

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA AERONÁUTICA

DANIELLE MONTEIRO SOUZA

**ESTUDO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO DE PAREDES
DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA
A ARCO ELÉTRICO**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UBERLÂNDIA - MG
2017

DANIELLE MONTEIRO SOUZA

**ESTUDO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO DE PAREDES
DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA
A ARCO ELÉTRICO**

Projeto de Conclusão de Curso de graduação,
do curso de Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA – MG
2017

DANIELLE MONTEIRO SOUZA

**ESTUDO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE RESFRIAMENTO DE PAREDES
DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA
A ARCO ELÉTRICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado a Faculdade de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Aprovado em: 22 de dezembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU

Profª. Dra. Núbia dos Santos Saad
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU

Dedico este trabalho aos meus pais, por não medirem esforços pelo meu sucesso e minha felicidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e pelas lindas oportunidades que recebi ao longo dos anos.

Aos meus pais, Eliton e Vilma, merecedores de toda minha gratidão pelo mais grandioso e sincero amor que me oferecem diariamente.

A todos meus professores até então, que carregam consigo o dom e o privilégio de ensinar.

A Universidade Federal de Uberlândia e seu corpo docente, responsáveis por minha formação e ética profissional.

Ao meu orientador Ruham pela prontidão em ensinar, ajudar e orientar.

Ao Leandro, cuja ajuda foi fundamental para realização deste trabalho.

Aos professores Douglas e Núbia pela disposição em contribuir com o projeto.

Aos Laboratórios LAPROSOLDA e LMEst pela disponibilidade de fundamentais equipamentos além do auxílio de técnicos e professores.

Aos meus irmãos Giselle e Rodrigo, por confiarem no meu sucesso e serem apoio desde a infância.

Ao meu namorado Kássio e demais amigos e familiares que sempre foram o sustento de minha felicidade e fonte de incentivos.

RESUMO

A manufatura aditiva vem ganhando espaço no cenário dos processos de fabricação. As razões são o baixo tempo de produção, redução de custos financeiros e a alta versatilidade na construção de geometrias complexas, fazendo com que o desempenho dos produtos seja o foco principal. Dentre suas variantes, a manufatura a arco elétrico é a técnica de deposição de material por camadas com o uso de processos de soldagem tradicionais já consolidados. A técnica CMT de deposição, derivada dos processos MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas) é um sistema de alta produtividade e financeiramente viável com grande foco na produção de elementos de geometrias complexas. O superaquecimento da superfície dos componentes fabricados por deposição metálica pode ser responsável pelo aparecimento de tensões residuais, degradação de propriedades mecânicas, desvio geométrico e queda de produtividade. Com o objetivo de diminuir este superaquecimento, três estratégias de resfriamento de paredes retangulares de alumínio construídas por CMT foram planejadas e executadas neste trabalho para posteriores análises de propriedades mecânicas, geométricas e de porosidade. As estratégias são: natural ao ar sem uso de água, resfriamento do suporte com água e resfriamento por imersão em água. Todo o processo contou com a deposição de 28 camadas de 300mm cada. O campo de temperatura foi monitorado por câmera térmica e termopares. Os resultados térmicos mostraram nitidamente as altas temperaturas e baixas taxas de resfriamento das paredes feitas sem água. Geometricamente as paredes resfriadas por imersão apresentaram maior altura e regularidade, além de maior área efetiva de material que resulta em possíveis benefícios financeiros. Ensaio de tração mostraram que para as condições sem uso de água e com resfriamento apenas do suporte tendem a apresentar maior ductilidade nas direções horizontais dos corpos de prova (no sentido longitudinal de deposição de material). A condição por imersão diminui a anisotropia dos corpos de prova. Um novo método para avaliar a deformação dos corpos de prova foi desenvolvido, trata-se de análise de imagens em software que relaciona um círculo desenhado no início do ensaio com sua configuração final no momento da ruptura. Os resultados foram coerentes e levemente distintos da análise por método de deslocamento. A porosidade de paredes com resfriamento por imersão não mudou em relação às demais e a dureza das paredes ficou em média muito parecida. Em geral, foram observadas melhorias quanto ao uso de imersão em água, por isso muitas outras análises podem ser feitas a partir das metodologias e resultados obtidos.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Soldagem CMT, Propriedades Mecânicas, Geometria da Parede.

ABSTRACT

Additive manufacturing has been gaining ground in the manufacturing process scenario. The reasons are low production time, reduced financial costs and high versatility in building complex geometries, making product performance the focus. Among its variants, electric arc welding is a technique of material deposition by layers using traditional welding processes already consolidated. The CMT deposition technique, derived from the MIG / MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas) processes, is a highly productive and financially viable system with large focus on the production of complex geometry elements. The overheating on the surface of components made by metallic deposition may be responsible for the appearance of residual stresses, degradation of mechanical properties, geometric deviation and decrease of productivity. In order to reduce this overheating, three strategies to cool aluminum walls built by CMT were planned and executed in this work for later analyzes of mechanical properties, geometric and porosity. The strategies are natural to air without water, cooling the support with water and cooling by immersion in water. The whole process counted on the deposition of 28 layers of 300mm each. The temperature field was monitored by thermal camera and thermocouples. The thermal results clearly showed the high temperatures and low cooling rates of the walls made without water. Geometrically the immersion technique showed higher height and regularity, as well as a larger effective area of material which results in possible financial benefits. Tensile tests showed that conditions without water and with cooling only the support tend to have greater ductility in the horizontal directions of the test specimens (in the longitudinal direction of material deposition). The immersion condition decreased the anisotropy of the specimens. A new method to evaluate the deformation of the test specimens was developed, it is a software image analysis that relates a circle drawn at the beginning of the test with its final configuration at the moment of rupture. The results were consistent and slightly different from the displacement method analysis. The porosity of immersed walls did not change in relation to the others and the hardness of the walls was on average very similar. In general, improvements were observed regarding the use of immersion in water, so many other analyzes could be made based on the methodologies and results obtained.

Keywords: Additive Manufacturing, CMT Welding, Mechanical Properties, Wall Geometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Composição estrutural do Boeing 737 (em massa). Fonte: Adaptado de Adrian P. Mouritz em “Introduction to aerospace materials”.	2
Figura 2 - Composição estrutural do Boeing 787 (em massa). Fonte: Adaptado de Adrian P. Mouritz em “Introduction to aerospace materials”.	2
Figura 3 - Emprego da manufatura aditiva na aeronáutica: (a) um componente externo de montagem de um trem de pouso; (b) a construção de reforços de uma asa. Fonte: Williams et al (2016).	7
Figura 4 - Esquema da relação entre taxa de deposição e resolução em processos de manufatura aditiva para metais.	8
Figura 5 - Ilustração do equipamento para soldagem CMT. Fonte: CMT (FRONIUS, 2007).	10
Figura 6 - Robô Fanuc (a), CMT (b) reservatório de água (b). Fonte: (a) Site fabricante <acessado em out. 2017>.....	13
Figura 7 - Serra fita horizontal <i>Sawmaster SM 330M</i>	13
Figura 8 - Fresadora <i>Timemaster 5KVIG</i> (a) e Máquina de tração <i>MTS Landmark 647 Hydraulic Wedge Grip</i> (b).	14
Figura 9 - Microdurômetro <i>Shimadzu HMV-G</i> (a) e balança <i>Ohaus TP2000</i> (b).	14
Figura 10 - Condicionador de sinais (a), termopares (a), paquímetro (a) e câmera térmica (b).	15
Figura 11- Suporte.	16
Figura 12- Cuba de deposição/resfriamento.	16
Figura 13 - Diferentes estratégias de resfriamento avaliadas.	17
Figura 14 - Construção do suporte.	18
Figura 15 - Vista lateral da cuba vedada.	19
Figura 16 - Encaixe tocha CMT – Robô.	19
Figura 17- Esquema de deposição das camadas.	20
Figura 18 - Posicionamento dos termopares no substrato.	21
Figura 19 - Aparato experimental real.	22
Figura 20 - Aparato experimental esquemático.	23
Figura 21 - Aparato experimental em detalhes.	23
Figura 22 - Parede finalizada.	23
Figura 23 - Esquema da remoção do CP para macrografia e microdureza.	24
Figura 24 - Disposição dos CPs nas paredes.	25
Figura 25 - Geometria dos CPs de tração (dimensões em mm).	25
Figura 26 - CP de tração finalizado com referência circular para cálculo de deformação.	26
Figura 27 - Ilustração campo de temperatura para resfriamento sem água.	28
Figura 28 - Ilustração campo de temperatura para resfriamento com água até o suporte.	29
Figura 29 - Ilustração campo de temperatura para resfriamento com água na parede.	29
Figura 30 - Resultados dos termopares localizados na região central do substrato para as dez primeiras camadas para as três estratégias de resfriamento.	30

Figura 31- Resultados de termopares localizados no substrato região central.	31
Figura 32 - Mapa térmico para a condição Sem Água ao final da deposição.....	33
Figura 33 - Mapa térmico para a condição Água Suporte ao final da deposição.....	33
Figura 34 - Mapa térmico para a condição Água Camada ao final da deposição.	34
Figura 35 - Esquema da região das paredes para obtenção dos ciclos térmicos por meio da câmera termográfica.	35
Figura 36- Ciclos térmicos do centro da vigésima camada levantados por meio da câmera IR.	35
Figura 37 - Extrapolação das curvas finais de resfriamento da vigésima camada levantadas por meio da câmera IR (provável tendência após os ciclos térmicos mostrados na Figura 36).	36
Figura 38 - Paredes prontas com as diferentes condições de resfriamento (escala em mm). ..	37
Figura 39 - Comparação de alturas e espessuras médias das paredes para as diferentes estratégias de resfriamento.....	39
Figura 40 - Altura média das paredes para as diferentes estratégias de resfriamento.	40
Figura 41 - Espessura média das paredes para as diferentes estratégias de resfriamento.	41
Figura 42 - Macrografia central para (a) Água Camada, (b) Água Suporte e (c) Sem Água. .	42
Figura 43 - Altura x Espessura central em detalhes.	43
Figura 44 - Larguras centrais efetivas.	44
Figura 45 - Áreas Centrais Efetivas.....	44
Figura 46 - Altura x Espessura esquerda em detalhes.	45
Figura 47 - Altura x Espessura direita em detalhes.	46
Figura 48 - Evolução da altura ao longo da parede para a condição Sem Água.	46
Figura 49 - Evolução da altura ao longo da parede para a condição Água Suporte.....	47
Figura 50 - Evolução da altura ao longo da parede para a condição Água Camada.	47
Figura 51 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Sem Água na região esquerda da parede.	49
Figura 52 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Sem Água na região central da parede.	49
Figura 53 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Sem Água na região direita da parede.....	50
Figura 54 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Suporte na região esquerda da parede.	51
Figura 55 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Suporte na região central da parede.	51
Figura 56 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Suporte na região direita da parede.....	52
Figura 57 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Camada na região esquerda da parede.	53
Figura 58 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Camada na região central da parede.....	53
Figura 59 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Camada na região direita da parede.	54

Figura 60 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para as condições Sem Água, Água Suporte e Água Camada na região central das paredes.....	55
Figura 61 - Resultados de deslocamento até a ruptura (ductilidade) para todas regiões (esquerda, central e direita) da parede para cada condição de resfriamento (a) Sem Água, (b) Água Suporte e (c) Água Camada.	56
Figura 62 - Resultados de limite de resistência à tração para todas regiões (esquerda, central e direita) da parede para cada condição de resfriamento (a) Sem Água, (b) Água Suporte e (c) Água Camada.	56
Figura 63 - Corpo de prova no momento de ruptura.	57
Figura 64 - Evolução do comprimento dos CP da condição Água Camada central vertical no tempo até a ruptura.	58
Figura 65 - Deformações verticais baseados no deslocamento e em imagem.	58
Figura 66 - Deformações horizontais baseados no deslocamento e em imagem.	59
Figura 67 - Densidade e volume de vazios das paredes obtidas com as diferentes estratégias de resfriamento.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Posição dos termopares.	21
Tabela 2- Resultados de altura das paredes.	38
Tabela 3- Resultados de espessura das paredes.	38
Tabela 4- Áreas efetivas.	45
Tabela 5- Dureza Vickers.	48
Tabela 6- Volume de vazios das paredes obtidas com as diferentes estratégias de resfriamento.	60
Tabela 7- Volume estimado das paredes.	61

LISTA DE SIGLAS

CMT	Cold Metal Transfer
CP	Corpo de Prova
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
IR	Infrared
WAAM	Wire and Arc Addictive Manufacturing
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
P-MIG	Pulsed Metal Inert Gas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	12
4 METODOLOGIA.....	17
4.1 Fabricação de Paredes	17
4.2 Fabricação de Corpos de Prova.....	24
4.2.1 <i>Macrografia e Microdureza</i>	24
4.2.2 <i>Ensaio de tração</i>	24
4.3 Análise de Deformação.....	26
4.4 Análise de Porosidade	26
5 RESULTADOS	28
5.1 Ciclo Térmico	28
5.1.1 <i>Resultados com Termopares</i>	30
5.1.2 <i>Resultados com Câmera Termográfica</i>	32
5.2 Geometria das Paredes.....	36
5.2.1 <i>Análise macrográfica</i>	41
5.3 Propriedades Mecânicas	48
5.3.1 <i>Dureza</i>	48
5.3.2 <i>Tração</i>	48
5.4 Porosidade	59
6 CONCLUSÕES	62
7 TRABALHOS FUTUROS	64
8 REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A indústria aeronáutica é movida pela necessidade de produzir aeronaves cada vez mais seguras, versáteis, leves e se possível com redução de custos. A ciência dos materiais vem como aliada neste processo, contribuindo para descobertas e emprego de materiais com propriedades físicas, mecânicas, químicas ou térmicas necessárias à construção de cada elemento de uma aeronave. Neste processo é fundamental avaliar também a disponibilidade na natureza (custo de matéria prima) e manuseio, uma vez que as propriedades térmicas ou físicas de um material podem limitar a construção de peças por usinagem, por exemplo.

O alumínio tem papel de destaque nessa jornada devido à combinação de suas características e vem sendo aplicado na indústria aeronáutica desde a substituição da madeira após o final da Primeira Guerra Mundial. As chamadas ligas de alumínio são largamente utilizadas por aliarem boa resistência e rigidez; custo moderado; baixa densidade; fácil fabricação e processamento; além da possibilidade de construção de peças de geometria complexa.

Esta combinação de propriedades é tão valiosa que esta classe de material é aproveitada em enormes proporções nas aeronaves atuais. Muitos modelos são construídos majoritariamente de alumínio, como os Airbus A320, A340, os Boeing 737, 747, 777, caças militares, etc. O conhecido Boeing 737, aeronave comercial mais vendida da história com mais de 9300 aviões entregues e cerca de 6500 aviões em serviço, é composto por 81% de alumínio em massa estrutural (The Boeing 737 Technical Site, 2017 e MOURITZ, 2012). A Figura 1 expõe melhor os fatos citados. O alumínio é usado nos principais componentes estruturais, incluindo fuselagem, asas e empenagens. Em geral, apenas o trem de pouso e os motores são produzidos em aços de elevada resistência e ligas de titânio e superligas, respectivamente.

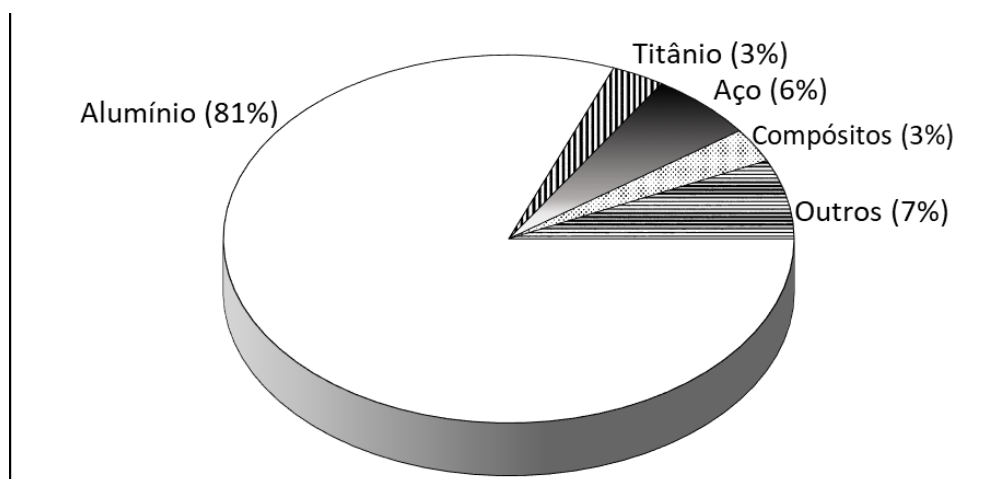


Figura 1 - Composição estrutural do Boeing 737 (em massa). Fonte: Adaptado de Adrian P. Mouritz em “Introduction to aerospace materials”.

E ainda, apesar do crescente uso de materiais compósitos (como por exemplo no Boeing 787 e Airbus A350), o alumínio continua sendo elemento fundamental e indispensável em projetos aeronáuticos como pode ser visto na Fig. 2.

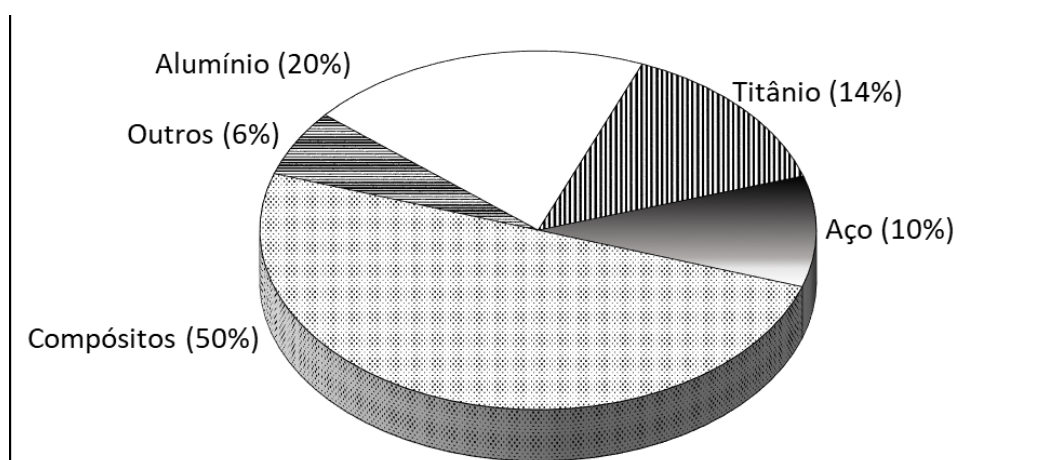


Figura 2 - Composição estrutural do Boeing 787 (em massa). Fonte: Adaptado de Adrian P. Mouritz em “Introduction to aerospace materials”.

Vista a importância das ligas de alumínio, é preciso reconhecer também a necessidade de processos de fabricação adequados para que sejam cada vez mais eficientes no que diz respeito à possibilidade de design de peças, custos, tempo de produção e qualidade final. Devido a sua grande facilidade de transformação, o alumínio pode se submeter sem dificuldades a processos de extrusão, forjamento, laminação, fundição, usinagem e soldagem.

A abordagem deste trabalho é baseada na ideia de otimizar a fabricação de componentes de alumínio por meio da chamada manufatura aditiva. Esta técnica de fabricação consiste em deposição de material camada por camada, até atingir a geometria desejada para o componente ou resultado próximo disso, algo muito semelhante a uma impressão 3D. A grande diferença entre esta técnica e as demais é que aqui a quantidade de matéria prima utilizada é bem próxima do volume final dos produtos e a necessidade de usinagem é drasticamente reduzida (com exceção do desbaste fino e acabamento) (GIBSON, 2010). Observa-se então as vantagens de liberdade de geometria, com foco mais no desempenho dos componentes fabricados, além de custo financeiro reduzido por conta do volume inicial de matéria prima. A ideia é aproximar a razão chamada *buy-to-sell* (relação entre quantidade de matéria prima comprada e vendida na forma de produto final), ou como é mais utilizado na indústria aeronáutica *buy-to-fly* (relação entre massa de matéria prima comprada e colocada para voar), para 1:1.

O desenvolvimento e aplicação desta técnica só foram possíveis devido ao atual acesso ao alto grau de automação, capaz de prover robôs de grande precisão de movimentos e repetitividade. Portanto, o tempo gasto para uma produção em série é reduzido significativamente em comparação com processos convencionais; além da economia de tempo e insumos associada à menor dependência de processos de usinagem.

A tecnologia de deposição de metais na manufatura aditiva pode ser baseada em leito de pó (*powder bed*) utilizando feixe de elétrons ou laser para a sinterização ou baseada em deposição de metal fundido também por feixe de elétrons, laser ou ainda, por processos de soldagem a arco elétrico. Os processos de soldagem convencionais que utilizam arco elétrico são bastante presentes na indústria por possuírem alta taxa de deposição e custo de equipamentos relativamente baixo. Por este motivo e também pelo difícil acesso às demais tecnologias, inclusive por grande parte das indústrias, este trabalho é voltado para manufatura aditiva a arco elétrico.

Dentre os principais processos de soldagem a arco, os mais comuns são o TIG (*Tungsten Inert Gas*) e o MIG/MAG. O termo MIG vem do inglês (*Meal Inert Gas*) e é definido como um processo onde o arco elétrico e a poça de fusão são protegidos de contaminação atmosférica por um gás inerte: argônio puro ou misturas com outros gases. Já o MAG (*Metal Active Gas*) faz uso de dióxido de carbono ou misturas de outros gases no lugar do argônio. O calor que funde o metal inicialmente em forma de arame (continuamente alimentado) é provido por um arco elétrico, alimentado por uma fonte de corrente em geral contínua, que envolve o substrato e o próprio arame sólido. Fatores que influenciam o tamanho do cordão de solda, bem como

tempo gasto para deposição de material, são os valores de corrente e tensão da fonte, velocidade de alimentação e diâmetro do arame.

Um dos grandes vilões dos processos de soldagem a arco elétrico é o enorme aporte térmico gerado durante a deposição de material. O superaquecimento da superfície pode diminuir a produtividade, prejudicar as propriedades físicas e mecânicas do produto final, além de causar desvios geométricos e tensões residuais. Novas tecnologias são desenvolvidas frequentemente para reduzir estes e outros efeitos deletérios que surgem da energia térmica excessiva.

A chamada CMT é uma espécie de otimização dos processos MIG/MAG que opera no modo de transferência metálica por curto-circuito controlado. Do inglês *Cold Metal Transfer* e desenvolvido pela empresa austríaca *Fronius*, sua principal característica é o controle de movimento do arame e da corrente enquanto a deposição acontece, resultando em menor geração de calor e cordões de solda com menor quantidade de respingos. Em resumo, o processo CMT possui uma tocha especial capaz de reverter repetidamente o sentido de velocidade do arame, ou seja, quando ele toca a poça de fusão (momento do curto-circuito) ele é retraído para que a gota de metal fundido se desprenda de maneira mais fácil e seja englobada pela poça de fusão, sem necessidade de altos níveis de correntes elétricas (FRONIUS, 2017). Dessa maneira o aporte térmico diminui consideravelmente e a quantidade de respingos também.

Neste sentido, fica clara a importância de se estudarem os efeitos e possíveis estratégias contra a elevada energia térmica gerada na manufatura aditiva a arco elétrico. Ela pode gerar diversos problemas relacionados a perdas financeiras e de qualidade com os componentes produzidos.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar diferentes estratégias de resfriamento de paredes de alumínio fabricadas por manufatura aditiva por meio do processo de soldagem CMT. Serão avaliadas três formas de resfriamento: resfriamento contínuo com água durante o processo de deposição de material, resfriamento estacionário com água no nível do suporte do substrato e resfriamento convencional apenas por convecção do ar.

1.2.1 *Objetivos específicos*

Serão avaliados os efeitos da estratégia de resfriamento no ciclo térmico, nas propriedades mecânicas (dureza, limite de resistência a tração, ductilidade), características geométricas (altura, largura, largura efetiva, acabamento) e físicas (nível de porosidade) das partes fabricadas em alumínio.

O uso de água para resfriar paredes fabricadas por manufatura aditiva, uma vez que bons resultados sejam gerados, pode ser amplamente empregado no setor industrial, já que a água é um artifício barato e que pode ser reaproveitado (poderia ser usada água de reuso), com poucos danos à natureza (perda parcial de água por evaporação e contaminação por fumos/óxidos metálicos) e a instalação tende a ser simples e financeiramente viável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Willians et al. (2016) afirmam que na construção de componentes aeronáuticos há uma necessidade de processos cada vez mais modernos que poderiam substituir o método atual de fabricação de grandes estruturas, como partes cruciformes, painéis enrijecidos, nervuras de asa, etc., que são usinadas a partir de tarugos ou de forjados grandes, com razões *buy-to-fly* insustentáveis.

No fim da década de 1980 indústrias aeroespaciais experimentaram a manufatura aditiva como tecnologia na produção de componentes metálicos. No decorrer do tempo seu uso no setor aumentou significativamente, dotando em 2012 cerca de 10% da receita global de manufatura aditiva, equivalente a US\$ 220 milhões (WOHLERS, 2013). A explicação para isso reside no fato de a manufatura aditiva trazer consigo vantagens na flexibilidade para criar geometrias de partes complexas que são difíceis de construir usando a fabricação tradicional. Com esta técnica pode-se conceber peças com cavidades internas e estruturas de rede que ajudam a reduzir o peso das peças sem comprometer seu desempenho mecânico. Além disso, a manufatura aditiva produz menos sucata (sobras de material) do que os processos de fabricação tradicionais, um atributo crítico em se tratando de materiais aeroespaciais de custo elevado como o titânio e diversas outras ligas, inclusive de alumínio. E ao contrário de outros processos, na produção em massa a manufatura aditiva pode ser amplamente orientada para produção customizada (COTTELEER et al., 2014). A Figura 3 mostra aplicações de manufatura aditiva na indústria aeronáutica.

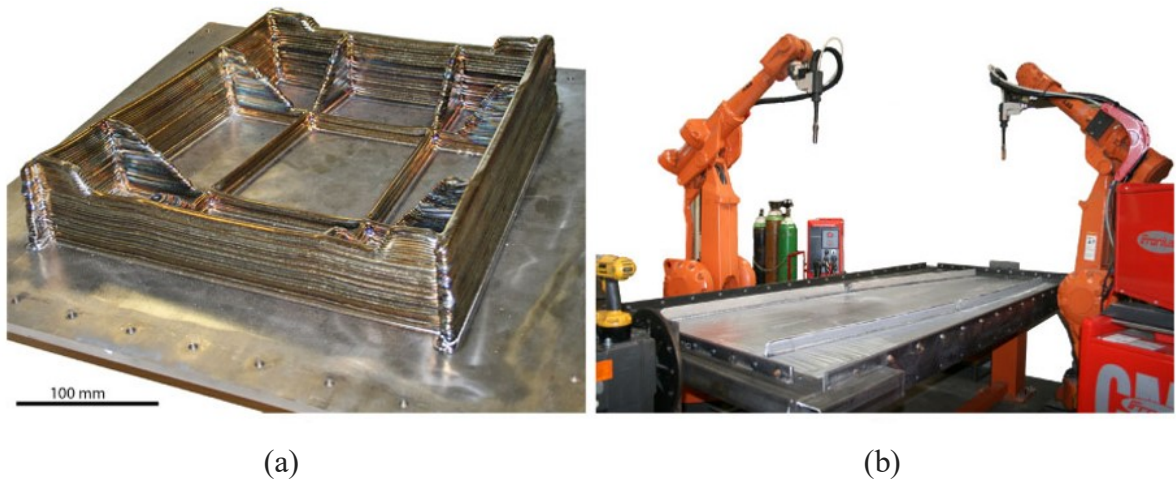


Figura 3 - Emprego da manufatura aditiva na aeronáutica: (a) um componente externo de montagem de um trem de pouso; (b) a construção de reforços de uma asa. Fonte: Williams et al (2016).

Pesquisas mostram que dependendo das técnicas de produção tradicionais, quando empresas do setor aeroespacial migram para a manufatura aditiva, podem se beneficiar em economia de tempo na prototipagem variando de 43% a 75%. (Stratasys Inc. , 2012). Segundo Mark Cottleer (2014), a técnica ajuda empresas a desenvolverem protótipos de ajuste, de forma e de funcionalidade necessários, acelerando assim os ciclos de design e por isso reduzindo o tempo até a disponibilidade do produto no mercado e dando às organizações uma vantagem competitiva.

Na manufatura aditiva o produto final é obtido através da fusão de arames ou de matérias-primas em pó, combinando o metal líquido camada por camada. Ela pode ser dividida em três categorias classificadas de acordo com a fonte de energia empregada: laser, feixe de elétrons e arco elétrico (YANG et al , 2016). Por trabalharem com alta densidade de energia, os métodos a laser e por feixe de elétrons possuem maior precisão dimensional e geométrica. Como ilustra a Figura 4, apesar de não conferir uma resolução tão boa quanto às obtidas com laser e feixe de elétrons, principalmente com tecnologias de leito de pó, os processos de soldagem ditos convencionais (a arco elétrico) permitem as mais elevadas taxas de deposição.

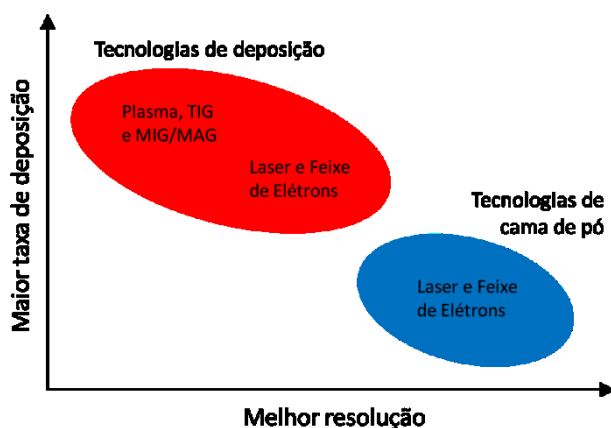


Figura 4 - Esquema da relação entre taxa de deposição e resolução em processos de manufatura aditiva para metais.

Segundo Lu et al. (2017), com base no princípio de superposição em camadas e tecnologia de soldagem a arco, o processo de manufatura aditiva com arco elétrico e arame (WAAM – Wire and Arc Addictive Manufacturing) atualmente é desenvolvido como uma expectativa comercial de depositar e fabricar partes metálicas usando material de arame metálico e arco elétrico pelos processos MIG/MAG (GMAW – Gas Metal Arc Welding) e TIG (GTAW – Gas Tungsten Arc Welding). Em comparação com as tecnologias de manufatura aditiva alternativas, como o laser (LENS®) e a fusão por feixe de elétrons (EBM®), a tecnologia WAAM possui vantagens no preço dos equipamentos, alta eficiência energética, elevada taxa de deposição e possibilidade de aplicação para vários materiais (aço carbono simples, aço inoxidável, ligas a base de níquel, ligas de alumínio e ligas de titânio) (LU et al., 2017).

Por estas razões, a exploração de arame e arco elétrico na manufatura aditiva tem sido cada vez maior. O WAAM atualmente usa equipamentos de soldagem a arco padrão, como fonte de soldagem, tochas e sistemas de alimentação de arame. O movimento para executar a trajetória de deposição pode ser fornecido por sistemas robóticos ou por pórticos numéricos controlados por computador (WILLIANS , 2016).

Em particular, a soldagem CMT, variante de curto-circuito controlado do processo MIG/MAG, tem sido bastante explorada para manufatura aditiva. Baseado em (FRONIUS, 2017), no processo CMT um arame é alimentado continuamente, e um arco elétrico (protegido por um gás inerte) é aberto entre a ponta do arame e o material a ser soldado (a receber o depósito), semelhantemente ao processo MIG/MAG. A diferença está em uma tocha especial capaz de reverter o avanço do arame-eletrodo sempre que o arame toca a poça de fusão. A

consequência é uma transferência suave da gota para a poça (neste instante, a corrente é também reduzida drasticamente, não havendo os picos de correntes de curtos-circuitos), sem respingos (perda de material). Como o arco consegue ficar sempre curto, a energia calorífica transferida para a peça é muito baixa, justificando o nome Cold Metal Transfer (CMT).

A Figura 5 ilustra o equipamento CMT, com destaque para o pulmão, que permite a “flambagem” do arame durante as reversões.

1. Fonte de soldagem Fronius CMT: fonte de soldagem inversora totalmente digitalizada com comando micro processado e digitalmente regulável, com a corrente na faixa de 320/400/500 A;
2. Controle remoto: unidade de controle remoto com display, monitoramento de dados de soldagem com função, interface de usuário, estrutura de menu sistemático, gerenciamento de acesso;
3. Aparelho de refrigeração: propicia a refrigeração da tocha de soldagem com água;
4. Interface para robô: pode ser por comando digital, analógico ou através de barramento de campo (Fieldbus);
5. Alimentador de arame: alimentador de arame regulado digitalmente para todas as bobinas usuais;
6. Tocha CMT: tocha de soldagem robotizada, compacta, com servo motor CA com regulagem digital altamente dinâmica e isenta de engrenagem, para alimentação de arame precisa com pressão constante de roletes;
7. *Buffer* ou pulmão do arame: instalado entre os dois tracionadores de arame (alimentador e tocha), desacopla um tracionador do outro, criando assim uma folga para o arame não dobrar devido às diferenças momentâneas entre sentido de movimentos (avanços vindos do alimentador e da tocha e recuos oriundos da tocha), devendo ser montado preferencialmente com balancim ou no terceiro eixo de robô;
8. Suporte para armazenamento do arame.

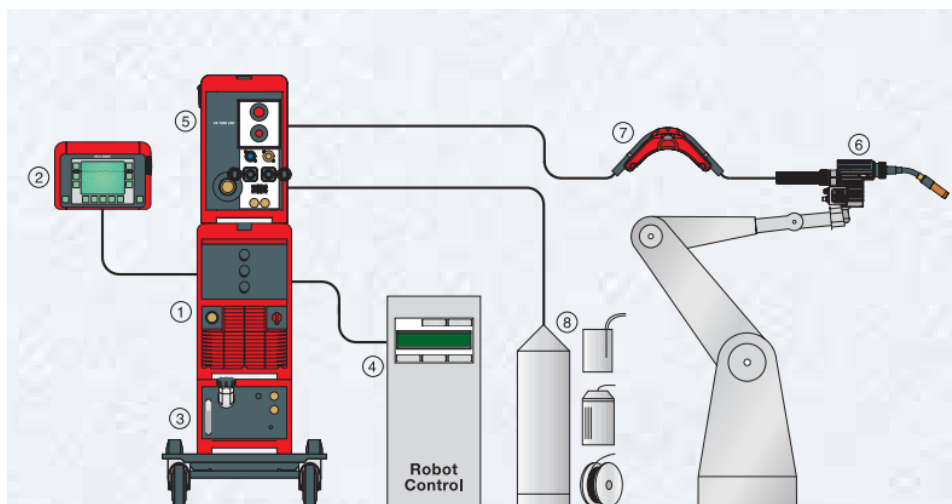


Figura 5 - Ilustração do equipamento para soldagem CMT. Fonte: CMT (FRONIUS, 2007).

O superaquecimento de regiões de deposição de material é o grande adversário da técnica de manufatura aditiva. Durante qualquer processo WAAM, o acúmulo de calor se torna crítico à medida que a altura depositada aumenta, especialmente na fabricação de componentes de parede fina. Isso induzirá o metal líquido a escorrer e a parede a perder qualidade superficial (YANG et al., 2016).

Para Xiong et al. (2018) com o movimento da fonte de calor em processos com base em GMAW, o componente é formado camada por camada e experimenta aquecimento, bem como processo de resfriamento repetidamente. Segundo estes autores, a propagação de calor na fabricação de componentes é transiente altamente não-linear graças à existência de fusão múltipla, solidificação e transformação de fase.

Uma melhor compreensão do mecanismo térmico-físico de propagação de calor na fabricação de produtos com base em GMAW pode contribuir para a previsão razoável de estresse residual e deformação, propriedades mecânicas e otimização de variáveis de processo (DING et al., 2011).

Na busca de produtos finais com boas propriedades mecânicas, melhor acabamento e menor tempo de produção, muitos estudos na área vem se concretizando. Explicações e soluções relacionadas ao gradiente térmico durante a deposição de material na manufatura aditiva tem sido necessárias para sucesso na área. Yang et al. (2016) propõem a soldagem a arco elétrico de duplo eletrodo DE-GMAW, uma variação do GMAW tradicional para reduzir a entrada de calor do substrato e manter a corrente de fusão do arame constante.

Xiong et al. (2018) desenvolveram um modelo de elementos finitos a fim de calcular a propagação de calor de um componente circular de paredes finas fabricado por manufatura

aditiva. Eles observaram a descrição térmica e o gradiente de temperatura na poça fundida e nas camadas depositadas. À medida que o processo de deposição prossegue, regiões de alta temperatura do substrato e da poça de fusão aumentam. Isso leva à conclusão de que pode ser necessária a espera de um tempo de resfriamento entre camadas para minimizar os efeitos negativos do acúmulo de calor, a não ser que seja adotada alguma estratégia de resfriamento ativo para minimizar ou eliminar este tempo improdutivo (sem deposição), o que pode ser ainda mais crítico em se tratando de peças de pequenas dimensões. Cao et al. (2017) analisou o resfriamento de uma junta de soldagem da liga de alumínio 6N01 de 8 mm de espessura unida pelo método P-MIG (Pulsed Metal Inert Gas). O resfriamento indireto/passivo com água (base de soldagem resfriada) otimizou a microestrutura e melhorou as propriedades mecânicas da junta soldada.

3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A produção das paredes de alumínio por manufatura aditiva a arco elétrico para avaliação das diferentes estratégias de resfriamento consumiu um total de quatro materiais principais. O *arame de alumínio* utilizado por questões práticas e financeiras foi da liga Al5356, que apesar de não ser aplicado na indústria aeronáutica é perfeitamente útil para a realização dos testes e análises de efeitos. Uma vez que bons resultados apareçam, outras ligas podem ser analisadas para um melhor estudo das propriedades mecânicas e aplicações. O arame utilizado possui diâmetro de 1 mm. *Chapas de alumínio* da liga Al5052, com dimensões médias de 250 x 40 x 3 mm foram usadas como substrato para a construção de paredes. Também foi necessário no funcionamento do processo CMT a utilização de *gás argônio*, ideal para deposição de alumínio. Ainda dos materiais, a *água* teve papel primordial em duas estratégias de resfriamento avaliadas, sendo bombeada a cada construção de parede para evitar desperdícios. Na etapa de preparação de corpos de prova outros materiais *lixas e soluções químicas* (Kroll) foram também consumidos.

A realização deste trabalho contou com o uso de vários equipamentos e acessórios, a maioria deles disponíveis e cedidos pelo laboratório LAPROSOLDA da Faculdade de Engenharia Mecânica. Dentre eles, um robô de automação industrial modelo *Fanuc ARC Mate 100iBe*, representado pela Fig. 6 (a), responsável pela precisão dos movimentos de deposição, uma máquina *CMT Fronius VR 7000*, um reservatório de água e mangueiras que juntamente com um sistema de pressurização por ar comprimido foram responsáveis pela entrada e saída de água de uma cuba onde as paredes foram construídas, como apresentado na Fig. 6 (b). Para construir os corpos de prova foi preciso a utilização de uma serra horizontal alternativa e fresadora, mostrados na Fig. 7 e Fig. 8 (a). Já a realização dos testes de tração contou com uma máquina universal de ensaios mecânicos do tipo servo-hidráulica MTS (provida pelo laboratório LMest, UFU), como aponta a Fig. 8 (b). Também nos ensaios de tração uma câmera fotográfica profissional da marca *Canon* foi usada para filmagem dos corpos de prova. Ainda foram utilizados um microdurômetro e uma balança digital de precisão ilustrados na Fig. 9 (a) e (b), respectivamente.



(a)



(b)

Figura 6 - Robô Fanuc (a), CMT (b) reservatório de água (b). Fonte: (a) Site fabricante
<acessado em out. 2017>

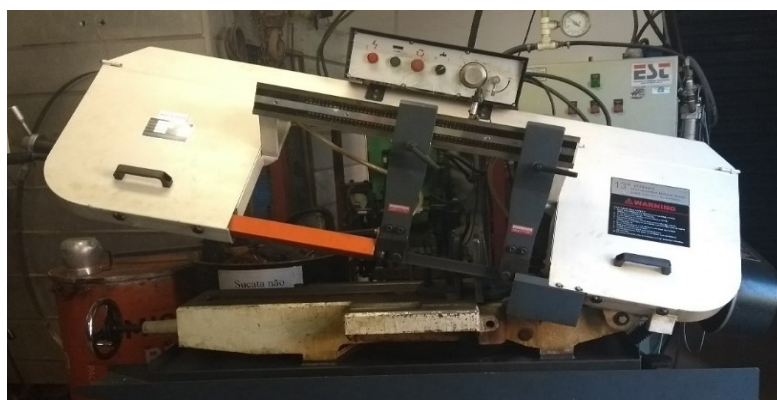


Figura 7 - Serra fita horizontal *Sawmaster SM 330M*.

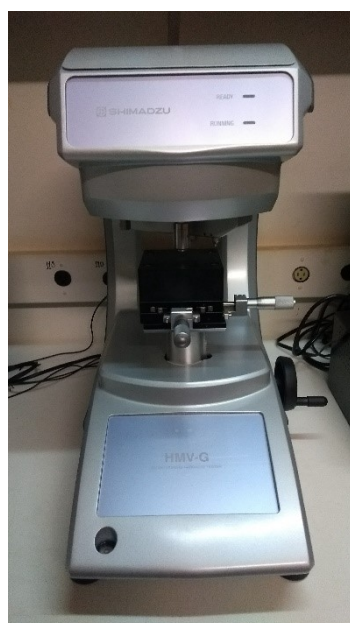


(a)



(b)

Figura 8 - Fresadora *Timemaster 5KVIG* (a) e Máquina de tração *MTS Landmark 647 Hydraulic Wedge Grip* (b).



(a)



(b)

Figura 9 - Microdurômetro *Shimadzu HMV-G* (a) e balança *Ohaus TP2000* (b).

Como mostra a Fig. 10 (a), também foram utilizados termopares do tipo k (diâmetro 0,5mm), paquímetro, placa de aquisição e condicionamento de sinais *National Instruments Ni USB 9162* com notebook para armazenamento de dados e um paquímetro. Uma câmera infravermelha *Flir A325sc* juntamente com seu notebook exclusivo para aquisição e armazenamento de dados foi utilizada para capturar dados térmicos das paredes depositadas. A câmera é representada pela Fig. 10 (b).

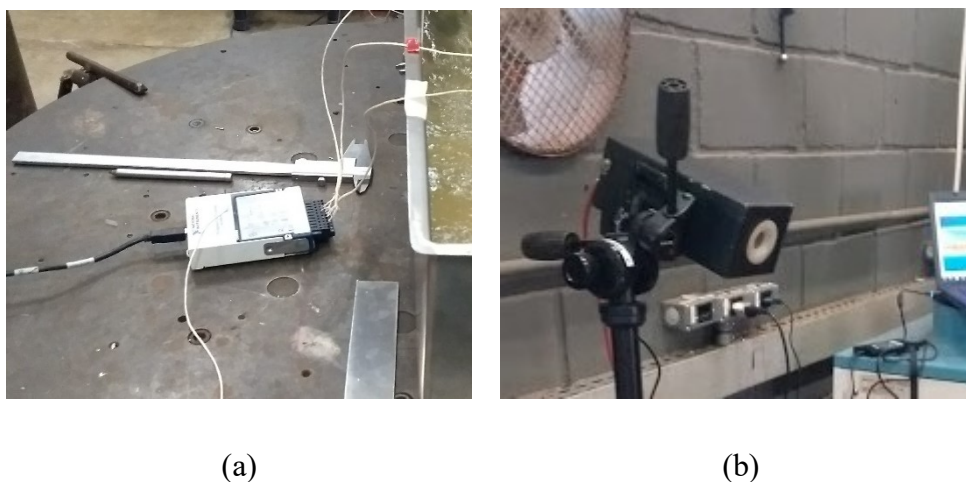


Figura 10 - Condicionador de sinais (a), termopares (a), paquímetro (a) e câmera térmica (b).

Foi utilizado um suporte para os substratos que serão a base das paredes. Este suporte é importante para garantir que as mesmas não se movimentarão e para que o processo de deposição de material seja uniforme, além de diminuir seu empenamento. Para tal, o suporte foi constituído por uma viga “I” de 390 mm de comprimento com 8 furos roscados em cada lado em uma das abas (considerada superior) para ser fixada por solda em uma viga “C”. Duas cantoneiras de 320 mm de comprimento com oito furos e oito parafusos de 6 mm cada foram utilizadas para fixar os substratos à parte superior do suporte. O suporte foi fixado à cuba com ajuda de parafusos em uma base pré-existente em seu interior e está ilustrado na Fig. 11. A cuba de aço inoxidável utilizada (600 mm de comprimento X 400 mm de largura X 200 mm de altura) teve alguns furos existentes vedados com exceção de um para entrada e saída de água, como mostra a Fig. 12.



Figura 11- Suporte.



Figura 12- Cuba de deposição/resfriamento.

4 METODOLOGIA

4.1 Fabricação de Paredes

Foram construídas um total de nove *paredes* lineares constituídas todas por 28 camadas, divididas igualmente em três categorias que se diferem em relação à estratégia de resfriamento empregada. É necessário uma nomeação destas categorias para melhor referenciá-las ao longo do trabalho:

- **Sem Água** (resfriamento natural ao ar) = a cuba permaneceu vazia o tempo todo;
- **Água Suporte** (nível fixo de água) = nível de água estacionário na altura do suporte do substrato;
- **Água Camada** (imersão em água) = durante a construção das dez primeiras camadas o nível de água ficou estacionário na altura do suporte. Em seguida, com a deposição interrompida, este nível subiu até aproximadamente a altura da 5ª camada para depois continuar o abastecimento da cuba com água progressivamente camada a camada com o reinício da deposição de material.

A Figura 13 ilustra cada condição de resfriamento abordada.

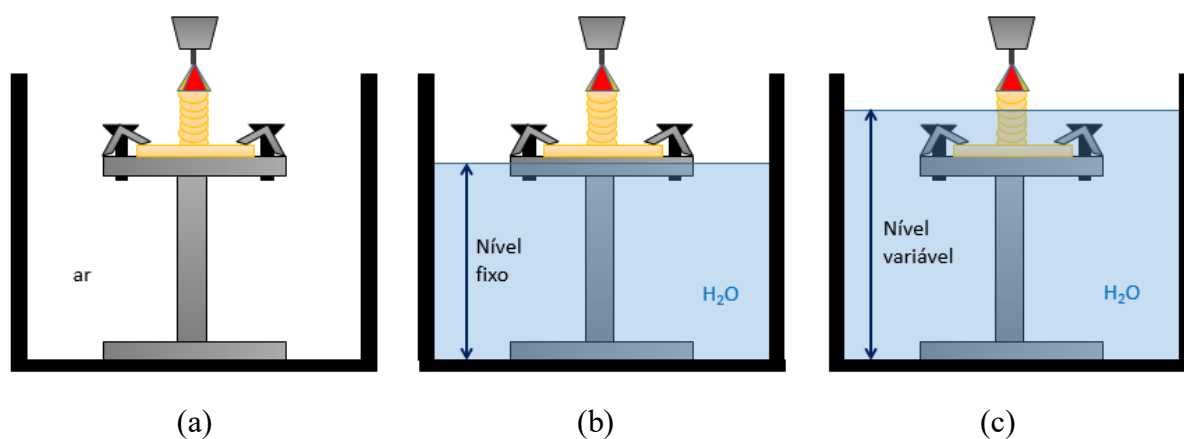


Figura 13 - Diferentes estratégias de resfriamento avaliadas.

A adoção deste último método se deu porque em testes preliminares verificou-se que o alto calor do arco causava a vaporização e instabilidade da água (esguicho em direção às barras laterais do suporte e então em direção às paredes), prejudicando o processo de deposição de material. Por isso foi necessária uma distância de aproximadamente 13 mm entre o nível de água e o arco. Além disso, as cantoneiras (barras laterais do suporte) impediam a passagem de

água no local, o que também não era desejável. Optou-se então por construir dez camadas com a água parada no nível do suporte. Depois a água subiu continuamente acompanhando com cerca de 13 mm de distância (devido ao risco de vaporização excessiva de água) a última camada de material em cada instante.

Todo o processo de fabricação das paredes será descrito a seguir, incluindo detalhes de cada etapa necessária para o resultado final das nove peças construídas por manufatura aditiva a arco elétrico.

1ª Etapa – Construção e adaptação de acessórios

Antes de qualquer atividade, o suporte para fixação do substrato foi construído a partir de materiais descartados. As cantoneiras (barras laterais do suporte) também foram furadas e a base inferior soldada à viga C para que tudo ficasse imóvel dentro da cuba. A Figura 14 mostra parte desta etapa. Por sua vez, a cuba teve seus furos vedados por arruelas, borrachas e parafusos. A passagem de água se deu através do único furo não vedado, como na Fig. 15.



Figura 14 - Construção do suporte.



Figura 15 - Vista lateral da cuba vedada.

Uma vez que o problema “fixar o substrato” foi resolvido, foi preciso encontrar uma maneira segura e precisa de montar a tocha CMT ao robô. A solução encontrada foi a construção de uma peça de alumínio que encaixasse a tocha no robô. A Figura 16 mostra à esquerda a tocha CMT e à direita o braço do robô com a peça de alumínio usinada.



Figura 16 - Encaixe tocha CMT – Robô.

2ª Etapa – Programação do robô

O próximo passo foi preparar todo o aparato experimental para a realização dos testes. O robô foi programado para percorrer posições longitudinais exatas e acrescentar de 2 mm a cada camada. O movimento de deposição foi uma espécie de “vai e vem”, no qual as camadas vizinhas foram construídas com sentidos opostos de velocidades. A Figura 17 ilustra o processo. O lado convencionado para o início de todas as paredes é o lado esquerdo. Foram feitas em cada parede um total de 28 camadas com comprimento de 300 mm cada.



Figura 17- Esquema de deposição das camadas.

3ª Etapa – Seleção dos parâmetros de deposição

Os parâmetros de soldagem foram selecionados utilizando o painel de controle remoto da fonte CMT. A velocidade de alimentação escolhida foi de 8,2 m/min e a distância entre o bico de contato e a peça de 12 mm (corrente de 89 A e tensão de 8,5 V). Uma análise detalhada da influência de variações destes parâmetros é proposta como trabalhos futuros.

Quanto à velocidade do robô, ou seja, de deposição das camadas, observou-se em testes preliminares que no início as primeiras camadas ficavam mais estreitas que as demais. A provável explicação é que, no início, o calor da poça é facilmente dissipado pelo contato direto com o suporte e a medida em que a parede cresce, essa facilidade diminui e a tendência é a poça ficar maior, aumentando automaticamente a largura da camada (espessura da parede). Este efeito se dá apenas nas primeiras camadas, onde o suporte ainda possui grande capacidade de extrair calor das camadas acima. A solução encontrada foi ter uma velocidade do robô mais baixa nas primeiras camadas para aumentar a quantidade de material depositado e assim aumentar a largura dos depósitos próximos ao suporte. Depois de algumas tentativas em testes preliminares, a opção considerada ideal e então utilizada foi ter velocidades de 45, 50, 55 e 60 cm/min na primeira, segunda, terceira e quarta camadas, respectivamente. As demais camadas superiores foram mantidas em 60 cm/min.

4ª Etapa – Preparação de equipamentos

Tanto os termopares quanto a câmera IR foram utilizados para geração de dados para análise térmica de todo o processo. A câmera IR foi utilizada para filmar a construção das nove paredes, a partir da mesma posição. Já os termopares foram alocados em quantidades e locais diferentes para cada teste para tentar levantar informações importantes e diversas. A maioria ficou localizada no substrato (próximo à parede) nas regiões laterais direita, esquerda e central. Devido à grande dificuldade em soldar os termopares no substrato de alumínio, alguns ficaram ligeiramente deslocados das posições ideais ilustradas na Fig. 18. Alguns também foram posicionados dentro da cuba na água ou região central da própria parede quando foi atingida a 9ª camada.

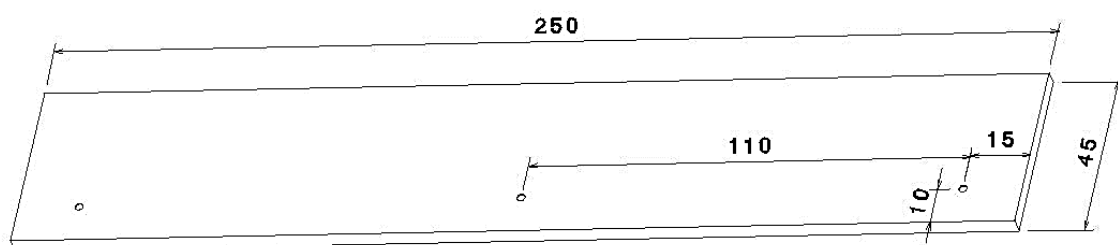


Figura 18 - Posicionamento dos termopares no substrato.

A Tabela 1 indica o uso e a posição dos termopares para cada parede nas diferentes condições de resfriamento.

Tabela 1- Posição dos termopares.

Condição	Posição		
	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3
Sem Água 1	Substrato / esquerda	Substrato / centro	Substrato / direita
Sem Água 2	Substrato / esquerda	Substrato / centro	Substrato / direita
Sem Água 3	Substrato / esquerda	Substrato / centro	Substrato / direita
Água Suporte 1	Substrato / esquerda	-	Água
Água Suporte 2	Substrato / esquerda	Substrato / centro	Água
Água Suporte 3	Substrato / esquerda	Substrato / centro	Substrato / direita
Água Camada 1	Substrato / esquerda	Substrato / centro	Substrato / direita
Água Camada 2	9/10ª Camada	Substrato / centro	Substrato / direita
Água Camada 3	9/10ª Camada	Substrato / centro	Substrato / direita

5ª Etapa - Deposição de material

As chapas de liga de alumínio 5052 utilizadas como substrato foram pesadas antes e depois da deposição de material para medir a quantidade de material efetivamente depositado e comparar a existência de respingos e/ou desperdício de material nos três casos de resfriamento. Os testes foram feitos em dois dias e em ambiente fechado cuja temperatura estava em torno de 27°C. O tempo de deposição das 28 camadas para formar cada uma das paredes durou em média cerca de 11 minutos.

A Figura 19 é uma foto real no momento de deposição de material. No centro encontra-se a tocha CMT, na parte esquerda inferior a placa/condicionador de sinais dos termopares e no fundo à direita está a câmera infravermelha. Já a Figura 20 também representa o aparato experimental, mas de forma esquemática, com a disposição geral de equipamentos, acessórios e materiais. À esquerda está representado o robô em amarelo e a fonte CMT em vermelho. No fundo encontra-se o cilindro de gás argônio. Sobre a mesa central tem-se a cuba, os termopares, o condicionador de sinal dos termopares e o computador que armazena os dados colhidos. À direita está a câmera IR em seu suporte juntamente com o computador responsável pelo armazenamento e análise das imagens termográficas. A Figura 21 foi desenvolvida para melhor visualizar a cuba, a câmera, o suporte que sustenta a chapa de base e o uso dos termopares. A Figura 22 mostra o fim do processo de deposição e uma parede já formada.



Figura 19 - Aparato experimental real.



Figura 20 - Aparato experimental esquemático.

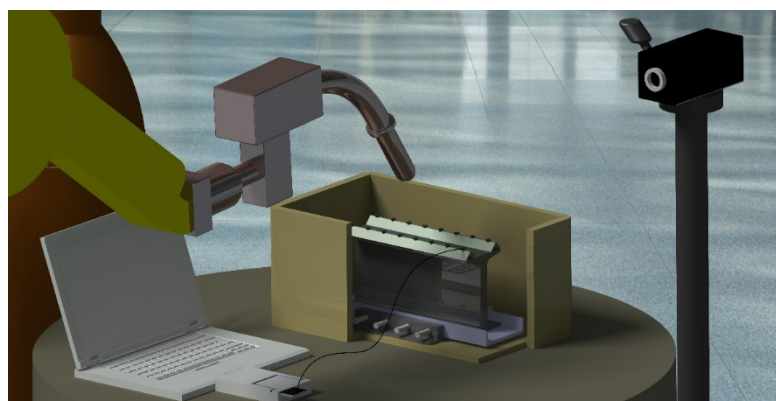


Figura 21 - Aparato experimental em detalhes.

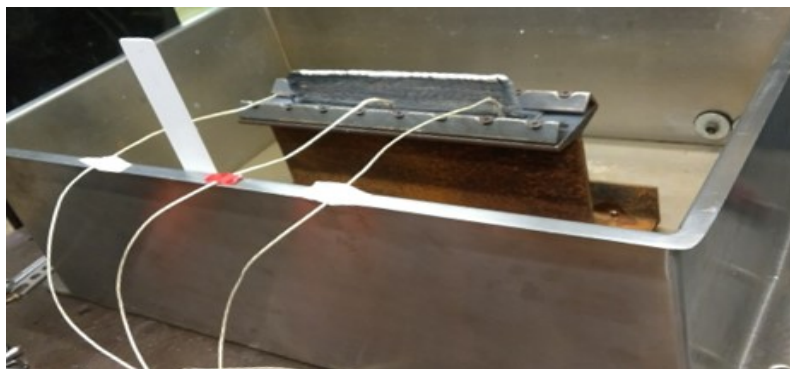


Figura 22 - Parede finalizada.

4.2 Fabricação de Corpos de Prova

4.2.1 Macrografia e Microdureza.

Os corpos de prova utilizados tanto para macrografia quanto para microdureza foram os mesmos e foram retirados das paredes na região central, como mostra a Fig. 23. De cada estratégia de resfriamento foi retirado um corpo de prova. A retirada dos CPs se deu por serramento, seguido de fresamento para nivelar as faces e lixamento.

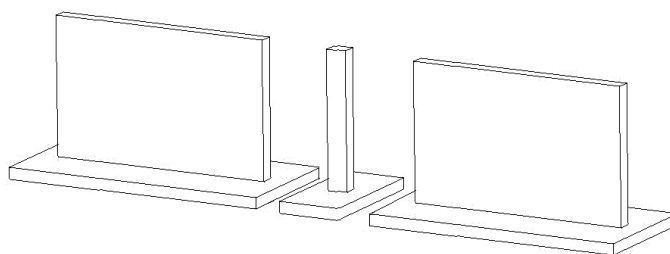


Figura 23 - Esquema da remoção do CP para macrografia e microdureza.

4.2.2 Ensaio de tração

O objetivo dos testes de tração foi avaliar o limite de resistência a tração, deslocamento (deformação) máximo e ductilidade em duas direções distintas (sentido de crescimento vertical e horizontal das paredes). Duas das três paredes produzidas em cada condição de resfriamento foram usadas para gerar seis CPs verticais e seis horizontais, diferenciados entre si pela posição ocupada na parede (esquerda, central ou direita). A Figura 24 ilustra a região de retiradas dos CPs de tração. Como são três condições de resfriamento, o número total de CPs de tração foi de 36.

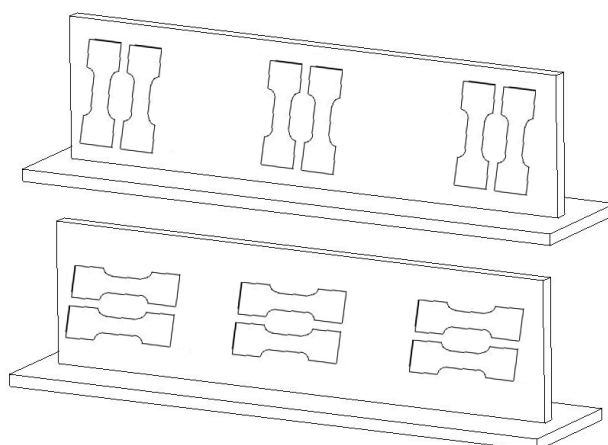


Figura 24 - Disposição dos CPs nas paredes.

Devido a necessidade de uma grande quantidade de CPs de tração e pelo tamanho das paredes fabricadas, adotou-se um tamanho reduzido para estes. Assim, as dimensões foram similares às utilizadas por Lu et al. (2017) e estão indicadas na Fig. 25.

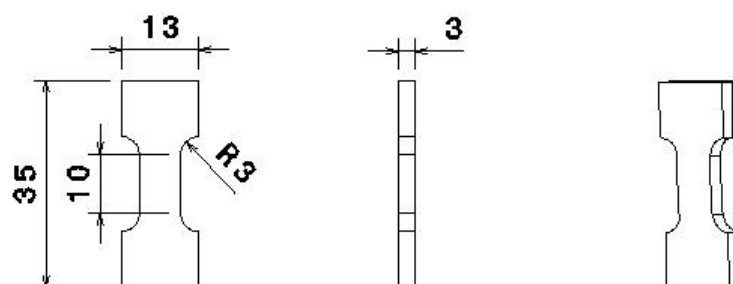


Figura 25 - Geometria dos CPs de tração (dimensões em mm).

O processo de usinagem foi feito em etapas contando com o uso de fresadora e de serra de fita horizontal. O primeiro passo foi remover a chapa base com a fresadora. Em seguida as laterais da parede foram fresadas e surgiu então um formato retangular uniforme de espessura média de 4 mm. Então na serra de fita horizontal, quadrados de aproximadamente 35 x 35 mm foram feitos para em seguida se tornarem retângulos de aproximados 35 x 17,5 mm (horizontais ou verticais como mostrado na Figura 24). Por último, voltando para a fresadora, as dimensões corretas dos CPs foram atingidas bem como o pescoço fabricado. Para que marcas causadas pelas máquinas e/ou pequenos defeitos da superfície dos corpos de prova não causassem concentração de tensão na peça e influenciassem resultados do ensaio de tração, as regiões do

pescoço foram lixadas com lixas 180 e 320. Com os CPs prontos, as medidas exatas foram determinadas por um paquímetro a fim de se calcular a tensão aplicada futuramente no ensaio de tração.

4.3 Análise de Deformação

Para calcular a deformação dos corpos de prova, foram utilizados dois diferentes métodos. O primeiro é a razão do deslocamento da garra da máquina de tração que puxa o CP com o comprimento de seu pescoço (16 mm). O segundo método se baseou na filmagem dos CPs durante o ensaio de tração para posterior análise de deslocamento de referências marcadas sobre eles. Neste caso, marcas em forma de círculo de aproximadamente 5 mm de diâmetro foram feitas a lápis com auxílio de um gabarito na região central do pescoço para posterior análise gráfica no MATLAB®, como mostra a Fig. 26.



Figura 26 - CP de tração finalizado com referência circular para cálculo de deformação.

4.4 Análise de Porosidade

O método utilizado para avaliar a presença percentual de poros nas amostras foi o método de Arquimedes ou a chamada gravimetria. Trata-se de uma análise das forças atuantes no corpo de prova quando fora e dentro d'água. O resultado final não apresenta a quantidade de poros nem suas dimensões, mas sim o percentual de vazios em relação à uma amostra ótima/ideal.

Neste caso, o CP é pesado por uma balança de precisão no ar e depois “flutuando” dentro de um recipiente com água. Quando dentro d'água, há a presença da força de Empuxo e da força Peso. Ao ar, devido à sua baixa densidade, a força de Empuxo é desprezível. A força de Empuxo é dada pela Eq. (1):

$$E = g \times \rho_F \times V_F \quad \text{Eq. 1}$$

onde $\rho_F = 1 \text{ g/cm}^3$ (densidade da água) e $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade local). V_F é dado em cm^3 e se refere ao volume de água deslocado pela imersão do corpo no fluido, ou seja, o próprio volume do corpo. Ou ainda, o empuxo pode ser relacionado com a massa do fluido m_F pelas Eq. (2) e (3).

$$\rho_F = \frac{m_F}{V_F} \quad \text{Eq. 2}$$

$$E = m_F g \quad \text{Eq. 3}$$

Quando um corpo de massa m_c e peso W_c está submerso em água ele experimentará diminuição aparente de seu peso, assim:

$$E = W_c - W_{H_2O} . \quad \text{Eq. 4}$$

Onde W_{H_2O} é o peso aparente do corpo na água e m_{H_2O} sua massa aparente na água.

O objetivo agora é encontrar a densidade do corpo ρ_c correlacionando seu peso W_c e peso aparente W_{H_2O} , bem como a densidade do fluido e o volume ocupado. Desenvolvendo as variáveis para obter a Eq. (5) e lembrando que o volume do corpo equivale ao volume submerso:

$$m_F g = m_c g - m_{H_2O} g , \quad \text{Eq. 5}$$

$$V_F = \frac{m_c}{\rho_c} . \quad \text{Eq. 6}$$

Continuando o desenvolvimento até obter ρ_c em função das variáveis m_c e m_{H_2O} :

$$\rho_F V_F = m_c - m_{H_2O} , \quad \text{Eq. 7}$$

$$\rho_F \frac{m_c}{\rho_c} = m_c - m_{H_2O} , \quad \text{Eq. 8}$$

$$\rho_c = \frac{m_c}{m_c - m_{H_2O}} . \quad \text{Eq. 9}$$

Agora, a fim de se obter a porcentagem de poros que surgiram no processo da construção da parede por manufatura aditiva, é necessário um valor padrão de comparação. Por isso foi feito o procedimento descrito para uma chapa de alumínio da liga Al 5052 e obteve-se uma densidade $\rho_{al} = 2,698$. Como esta chapa é laminada, acredita-se que está com ausência virtual de porosidades.

O volume de vazios percentual de cada condição foi calculado através da expressão:

$$V_v = (\rho_{al} - \rho_c) \times \frac{100}{\rho_{al}} . \quad \text{Eq. 10}$$

O procedimento foi feito usando parte das paredes de onde foram retirados os corpos de prova de macrografia e microdureza cuja densidade é ρ_c .

5 RESULTADOS

5.1 Ciclo Térmico

O ciclo térmico que envolve os experimentos deste trabalho depende diretamente do fluxo de calor que existe nas diferentes condições de contorno ao longo da altura e do comprimento das paredes construídas.

A primeira condição de resfriamento abordada neste trabalho diz respeito a simples convecção com o ar, como ilustrado na Fig. 27. Aqui acontece claramente um baixo fluxo de calor da parede para o ar e um baixo fluxo de calor da parede em direção à base/suporte (resfriamento por condução pela parede com baixo gradiente térmico) com exceção das camadas mais baixas da parede. A maior parte das camadas fica em elevada temperatura com exceção das primeiras.



Figura 27 - Ilustração campo de temperatura para resfriamento sem água.

Quando o suporte é resfriado por água, a parede continua resfriada apenas pela convecção com o ar e pela condução de calor pela base. No entanto, a presença de água diminui a quantidade de camadas em elevada temperatura devido ao maior gradiente térmico em regiões inferiores da parede pelo resfriamento do suporte e sua respectiva troca de calor com a água, como ilustrado na Fig. 28.



Figura 28 - Ilustração campo de temperatura para resfriamento com água até o suporte.

Por último, quando a parede também é resfriada por água, além desse resfriamento ativo, há também fluxo de calor elevado da parede em direção à base/suporte (resfriamento por condução pela parede com elevado gradiente térmico) e baixo fluxo de calor da parte superior (sem contato com a água) da parede para o ar (resfriamento por convecção com o ar). A Figura 29 ilustra que neste caso ocorre diminuição ainda maior da quantidade de camadas em elevada temperatura durante a deposição.

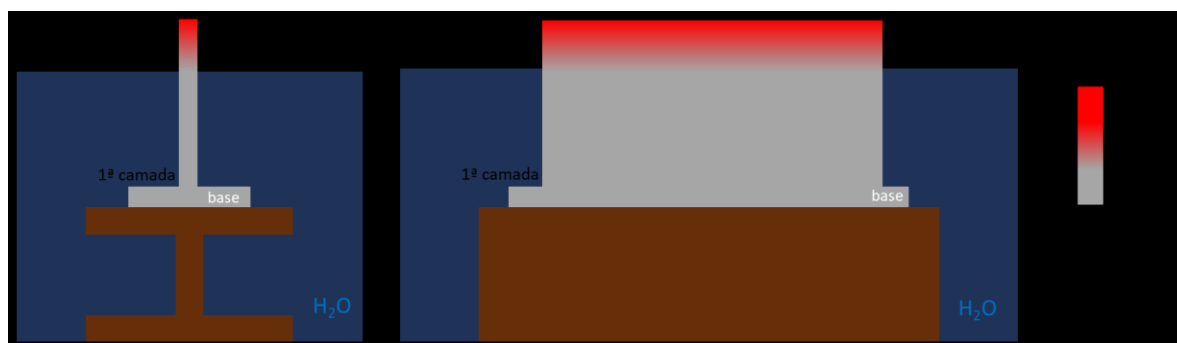


Figura 29 - Ilustração campo de temperatura para resfriamento com água na parede.

Ao analisar a parede ao longo de seu comprimento é preciso destacar que as bordas trocam calor de um lado com o metal (a própria parede) e do outro lado com o ar por convecção ou com a água. A troca de calor por condução (metal-metal) pode ter mais efetividade (maior condutividade térmica) se comparada com simples convecção com o ar ou água. Por isso, haverá sempre acúmulo de calor na região das bordas, retardando o resfriamento/solidificação e provocando possível queda na altura com respectivo aumento de espessura (já que a taxa de deposição de material permanece constante).

5.1.1 Resultados com Termopares

Os resultados providos dos termopares foram combinados em apenas dois gráficos (de duas paredes distintas) para visualizar o que acontece termicamente no substrato em cada condição. Apesar de quase todas as paredes terem termopares nas regiões esquerda, central e direita do substrato, a região central foi adotada para expor as curvas de temperatura. A Figura 30 tem como objetivo comparar as dez primeiras camadas das três condições de resfriamento.

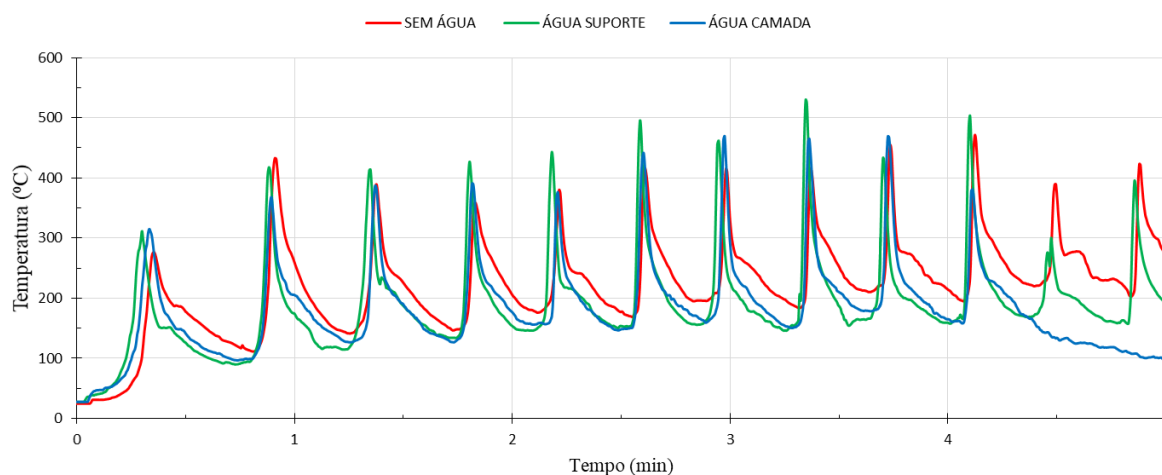


Figura 30 - Resultados dos termopares localizados na região central do substrato para as dez primeiras camadas para as três estratégias de resfriamento.

Após o quarto minuto de experimento, as condições de resfriamento natural no ar e de resfriamento do suporte continuam a deposição de material enquanto a última condição inicia o processo de imersão da parede em água. Por isso há decaimento significativo da curva em azul após 4 min aproximadamente. Vale lembrar que neste início as condições Água Suporte e Água Camada estão submetidas aos mesmos procedimentos. Elas se diferenciam apenas após a décima camada quando o nível de água sobe para a condição Água Camada. No caso da condição Água Camada, a deposição de material foi momentaneamente interrompida para subir o nível da água sem o inconveniente do risco de perturbação do arco/poça.

Os picos são mais intensos para as curvas azul (Água Camada) e verde (Água Suporte) e em geral um pouco defasados no tempo. A explicação pode estar na variação de distância entre os termopares e a linha de passagem da tocha/arco durante a deposição. Como o alumínio apresentou muita dificuldade para a fixação/solda dos termopares, não foi possível estabelecer exatidão no posicionamento dos termopares. Assim, o termopar da condição Sem Água pode ter ficado um pouco mais afastado da linha de passagem da tocha/arco, o que pode ter gerado

estas pequenas discrepâncias. Ainda assim, fica claro que a curva vermelha (Sem Água) teve mais dificuldade de resfriamento. Neste caso observa-se que os vales acusam um patamar de aproximadamente 50°C superior em relação às demais condições, o que indica maior acúmulo de calor.

A Figura 31 apresenta resultados com a inclusão de dados referentes a outra parede para o tempo total de deposição. Neste caso um termopar foi colocado entre a nona e décima camada da condição Água Camada e seus dados de temperatura aparecem após certo tempo de deposição já decorrido em cor amarela.

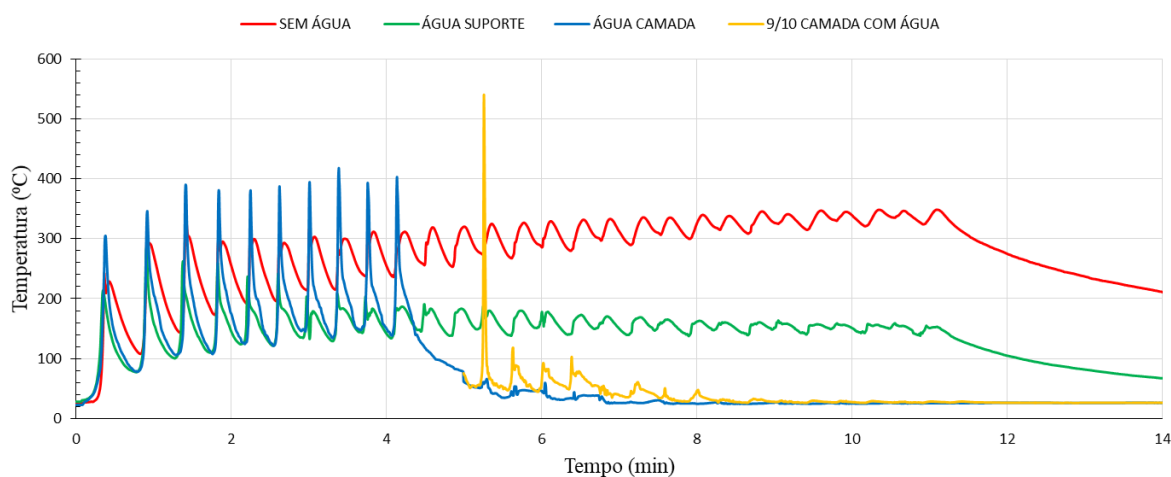


Figura 31- Resultados de termopares localizados no substrato região central.

As curvas em azul, referentes ao resfriamento por imersão em água, apresentam picos maiores em comparação às outras regiões. Isto pode ser também explicado por um posicionamento do termopar mais próximo da região da linha de passagem da tocha/arco. Ao longo do tempo fica claro a tendência de difícil resfriamento para a condição sem uso de água, pois o calor vai se acumulando e com isso a temperatura vai subindo. O alto pico de temperatura no início da curva amarela corresponde ao momento em que o arco elétrico passou imediatamente acima do termopar fixado na parede (a maior proximidade da fonte de calor levou a uma maior temperatura). Em seguida, com o aumento contínuo do nível de água a temperatura captada pelo termopar diminui drasticamente, apesar de continuar a ser afetada pela passagem da tocha/arco na deposição das demais camadas (presença de picos de temperatura reduzidos). Observa-se que, depois de cerca de seis camadas depositadas com

resfriamento contínuo com água, a região da parede com o termopar já chegou à temperatura ambiente.

Ao se compararem as três estratégias de resfriamento nota-se nitidamente que a condição Sem Água acumulou mais calor durante a deposição e que a condição Água Camada foi capaz de mitigar significativamente o calor acumulado. À medida que o tempo passa a temperatura dos vales e picos da condição Sem Água não diminui, confirmando a dificuldade de resfriamento desta estratégia. A condição Água Suporte apresentou desempenho intermediário, o que faz sentido já que até certo ponto (altura da parede) um elevado gradiente térmico pode ser mantido entre as camadas e o suporte com auxílio da água.

Assim, uma grande vantagem do método de resfriamento por imersão em água é possibilidade de fabricação de peças mais rapidamente, ou seja, espera de menor tempo entre a deposição de uma camada e da seguinte e possibilidade de manuseio imediato da peça após sua construção. Para dar uma ideia da economia de tempo possível, o intervalo gasto para o substrato chegar em 50°C após a deposição da última camada foi de aproximadamente 42 min com a estratégia de resfriamento Sem Água e praticamente imediato na condição Água Camada.

5.1.2 Resultados com Câmera Termográfica

O uso dos termopares, tendo em vista o local dos seus posicionamentos (substrato ou meio da parede), apesar de fornecer dados importantes, não oferece informações de como as paredes se comportaram como um todo. Assim, a câmera termográfica foi uma ferramenta muito importante neste sentido. Com os mapas de temperatura fornecidos durante e ao final da fabricação das paredes em cada condição de resfriamento é possível ter uma ideia mais ampla do acúmulo/dissipação de calor resultante. Além disso, por meio de pós-processamento das imagens termográficas é possível levantar o ciclo térmico em qualquer local e momento do processo de deposição. As Figuras 32, 33 e 34 trazem, na mesma escala/intervalo de cores/temperaturas, os mapas térmicos típicos de paredes nas diferentes estratégias de resfriamento no fim da deposição das últimas camadas (momento de desligamento do arco/deposição). Foi adotado um valor 0,35 para a emissividade do alumínio em todos os casos.

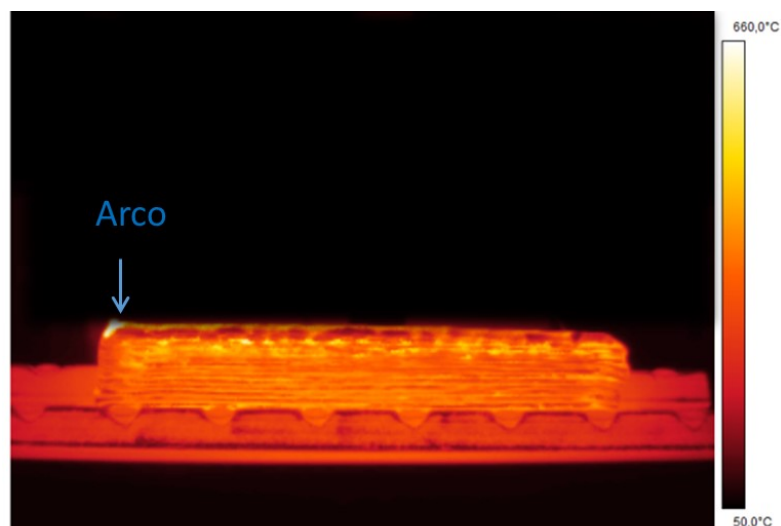


Figura 32 - Mapa térmico para a condição Sem Água ao final da deposição.

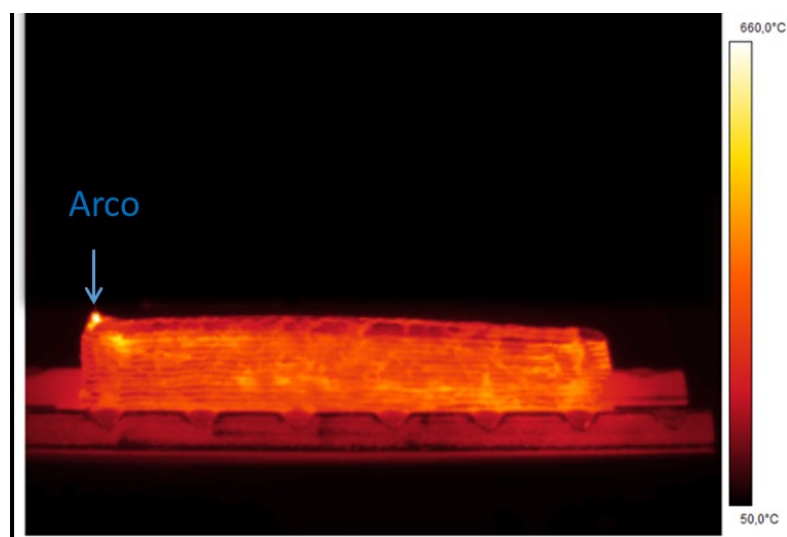


Figura 33 - Mapa térmico para a condição Água Suporte ao final da deposição.

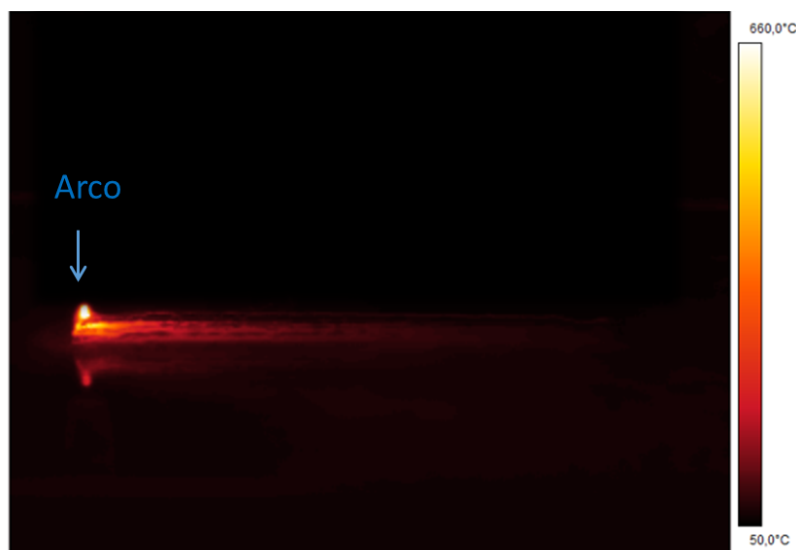


Figura 34 - Mapa térmico para a condição Água Camada ao final da deposição.

Apesar de parecidas, as Figuras 32 e 33 apresentam diferenças. A segunda (Água Suporte) é ligeiramente mais escura e tem menos regiões em amarelo claro, indicações de que seus valores de temperatura são em média menores. Entretanto, a grande diferença vem para a condição de resfriamento contínuo e ativo (contato direto) da parede com água. A Figura 34 aponta altas temperaturas apenas na região próxima do arco/poça. Isso dá uma ideia qualitativa e ampla do quanto a estratégia de resfriamento Água Camada pode ser mais efetiva.

Em termos quantitativos, uma mesma estratégia para analisar os resultados foi usada para as três condições de resfriamento. Uma pequena área quadrada (cerca de 3 x 3 mm) foi delimitada na região central de cada parede por meio do software da câmera IR para obter uma temperatura média desta região, como ilustra a Fig. 35. Esta região foi escolhida de forma que ainda fossem depositadas oito camadas para construção da parede, ou seja, compreendeu a região da vigésima camada depositada. Assim, a temperatura média desta região foi levantada com o passar do tempo de deposição das camadas seguintes até o fim da construção da parede em questão. Ou seja, os ciclos térmicos do centro da vigésima camada foram levantados para cada estratégia de resfriamento. A Figura 36 traz os resultados deste levantamento em uma forma gráfica.

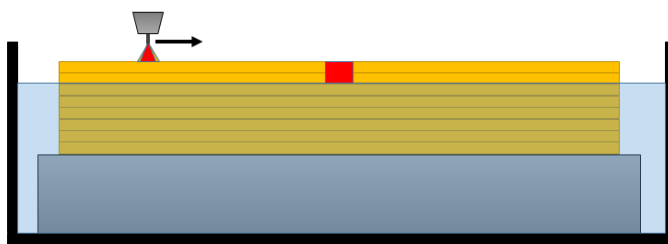


Figura 35 - Esquema da região das paredes para obtenção dos ciclos térmicos por meio da câmara termográfica.

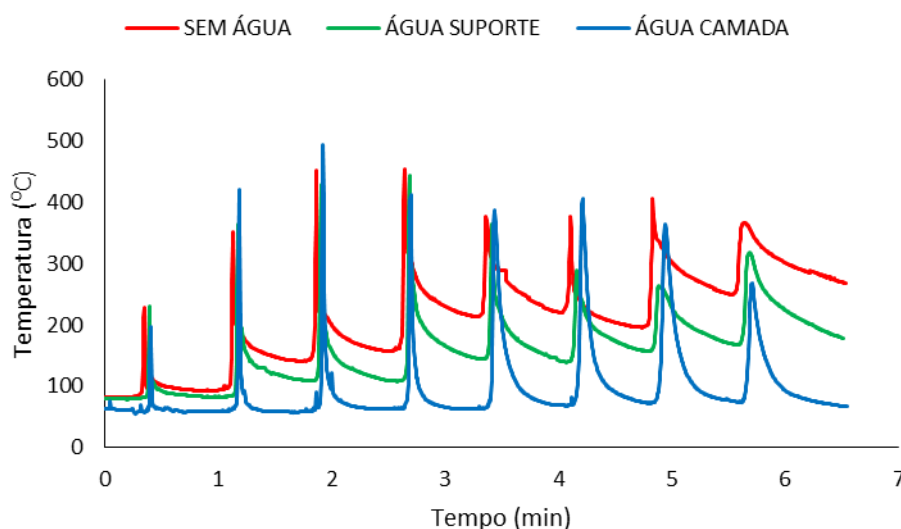


Figura 36- Ciclos térmicos do centro da vigésima camada levantados por meio da câmara IR.

As curvas seguem o mesmo padrão observado com os termopares, ou seja, picos como indicação da passagem do arco acima da região monitorada e vales referentes ao resfriamento subsequente. A observação importante a ser feita a partir da Figura 36 é a taxa de resfriamento da condição Água Camada, nitidamente muito superior às demais. Ainda a se destacar, os valores de temperatura após o resfriamento são bastante inferiores (cerca de 60°C) com a condição Água Camada se comparados à condição Sem Água, enquanto a condição Água Suporte ficou em valores intermediários. Além disso, com a estratégia Água Camada a temperatura chega a ficar por certo tempo no patamar reduzido que praticamente se mantém após a deposição de cada camada subsequente. Diferentemente, as estratégias de resfriamento Água Suporte e Sem Água, nesta ordem, tem os valores de temperatura cada vez maiores após a passagem o arco, em mais uma evidência do crescente acúmulo de calor nestas condições.

Estas diferenças no comportamento do ciclo térmico podem levar a modificações nas características físicas, mecânicas e geométricas das paredes, o que será avaliado mais adiante.

Fez-se de forma ilustrativa uma análise da diferença de produtividade entre as condições de resfriamento, pensando no tempo para deposição de uma possível camada seguinte sem os riscos e problemas com o superaquecimento da parede. Neste sentido, a Fig. 37 apresenta uma extrapolação exponencial das curvas finais de resfriamento mostradas na Fig. 36. O tempo estimado para as condições Sem Água, Água Suporte e Água Camada alcançarem uma temperatura média de 50°C na região avaliada é de 23,5, 10,2 e 7,2 minutos, respectivamente.

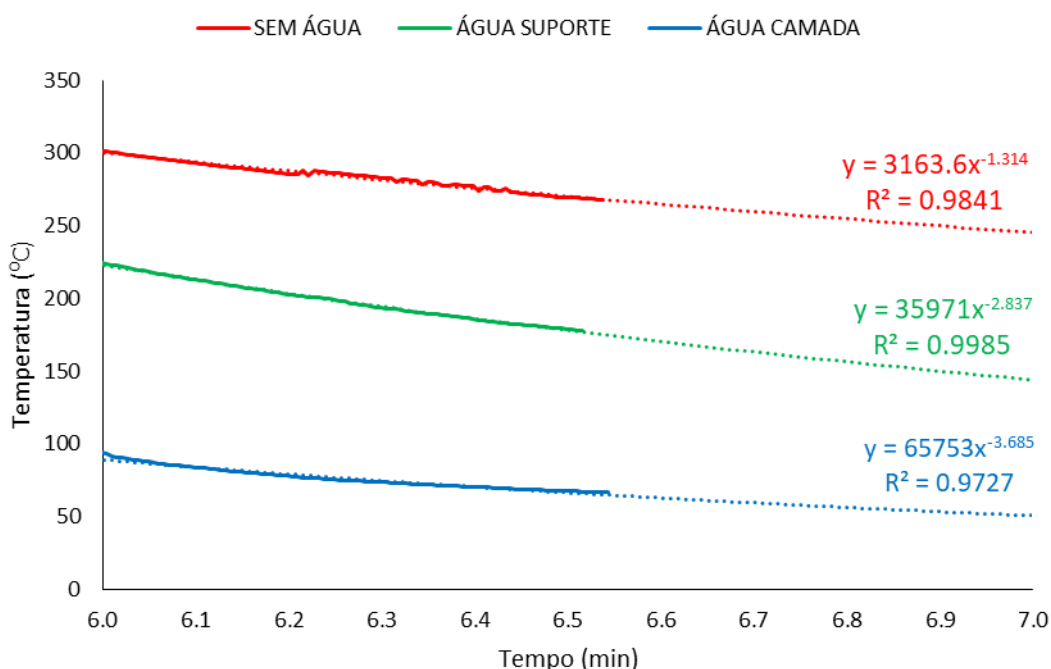


Figura 37 - Extrapolação das curvas finais de resfriamento da vigésima camada levantadas por meio da câmera IR (provável tendência após os ciclos térmicos mostrados na Figura 36).

5.2 Geometria das Paredes

O fato que primeiro chamou atenção após a deposição das camadas foi relacionado à geometria das paredes obtidas com as diferentes estratégias de resfriamento. Para as três maneiras de resfriamento tanto a espessura quanto a altura das paredes e o contorno da secção

transversal (já notado visualmente de imediato pelo aspecto lateral das paredes) mudaram significativamente.

A Figura 38 é uma foto de paredes nas condições Sem Água, Água Suporte e Água Camada (partes A, B e C, respectivamente). Uma régua posicionada à direita auxilia na percepção das alturas. A parede na condição Água Camada ficou nitidamente mais alta como um todo e mais regular em termos de ondulações laterais a partir da posição (nível) que teve ação da água subindo/resfriando ativamente e gradativamente.

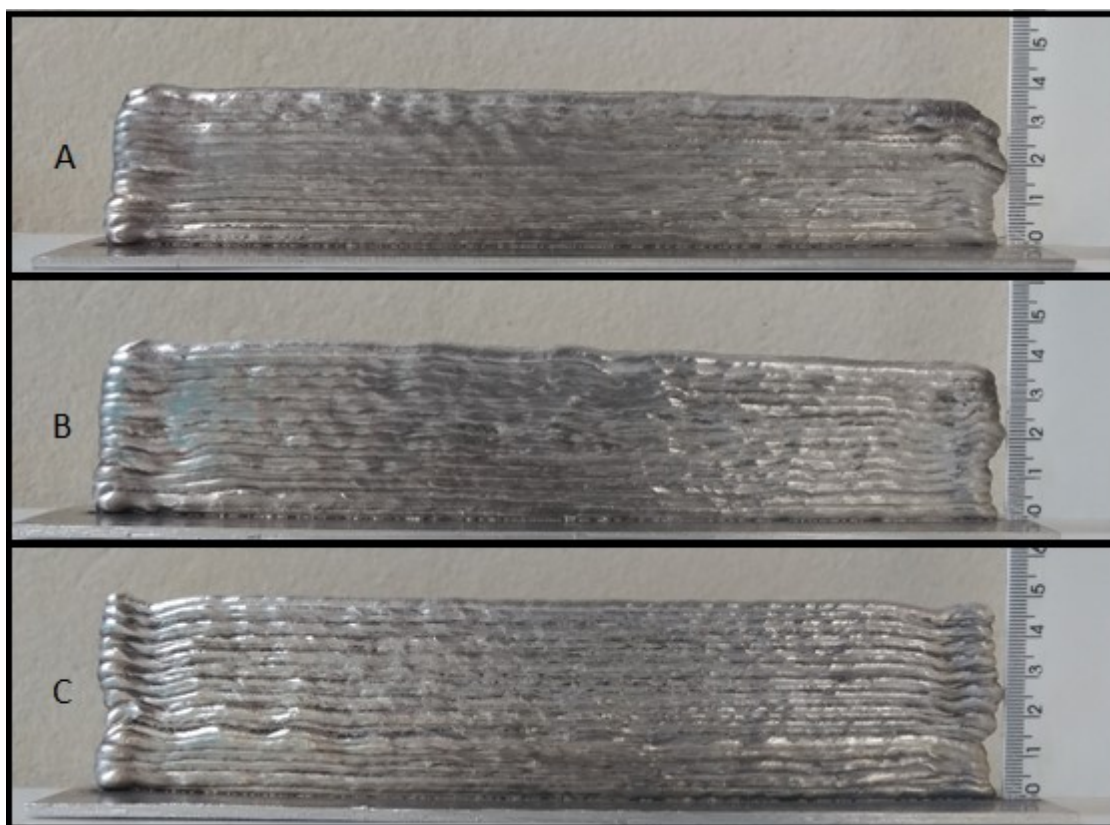


Figura 38 - Paredes prontas com as diferentes condições de resfriamento (escala em mm).

As paredes utilizadas para a produção dos CPs de tração (duas para cada estratégia de resfriamento) foram analisadas geometricamente antes da usinagem e tiveram suas dimensões medidas por um paquímetro. As medidas aconteceram em cinco regiões das paredes: lateral esquerda, central esquerda, central, central direita e lateral direita. A região central é equivalente ao centro da parede, as laterais a 25 mm das pontas e as laterais centrais no ponto médio entre as laterais e o centro. Descartou-se as pontas para que seus efeitos (inversão de sentido de movimento do arco) não fossem levados em consideração. Para a medida da espessura adotou-se uma distância aproximada entre o substrato e o ponto de medição de 30

mm para que fossem comparadas as situações nas diferentes estratégias de resfriamento. Os resultados de espessura e altura das paredes medidas seguem nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Um gráfico que correlaciona os dados das Tabelas 2 e 3 foi feito para melhor compreensão dos resultados de geometria das paredes e está representado na Fig. 39.

Tabela 2- Resultados de altura das paredes.

ALTURA [mm]							
Estratégia de resfriamento	Paredes	Posições					Médias
		Lateral esquerda	Central esquerda	Central	Central direita	Lateral direita	Total
SEM ÁGUA	Parede 1	39.30	40.02	40.14	39.29	38.12	39.37
	Parede 2	39.61	40.53	40.00	39.09	37.20	39.29
	Média	39.46	40.28	40.07	39.19	37.66	39.33
ÁGUA SUPORTE	Parede 1	42.60	44.60	45.31	42.51	40.18	43.04
	Parede 2	43.47	45.01	45.04	42.66	40.58	43.35
	Média	43.04	44.81	45.18	42.59	40.38	43.20
ÁGUA CAMADA	Parede 1	50.11	51.11	51.43	51.25	50.04	50.79
	Parede 2	51.25	52.68	52.45	52.18	51.59	52.03
	Parede 3	50.24	51.60	51.81	51.20	49.63	50.90
	Média	50.53	51.80	51.90	51.54	50.42	51.24

Tabela 3- Resultados de espessura das paredes.

ESPESSURA [mm]							
Estratégia de resfriamento	Paredes	Posições					Médias
		Lateral esquerda	Central esquerda	Central	Central direita	Lateral direita	Total
SEM ÁGUA	Parede 1	7.27	7.11	7.02	7.04	7.89	7.27
	Parede 2	7.13	7.11	7.00	7.95	8.09	7.46
	Média	7.20	7.11	7.01	7.50	7.99	7.36
ÁGUA SUPORTE	Parede 1	6.43	6.45	6.19	6.46	7.67	6.64
	Parede 2	6.34	5.97	6.49	6.59	7.30	6.54
	Média	6.39	6.21	6.34	6.53	7.49	6.59
ÁGUA CAMADA	Parede 1	5.45	5.18	4.89	5.11	5.52	5.23
	Parede 2	5.46	5.40	5.07	5.36	5.46	5.35
	Parede 3	5.39	5.22	5.17	5.27	5.51	5.31
	Média	5.43	5.31	5.12	5.32	5.49	5.33

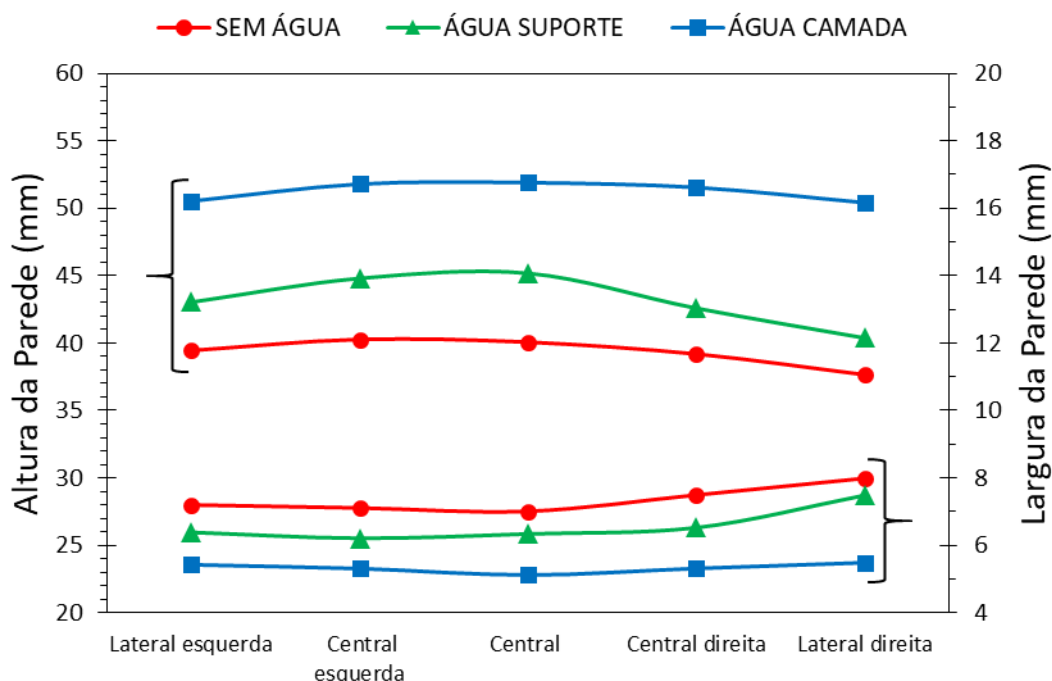


Figura 39 - Comparação de alturas e espessuras médias das paredes para as diferentes estratégias de resfriamento.

Fica claro que as paredes da condição Sem Água são as mais baixas e mais espessas, enquanto que as paredes Água Camada são as mais altas e finas. Exatamente como era de se esperar, as paredes com maiores oportunidades de troca de calor se resfriam e solidificam mais rápido, se tornando assim mais finas e altas que aquelas que tiveram alto calor acumulado e cujo resfriamento se deu basicamente pela convecção com o ar. As condições com acúmulo de calor vão aumentando a temperatura da camada que está recebendo material e assim aumentam a molhabilidade do material depositado, o que faz com que ele se espalhe mais (aumento da espessura média da parede) e consequentemente diminua sua altura (redução da altura média da parede). Isso pode até ter favorecido o escoamento parcial da poça de fusão pelas bordas da parede e até a modificação de sua forma (como foi notado durante os experimentos) o que em si pode mudar a dinâmica de solidificação do material, com possíveis consequências nas propriedades físicas e mecânicas e nas características geométricas das paredes fabricadas. Isso dever ser alvo de análises futuras.

O efeito das bordas – laterais com acúmulo de calor – e assim de redução de altura e aumento de largura nas laterais também aparece nos gráficos da Figura 39, algo menos perceptível nas paredes fabricadas com a condição Água Camada. Assim, uma informação muito importante que também pode ser retirada deste gráfico é a uniformidade das paredes

obtida com a estratégia de subir a água continuamente para fazer o resfriamento. As Figuras 40 e 41 mostram na média como paredes mais altas e finas podem ser obtidas com esta abordagem de resfriamento e deixam claro através dos desvios padrões que as variações geométricas das paredes são maiores para as outras duas estratégias de resfriamento. Para as condições Sem Água, Água Suporte e Água Camada as espessuras médias foram de (+-7,36), (+-6,59) e (+-5,33) mm, respectivamente. Para a mesma ordem das estratégias de resfriamento, as alturas médias foram de (+-39,33), (+-43,20) e X (+-51,24) mm.

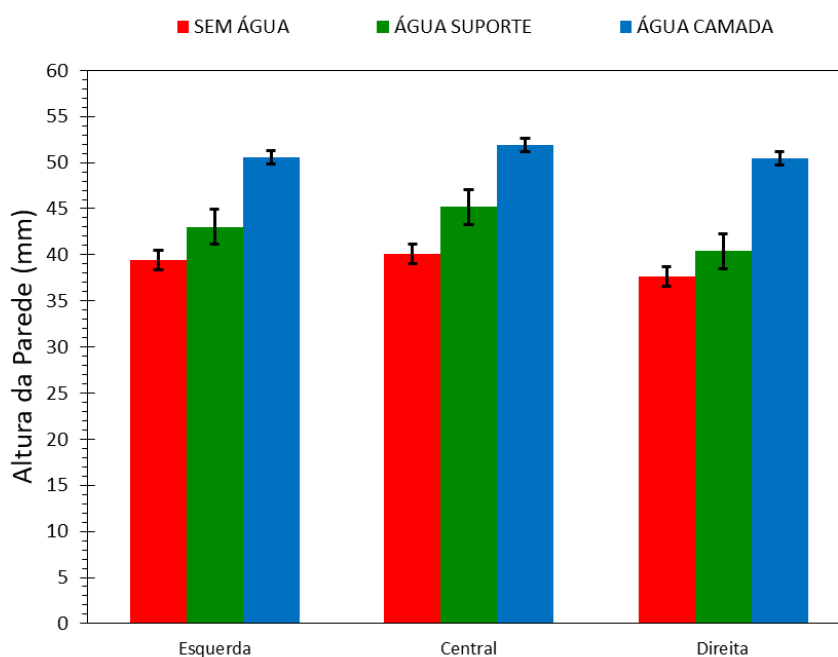


Figura 40 - Altura média das paredes para as diferentes estratégias de resfriamento.

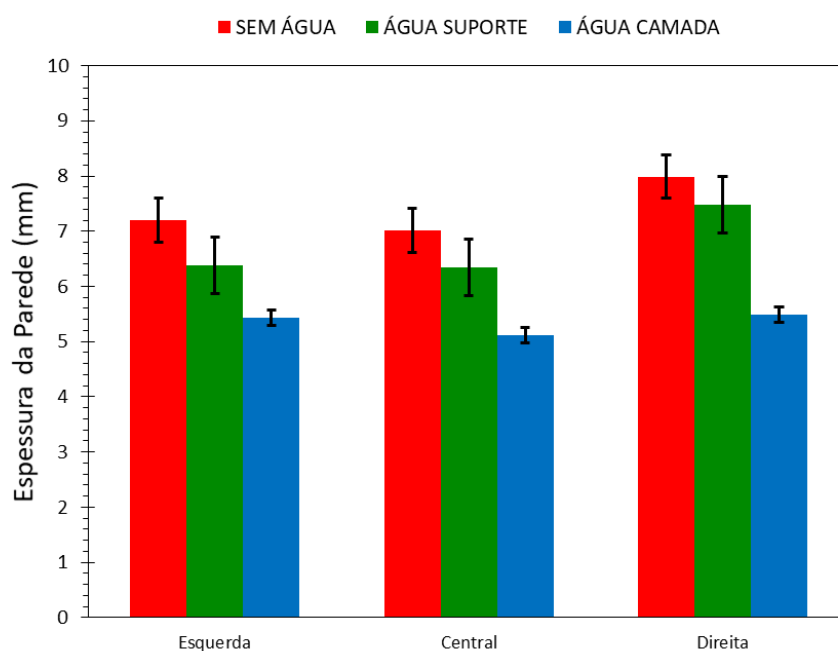


Figura 41 - Espessura média das paredes para as diferentes estratégias de resfriamento.

5.2.1 Análise macrográfica

Para avaliar o efeito do resfriamento na geometria final das paredes, este trabalho também contou com análise macroestrutural das paredes obtidas em cada condição de resfriamento. Amostras da região central foram retiradas como aponta a Fig. 23. Além do centro, as bordas direitas e esquerdas foram analisadas. As amostras foram devidamente preparadas com lixas 320 e 600 e atacadas quimicamente (reagente Kroll) para remover o brilho e evitar reflexos nas fotografias. A Figura 42 apresenta imagens macrográficas para a região central de uma parede de cada condição.

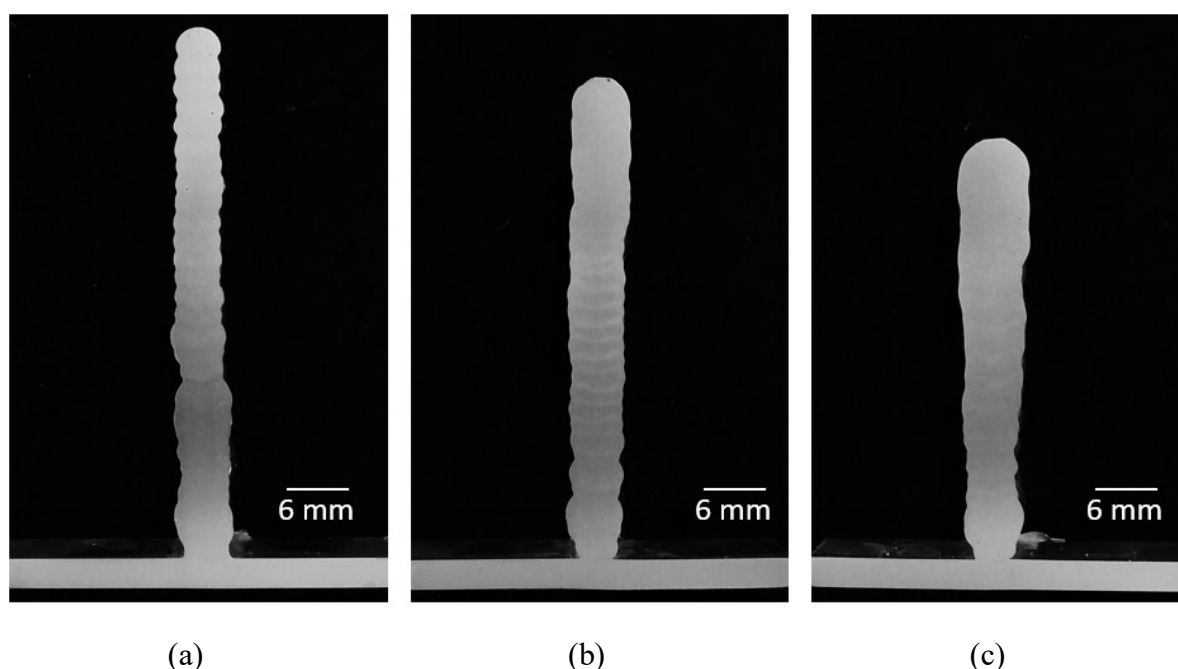


Figura 42 - Macrografia central para (a) Água Camada, (b) Água Suporte e (c) Sem Água.

A uniformidade geométrica com certeza é um parâmetro essencial nos processos de fabricação por manufatura aditiva, pois evita desperdícios no processo de desbaste fino e/ou acabamento. Pela Figura 42 ficam claras as diferenças tanto de altura quanto de espessura. As condições Sem Água e Água Suporte tendem a ter espessura aumentada com o aumento da altura, fato justificado pelo acúmulo e calor e consequente dificuldade de solidificação imediata, aumentando também a molhabilidade, o que alarga e achata os depósitos.

É preciso, em seguida, quantificar as geometrias transversais das paredes para avaliar qual seria a espessura efetiva do material, ou seja, quanto teria de ser usinado para obter uma seção transversal uniforme. Para isto, esta imagem foi processada no software MATLAB® (com programa em desenvolvimento no Laprosolda-UFU) e obteve-se valores de espessura em função da altura das paredes para cada condição. A Figura 43 ilustra os resultados obtidos. O comprimento da altura encontra-se no eixo “x” e a largura/espessura das paredes no eixo “y”.

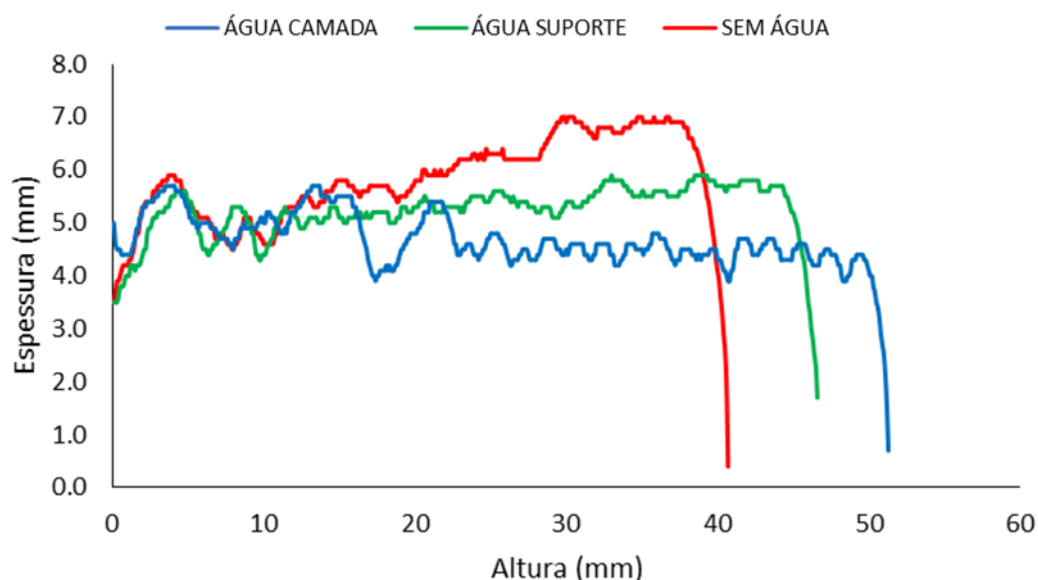


Figura 43 - Altura x Espessura central em detalhes.

Vale lembrar que as paredes construídas por imersão na água tiveram suas dez primeiras camadas feitas apenas com o suporte imerso (idem segunda condição). Isto aconteceu devido a dificuldades com o arco elétrico e com a obstrução de passagem das cantoneiras, apresentando então espessura semelhante com os demais casos no início do comprimento da altura. Pode-se afirmar também pela Figura 43 que depois de certo tempo de experimento o resfriamento provindo de trocas de calor com o suporte deixa de fazer efeito para a condição Sem Água. No caso com água resfriando as camadas obteve-se uma largura mais constante, com a estratégia de resfriamento do suporte com água em situação intermediária. As larguras efetivas obtidas foram de 3,9, 3,5 e 3,5 mm para as condições Água Camada, Água Suporte e Sem Água, respectivamente. A Figura 44 ilustra o nível no qual estas larguras se encontram ao longo da altura.

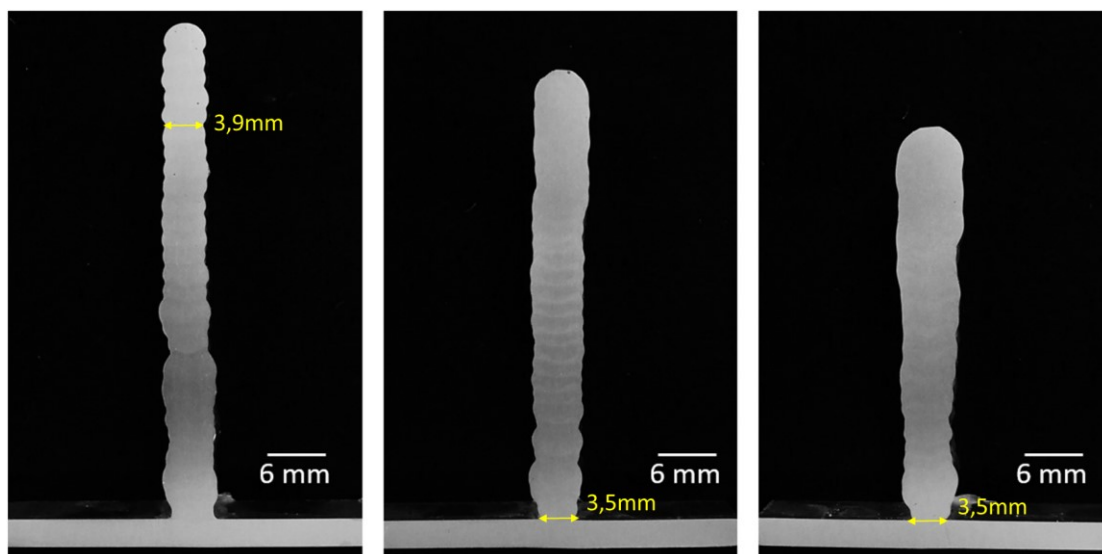


Figura 44 - Larguras centrais efetivas.

Agora é preciso avaliar a quantidade de material que seria descartado em processos de usinagem para obtenção de paredes uniformes de alumínio. As Figuras 43 e 44 foram combinadas para melhor ilustrar o que seria realmente utilizado das paredes. Os retângulos coloridos sobrepostos equivalem às áreas transversais efetivas de material.

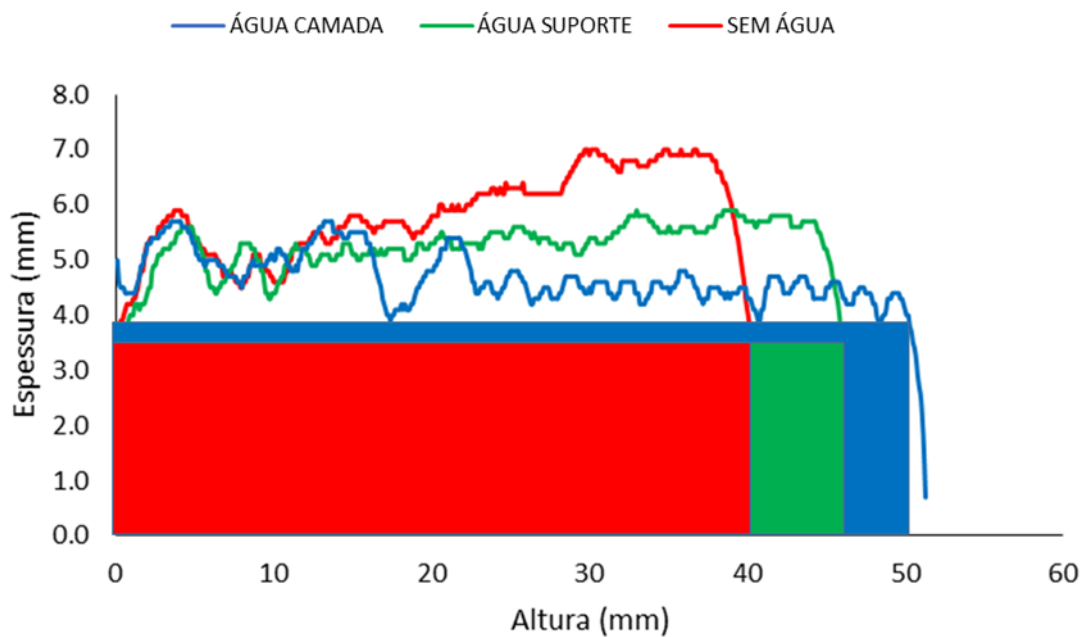


Figura 45 - Áreas Centrais Efetivas.

Dividindo a área efetiva (ilustrada na Fig. 45) pela área total de cada condição é possível saber em termos de porcentagem quanto de material que foi depositado seria finalmente utilizado para alguma aplicação. A área total foi estimada numericamente por um método integrativo, onde o resultado final foi a soma de áreas de vários retângulos de mesma largura (0,1 mm) e alturas correspondentes à largura das paredes para cada incremento.

A Tabela 4 apresenta os resultados desta avaliação. Sem a utilização de água para construção de paredes por manufatura aditiva, aproximadamente 40% da matéria prima investida seria descartada, quantidade esta que se reduz quase pela metade quando o método de imersão em água é aplicado.

Tabela 4- Áreas efetivas.

Condição	Área Total [mm ²]	Altura [mm]	Largura efetiva [mm]	Área Efetiva [mm ²]	Razão efetiva [%]
SEM ÁGUA	235.22	40.50	3.50	141.75	60.26
ÁGUA SUPORTE	243.05	46.00	3.50	161.00	66.24
ÁGUA CAMADA	239.15	50.00	3.90	195.00	81.54

Agora, para mostrar os resultados macrográficos laterais (regiões ao final dos depósitos/camadas), tem-se as Figuras 46 e 47 que foram também desenvolvidas pela análise de imagem no MATLAB®.

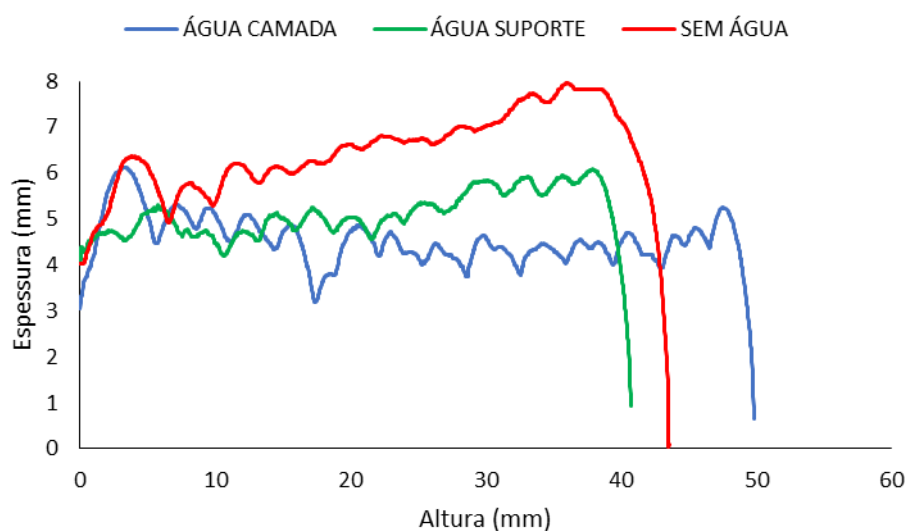


Figura 46 - Altura x Espessura esquerda em detalhes.

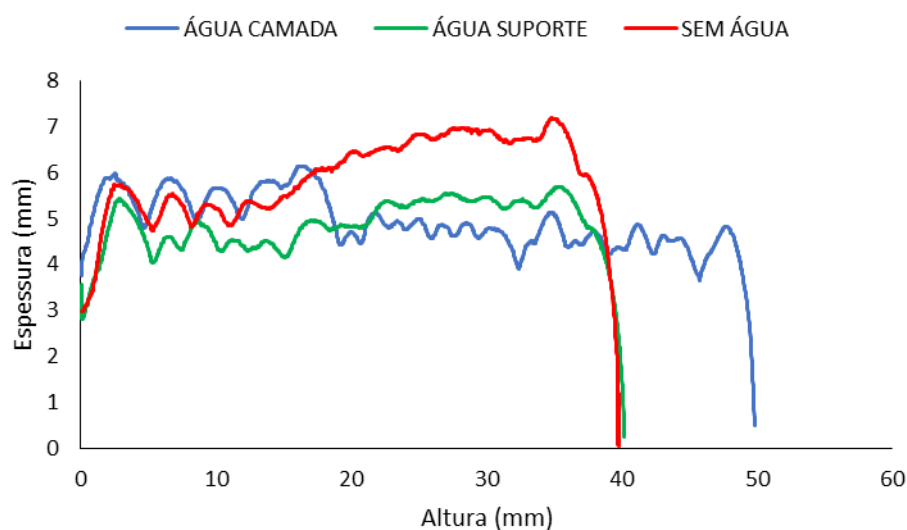


Figura 47 - Altura x Espessura direita em detalhes.

A partir das duas bordas, nota-se comportamento semelhante ao que ocorreu no centro, ou seja, a condição de Água Camada com largura efetiva e altura superiores. A condição Sem Água foi sempre mais espessa e com largura efetiva aproximadamente igual à condição Água Suporte.

Agora a fim de observar o que ocorre ao longo do comprimento das paredes, gráficos acoplando curvas centrais, esquerdas e direitas de cada condição de resfriamento são apresentados nas Figuras 48, 49 e 50.

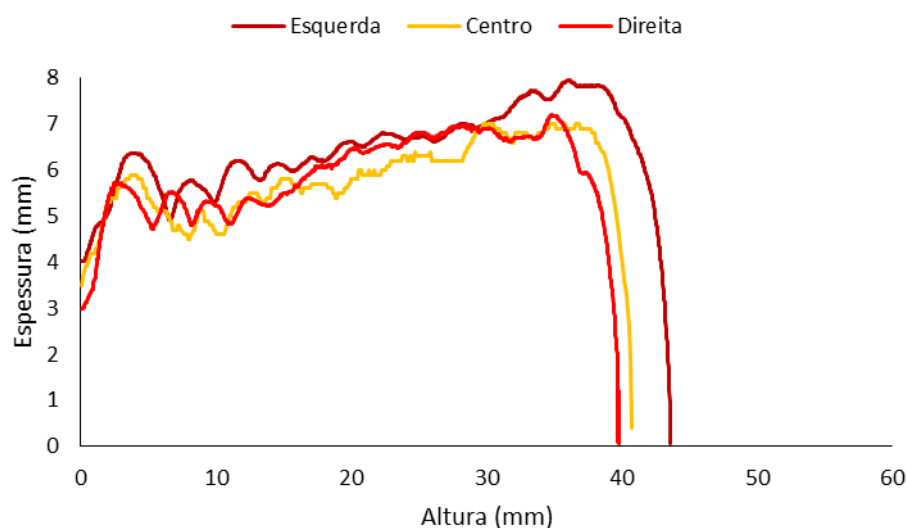


Figura 48 - Evolução da altura ao longo da parede para a condição Sem Água.

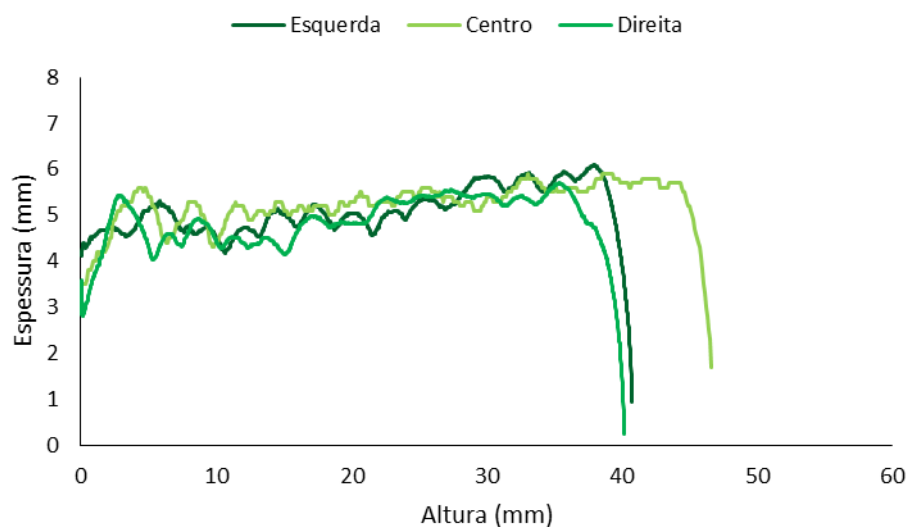


Figura 49 - Evolução da altura ao longo da parede para a condição Água Suporte

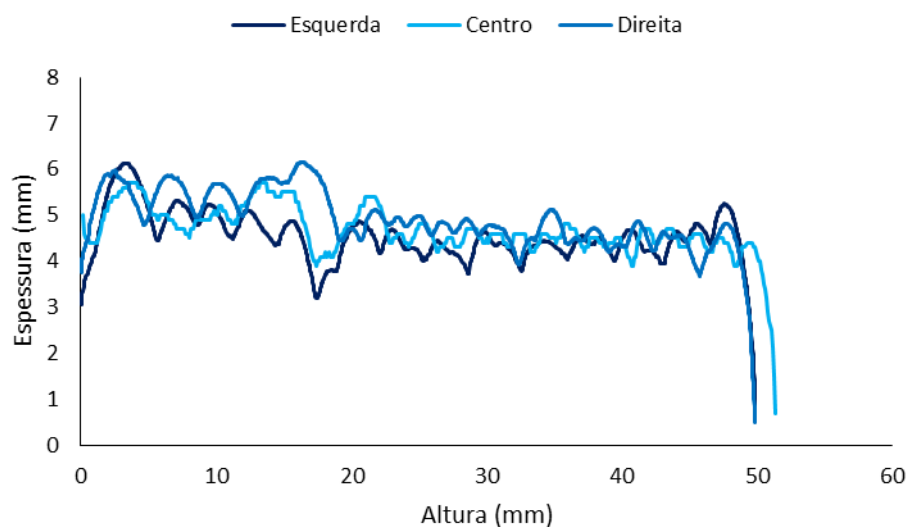


Figura 50 - Evolução da altura ao longo da parede para a condição Água Camada.

Com exceção da condição Sem Água, as curvas centrais apresentaram maiores alturas, como era esperado devido ao efeito de superaquecimento e consequente maior molhabilidade nas bordas. Também das Figuras 48 e 49 fica claro que as laterais direitas são mais baixas. A explicação pode estar relacionada com o fato de quando material é depositado na região direita, tanto o substrato quanto o suporte já estão aquecidos (maior molhabilidade) devido à condução de calor que se inicia juntamente com a deposição de material na região esquerda. A Figura 50 demonstra maior uniformidade da situação de resfriamento ativo das camadas, uma vez que a

curvas se sobrepõem constantemente a partir no nível de altura em que a estratégia de resfriamento Água Camada foi utilizada.

5.3 Propriedades Mecânicas

5.3.1 Dureza

Os resultados de microdureza contaram com cinco repetições e são dados em HV 0,2 (Dureza Vickers) na Tab. 5. Os dados mostram que as diferentes condições de resfriamento parecem não ter influência na dureza resultante, indicando que não houve alterações de microconstituintes do material.

Tabela 5- Dureza Vickers.

Dureza (HV 0.2)							
Condição	1	2	3	4	5	Média	Desvio
SEM ÁGUA	67.8	68.2	71.1	74.8	73.8	71	3
ÁGUA SUPORTE	70.5	75.8	70.4	72.4	73.6	73	2
ÁGUA CAMADA	72.2	70.2	68.5	67.8	73.8	71	3

5.3.2 Tração

Para o ensaio de tração, 36 CPs foram construídos, divididos entre verticais e horizontais, esquerdos, centrais e direitos, como já informado. Para cada posição da parede (esquerda, central e direita) foram testados dois CPs de cada orientação (vertical e horizontal). Os resultados foram obtidos através de dados da máquina de tração e também de análise de imagens provinda do software MATLAB® (com programa em desenvolvimento no Laprosolda-UFU).

Todos os CPs foram previamente medidos com paquímetro a fim de se obter a área da seção transversal do pescoço e posteriormente calcular a tensão aplicada a cada momento do ensaio, uma vez que a máquina de tração forneceu apenas valores de tempo e carga aplicada. O deslocamento foi obtido a partir do produto da velocidade de movimentação da garra (1mm/min) pelo do tempo de ensaio. As Figuras 51, 52, 53 mostram o comportamento de tensão versus deslocamento dos CPs da condição Sem Água quando submetidos à tração para

as regiões esquerda, central e direita, respectivamente. Os dados se referem à tensão aplicada em função do deslocamento da garra durante o ensaio de tração.

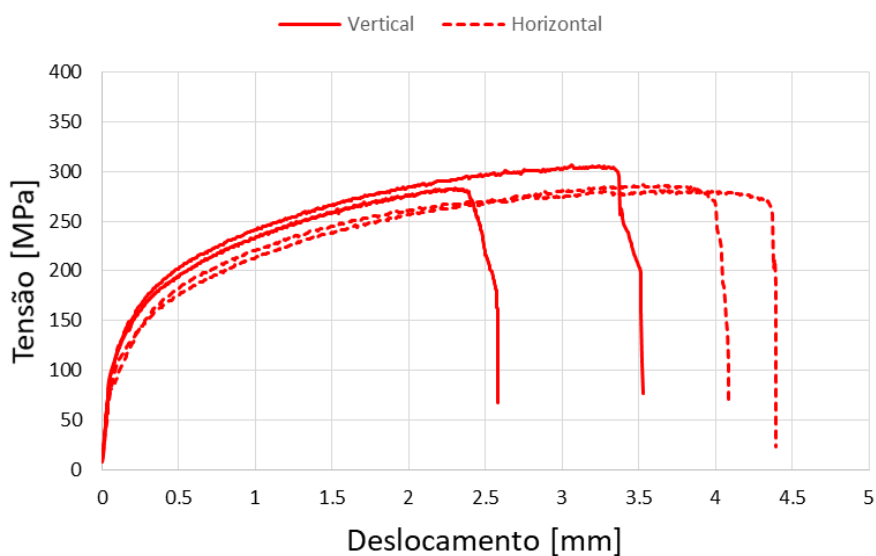


Figura 51 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Sem Água na região esquerda da parede.

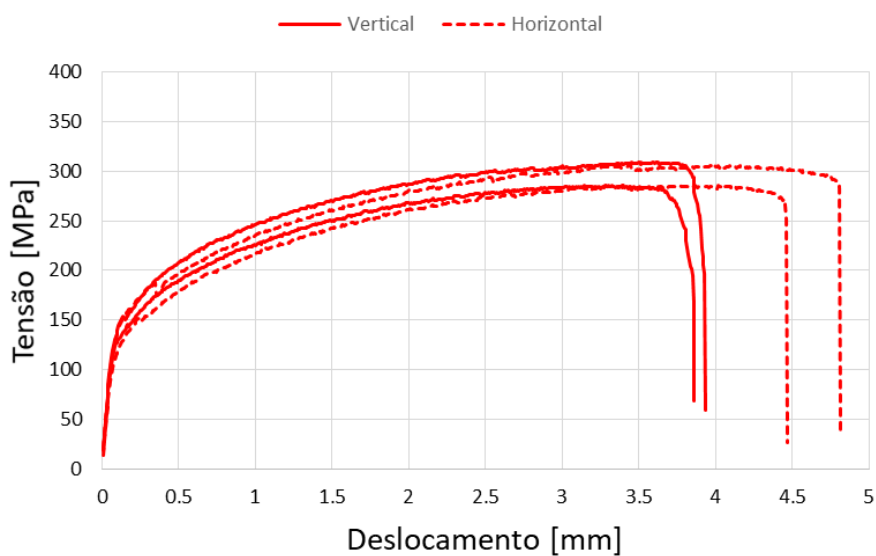


Figura 52 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Sem Água na região central da parede.

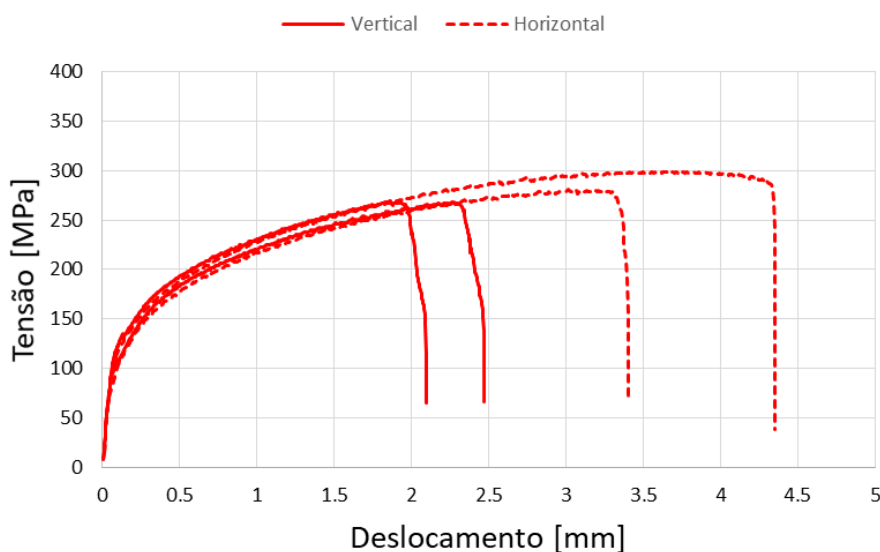


Figura 53 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Sem Água na região direita da parede.

Em geral observa-se claramente que os CPs horizontais se deformam mais antes da ruptura. Os valores de resistência foram similares, indicando que houve mudança apenas de ductilidade em função da orientação da carga aplicada em relação à direção de crescimento da parede. Ao que parece o acúmulo de calor na parede com a estratégia de resfriamento sem água levou a diferenças significativas de ductilidade entre a direção de crescimento vertical e horizontal da parede. Além disto, os CPs de regiões centrais se deformaram mais em média, provavelmente pelo resfriamento mais lento desta região (menor gradiente térmico), o que pode favorecer a formação de maiores grãos e então maior ductilidade.

As Figuras 54, 55 e 56 apresentam os resultados de tensão versus deslocamento para a condição Água Suporte.

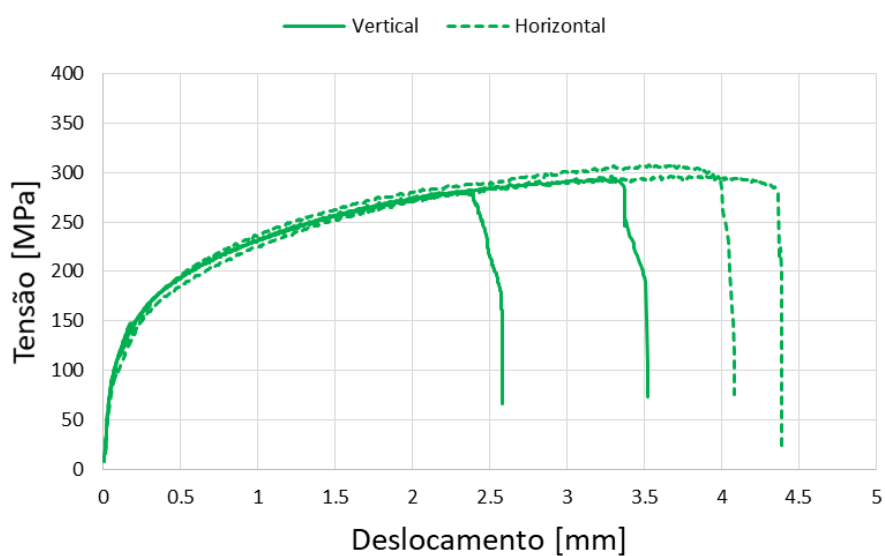


Figura 54 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Suporte na região esquerda da parede.

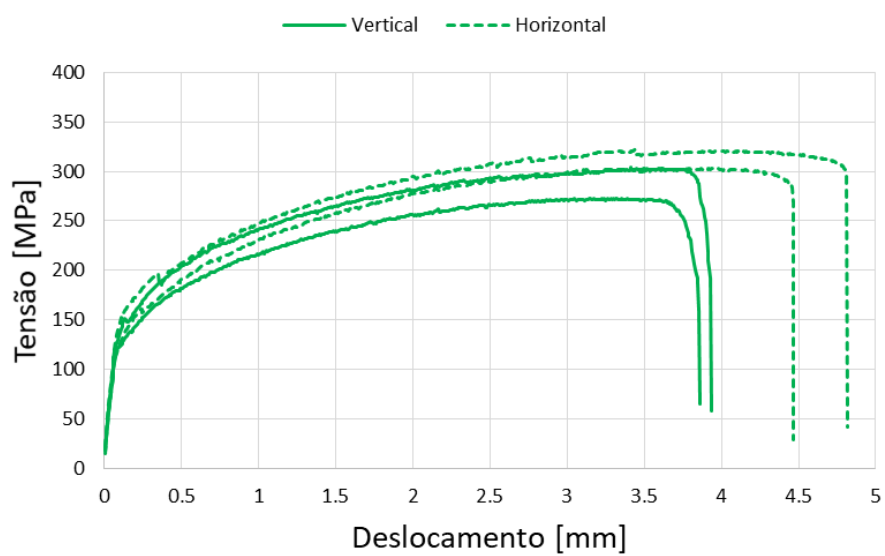


Figura 55 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Suporte na região central da parede.

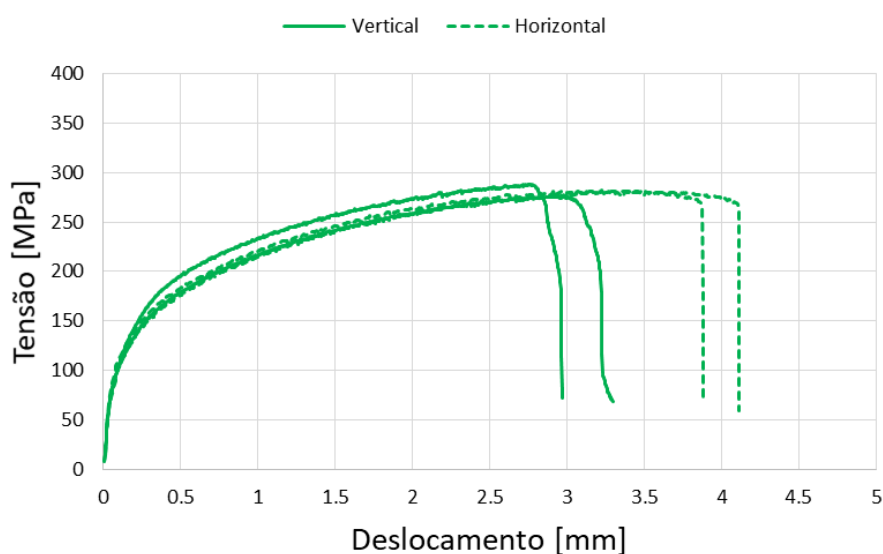


Figura 56 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Suporte na região direita da parede.

Os resultados foram bastante similares aos obtidos com a condição Sem Água. A região central também apresentou deformação um pouco maior do que nas laterais. Ao que parece, o efeito de resfriamento do suporte com água se limitou realmente às primeiras camadas, não chegando às regiões da parede a partir das quais as secções de largura reduzida dos CPs de tração foram fabricadas.

Por último, os resultados da condição de imersão das paredes em água são apresentados nas Figuras 57, 58 e 59.

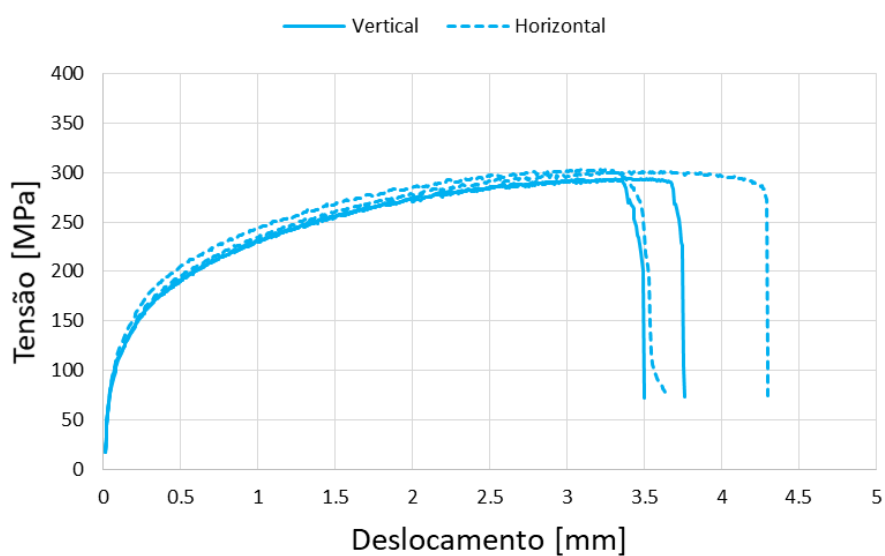


Figura 57 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Camada na região esquerda da parede.

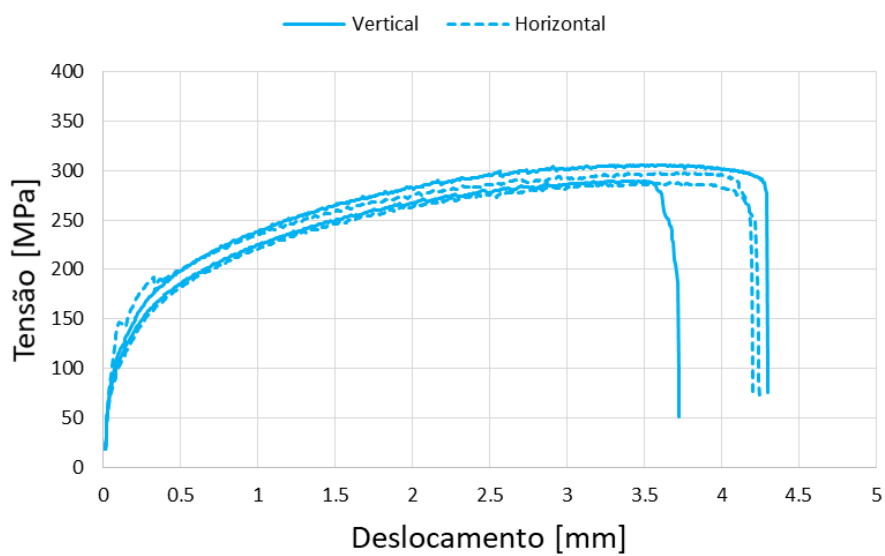


Figura 58 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Camada na região central da parede.

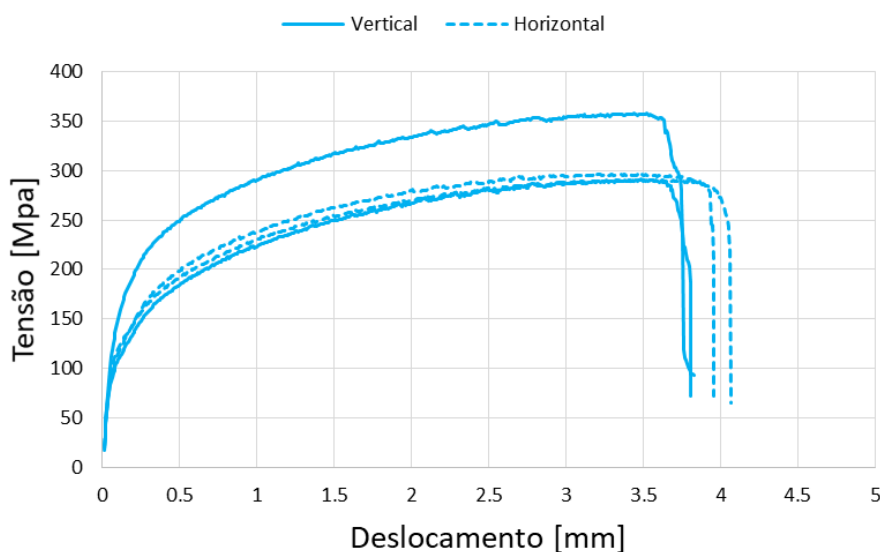


Figura 59 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para a condição Água Camada na região direita da parede.

Os resultados de limite de resistência à tração foram similares aos obtidos com as outras condições de resfriamento, com exceção de um caso na Fig. 59 na qual uma das curvas atinge um valor aproximado de 350 MPa. Esta curva (CP) foi desconsiderada das análises. Entretanto, a estratégia de resfriamento com água na camada parece ter favorecido a diminuição da anisotropia do material da parede em termos de ductilidade. Ou seja, os níveis de deformação (representada pelo deslocamento) ao final do ensaio (ruptura) foram bastante similares na direção vertical e horizontal, inclusive com tendência de ficarem em patamar intermediário se comparados aos valores obtidos com as outras formas de resfriamento. Além disso, houve menor dispersão entre os valores de deformação encontrado para CPs centrais e laterais. Para melhor destacar a diminuição da anisotropia de ductilidade, a Fig. 60 foi construída acomodando seis curvas no mesmo gráfico que correspondem aos CPs centrais das três condições de resfriamento avaliadas. A evidência da diminuição da anisotropia é a maior proximidade das curvas azuis representantes da condição Água Camada. Acredita-se que o rápido resfriamento obtido com a água nas camadas torna o gradiente térmico elevado e equilibrado (campo de temperatura concentrado e igualmente distribuído), o que pode levar à formação de grãos com características de forma similares na vertical e horizontal (as outras formas de resfriamento devem ter levado a grãos mais alongados na direção horizontal devido ao acúmulo de calor). Isso poderia explicar o equilíbrio de ductilidade na direção vertical e

horizontal da parede. Agora, quanto ao fato da estratégia de água na camada ter levado a um aumento da ductilidade na direção vertical serão necessários mais estudos.

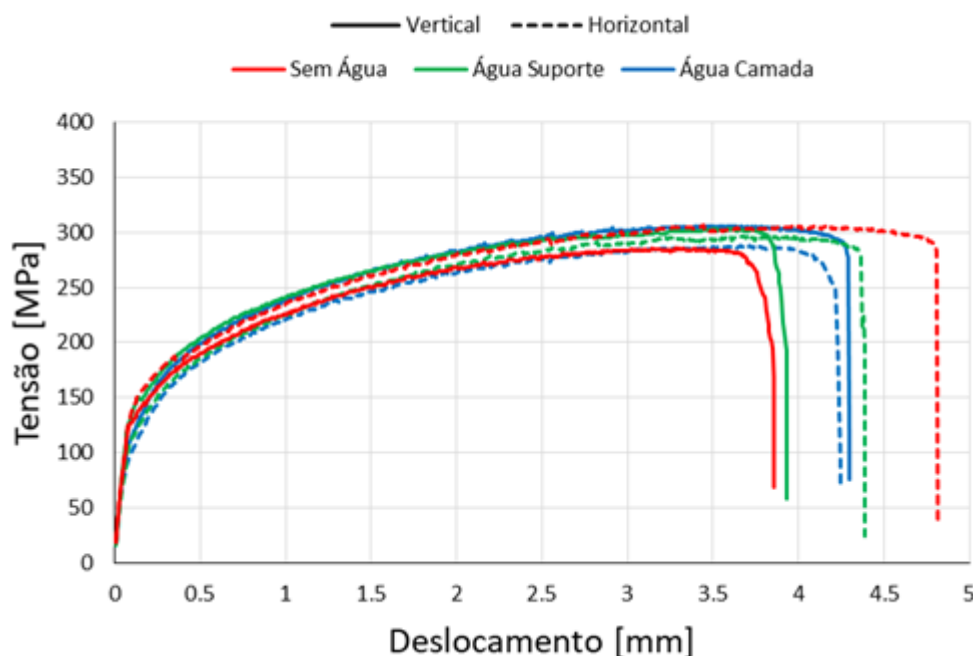


Figura 60 - Tensão versus deslocamento para CPs verticais e horizontais para as condições Sem Água, Água Suporte e Água Camada na região central das paredes.

Dois gráficos de barras foram feitos para melhor quantificar estes resultados e evidenciar as diferenças para cada estratégia de resfriamento. A Figura 61 se refere aos resultados de deformação (ductilidade) e a Fig. 62 aos resultados de limite de resistência à tração. Como evidenciado, o resfriamento com água das camadas depositadas causou um efeito claro na ductilidade, inclusive com menores níveis de desvio padrão (melhor repetibilidade), mas não na resistência mecânica das paredes em função da direção de aplicação de carga.

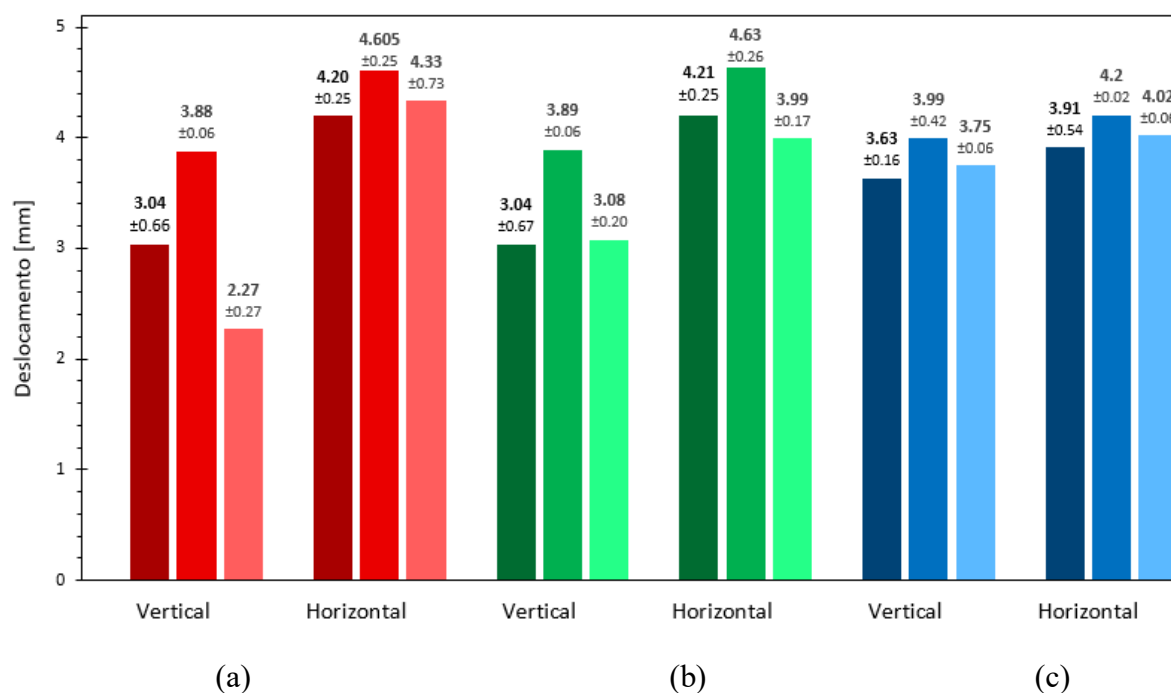


Figura 61 - Resultados de deslocamento até a ruptura (ductilidade) para todas regiões (esquerda, central e direita) da parede para cada condição de resfriamento (a) Sem Água, (b) Água Suporte e (c) Água Camada.

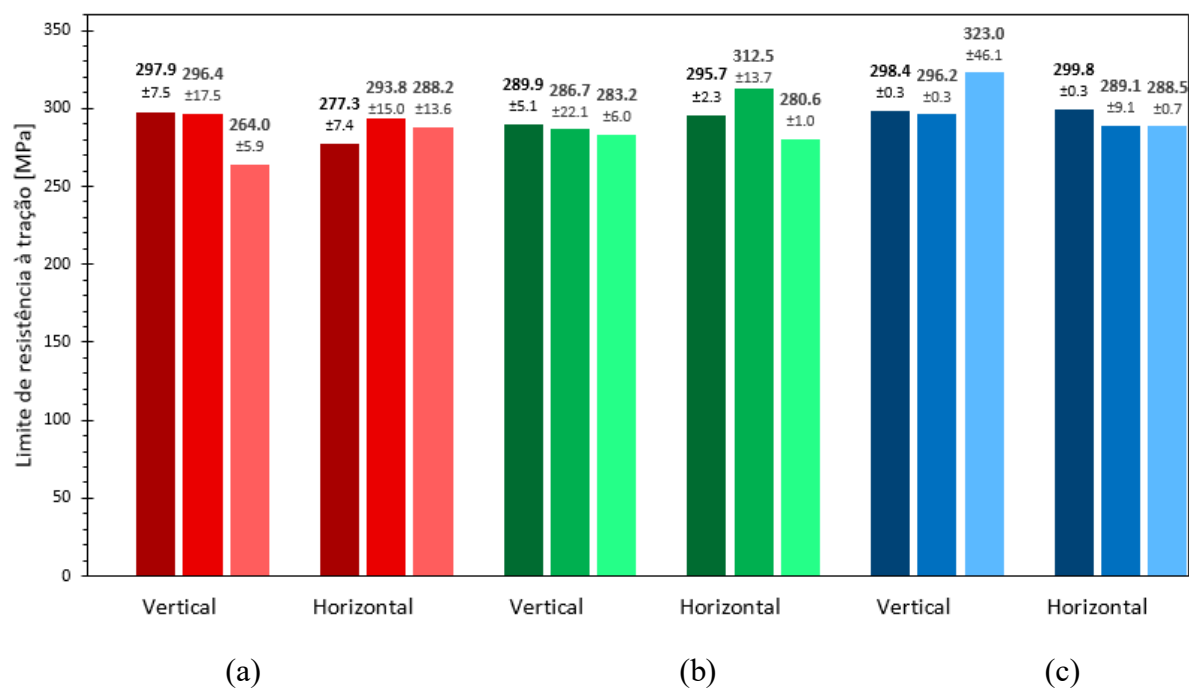


Figura 62 - Resultados de limite de resistência à tração para todas regiões (esquerda, central e direita) da parede para cada condição de resfriamento (a) Sem Água, (b) Água Suporte e (c) Água Camada.

Como já mencionado, a deformação dos corpos de prova foi obtida de duas maneiras distintas: baseada no deslocamento da garra da máquina de tração (comprimento final dos CPs versus comprimento inicial) e baseado em análise de imagem dos círculos de referência desenhados na superfície dos CPs (processamento em MATLAB® de imagens do crescimento do círculo na direção do ensaio versus seu diâmetro inicial). O corpo de prova vertical da condição Sem Água no momento da ruptura é ilustrado pela Figura 63.

Como aponta a Figura 64, com a deformação do CP durante o ensaio de tração, o círculo vai crescendo nesta direção e diminuindo na transversal. O programa utilizado detecta este círculo, cujo diâmetro inicial é determinado automaticamente ao se calibrar a imagem pela largura do pescoço do CP. À medida que o ensaio segue, o programa vai determinando a dimensão do círculo na direção de aplicação da carga. Ao final, pode-se calcular a deformação instantânea do círculo (comprimento instantâneo versus diâmetro inicial) tanto na fase elástica quanto na plástica. Ou seja, diferente do que se obtém tradicionalmente com o uso de extensômetros, este método proporciona avaliações de deformação também na fase plástica. Os resultados de ductilidade (deformação na ruptura) obtidos com os dois métodos são apresentados nas Figuras 65 e 66. Apesar dos resultados mostrarem valores condizentes com a ductilidade esperada para a liga de alumínio utilizada e coerentes quanto à estratégia de resfriamento utilizada (a condição Água Camada equilibrou a ductilidade das duas direções de crescimento da parede), houve uma certa discrepância entre os valores de deformação obtidos pelos dois métodos. Isso será alvo de análises futuras inclusive para refinar o programa de análise de imagem e suas funções.

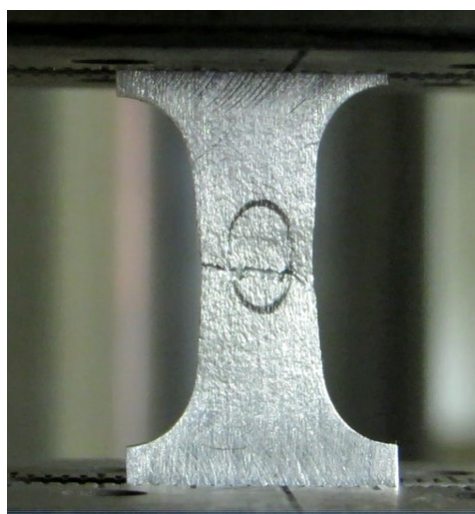


Figura 63 - Corpo de prova no momento de ruptura.

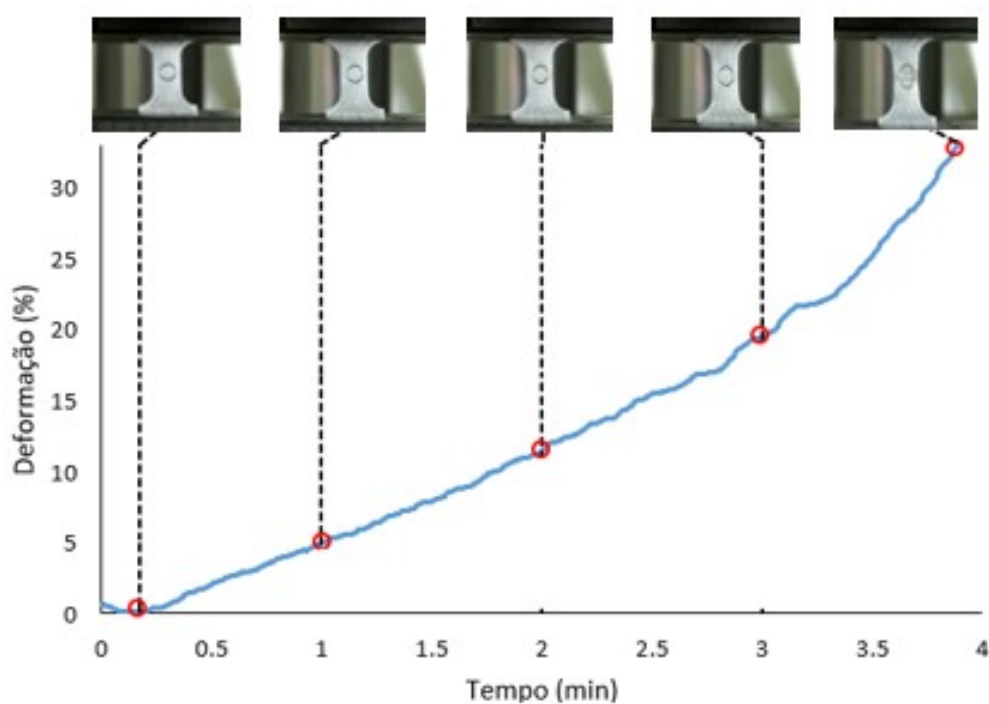


Figura 64 - Evolução do comprimento dos CP da condição Água Camada central vertical no tempo até a ruptura.

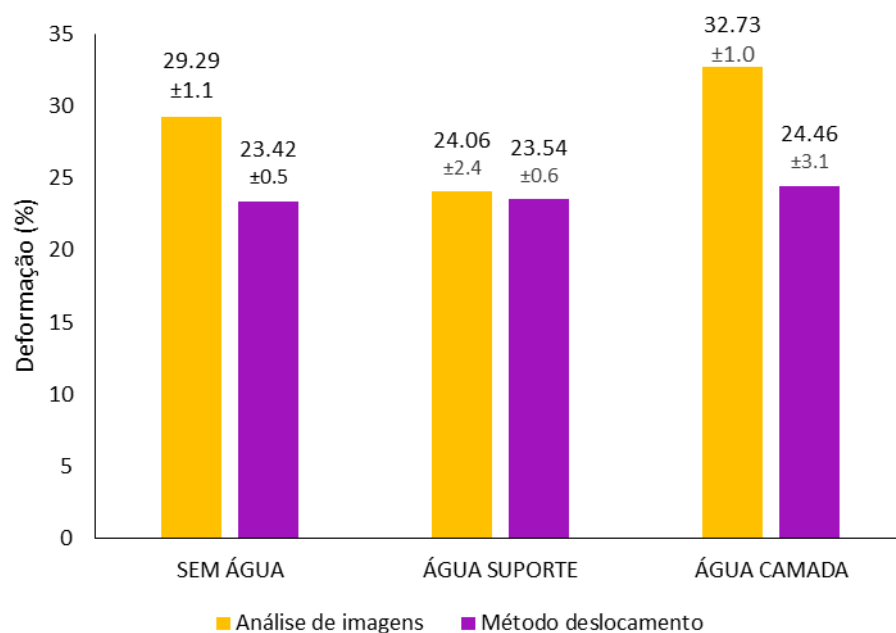


Figura 65 - Deformações verticais baseados no deslocamento e em imagem.

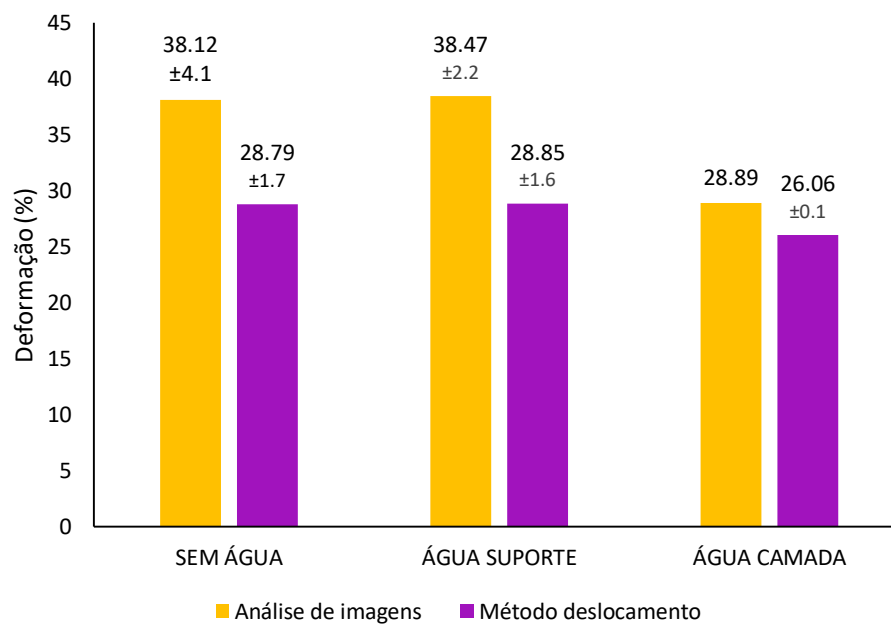


Figura 66 - Deformações horizontais baseados no deslocamento e em imagem.

5.4 Porosidade

Os resultados de porosidade são dados na Tab. 6 em percentual de vazios nas amostras e em relação ao substrato da liga Al 5052 de densidade calculada por gravimetria de 2,698 g/cm³. A Figura 67 apresenta os mesmos resultados de forma gráfica.

Tabela 6- Volume de vazios das paredes obtidas com as diferentes estratégias de resfriamento.

Volume de vazios						
Condição	Massa no ar [g]	Massa aparente na água [g]	Delta massa [g]	Vsub [g/cm ³]	ρ_c [g/cm ³]	Vv [%]
SEM ÁGUA	57.05	35.18	21.87	21.87	2.6086	3.31
	57.08	35.19	21.89	21.89	2.6076	3.35
	57.1	35.22	21.88	21.88	2.6097	3.27
Média	57.08	35.20	21.88	21.88	2.6086	3.31
ÁGUA SUPORTE	61.51	38.01	23.5	23.5	2.6174	2.99
	61.48	38.00	23.48	23.48	2.6184	2.95
	61.48	38	23.48	23.48	2.6184	2.95
Média	61.49	38.00	23.49	23.49	2.6181	2.96
ÁGUA CAMADA	59.52	36.8	22.72	22.72	2.6197	2.90
	59.47	36.78	22.69	22.69	2.6210	2.85
	59.5	36.78	22.72	22.72	2.6188	2.93
Média	59.50	36.79	22.71	22.71	2.6198	2.90

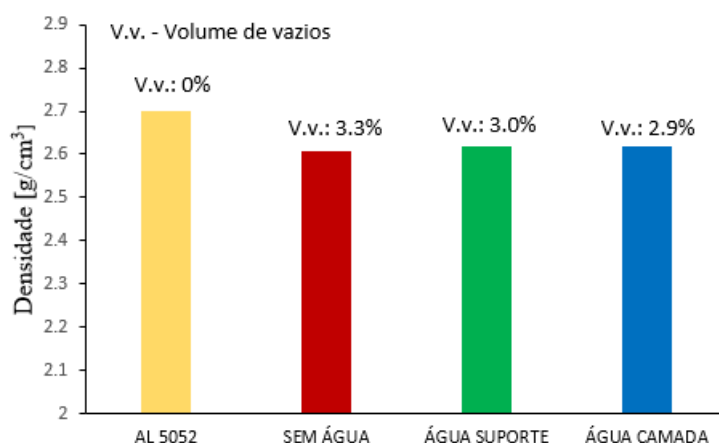


Figura 67 - Densidade e volume de vazios das paredes obtidas com as diferentes estratégias de resfriamento.

Ao contrário do que se podia esperar devido ao rápido resfriamento sofrido (menos tempo para escape de gases absorvidos pela poça de fusão), a condição Água Camada não levou a maiores índices de porosidade. Todos os percentuais de volumes vazios ficaram no mesmo nível, o que indica que esta estratégia de resfriamento, além de equilibrar a ductilidade nas duas direções de crescimento das paredes, não gera a formação de poros em excesso.

Utilizando os resultados de densidade média de cada condição e combinando com os valores de massa (obtidos por pesagem do substrato antes e após a deposição de alumínio em cada forma de resfriamento) é possível estimar o volume de material depositado em cada caso,

cujos resultados são apresentados na Tab. 7. Como observado, a mesma quantidade de material foi depositada em cada estratégia de resfriamento, o que era esperado pela mesma seleção de parâmetros utilizada em todos os casos.

Tabela 7- Volume estimado das paredes.

Volume estimado das paredes			
Condição	Delta massa [g]	Densidade [g/cm ³]	Volume [cm ³]
SEM ÁGUA	141.65	2.60862	54.30
	141.77		54.35
	141.32		54.17
Média	141.58		54.27
ÁGUA SUPORTE	142.28	2.61808	54.35
	140.54		53.68
	143.06		54.64
Média	141.96		54.22
ÁGUA CAMADA	139.58	2.61984	53.28
	139.67		53.31
	140.98		53.81
Média	140.08		53.47

6 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos dos termopares nota-se nitidamente que a condição Sem Água acumulou mais calor durante a deposição e que a condição Água Camada foi capaz de mitigar significativamente o calor acumulado. À medida que o tempo passa, a temperatura dos vales e picos da condição Sem Água não diminuem, confirmando a dificuldade de resfriamento desta estratégia. O difícil posicionamento dos termopares no substrato pode ter causado efeitos indesejáveis nos resultados.

O uso da câmera termográfica facilitou uma visualização mais ampla do acúmulo/dissipação de calor resultante, através dos mapas de temperatura fornecidos durante e ao final da fabricação das paredes em cada condição de resfriamento. Além disso, quantitativamente a avaliação de temperatura na região de um quadrado fixo na deposição das oito últimas camadas mostrou muita semelhança ao observado com os termopares: a taxa de resfriamento da condição Água Camada é claramente muito superior às demais.

Geometricamente as paredes foram analisadas em três regiões (esquerda, central, direita) para avaliar a regularidade. O resfriamento por imersão em água gerou paredes mais altas, finas e regulares, resultando em maior área efetiva e consequente volume efetivo. A espessura das paredes da condição Sem Água e Água Suporte tende a ser maior com o aumento da altura. A justificativa é o fato de o acúmulo de calor aumenta a temperatura da camada que está recebendo material e assim aumenta a molhabilidade do material depositado, o que faz com que ele se espalhe mais (aumento da espessura média da parede) e consequentemente diminua sua altura (redução da altura média da parede). O efeito das bordas é menos perceptível na condição Água Camada, dando maior uniformidade às suas paredes.

A análise macrográfica auxiliou na avaliação de área total e efetiva das seções transversais centrais e laterais. Através de simples estimativa, sem a utilização de água para construção de paredes por manufatura aditiva, aproximadamente 40% da matéria prima investida seria descartada. Esta quantidade se reduz quase pela metade quando o método de imersão em água é aplicado. Além disso, a macrografia reafirma os efeitos de borda diminuídos para condição Água Camada bem como sua boa uniformidade.

Para as condições Sem Água e Água Suporte, os valores de resistência foram similares, indicando que houve mudança apenas de ductilidade em função da orientação da carga aplicada em relação à direção de crescimento da parede. Além disto, os CPs de regiões centrais se deformaram mais em média, provavelmente pelo resfriamento mais lento desta região (menor

gradiente térmico), o que pode favorecer a formação de maiores grãos e então maior ductilidade. Já a estratégia de resfriamento Água Camada parece ter favorecido a diminuição da anisotropia do material da parede em termos de ductilidade. Houve também menor dispersão entre os valores de deformação encontrados para CPs centrais e laterais.

Apesar de pequenas discrepâncias de resultados, as duas análises de ductilidade feitas mostraram valores condizentes com a ductilidade esperada para a liga de alumínio utilizada e coerentes quanto à estratégia de resfriamento utilizada (a Água Camada equilibrou a ductilidade das duas direções de crescimento da parede).

Os resultados de dureza não foram suficientes para nenhuma comparação das três estratégias, ou seja, não houve alterações de microconstituintes do material. Quanto à porosidade, o rápido resfriamento em água não provocou maior aparecimento de poros, ficando as três condições uniformes quanto ao volume de vazios.

Em geral, as comparações feitas entre as três estratégias de resfriamento mostraram significantes melhorias para a condição Água Camada. A implementação industrial de um sistema de refrigeração assim é viável, podendo gerar benefícios financeiros facilmente calculados. Além disso, a água pode ser reaproveitada em vários processos e seu uso não causa prejuízos a natureza.

7 TRABALHOS FUTUROS

Diante da importância dos estudos em manufatura aditiva e dos resultados obtidos é válido continuar investigando o uso de água para a diminuição do acúmulo de calor gerado no processo de deposição de alumínio.

Obter um sistema eficiente para a imersão em água desde o início da parede (e não apenas a partir da décima camada) mostra ser essencial, tanto para efeitos de pesquisa quanto para aplicações industriais. Uma metodologia que pode ser empregada é adicionar solutos para retardar vaporização da água, fazendo com que a água atue cada vez mais próxima da tocha de deposição.

Outra aplicação seria circular a água na cuba bem como resfriá-la para aumentar a eficiência de troca de calor com as paredes construídas.

Monitorar os parâmetros de deposição de material também pode apresentar diferentes caminhos para estudos posteriores.

Serão necessárias análises micrográficas para avaliar o crescimento de grãos diante dos diversos campos de temperatura gerados pelas formas de resfriamento. É interessante também observar os resultados para as diferentes condições de contorno (efeito das bordas).

Estudar o porquê do aumento da ductilidade na direção vertical na condição Água Camada pode abranger mais de seus benefícios. Além disso, o método de análise de imagens desenvolvido para resultados de ductilidade pode ser aprimorado e empregado para quantificar deformações elásticas e plásticas em duas direções.

Uma futura avaliação de demais propriedades físicas e mecânicas também merece destaque. Testes mecânicos de impacto, fadiga e de tração em baixas temperaturas, por exemplo, são necessários na utilização do alumínio para o setor aeronáutico.

Empregar a tecnologia em outras ligas de alumínio e outros materiais é também essencial, uma vez que diversos outros setores industriais podem ser beneficiados dos resultados. E ainda, avaliar a técnica estudada em processos MIG/MAG propriamente ditos pode facilitar ainda mais a difusão dos benefícios por conta da maior abrangência industrial em relação ao CMT.

8 REFERÊNCIAS

- BOBBY, S. S.; SINGAMNENI, S. Conformal cooling through thin shell moulds produced by 3D printing. **Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering**, 2012.
- CAO, Y.; LI, H.; LIANG, Z.; WANG, D. Effect of Water Cooling on the Microstructure and Mechanical Properties of 6N01 Aluminum Alloy P-MIG-Welded Joints. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2017.
- COTTELEER, M. **3D opportunity – additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth**. 2014.
- DING, J.; COLEGROVE, P.; MEHNEAS, J.; GNGULY, S.; SEQUEIRA, M.; ALMEIDA; WANG, F.; WILLIAMS, S. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts. **Computational Materials Science** , 2011.
- FRONIUS. **Fronius.com**, 2017. Disponivel em: <http://www3.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf>.
- FRONIUS. CMT – Cold Metal Transfer: The Cold Welding Process For Premium Quality. **Fronius**, 25 nov. 2017. Disponivel em: <<http://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt>>.
- GIBSON, I; ROSEN, D.; STUKER, B. **Additive Manufacturing Technologies**. [s.n.], 2010.
- LU, X.; ZHOUL, F.; XING, X. L.; SHAO, L. Y.; YANG, Q. X.; GAO, S. Y. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017.
- MOURITZ, A. P. **Introduction to aerospace materials**. [s.n.], 2012.
- The Boeing 737 Technical Site. **The Boeing 737 Technical Site**, 30 out. 2017. Disponivel em: <<http://www.b737.org.uk/history.htm>>.
- WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. **Materials Science and Technology**, 2016.
- WOHLERS, T. Additive manufacturing and 3D printing state of the industry , 2013.
- XIONG, J.; LI, R; LEI, Y; CHEN, H. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Tech.**, 2018.
- YANG, D.; HE, C.; ZHANG, G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double eletrode GMAW based addictive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology** , 2016.