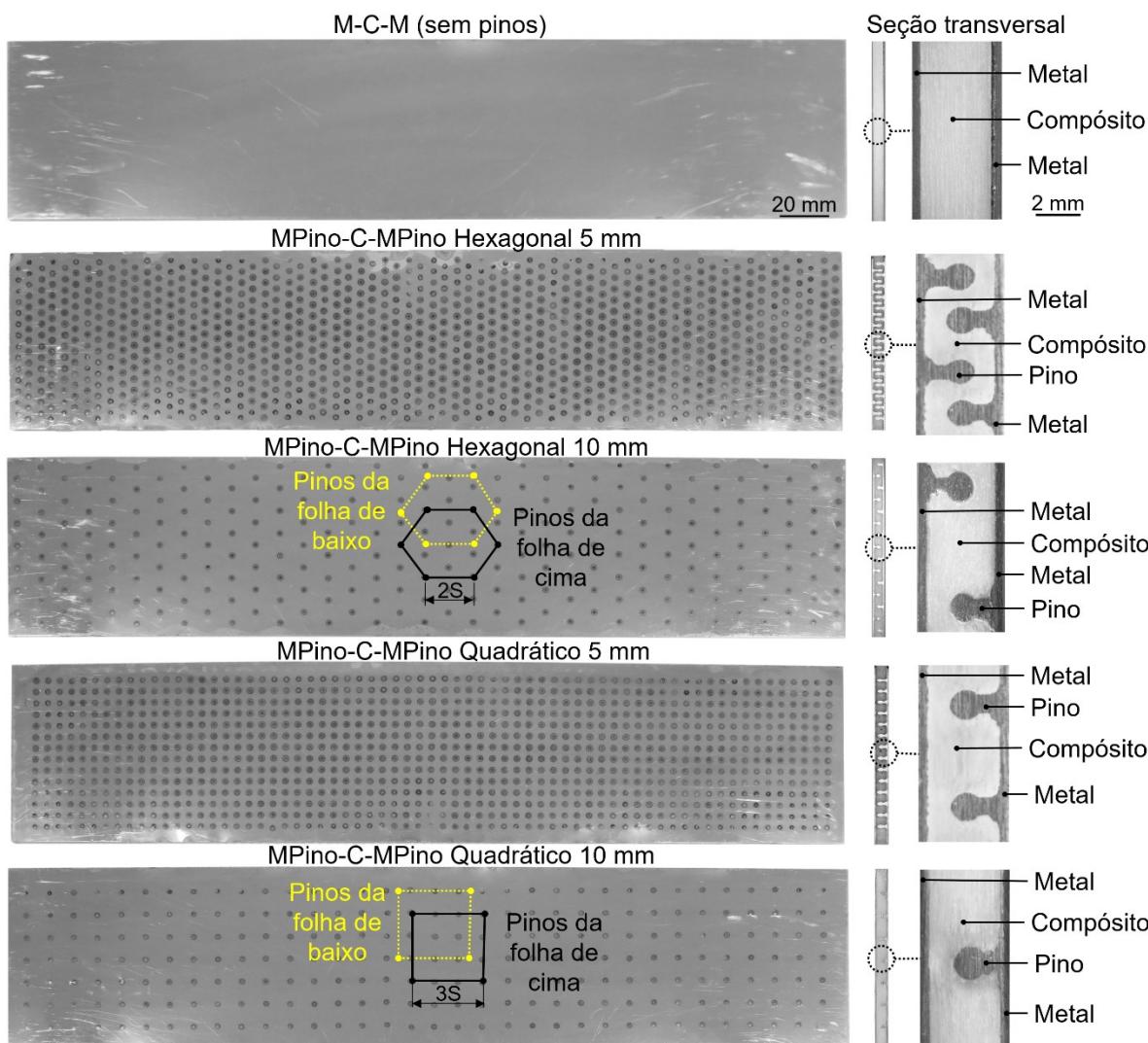


Figura 6.3 – Tipos de painéis da 2^a fase de avaliação ($\approx 350 \times 80 \times 4$ mm) com respectivas seções transversais e sobreposição esquemática de pinos nas folhas metálicas de cima e de baixo, onde M-C-M = metal-compósito-metal, MPino-C-MPino = metal com pinos-compósito-metal com pinos para o padrão de deposição Hexagonal e Quadrático e S = distância de espaçamento entre os pinos (as marcas semelhantes a pontos nos painéis com pinos são devidas à oxidação induzida pelo calor do aço inoxidável logo abaixo da posição dos pinos depositados - este efeito estético poderia ser evitado com purga de gás inerte)

6.2 Caracterização dos painéis fabricados

A Tabela 6.1 apresenta as características médias medidas/calculadas dos painéis fabricados durante a 2^a fase de avaliação. Para medir as características geométricas dos painéis (comprimento, largura e espessura), criou-se uma malha de 28 pontos, conforme mostrado na Figura 6.4. As características dos painéis, tais como, espessura, comprimento, largura e massa foram medidas conforme apresentado na Seção 5.2 do Capítulo V.

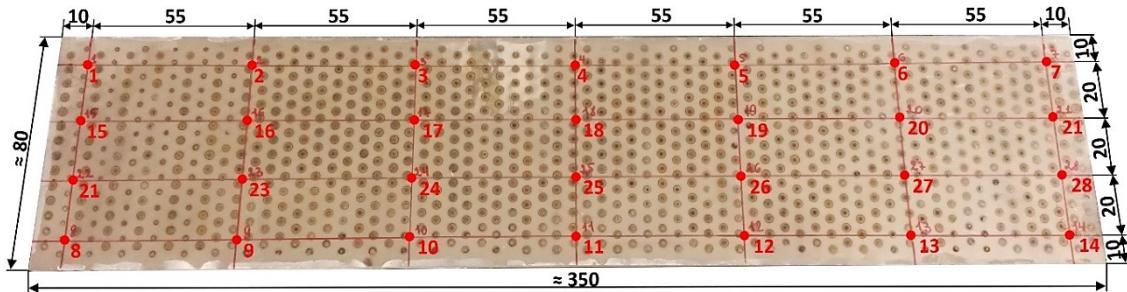


Figura 6.4 – Malha para medição das características geométricas dos painéis da 2^a fase de avaliação (os números marcados são pontos sequenciais de medição da espessura e as dimensões estão em mm)

A Figura 6.5 apresenta graficamente a variação da espessura e densidade médias de todos os tipos de painéis da 2^a fase de avaliação. Percebe-se que o uso dos espaçadores de espessura deixou a espessura mais homogênea (variando $\approx 0,18$ mm), quando comparado com os painéis da 1^a fase de avaliação (variando $\approx 0,56$ mm). Isto foi conseguido mantendo o mesmo número de lâminas de pré-impregnados na camada de compósito e com uma elevada densidade de pinos (espaçamento de 5 mm). Obviamente, os painéis com maior número de pinos apresentaram maior densidade devido à massa de cada pino ($0,023 \pm 0,001$ g), como apresentam a Figura 6.5 e a Tabela 6.1.

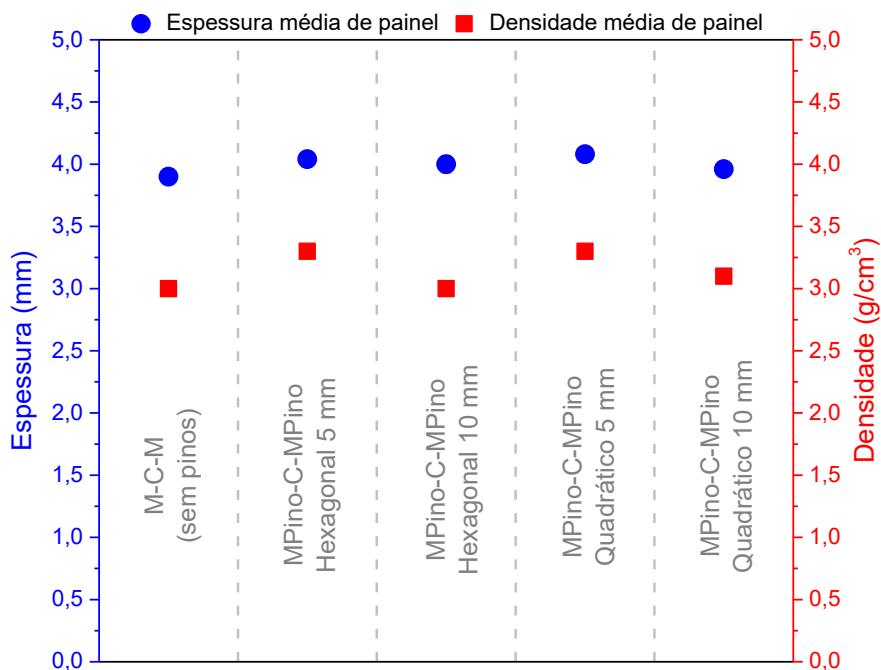


Figura 6.5 – Espessura e densidade médias dos painéis da 2^a fase de avaliação

Tabela 6.1 – Características principais dos painéis da 2^a fase de avaliação

Tipo de painel	Dimensões dos painéis (mm)			Pinos por painel	Lâminas de pré-impregnado no compósito	Densidade dos pinos (pino/cm ²)	Densidade dos painéis (g/cm ³)
	C	L	E				
M-C-M (sem pinos)	349,44 ± 0,25	80,09 ± 0,03	3,90 ± 0,03	0	13	0	3,0
MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm	347,03 ± 0,53	79,83 ± 0,21	4,04 ± 0,03	2001	13	3,61	3,3
MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm	349,44 ± 0,25	80,16 ± 0,04	4,00 ± 0,07	525	13	0,94	3,0
MPino-C-MPino Quadrático 5 mm	347,34 ± 0,47	79,77 ± 0,08	4,08 ± 0,01	1976	13	3,57	3,3
MPino-C-MPino Quadrático 10 mm	348,72 ± 0,47	80,08 ± 0,09	3,96 ± 0,02	518	13	0,93	3,1

C = comprimento; L = largura; E = espessura; tipo de pino utilizado = cabeça abaulada; folha de aço AISI 430; tipo do arame-eletrodo = AWS ER 309 L; densidade média (real) do arame-eletrodo = 0,0078 ± 0,0000 g/mm³; Diâmetro médio do arame-eletrodo = 0,98 ± 0,00 mm; Altura média dos pinos depositados - 2,50 ± 0,06 mm; Diâmetro médio da cabeça dos pinos = 1,45 ± 0,03 mm; Massa média (real) dos pinos depositados - 0,023 ± 0,000 g; Espessura de uma lâmina de pré-impregnado antes de prensagem e cura = 0,3 mm; Densidade da lâmina de pré-impregnado medida = 1,51 g/cm³; Massa média (real) das folhas metálicas sem pinos = 47,93 ± 0,36 g; Volume de um pino depositado (calculado) = 2,39 mm³; Massa de um pino depositado (calculada) = 0,019 g; Área superficial livre de um pino antes da laminação do compósito (calculada) = 5,5 mm²

6.3 Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis laminados

A avaliação das propriedades mecânicas dos painéis laminados da 2^a fase foi feita pelo ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo *Drop-Weight Test*, seguido de flambagem, e o de cisalhamento tipo losipescu. Estes ensaios também foram aplicados nos painéis laminados da 1^a fase de avaliação. Porém, visando atender outras solicitações que um painel poderia sofrer, os painéis da 2^a fase de avaliação foram ainda ensaiados em termos de análise modal e impacto de alta velocidade (balístico). Também com os painéis da 2^a fase foi feita uma avaliação da influência de deposição dos pinos sobre a qualidade superficial do painel. A seguir, cada um destes ensaios é descrito mais detalhadamente juntamente com resultados obtidos em cada caso.

6.3.1 Ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo *Drop-Weight Test*

Para executar o ensaio de impacto, seguiu-se o mesmo procedimento da 1^a fase de avaliação (descrito na Seção 5.3.2 do Capítulo V e guiado pela norma ASTM D7136 (ASTM, 2015)). Como na 1^a fase de avaliação, também se utilizou dois corpos de prova para cada tipo de PLMC. É importante destacar que o impactador da 2^a fase de avaliação foi modificado da seguinte forma:

- aumentou-se a massa do impactador em aproximadamente 300 g (de 2,024 para 2,326 kg), para causar um dano maior nos painéis, aumentando a energia de impacto;
- substituiu-se o diâmetro da cabeça esférica do impactador por um maior (de 17,0 para 28,5 mm), também de aço duro, assim, simulando um objeto de impacto de maior dimensão;
- reduziu-se o comprimento dos corpos de prova (de 200 para 175 mm), com objetivo de economizar painéis fabricados, cortando na metade do seu comprimento, ou seja, obtendo-se corpos de prova de $\approx 175 \times 80 \times 4$ mm cada.

Devido à homogeneidade da espessura dos painéis da 2^a fase de avaliação, a altura de queda (entre a cabeça esférica do impactador e a superfície do painel) do impactador foi constante e igual a 1,85 m para todos os testes, resultando em um valor de energia de impacto de 10,5 J/mm de espessura do painel. A Figura 6.6 mostra as superfícies de cima e de baixo de todos os tipos de painéis após o impacto.

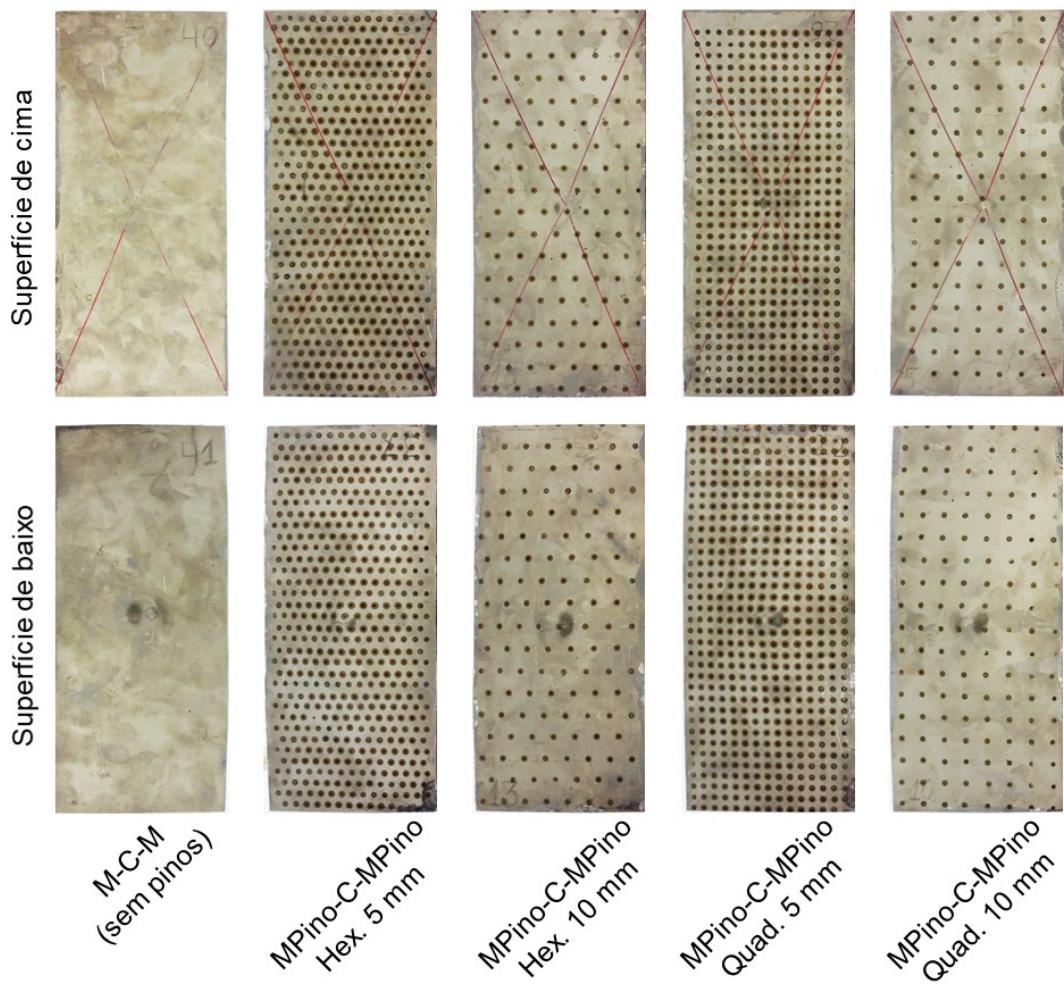


Figura 6.6 – Aspecto das superfícies de cima e de baixo de todos os tipos de PLMC após o impacto na 2^a fase de avaliação

Em analogia com a 1^a fase de avaliação, para se observar o impacto e quantificar as energias envolvidas, baseadas nas velocidades de impacto e retorno do impactador, utilizou-se uma câmera comercial CCD de alta velocidade (mais detalhes na Seção 3.3.3 do Capítulo III). Relembrando, as imagens capturadas foram analisadas para determinar as velocidades de impacto e retorno imediatamente antes e após o impacto, tomando como base os deslocamentos do impactador (superfície de baixo da cabeça esférica) quadro a quadro e respectivos tempos entre os mesmos (5×10^{-4} s), como visto na Figura 5.22(a) do Capítulo V. As velocidades no momento de impacto e retorno do impactador foram determinadas usando as curvas de regressão com suas respectivas equações de 2º grau. Como pode ser visto na Figura 6.7, as velocidades médias de impacto variaram de 5,81 a 5,96 m/s e as velocidades de retorno de 2,87 a 3,03 m/s. Ou seja, houve uma pequena variação das velocidades, independentemente do tipo de PLMC ensaiado, com uma boa repetitividade do ensaio (barras de erro na Figura 6.7).

A velocidade de impacto calculada, desconsiderando o atrito do ar e do tubo-guia do aparelho de impacto, foi de 6,02 m/s.

Os resultados do ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo *Drop-Weight Test* da 2^a fase de avaliação mantiveram a tendência dos resultados da 1^a fase, ou seja, a presença de pinos (ancoradores) nos PLMC não parece ter efeito significativo sobre a capacidade de absorção de energia de impacto, mesmo com uma elevada densidade dos pinos (espaçamento de 5 mm).

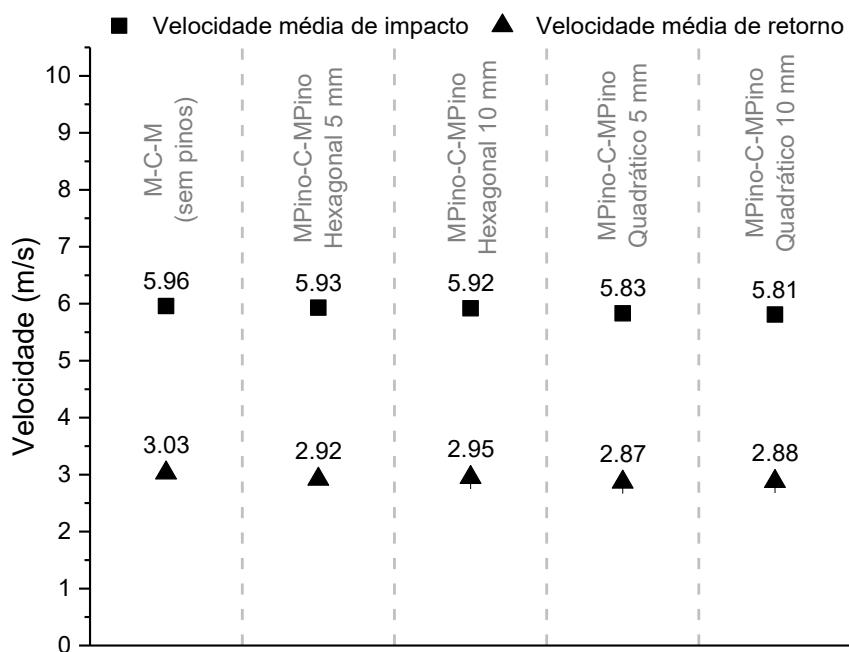


Figura 6.7 – Velocidades médias de impacto e retorno obtidas em cada tipo de painel da 2^a fase de avaliação

Por sua vez, as velocidades de impacto foram usadas para calcular as energias de impacto e retorno. Da mesma forma que na 1^a fase, a energia de impacto foi considerada como sendo a energia cinética do impactador com altura de queda tendendo a zero (nível de superfície de cima do painel antes do impacto). Analogamente, a energia de retorno foi considerada como sendo a energia cinética da massa de elevação no início do rebote após o impacto (altura de rebote tendendo a zero - nível de superfície de cima do painel antes do impacto). A absorção de energia durante o impacto foi considerada como a diferença relativa das energias cinéticas antes e depois do impacto. As quantificações de energia de impacto foram novamente, como na 1^a fase de avaliação, representadas de três formas: energia, energia específica (é um critério que considera a densidade dos PLMC, conforme a Tabela 6.1) e energia por unidade de espessura do painel (é um critério que considera a espessura dos PLMC, conforme a Tabela 6.1).

Como se observa na Figura 6.8, a energia de impacto foi sempre em torno de 40 J. As energias de retorno e as absorções de energia também foram semelhantes para todos os PLMC ensaiados. Em geral, os PLMC absorveram em torno de 75 % da energia de impacto, enquanto que os PLMC convencionais, do tipo M-C-M (sem pinos), absorveram ligeiramente menos, cerca de 72 % da energia de impacto.

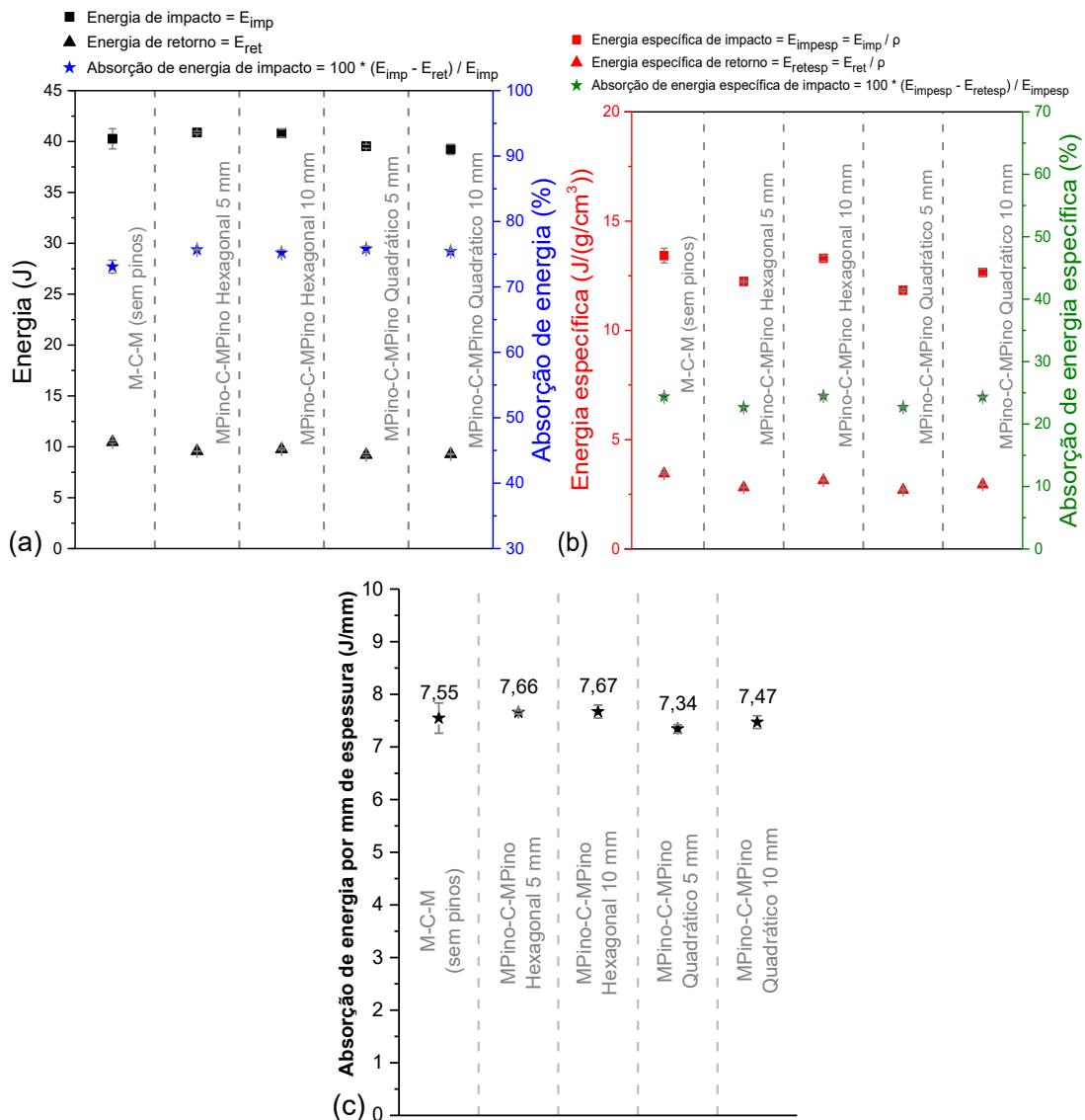


Figura 6.8 – (a) Energias médias de impacto e retorno com suas consequentes absorções de energia durante o ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test* na 2^a fase de avaliação; (b) Energias específicas de impacto e retorno e consequentes absorções de energia específica durante o ensaio de impacto na 2^a fase de avaliação; (c) Energia média absorvida por unidade de espessura do painel durante o ensaio de impacto na 2^a fase de avaliação (ρ = densidade do painel)

Os resultados da absorção de energia de impacto de baixa velocidade, independentemente de qualquer critério da sua medida (energia, energia específica e energia por unidade de espessura do painel da Figura 6.8), mostram que a presença

dos pinos como ancoradores dentro dos PLMC não parece ter nenhum efeito significativo sobre a capacidade de absorção de energia de impacto dos PLMC. Portanto, os pinos, pelo menos para as condições de impacto aplicadas, não tornaram os PLMC mais frágeis ou sensíveis ao impacto. Além disso, como na 1^a fase de avaliação, as mudanças no padrão de deposição e no espaçamento (densidade) dos pinos, pelo menos para demais condições, não causaram nenhum efeito sobre a capacidade dos PLMC de absorver a energia de impacto de baixa velocidade.

6.3.2 Quantificação dos danos nos painéis após ensaios de impacto – perfil de profundidade do dano

De forma análoga à 1^a fase de avaliação dos painéis laminados, o perfil de profundidade do dano após o impacto (deformação permanente) foi determinado por meio da medição do deslocamento vertical (eixo Z da Figura 5.24 do Capítulo V) nas linhas centrais transversal e longitudinal marcadas em todos os painéis antes do ensaio de impacto. Optou-se por não usar a técnica de Termografía Infravermelha na 2^a fase de avaliação, pois esta abordagem mostrou resultados bastante próximos aos indicados pelo perfil de profundidade do dano (deformação máxima), que é uma abordagem mais simples.

Os perfis médios de profundidade de dano de cada painel são apresentados na Figura 6.9(a). Como os perfis eram longitudinalmente e transversalmente simétricos em relação ao ponto mais elevado, são apresentadas apenas a metade do comprimento e a metade da largura dos PLMC. Em geral, os perfis de superfície medidos em cada PLMC com pinos foram similares, longitudinalmente e transversalmente, aos perfis dos PLMC convencionais (M-C-M (sem pinos)), porém com uma média da deformação permanente máxima levemente menor para os PLMC do tipo MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm e MPino-C-MPino Quadrático 5 mm, conforme ilustra a Figura 6.9(b). Para melhor entendimento desses resultados, os PLMC foram analisados também visualmente e na Figura 6.10 é possível perceber que, no caso desses dois tipos de PLMC, a cabeça esférica do impactador atingiu a região da superfície com o pino depositado. Por sua vez, isto causou deformação permanente média levemente menor destes painéis em comparação aos demais.

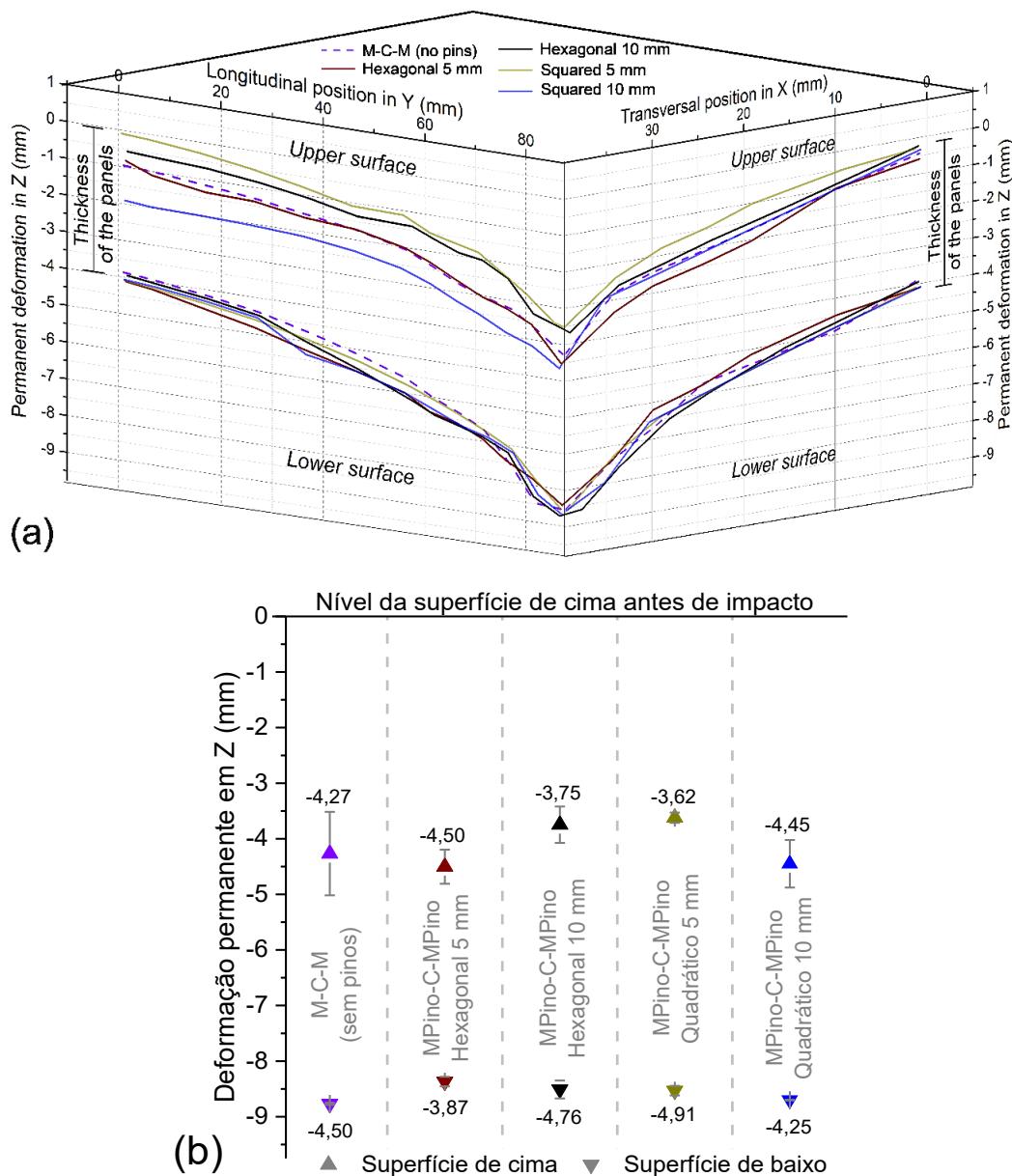


Figura 6.9 – (a) Perfis de profundidade de dano produzidos em cada painel na 2^a fase de avaliação (média de 2 corpos de prova); (b) Médias da deformação permanente máxima em cada tipo de painel na 2^a fase de avaliação

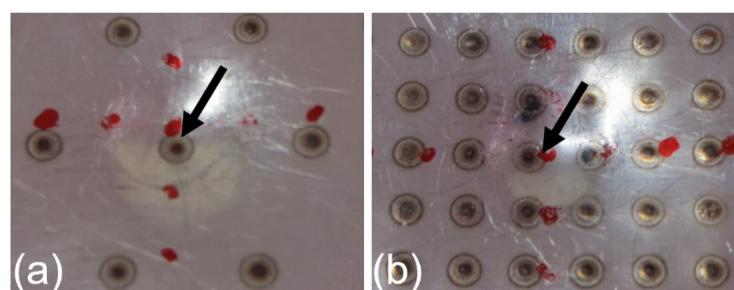


Figura 6.10 – Ampliação da região de impacto das superfícies de cima dos painéis após o ensaio na 2^a fase de avaliação, onde: (a) MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm; (b) MPino-C-MPino Quadrático 5 mm (a seta indica o local mais profundo do painel após deformação por impacto)

6.3.3 Ensaio de flambagem após o ensaio de impacto – tolerância ao dano

Com o objetivo de quantificar a tolerância ao dano, também na 2^a fase foi aplicado o ensaio de flambagem após o impacto com os PLMC. O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D7137 (ASTM, 2017), mantendo-se a velocidade de deslocamento do cutelo constante igual a 1,25 mm/min.

A Figura 6.11(a) mostra a evolução do Deslocamento Axial em função da Carga, na qual é possível perceber as fases de compressão, flambagem e falha. Observa-se na figura que os PLMC com maior densidade de pinos (espaçamentos de 5 mm) conseguiram suportar cargas mais elevadas durante a deflexão (fase de flambagem), seguidos pelos painéis com pinos depositados em padrões de menor espaçamento (painéis MPino-C-MPino Quadrático 10 mm e MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm nesta ordem). Os PLMC convencionais (sem pinos) atingiram um elevado valor de carga no momento da falha, ainda com um alto valor de deslocamento axial neste momento, em comparação com os PLMC com pinos. Entretanto, os PLMC convencionais (sem pinos), depois de atingir um alto valor de carga sob falha, apresentaram um rápido descarregamento após o rompimento (falha catastrófica). É importante destacar que este efeito de falha catastrófica dos PLMC convencionais (sem pinos) já foi observado durante a 1^a fase de avaliação dos painéis laminados.

Na Figura 6.11(b) são mostrados os valores de carga compressiva máxima, carga sob falha, deslocamentos axiais sob carga máxima e da falha (valores médios de 2 testes). O deslocamento axial da falha é mostrado como alternativa correlacionada com a deflexão lateral dos painéis ensaiados. Como visto, os PLMC com pinos toleraram uma maior carga máxima, tendo desempenhos próximos entre si, exceto o painel MPino-C-MPino Quadrático 10 mm, que foi capaz de suportar uma carga máxima notavelmente menor, mas ainda maior do que as dos painéis convencionais (M-C-M (sem pinos)). Todos os tipos de PLMC alcançaram cargas de compressão máxima em torno de 1,35 mm de deslocamento axial.

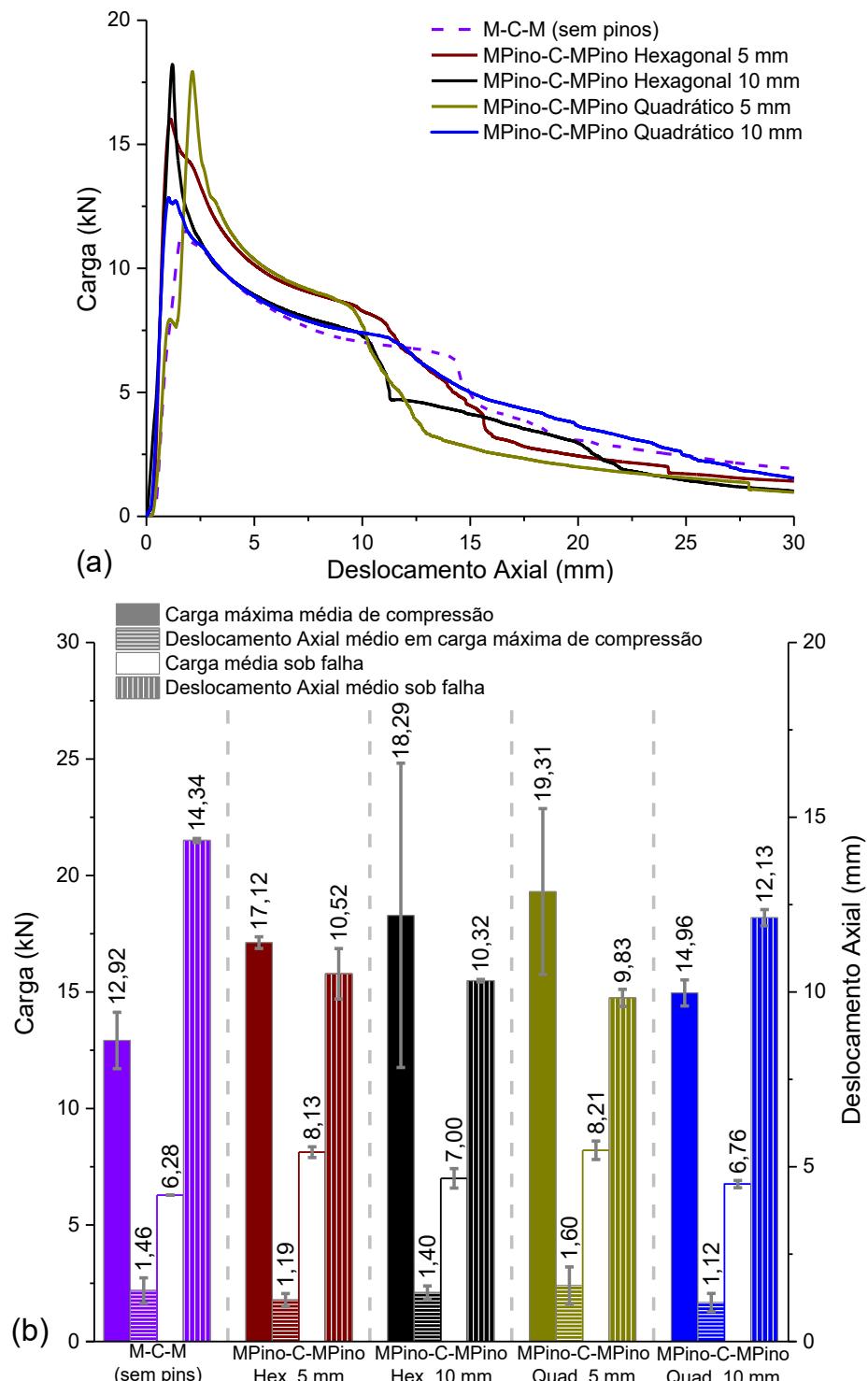


Figura 6.11 – (a) Deslocamento Axial x Carga típicos no ensaio de flambagem de todos os tipos de PLMC da 2^a fase de avaliação; (b) Carga máxima média de compressão, carga sob falha e seus correspondentes deslocamentos axiais de todos os tipos de painéis durante o ensaio de flambagem após impacto da 2^a fase de avaliação

Os painéis do tipo MPino-C-MPino Quadrático 5 mm e MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm suportaram maiores cargas máximas de compressão e sob falha (Figura 6.11(b)), provavelmente, por causa da sua menor deformação permanente

máxima (Figura 6.9(b)). Ainda se notou que os painéis do tipo MPino-C-MPino Quadrático 5 mm e MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm não apresentaram uma boa repetitividade do seu elevado valor médio de carga máxima de compressão, comprovada por um desvio padrão médio elevado (barra de erros da Figura 6.11(b)). Provavelmente, isso aconteceu porque a cabeça esférica do impactador atingiu a região do pino em um dos dois testes realizados, assim levando a menor deformação. Já os demais PLMC apresentaram uma deformação permanente semelhante, o que é respaldado pela boa repetitividade das cargas e dos deslocamentos no ensaio de flambagem. Neste caso, os PLMC com pinos, provavelmente por terem menores áreas de dano (maior tolerância ao dano), propiciaram manter o material (folhas de metal e compósito) juntos por mais tempo, evitando uma falha brusca/catastrófica. Ou seja, novamente os pinos tendem a adiar a propagação da delaminação entre as folhas metálicas e o compósito, pelo ancoramento dos mesmos, e até tendem a retardar a propagação da delaminação no compósito, atuando como grampos que suportam a maior parte de suas camadas entre as folhas metálicas e pinos do tipo cabeça abaulada.

A Figura 6.12 apresenta as imagens de todos os tipos de painéis laminados com danos de impacto após o ensaio de flambagem. Como esperado, todos os tipos de painéis tiveram sua deflexão lateral da superfície de cima (lado do impacto) em direção à superfície de baixo. Todos os painéis entraram em colapso e terminaram dobrados com a presença de ondulações transversalmente cruzando as áreas de dano. Ainda, todos os PLMC ensaiados durante a 2^a fase de avaliação tiveram a folha metálica de baixo rompida transversalmente no meio após o ensaio de flambagem, inclusive o painel convencional (sem pinos). Mas neste último caso (M-C-M - sem pinos), a fratura não atravessou toda a largura do painel, concentrando-se mais próxima da região de dano. Ainda se percebeu que os rompimentos das folhas metálicas aconteceram entre os pinos metálicos (espaçamentos), pelo fato dos pinos agirem como ancoradores das folhas metálicas e devido as tensões de tração estarem presentes nas folhas metálicas de baixo (lado oposto ao impacto) entre os pinos. Mais uma vez foi notado que os painéis do tipo M-C-M (sem pinos), com o dano do impacto, terminaram o ensaio de flambagem com as folhas metálicas ligeiramente separadas do compósito. Em contrapartida, nos PLMC com pinos, nesta 2^a fase de avaliação, não se percebeu qualquer descolamento das folhas metálicas, mesmo próximo das fraturas. Este fato prova mais uma vez que os pinos efetivamente ancoraram as folhas metálicas ao compósito, mesmo após danos causados por impacto.

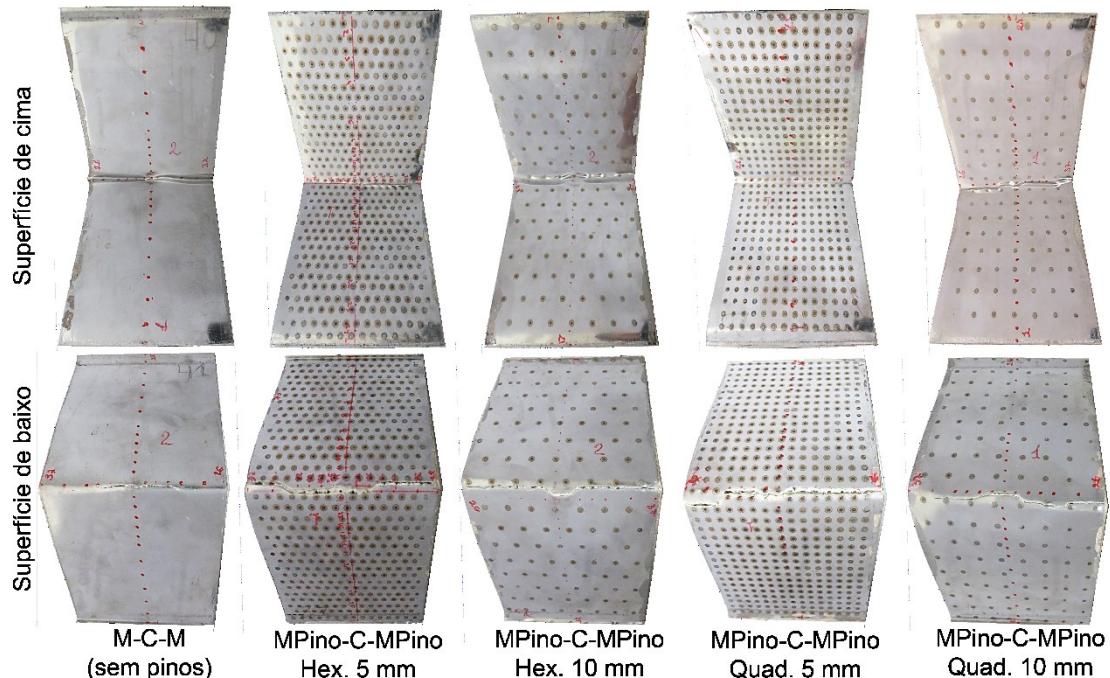


Figura 6.12 – Aspecto típico de todos os tipos de painéis da 2^a fase de avaliação com dano por impacto após o ensaio de flambagem

6.3.4 Ensaio de cisalhamento (losipescu)

A execução dos testes pelo ensaio de cisalhamento losipescu seguiu o mesmo procedimento, equipamentos e preparação dos corpos de prova da 1^a fase de avaliação (Seção 5.3.4 do Capítulo V). O ensaio foi aplicado em cinco corpos de prova retirados de cada um dos cinco tipos de painéis laminados da 2^a fase de avaliação. As dimensões médias dos corpos de prova fabricados e os resultados do ensaio são mostrados na Tabela 6.2.

A Figura 6.13 apresenta o aspecto típico de corpos de prova dos PLMC antes e após o ensaio de cisalhamento losipescu. As partes (a) e (b) da Figura 6.14 mostram curvas típicas de Deslocamento × Carga e Deslocamento × Carga Específica, respectivamente. Durante a realização dos testes, percebeu-se uma boa repetitividade dos resultados. A Figura 6.15 apresenta diagramas de coluna com os valores médios da carga máxima, deslocamento sob carga máxima e tensão máxima alcançados. Observa-se que os corpos de prova dos painéis ancorados com maior número de pinos (espaçamento de 5 mm), independentemente do seu padrão de deposição, mostraram uma carga média máxima ($\approx 6,61$ kN) maior do que a de todos os demais corpos de prova. Já outros painéis com menor densidade de pinos (espaçamento de 10 mm) exibiram uma carga máxima ($\approx 5,83$ kN) intermediária, independentemente do padrão de deposição, comparando com os PLMC com espaçamento de 5 mm. Finalmente, os

PLMC convencionais (M-C-M (sem pinos)) mostraram menor carga máxima ($\approx 5,04$ kN), aproximadamente 25 % abaixo dos resultados com os corpos de prova dos painéis com espaçamento de 5 mm.

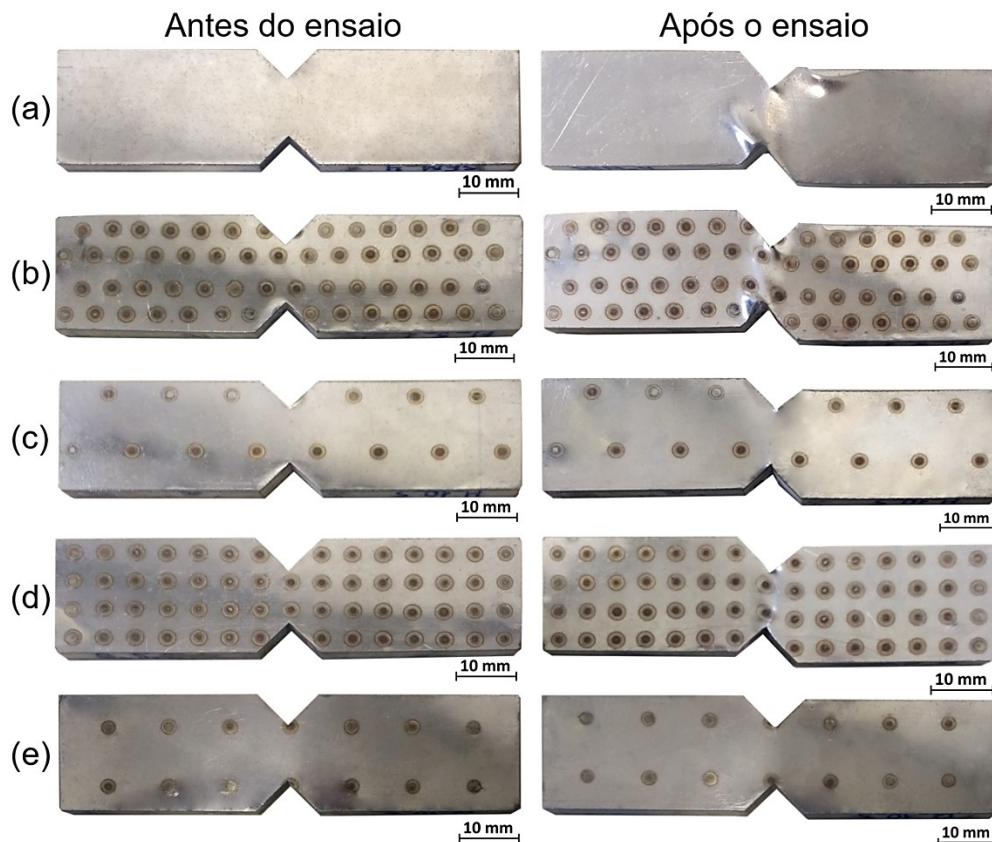


Figura 6.13 – Aspecto típico dos cinco tipos de corpos de prova dos PLMC da 2^a fase de avaliação do ensaio de cisalhamento losipescu antes (à esquerda) e após (à direita), onde: (a) M-C-M (sem pinos); (b) MPino-C-MPino Hexagonal 5; (c) MPino-C-MPino Hexagonal 10; (d) MPino-C-MPino Quadrático 5; (e) MPino-C-MPino Quadrático 10

Tabela 6.2 – Características dos corpos de prova dos painéis laminados da 2^a fase de avaliação do ensaio de cisalhamento losipescu e resultados do ensaio

Tipo de painel	Dimensões dos CP (mm)			Pinos por CP	Massa do CP (g)	Densidade dos CP (g/cm ³)	Fmax (kN)	Deslocamento em F _{max} (mm)	Fmax específica (kN/(g/cm ³))	Tmax (kN/mm ²)
	C	L	E							
M-C-M (sem pinos)	75,88 ± 0,13	19,92 ± 0,05	3,95 ± 0,00	0	17,15 ± 0,07	2,88 ± 0,01	5,04 ± 0,20	2,94 ± 0,27	1,75 ± 0,06	0,106 ± 0,004
MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm	76,23 ± 0,07	19,95 ± 0,05	4,02 ± 0,01	110	19,86 ± 0,17	3,25 ± 0,02	6,48 ± 0,19	2,89 ± 0,51	1,98 ± 0,06	0,134 ± 0,004
MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm	75,74 ± 0,09	19,96 ± 0,03	3,91 ± 0,02	29	17,80 ± 0,07	3,01 ± 0,01	5,89 ± 0,15	3,03 ± 0,17	1,95 ± 0,05	0,126 ± 0,006
MPino-C-MPino Quadrático 5 mm	75,68 ± 0,23	19,98 ± 0,04	4,15 ± 0,01	112	20,22 ± 0,19	3,22 ± 0,02	6,74 ± 0,28	2,81 ± 0,28	2,09 ± 0,08	0,136 ± 0,006
MPino-C-MPino Quadrático 10 mm	76,42 ± 0,09	19,98 ± 0,03	3,95 ± 0,02	29	17,99 ± 0,10	2,98 ± 0,02	5,77 ± 0,14	1,44 ± 0,06	1,93 ± 0,04	0,122 ± 0,003

C = comprimento; L = largura; E = espessura; CP = corpo de prova; Fmax = carga máxima; Tmax = tensão máxima

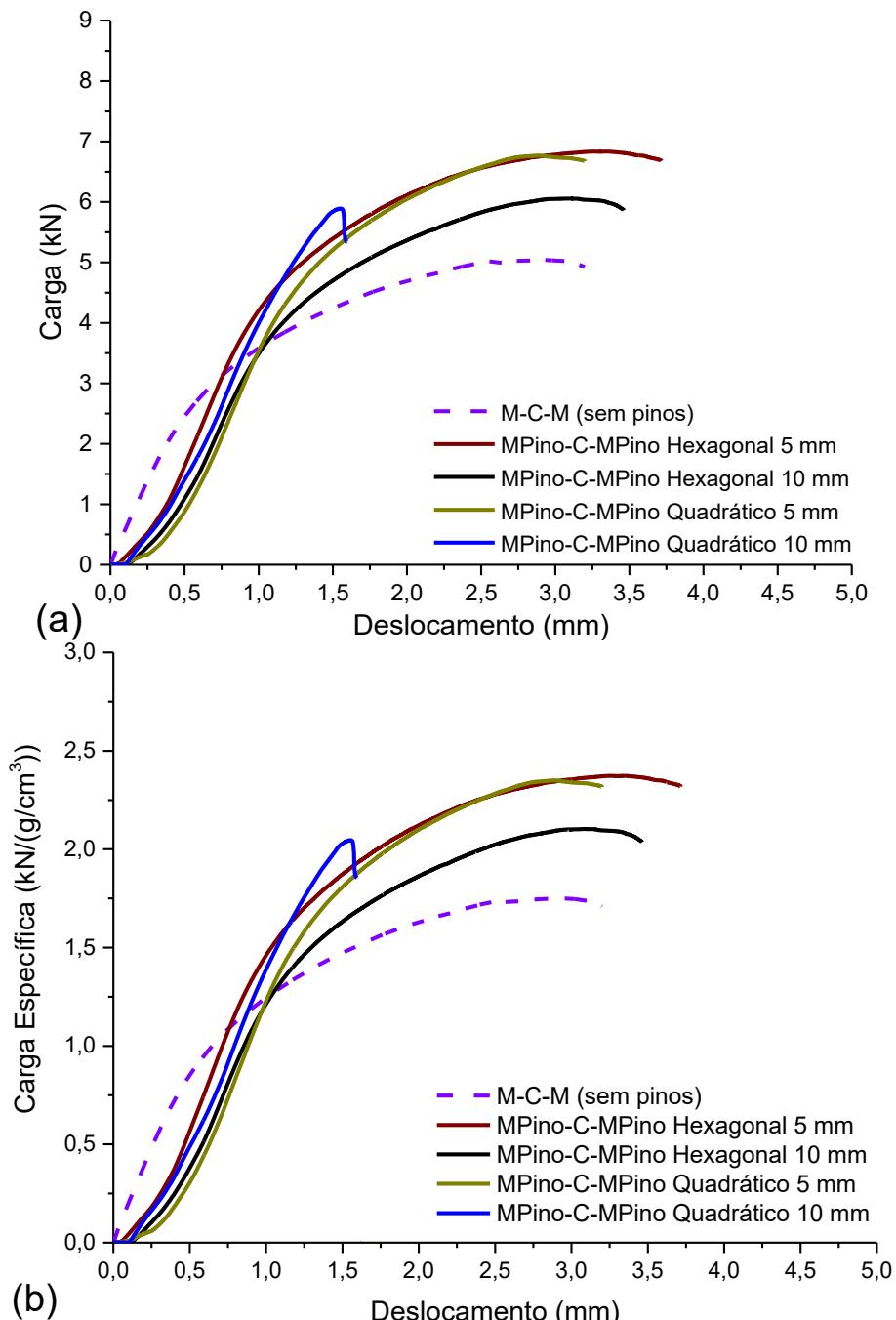


Figura 6.14 – Curvas típicas para cada tipo de painel no ensaio de cisalhamento losipescu da 2^a fase de avaliação, onde: (a) Deslocamento × Carga; (b) Deslocamento × Carga Específica

Como apresenta a Tabela 6.2, a carga específica média dos corpos de prova dos painéis com pinos foi similar ($\approx 2 \text{ kN}/(\text{g}/\text{cm}^3)$), mesmo lembrando que os painéis com espaçamento de 5 mm têm a maior densidade dos pinos. Os corpos de prova do painel M-C-M (sem pinos), por serem mais leves e ao mesmo tempo menos resistentes à força de cisalhamento, apresentaram uma carga específica inferior ($\approx 1,75 \text{ kN}/(\text{g}/\text{cm}^3)$), em comparação com os demais painéis.

Os corpos de prova dos PLMC com pinos alcançaram um deslocamento sob carga máxima de aproximadamente 2,91 mm (Figura 6.15), exceto os corpos de prova do painel MPino-C-MPino Quadrático 10 mm que apresentaram um valor inferior de deslocamento no momento de rompimento ($1,44 \pm 0,06$ mm). Provavelmente, isso aconteceu por causa da posição do pino dentro de ambos os entalhes (Figura 6.13). Como pino ficou rente à borda do vértice do entalhe, pode ter ocorrido concentração de tensão nesta região, rompendo, assim, os corpos de prova deste caso com antecedência e não deixando margem para mais deslocamentos.

Em geral, os painéis com pinos da 2^a fase de avaliação mostraram melhores resultados de carga máxima e específica, demandando maior valor de tensão de cisalhamento para romper. Provavelmente, este resultado foi causado porque o contato entre as folhas metálicas e o compósito dos corpos de prova pinados são mais ancorados. De tal forma, o maior número de pinos (espaçamento de 5 mm) proporcionou uma melhor união entre as folhas metálicas e a camada de compósito, consequentemente mostrando melhores resultados no ensaio. Possivelmente, as falhas nos corpos de prova com pinos seriam menos catastróficas após atingir a carga máxima (após a falha), o que pode ser explorado em trabalhos futuros.

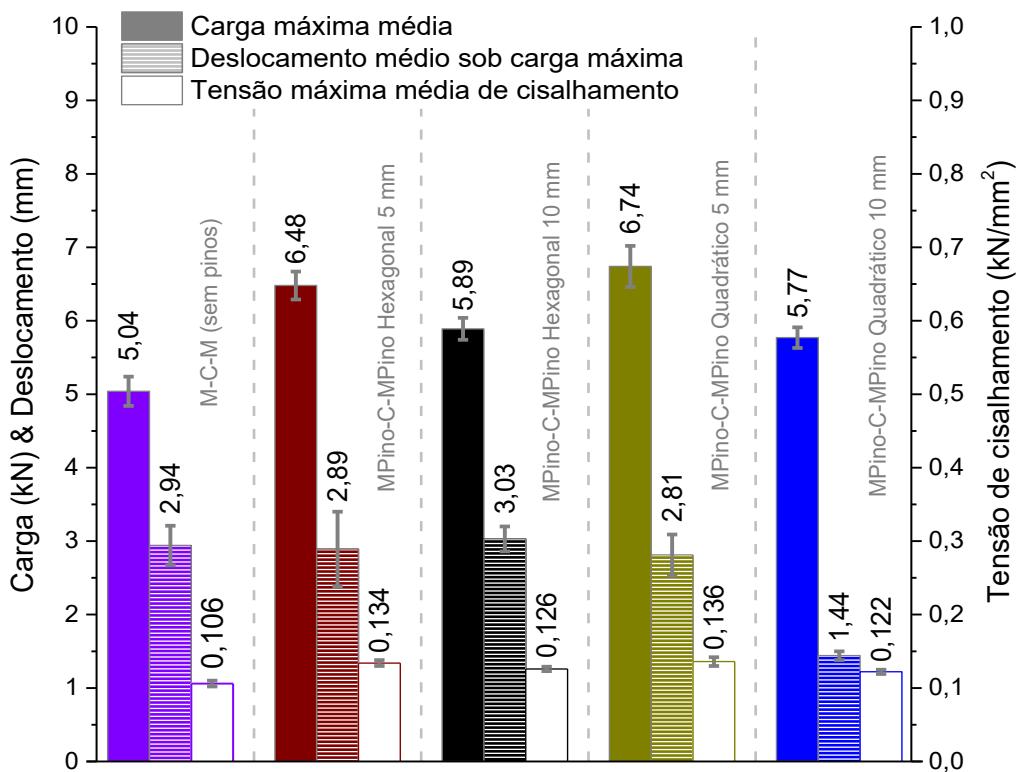


Figura 6.15 – Valores médios obtidos através de 5 medições de carga máxima, deslocamento sob carga máxima e tensão máxima de cisalhamento do ensaio de cisalhamento losipescu da 2^a fase de avaliação

6.3.5 Análise modal dos painéis

Segundo Leme (2014), a análise modal é uma ferramenta utilizada em larga escala para determinar propriedades dinâmicas (frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração) de uma estrutura mecânica por imposição de vibrações (vibração forçada). De acordo com Rao (2008), qualquer movimento de uma estrutura flexível que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração. Este movimento pode ser inferido de forma instantânea ou de forma contínua. A utilização da análise modal se aplica com frequência devido a facilidade de implementação, relativamente de baixo custo, assim, como por ser uma análise não destrutiva.

Segundo Bolina et al. (2014), as frequências naturais (f_n) indicam a taxa de oscilação livre da estrutura, depois de cessada à força que provocou o seu movimento. Em outras palavras, representa o quanto à estrutura vibra quando não há força aplicada sobre a mesma. Vale relembrar que o valor da frequência natural é função direta das relações dos esforços elásticos (rigidez) e inversa da inerciais (massa) da estrutura. Em uma estrutura há diversas frequências naturais podem ser observadas pois ela pode vibrar livremente (após ter sido excitada por uma força) em diversas direções. Na prática, maiores valores de frequência natural indicam que os esforços elásticos são preponderantes aos esforços inerciais. Além disso, sempre quando uma estrutura oscila com uma frequência igual a uma das frequências naturais de vibração desta estrutura, ocorre um fenômeno chamado de ressonância. A ressonância proporciona na estrutura elevadas amplitudes de vibração, podendo ocasionar falhas, por exemplo, a quebra de uma simples taça de vinho. Neste caso, quando a frequência de vibração de uma fonte (onda sonora) coincide com a frequência natural do corpo (taça), a amplitude de oscilação desse corpo atinge valores elevados, pois a fonte progressivamente cede energia ao corpo e acontece quebra da taça se as deformações excederem os níveis suportados pelo material.

No entanto, os níveis de vibração durante uma ressonância podem ser absorvidos/atenuados se houver mecanismos de absorção que possuem elevados fatores de amortecimento presentes na estrutura, por exemplo, amortecedores. Uma estrutura mais amortecida em uma determinada frequência natural consegue absorver/atenuar os níveis de vibrações mais rapidamente. Os fatores de amortecimento (ξ_n) representam os níveis de amortecimento de uma estrutura, que por sua vez são caracterizados para cada uma de suas frequências naturais.

Ao se analisar, para uma determinada frequência natural (movimento periódico) a relação entre os pontos que discretizam a estrutura, obtém-se os modos naturais de vibração. Ou seja, os modos de vibração determinam a forma como a estrutura vibra em uma

determinada frequência natural. Na prática, conhecendo-se as propriedades dinâmicas de uma estrutura, é possível determinar como serão as oscilações de vibração em diferentes posições de medição.

Sendo assim, o objetivo de aplicar análise modal experimental nos PLMC da 2^a fase de avaliação foi o de avaliar, através das respectivas frequências naturais (f_n), fatores de amortecimento (ξ_n) se os pinos presentes nos PLMC são capazes de conferir rigidez ou amortecimento aos painéis. As formas modais dos PLMC não foram avaliadas neste trabalho.

De acordo com Lundkvist (2014), as propriedades dinâmicas estruturais ou parâmetros modais na prática são identificados a partir da FRF (Função Resposta em Frequência). Para obter FRF, os dados que estão no domínio do tempo são transformados para o domínio da frequência, usando a transformada de Fourier, conforme exemplifica a Figura 6.16. Ao mesmo tempo, a partir da resposta do sistema vibrando sob uma condição, determina-se as propriedades modais. Pode-se dizer que a partir das propriedades modais identificadas faz-se a previsão do comportamento dinâmico temporal da estrutura sob quaisquer condições de excitação. Conforme ilustrado na Figura 6.16(d), uma resposta temporal da estrutura contém a participação dos seus modos de vibração, sendo que cada modo de vibração contempla uma frequência natural, fator de amortecimento e forma modal.

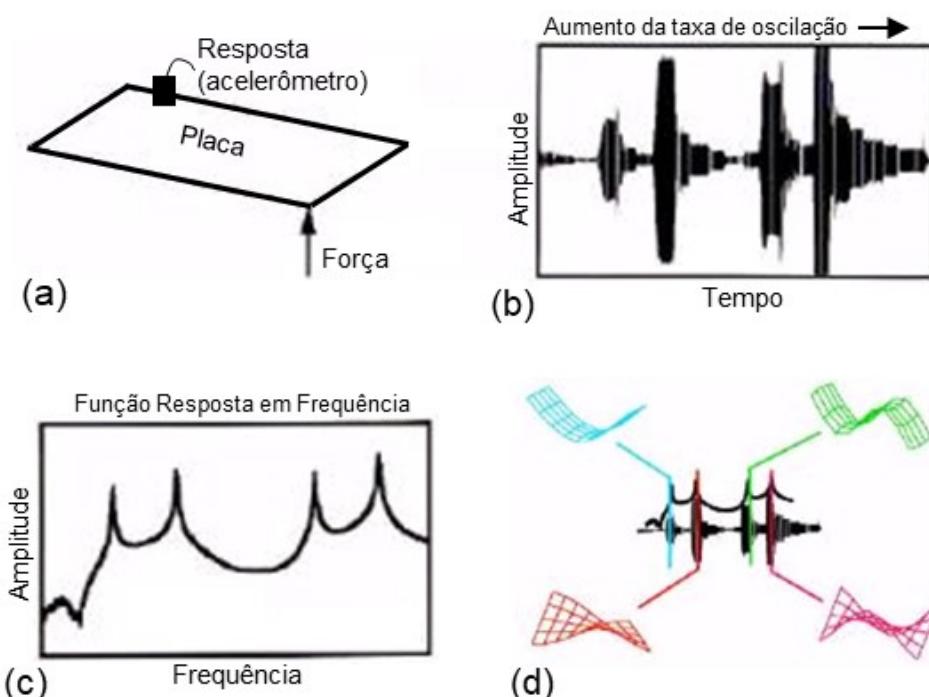


Figura 6.16 – Ilustração de realização da análise modal, onde: (a) Montagem experimental; (b) Resposta da placa no domínio de tempo; (c) Resposta da placa no domínio de frequência (FRF); (d) Sobreposição das respostas e exemplo das formas modais da placa correspondente a cada frequência natural (ressonância) (adaptado de SOEIRO, 2001)

Para se aplicar a análise modal nos painéis, usou-se a bancada experimental apresentada na Figura 6.17, com os equipamentos utilizados para realização das medições Função Resposta em Frequência (FRF) dos painéis para determinar suas propriedades dinâmicas.

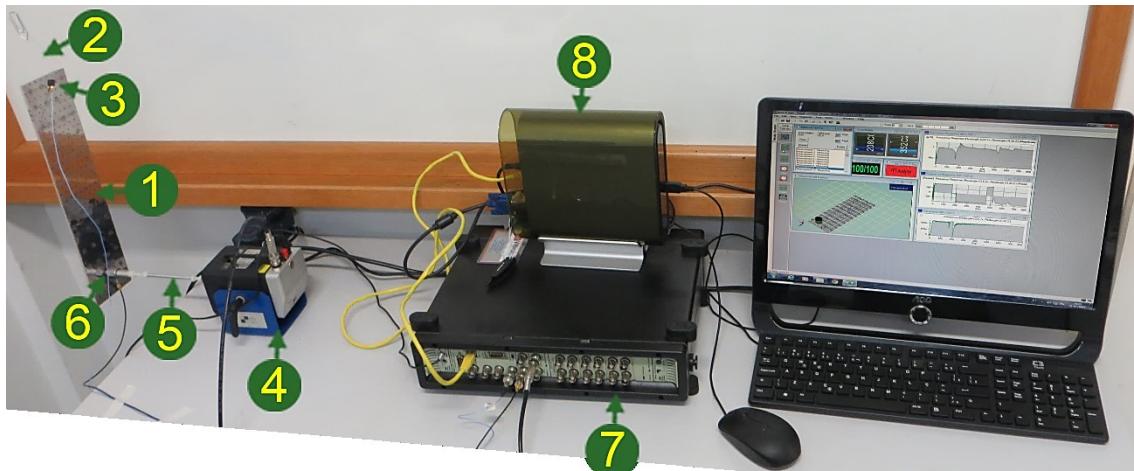


Figura 6.17 – Bancada experimental para realizar análise modal nos PLMC, onde: 1 - painel (objeto de análise); 2 - linha de nylon colada nas bordas do PLMC; 3 - acelerômetro; 4 - excitador eletromagnético (*shaker*); 5 - tubo de conexão entre a célula de carga e o *shaker*; 6 - célula de carga (colada no painel); 7 - sistema de aquisição de dados; 8 - computador para processamento de dados por um software dedicado

Alguns detalhes da montagem da bancada experimental são apresentados a seguir:

- O PLMC é pendurado por meio de uma linha de nylon colada nas bordas laterais do mesmo, formando uma flecha de 60 mm, conforme apresenta a Figura 6.18. Chama-se condição de contorno do tipo “livre-livre” (“free-free”), quando não há apoio ou fixação rígida da estrutura. Desta forma, os PLMC estariam, por esta montagem experimental, em uma condição de contorno “livre-livre”), que foi escolhida por ser relativamente simples de executar e bastante informativa;
- As posições de análise da resposta dinâmica de cada painel foram baseadas em uma malha de 51 pontos, indicados na mesma Figura 6.18;
- O acelerômetro piezoelétrico é modelo 352C22 (S/N LW181487) do fabricante PCB Piezotronics®, fixado em uma posição do PLMC por meio de uma cera específica, que permite a propagação das vibrações entre o painel e o acelerômetro;
- O excitador eletromagnético (*shaker*) é um modelo K2007E01 do fabricante Modal Shop Inc. com função de programar tempo e frequência de vibração para induzir no objeto de análise (painel) através de um tubo de conexão. Neste trabalho, o *shaker* foi programado para produzir um sinal do tipo ruído branco (sinal aleatório com igual intensidade nas diferentes frequências) compreendendo a faixa de

frequência de 0 a 800 Hz afim de encontrar as propriedades dinâmicas da estrutura. A escolha desta faixa de frequência foi feita a partir de um estudo preliminar, no qual encontrou-se os quatro primeiros modos de vibração. Esta banda de frequência determina a composição do ruído branco que será exercido pelo excitador eletromagnético;

- A célula de carga é um modelo 208C03 (S/N LW34448), colada no painel em uma determinada posição, como sugerido pela Figura 6.18;
- O sistema de aquisição de dados é capaz de obter e analisar os sinais do acelerômetro e da célula de carga. Este sistema foi configurado para obter uma resolução em frequência (Δf) de 0,25 Hz e banda de análise compreendida entre 0 (f_{min}) e 800 (f_{max}) Hz. A taxa de aquisição (resolução temporal) dos dados é, então, definida automaticamente pelo sistema de aquisição;
- O software comercial é da Brüel e Kjær, do fabricante Vibrant Technology®, para aquisição e pós-processamento para identificar os parâmetros das propriedades dinâmicas do painel.

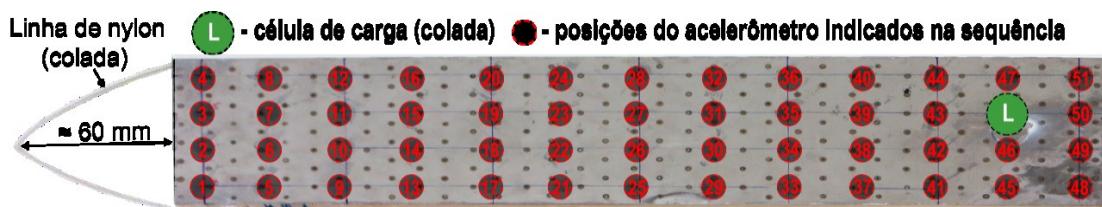


Figura 6.18 – Malha de 51 pontos de posicionamento sequencial do acelerômetro em um PLMC do tipo MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm ($\approx 350 \times 80 \times 4$ mm)

A Figura 6.19 apresenta a curva FRF típica da relação de amplitude e fase (defasagem angular) ao longo do domínio de frequência (de 0 a 800 Hz) entre os sinais de saída (aceleração medida) e entrada (força aplicada), a partir da qual determinou-se as propriedades dinâmicas dos painéis. Neste caso, a fase entre as respostas do acelerômetro (aceleração) e da célula de carga (força) tem papel de confirmar se um pico de ressonância realmente aconteceu ao longo do domínio de frequência. Rao (2008) menciona que a ressonância acontece quando simultaneamente um pico no sinal positivo de amplitude da FRF é observado e quando a fase é próxima ou passa por 90°. Conforme mostra a Figura 6.19, nos quatro picos (modos) da ressonância os sinais da fase claramente alteraram seus valores (para menos), assim, conferindo que os picos de ressonância realmente aconteceram. Ainda o formato dos picos (ressonâncias) indica ainda o nível de amortecimento, pois os picos mais “ovalados” estão associados à elevada presença de amortecimento.

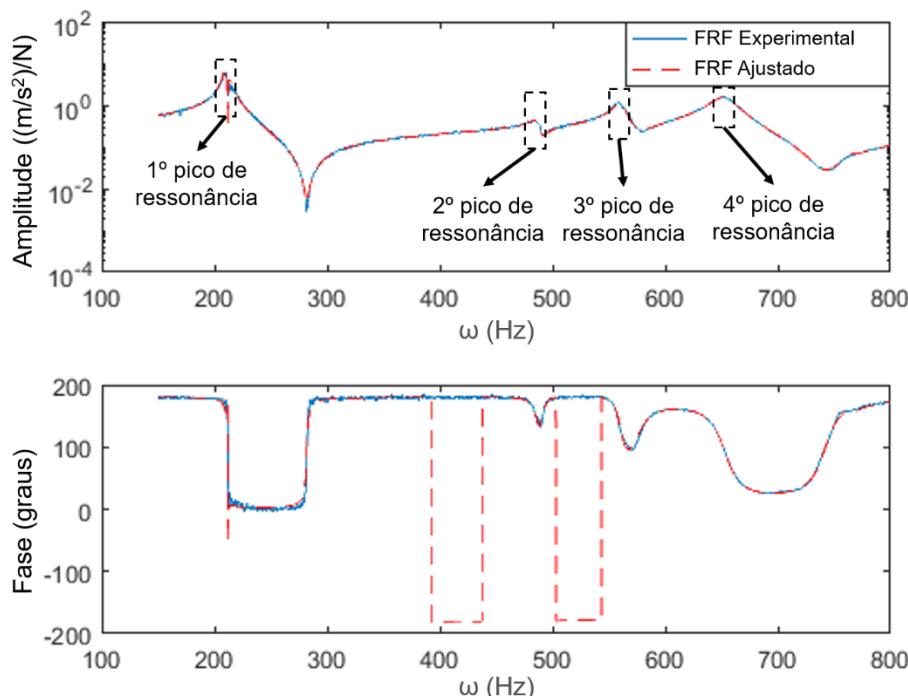


Figura 6.19 – Curvas da amplitude (acima) e da fase (abaixo) avaliadas em uma posição no painel MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm (comportamento semelhante para os demais pontos da malha), onde as linhas sólidas são FRF e as linhas tracejadas são o ajuste realizado pelo método RFP na banda de análise (ω) entre 0 e 800 Hz (nota-se que o ajuste ficou sobreposto a curva experimental para o caso da amplitude)

Para a determinação mais criteriosa e precisa das frequências naturais (f_n) e fatores de amortecimento (ξ_n) de cada modo, utilizou-se o método *Rational Fraction Polinomial* (RFP) (Richardson e Formenti (1982) e Leme (2014)). O método RFP consiste em ajustar uma razão de polinômios às curvas de FRF (amplitude e fase) obtidas experimentalmente. Para este fim, foi desenvolvida neste trabalho uma rotina em ambiente MATLAB® apresentada em apêndice.

As linhas tracejadas da Figura 6.19 apontam o aspecto (típico para todos os painéis analisados) do ajuste realizado pelo método RFP nas curvas experimentais de FRF (amplitude e fase), utilizando um polinômio de 7º grau. Com o ajuste realizado em todas as posições, 51 parâmetros modais de cada painel, a saber, as frequências naturais (f_n) e os fatores de amortecimentos (ξ_n), foram determinados. As linhas sólidas da Figura 6.19 apresentam as curvas de FRF da amplitude e da fase avaliadas em uma dada posição do painel (comportamento semelhante para os demais pontos da malha). Observe-se a partir do gráfico da amplitude da Figura 6.19 a presença de quatro picos (frequências em torno de 200, 480, 560 e 650 Hz), indicando as frequências de ressonância do painel.

A Figura 6.20 e a Figura 6.21 apresentam resultados médios de quatro modos da frequência natural (f_n) e fator de amortecimento (ξ_n), respectivamente, medidos nos 51 pontos da malha de medição. Para facilitar a análise dos resultados, criou-se a Tabela 6.3, a qual compara percentualmente os resultados dos quatro modos de vibração em termos de

frequência natural e fator de amortecimento dos quatro tipos de painéis pinados analisados em relação ao painel convencional (sem pinos).

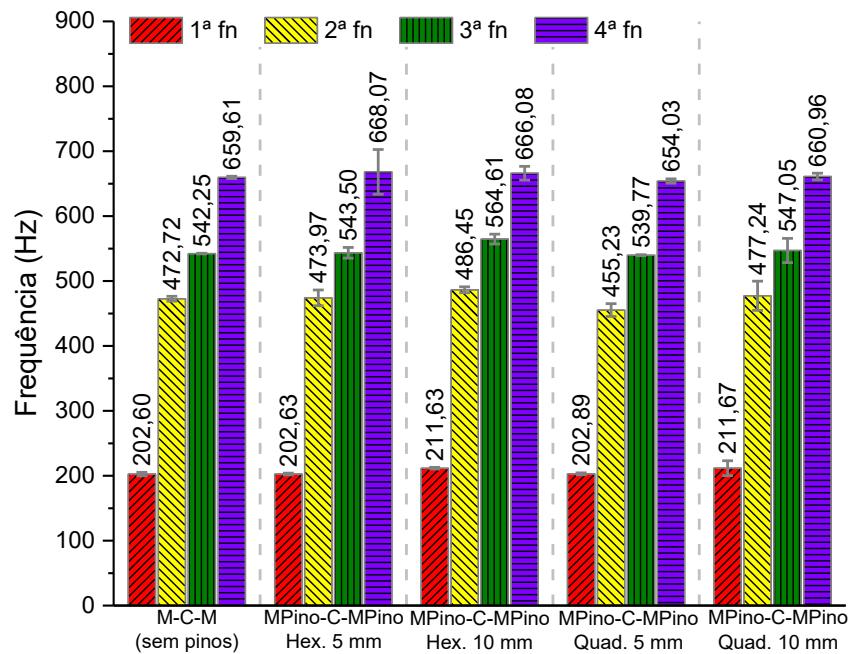


Figura 6.20 – Valores médios dos quatro modos da frequência natural (fn) obtidos por meio de análise modal dos PLMC

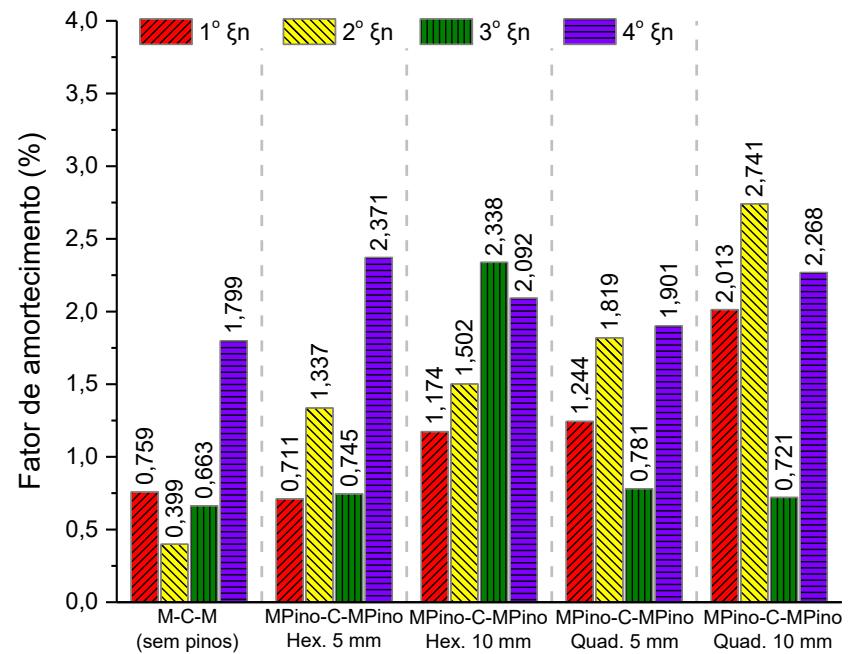


Figura 6.21 – Valores médios dos quatro modos de fatores de amortecimento (ξn) obtidos por meio de análise modal nas quatro frequências naturais dos PLMC

Tabela 6.3 – Mudança percentual dos modos de vibração da frequência natural (Δf_n) e fator de amortecimento ($\Delta \xi_n$) dos painéis pinados em relação ao painel convencional (M-C-M (sem pinos))

Tipo de PLMC	1º modo (%)		2º modo (%)		3º modo (%)		4º modo (%)	
	Δf_n	$\Delta \xi_n$						
MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm	0,02	-6,32	4,46	54,68	0,14	63,90	4,48	165,22
MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm	0,26	235,09	2,90	276,44	-3,70	355,89	0,96	586,97
MPino-C-MPino Quadrático 5 mm	0,23	12,37	4,12	252,64	-0,46	17,80	0,89	8,75
MPino-C-MPino Quadrático 10 mm	1,28	31,80	0,98	16,29	-0,85	5,67	0,21	26,07

Em relação à frequência natural, que representa a relação entre a rigidez e a massa de uma estrutura, é possível perceber que os painéis com pinos não tiveram variação significativa das frequências naturais dos modos de vibração em comparação com os painéis sem pinos (Tabela 6.3). Isso implica que os pinos têm pouco efeito nesta propriedade dinâmica. Porque, provavelmente, apesar do acréscimo de massa proporcionado pela deposição dos pinos em um painel, o aumento da rigidez acontece de maneira proporcional de forma que a frequência natural permanece inalterada (em relação ao painel sem pinos).

Em contrapartida, a presença dos pinos nos PLMC aumentou significativamente o coeficiente de amortecimento (Figura 6.21). A Tabela 6.3 mostra que a presença dos pinos fez aumentar o fator de amortecimento dos PLMC entre 2 a 5 vezes (painéis pinados com espaçamento de 10 mm e padrão de deposição Hexagonal) dependendo do modo de vibração, em comparação com o painel convencional (sem pinos). Provavelmente, isso ocorreu pelo fato de que cada pino ou grupo de pinos age como mecanismo de absorção de energia. Assim, as amplitudes de oscilação são atenuadas mais rapidamente com a presença dos pinos. Esta qualidade poderia ser aproveitada na prática, pois, por exemplo, estariam menos susceptíveis a problemas acústicos em baixas frequências e menos susceptíveis a grande amplitude de vibração. Desta forma, em uma aplicação para veículos aéreos ou terrestres, estes materiais ajudariam na proteção acústica dos passageiros frente a ruídos sonoros externos em uma faixa de operação de 0 a 800 Hz. Outros padrões de deposição e/ou densidade de pinos poderiam ser explorados no sentido de conferir características de isolamento acústico e de amortecimento de vibrações em estruturas baseadas em laminados metal-compósito.

6.3.6 Ensaio de impacto de alta velocidade (balístico)

Ensaios de impacto são abordagens para determinar o quanto um material/estrutura consegue absorver da energia de um objeto de impacto. Existem diversos tipos de ensaios

de impactos, cada um visando simular uma dada condição. Farooq e Myler (2016) classificam os ensaios de impacto conforme a velocidade do objeto de impacto. Como ilustra a Figura 2.41 do Capítulo II, esses autores citam as classes de ensaio “quase-estático”, “de baixa velocidade”, “de velocidade intermediária”, “de alta velocidade” (também conhecidos como “de balística”) e “de hipervelocidade”. O ensaio de impacto de alta velocidade (balístico), em particular, é uma abordagem para saber como um determinado material/estrutura consegue absorver energia de um objeto de impacto (projétil). Este tipo de ensaio é aplicado principalmente em materiais aplicáveis em defesa, por exemplo, coletes, escudos, blindagens de veículos, etc. Ainda segundo Farooq e Myler (2016), no ensaio de alta velocidade (balístico) o objeto de impacto (projétil) atinge uma velocidade entre 100 m/s a 1 000 m/s e na maioria das vezes penetra o corpo de prova especificado para o ensaio.

Existem diversos documentos normativos (ABNT NBR 15000 (ABNT, 2005), NIJ Standard 0108.01 (NIJ, 1985), etc.) que regulam o procedimento de execução do ensaio de alta velocidade (balístico). A montagem experimental consiste basicamente de um aparelho ou uma arma para acelerar um objeto (projétil) que impacta contra um corpo de prova e um sistema para medir a velocidade (energia) do projétil (cronógrafos com sensores a LASER ou infravermelho, câmeras de alta velocidade, etc.), conforme ilustra a Figura 6.22 ou a Figura 2.43(b) do Capítulo II. Na literatura encontra-se dois tipos de equipamento para acelerar o projétil (objeto de impacto) até uma faixa de velocidade (energia) de impacto desejada. O primeiro tipo utiliza um sistema pneumático (Randjbaran et. al. (2014), Godzimirski et al. (2015), Sorrentino et al. (2015), Zhang et al. (2016) e Kaboglu et al. (2018)). O outro tipo usa armas de fogo (Resnyansky e Katselis (1993), Pramanik e Mantena (2012) e Yilmazcoban e Doner (2015)).

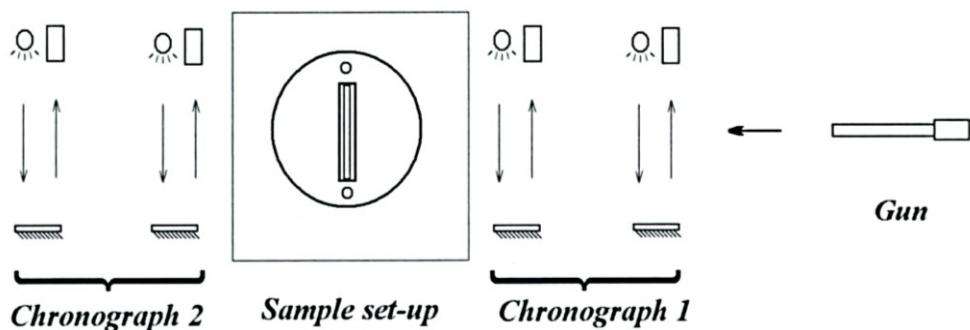


Figura 6.22 – Elementos típicos de uma bancada experimental para ensaio de impacto de alta velocidade/balístico (RESNYANSKY e KATSELIS, 1993)

Neste trabalho, procurou-se avaliar a capacidade de absorção de energia dos PLMC através do ensaio de impacto de alta velocidade (balístico). O objetivo foi verificar a influência dos pinos presentes nos PLMC em termos de capacidade de absorver a energia balística.

Optou-se por usar armas de fogo com diferentes calibres para disparar projéteis, por considerar este método mais representativo, utilizando para isso munições de padrão comercial com diferentes níveis de energia.

A Figura 6.23 apresenta a bancada experimental (não normatizada) criada para ensaio de alta velocidade (balístico) nos PLMC com seus elementos. A arma de fogo (posição 1) foi fixada por meio de uma morsa mecânica (posição 2) presa sobre um suporte de aço (posição 3), especialmente fabricado para esta finalidade. Montado desta forma, o conjunto compõe uma estativa balística que permitiu realizar todos os disparos sempre sob as mesmas condições. Como pode ser observado na Figura 6.23(a), o suporte da morsa possui um eixo auxiliar vertical com uma roldana ajustável em altura para a passagem de uma corda (posição 4) que permite acionar o gatilho remotamente. Somado a estas medidas de segurança, a região logo abaixo do corpo de prova (posição 5), posicionados para serem impactados pelos disparos, foi circundada por sacos de areia (posição 6). Os corpos de prova em si foram cobertos por uma proteção metálica robusta em sua parte superior (posição 7) para proporcionar, simultaneamente, a necessária e completa proteção contra ricochetes (inteiros ou fragmentados) e a rapidez e praticidade na substituição dos corpos de prova ensaiados. Desta forma, ficou garantida a segurança em torno da área de disparo.

Antes de efetuar o disparo, a arma foi corretamente apontada para o centro do corpo de prova por um atirador devidamente habilitado, mantendo a distância entre a saída do cano da arma até o corpo de prova inalterada de 1,1 m. Atrás do suporte de fixação do corpo de prova, a 0,3 m de distância, foi posicionado um cronógrafo digital (posição 8 da Figura 6.23) modelo ProChron Digital da marca Competition Electronics® (ilustrado pela Figura 6.24(a)) para medição das velocidades dos projéteis que conseguissem atravessá-los (e, consequentemente, das energias residuais). O princípio de funcionamento do cronógrafo se baseia na medição do tempo que leva para um projétil percorrer uma distância fixa entre os sensores de luz infravermelha de entrada e de saída do aparelho, conforme ilustrado na Figura 6.24(b). O cronógrafo utilizado possui uma faixa de medição de velocidade de 6,4 a 2 133,6 m/s. É importante destacar que todas as etapas do ensaio experimental foram realizadas nas dependências de uma estante de tiro esportivo homologado pelo Exército Brasileiro (Clube de Tiro Uberlândia), de forma a garantir a total segurança de todos os envolvidos.



Figura 6.23 – Vistas gerais da bancada experimental utilizada para o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) nos PLMC, onde: 1 - arma (pistola/revólver); 2 - morsa mecânica; 3 - suporte de aço; 4 - corda de disparo; 5 - corpo de prova; 6 - sacos de areia; 7 - proteção metálica contra ricochetes; 8 - cronógrafo digital

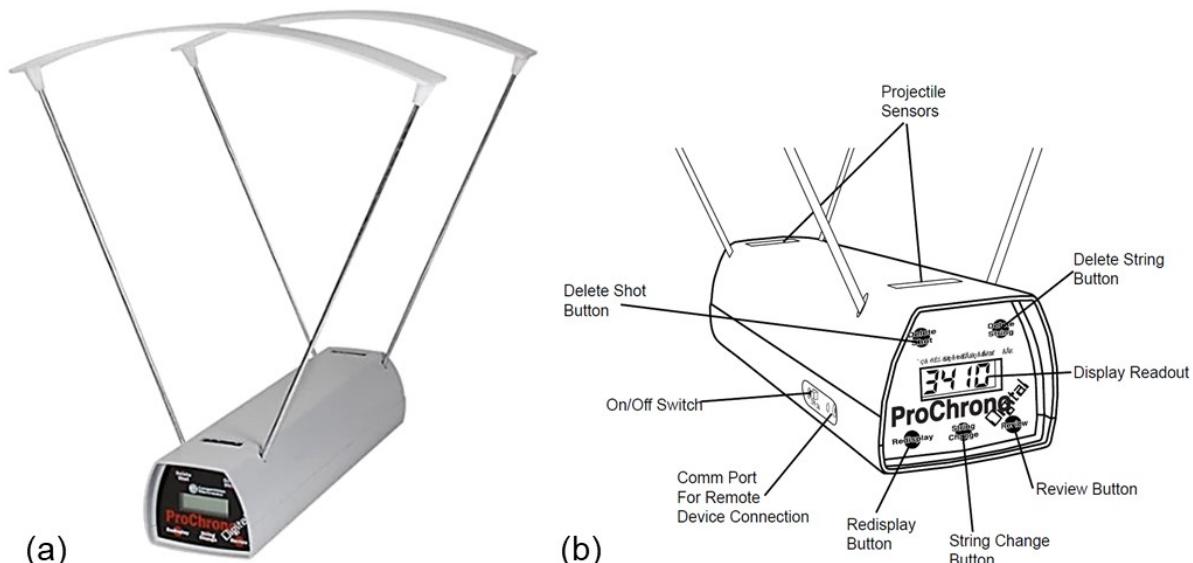


Figura 6.24 – Cronógrafo digital utilizado para medição das velocidades dos projéteis durante o ensaio de alta velocidade (balístico), onde: (a) vista geral; (b) ilustração de alguns elementos (MANUAL DE INSTRUÇÕES PROCHRONE DIGITAL, 2015)

Os corpos de prova para o ensaio de alta velocidade/balístico foram obtidos a partir de cortes transversais (dimensões de $80 \times 80 \times 4$ mm) dos PLMC, como apresentado na Figura 6.25. As demais características dos corpos de prova dos PLMC utilizados no ensaio de alta velocidade (balístico) estão na Tabela 6.4.

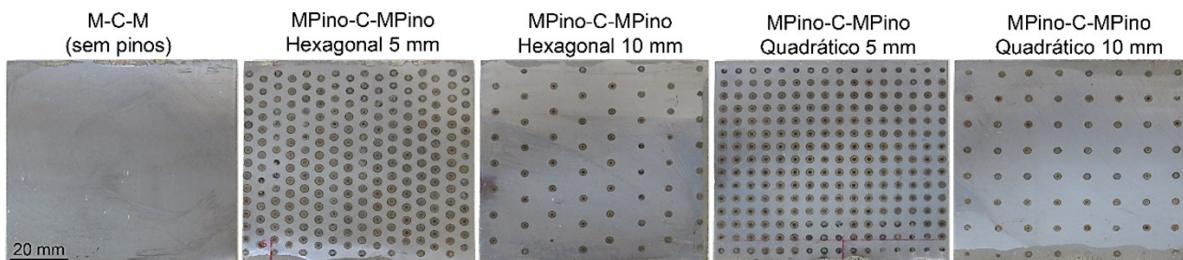


Figura 6.25 – Vista frontal dos corpos de prova utilizados no ensaio de alta velocidade (balístico)

Tabela 6.4 – Características dos corpos de prova para o ensaio de alta velocidade (balístico)

Tipo de painel	Dimensões de CP (mm)			Pinos por CP	Densidade dos pinos (pino/cm ²)	Densidade de CP (g/cm ³)
	C	L	E			
M-C-M (sem pinos)	79,93 ± 0,25	80,03 ± 0,27	3,93 ± 0,02	0	0	3,0
MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm	79,79 ± 0,09	79,89 ± 0,10	4,02 ± 0,02	460	3,61	3,4
MPino-C-MPino Hexagonal 10 mm	79,89 ± 0,14	79,93 ± 0,02	3,93 ± 0,00	120	0,94	3,1
MPino-C-MPino Quadrático 5 mm	80,01 ± 0,23	79,98 ± 0,23	4,09 ± 0,01	464	3,63	3,3
MPino-C-MPino Quadrático 10 mm	79,91 ± 0,22	79,91 ± 0,25	3,97 ± 0,00	120	0,94	3,1

CP = corpo de prova; C = comprimento; L = largura; E = espessura; tipo de pino utilizado = cabeça abaulada; quantidade de lâminas de pré-impregnado no compósito = 13

Durante a execução dos testes, foram utilizadas cinco armas de fogo curtas (pistolas e revólveres) de diferentes calibres (.22, .38, 9 mm, .40 e .45) para disparar seis tipos de munições padrão comercial (.22 LR Stinger / EXPO, .38 SPL +P+ GOLD / EXPO, .380 AUTO / ETOG, 9 mm / ETOG, .40 S&W / ETTP e .45 AUTO / ETOG), ilustradas na Figura 6.26. O objetivo do uso de diferentes munições (diferentes velocidades de impactos, massas e formatos) foi o de variar as energias de impacto dos projéteis e observar a absorção das mesmas nos PLMC. Características dessas munições são apresentadas a seguir:

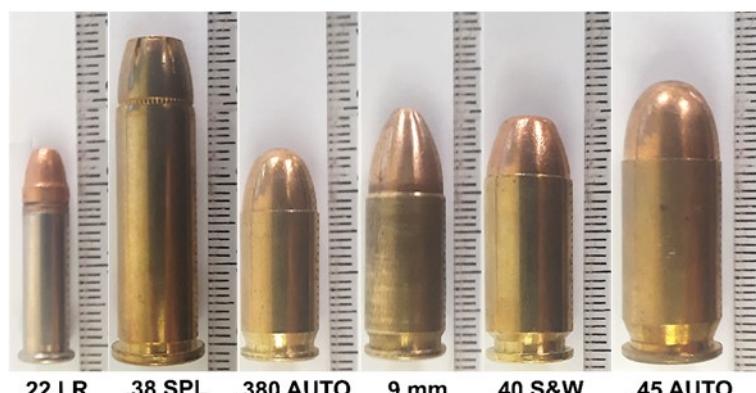


Figura 6.26 – Tipos de munição utilizados no ensaio de alta velocidade (balístico) (divisão de escala em 1 mm)

- Calibre .22 LR (*Long Rifle*), modelo Stinger, marca CCI Ammunitions®, projétil EXPO (Expansivo Ponta Oca) 32 gr. (2,074 g). Esta munição representa a opção de maior energia neste calibre. Apesar de ser considerado como um calibre pequeno e, a princípio, inadequado para fins de defesa, o .22 LR em suas versões de alta energia mantém suas características de ser altamente preciso, penetrante e capaz de causar ferimentos importantes devido à sua propriedade de mudar de trajetória quando atinge um alvo orgânico. Desta forma, considera-se importante a análise da proteção balística proporcionada perante este calibre;
- Calibre .38 SPL (*Special*), modelo +P+ Gold, marca CBC® (Companhia Brasileira de Cartuchos), projétil EXPO 125 gr. (8,010 g). O calibre .38 SPL é o mais utilizado para defesa e segurança privada com aplicação em revólveres. Ele possui características intrínsecas de boa precisão e grande diversidade de níveis de energia e configurações de projétil, de forma que sua representatividade quanto à proteção balística é bastante relevante;
- Calibre .380 AUTO (*Automatic*), modelo standard, marca CBC®, projétil ETOG (Encamisado Total Ogival) 95 gr. (6,156 g). Segundo o Art. 17 do Decreto 3.665/2000 da legislação do Brasil, o calibre .380 AUTO é o maior calibre classificado como permitido no Brasil para uso em pistolas semiautomáticas. Ele possui características intrínsecas de boa precisão e grande diversidade de níveis de energia e configurações de projétil;
- Calibre 9 mm, modelo standard, marca CBC®, projétil ETOG 124 gr. (8,035 g). Este calibre é de uso restrito e conhecido por sua utilização em pistolas e submetralhadoras de aplicação militar e policial. Suas principais características são as pequenas dimensões da munição e a elevada velocidade de deslocamento do projétil, que proporciona trajetória tensa (plana e de alta velocidade), elevada energia, capacidade de penetração e poder de incapacitação. Ao mesmo tempo permite desenvolver armas de tamanho reduzido, mas com grande capacidade em termos da quantidade de munição que se pode inserir em seus carregadores (tipicamente 19 unidades). Neste caso, foi utilizada munição 9 mm standard com projétil encamisado total e ogiva pontiaguda (Figura 6.26);
- Calibre .40 S&W (*Smith & Wesson*), modelo standard, marca CBC®, projétil ETTP (Encamisado Total Ponta Plana) 180 gr. (11,664 g). O calibre .40 S&W é de uso restrito no Brasil e representa uma opção moderna que vem se destacando como extremamente eficiente para utilização policial e esportiva. Sua evolução se baseou no fato de que o calibre 9 mm apresenta ótimas características balísticas, mas possui duas deficiências quando em uso policial. A primeira é o fato de ser muito

penetrante, o que no caso do uso policial pode representar um risco de atingir seriamente pessoas que estiverem posicionadas atrás do alvo. A segunda diz respeito ao pequeno diâmetro do projétil; mesmo com alta energia e capacidade de penetração, ocorrem situações onde a incapacitação do alvo (interrupção de sua capacidade de agredir) não é imediata. Nestas situações, a capacidade de incapacitação (poder de parada) fica muito dependente do uso de projéteis expansivos. Ainda se destaca que o calibre .40 S&W surgiu como uma excelente solução de compromisso entre o 9 mm e o .45 AUTO. Ele possui um projétil de diâmetro intermediário (10 mm) impulsionado a altas velocidades. Desta forma, ele se apresenta com elevada energia, capacidade de penetração moderada, ótimo poder de parada e permite uso de armas de grande capacidade (tipicamente 16 unidades) em tamanho regular;

- Calibre .45 AUTO (*Automatic*), modelo standard, marca CBC®, projétil ETOG 230 gr. (14,904 g). O calibre .45 AUTO é um clássico do uso militar que também é de uso restrito no Brasil e apresenta ótimas características balísticas, tais como, elevada energia e alto poder de parada mesmo com projéteis ogivais. Sua principal deficiência pode ser atribuída às grandes dimensões do projétil, que faz com que a capacidade dos carregadores das armas regulares seja relativamente pequena (tipicamente 8 unidades) ou que sejam necessárias armas de grandes dimensões e difícil dissimulação para comportar um carregamento maior (tipicamente 14 unidades).

Durante os testes, cada um dos seis tipos de munição foi disparado contra uma amostra de cada um dos cinco diferentes tipos de PLMC. Por se trabalhar com apenas um cronógrafo, a velocidade de entrada de cada projétil foi determinada por disparos sem utilização de obstáculos. Sabendo a diferença entre os valores de velocidade imediatamente após passar pelo obstáculo (painel) e sem obstáculo e a massa do projétil, foi calculada a absorção da energia cinética devido ao impacto contra os corpos de prova (PLMC). Neste trabalho, essa energia é apresentada também como energia específica (em relação à densidade de cada painel). As Figura 6.27 a Figura 6.32 apresentam os aspectos das superfícies frontal (entrada do projétil) e posterior (saída do projétil) dos corpos de prova após os testes e os respectivos perfis, em função da munição. A Tabela 6.5 apresenta os resultados compilados.

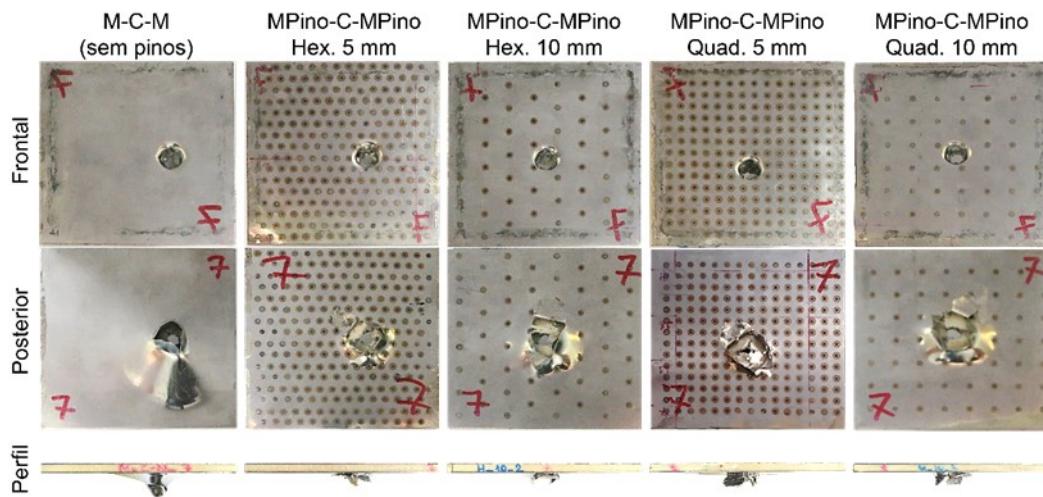


Figura 6.27 – Aspecto dos corpos de prova dos PLMC após o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) com munição .22 LR Stinger / EXPO (2,074 g) da fabricante CCI®

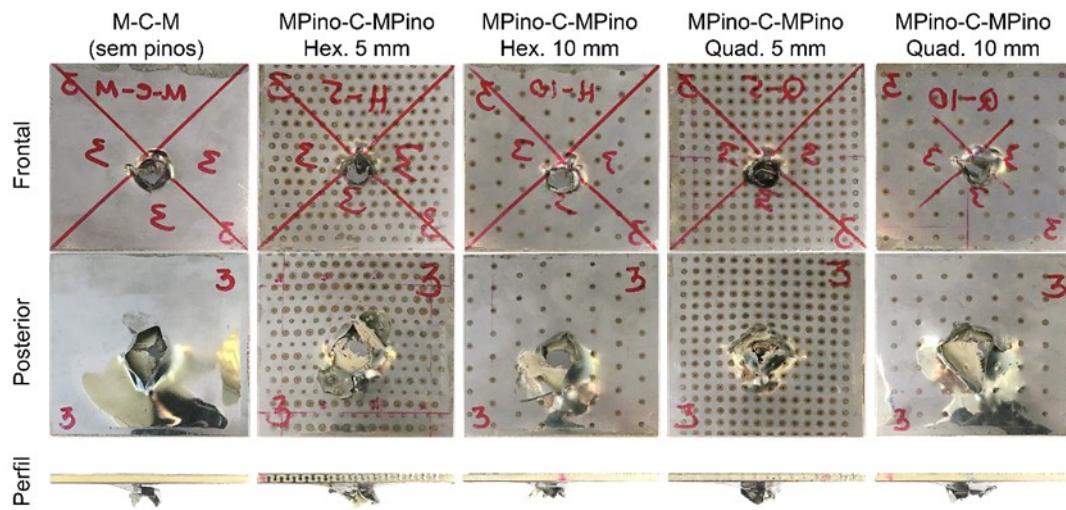


Figura 6.28 – Aspecto dos corpos de prova dos PLMC após o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) com munição .38 SPL +P+ GOLD / EXPO (8,010 g) da fabricante CBC®

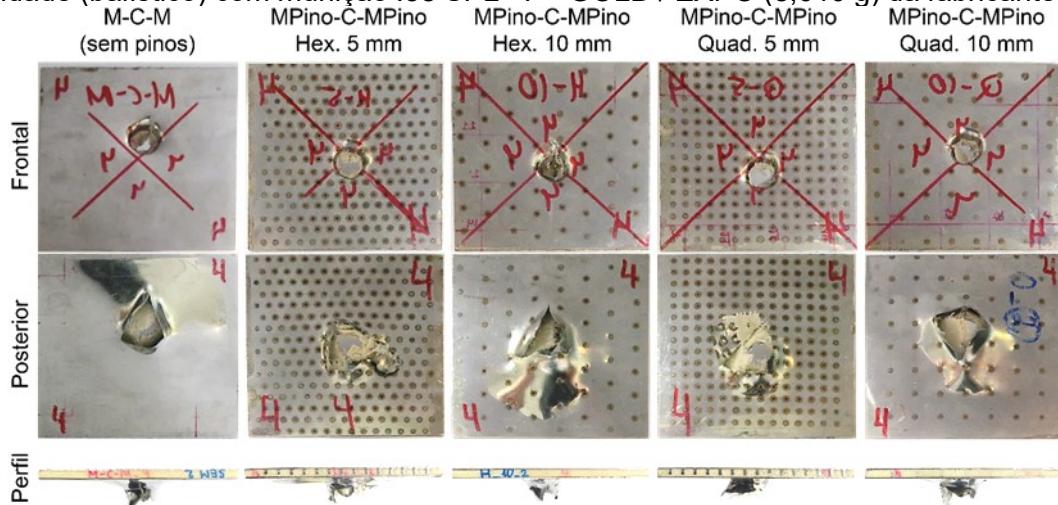


Figura 6.29 – Aspecto dos corpos de prova dos PLMC após o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) com munição .380 AUTO / ETOG (6,156 g) da fabricante CBC®

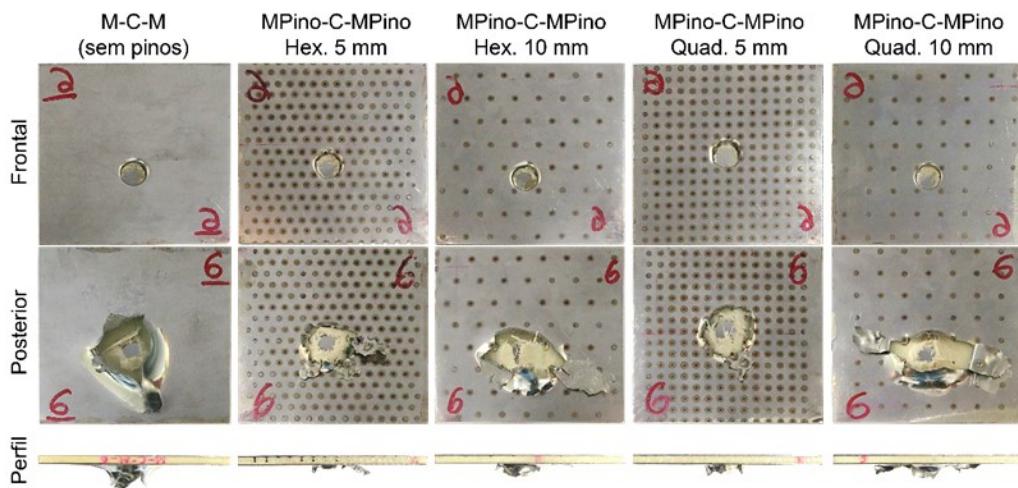


Figura 6.30 – Aspecto dos corpos de prova dos PLMC após o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) com munição 9 mm / ETOG (8,035 g) da fabricante CBC®

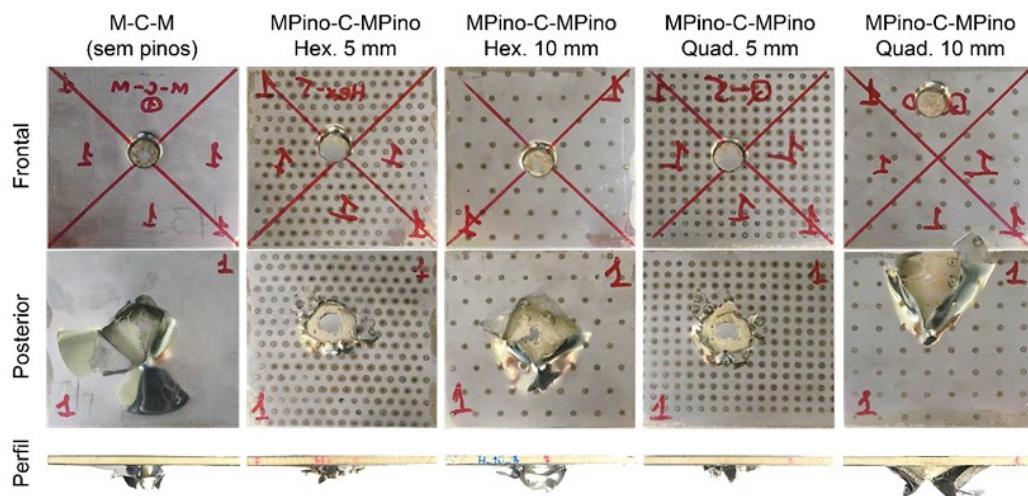


Figura 6.31 – Aspecto dos corpos de prova dos PLMC após o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) com munição .40 S&W / ETTP (11,664 g) da fabricante CBC®

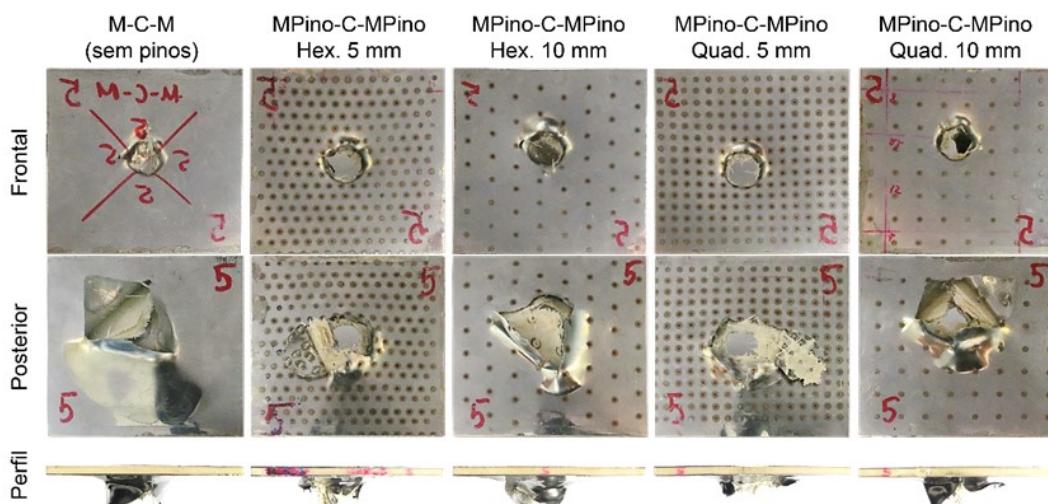


Figura 6.32 – Aspecto dos corpos de prova dos PLMC após o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) com munição .45 AUTO / ETOG (14,904 g) da fabricante CBC®

Tabela 6.5 – Velocidades de saída do projétil e energias absorvidas total e específica para os diferentes tipos de PLMC em função das munições utilizadas

Tipo de projéteis	Tipo de painel	Velocidade de saída (m/s)	Energia absorvida (J)	Energia absorvida específica (J/(g/cm³))
.22 LR Stinger / EXPO (2,074 g)	<i>Com velocidade de entrada de 409,50 m/s e energia de entrada de 173,86 J</i>			
	M-C-M (sem pinos)	122,53	85,38	28,75
	MPino-C-MPino Hexa. 5 mm	147,22	71,32	21,29
	MPino-C-MPino Hexa. 10 mm	0	173,86	55,90
	MPino-C-MPino Quad. 5 mm	0	173,86	52,53
	MPino-C-MPino Quad. 10 mm	0	173,86	55,72
.38 SPL +P+ GOLD / EXPO (8,010 g)	<i>Com velocidade de entrada de 301,75 m/s e energia de entrada de 364,67 J</i>			
	M-C-M (sem pinos)	195,99	44,80	15,08
	MPino-C-MPino Hexa. 5 mm	154,84	86,44	25,80
	MPino-C-MPino Hexa. 10 mm	137,46	108,10	34,76
	MPino-C-MPino Quad. 5 mm	102,41	159,14	48,08
	MPino-C-MPino Quad. 10 mm	111,86	144,41	46,29
.380 AUTO / ETOG (6,156 g)	<i>Com velocidade de entrada de 280,72 m/s e energia de entrada de 242,56 J</i>			
	M-C-M (sem pinos)	137,46	63,17	21,27
	MPino-C-MPino Hexa. 5 mm	110,64	89,03	26,58
	MPino-C-MPino Hexa. 10 mm	121,01	78,51	25,24
	MPino-C-MPino Quad. 5 mm	82,30	121,19	36,61
	MPino-C-MPino Quad. 10 mm	100,58	99,88	32,01
9 mm / ETOG (8,035 g)	<i>Com velocidade de entrada de 369,63 m/s e energia de entrada de 531,21 J</i>			
	M-C-M (sem pinos)	301,45	15,53	5,23
	MPino-C-MPino Hexa. 5 mm	294,13	19,40	5,79
	MPino-C-MPino Hexa. 10 mm	299,92	16,30	5,24
	MPino-C-MPino Quad. 5 mm	279,20	28,64	8,65
	MPino-C-MPino Quad. 10 mm	299,92	16,30	5,22
.40 S&W / ETPP (11,664 g)	<i>Com velocidade de entrada de 301,14 m/s e energia de entrada de 528,88 J</i>			
	M-C-M (sem pinos)	236,83	24,12	8,12
	MPino-C-MPino Hexa. 5 mm	211,23	47,15	14,07
	MPino-C-MPino Hexa. 10 mm	224,03	34,68	11,15
	MPino-C-MPino Quad. 5 mm	221,89	36,63	11,07
	MPino-C-MPino Quad. 10 mm	215,49	42,78	13,71
.45 AUTO / ETOG (14,904 g)	<i>Com velocidade de entrada de 242,93 m/s e energia de entrada de 439,77 J</i>			
	M-C-M (sem pinos)	124,66	108,02	36,37
	MPino-C-MPino Hexa. 5 mm	114,60	126,82	37,86
	MPino-C-MPino Hexa. 10 mm	92,05	174,46	56,10
	MPino-C-MPino Quad. 5 mm	128,93	100,49	30,36
	MPino-C-MPino Quad. 10 mm	135,94	88,73	28,44

É importante ressaltar que nos testes a munição .22 LR Stinger / EXPO, o projétil, que possui menor energia de impacto (173,86 J), transfixou todos os tipos de corpos de prova. Porém, em apenas duas situações foi possível medir a velocidade do projétil após o corpo de prova (M-C-M (sem pinos) e MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm). Esta ocorrência pode ser atribuída à possibilidade de desvio de trajetória do projétil após transfixar o alvo ou mesmo à fragmentação do mesmo que, segundo esta hipótese, não reteve massa suficiente para ser registrada pelo cronógrafo. O esclarecimento acerca de qual possibilidade realmente representa a realidade só poderia ser obtido através do uso de uma câmera de alta

velocidade. Já os projéteis das demais munições testadas conseguiram transfixar os painéis e passar pelo cronógrafo, possibilitando obter a velocidade de saída dos mesmos.

Como era esperado a munição calibre 9 mm / ETOG transfixou todos os corpos de prova sem dificuldade, de tal forma, que todos os painéis absorveram menos energia de impacto. Mas apesar da pouca absorção energética ao atravessar os corpos de prova, percebe-se que os PLMC com pinos absorveram mais energia que o painel convencional (sem pinos). No caso específico do painel MPino-C-MPino Quadrático 5 mm, a energia absorvida foi praticamente o dobro daquela absorvida pelo painel convencional M-C-M (sem pinos). Ainda o M-C-M (sem pinos) apresentou um descolamento maior da folha metálica posterior (superfície de saída do projétil), como mostra a Figura 6.30, em comparação com os demais painéis pinados.

Da Figura 6.33 e da Figura 6.34 é possível notar que, em geral, os corpos de prova dos painéis pinados conseguem absorver uma energia maior de impacto. Para o painel do tipo MPino-C-MPino Quadrático 5 mm e munição .38 SPL +P+ GOLD / EXPO foi possível absorver até 4 vezes mais energia do projétil em relação ao painel convencional. A análise visual dos corpos de prova após o impacto de alta velocidade com todas as munições testadas permitiu observar falta de descolamento da folha metálica posterior (superfície de saída do projétil) em todos os painéis, exceto no painel M-C-M (sem pinos), como mostram as Figura 6.27 a Figura 6.32. Isso evidencia que os pinos ajudam a evitar a delaminação entre a parte metálica e compósita, assim como ocorreu no caso dos testes de flambagem após o ensaio de impacto de baixa velocidade (Seção 6.3.2) e comprovado pelos testes de cisalhamento (Seção 6.3.3). Em termos específicos, ou seja, considerando a densidade dos painéis com e sem pinos, não houve efeito significativo, ficando a ordem de desempenho inalterada. Isso indica que o pequeno acréscimo de massa pela presença dos pinos não foi capaz de alterar os resultados.

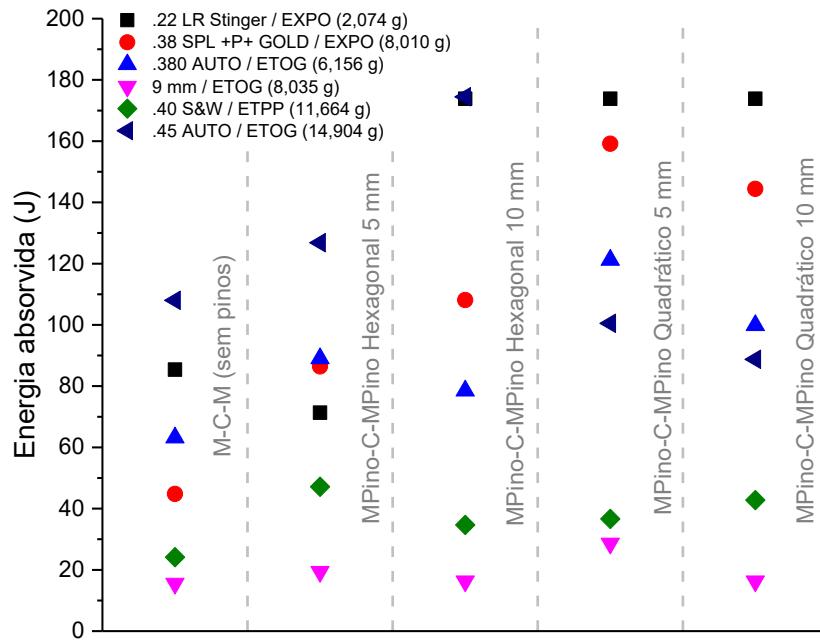


Figura 6.33 – Valores de energia absorvida após o impacto de alta velocidade (ensaio balístico) para as diferentes munições e tipos de PLMC

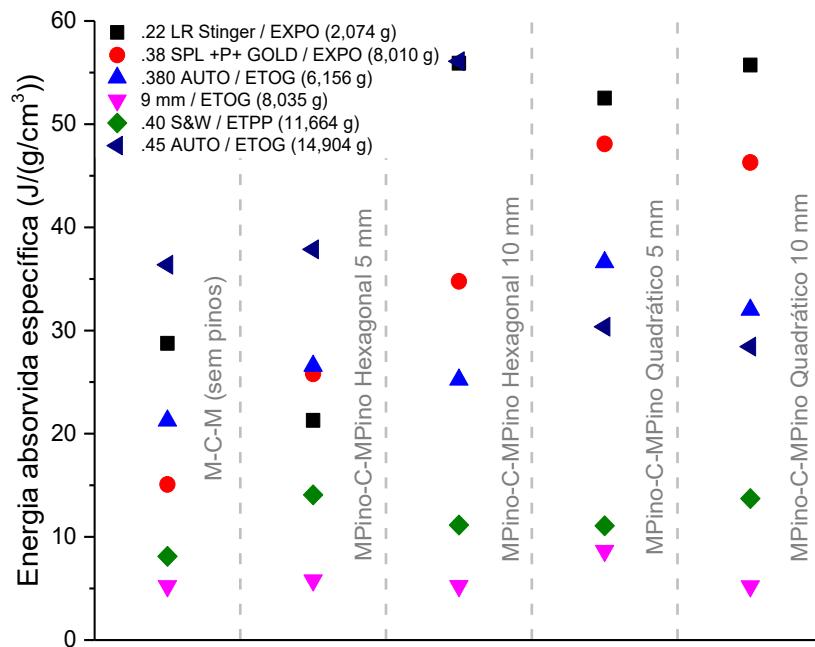


Figura 6.34 – Valores de energia absorvida após o impacto de alta velocidade (ensaio balístico) para as diferentes munições e tipos de PLMC

Da Figura 6.33 e da Figura 6.34 observa-se uma mínima influência da quantidade de pinos (densidade) por painel sobre a absorvação da energia de impacto de alta velocidade. Mas os painéis com padrão de deposição Quadrático apresentaram melhores resultados em termos de absorvação de energia em relação aos de padrão Hexagonal na maioria dos casos.

Este resultado está, provavelmente, relacionado com o fato do padrão Quadrático proporcionar uma melhor ancoragem dos pinos dentro da camada de compósito e, consequentemente, uma maior resistência e distribuição da carga de impacto.

Dos testes balísticos realizados com os seis diferentes tipos de munições, um painel pinado absorveu maior quantidade de energia contra as munições .22 LR Stinger / EXPO, .38 SPL +P+ GOLD / EXPO e .380 AUTO / ETOG em comparação com o painel convencional (sem pinos). O que poderia indicar que esse conjunto de características da munição de calibres menores testados (até .38), consequentemente menores energias de impacto (até \approx 350 J), e do tipo Expansivo Ponta Oca (EXPO) e/ou Encamisado Total Ogival (ETOG) é promissor em termos de maior absorção de energia de impacto balístico contra os painéis com pinos.

6.4 Avaliação de características “cosméticas” dos painéis

Fontes bibliográficas (Laliberte et al. (2000), Marsh (2004) e Botelho et al. (2006)) destacam que a maior parte dos Laminados Metal-Compósito (LMC), devido as suas vantagens, são utilizados em aeronaves modernas, tais como, fuselagem, asas, etc. Os PLMC são utilizados como fabricado ou após aplicação de pintura. Neste contexto, a qualidade da superfície torna-se um fator relevante. Dessa forma, o objetivo desta seção de trabalho foi avaliar a influência da deposição dos pinos nas características consideradas “cosméticas” da superfície metálica dos PLMC, através da mensuração de ondulação e rugosidade da superfície, de forma comparativa a um PLMC sem pinos (painel convencional). Destaca-se que a expressão “características cosméticas” é utilizada em aplicações industriais quando se quer caracterizar aspectos que não interferem com o desempenho estrutural do componente, mas apenas com o acabamento, que para certas aplicações possui importância.

Nestes termos, foram medidas a ondulação e a rugosidade das superfícies metálicas opostas à região dos pinos dos cinco tipos de painéis ilustrados na Figura 6.3 da Seção 6.1, sendo quatro com e um sem pinos (convencional). Lembrando que se utilizou dois padrões de deposição de pinos distintos, o Hexagonal e o Quadrático, com dois valores diferentes para o espaçamento entre os pinos (5 e 10 mm).

A Figura 6.35 apresenta uma vista de um PLMC reforçado com pinos, onde é possível perceber as marcas escuras na superfície metálica, as quais representam os pinos depositados do lado oposto da folha metálica. Estas marcas se caracterizam por uma deformação localizada (pico e vale) e uma acentuada oxidação induzida pelo calor da soldagem dos pinos (o efeito cosmético da oxidação poderia ser evitado com aplicação de purga com gás inerte ou redutor), ou seja, um efeito termomecânico. A deformação localizada

se deve ao modo operacional do CMT PIN, que deposita os pinos por processo de arco (efeito térmico), criando uma pequena poça de fusão, mas não atingindo o lado oposto. Em seguida, a ponta do arame-eletrodo penetra na poça, possivelmente alcançando o fundo da mesma e empurando a superfície da folha metálica, deformando-a (efeito mecânico), caracterizando o pico no centro da marca (para fora do painel). Em seguida, a corrente é desligada e o arame se solidifica na superfície da folha metálica. Depois, é imposta uma corrente do arame soldado para a folha metálica (curto-círcuito), promovendo o aquecimento por efeito Joule do mesmo, e um movimento de retração do arame para rompê-lo e formar um pino. Acredita-se, que esta retração do arame deforma a folha metálica, criando um vale concêntrico ao pico (para dentro do futuro painel). Concorrentemente, algum efeito de expansão e contração também pode ocorrer, mas de forma secundária.

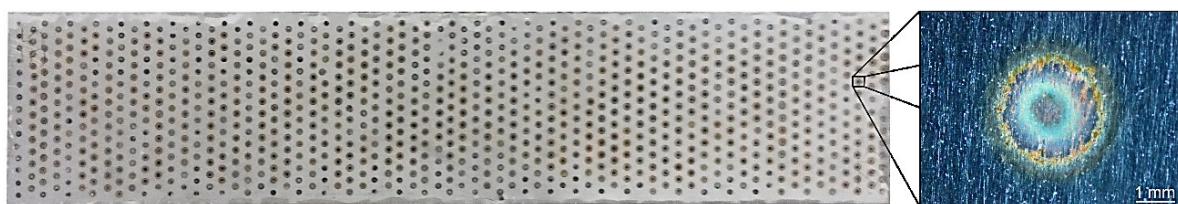


Figura 6.35 – Exemplo das marcas escuras na superfície externa da chapa metálica do PLMC (MPino-C-MPino Hexagonal 5 mm com dimensões $\approx 350 \times 80 \times 4$ mm), causadas pelo processo de deposição dos pinos

Para realizar as medições da ondulação e da rugosidade das superfícies, foi utilizado um perfilômetro Taylor Hobson® modelo Form Talysurf Intra com resolução de 16 nm numa faixa de medição de 1 mm. Foram fixados os parâmetros de medição, tais como, velocidade de medição igual a 0,25 mm/s, comprimento de medição igual a 10 mm, temperatura ambiente de 20 ± 2 °C (norma ABNT NBR NM ISO 1, 1997) e valor de comprimento de amostragem “*cut-off*” igual a 0,8 mm (determinado conforme a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008) em função da rugosidade do material). Lembrando que o valor de “*cut-off*” representa um segmento de comprimento de medição, usado em algumas representações de medições da rugosidade. É importante destacar que nas medições dos painéis com pinos, a ponteira do perfilômetro foi posicionada para somente medir sobre algumas das regiões de marcas deixadas pela deposição dos pinos (acrescidas de 2 a 3 mm de cada lado), cruzando-as radialmente. Nos painéis sem pinos, escolheu-se áreas de mesma dimensão. Para fins estatísticos, foram analisadas três amostras de superfícies para cada tipo de painel, escolhidas aleatoriamente. Em todos os casos, foram determinados os perfis de ondulação (escala macrogeométrica) e os perfis de rugosidades (escala microgeométrica) das regiões avaliadas.

A Figura 6.36(a) e (b) apresenta os perfis de ondulação típicos das superfícies de painéis com e sem pinos, respectivamente, e ilustra a região medida associada. A quantificação da ondulação foi feita a partir das distâncias máximas entre o pico e o vale da ondulação (ΔZ da Figura 6.36(a)) de cada marca do pino depositado. Observou-se que o pico máximo do perfil de ondulação de superfície está localizado no centro do pino depositado na superfície oposta da folha metálica e os dois picos mínimos, aparecem deformando a superfície ao redor do pino, conforme a Figura 6.36(a). Como os pinos são feitos com os mesmos parâmetros, os valores de ΔZ são próximos, resultando num valor médio de $26,92 \pm 2,35 \mu\text{m}$. Para fins de comparação, o mesmo critério foi aplicado no PLMC sem pinos, portanto sem ondulação por efeito térmico, resultando em uma média $1,40 \pm 0,40 \mu\text{m}$.

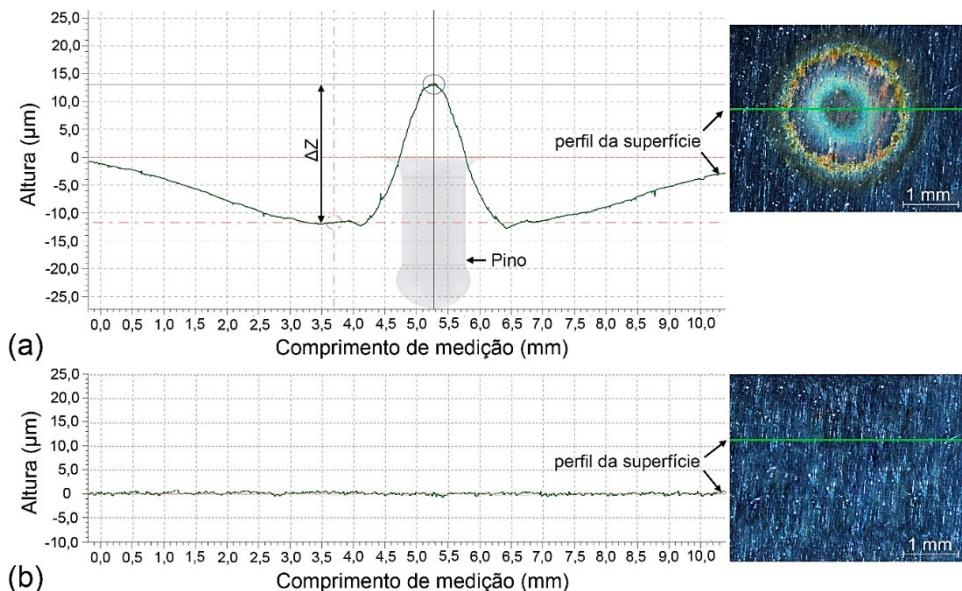


Figura 6.36 – Perfis típicos de ondulação superficial de PLMC, onde: (a) Com pinos (mostrando ondulação acentuada); (b) Sem pinos (sem ondulação)

A Figura 6.37 mostra os resultados médios das rugosidades média (R_a), média parcial (R_z) e total (R_t) das regiões amostradas das superfícies dos painéis. Lembrando que R_a é a média aritmética dos valores absolutos dos picos de rugosidade em relação a uma linha média, dentro do comprimento de medição. R_z é definido como o maior valor das rugosidades (picos), ou seja, rugosidade medida em segmentos definido pelo “*cut-off*”, que se apresenta no percurso de medição. Finalmente, R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição, obtidos dentro dos segmentos definidos pelo “*cut-off*”. Estas representações de rugosidades foram escolhidas baseadas nos estudos de De Chiffre et al. (2000) *apud* De Chiffre (1999), que demonstrou os parâmetros mais utilizados na indústria.

Os resultados mostram que todos os tipos de painéis com pinos têm aproximadamente os mesmos valores de rugosidades R_a , R_z e R_t (considerando-se o desvio padrão médio). Porém, a deposição dos pinos promoveu um aumento de rugosidade nas regiões das marcas, em relação ao painel convencional. Assim, concluiu-se que a técnica de deposição dos pinos CMT PIN, através do seu princípio termomecânico (arco elétrico com avanço e recuo do arame), altera o perfil da superfície de uma folha metálica (0,4 mm de espessura) de AISI 430 no local dos pinos, mas apenas em escala microscópica (em pouco menos do que 30 μm em termos de ondulação e em pouco mais de 0,20 μm em termos de rugosidade). Desta forma, a eliminação da coloração por processo de purga durante a disposição dos pinos já retira em grande parte as desvantagens da aplicação dos pinos.

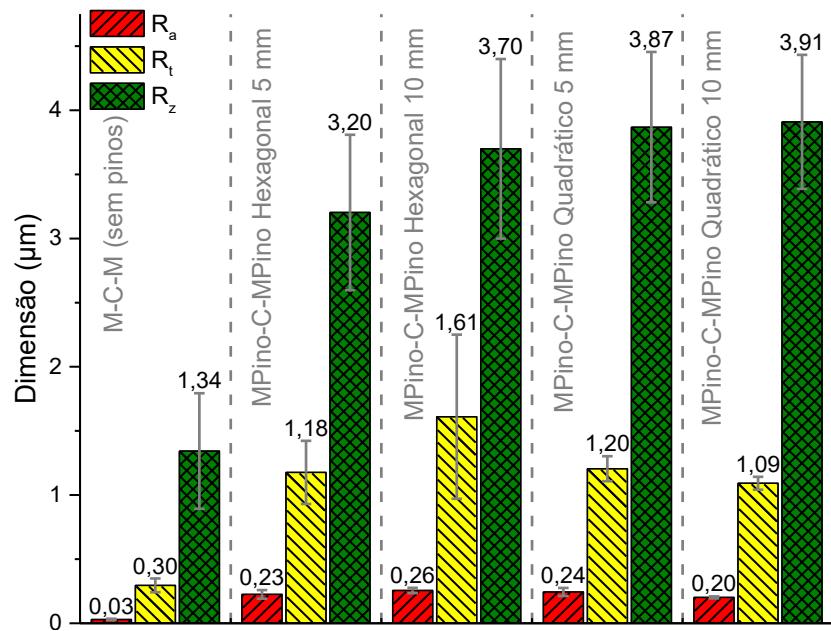


Figura 6.37 – Valores de R_a (média), R_z (média parcial) e R_t (total) obtidos nas superfícies de PLMC

6.5 Discussão parcial dos resultados da 2^a fase de avaliação e comparação com os da 1^a fase

- Durante a 2^a fase de avaliação conseguiu-se fabricar os PLMC convencionais (sem pinos) e com pinos (ancoradores) com espessura muito próxima e com mesmo número de lâminas de pré-impregnado do compósito, o que foi garantido com o uso de espaçadores de espessura durante a etapa de montagem (prensagem e cura) dos painéis. Em comparação com a 1^a fase de avaliação, a espessura dos painéis da 2^a ficou mais homogênea sem necessidade de alteração de número de lâminas de pré-impregnados, mesmo com uma elevada densidade dos pinos (espaçamento de 5 mm);

- O ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo *Drop-Weight Test* demonstrou que a presença de pinos (ancoradores) nos PLMC não parece ter efeito significativo sobre a capacidade de absorção de energia de impacto. Esses resultados são coerentes com os da 1^a fase. Ou seja, o padrão de deposição (Hexagonal ou Quadrático) e a densidade (número) dos pinos, para uma espessura dos PLMC de 4 mm e com o mesmo número de lâminas de pré-impregnado no compósito, apresentou efeito similar aos PLMC convencionais (sem pinos) sobre a capacidade dos painéis para absorver a energia de impacto. Mas, por outro lado, os pinos, mais uma vez e pelo menos para as condições de impacto aplicadas, não tornaram os PLMC mais frágeis ou sensíveis ao impacto. Os resultados de ambas as fases de avaliação apresentaram uma tendência de aumento do nível de deformação permanente máxima conforme o aumento da densidade de pinos em um PLMC. Ainda, durante a 2^a fase de avaliação, observou-se um efeito de redução da deformação permanente máxima quando o objeto de impacto (cabeça esférica do impactador) atinge a região da superfície com o pino depositado ou bem próxima dele;
- Também, assim como na 1^a fase, os PLMC pinados testados na 2^a fase de avaliação apresentaram maior tolerância ao dano causado pelo ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test*. Mesmo com a maior energia de impacto e diâmetro da cabeça esférica do impactador utilizados na 2^a fase (40 J e 28,5 mm) em relação à 1^a (35 J e 17,0 mm), os PLMC com pinos apresentaram um comportamento menos catastrófico, ainda suportando maiores cargas durante todo o ensaio de flambagem. Assim, fica reforçada a hipótese de que os pinos dentro dos PLMC criaram um mecanismo de tolerância ao dano causado por impacto de baixa velocidade;
- Os PLMC com pinos na 2^a fase de avaliação, tal como ocorreu na 1^a fase, apresentaram uma redução de delaminação na interface metal-compósito. Mais uma vez este efeito justifica a razão pela qual os PLMC com pinos apresentaram uma maior resistência ao cisalhamento avaliada pelo ensaio de cisalhamento de losipescu em relação aos painéis convencionais (sem pinos), já que os pinos conseguem ancorar a união metal-compósito nos painéis. É importante destacar que os PLMC com maior número de pinos (espaçamento de 5 mm), avaliados somente na 2^a fase, independentemente do padrão de deposição, apresentaram maiores cargas máximas e deslocamentos no momento de falha em comparação com menor número de pinos (espaçamento de 10 mm). Lembrando que na 1^a fase de avaliação o maior número de pinos até então testado (espaçamento de 10 mm) não resultou em diferença significativa nos resultados de resistência ao cisalhamento se comparado com o menor número de pinos avaliado (espaçamento de 20 mm);
- Na 2^a fase de avaliação, tanto no ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test* quanto no de cisalhamento de losipescu, notou-se que os pinos modificam localmente as

propriedades dos PLMC. Isso ficou evidenciado quando o objeto de impacto de baixa velocidade atingiu a superfície do painel bem próxima à posição de um pino e quando o entalhe de um corpo de prova do tipo losipescu terminou justamente na posição de um pino; em ambos os casos os resultados foram discrepantes em relação à tendência então observada. Assim, pode-se inferir que uma quantidade maior de pinos, dentro de um certo limite prático, também torna o material mais homogêneo em termos de propriedades mecânicas;

- Da análise modal, realizada somente na 2^a fase de avaliação, por meio dos quatro modos de frequência natural obtidos, a presença dos pinos nos PLMC não resultou em aumento significativo de rigidez. Tem-se, neste caso, provavelmente dois fatores atuando em sentidos opostos; por um lado a presença dos pinos levaria a um aumento de rigidez pela ação de ancoramento entre metal e compósito, mas por outro a maior densidade dos painéis com pinos é um fator redutor de rigidez como em qualquer estrutura. Entretanto, a presença dos pinos nos PLMC aumentou significativamente o fator de amortecimento, absorvendo mais a onda vibratória aplicada. A simples deposição dos pinos foi capaz de diminuir em até cerca de 5 vezes (para alguns modos de ressonância) a propagação das vibrações em uma baixa frequência (de 0 a 800 Hz);
- Do ensaio de impacto de alta velocidade (balístico), realizada apenas na 2^a fase de avaliação, e executado com armas curtas (revólveres e pistolas) com seis tipos de munições de padrão comercial em diferentes níveis de energia, verificou-se que os PLMC com pinos conseguem absorver maior quantidade de energia dos projéteis do que os PLMC convencionais (sem pinos). O fator preponderante para este desempenho foi o padrão de deposição, com vantagem para o Quadrático em relação ao Hexagonal, e não a quantidade (densidade) de pinos. A vantagem do padrão de distribuição Quadrático pode ser relacionada a um melhor intertravamento entre metal e compósito que ocorre quando os pinos da folha metálica de cima são posicionados deslocados em relação a posição dos pinos da folha de baixo. Isso deixa os pinos em média mais próximos um dos outros e, assim, promove uma maior distribuição e melhor absorção do impacto pelos painéis;
- Finalmente, também de análise realizada somente a partir da 2^a fase de avaliação, verificou-se que a técnica de deposição de pinos CMT PIN altera o perfil da superfície das folhas metálicas dos painéis no local dos pinos apenas em escala microscópica. Além disso, ocorre uma termoxidação nessas regiões, o que não chega a ser um problema pois este inconveniente poderia ser evitado/minimizado por meio de aplicação de gás de purga (proteção suplementar à utilizada junto ao arco elétrico e inerte).

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o uso de ancoradores (pinos) depositados pela técnica CMT PIN em estruturas do tipo Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMC), como forma de melhorar suas propriedades. No presente caso em estudo, os PLMC foram compostos de folhas de aço AISI 430 com 0,4 mm de espessura e lâminas de pré-impregnado de fibra de vidro/epóxi comercial. No estudo, usou-se painéis em tamanho reduzido (miniaturizados) e se fez comparações com painéis convencionais. Nas comparações, utilizou-se dois padrões de deposição (Hexagonal ou Quadrático) e 3 níveis de densidade dos pinos (espaçamento de 5, 10 e 20 mm).

Como decorrência de ensaios propostos e aplicados para avaliar o comportamento dos painéis experimentais quando submetidos a esforços (normais e cisalhantes), a capacidade de absorver energias sob impacto (baixa e alta velocidades) e se os pinos induzem amortecimento aos painéis, as conclusões encontradas foram:

- Os painéis com pinos, em geral, tiveram resistência similares à flambagem, e até menor resistência à flexão, quando comparados com o painel convencional (sem pinos). Entretanto, os PLMC com pinos apresentaram falhas menos catastróficas e obtiveram maior resistência ao cisalhamento;
- A presença dos pinos nos painéis PLMC (com pinos) não mostrou efeito significativo sobre a capacidade de absorção de energia durante o ensaio de impacto de baixa velocidade do tipo *Drop-Weight Test*. Portanto, considerando-se as condições de impacto aplicadas, os PLMC não se tornaram mais frágeis ou sensíveis devido à presença de pinos. Por outro lado, os PLMC com pinos conseguiram absorver mais energia durante o ensaio de impacto de alta velocidade (balístico);
- A análise modal mostrou que os ancoradores (pinos) não influenciaram os valores das frequências naturais dos PLMC. Por outro lado, a presença dos pinos nos PLMC aumentou significativamente os valores do coeficiente de amortecimento, capacitando esses painéis para reduzir vibrações e ruídos na estrutura;

- Os diferentes padrões de deposição (Hexagonal ou Quadrático) e densidade dos pinos (espaçamento de 5, 10 e 20 mm) nos PLMC mostram tendências não uniformes sobre seus efeitos frente aos esforços em função dos tipos de ensaios. Sob flexão (ensaio de dobramento a três pontos) e cisalhamento (ensaio losipescu), o aumento do espaçamento entre os pinos (menor densidade dos pinos) tendeu a aumentar o valor de deslocamento (flecha) possível no momento da falha, mas resultou em menor resistência ao cisalhamento. Os painéis com padrão de deposição Quadrático apresentaram melhores resultados em termos de absorção de energia em relação aos de padrão Hexagonal na maioria dos casos quando submetidos ao ensaio de impacto com alta velocidade (balístico), independentemente dos seus espaçamentos, mas não mostrou influenciar os resultados no ensaio com baixa velocidade (*Drop-Weight Test*);
- A deposição de pinos por soldagem em folhas metálicas, usando-se a técnica CMT PIN, mostrou-se exequível, sem alterações superficiais significativas das paredes externas dos painéis, embora com leve acréscimo de densidade dos PLMC;
- O presente trabalho contribuiu em termos de possibilidade de aumento de eficiência de acoplamento entre metal e compósito em painéis laminados, com maior resistência ao cisalhamento. Ao mesmo tempo, revelou-se uma metodologia de aplicação dos pinos nos PLMC que pode ser aplicada em diferentes materiais metálicos, por exemplo, aqueles amplamente utilizados na indústria aeronáutica ou em estruturas leves em geral. Além disso, é importante destacar que os painéis miniaturizados não representam uma estrutura real e, assim, acredita-se que os pinos numa estrutura de tamanho maior poderiam agir de forma ainda mais favorável.

Considerando que o objetivo específico deste trabalho foi entender o funcionamento da técnica CMT PIN, visando achar o melhor tipo de pino para a aplicações em questão, pôde-se concluir que:

- Em relação aos três parâmetros de regulagem (“*Ball/Cyl. Adaptation*” (BCA), “*Altitude Adaptation*” (AA) e “*Base Adaptation*” (BA)) da técnica CMT PIN para deposição dos pinos do tipo cabeça cilíndrica e abaulada, concluiu-se que o BCA controla o tamanho da cabeça do pino e também define o tipo do mesmo, através do tempo de passagem de corrente ($Q=I^2Rt$) pelo arame soldado na chapa. O AA controla a altura do pino através do tempo de “espera” após a soldagem do arame com o metal de base, deixando conduzir a parte mais aquecida da região de solda (pé do pino) para o centro do arame. Por fim, o BA regula o tamanho do pé (base) do pino pela velocidade do arame-eletrodo logo após fundir a sua ponta pelo arco elétrico;

- Outros parâmetros de deposição avaliados, sejam eles a DBCP, a espessura e a temperatura da chapa (metal de base), influenciaram nas características geométricas dos pinos do tipo cabeça abaulada e cabeça cilíndrica. O parâmetro BA foi o parâmetro “chave” em termos da resistência de solda do pino (arame) com a folha metálica.

Dessa forma, a produção de PLMC com pinos depositados pela técnica CMT PIN mostrou um potencial de aplicabilidade industrial, por exemplo, nas indústrias automobilística (blindagem) e/ou aeronáutica, defesa (veículos de combate, coletes), transporte (carcaças de trens e barcos), construção civil (módulos portáteis de central de dados, hospitais de campanha, plataformas marítimas, etc.), energia (caixa de transformadores de alta potência), etc. Entretanto, maiores estudos precisam ser implementados para otimizar e explorar melhor a ideia de aplicação dos ancoradores.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar os estudos relacionados à técnica de deposição dos pinos CMT PIN, têm-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar a deposição e a formação de outros tipos de pinos pela técnica CMT PIN, tais como, cabeça pontiaguda (*pike*); impressão (*print*) e cabeça abaulada-pontiaguda (*ball-head & pike*), conforme ilustra a Figura 2.46 do Capítulo II;
- Fazer uma otimização do tempo de período de deposição de vários tipos de pinos pela técnica CMT PIN, buscando-se, desta forma, aumentar a produtividade;
- Estudar as características metalúrgicas para diferentes tipos de pinos a fim de saber como o princípio termomecânico (arco elétrico com movimento (avanço e recuo) do arame) da técnica CMT PIN afeta região de pino-chapa. As partes (a) e (b) da Figura 8.1 ilustram um exemplo de pinos do tipo cabeça abaulada e cilíndrica, respectivamente, e possíveis características metalúrgicas que poderiam ser encontradas neste estudo;

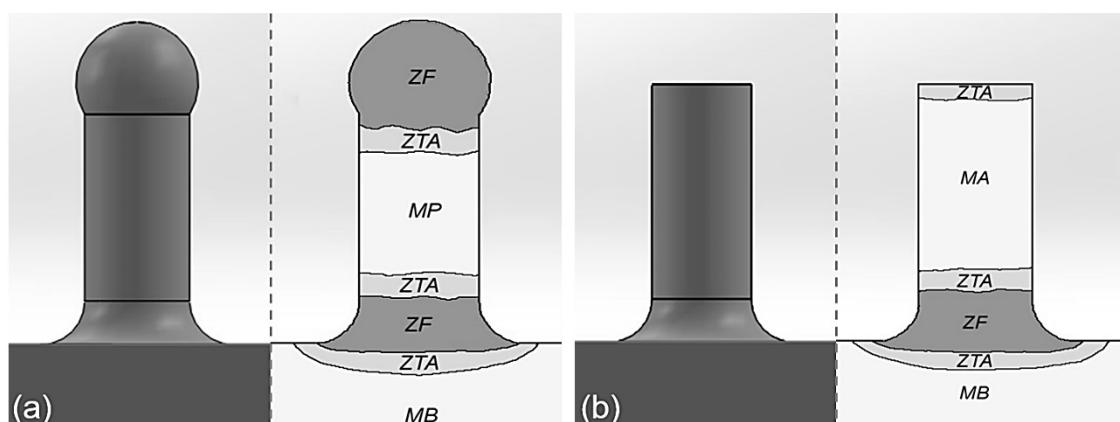


Figura 8.1 – Ilustração dos pinos com as características metalúrgicas esperadas: (a) Pino do tipo cabeça abaulada; (b) Pino do tipo cabeça cilíndrica, onde: ZTA = zona termicamente afetada; ZF = zona fundida; MA = metal do arame-eletrodo; MB = metal de base

- Levantar dados de custos (tais como, materiais de consumo, tempo, energia elétrica, etc.) envolvidos no processo de deposição de pinos pela técnica CMT PIN;
- Depositar pinos em folhas de ligas metálicas que são amplamente utilizadas na indústria aeronáutica, por exemplo, ligas de titânio (Ti-6Al-4V) e/ou alumínio (AlSi5 ou duralumínio). Desta forma, tentar resolver o problema de acoplamento entre metal e compósito existente em LMC com estas ligas metálicas. Atualmente, estas ligas, antes de serem aplicadas nos LMC, necessitam tratamentos químicos especiais (por exemplo, anodização), os quais possuem elevado custo e duração, bem como necessitam de rigoroso controle;
- Criar um procedimento que facilite ao usuário encontrar os parâmetros de regulagem (entrada), que não são ortogonais, para deposição de vários tipos de pinos com características geométricas distintas (saída).

Com o objetivo de complementar os estudos da aplicação de pinos (ancoradores) em Laminados Metal-Compósito (LMC), de forma a permitir melhorar as suas propriedades (resistência mecânica, rigidez, etc.), apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- De forma a minimizar custos e tempo experimental, poder-se-ia implementar métodos de simulação numérica (FEM), de modo a estudar e otimizar diversos parâmetros de aplicação de pinos em LMC. Por exemplo, poderia-se determinar a influência do espaçamento, as características geométricas e a distribuição (padrão de deposição) dos pinos sobre a resistência às diversas forças atuantes (flexão, torção, tração, fadiga, etc.) em um Painel Laminado Metal-Compósito (PLMC);
- Estudar o efeito de outros parâmetros de deposição de pinos, tais como, ângulo de inclinação, diâmetro (por exemplo, arame-eletrodo de 0,8 mm de diâmetro) e outros padrões de deposição, com a finalidade de melhorar o desempenho dos PLMC pinados;
- Explorar outros tipos de ensaios e estudos com PLMC com ancoradores, tais como, fadiga mecânica e térmica, torção, usinabilidade (furação/fresamento), etc.;
- Realizar a fabricação de PLMC com pinos do tipo 3/2 (3 folhas metálicas pinadas com 2 camadas de compósito entre as folhas), conforme ilustra a Figura 8.2. Executar com este tipo de painel diversos ensaios mecânicos, principalmente a balística, pois acredita-se que a presença de mais uma folha metálica com os pinos no meio poderia contribuir para a absorção de maior quantidade de energia de impacto de alta velocidade;

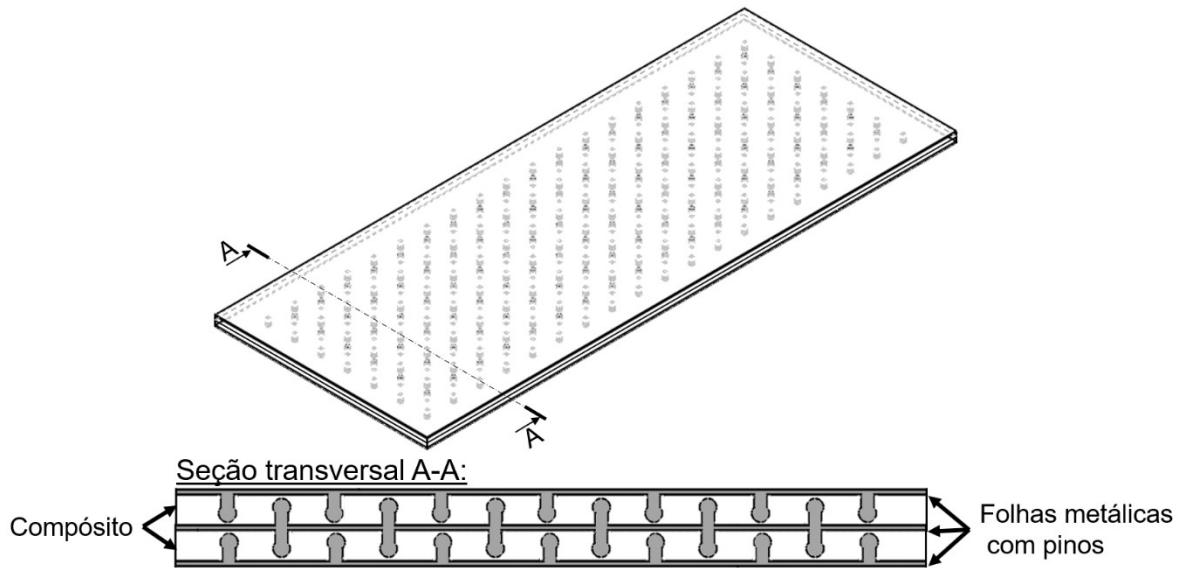


Figura 8.2 – Ilustração da ideia de PLMC com pinos do tipo 3/2 (3 folhas metálicas com 2 camadas de compósito entre as folhas)

- Realizar o ensaio de cisalhamento de losipescu em corpos de prova (com/sem pinos), completando com o estudo de “catastrofismo”, após o rompimento dos corpos de prova;
- Executar mais repetições do ensaio de impacto de alta velocidade (balístico) nos PLMC pinados e testar outros tipos de projéteis com diversos calibres;
- Projetar e executar a ideia de fabricação de PLMC com pinos (ancoradores) soldados em ambas as folhas metálicas, conforme ilustra a Figura 8.3. Acredita-se que a abordagem de uma estrutura metálica do tipo “oca” (folha metálica-pino-folha metálica com compósito no meio) poderia aumentar o desempenho de um PLMC;
- Conseguir fomento de uma empresa ou órgão que se interesse para apoiar este trabalho, pois os materiais de consumo (pré-impregnados) e equipamentos (prensa de cura a quente) apresentam elevado custo.

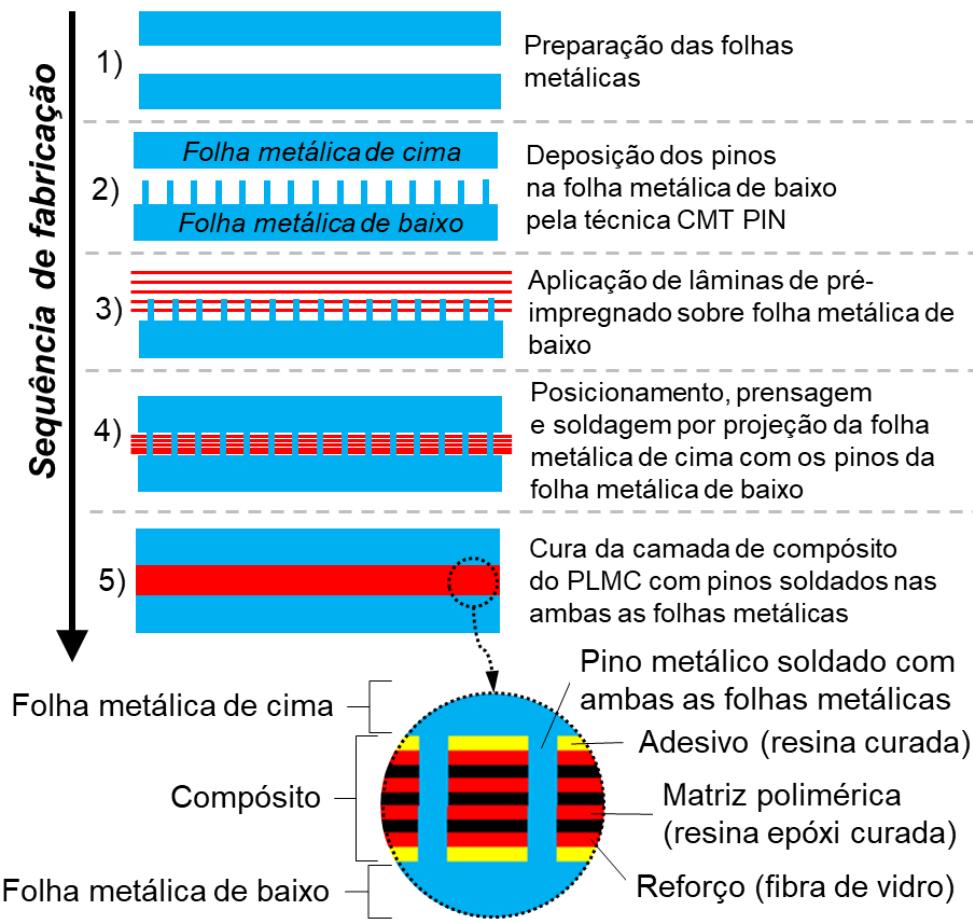


Figura 8.3 – Sequência de fabricação de PLMC com pinos metálicos soldados entre folhas metálicas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288 (2008)**. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, Brasília, DF, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15000 (2005)**. Blindagens para impactos balísticos - Classificação e critérios de avaliação, Brasília, DF, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 1 (1997)**. Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento, Brasília, DF, 1997.

ALMEIDA JR., J.H.S.; ANGRIZANI, C.C.; BOTELHO, E.C.; AMICO, S.C. Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. **Materials and Design**. v. 65, p. 789-795, jan. 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.003

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2344 / D2344M - 13**. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039 / D3039M - 17**. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3479 / D3479M - 12**. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3528 - 96(2016)**. Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading, West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3846 - 08(2015)**. Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics, West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5035 - 11(2015)**. Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method), West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5379 / D5379M - 12**. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5528 - 13.** Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7136 / D7136M - 15.** Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7137 / D7137 - 17.** Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790 - 17.** Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E739 - 10(2015).** Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data, West Conshohocken, PA, 2015.

ASUNDI, A.; CHOI, ALTA Y.N. Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft. **Journal of Materials Processing Technology.** v. 63, n. 1-3, p. 384-394, jan. 1997. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02652-0

BOTELHO, E.C.; PARDINI, L.C.; REZENDE, M.C. Evaluation of hygrothermal effects on the shear properties of Carall composites. **Materials Science and Engineering A.** v. 452-453, p. 292-301, abr. 2007. DOI: 10.1016/j.msea.2006.10.127

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. **Materials Research.** v. 9, n. 3, p. 247-256, 2006. DOI: 10.1590/S1516-14392006000300002

BOLINA, C.C.; PALECHOR, E.U.L.; VÁSQUEZ, M.P.R.; NICACIO, W.G.; GUTIERRES, M.P.D.; LOPEZ, A.A.O. **Vibrações: as frequências naturais estimada e experimental de uma estrutura.** In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria (CNMAI), nov. 2014, Caldas Novas – Goiás, Brasil. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-us-east-1.amazonaws.com/mathematicalproceedings/cnmai2014/0038.pdf>. Acesso em: 23 de abril de 2018.

BRASIL. Decreto n.º 3.665 de 20 de novembro de 2000. **Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados (R-105).** Disponível em: <http://www.dfdc.eb.mil.br/index.php/component/content/article?id=170:r-105-art-1-ao-29>. Acesso em: 02 de março de 2018

BUDHE, S.; BANEA, M.D.; DE BARROS, S.; DA SILVA, L.F.M. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. **International Journal of Adhesion & Adhesives.** v. 72, p. 30-42, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010

BURIANEK, D.A.; GIANNAKOPOULOS, A.E.; SPEARING, S.M. Modeling of facesheet crack growth in titanium – graphite hybrid laminates, Part I. **Engineering Fracture Mechanics.** v. 70, n. 6, p. 775-798, abr. 2003. DOI: 10.1016/S0013-7944(02)00086-3

CALLISTER, W.D.JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC) Editora S.A., 2002. 589p.

CALLISTER, W.D.JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC) Editora S.A., 2013. 817p.

CÂNDIDO, G.M.; ALMEIDA, S.F.M.; REZENDE, M.C. Processamento de laminados de compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia.** v. 10, n. 1, p. 31-41, 2000. DOI: 10.1590/S0104-14282000000100007

CARRILLO, J.G.; CANTWELL, W.J. Mechanical properties of a novel fiber-metal laminate based on a polypropylene composite. **Mechanics of Materials.** v. 41, n.7, p. 828-838, jul. 2009. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.03.002

CHAI, G.B.; MANIKANDAN, P. Low velocity impact response of fibre-metal laminates - A review. **Composite Structures.** v. 107, p. 363-381, jan. 2014. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.08.003

CHANG, P.Y.; YEH, P.C.; YANG, J.M. Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates. **Materials Science and Engineering A.** v. 496, n. 1-2, p. 273-280, nov. 2008. DOI: 10.1016/j.msea.2008.07.041

CMT: Cold Metal Transfer, Processo de solda MIG/MAG com arco voltaico em curto circuito. Disponível em: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcn/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf. Acesso em: 22 de agosto de 2017

CORTES, P.; CANTWELL, W.J. The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre–metal laminates. **Composites Science and Technology.** v. 66, n. 13, p. 2306-2316, out. 2006. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.11.031

COSTA, M.L.; DE PAIVA, J.M.F.; BOTELHO, E.C.; REZENDE, M.C. Avaliação térmica e reológica do ciclo de cura do pré-impregnado de carbono/epóxi. **Polímeros: Ciência e Tecnologia.** v. 13, n. 3, p. 188-197, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v13n3/v13n3a09.pdf>. Acesso em: 06 de julho de 2017.

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.** v. 42, p. 434-440, dez. 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.038

DAMATO, C.A. **Efeito do condicionamento ambiental nas propriedades de cisalhamento e viscoelásticas de compósitos híbridos metal-fibra.** 2010. 142 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá.

DE CHIFFRE, L. Industrial survey on ISO surface texture parameters. **CIRP Annals - Manufacturing Technology.** v. 48/3, p. 74-77, 1999.

DE CHIFFRE, L.; LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; LUCCA, D.A.; GOCH, G.; BROWN, C.A.; RAJA, J.; HANSEN, H.N. Quantitative characterization of surface texture. **CIRP Annals - Manufacturing Technology.** v. 49, n. 2, p. 635-352, 2000. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63458-1

REIS L.; DE FREITAS M. Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels. **Composite Structures.** v. 38, n. 1-4, p. 509-515, mai.-ago.1997. DOI: 10.1016/S0263-8223(97)00086-X

DE FREITAS, S.T.; SINKE, J. Failure analysis of adhesively-bonded metal-skin-to-composite-stiffener: Effect of temperature and cyclic loading. **Composite Structures**. v. 166, p. 27-37, abr. 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.01.027

DOMINGUES, L.; FERNANDES, J.C.S.; BELO, DA C.M.; FERREIRA, M.G.S.; GUERRA-ROSA, L. Anodising of Al 2024-T3 in a modified sulphuric acid / boric acid bath for aeronautical applications. **Corrosion Science**. v. 45, n. 1, p. 149-160, jan. 2003. DOI: 10.1016/S0010-938X(02)00082-3

EARL, C.; HILTON, P.; O'NEILL, B. Parameter influence on surfi-sculpt processing efficiency. **Physics Procedia**. v. 39, p. 327-335, 2012. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.045

FAROOQ, U.; MYLER, P. Finite element simulation of damage and failure predictions of relatively thick carbon fibre-reinforced laminated composite panels subjected to flat and round noses low velocity drop-weight impact. **Thin-Walled Structures**. v. 104, p. 82-105, jul. 2016. DOI: 10.1016/j.tws.2016.03.011

FLIR A325 Infrared Camera System, FLIR Systems 2008, Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/98052953/Flir-a325-Thermal-Camera-Datasheet>. Acesso em: 29 de agosto de 2017.

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.

Fronius. **Manual de Instrução de Operação do Controle Remoto RCU 5000i**. 2012. 241p.

GOLDAK, J.; CHAKRAVARTI, A.; BIBBY, M. A new finite element model for welding heat sources. **Metallurgical and Materials Transactions B**. v. 15, n. 2, p. 299-305, 1984. DOI: 10.1007/BF02667333

GONZALEZ-CANCHE, N.G.; FLORES-JOHNSON, E.A.; CARRILLO, J.G. Mechanical characterization of fiber metal laminate based on aramid fiber reinforced polypropylene. **Composite Structures**. v. 172, p. 259-266, jul. 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.02.100

GODZIMIRSKI, J.; JANISZEWSKI, J.; ROŚKOWICZ, M.; SURMA, Z. Ballistic resistance tests of multi-layer protective panels. **Maintenance and reability**. v. 17, n. 3, p. 416-421, 2015. DOI: 10.17531/ein.2015.3.12

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**. v. 64, p. 11-24, set. 2014. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.04.018

GUILLAUMAT L.; BATSALE J.C.; MOURAND D. Real time infra-red image processing for the detection of delamination in composite plates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 35, n. 7-8, p. 939-944, jul. 2004. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.01.021

HART-SMITH, L.J. Bonded-bolted composite joints. **Journal of Aircraft**. v. 22, n. 11, p. 993-1000, nov. 1985. DOI: 10.2514/3.45237

Hexcel Corporation. **Technical Fabrics Handbook "Reinforcement for Composites"**. Disponível em: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexForce_FabricsHandbook.pdf. Acesso em: 27 de julho de 2017

Hexcel Corporation. **Resin systems for Advanced Composites, HexPly® F155. Product data sheet.** Disponível em: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_F155_us_DataSheet.pdf. Acesso em: 23 de agosto de 2017

HINZ, S.; OMOORI, T.; HOJO, M.; SCHULTE, K. Damage characterisation of fibre metal laminates under interlaminar shear load. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** v. 40, n. 6-7, p. 925-931, jul. 2009. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.020

ISHIKAWA, T.; SUGIMOTO, S.; MATSUSHIMA, M.; HAYASHI, Y. Some experimental findings in compression-after-impact (CAI) tests of CF/PEEK (APC-2) and conventional CF/EPOXY flat plates. **Composites Science and Technology.** v. 55, n. 4, p. 349-363, 1995. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00079-8

ISLAM, M.S.; TONG, L. Influence of pinning on static strength of co-cured metal-GFRP hybrid single lap joints. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** v. 84, p. 196-208, mai. 2016. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.01.011

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7438:1985.** Metallic Materials - Bend Test, Geneva, Switzerland, 1985.

KABOGLU, C.; MOHAGHEGHIAN, I.; ZHOU, J.; GUAN, Z.; CANTWELL, W.; JOHN, S.; BLACKMAN, B.R.K.; KINLOCH, A.J.; DEAR, J.P. High-velocity impact deformation and perforation of fibre metal laminates. **Journal of Materials Science.** v. 53, n. 6, p. 4209-4228, 2018. DOI: 10.1007/s10853-017-1871-2

KATUNIN, A.; DRAGAN, K.; DZIENDZIKOWSKI, M. Damage identification in aircraft composite structures: a case study using various non-destructive testing techniques. **Composite Structures.** v. 127, p. 1-9, set. 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080

KHALILI, S.M.R.; MITTAL, R.K.; KALIBAR, S.G. A study of the mechanical properties of steel/aluminium/GRP laminates. **Materials Science and Engineering A.** v. 412, n. 1-2, p. 137-140, dez. 2005. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.016

KHAN, S.U.; ALDERLIESTEN, R.C.; BENEDICTUS, R. Post-stretching induced stress redistribution in fibre metal laminates for increased fatigue crack growth resistance. **Composites Science and Technology.** v. 69, n. 3-4, p. 396-405, mar. 2009. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.11.006

LALIBERTE, J.F.; POON, C.; STRAZNICKY, P.V.; FAHR, A. Applications of fiber-metal laminates. **Polymer Composites.** v. 21, n. 4, p. 558-567, ago. 2000. DOI: 10.1002/pc.10211

LE BOURLEGAT, L.R. **Processamento e Caracterização Híbrido Titânio/Fibra de Carbono /Epóxi.** 2009. 115 f. Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

LEME, L.M.M. **Estudo comparativo de técnicas de análise modal experimental no domínio da frequência em uma barra na condição de contorno livre-livre.** 2014. 88 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação – Universidade Tecnológico Federal do Paraná, Pato Branco.

LIN, C.T.; KAO, P.W.; YANG, F.S. Fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced aluminium laminates. **Composites.** v. 22, n. 22, p. 135-141, mar. 1991. DOI: 10.1016/0010-4361(91)90672-4

LIZARANZU, M.; LARIO, A.; CHIMINELLI, A.; AMENABAR, I. Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools. **Infrared Physics & Technology**. v. 71, p. 113-120, jul. 2015. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.02.006

LUNDKVIST, A. **Modal analysis project**. Luleå University of Technology. Disponível em: http://www.student.ltu.se/~nadlun-5/pdfs/I7005a_report_main.pdf. Acesso em: 23 de abril de 2018.

MARSH, G. Composites lift off in primary aerostructures. **Reinforced Plastics**. v. 48, n. 4, p. 22-27, abr. 2004. DOI: 10.1016/S0034-3617(04)00193-6

MATHIJSEN, D. Now is the time to make the change from metal to composites in naval shipbuilding. **Reinforced Plastics**. v. 60, n. 5, p. 289-293, set.-out. 2016. DOI: 10.1016/j.repl.2016.08.003

MEOLA, C.; BOCCARDI, S.; CARLOMAGNO, G.M.; BOFFA, N.D.; RICCI, F.; SIMEOLI, G.; RUSSO, P. Impact damaging of composites through online monitoring and non- destructive evaluation with infrared thermography. **NDT & E International**. v. 85, p.34-42, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.10.004

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G.M. Impact damage in GFRP: new insights with infrared thermography. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 41, n. 12, p. 1839-1847, dez. 2010. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.09.002

MICHAELS, D. Novos materiais revolucionam aviões. **The wall street journal**. jun. 2013. Disponível em: <https://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323566804578552072715834706>. Acesso em: 29 de junho de 2017

NATIONAL INSTRUMENTS. **Documento das especificações, modelo NI USB-6009**. 2012

NETO, F.L.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2006. 313p.

NGUYEN, A.T.T.; AMARASINGHE, C.K.; BRANDT, M.; FEIH, S.; ORIFICI, A.C. Loading, support and geometry effects for pin-reinforced hybrid metal-composite joints. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 98, p. 192-206, jul. 2017. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.03.019

NGUYEN, A.T.T.; BRANDT, M.; FEIH, S.; ORIFICI, A.C. Pin pull-out behaviour for hybrid metal-composite joints with integrated reinforcements. **Composite Structures**. v. 155, p. 160-172, nov. 2016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.07.047

NATIONAL INSTITUTE O JUSTICE. **NIJ Standard 0108.01 (1985)**. Ballistic Resistant Protective Materials, USA, 1985.

PALOLA, S.; SARLIN, E.; KOLAHGAR AZARI, S.; KOUTSOS, V.; VUORINEN, J. Microwave induced hierarchical nanostructures on aramid fibers and their influence on adhesion properties in a rubber matrix. **Applied Surface Science**. v. 410, p. 145-153, jul. 2017. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.070

PRAMANIK, B.; MANTENA, P.R. Energy absorption of nano-reinforced and sandwich composites in ballistic and low-velocity punch-shear. **Open Journal of Composite Materials**. v. 2, n. 3, p. 87-96, 2012. DOI: 10.4236/ojcm.2012.23010

PINGKARAWAT, K.; MOURITZ, A. Improving the mode I delamination fatigue resistance of composites using z-pins. **Composites Science and Technology**. v. 92, p. 70-76, fev. 2014. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.12.009

POZEGIC, T.R.; ANGUITA, J.V.; HAMERTON, I.; JAYAWARDENA, K.D.G.I.; CHEN, J-S.; STOLOJAN, V. Multi-functional carbon fibre composites using carbon nanotubes as an alternative to polymer sizing. **Scientific Reports**. v. 6, p. 2045-2322, nov. 2016. DOI: 10.1038/srep37334

ProChron Digital. **Manual de Instrução de Operação do Cronógrafo Digital**. 2015. 16p.

RAO, S.S. **Vibrações Mecânicas**. 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 424p.

RANDJBARAN, E.; ZAHARI, R.; JALIL, N.A.A.; MAJID, D.L.A.A. Hybrid composite laminates reinforced with kevlar/carbon/glass woven fabrics for ballistic impact testing. **The Scientific World Journal**. v. 2014, p. 1-7, 2014. DOI: 10.1155/2014/413753

REMMERS, J.J.C.; BORST, R. DE. Delamination buckling of fibre-metal laminates. **Composites Science and Technology**. v. 61, n. 15, p. 2207-2213, nov.-dez. 2001. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00114-2

REZENDE, M.C.; COSTA, M.L.; BOTELHO, E.C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber Editora, 2011. 396p.

RESNYANSKY, A.D.; KATSELIS, G. **Ballistic and material testing procedures and test results for composite samples for the TIGER helicopter vulnerability project**. Edinburgh South Australia: DSTO System Sciences Laboratory, 1993. 28p.

RICHARDSON, M.H.; FORMENTI, D.L. **Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials**. In: 1ST PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, nov. 1982, USA. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.3592&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

ROEBROEKS, G.H.J.J. Fiber-Metal Laminates: Recent developments and applications. **International Journal of Fatigue**. v. 16, n. 1, p. 33-42, jan. 1994. DOI: 10.1016/0142-1123(94)90443-x

SALVE, A.; KULKARNI, R.; MACHE, A. A Review: Fiber Metal Laminates (FML's) - Manufacturing, Test methods and Numerical modeling. **International Journal of Engineering Technology and Sciences (IJETS)**. v. 6, n. 1, p. 71-84, dez. 2016. DOI: 10.15282/ijets.6.2016.10.2.1060

SORRENTINO, L.; BELLINI, C.; CORRADO, A.; POLINI, W.; ARICÒ, R. Ballistic performance evaluation of composite laminates in kevlar 29. **Procedia Engineering**. v. 88, p. 255-262, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.048

SOEIRO, N.S. **Análise modal experimental**. Universidade Federal do Pará. Disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAgT_QAK/analise-modal-experimental. Acesso em: 23 de abril de 2018.

SILVA, R.A. **Processamento e caracterização de compósitos híbridos fibra/metal**. 2006. 285 f. Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SINMAZÇELIK, T.; AVCU, E.; BORA, M. Ö.; ÇOBAN, O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. **Materials and Design**. v. 32, n. 7, p. 3671-3685, ago. 2011. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.011

SPS (Sistemas e Processos de Soldagem). **Manual de instruções MVG-3 Medidor de vazão de gás**. 2.ed., ago. 2012. 7p.

STELZER, S.; UCSNIK, S.; PINTER, G. Fatigue behaviour of composite-composite joints reinforced with cold metal transfer welded pins. **International Journal of Fatigue**. v. 81, p. 37-47, dez. 2015. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.06.004

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: Applied Science and Manufacturing**. v. 88, p. 39-47, set. 2016. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.05.020

TONG, L.; MOURITZ, A.P.; BANNISTER, M.K. **3D fiber reinforced polymer composites**. Elsevier Science Ltd. Oxford, UK, 2002. 262p. Disponível em: <https://the-eye.eu/public/WorldTracker.org/Engineering/Materials/3D%20Fibre%20Reinforced%20Polymer%20Composites.pdf>, Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

UCSNIK, S. **Pin-based hybrid joining**. In: 5TH ANNIVERSARY OF THE INSTITUTE OF CARBON COMPOSITE, 5, set. 2014, Technische Universität München. Disponível em: http://www.lcc.mw.tum.de/fileadmin/w00bkg/www/PDF/Symposium/LCC_Symposium_Ucsnik.pdf, Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

UCSNIK, S.; SCHEERER, M.; ZAREMBA, S.; PAHR, D.H. Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 41, n. 3, p. 369-374, mar. 2010. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.11.003

UCSNIK, S.; STELZER, S; SEHRSCHÖN, H.; SIEGLHUBER, G. **Composite to composite joint with lightweight metal reinforcement for enhanced damage tolerance**. In: ECCM16 - 16TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 16, jun. 2014, Seville, Spain. Disponível em: <http://www.escm.eu.org/eccm16/assets/0747.pdf>, Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

URSENBACH, D.O. **Penetration of CFRP laminates by cylindrical indenters**. 1995. 153 f. MSs thesis – The University of British Columbia, Canada. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0078475>, Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

VERMEEREN, C.A.J.R. An historic overview of the development of fibre metal laminates. **Applied Composite Materials**. v. 10, n. 4-5, p. 189-205, 2003. DOI: 10.1023/A:1025533701806

VLOT, A. Impact properties of fibre metal laminates. **Composites Engineering**. v. 3. n. 10, p. 911-927, 1993.

VLOT, A.; VOGELESANG, L.B.; VRIES T.J. Towards application of fibre metal laminates in large aircraft. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal**. v. 71, n. 6, p. 558-570, 1999.

VOGELESANG, L.B.; VLOT, A. Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 103, n. 1, p. 1-5, jun. 2000. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00411-8

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**. v. 76, p. 202-206, jul. 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.03.065

WILLIAMS, A.; CALDER, S. Driving growth in carbon fiber. **Reinforced Plastics**. v. 59, n. 5, p. 238-241, set.-out. 2015. DOI: 10.1016/j.repl.2015.05.001

WITTWER, L.; ENZINGER, N. **Simulating the welding process of pin structures**. In: SYSTEMWELD FORUM 2011, nov. 2011, Graz University of Technology, Austria. Disponível em: https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=60204. Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

WITTWER, L.; ENZINGER, N.; SOMMITSCH, C. **Impacts on the mechanical properties of aluminum base material due to pin welding**. In: LKR LEICHTMETALLTAGE GMUNDEN, nov. 2012, Graz University of Technology, Austria. Disponível em: https://pure.tugraz.at/portal/files/1082885/poster_wittwer_et_al.pdf. Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

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**. v. 134, p. 587-592, dez. 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.083

YAGHOUBI, A.S.; LIAW, B. Influences of thickness and stacking sequence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML plates: Part II - Numerical studies. **Journal of Composite Materials**. v. 48, n. 19, p. 2011-2021, 2015. DOI: 10.1177/0021998313494097

YILMAZCOBAN, I.K.; DONER, S. Ballistic protection evaluation of sequencing the composite material sandwich panels for the reliable combination of armor layers. **Acta Physica Polonica A**. v. 130, n. 1, p. 342-346, 2016. DOI: 10.12693/APhysPolA.130.342

ZHANG, Q.N.; ZHANG, X.W.; LU, G.X.; RUAN, D. Ballistic impact behaviors of aluminum alloy sandwich panels with honeycomb cores: An experimental study. **Journal of Sandwich Structures & Materials**. v. 0, n. 00, p. 1-24, 2016. DOI: 10.1177/1099636216682166

Apêndice

Programa de análise dos parâmetros intermediários feito no ambiente MATLAB®:

```

"Master_rotina.m"
close all; clc; %Fechar Tudo; Limpar Command Window
clear all; %Remover todos valores da Área de Trabalho
tic %ligar o cronometro
Scan; %Abrir o programa Scan por carregar os valores

Taq = 1/5000; %5000 Hz é taxa de aquisição de dados
deltaT = 6;
Tempo = 13.0+deltaT*1; %tempo onde começar analise de oscilograma

choice={'Ball/Cyl','Pike'};
[i,v]=listdlg('PromptString','Select a mode','ListSize',[160
33],'OkString','Select','SelectionMode','single','Name','Mode','ListString',choice);

if v==1
    Mode=choice(i);
    if i==1
        Graf;
    elseif i==2
        Graf_pike;
    end
end
toc

"Scan.m"

filename=uigetfile('*.txt'); %Usuário vai selecionar um arquivo
fid = fopen(filename); %Abrir o arquivo selecionado
Text = textscan(fid, '%s %s %s %s %s'); %Fechar o arquivo
fclose(fid);
corrente=Text{3}; %Corrente é a coluna 3
tensao=Text{4}; %Tensão é a coluna 4
corrente = strrep(corrente, ',', '.'); %Substituir vírgula por pontos
tensao=strrep(tensao, ',', '.');
clear Text ans fid filename %Remover as variáveis
Corrente=transpose(str2double(corrente)); %Valores numéricos
Tensao=transpose(str2double(tensao)); %Valores numéricos
clear tensao corrente

"Regiao1_corrente.m"

y=Tempo*Taq^(-1); %Iniciar a pesquisa no inicio
i=0; %Definir o gatilho a 0
while i==0 %Como i=0
    y=y+1; %Pesquisar todos os pontos
    if Correntem(y) >= 3
        tspp11=y-1;
        i=1; %Sair da ciclo
    end
end

y=tspp11+1; %Iniciar no ponto
i=0; %Definir o gatilho a 0
while i==0
    y=y+1;
    A=[Correntem(y)-Correntem(y-1),Correntem(y-1)-Correntem(y-2)];
    if mean(A)<=2
        tspp12=y-1;
        i=1;
    end
end

y=tspp12;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    A=[Correntem(y-1)-Correntem(y),Correntem(y-2)-Correntem(y-1)];
    if mean(A)>=2
        tspp13=y-1;
        i=1;
    end
end

Ispp1=mean(Correntem(tspp12:tspp13)); %Corrente media da Ispp1

```

```

t spp21=t spp13+2;

y=t spp21+5;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    A=[Correntem(y-1)-Correntem(y),Correntem(y-2)-Correntem(y-1)];
    if mean(A)>=5
        spp22=y-5;
        i=1;
    end
end

Ispp2=mean(Correntem(t spp21:t spp22)); % Corrente Ispp2 media

y=t spp22+2;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    A=[Correntem(y-1)-Correntem(y),Correntem(y-2)-Correntem(y-1)];
    if mean(A)>=5
        spp31=y+1;
        i=1;
    end
end

y=t spp31;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    if Correntem(y)<=3
        spp32=y-5;
        spp33=y+2;
        i=1;
    end
end

Ispp3=mean(Correntem(t spp31:t spp32)); %Corrente Ispp3 media

t spp3=((t spp33-t spp31)*T)*10^3; %Tempo spp3 em millisecondo
t spp2=((t spp22-t spp21)*T)*10^3; %Tempo spp2 em millisecondo
t spp1=((t spp13-t spp11)*T)*10^3; %Tempo spp1 em millisecondo

t Ispp=((t spp33-t spp11)*T)*10^3; %Tempo spp total em millisecondo

“Regiao1_tensao.m”

y=Tempo*Taq^(-1);
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    if Tensaom(y) >= 5
        tvaz1=y-1;
        i=1;
    end
end

y=tvaz1;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    if Tensaom(y) <= 5
        tvaz2=y+1;
        i=1;
    end
end

tvaz=((tvaz2-tvaz1)*T)*10^3;

Uvaz=mean(Tensaom(tvaz1+5:tvaz2-5));

y=tvaz2;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    if Tensaom(y) >= 15
        tuspp1=y-1;
        i=1;
    end
end

y=tuspp1;

```

```

i=0;
while i==0
    y=y+1;
if Tensaom(y) <= 5
    tuspp2=y+1;
    i=1;
end
end

tUspp=((tuspp2-tuspp1)*T)*10^3; %tempo de tensão Uspp em milisegundos

Uspp=mean(Tensaom(tuspp1+5:tuspp2-5)); %tensão Uspp média

"Regiao2.m"

y=tuspp2+5;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
if Tensaom(y) >= 1
    tsolpp1=y;
    i=1;
end
end

tsolpp=((tsolpp1-tuspp2)*T)*10^3;

Umsolpp=mean(Tensaom(tuspp2+5:tsolpp1-5)); Imsolpp=mean(Correntem(tspp33+5:tsolpp1-5));

"Regiao3_corrente.m"

y=tsolpp1;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    A=[Correntem(y)-Correntem(y-1),Correntem(y-1)-Correntem(y-2)];
    if mean(A)<=1
        taq11=y-1;
        i=1;
    end
end

%tempo taq12
y=taq11;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    if Correntem(y) <=2
        taq12=y+1;
        i=1;
    end
end

Imaq=mean(Correntem(taq11:taq12)); %corrente Iaq média
taqtot=((taq12-taq11)*T)*10^3;

"Regiao3_tensao.m"

y=tuspp2;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    A=[Tensaom(y)-Tensaom(y-1),Tensaom(y-1)-Tensaom(y-2)];
    if mean(A)>=0.5
        tuaq11=y-1;
        i=1;
    end
end

y=tuaq11;
i=0;
pico=0;
while i==0;
    y=y+1;
    A=[Tensaom(y)-Tensaom(y-1),Tensaom(y-1)-Tensaom(y-2)];
    if mean(A) >=1.5
        pico=1;
        i=1;
    end
    if mean(A) <=-0.7
        tpeg=y;
    end
end

```

```

        pico=0;
        i=1;
    end
    if y==dim(2)-1
        i=1;
    end
end

if pico==1

    y=tuaq11+15;
    i=0;
    while i==0
        y=y+1;
        A=[Tensaom(y)-Tensaom(y-1),Tensaom(y-1)-Tensaom(y-2)];
        if mean(A) >=1.5
            tuaq12=y+2;
            i=1;
        end
    end
elseif pico==0
    y=tuaq11;
    i=0;
    while i==0
        y=y+1;
        if Tensaom(y) <=1
            tuaq12=y+2;
            i=1;
        end
    end
end
Umaq=mean(Tensaom(tuaq11+2:tuaq12-5)); %tensão durante aquecimento media

```

"Regiao4_tensao.m"

```

if pico==1
    C=mean(Tensaom(tuaq12:tuaq12+1));
    if C>=10
        disp ('Com pico na região 4')
        maxTensaom=0;
        y=tuaq12;
        while y<=tuaq12+1
            y=y+1;
            if Tensaom(y)>=maxTensaom
                maxTensaom=Tensaom(y);
            end
        end
        y=tuaq12;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;
            if Tensaom(y)>=maxTensaom-5
                tvazromp11=y;
                i=1;
            end
        end
        y=tvazromp11;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;
            A=[Tensaom(y-1)-Tensaom(y),Tensaom(y-2)-Tensaom(y-1)];
            if mean(A)>=2
                tvazromp12=y-1;
                i=1;
            end
        end
        y=tvazromp12;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;
            A=[Tensaom(y-1)-Tensaom(y),Tensaom(y-2)-Tensaom(y-1)];
            if mean(A)<=2
                turomp11=y-1;
                i=1;
            end
        end
        y=turomp11;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;
            A=[Tensaom(y-1)-Tensaom(y),Tensaom(y-2)-Tensaom(y-1)];
            if mean(A)>=1.5
                turomp12=y-1;
                i=1;
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
    y=turomp12;
    i=0;
    while i==0
        y=y+1;
        if Tensaom(y)<=1
            turomp13=y+1;
            i=1;
        end
    end
    Uvazromp=mean(Tensaom(tvazromp11:tvazromp12));
    tvazromp=((tvazromp12-tvazromp11)*T)*10^3;

    tromp=((turomp13-turomp11)*T)*10^3;
    Umromp=mean(Tensaom(turomp11:turomp12));

elseif C<10
    disp ('Sem pico e sem buraco na região 4')
    y=tuaq12+2;
    i=0;
    while i==0
        y=y+1;
        A=[Tensaom(y)-Tensaom(y-1),Tensaom(y-1)-Tensaom(y-2)];
        if mean(A)<=1.5
            turomp11=y-1;
            i=1;
        end
    end
    y=turomp11;
    i=0;
    while i==0
        y=y+1;
        A=[Tensaom(y-1)-Tensaom(y),Tensaom(y-2)-Tensaom(y-1)];
        if mean(A)>=2
            turomp12=y-1;
            i=1;
        end
    end
    y=turomp12;
    i=0;
    while i==0
        y=y+1;
        if Tensaom(y)<1
            turomp13=y-1;
            i=1;
        end
    end
    end
    Uvazromp=0;
    tvazromp=0;

    tromp=((turomp13-turomp11)*T)*10^3;
    Umromp=mean(Tensaom(turomp11:turomp12));
end
elseif pico==0
    B=mean(Tensaom(tuaq12:tuaq12+1000));
    if B<=1
        disp ('Não tem nada na região 4')
        tvazromp=0;
        tromp=0;
        Uvazromp=0;
        Umromp=0;
    elseif B>1
        disp ('Tem buraco na região 4')
        y=tuaq12;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;
            if Tensaom(y)<=1
                tvazromp11=y;
                i=1;
            end
        end
        y=tvazromp11;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;
            if Tensaom(y)>=1
                tvazromp12=y;
                i=1;
            end
        end
        y=tvazromp12;
        i=0;
        while i==0
            y=y+1;

```

```

A=[Tensaom(y-1)-Tensaom(y),Tensaom(y-2)-Tensaom(y-1)];
if mean(A)<=1
    turomp11=y-1;
    i=1;
end
y=turomp11;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    A=[Tensaom(y-1)-Tensaom(y),Tensaom(y-2)-Tensaom(y-1)];
    if mean(A)>=1
        turomp12=y-1;
        i=1;
    end
end
y=turomp11;
i=0;
while i==0
    y=y+1;
    if Tensaom(y)<=1
        turomp13=y+1;
        i=1;
    end
end
Uvazromp=mean(Tensaom(tvazromp11:tvazromp12));
tvazromp=((tvazromp12-tvazromp11)*T)*10^3;
tromp=((turomp13-turomp11)*T)*10^3;
Umromp=mean(Tensaom(turomp11:turomp12));
end

```

“Resultsinexcel.m”

```

prompt = 'Test Number :';
dlg_title = 'Teste'
num_lines = 1;
def = {'1'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);

filename = 'Results.xlsx';

a=str2double(answer)+1;

%Região 1
Regiao1 = [Uvaz tvaz Uspp tuuspp Ispp1 Ispp2 Ispp3 tspp1 tspp2 tspp3 tIspp];
sheet = 1; %Recolher os valores da Região 1 na primeira folha
xlRange = ['B' num2str(a) ':L' num2str(a)];
xlswrite(filename,Regiao1,sheet,xlRange)

%Região 2
Regiao2 = [tsolpp Imsolpp Umsolpp];
sheet = 2;
x2Range = ['B' num2str(a)];
xlswrite(filename,Regiao2,sheet,x2Range)

%Região 3
Regiao3 = [Imaq taqtot Umaq];
sheet = 3;
x3Range = ['B' num2str(a) ':D' num2str(a)];
xlswrite(filename,Regiao3,sheet,x3Range)

%Região 4
Regiao4 = [tvazromp tromp Uvazromp Umromp];
sheet = 4;
x4Range = ['B' num2str(a) ':E' num2str(a)];
xlswrite(filename,Regiao4,sheet,x4Range)

```

“Graf.m”

```

dimTensao=size(Tensao);

time=transpose(0:Taq:(dimTensao(2)*Taq-Taq));
T=Taq;
t=0:T:(dimTensao(2)*Taq-Taq

dim=size(t);
Tensaom=zeros(dim);
Correntem=zeros(dim);

```

```

%Filtrando os ruidos
if T==Taq
    Tensaom=Tensao;
    Correntem=Corrente;
else
for i=1:(dim(2)-1)
    Tensaom(i)=mean(Tensao((i)*T/Taq:i*T/Taq));
    Correntem(i)=mean(Corrente((i)*T/Taq:i*T/Taq));
end
end
Potinst=zeros(size(Tensaom));
Potinst100=zeros(size(Tensaom));

for i=1:dim(2)
    Potinst(i)=Tensaom(i)*Correntem(i);
    Potinst100(i)=Potinst(i)/100;
end

fig1=figure(1);
set(fig1,'name','Tensão / Corrente / Potência instantânea','numbertitle','off')
subplot(3,1,1)
plot(time,Tensao)
grid on
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Tensão (V)')
title('Grafico da Tensão')

subplot(3,1,2)
plot(time,Corrente);
grid on
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Corrente (A)')
title('Grafico da Corrente')

subplot(3,1,3)
plot(time,Potinst);
grid on
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Potentia Instantania (VA)')
title('Grafico da Potência instantânea')

fig3=figure(3);
subplot(2,1,1)
[AX,~,~]=plotyy(time,Tensao,t,Potinst);
grid on
xlabel('tempo (s)')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Tensao (V)')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Potência instantânea (VA)')
title('Grafico da Tensão & Potência instantânea')

subplot(2,1,2)
plotyy(time,Corrente,t,Potinst)
[AX,~,~]=plotyy(time,Corrente,t,Potinst);
grid on
xlabel('tempo (s)')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Corrente (A)')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Potência instantânea (VA)')
title('Grafico da Corrente & Potência instantânea')

fig2=figure(2);
set(fig2,'name','Medias','numbertitle','off')
plot(t,Tensaom,'b',t,Correntem,'r',t,Potinst100,'g'); grid on; ylabel('Tensão (V)      Corrente (A)      Potência instantânea (VA*100) ')
xlabel('tempo (s)')
grid on;
title('Grafico das Medias')
legend('Tensão','Corrente','Pot. Inst.');

clc
Regiao1_corrente;
Regiao1_tensao;
Regiao2;
Regiao3_corrente;
Regiao3_tensao;
Regiao4_tensao;
Resultsinexcel;
toc           %Parar o cronometro e escrever o tempo percorrido

```

Tabela 4.1(a) – Influência da combinação dos parâmetros de entrada nos parâmetros de saída (características geométricas dos pinos)

Nº de teste	Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída			
	BCA	AA	BA	Altura do pino (mm)	σ (mm)	Diâmetro da cabeça do pino (mm)	σ (mm)
1	1	-30	-0.2	3,35	$\pm 0,08$	0,99	$\pm 0,00$
2	1	-30	-0.1	3,84	$\pm 0,05$	0,99	$\pm 0,00$
3	1	-30	0.0	4,16	$\pm 0,08$	0,99	$\pm 0,00$
4	1	-30	0.1	4,60	$\pm 0,06$	0,99	$\pm 0,00$
5	1	-30	0.2	4,86	$\pm 0,02$	0,99	$\pm 0,00$
6	1	-15	-0.2	3,78	$\pm 0,01$	0,99	$\pm 0,00$
7	1	-15	-0.1	5,02	$\pm 0,05$	0,99	$\pm 0,00$
8	1	-15	0.0	5,23	$\pm 0,10$	0,99	$\pm 0,00$
9	1	-15	0.1	5,08	$\pm 0,08$	0,99	$\pm 0,00$
10	1	-15	0.2	5,15	$\pm 0,05$	0,99	$\pm 0,00$
11	1	0	-0.2	5,12	$\pm 0,09$	0,99	$\pm 0,00$
12	1	0	-0.1	5,51	$\pm 0,01$	0,99	$\pm 0,00$
13	1	0	0.0	5,64	$\pm 0,20$	0,99	$\pm 0,00$
14	1	0	0.1	5,61	$\pm 0,03$	0,99	$\pm 0,00$
15	1	0	0.2	5,54	$\pm 0,06$	0,99	$\pm 0,00$
16	1	15	-0.2	5,18	$\pm 0,01$	0,99	$\pm 0,00$
17	1	15	-0.1	5,74	$\pm 0,11$	0,99	$\pm 0,00$
18	1	15	0.0	5,82	$\pm 0,06$	0,99	$\pm 0,00$
19	1	15	0.1	6,02	$\pm 0,03$	0,99	$\pm 0,00$
20	1	15	0.2	6,24	$\pm 0,06$	0,99	$\pm 0,00$
21	1	30	-0.2	5,59	$\pm 0,07$	0,99	$\pm 0,00$
22	1	30	-0.1	5,67	$\pm 0,11$	0,99	$\pm 0,00$
23	1	30	0.0	5,91	$\pm 0,03$	0,99	$\pm 0,00$
24	1	30	0.1	6,46	$\pm 0,05$	0,99	$\pm 0,00$
25	1	30	0.2	6,85	$\pm 0,05$	0,99	$\pm 0,00$
26	2	-30	-0.2	3,68	$\pm 0,06$	1,13	$\pm 0,03$
27	2	-30	-0.1	4,07	$\pm 0,05$	1,18	$\pm 0,07$
28	2	-30	0.0	4,35	$\pm 0,10$	0,99	$\pm 0,00$
29	2	-30	0.1	4,40	$\pm 0,12$	1,21	$\pm 0,01$
30	2	-30	0.2	4,56	$\pm 0,13$	1,52	$\pm 0,10$
31	2	-15	-0.2	4,09	$\pm 0,17$	1,17	$\pm 0,01$
32	2	-15	-0.1	4,37	$\pm 0,10$	1,14	$\pm 0,05$
33	2	-15	0.0	4,85	$\pm 0,03$	0,99	$\pm 0,00$
34	2	-15	0.1	4,51	$\pm 0,13$	1,34	$\pm 0,03$
35	2	-15	0.2	4,89	$\pm 0,14$	1,27	$\pm 0,07$
36	2	0	-0.2	4,66	$\pm 0,21$	1,34	$\pm 0,01$
37	2	0	-0.1	4,91	$\pm 0,14$	1,19	$\pm 0,07$
38	2	0	0.0	5,31	$\pm 0,08$	0,99	$\pm 0,00$
39	2	0	0.1	5,27	$\pm 0,01$	0,99	$\pm 0,00$
40	2	0	0.2	5,34	$\pm 0,02$	1,25	$\pm 0,02$

Nº de teste	Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída			
	BCA	AA	BA	Altura do pino (mm)	σ (mm)	Diâmetro da cabeça do pino (mm)	σ (mm)
41	2	15	-0.2	5,31	$\pm 0,12$	0,99	$\pm 0,00$
42	2	15	-0.1	5,27	$\pm 0,03$	0,99	$\pm 0,00$
43	2	15	0.0	5,72	$\pm 0,01$	0,99	$\pm 0,00$
44	2	15	0.1	5,63	$\pm 0,06$	0,99	$\pm 0,00$
45	2	15	0.2	5,47	$\pm 0,14$	1,30	$\pm 0,06$
46	2	30	-0.2	5,44	$\pm 0,25$	1,18	$\pm 0,10$
47	2	30	-0.1	5,63	$\pm 0,36$	1,38	$\pm 0,00$
48	2	30	0.0	5,95	$\pm 0,07$	0,99	$\pm 0,00$
49	2	30	0.1	6,43	$\pm 0,04$	0,99	$\pm 0,00$
50	2	30	0.2	6,17	$\pm 0,02$	0,99	$\pm 0,00$
51	3	-30	-0.2	4,20	$\pm 0,02$	1,61	$\pm 0,04$
52	3	-30	-0.1	4,25	$\pm 0,06$	1,68	$\pm 0,09$
53	3	-30	0.0	4,52	$\pm 0,11$	1,58	$\pm 0,06$
54	3	-30	0.1	4,46	$\pm 0,15$	1,58	$\pm 0,05$
55	3	-30	0.2	5,26	$\pm 0,02$	1,69	$\pm 0,08$
56	3	-15	-0.2	4,39	$\pm 0,06$	1,69	$\pm 0,03$
57	3	-15	-0.1	4,77	$\pm 0,14$	1,57	$\pm 0,01$
58	3	-15	0.0	4,80	$\pm 0,07$	1,60	$\pm 0,04$
59	3	-15	0.1	5,18	$\pm 0,07$	1,72	$\pm 0,08$
60	3	-15	0.2	5,76	$\pm 0,15$	1,68	$\pm 0,10$
61	3	0	-0.2	4,57	$\pm 0,16$	1,56	$\pm 0,04$
62	3	0	-0.1	4,79	$\pm 0,10$	1,50	$\pm 0,03$
63	3	0	0.0	5,09	$\pm 0,06$	1,49	$\pm 0,03$
64	3	0	0.1	5,24	$\pm 0,06$	1,53	$\pm 0,14$
65	3	0	0.2	5,60	$\pm 0,05$	1,63	$\pm 0,05$
66	3	15	-0.2	5,07	$\pm 0,05$	1,74	$\pm 0,03$
67	3	15	-0.1	5,34	$\pm 0,12$	1,55	$\pm 0,08$
68	3	15	0.0	5,58	$\pm 0,17$	1,53	$\pm 0,05$
69	3	15	0.1	5,84	$\pm 0,61$	1,50	$\pm 0,05$
70	3	15	0.2	5,88	$\pm 0,12$	1,59	$\pm 0,04$
71	3	30	-0.2	5,36	$\pm 0,09$	1,65	$\pm 0,04$
72	3	30	-0.1	5,76	$\pm 0,04$	1,52	$\pm 0,05$
73	3	30	0.0	5,81	$\pm 0,14$	1,42	$\pm 0,06$
74	3	30	0.1	6,14	$\pm 0,07$	1,45	$\pm 0,08$
75	3	30	0.2	6,26	$\pm 0,07$	1,53	$\pm 0,09$
76	4	-30	-0.2	4,05	$\pm 0,02$	1,84	$\pm 0,01$
77	4	-30	-0.1	4,33	$\pm 0,09$	1,76	$\pm 0,06$
78	4	-30	0.0	4,60	$\pm 0,08$	1,82	$\pm 0,03$
79	4	-30	0.1	5,29	$\pm 0,16$	1,70	$\pm 0,04$
80	4	-30	0.2	5,50	$\pm 0,12$	1,60	$\pm 0,05$
81	4	-15	-0.2	4,41	$\pm 0,02$	1,93	$\pm 0,03$

Nº de teste	Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída			
	BCA	AA	BA	Altura do pino (mm)	σ (mm)	Diâmetro da cabeça do pino (mm)	σ (mm)
82	4	-15	-0.1	5,09	$\pm 0,15$	1,89	$\pm 0,03$
83	4	-15	0.0	5,25	$\pm 0,03$	1,97	$\pm 0,05$
84	4	-15	0.1	5,97	$\pm 0,05$	1,69	$\pm 0,05$
85	4	-15	0.2	6,31	$\pm 0,07$	1,66	$\pm 0,06$
86	4	0	-0.2	4,74	$\pm 0,11$	1,93	$\pm 0,03$
87	4	0	-0.1	5,43	$\pm 0,11$	1,85	$\pm 0,04$
88	4	0	0.0	5,42	$\pm 0,03$	1,95	$\pm 0,04$
89	4	0	0.1	5,59	$\pm 0,03$	2,01	$\pm 0,03$
90	4	0	0.2	6,51	$\pm 0,09$	1,68	$\pm 0,02$
91	4	15	-0.2	5,32	$\pm 0,08$	1,90	$\pm 0,03$
92	4	15	-0.1	5,93	$\pm 0,06$	1,83	$\pm 0,02$
93	4	15	0.0	5,67	$\pm 0,10$	1,79	$\pm 0,06$
94	4	15	0.1	5,62	$\pm 0,07$	2,00	$\pm 0,03$
95	4	15	0.2	6,49	$\pm 0,04$	1,72	$\pm 0,02$
96	4	30	-0.2	5,33	$\pm 0,03$	2,00	$\pm 0,01$
97	4	30	-0.1	5,80	$\pm 0,05$	2,01	$\pm 0,02$
98	4	30	0.0	5,74	$\pm 0,05$	2,02	$\pm 0,02$
99	4	30	0.1	5,59	$\pm 0,03$	1,95	$\pm 0,06$
100	4	30	0.2	6,73	$\pm 0,11$	1,61	$\pm 0,02$
101	5	-30	-0.2	4,00	$\pm 0,02$	1,81	$\pm 0,01$
102	5	-30	-0.1	4,38	$\pm 0,02$	1,87	$\pm 0,00$
103	5	-30	0.0	4,75	$\pm 0,04$	2,07	$\pm 0,07$
104	5	-30	0.1	5,04	$\pm 0,05$	2,05	$\pm 0,03$
105	5	-30	0.2	5,46	$\pm 0,09$	1,90	$\pm 0,02$
106	5	-15	-0.2	4,35	$\pm 0,06$	1,89	$\pm 0,01$
107	5	-15	-0.1	5,32	$\pm 0,09$	2,12	$\pm 0,04$
108	5	-15	0.0	4,99	$\pm 0,08$	2,09	$\pm 0,05$
109	5	-15	0.1	5,20	$\pm 0,14$	2,12	$\pm 0,03$
110	5	-15	0.2	5,52	$\pm 0,16$	1,91	$\pm 0,04$
111	5	0	-0.2	5,21	$\pm 0,08$	2,02	$\pm 0,02$
112	5	0	-0.1	5,31	$\pm 0,02$	1,98	$\pm 0,04$
113	5	0	0.0	4,81	$\pm 0,03$	2,00	$\pm 0,04$
114	5	0	0.1	5,10	$\pm 0,02$	2,08	$\pm 0,02$
115	5	0	0.2	5,85	$\pm 0,03$	1,94	$\pm 0,02$
116	5	15	-0.2	5,04	$\pm 0,11$	1,89	$\pm 0,02$
117	5	15	-0.1	5,30	$\pm 0,05$	1,94	$\pm 0,01$
118	5	15	0.0	5,20	$\pm 0,06$	1,94	$\pm 0,02$
119	5	15	0.1	5,15	$\pm 0,04$	2,12	$\pm 0,07$
120	5	15	0.2	5,71	$\pm 0,09$	1,94	$\pm 0,03$
121	5	30	-0.2	5,06	$\pm 0,03$	1,98	$\pm 0,02$
122	5	30	-0.1	5,64	$\pm 0,14$	2,01	$\pm 0,01$

Nº de teste	Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída			
	BCA	AA	BA	Altura do pino (mm)	σ (mm)	Diâmetro da cabeça do pino (mm)	σ (mm)
123	5	30	0.0	5,32	$\pm 0,03$	1,93	$\pm 0,01$
124	5	30	0.1	5,33	$\pm 0,12$	2,06	$\pm 0,03$
125	5	30	0.2	5,75	$\pm 0,03$	1,97	$\pm 0,03$

BCA = "Ball/Cyl. Adaptation"; AA = "Altitude Adaptation"; BA = "Base Adaptation"; σ = desvio padrão médio

Tabela 4.2(a) – Influência da combinação dos parâmetros de entrada nos parâmetros intermediários

	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Nº de teste
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	BCA
-15	-15	-15	-15	-15	-30	-30	-30	-30	-30	-30	AA
0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	-0,20	BA
29,0	29,0	29,0	29,0	29,1	29,1	29,0	29,1	29,1	29,0	29,0	Uvaz (V)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	σ (V)
49,3	49,2	48,7	47,5	38,8	45,9	37,5	43,3	41,0	36,1	36,1	tvaz (ms)
1,6	0,6	0,8	1,0	1,1	0,9	7,2	1,2	1,3	2,7	2,7	σ (ms)
18,6	18,5	18,8	18,1	18,3	19,2	19,1	19,5	19,0	18,5	18,5	Uspp (V)
0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	σ (V)
33,8	33,5	33,8	35,3	36,5	33,5	33,5	33,8	35,0	36,4	36,4	tUspp (ms)
0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	σ (ms)
81,5	81,1	80,9	81,2	82,0	81,0	81,4	80,7	80,7	81,4	81,4	Ispp1 (A)
0,4	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	σ (A)
51,0	50,9	50,9	50,9	51,1	50,9	51,0	51,2	51,0	50,9	50,9	Ispp2 (A)
0,0	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	σ (A)
25,8	25,8	24,5	25,2	25,7	25,9	24,3	26,0	24,1	26,0	26,0	Ispp3 (A)
0,1	0,3	1,8	1,2	0,2	0,3	1,4	0,1	1,3	0,2	0,2	σ (A)
6,8	6,5	6,8	6,7	6,2	6,9	6,6	6,5	6,7	6,6	6,6	tspp1 (ms)
0,2	0,0	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	σ (ms)
22,3	22,2	22,0	22,3	22,7	22,1	22,2	22,5	22,3	22,4	22,4	tspp2 (ms)
0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	σ (ms)
9,5	9,3	10,7	11,5	12,3	9,4	10,3	9,8	12,8	11,8	11,8	tspp3 (ms)
0,3	0,2	1,6	1,3	0,8	0,6	1,4	0,4	1,1	0,3	0,3	σ (ms)
42,7	42,0	43,5	44,5	45,2	42,4	43,1	42,8	45,8	44,8	44,8	tspp (ms)
0,6	0,0	1,3	1,3	0,6	0,6	1,1	0,4	1,1	0,3	0,3	σ (ms)
186,5	186,8	186,8	186,7	186,7	24,5	24,7	24,8	24,5	24,8	24,8	tsolpp (ms)
0,0	0,2	0,4	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,3	σ (ms)
3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,7	3,0	2,9	3,1	3,1	lmsolpp (A)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	σ (A)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Umsolpp (V)
93,4	93,7	94,7	93,8	92,6	92,2	94,5	93,6	92,5	90,8	90,8	Imaq (A)
0,7	1,0	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,3	0,6	0,2	0,2	σ (A)
547,3	540,5	523,8	519,5	457,7	554,3	521,1	506,2	498,8	446,8	446,8	taq (ms)
5,1	13,0	7,2	0,7	3,8	7,9	2,6	2,2	8,9	7,6	7,6	σ (ms)
1,5	1,5	1,2	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	Umaq (V)
0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	σ (V)
1,0	1,0	1,2	1,0	1,1	1,3	1,2	1,0	1,1	1,1	1,1	tvazromp (ms)
0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	σ (ms)
307,8	307,0	304,7	310,3	306,8	308,1	308,1	305,0	304,2	305,9	305,9	tromp (ms)
3,1	4,0	3,6	1,9	8,6	2,1	5,5	2,7	2,1	5,2	5,2	σ (ms)
29,9	29,8	29,6	29,8	29,9	29,8	29,8	29,9	29,9	29,8	29,8	Uvazromp (V)
0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	σ (V)
6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	Uromp (V)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	σ (V)

22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	30	15	15	15	15	15	0	0	0	0	0
-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	-0,20
29,1	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	29,0	28,9	28,9	29,0	28,9	28,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
52,0	49,1	54,6	54,5	52,7	52,6	50,5	51,2	51,6	52,4	50,8	47,2
0,0	0,6	1,3	0,5	1,0	0,7	1,3	1,1	0,4	1,4	0,9	0,6
19,2	22,1	20,3	20,8	19,4	21,4	19,4	20,8	20,9	21,7	19,5	18,5
0,2	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,5	0,3	0,7	0,1	0,2
35,0	37,3	33,8	33,9	34,1	35,5	37,5	33,8	33,8	34,3	35,3	37,5
0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,0
81,0	80,7	81,1	81,4	81,0	80,9	80,8	81,2	80,3	80,8	81,5	80,6
0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,1
50,9	51,0	51,0	51,3	51,1	50,8	51,0	50,8	51,0	50,8	50,9	51,0
0,1	0,1	0,1	0,5	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
25,8	25,9	26,0	25,9	25,4	24,8	25,4	25,9	26,0	26,0	25,4	25,7
0,2	0,2	0,3	0,6	0,5	1,8	0,1	0,4	0,1	0,5	0,3	0,3
6,5	6,8	6,8	6,6	6,6	6,6	6,7	6,5	6,6	6,5	6,8	6,7
0,0	0,3	0,3	0,6	0,5	0,3	0,2	0,0	0,2	0,0	0,3	0,2
22,1	22,3	22,1	22,4	22,3	22,1	22,0	22,5	22,4	22,4	22,3	22,2
0,2	0,3	0,2	0,6	0,4	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,2
10,9	12,4	9,1	9,5	10,2	12,1	14,0	9,0	9,3	9,8	11,1	13,2
0,4	0,2	0,2	0,3	1,0	1,6	0,7	0,0	0,4	0,3	0,7	0,6
43,5	45,4	42,0	42,5	43,1	44,8	46,7	42,0	42,3	42,6	44,1	46,0
0,5	0,2	0,3	0,3	0,9	1,5	0,6	0,0	0,4	0,2	0,7	0,3
679,9	680,1	516,5	516,5	516,6	516,6	516,5	351,7	351,8	351,5	351,5	352,0
0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,7
3,0	2,9	2,9	3,0	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
96,8	96,2	94,9	95,9	96,8	94,8	93,9	93,4	95,9	92,3	94,5	94,6
0,7	0,5	0,6	0,1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,5	0,3	0,7
521,3	495,0	550,3	535,3	521,7	531,6	528,7	550,0	527,5	544,4	522,5	501,2
9,1	7,3	4,9	1,3	5,1	7,5	6,2	5,0	4,8	5,1	4,0	6,4
1,4	1,3	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4	1,2
0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,3	1,0
0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,0
302,9	302,4	306,5	307,8	307,4	305,5	308,0	309,2	305,9	304,0	305,8	312,0
2,8	1,3	2,5	4,5	3,3	2,8	3,3	0,6	1,9	2,3	3,6	0,7
29,9	29,7	29,8	29,9	29,8	29,6	29,9	29,8	29,8	29,8	29,8	29,6

34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0
-15	-15	-15	-15	-30	-30	-30	-30	-30	-30	30	30
0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	-0,20	0,10	0
28,9	29,0	28,9	29,0	29,0	28,9	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47,3	39,4	40,0	43,5	49,2	44,5	38,8	42,0	43,1	59,8	48,0	54,3
1,8	3,7	1,3	1,8	2,9	2,3	0,4	3,3	1,5	1,9	2,8	1,0
19,7	18,7	19,1	18,7	20,1	19,2	19,1	18,5	19,0	19,1	19,5	19,7
0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
33,5	33,9	34,8	36,4	33,3	33,6	34,0	34,8	36,5	33,9	33,8	34,1
0,0	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,0	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2
81,3	81,3	81,0	81,0	81,3	81,5	81,2	81,9	81,0	81,1	81,2	81,1
0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,1	0,0	0,2	0,7	0,3	0,3
51,0	51,0	51,0	51,0	50,9	51,1	51,0	51,4	50,9	51,4	50,9	51,0
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,5	0,0	0,3	0,1	0,1
26,1	25,3	25,8	25,7	24,7	25,2	24,0	25,7	25,8	26,0	25,9	25,6
0,1	0,3	0,1	0,1	0,9	0,5	1,8	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4
6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,5	6,5	6,0	6,5	6,3	6,5	6,8
0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,5	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0	0,3
22,0	22,3	22,0	22,0	22,4	22,2	22,7	22,4	22,8	22,4	22,4	22,0
0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,4	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	0,0
9,0	9,9	10,2	11,9	10,0	10,3	11,3	10,7	12,1	9,1	9,3	10,4
0,0	0,6	0,2	0,4	1,3	0,8	0,9	0,2	0,3	0,2	0,4	0,9
41,8	42,9	43,3	44,6	42,8	43,1	44,0	43,3	45,0	42,1	42,1	43,1
0,2	0,6	0,2	0,4	1,4	0,6	1,0	0,4	0,4	0,2	0,4	1,1
186,7	186,8	186,7	186,9	24,7	24,6	24,7	24,7	24,8	680,0	680,0	679,9
0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,2
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	3,0	3,0	3,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
97,2	96,3	94,9	93,7	95,9	93,3	89,5	91,0	94,2	91,9	92,8	97,0
0,2	0,5	0,3	2,1	0,9	0,4	1,0	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8
554,3	507,4	514,3	535,0	588,2	552,3	508,3	516,3	537,9	579,3	558,4	529,4
1,8	4,6	8,8	8,8	4,1	3,1	1,8	14,1	2,1	10,5	8,6	4,7
1,4	1,2	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
1,3	1,4	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,5	1,2	1,0	1,0	1,1
0,2	0,4	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,7	0,2	0,0	0,0	0,2
305,2	309,1	313,5	306,5	309,3	310,3	310,0	307,3	305,5	226,8	254,8	290,4
6,4	0,4	4,7	4,3	2,9	1,9	12,0	0,6	1,4	11,3	9,0	6,1
29,5	29,7	29,9	29,9	29,9	29,0	29,7	29,8	29,9	29,9	29,9	29,9
0,3	0,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
6,8	6,8	7,0	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
30	30	15	15	15	15	15	0	0	0	0	0	-15
-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20
28,7	28,7	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,9	28,9	28,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
49,2	47,4	50,4	47,3	46,4	44,5	45,7	50,3	44,3	45,5	42,8	46,4	45,3
0,8	2,1	1,9	1,3	1,1	1,0	2,6	0,9	1,6	1,7	2,1	0,6	3,2
18,8	18,3	19,6	19,3	19,2	18,4	18,2	19,5	19,0	18,8	19,0	19,4	18,7
0,3	0,3	0,3	0,5	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	
34,8	36,9	33,3	33,8	33,9	34,8	35,8	33,4	33,6	33,8	34,8	36,5	33,5
0,2	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	1,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
81,4	81,5	81,5	81,3	81,2	81,1	81,2	81,4	81,5	81,2	81,3	81,2	80,9
0,2	0,1	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,4	0,1	0,1	0,3
51,4	51,0	51,0	51,3	51,0	51,0	51,1	51,0	51,1	51,0	50,9	50,9	51,4
0,6	0,0	0,0	0,5	0,1	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,6
26,0	25,6	25,7	25,7	25,7	25,7	26,0	25,7	25,8	25,8	25,7	25,8	26,0
0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2
6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,6	6,8	6,6	6,5	6,5	6,3	6,8	6,2
0,7	0,2	0,0	0,5	0,0	0,2	0,4	0,2	0,2	0,0	0,2	0,3	0,8
22,5	22,1	22,4	22,5	22,3	22,1	22,2	22,3	22,4	22,2	22,5	22,3	22,5
0,7	0,2	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	0,3	0,7
10,3	13,1	9,3	9,0	9,9	10,9	11,5	9,3	9,2	9,5	10,5	12,0	9,2
0,2	0,4	0,4	0,0	0,6	0,4	1,6	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
43,3	45,9	42,1	42,0	42,6	43,6	44,5	42,1	42,1	42,2	43,3	45,0	41,8
0,2	0,6	0,4	0,0	0,4	0,4	1,4	0,6	0,4	0,2	0,2	0,0	0,4
680,0	680,0	516,6	516,5	516,6	516,	516,7	351,6	351,5	351,5	352,0	351,3	186,5
0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,7	0,2	0,0
3,0	2,9	3,0	3,0	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
98,1	98,1	96,9	98,8	98,9	97,9	94,4	96,5	97,7	97,3	97,2	97,2	95,2
0,4	0,7	0,1	0,6	0,6	0,2	2,7	0,3	0,7	0,2	0,2	0,2	0,7
510,0	515,8	577,8	522,5	514,3	512,	527,8	577,3	514,3	509,5	529,7	534,5	572,5
4,0	8,9	7,5	5,0	4,5	5,4	19,6	1,8	5,9	0,7	3,8	2,0	7,3
1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	1,3	1,0	1,3	1,0	0,9	1,0	1,1	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0
0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,4	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
294,7	292,8	308,9	307,0	311,5	310,	303,5	305,0	307,1	304,2	324,7	305,1	310,5
5,4	13,5	3,1	2,8	4,0	7,8	5,0	0,5	2,9	3,6	9,4	2,9	0,7
29,9	29,8	29,9	29,6	29,9	29,4	29,9	29,9	29,9	29,3	29,9	29,9	29,9
0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1
6,7	6,7	6,8	6,8	6,7	6,7	7,0	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,0
-15	-15	-15	-15	-30	-30	-30	-30	-30	30	30	30
0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0
28,8	28,8	28,8	28,9	28,8	28,8	28,9	28,8	28,8	28,9	28,7	28,7
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37,6	47,8	48,8	47,0	50,7	46,8	47,3	44,3	44,9	51,8	53,6	50,2
2,4	0,8	1,0	0,3	1,8	0,9	1,6	2,6	0,6	2,4	1,4	1,2
18,8	20,2	20,2	19,6	22,3	19,7	19,9	19,6	19,5	18,9	19,0	19,1
0,2	0,2	0,1	0,1	1,7	0,3	0,3	0,2	0,4	0,2	0,1	0,2
33,5	33,8	34,5	36,0	33,3	33,4	33,7	34,5	36,4	33,5	33,6	33,7
0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2
81,4	80,7	81,3	80,8	81,4	81,1	81,0	81,0	81,1	81,2	81,5	81,7
0,3	0,3	0,2	0,0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3
51,0	51,0	50,9	50,9	50,9	51,0	50,9	50,9	50,9	51,3	50,9	50,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1
25,8	25,9	24,7	25,6	26,1	25,8	25,7	25,8	25,8	25,7	25,7	25,8
0,3	0,2	1,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
6,6	6,5	6,5	6,5	6,8	6,5	6,8	6,5	6,8	6,6	6,6	6,5
0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,2	0,6	0,2	0,0
22,3	22,3	22,0	22,3	22,2	22,0	22,2	22,2	22,0	22,8	22,3	22,3
0,3	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,6	0,3	0,2
9,1	9,2	10,9	11,7	9,0	9,8	9,8	9,8	12,8	9,4	9,4	9,2
0,4	0,2	1,1	0,2	0,7	0,4	0,6	0,2	0,6	0,4	0,4	0,2
42,0	42,0	43,4	44,5	41,7	42,5	42,5	42,8	45,4	42,3	42,3	42,0
0,3	0,3	1,1	0,3	0,6	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,0
186,5	186,5	186,5	186,5	24,7	24,8	24,7	24,5	24,5	680,0	680,0	679,8
0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
3,0	2,9	2,9	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	2,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
96,8	97,0	97,0	96,2	93,2	94,7	97,1	94,4	95,1	95,1	96,5	98,3
0,8	0,3	0,4	0,5	1,0	0,8	0,2	1,3	0,6	0,5	0,8	0,5
609,4	587,7	585,0	573,3	616,2	603,1	587,7	582,7	580,3	553,8	542,4	526,0
11,4	1,1	2,8	5,2	13,4	4,9	2,4	8,8	2,6	3,4	4,4	3,8
1,5	1,4	1,5	1,5	1,6	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
308,1	308,2	305,2	305,0	308,2	305,0	308,0	306,5	303,0	257,9	262,1	287,4
2,4	1,8	2,6	3,0	4,4	0,8	1,3	1,7	2,8	10,6	8,1	5,8
29,8	29,8	29,9	29,9	29,8	29,9	29,9	29,8	29,9	29,8	29,9	29,9
0,1	0,2	0,2	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2
6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,8	6,7	6,7
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
30	15	15	15	15	15	0	0	0	0	0	-15
-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20
28,6	28,7	28,7	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
54,4	58,3	54,8	53,6	53,3	51,6	57,5	55,5	51,9	52,5	50,8	48,4
1,4	4,9	1,4	2,1	0,6	2,1	1,3	2,3	1,3	1,0	1,2	9,9
19,2	19,9	18,9	20,1	21,0	19,2	18,7	18,8	19,4	20,1	19,8	18,6
0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	0,1	0,2	0,8	0,1	0,2	0,6	0,2
36,3	33,3	33,5	33,8	34,4	36,0	33,2	33,5	33,5	34,4	36,4	33,3
0,2	0,2	0,0	0,4	0,3	0,5	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3
81,2	81,4	81,2	81,3	81,2	81,5	81,5	81,6	81,2	81,5	81,7	81,2
0,2	0,1	0,5	0,5	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,1	0,5	0,5
51,0	51,0	51,0	51,1	51,0	51,0	51,2	51,0	51,1	50,9	51,1	51,0
0,0	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1
25,5	25,7	25,7	25,1	25,8	25,8	25,2	25,3	25,7	25,4	25,6	25,6
0,1	0,3	0,3	0,8	0,3	0,2	0,5	0,4	0,2	0,1	0,3	0,5
6,5	6,3	6,5	6,4	6,5	6,6	6,3	6,5	6,4	6,6	6,2	6,5
0,2	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,0
22,1	22,2	22,2	22,4	22,4	22,1	22,3	22,3	22,4	22,1	22,5	22,4
0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
11,9	9,0	9,0	10,5	9,8	12,0	10,7	9,5	9,1	10,4	12,2	9,4
0,6	0,0	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2	0,8	0,2	0,6	0,4	0,8
44,5	41,5	41,7	43,3	42,7	44,8	43,3	42,3	41,9	43,1	44,9	42,3
0,6	0,0	0,2	0,6	0,4	0,5	0,4	0,9	0,2	0,7	0,5	0,6
679,7	516,5	516,5	516,6	516,6	516,8	351,5	351,6	351,5	351,6	351,5	186,5
0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0
2,9	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95,9	94,1	94,0	96,3	95,9	96,0	97,3	96,5	97,6	96,0	96,0	94,9
0,7	0,5	1,3	1,6	0,5	0,3	0,3	0,7	0,2	0,8	0,6	1,0
592,8	642,2	620,0	593,8	595,3	586,1	628,0	618,9	586,8	592,9	586,8	640,6
5,8	9,9	20,0	6,8	3,3	2,4	7,7	1,8	2,3	4,4	4,2	16,8
1,5	1,6	1,6	1,5	1,5	1,3	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,1	1,3	1,0	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,2	0,2	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
214,0	303,2	302,3	303,4	301,1	308,6	309,8	312,5	305,8	303,8	310,0	310,0
7,6	1,9	1,1	4,3	5,3	2,6	3,6	6,3	2,4	4,5	5,0	2,0
29,9	29,6	29,9	29,6	29,8	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,8
0,0	0,4	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,5	6,6	6,7	6,6	6,6	6,6	6,7	6,6	6,6	6,6	6,6	6,7
0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1

83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0
-15	-15	-15	-30	-30	-30	-30	-30	-30	30	30	30
0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10
28,5	28,5	28,6	28,6	28,6	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
57,0	37,9	48,8	53,7	55,4	53,9	47,5	45,1	61,6	59,3	53,0	17,8
0,8	8,7	1,0	3,2	2,2	2,1	1,3	1,4	1,4	3,0	5,6	
19,8	20,1	19,2	19,9	19,5	19,9	19,0	19,5	20,0	19,5	19,7	19,1
0,3	0,2	0,1	0,2	0,6	0,2	0,4	0,2	0,4	0,8	0,3	0,3
33,8	34,4	36,3	33,5	33,3	33,5	34,5	36,4	33,3	33,5	33,8	34,4
0,3	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,2	0,3
81,2	81,1	80,9	81,0	80,9	81,2	81,7	81,3	80,6	81,1	81,2	81,3
0,3	0,6	0,3	0,1	0,5	0,4	0,0	0,5	0,6	0,3	0,3	0,4
50,9	51,1	51,0	50,9	51,5	51,0	51,3	50,9	50,9	51,4	50,9	50,9
0,0	0,2	0,1	0,1	0,7	0,1	0,4	0,0	0,1	0,5	0,1	0,1
24,2	25,1	25,8	25,5	25,7	25,7	25,7	25,9	25,6	26,0	25,6	25,9
2,2	0,8	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3
6,8	6,3	6,5	6,7	5,9	6,4	6,3	6,5	6,6	6,2	6,7	6,5
0,3	0,3	0,0	0,2	0,9	0,2	0,6	0,0	0,2	0,4	0,2	0,0
22,1	22,6	22,0	22,2	22,8	22,5	22,5	22,4	22,3	22,8	22,2	22,3
0,2	0,4	0,0	0,2	0,8	0,3	0,7	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
10,1	10,5	12,0	9,2	9,0	9,3	10,2	12,0	9,4	9,0	9,2	10,1
1,7	1,0	0,3	0,6	0,0	0,2	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7
43,0	43,4	44,5	42,0	41,6	42,1	43,0	44,9	42,3	42,0	42,0	42,9
1,5	0,9	0,3	0,7	0,2	0,2	0,7	0,5	0,8	0,7	0,3	0,5
186,4	186,4	186,5	24,5	24,6	24,9	24,7	24,7	679,8	679,8	679,8	679,9
0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	
2,9	2,9	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	
0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
97,4	95,2	94,6	94,3	95,0	96,4	94,7	94,9	94,0	95,1	94,8	96,0
0,6	0,8	0,5	0,6	0,3	0,3	0,6	1,4	0,2	0,1	0,6	1,9
634,1	634,6	611,6	655,7	650,5	636,9	629,2	604,8	652,9	613,5	574,2	595,7
7,6	4,9	8,1	6,9	9,0	5,4	4,6	12,2	3,6	22,3	2,6	5,2
1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
1,1	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,2	1,2
0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2
308,1	307,0	306,0	305,2	310,9	305,1	307,7	305,0	611,1	197,7	244,0	216,5
5,4	3,0	4,0	3,6	1,2	3,1	2,9	1,4	1,6	25,2	4,7	4,6
29,8	29,6	29,8	29,8	29,9	29,9	29,7	29,9	29,9	29,6	29,8	
0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,4	0,2	
6,5	6,5	6,6	6,5	6,6	6,5	6,5	6,6	6,5	6,5	6,7	6,6
0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0

95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
15	15	15	15	15	0	0	0	0	0	-15	-15
0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10
29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60,6	60,9	57,9	59,1	56,4	59,2	60,8	58,5	55,7	49,8	58,7	58,7
1,0	0,9	0,6	1,7	1,1	1,6	0,6	1,0	0,8	0,6	1,4	0,4
19,6	19,6	19,8	19,7	19,4	19,6	19,0	19,0	18,7	19,2	19,5	20,3
0,2	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1	0,4	0,7	0,2	0,5	0,4	0,3
32,7	32,8	32,8	33,8	35,6	33,3	33,4	33,6	34,2	36,1	33,4	33,3
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2
79,9	80,2	79,8	80,2	80,3	81,2	81,3	81,0	81,2	81,3	81,4	81,6
0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,6	0,3	0,3	0,1	0,5	0,3
50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	51,0	50,9	51,2	51,1	50,9	50,9	50,9
0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,5	0,2	0,2	0,1	0,0
24,9	25,5	25,2	25,0	24,8	26,1	24,7	25,8	25,5	24,2	25,0	25,5
0,9	0,4	0,7	1,0	1,1	0,6	1,5	0,1	0,1	1,9	1,0	0,2
6,7	6,6	6,6	6,6	6,7	6,5	6,7	6,3	6,5	6,6	6,6	6,5
0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,3	0,0	0,2	0,2	0,0
24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	22,3	22,2	22,5	22,2	22,2	22,3	22,2
0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
9,0	8,7	8,9	9,9	12,0	8,8	10,4	9,7	9,7	13,4	9,6	8,8
0,5	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4	0,9	0,6	0,2	1,7	0,8	0,2
41,2	41,0	41,0	42,2	44,3	41,7	43,3	42,5	42,3	46,2	42,5	41,5
0,5	0,3	0,4	0,5	0,7	0,2	1,0	0,6	0,2	1,6	0,8	0,0
516,9	516,9	516,9	516,8	516,9	351,7	351,5	351,5	351,5	351,5	186,5	186,5
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,0	3,1	3,1	3,0	3,1	2,9	3,0	3,0	2,9	3,0	2,9	2,8
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
96,8	97,4	97,4	95,0	95,8	95,9	96,6	97,5	97,2	97,9	95,3	94,5
0,3	0,6	1,0	0,7	0,2	0,3	0,9	0,6	0,7	0,2	0,3	0,3
653,4	645,0	625,3	650,3	634,0	658,0	650,5	632,6	624,8	593,9	656,5	662,5
3,2	6,3	5,8	3,2	1,7	3,3	5,6	7,1	14,2	3,5	3,4	3,0
1,6	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,3	2,3	2,2	2,2	1,3	1,0	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0
30,0	29,9	30,0	30,0	30,0	29,5	29,9	29,9	29,6	29,9	29,9	29,9
0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
307,3	305,8	311,3	307,8	307,8	310,3	313,0	306,4	303,2	304,7	307,2	309,3
2,5	3,3	2,5	5,8	2,6	0,8	1,8	2,9	0,2	1,2	2,6	3,1
7,0	7,0	6,9	7,0	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

119	118	117	116	115	114	113	112	111	110	109	108
5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
15	15	15	15	0	0	0	0	0	-15	-15	-15
0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20	0,10	0
28,9	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,1	29,1	29,1	29,1	29,1	29,1
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
58,3	56,2	57,3	54,2	59,5	57,3	57,7	56,9	54,6	54,9	58,6	56,2
0,6	0,2	0,6	0,5	0,2	0,7	1,0	1,9	0,6	1,5	2,3	1,2
20,0	19,8	19,0	19,6	19,6	19,9	19,3	20,5	18,6	20,2	20,3	20,1
0,1	0,4	0,4	0,3	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1
32,8	32,9	33,8	35,6	32,8	32,7	33,2	33,8	35,8	32,8	32,8	33,1
0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
80,1	80,4	80,2	80,0	80,1	80,1	80,3	80,0	80,2	80,1	79,8	80,1
0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,5
50,8	50,7	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,9	50,9	50,8
0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
25,3	25,6	25,4	25,5	25,6	25,5	25,6	25,5	25,7	25,5	25,5	25,5
0,4	0,1	0,4	0,1	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1
6,7	6,6	6,6	6,7	6,7	6,5	6,7	6,7	6,7	6,7	6,6	6,6
0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,1	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
8,9	8,7	9,9	11,4	8,5	8,9	8,8	9,7	11,9	8,8	8,9	9,0
0,3	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2
41,2	40,9	42,1	43,7	40,8	41,0	41,1	41,9	44,1	41,0	41,1	41,2
0,4	0,1	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
516,9	516,9	516,9	517,0	351,9	351,9	351,8	351,8	351,9	186,9	186,9	186,8
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
97,9	99,3	99,0	98,1	95,6	97,6	98,2	95,8	97,0	97,6	96,8	97,8
0,5	0,1	0,4	0,3	0,8	0,4	0,9	0,6	0,3	0,6	0,7	0,8
652,1	618,3	618,3	604,9	676,0	640,9	632,9	641,7	610,1	642,4	653,6	626,9
8,4	2,9	5,1	3,2	10,5	9,1	9,8	9,0	3,4	8,5	9,7	8,7
1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,7	36,4	36,3	49,9	2,3	13,8	21,8	13,9	44,7	14,0	6,3	27,7
4,4	3,0	5,0	3,3	0,1	9,1	9,9	7,7	3,4	6,1	5,6	8,7
303,8	270,3	267,5	254,5	305,8	294,7	288,8	295,1	263,6	294,7	304,5	280,8
6,0	3,0	4,6	4,5	3,2	10,2	8,7	8,9	6,9	9,5	5,7	7,3
29,9	29,9	29,9	29,9	30,0	30,0	29,9	29,9	30,0	29,9	29,9	29,9
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9
0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

125	124	123	122	121	120
5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
30	30	30	30	30	15
0,20	0,10	0	-0,10	-0,20	0,20
28,9	28,8	28,9	28,9	28,9	28,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
57,8	58,2	56,3	60,6	55,9	56,7
1,2	1,4	1,3	0,9	0,1	0,8
19,6	19,2	20,2	18,7	19,2	19,0
0,0	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3
32,8	32,8	33,0	33,8	35,5	32,9
0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
80,1	80,1	79,9	80,2	80,2	80,2
0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
50,7	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8
0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
25,6	25,6	25,5	25,4	25,4	25,6
0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1
6,7	6,6	6,5	6,6	6,6	6,7
0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8,9	8,5	9,0	9,9	11,4	8,7
0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1
41,1	40,7	41,1	42,1	43,6	41,0
0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1
680,2	680,3	680,4	680,3	680,2	516,9
0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
97,6	97,6	98,5	95,8	98,4	97,6
1,1	1,1	0,9	0,2	0,2	0,8
660,5	653,0	632,9	651,4	613,3	659,8
7,4	12,2	10,8	1,6	2,0	8,7
1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,7	8,2	22,4	3,6	41,3	3,1
0,7	5,9	10,0	1,5	2,0	1,2
153,9	149,8	158,6	151,3	161,7	305,3
11,7	8,5	6,7	6,9	4,1	3,1
29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	30,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,6	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Programa feito no ambiente MATLAB® do método RFP para ajustar uma razão de polinômios às curvas de FRF (amplitude e fase) obtidas experimentalmente:

```

%% Inicio

clear all
close all
clc

%% Leitura do Arquivo

% Amplitude -----
fid = fopen('C:\Users\Iaroslav_Shababovskyi\OneDrive\Tese-UFU\Modal_analysis_free-
free_vibration_with_panels\Analise modal\Hexagonal_10_Amplitude_&_Fase\Hexagonal_10_ampl_p16.txt'); % Nome do Arquivo

C = textscan(fid, '%f%f', 'HeaderLines', 84)
Freqvec = C(:,2);
Amplvec = C(:,3);
fclose(fid);

% Fase -----
fid = fopen('C:\Users\Iaroslav_Shababovskyi\OneDrive\Tese-UFU\Modal_analysis_free-
free_vibration_with_panels\Analise modal\Hexagonal_10_Amplitude_&_Fase\Hexagonal_10_fase_p16.txt'); % Nome do Arquivo

C = textscan(fid, '%f%f', 'HeaderLines', 84)
Fasevec = C(:,3);
fclose(fid);

% Considerando frequencia entre 100 e 800 Hz
wmin = 150; wmax = 800;

Freqvec1 = Freqvec(Freqvec >= wmin);
Freqvec2 = Freqvec1(Freqvec1 <= wmax);

Amplvec1 = Amplvec(Freqvec >= wmin);
Amplvec2 = Amplvec1(Freqvec1 <= wmax);

Fasevec1 = Fasevec(Freqvec >= wmin);
Fasevec2 = Fasevec1(Freqvec1 <= wmax);

% Construindo FRF na forma complexa
AmplComplvec = Amplvec2.*exp(1i*Fasevec2*pi/180);

%% Plot FRF - Original APENAS

plot_original = 1; % 1 = Sim 0 = Não

if plot_original
    figure('Color',[1 1 1])
    subplot(2,1,1), semilogy(Freqvec,Amplvec);
    xlabel('$\omega$ [Hz]', 'interpreter', 'latex');
    ylabel('FRF - Amplitude')

    subplot(2,1,2), plot(Freqvec,Fasevec);
    xlabel('$\omega$ [Hz]', 'interpreter', 'latex');
    ylabel('FRF - Fase')

end

%% Identificação frequencias e amortecimentos

N=7; % Numero de modos

[alpha,par]=rfp(AmplComplvec,Freqvec2,N);

fn=par(:,1) %natural frequencies
xi=par(:,2) %damping ratios
C=[par(:,3),par(:,4)] %modal constant (magnitud,phase)

%% Plot Comparação FRF - Original e Identificada

plot_comparacao = 1; % 1 = Sim 0 = Não

if plot_comparacao
    figure('Color',[1 1 1])
    subplot(2,1,1), semilogy(Freqvec1,Amplvec1); hold on;
    subplot(2,1,1), semilogy(Freqvec2,abs(alpha), '--r');
    xlabel('$\omega$ [Hz]', 'interpreter', 'latex');

```

```
ylabel('FRF - Amplitude')

subplot(2,1,2), plot(Freqvec1,Fasevec1); hold on;
subplot(2,1,2), plot(Freqvec2,angle(alpha)*180/pi,'--r');
xlabel('$\omega$ [Hz]', 'interpreter', 'latex');
ylabel('FRF - Fase')
legend('Experimental (FRF)', 'Ajustado (RFP)');

end
```