



MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS PARA USO NA INDÚSTRIA CERÂMICA

Ricardo Peres Cizenski¹

Anderson Daleffe²

Carlos Antônio Ferreira³

Lírio Shaeffer⁴

Resumo: Como método alternativo na confecção de peças metálicas, a manufatura aditiva é uma excelente escolha, através da impressão 3D. Neste trabalho será abordado como um dos atuais processos de deposição de metais pode ser uma opção em substituição do processo de fundição, que mesmo sendo consolidado, é limitado em alguns aspectos. O estudo a seguir irá caracterizar a construção de um tubo industrial de alto desempenho fabricado por manufatura aditiva, verificar a usinabilidade, bem como fazer a análise mecânica do material depositado. Para isso, foi utilizado robô da marca YASKAWA para fazer a modelagem do tubo, depositando camada sobre camada de metal, por meio de soldagem por deposição a arco com fio. Por meio de análises de metalografia, microdureza e tração foi possível evidenciar que o método apresenta boa propriedade mecânica e uniformidade estrutural, o que viabiliza tecnicamente sua utilização. Contudo, o custo para esse tubo apresentou um valor elevado comparado ao atual processo fundido. Porém, através desse método é possível melhorar essa comparação financeira utilizando mais de um componente, deixando o material mais nobre para a região de maior solicitação. A descoberta desse estudo ajudou a compreender a amplitude de aplicações para esse método dentro das indústrias.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. WAAM. Soldagem camada sobre camada. Impressão 3D.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, a robotização da indústria se torna algo cada vez mais comum. Olhando pela ótica dos benefícios que isso traz para dentro das empresas, muitas vezes é possível substituir uma tarefa com um alto grau de periculosidade ou com tamanha repetitividade e complexidade por exemplo, por uma

¹ Graduando em Eng. Mecânica no semestre letivo de 2023-02. E-mail: ricardo_cizenski@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

³ Doutorando Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br

⁴ Professor Universidade Federal, do Rio Grande do Sul - UFRGS. E-mail: 00002781@ufrgs.br



máquina, mitigando falhas de processos ou até mesmo exposição de pessoas ao risco ocupacional.

Na última década, a manufatura aditiva de metais através da impressão 3D vem se desenvolvendo rapidamente e ganhando espaço nas indústrias. Pode-se citar diversos benefícios com esse processo como a precisão e nível de detalhamento, menos desperdícios, a utilização de mais de um material na construção entre outros. Existem diversos processos de manufatura aditiva de metais e a definição da melhor escolha depende muito do resultado almejado. Pode-se citar a Fusão Seletiva a Laser (Selective Laser Melting - SLM), Deposição a Laser Direta (Direct Laser Deposition - DLD), Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering - SLS), Soldagem por Deposição a Arco com Fio (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM) entre outros. A utilização da última técnica, WAAM, em substituição ao processo de fundição para uma determinada peça metálica de uso na indústria cerâmica será o objeto de estudo deste trabalho.

No sul de Santa Catarina, um ponto crítico da fundição é a questão dos longos prazos. Apesar de ser um processo bem consolidado, hoje o prazo para materiais fundidos é em torno de 45 dias se a empresa possuir o modelo disponível, caso não tenha, somam-se mais 25 dias para confecção do modelo, podendo agravar-se, dependendo da liga e do tamanho do lote, isso porque a fundição aguarda uma carteira de pedido de materiais iguais para pôr em produção e reduzir o custo. Muitas vezes o tempo de espera de uma peça fundida dentro do processo produtivo de uma metalúrgica é superior ao da produção do restante do equipamento inteiro e acaba limitando a entrega dos pedidos, gerando um desgaste com o cliente final.

Neste trabalho será apresentado uma análise estrutural, de viabilidade técnica e financeira para substituir uma parte de um equipamento em específico utilizado na cerâmica e atualmente processado através da fundição, por uma peça totalmente produzida por impressão 3D.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de soldagem existe desde a idade do bronze (aproximadamente 3000 a.C e 1200 a.C), quando a técnica era utilizada para produzir ferramentas, armas e objetos. Porém a soldagem moderna teve início no século XIX



quando, em 1881, o cientista russo Nikolai Benardos patenteou a primeira máquina de solda elétrica. Em 1885, Stanislaw Olszewski, patenteou o método de soldagem a arco com eletrodo de carbono e em 1890, o inglês C.L. Coffin desenvolveu um método de soldagem a arco com eletrodo de metal revestido. A soldagem com arame veio tempos depois, também conhecida como MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas), foi desenvolvida em meados do século XX e foi utilizada nesse estudo (B.CARY, 1998).

A soldagem envolve a união de materiais através da fusão tornando uma junta soldada. O processo MIG/MAG, é uma soldagem a arco elétrico que utiliza um arame como consumível. Nesse, o arco elétrico é criado entre o metal base e o consumível que aquece a região até a fusão completa dos materiais, criando uma poça de fusão. O arame é alimentado continuamente por um alimentador de arame, que é controlado por um motor. Um gás de proteção é injetado na extremidade do bico, expulsando o oxigênio, nitrogênio e outros gases que podem causar a oxidação, contaminação e porosidade na solda (ARMAO et al., 2005). A utilização desse grande invento da sociedade aliada a tecnologia de robotização na indústria gerou as impressões tridimensionais de metais.

A manufatura aditiva permite a criação de objetos tridimensionais através de adição de material camada sobre camada utilizando de comandos numéricos de computador que traçam um percurso programado respeitando velocidades e distâncias configuráveis. A geometria pré-estabelecida através de um software de modelamento CAD (Computer-Aided Design) é convertida em coordenadas usando um software CAM (Computer-Aided Manufacturing) que são executadas por um robô por meio de um controlador CNC.

A manufatura pelo processo de soldagem por deposição a arco com Fio (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM) consiste em utilizar um fio de metal, arco elétrico e gás de proteção para a fusão do material de adição na superfície de contato, permitindo a produção de uma gama de peças e geometrias diferenciadas, mantendo as propriedades de uma soldagem convencional, com uma precisão elevada (HACKENHAAR, 2016).

O processo WAAM originou-se por volta dos anos 2000 e possui um dos menores custos comparados aos processos semelhantes. Possui uma alta taxa de deposição e seu sistema de alimentação se assemelha muito ao convencional, tem

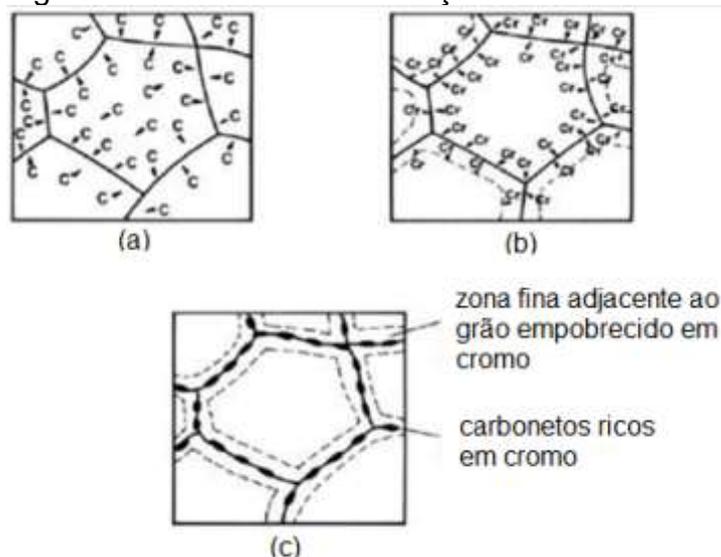
uma boa eficiência energética, porém seu acabamento não dispensa a necessidade de usinagem, mesmo que seja minimizada devido a boa precisão geométrica (SILVA,2017).

2.1 SELEÇÃO DO MATERIAL DE ADIÇÃO

O produto prototipado trabalhará em ambiente agressivo a temperaturas próximas aos 850°C, com picos de até 1000°C, onde a abrasividade é um ponto crítico relevante. Sabendo disso, a seleção deverá manter a qualidade do produto já fornecido hoje para que o restante do equipamento não seja prejudicado. Conforme a literatura e análises empíricas, os inoxidáveis tiveram maiores performances comparado aos aços ao carbono, para isso a seleção deve ater-se ao ponto de precipitação de carbonetos de cromo que é uma característica inerente para o bom funcionamento do produto.

Também conhecida como “sensitização” dos aços inoxidáveis austeníticos, a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos dos grãos, ocorre quando o material é aquecido por um período de tempo na faixa de temperatura de 400 °C a 815°C, deixando o material exposto à corrosão intergranular. Na Fig. 1 (a), (b) e (c), mostram as matrizes de carbono (C), cromo (Cr) e carbonetos de cromo ($Cr_{23}C_6$), respectivamente.

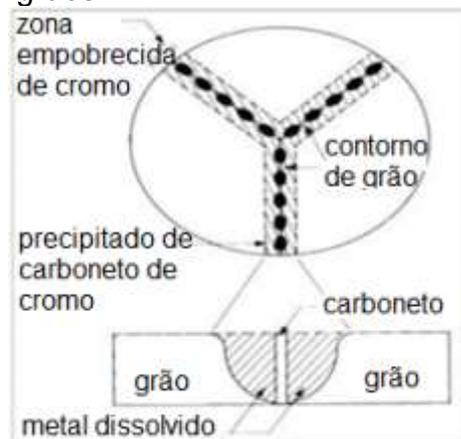
Figura 1: Cinética da sensitização.



Fonte: Adaptado de Sales (2005)

A região fica empobrecida de cromo e facilita a formação dos óxidos como mostra a Fig. 2. A formação desses carbonetos ($Cr_{23}C_6$) pode ser prejudicial ao desempenho do aço inoxidável, pois eles têm uma estrutura cristalina diferente da do material de base, o que pode levar a diminuição da resistência à corrosão e da resistência mecânica do material (STEIGERWALD, 1977).

Figura 2: Concentração de Cr e a corrosão no contorno de grãos.



Fonte: Adaptado de Sales (2005)

O material mais comum para essa aplicação e que é amplamente utilizado em fornos de alto tempera (aplicação com condições semelhantes) é o inox refratário AISI 310, isso se dá porque sua composição química contém cerca de 25% de cromo e 20% de níquel, além de pequenas quantidades de outros elementos como molibdênio e silício. O cromo aumenta a resistência à oxidação e à corrosão em altas temperaturas, enquanto o níquel aumenta a estabilidade de austenita. O AISI 310 também apresenta alta resistência mecânica e à fadiga térmica, isso significa que resistirá melhor aos ciclos de variações térmicas bruscas (STEIGERWALD, 1977).

Nesse sentido, o arame que atenderá as condições requisitadas para esse regime de trabalho será o AWS ER 310. AWS indica que o código de classificação é definido pela American Welding Society. ER indica que o consumível é arame de solda e 310 é a classificação do metal, no caso um inoxidável da série 310. Não é aconselhado utilizar arames com revestimento, pois o objetivo do revestimento é proteger o metal de solda contra a contaminação do ar e outros gases, prevenindo a



oxidação do metal de solda durante o processo. Também auxilia a estabilizar o arco elétrico e melhorar a transferência de metal. Nesse ponto, ele cria uma escória que impede que seja adicionada uma nova camada sobre a primeira sem que seja tratada a superfície (MASTELA, 2004). Entendendo isso, pode-se deduzir automaticamente que o ambiente para MA deve ser melhor controlado para mitigar os defeitos de solda e manter a qualidade dos cordões.

2.2 SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO DE SOLDA

Alguns cuidados para a seleção da máquina de solda são necessários para poder extrair o maior potencial do equipamento e do processo de soldagem. O primeiro ponto de atenção é quanto a potência específica, essa por sua vez deve ser calculada pela equação (1) e deve ficar entre cerca de 10^6 e 10^{13} W/m² (MODENESI, 2001).

$$P_{\text{esp}} = \frac{\eta \cdot E}{t \cdot A_o} \quad (1)$$

Onde:

P_{Esp} = Potência específica de uma fonte de energia.

η = Rendimento térmico da fonte.

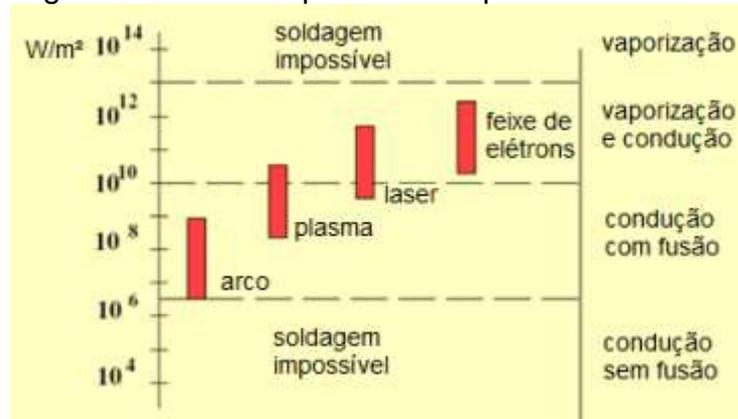
E = Quantidade de energia gerada pela fonte.

t = Tempo de operação.

A_o = Área de contato.

Esse parâmetro é importante pois afeta diretamente a penetração e qualidade da solda. Uma potência específica muito alta resulta em maior fusão e penetração e o inverso fusão e penetração insuficiente. A Fig. 3 demonstra o nível de potência ideal para cada método.

Figura 3: Escala de potências específicas.



Fonte: Adaptado de Marques, P. V. (2007)

O ciclo de trabalho é outro ponto importante para a MA, haja visto que dependendo do tipo de geometria, o tempo de operação é extenso e a fonte deverá atender sem desarmar. A equação (2) que determina o ciclo de trabalho é expressa como:

$$Ct = \frac{t_{\text{arco}}}{t_{\text{teste}}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

Ct = Ciclo de trabalho (%).

t_{arco} = Tempo em operação.

t_{teste} = Tempo de teste, normalmente 10 min dependendo da norma aplicada.

Nesse caso, utilizando os dados técnicos, o ciclo de trabalho (Ct) correspondente à corrente selecionada, vai determinar o tempo de arco aberto que a máquina suporta. Na Fig. 4 mostra um exemplo do fator de trabalho correspondente à corrente.

Figura 4: Exemplo de características de fonte.

	DADOS TÉCNICOS	TIG 200P AC/DC PULS.
	Peso (kg)	26,6
	Faixa de regulagem (Apm)	10 a 200
	Fator de trabalho (Apm)	200Amp. a 60% 155Amp. a 100%
	Eletrodo utilizado	1,60mm a 3,25mm
	Dimensões	493 x 330 x 320
	Tensão de alimentação	(V,HZ):220V (+/-15%), 50/60 Hz
	Fator de potência	0,93

Fonte: Catálogo Hylong. (2016)

2.3 CÁLCULO DE CUSTO EM SOLDAGEM

Segundo Modenesi (2001), para poder avaliar a viabilidade financeira do processo de MA comparado ao atual processo fundido, será necessário determinar o custo de soldagem através das etapas a seguir:

Custo do material de adição, equação (3):

$$C_e = \frac{m_s}{\varphi} \cdot C_{eU} \quad (3)$$

Onde:

- C_e = Custo do material de adição.
- $m_s = A_s \cdot L \cdot \rho \rightarrow$ Massa do metal.
- A_s = Área transversal do cordão.
- L = Comprimento
- ρ = Densidade do material.
- φ = Eficiência prática do processo.
- C_{eU} = Preço por kg do arame/eletrodo.

A Qd. 1 correlaciona a eficiência do processo, para equação anterior, com



o tipo de material de adição:

Quadro 1: Tabela de processo.

Processo		ϕ (%)
Eletrodos Revestidos:		
Comprimento:	350mm	55-65
	450mm	60-70
Arames:		
	SAW	95-100
	ESW	95-100
	GMAW	90-95
Arames tubulares:		
	FCAW	80-85

Fonte: Adaptado de Marques, P. V. (2007)

Custo do gás de proteção (C_g), equação (4):

$$C_g = V_g \cdot t_{arc} \cdot C_{GU} \quad (4)$$

Onde:

C_g = Custo do gás de proteção.

V_g = Vazão do gás.

t_{arc} = Tempo de operação.

C_{GU} = Custo por volume de gás.

Custo de mão de obra e custos fixos (CI), equação (5):

$$CI = \frac{t_{arc}}{\phi} \cdot (L + O) \quad (5)$$

Onde:

CI = Custo de mão de obra e custos fixos.

t_{arc} = Tempo de operação.

ϕ = Modo de operação.

L = Custo por unidade de tempo com mão de obra.

O = Custo com gastos fixos.

A Qd. 2 correlaciona a eficiência da operação para equação anterior. É visto que para processos automáticos, que é o caso da MA seria de 50 a 100%:



Quadro 2: Tabela de operação.

Modo de operação	ϕ (%)
Manual	05-30
Semi-automático	10-60
Mecanizado	40-90
Automático	50-100

Fonte: Adaptado de Marques, P. V. (2007)

Custo energia elétrica (C_{el}), equação (6):

$$C_{el} = \frac{P \cdot t_{arc}}{\varphi_{el}} \cdot (C_{elU}) \quad (6)$$

Onde:

C_{el} = Custo energia elétrica.

P = Potência elétrica média (kW).

t_{arc} = Tempo de operação.

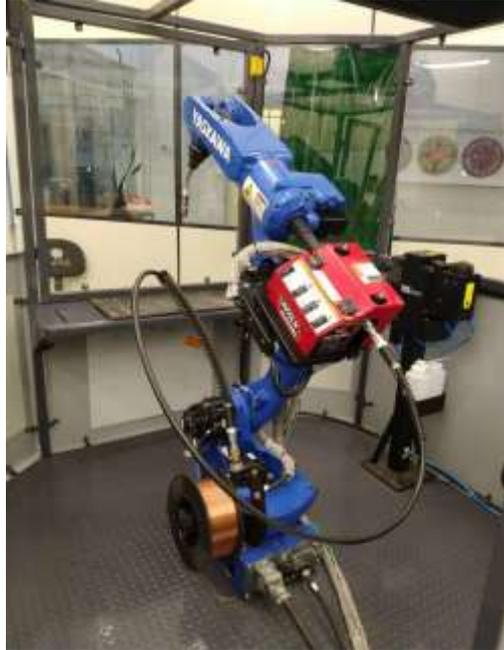
φ_{el} = Eficiência elétrica do equipamento.

C_{elU} = Preço da energia elétrica ($\frac{R\$}{kWh}$).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O equipamento utilizado para geração deste trabalho foi um robô de solda arco AR1440 na marca YASKAWA, com seis eixos e com capacidade de carga de 12kg, instalado no laboratório de manufatura aditiva no campus da SATC, Fig. 5. Ele utiliza de linguagem de programação C, sendo que o programa foi gerado no próprio Teach Pendant Dx200 (painel de recursos).

Figura 5: Robô marca YASKAWA.

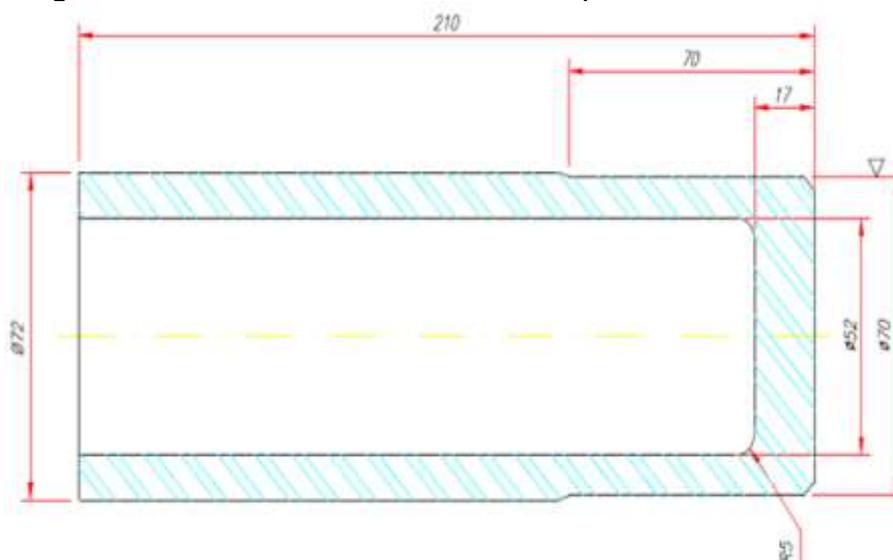


Fonte: Do autor (2023)

3.1 DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA DIMENSIONAL

A primeira etapa do trabalho foi arbitrar uma geometria com sobremetal suficiente para caracterização do dimensional com menor desperdício de material possível. A Fig. 6 elucida a geometria final desejada.

Figura 6: Tubo industrial de alto desempenho.



Fonte: Do autor (2023)



Para entendimento do processo, foi acrescentado nos diâmetros e na altura a tolerância de 5 mm. Nesse primeiro momento foi optado por gerar a peça com aço ao carbono para reduzir os custos, utilizando um arame tubular E71T-1 para o protótipo, sem a preocupação de performance nessa condição.

3.2 MÉTODOS PARA DEFINIÇÕES DE PARÂMETROS DE MÁQUINA

Para começar os testes com o robô, o objetivo primário foi procurar na literatura algo que equacionasse a configuração ideal da máquina, que pudesse nortear a parametrização de velocidade, deposição de material, vazão de gás de proteção e dar um setup inicial baseado no metal de base, porém por se tratar de algo novo não foi encontrado estudos direcionados a WAAM, sendo assim a otimização precisou ser de forma empírica. Para chegar na melhor performance do equipamento e poder marcar o melhor tempo e custo, a maneira encontrada foi gerar corpos de prova e ir validando a qualidade através de metalografia conforme acrescentado os parâmetros de velocidades de deposição, até chegar na condição de equilíbrio, qualidade versus velocidade.

Três amostras foram geradas, variando a configuração de velocidade de arame da máquina. Os parâmetros de vazão de gás, velocidade de avanço e tensão foram mantidos, Tab. 1.

Tabela 1: Parâmetros do robô para ensaio metalográfico.

Amostra	Tensão	Velocidade Avanço	Velocidade Arame	Vazão
1	20V	4 mm/s	50"/min	15 l/min
2	20V	4 mm/s	55"/min	15 l/min
3	20V	4 mm/s	60"/min	15 l/min

Fonte: Do autor (2023)

3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A metalografia é dividida em quatro etapas: preparação da amostra; lixamento e polimento; ataque químico e microscopia. Com essa análise é possível entender a relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, térmicas e



químicas dos materiais metálicos. Com o auxílio do equipamento microscópio Olympus BX51M, foram feitos os ensaios metalográficos para encontrar o ponto ótimo dos parâmetros de máquina, seguindo a norma ABNT NBR 15454. O objetivo principal com esse processo foi classificar qual das configurações atendiam a melhor condição de soldagem, identificando o comportamento microestrutural, bem como possíveis defeitos que possam influenciar nas propriedades mecânicas e no desempenho do material. Foi utilizado um ataque eletroquímico para revelar a estrutura, usando o reagente Villela e polarizando a amostra com uma tensão de 12 v e uma corrente de 1 A por um tempo de ataque de 10 minutos.

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza Vickers é um método não destrutivo que avalia a deformação causada por um indentador de diamante no formato de pirâmide com ângulo entre as faces de 136°. Com essa análise é possível calcular a dureza do material, ou seja, a capacidade dele de resistir a uma força sem deformação permanente, riscos ou marcações. O equipamento utilizado foi um durômetro modelo Shimadzu Corporation HVM-2TADW DM, observando a norma ISO 6507 para os ensaios. Para esse ensaio, foi aplicada uma força de 19,614N (HV 2) com um espaçamento entre as indentações de 2 mm, mantendo essa força por um período de 10 segundos, gerando 15 resultados no decorrer do comprimento da amostra.

3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIDIRECIONAL

Com esse ensaio é possível comparar as propriedades mecânicas entre os processos de manufatura. Foram gerados corpos de prova para ensaio de tração conforme a norma ASTM E 8M. Para esse ensaio, construiu-se uma cortina de solda com as dimensões 160 mm de largura e 220 mm de comprimento, conforme a Fig. 7. Essa cortina foi usinada em ambos os lados e retificada até ficar com 4 mm de espessura, mantendo o paralelismo entre as faces.

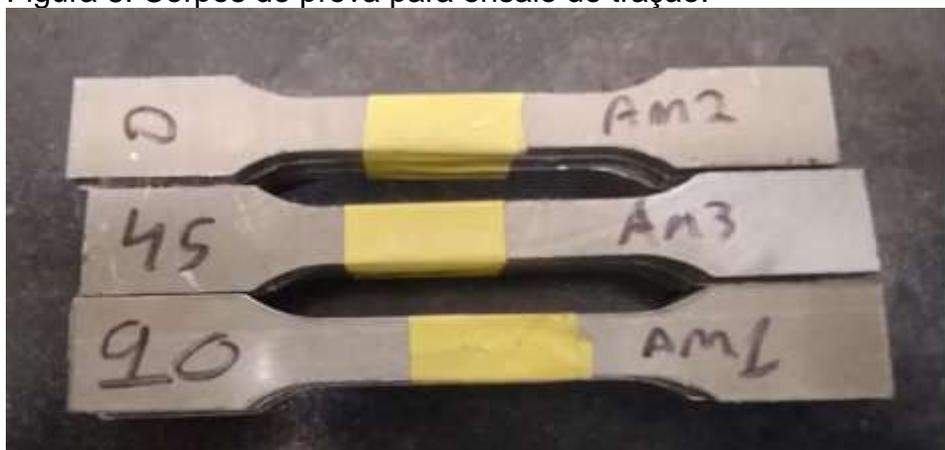
Figura 7: Amostra para retirada dos corpos de prova.



Fonte: Do autor (2023)

Amostras foram retiradas nas três direções, horizontal, vertical e oblíquo. Sendo horizontal, no mesmo sentido da solda, oblíquo, na diagonal da cortina e vertical, perpendicular ao sentido da solda. Essas amostras foram confeccionadas pelo processo de usinagem em uma máquina CNC, modelo Nantong SKX 1500, para não afetar termicamente as zonas adjacentes ao corte, influenciando nos resultados. Na Fig. 8, mostra os corpos prontos para o teste de tração no equipamento Emic DL-10000.

Figura 8: Corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2023)



3.6 INSUMOS UTILIZADOS

Após as análises dos ensaios de metalografia, tração unidirecional e microdureza concluídas, iniciou-se a impressão do tubo de alto desempenho com o arame AWS ER 310 com diâmetro de 1 mm. Esse tem como composição química os valores apresentados na Tab. 2. Sua liga apresenta uma boa resistência térmica, podendo chegar até 1200°C e sofrer choques térmicos sem grandes prejuízos ao material. Possui uma resistência a tração de 550 MPa e alongamento de 30%. O gás de proteção indicado para execução da solda com esse arame permite as seguintes proporções: 96% Argônio + 4% CO₂, 98% Argônio + 2% CO₂, 98% Argônio + 2% O₂.

Tabela 2: Composição química AWS ER 310

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0,08 - 0,15
Cromo (Cr)	25,0-28,0
Níquel (Ni)	20,0-22,5
Molibdênio (Mo)	0,75 Max.
Manganês (Mn)	1,0-2,5
Silício (Si)	0,30-0,65
Fósforo (P)	0,03 Max.
Enxofre (S)	0,03 Max.
Cobre (Cu)	0,75 Max.

Fonte: adaptado de Weld-inox (2023)

3.7 PROCEDIMENTO

A principal dificuldade encontrada foi fazer o topo de fechamento do tubo, pelo fato de a máquina não dispor de um sétimo eixo, que faria o papel de movimentar a peça, deixando assim a tocha de solda na posição correta. Nessa condição, adotou-se a estratégia de soldagem partindo de um metal de base composto pela mesma classificação, com espessura de 12,7 mm e gerando a peça de ponta cabeça, ou seja, iniciando pelo fechamento como na Fig. 9. Com o topo finalizado e base de suporte para a parede, por meio de soldas circulares somadas em três cordões por camada, foi formada a parede (corpo do tubo).

Figura 9: Procedimento de impressão.



Fonte: Do autor (2023)

3.8 USINABILIDADE

Após a finalização da impressão, a peça foi submetida ao processo de usinagem em um torno convencional, modelo Romi HBX, no intuito de validar a usinabilidade da peça e verificar possíveis defeitos de falta de fusão de solda, Fig. 10. Foi retirado 0,5 mm em cada passe, até que a superfície estivesse isenta de defeitos ou até chegar na medida final.

Figura 10: Usinabilidade.



Fonte: Do autor (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência serão tratados os resultados alcançados no decorrer desse trabalho e para facilitar a compreensão desses, eles estarão divididos em duas etapas, a primeira se tratando de uma viabilidade técnica e a segunda para uma viabilidade financeira. É importante ressaltar que o processo de manufatura aditiva é uma técnica nova que está sendo constantemente aperfeiçoada e que dispõe de uma gama enorme de aplicações.

4.1 MODELAGEM E PROGRAMAÇÃO DO TUBO

Com o sobremetal de 5 mm definido, o operador fez a programação da máquina executando três cordões de solda e conferindo as medidas de diâmetro até que ficasse dentro do esperado. O número de cordões se tornou necessário para atingir a espessura da parede do projeto do tubo. A cada três cordões de solda na mesma camada de modo colateral, acrescentou-se 1 mm na altura como avanço e repetiu-se o processo até chegar na altura total de 215 mm. A Fig. 11 foi a primeira peça gerada por WAAM e em questões de acabamento e dimensionais, apresentou bons resultados.

Figura 11: Primeiro protótipo, fabricado em aço de baixa liga (arame eletrodo E71-T1).



Fonte: Do autor (2023)

O valor indicado como sobremetal foi o suficiente, sendo que após o processo de usinagem a peça apresentou pequenas falhas desprezíveis para aplicação desse componente (Fig. 12). Essa falha foi gerada devido as configurações nos parâmetros de entrada da máquina, podendo ser eliminada mudando a estratégia de soldagem.

Figura 12: Falha na peça.



Fonte: Do autor (2023)

4.2 ENSAIO METALOGRAFICO

Com as medidas de projeto garantidas através do processo de usinagem e após a aprovação do protótipo, a próxima etapa foi buscar a performance com o material correto, podendo então levantar os dados para o estudo de viabilidade financeira.

Os resultados da metalografia apresentaram configurações semelhantes entre as amostras. Porém visualmente a amostra 1, com deposição de 50"/min, teve melhor aspecto comparada às outras. Através da Fig. 13 de ampliação de 1000 vezes, nota-se que o consumível AWS ER 310 apresentou a ausência da fase sigma (σ), que é composta pela combinação de ferro e cromo. Isso se dá pelo fato de a sua cinética de precipitação ser lenta dificultando a nucleação, tendo a necessidade de empobrecimento prévio da matriz nestes elementos. Confirmou-se a existência da

fase cromato de níquel (NiCrO_4), além das fases cromita e austenita já presentes na microestrutura.

Figura 13: Amostra 1 - Metalografia (ampliação 1000x).

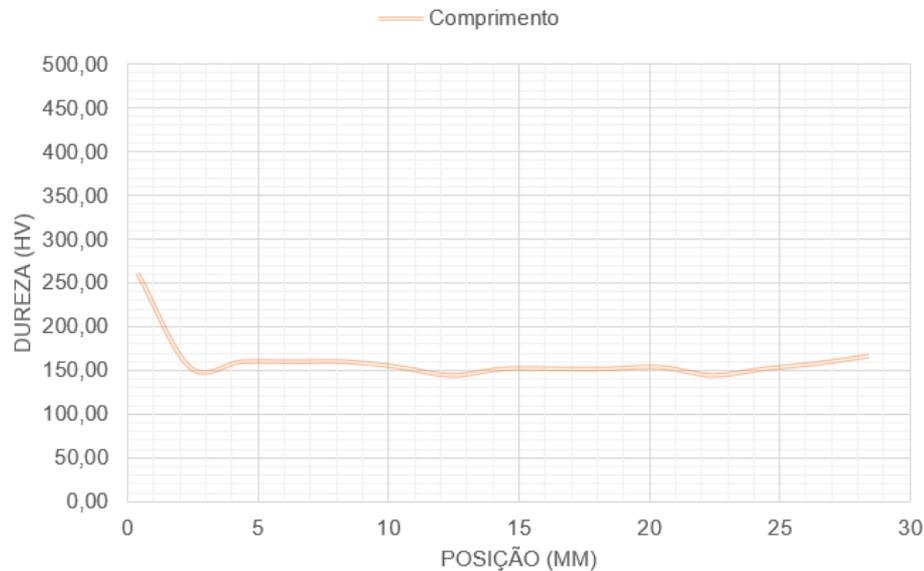


Fonte: Do autor (2023)

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Através da microdureza ficou constatado uma homogeneização aparente entre as indentações gerando uma dureza média de 162 HV conforme o gráfico da Fig. 14.

Figura 14: Gráfico microdureza
Ensaio Microdureza Vickers



Fonte: Do autor (2023)

Comparando com a Tab. 3 de propriedades mecânicas de um aço laminado, o valor ficou enquadrado na tolerância, mesmo que os processos sejam diferentes.

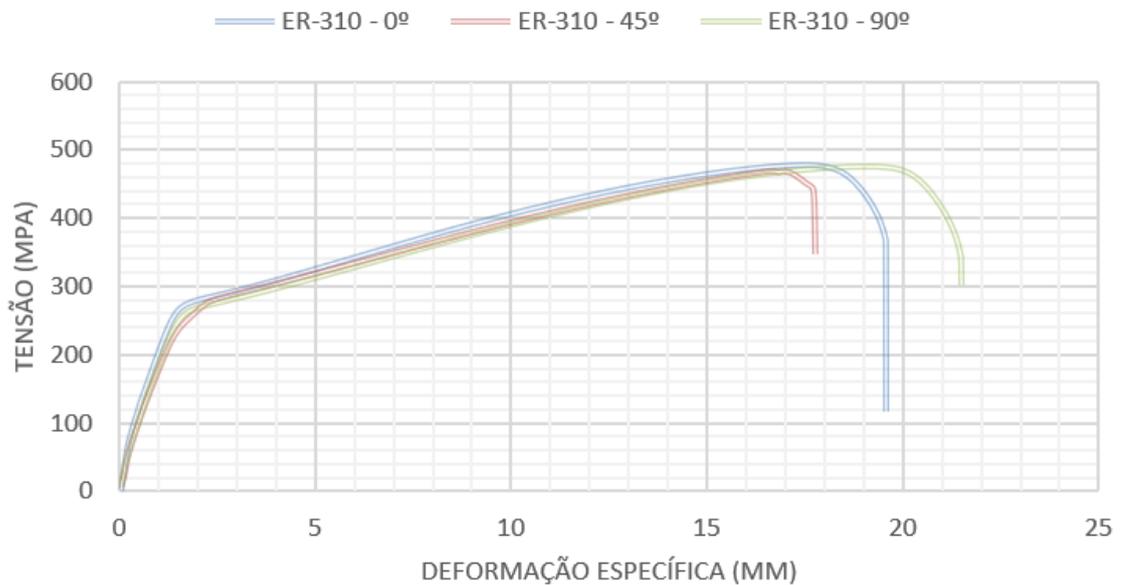
Tabela 3: Propriedades mecânicas aço laminado AISI 310.

Medida	Módulo de elasticidade	Tensão de escoamento	Tensão máxima	Alongamento	Dureza	
Unidade	GPa	MPa	MPa	% strain	HV	HB
Mín.	196	205	500	30	160	185
Máx.	204	310	620	47	225	207

Fonte: adaptado de Dustre (2023)

Com o teste de tração identificou-se que o material apresenta uma boa tenacidade exibindo uma deformação média aproximada de 19 mm. Para tensão máxima a média para as 9 amostras foi de aproximadamente 470MPa, ficando um pouco abaixo do valor mínimo da Tab. 3, porém um resultado satisfatório para aplicação. Na Fig. 15, através das comparações entre as amostras dos três sentidos, 0°, 45° e 90° do sentido da solda, demonstra a uniformidade mecânica do processo.

Figura 15: Gráfico ensaio tração



Fonte: Do autor (2023)

4.4 USINABILIDADE

O processo de usinagem exigiu um pouco mais de cuidado na parte interna do tubo, pois como a ferramenta era longa, conseqüentemente o grau de liberdade era maior no ponto de contato e acabava vibrando e sofrendo mais com os impactos da superfície desigual. Para eliminar isso, foi feita uma preparação de entrada de broca e utilizado uma broca $\varnothing 45$ mm que manteve a estabilidade de corte. O restante da peça foi usinada com pastilha e teve um comportamento semelhante a um tubo de usina de mesma classificação. O acabamento foi satisfatório, não apresentando nenhuma falha superficial. Na Fig. 16 mostra a peça acabada com seu dimensional final.

Figura 16: Peça acabada



Fonte: Do autor (2023)

4.5 ANÁLISE FINANCEIRA

De acordo com os estudos, os valores levantados estão levando em consideração a morosidade do ineditismo, sendo que poderá haver reduções consideráveis na equalização do processo após a repetibilidade. Utilizando as equações 3, 4, 5 e 6 os resultados foram $C_e = R\$1.430,00$ (Custo do material), $C_g = R\$180,00$ (Custo do gás), $C_{MOS} = R\$650,00$ (Custo soldagem) e $C_{MOU} = R\$260,00$ (Custo usinagem), totalizando R\$2.520,00 para execução completa do tubo de alta performance.

O mesmo tubo gerado pelo processo de fundição tem um custo por peça de R\$350,00, (valores médios praticados na região sul de Santa Catarina no período



de execução da pesquisa), isso se dá pelo fato de que a compra é feita em lotes aproximados de 500 unidades devido ao extenso prazo de entrega.

5 CONCLUSÃO

Em suma, as descobertas desse estudo destacam uma viabilidade técnica positiva, apresentando características mecânicas e uniformidade estrutural similar ao material de usina. Seu custo comparado a mesma peça fundida ficou aproximadamente 7 vezes maior, o que inviabiliza financeiramente essa aplicação específica. Porém, deve-se analisar que o custo do material fundido, apontado aqui, é uma média para fabricação em lote, sendo que o valor para uma unidade reduziria a diferença consideravelmente, ou caso a empresa não dispor de um modelo, a soma aproximada de R\$1800,00 para construção dele, elevaria automaticamente para uma análise mais equilibrada.

Reunindo os resultados obtidos, torna-se evidente que é factível, através da manufatura aditiva, construir peças de responsabilidade de cunho estrutural, sendo uma alternativa atraente principalmente para aplicações pontuais. Considerando o cenário atual da indústria, as implicações destes achados são significativas, especialmente no contexto das geometrias personalizáveis geradas pela WAAM.

Outro ponto positivo é a disponibilidade de insumos diversificados, melhorando a assertividade para algumas solicitações, o que não é tão comum para ligas fundidas. Essa técnica está sendo constantemente atualizada e uma gama de novos consumíveis apropriados para essa metodologia estão surgindo.

Esse estudo contribuiu para a compreensão mais aprofundada das dinâmicas desse método e amplitude de alcance na indústria. Ficando como sugestiva a análise do mesmo processo com compósitos diferentes, buscando performar essa aplicação com um material mais nobre na região de maior exposição e outro na região de apoio, onde fica mais protegido. Reitero que a análise financeira para essa configuração poderá indicar uma sobreposição ao processo atual, já que o custo da matéria prima correspondeu a 60% do valor total e o custo do arame AWS ER-310 é 19 vezes superior ao de um arame de aço ao carbono comum.



REFERÊNCIAS

- [1] ARTAZA, T.; ALBERDI, A.; MURUA, M.; GORROTXATEGIA, J.; FRIAS, J.; PUERTAS, G.; MELCHOR, M. A.; MUGICA, D.; SUÁREZ, A. Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine. Elsevier. Pontevedra, v.13, p. 778-785, junho 2017. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917308223> > Acesso em: 01 jun. 2023.
- [2] BELTRÁN, José Hernando Díaz. INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO E DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM MAG DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020. 2019. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/211333/001113947.pdf?sequence=1&is>
. Acesso em: 01 jun. 2023
- [3] CARY, Howard B.. Modern Welding Technology. 1998. , 4ª edição. Disponível em: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>. Acesso em: 15 maio 2023.
- [4] ESAB. Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW). Disponível em: <
https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm >. Acesso em: 15 maio 2023.
- [5] KOU, Sindo. Welding metallurgy. 2.ed Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2003. xiv, 461p. ISBN 9780471434917
- [6] Marques, P. V. et al. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- [7] MASTELA, Leonor da Cunha. PADRONIZAÇÃO E DETALHAMENTO DE LIGAÇÕES METÁLICAS. 2004. Disponível em:
<https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/17482/disserta%C3%A7%C3%A3o%20Leonor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 maio 2023.
- [8] MJV. Arame Inox AWS ER 310 [produto]. MJV Soldas, 2021. Disponível em: <https://www.mjvsoldas.com.br/produto/mjv-arame-inox-aws-er-310>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- [9] MODENESI, Paulo J.. Estimativa de Custos em Soldagem. 2001. Disponível em: https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/custo_em_soldagem.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.
- [10] MODENESI, Paulo J.. Introdução à Física do Arco Elétrico. 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>. Acesso em: 22 maio 2023.



- [11] SILVA, Bruno Filipe Bronze da. Aquisição por Visão Artificial e Medição Automática de Micro Dureza Vickers. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015. Disponível em: <
https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/8020/1/DM_BrunoSilva_2015_MEIM.pdf
Acesso em 01 junho 2023.
- [12] SILVA, Maria Inês Castro e. Study of Deposition Strategies of a Wire + Arc Additive Manufactured Component. 2018. Disponível em:
file:///C:/Users/PCP/Downloads/74180__Dissertacao.pdf. Acesso em: 01 jun. 2023.
- [13] PARANHOS, Ronaldo; SOUZA, Antônio Cordeiro. Soldagem a arco submerso. Rio de Janeiro: FIRJAN/SENAI, 1999. 77p. ISBN 8586363030
- [14] PAREDES, Ramón S. Cortés. AÇOS INOXIDÁVEIS: metalurgia e soldabilidade. METALURGIA E SOLDABILIDADE. 2020. Disponível em:
<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM315/Conte%FAos%20/CURSO%20DE%20A%20C7OS%20INOXID%20C1VEL%20Atualizado.doc.pdf>. Acesso em: 22 maio 2023.
- [15] PIRES, José Carlos Barbosa. Produção de peças com gradiente funcional de Inconel 625/aço inoxidável 316L através de Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). 2019. Disponível em:
https://run.unl.pt/bitstream/10362/94538/1/Pires_2019.pdf. Acesso em: 15 maio 2023.
- [16] Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Título. [Local]: [Editora], [Ano]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/224450>. Acesso em: 15 maio 2023.
- [17] Universidade Federal de Santa Catarina. Título. [Local]: [Editora], [Ano]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/211523>. Acesso em: 22 maio 2023.
- [18] Wikipedia contributors. ([s.d.]). Soldagem MIG/MAG. Wikipedia, The Free Encyclopedia, Disponível em:
https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Soldagem_MIG/MAG&oldid=62494333. Acesso em: 15 maio 2023.
- [19] RIJEZA. Metalografia: o que é e para que é utilizada essa análise. Disponível em: <https://rijeza.com.br/blog/metalografia-o-que-e-e-para-que-e-utilizada-essa-analise/>. Acesso em: 19/11/2023.
- [20] GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. dos. Ensaio dos materiais. Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- [21] HEED-HILL, Robert E. Princípios de metalurgia física. E.ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1982.



[22] SOUZA, Sérgio A. de. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. 5.ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982.

[23] Weldinox. WI-M-310 (ER 310). Disponível em: <https://weldinox.com.br/produtos/wi-m-310-er-310/>. Acesso em: 19/11/2023.

[24] JORNAL A MATÉRIA. Explicando a matéria: Dureza. Jornal A Matéria. Disponível em: <https://www.jornalamateria.ufscar.br/news/explicando-a-materia-dureza>. Acesso em: 19/11/2023.

[25] MALISKA, Ana. Preparação Microestrutural. Apostila. Disponível em: <https://pavanati.com.br/doc/Apostila%20Ana%20Maliska%20-%20Preparacao%20Microestrutural.pdf>. Acesso em: 19/11/2023.

[26] PASSOS, Bruno. Breve resumo sobre a fase sigma. LinkedIn. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/breve-resumo-sobre-fase-sigma-bruno-passos>. Acesso em: 19/11/2023.

[27] AUTOR(ES). Título do Artigo. Nome da Conferência ou Publicação, Local da Conferência, Ano de Publicação, p. xx-xx. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/porosidade-de-kirkendall-em-juntas-soldadas-dissimilares-entre-liga-fe-cr-al-e-aco-inoxidavel-aisi-310-apos-tratamento-isotermico-a-1150oc-ao-ar>. Acesso em: 19/11/2023.

[28] DUSTRE. Inox 310. Dustre - Produtos de Ligas Especiais. Disponível em: <https://dustre.com.br/produtos-ligas-especiais/inox-310/>. Acesso em: 19/11/2023.

[29] CARY, Howard B. Modern Welding Technology. 4. ed. Ilustrada. Universidade de Michigan: Prentice Hall, 1998. 780 p. ISBN 0132418037, 9780132418034. Digitalizado em 6 dez. 2007.

[30] HACKENHAAR, W. Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2016.

[31] SILVA, E. M. (2017). Lean Manufacturing e a Indústria 4.0. Disponível em <https://www.linkedin.com/pulse/lean-manufacturing-e-ind%C3%BAstria-40-edsonmiranda-da-silva>. Acesso: 13 de novembro de 2023.

[32] R. F. STEIGERWALD, H. J DUNDAS, R. D REDMOND, R. M. DAVISON. The physical metallurgy of Fe-Cr-Mo ferritic stainless steels. In:Stainless steel '77, Edited by R. Q. BARR, Climax Molybdenum Company, pp. 57-76, 1978.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.