

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA

LUCCA CASTRO GONÇALVES DE MATEUS

**Influência da rugosidade superficial na molhabilidade de cordões
de solda**

GOIÂNIA
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)s autor(a)(es)(as): LUCCA CASTRO GONCALVES DE MATEUS

Título do trabalho: Influência da Rugosidade Superficial na Molhabilidade de Cordões de Solda

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)s autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 16/08/2023, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucca Castro Goncalves De Mateus, Discente**, em 16/08/2023, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3968318** e o código CRC **5DABB5C9**.

LUCCA CASTRO GONÇALVES DE MATEUS

Influência da rugosidade superficial na molhabilidade de cordões de solda

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza
Coorientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho

GOIÂNIA
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Mateus, Lucca Castro Gonçalves de
Influência da Rugosidade Superficial na Molhabilidade de Cordões de Solda [manuscrito] / Lucca Castro Gonçalves de Mateus. - 2023.
23 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza; co-orientador Dr. Demostenes Ferreira Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui fotografias, gráfico, tabelas.

1. Molhabilidade. 2. Rugosidade superficial. 3. Soldagem. 4. MIG/MAG. 5. Engenharia mecânica. I. Souza, Daniel, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Curso

() Eng Elétrica	(x) Eng Mecânica	() Eng Computação
		PFC 1 () PFC 2 ()

Título do Trabalho

Influência da Rugosidade Superficial na Molhabilidade de Cordões de Solda

Banca Avaliadora

Membro 1	Daniel Souza
Membro 2	Renata Rodrigues Alves
Membro 3	Vitória Ferreira de Oliveira Marques

Discente

Matrícula	Nome
201905723	LUCCA CASTRO GONCALVES DE MATEUS

NOTAS

Matrícula	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Média*
	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	
201905723	8,5	10,0	9,5	9,5	10,0	9,0	9,5	9,5	8,5	9,3

NPT – Nota plano de trabalho;

NTE – Nota do trabalho escrito;

NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORIENTADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.

Aprovado com correções. As considerações da banca foram enviadas via e-mail.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 10/08/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitoria Ferreira De Oliveira Marques, Discente**, em 10/08/2023, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Rodrigues Alves, Usuário Externo**, em 11/08/2023, às 09:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3951447** e o código CRC **DC4DDD0B**.

Influência da Rugosidade Superficial na Molhabilidade de Cordões de Solda

Lucca Castro Gonçalves de Mateus, Demostenes Ferreira Filho, Daniel Souza
 Universidade Federal de Goiás
 luccacdemateus@hotmail.com

Resumo — A molhabilidade em cordões de solda está relacionada à convexidade do cordão e o ângulo de contato com a superfície do material de base. Este é um parâmetro importante de qualidade da solda, visto que cordões com alta convexidade podem gerar concentradores de tensões em peças sujeitas a tensões cíclicas e falta de preenchimento em operações de revestimento. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar se o acabamento superficial do material de base irá influenciar na molhabilidade de cordões de solda sobre chapa de aço-carbono utilizando o processo MIG/MAG. O método utilizado consistiu em gerar diferentes níveis de rugosidade através de processos de usinagem. A rugosidade foi então medida e foram realizados cordões de solda em cada uma das superfícies. Os testes de soldagem foram realizados com dois gases de proteção a fim de verificar se o mesmo comportamento iria ser observado em cada um deles. O critério utilizado foi o da medição do ângulo de contato das bordas do cordão a partir de seções transversais de corte analisadas por macrografias. Os resultados mostraram que não foi possível observar uma mudança perceptível no ângulo de contato em função da rugosidade a partir do método utilizado, que se mostrou limitado para o objetivo proposto.

Palavras-chave — Molhabilidade, Rugosidade Superficial, Soldagem, MIG/MAG

Abstract — Wettability in weld beads is related to the convexity of the bead and the contact angle with the base material surface. This is an important parameter for weld quality since beads with high convexity can create stress concentrators in parts subjected to cyclic stresses and lack of fill in coating operations. Therefore, the objective of this study is to evaluate whether the surface finish of the base material will influence the wettability of weld beads on carbon steel sheet using the MIG/MAG process. The method used involved generating different levels of roughness through machining processes. The roughness was then measured, and weld beads were performed on each of the surfaces. Welding tests were conducted using two shielding gases to verify if the same behavior would be observed for each of them. The criterion used was the measurement of the contact angle of the bead edges from cross-sectional cuts analyzed by macrographs. The results showed that it was not possible to observe a noticeable change in the contact angle as a function of roughness using the method employed, which proved to be limited for the proposed objective.

Keywords — Wettability, Surface Roughness, Welding, MIG/MAG

I. INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos mais comuns e amplamente utilizados na indústria para unir componentes metálicos. A qualidade e a integridade das juntas soldadas desempenham um papel crucial na garantia da segurança e confiabilidade das

estruturas e equipamentos. Dentre os diversos fatores que afetam a qualidade da solda, a molhabilidade dos cordões de solda tem sido objeto de interesse e estudo.

A molhabilidade dos cordões de solda refere-se ao fenômeno em que o metal de adição líquido se espalha e adere em uma camada sobre o metal de base sólido (WELDING TECH, 2019). A forma e a geometria dos cordões de solda são influenciadas pela molhabilidade, principalmente em relação à convexidade do cordão, medida pelo ângulo de contato com a superfície. Em operações de revestimento, uma alta convexidade pode levar a falta de preenchimento entre cordões adjacentes. Cordões com alta convexidade podem criar concentradores de tensão na base do cordão, o que é particularmente prejudicial em condições onde as peças soldadas estão sujeitas a esforços cíclicos e de fadiga (FREAR, KINSMAN e JONES, 1991). Portanto, compreender a influência de variáveis como a rugosidade superficial e a condição de superfície na molhabilidade dos cordões de solda é de extrema importância para garantir a integridade e a vida útil das estruturas soldadas.

O presente trabalho tem como objetivo investigar a relação entre a rugosidade superficial do metal de base e a molhabilidade dos cordões de solda. A rugosidade superficial é uma medida quantitativa das irregularidades presentes na superfície de todos os materiais. Através da realização e análise da geometria de cordões de solda feitos pelo processo MIG/MAG, será possível avaliar como a rugosidade superficial influencia a molhabilidade do cordão de solda para diferentes gases de proteção ao medir o ângulo de contato da seção transversal do cordão com o substrato.

A motivação para a realização deste estudo baseia-se na necessidade de compreender melhor os fatores que afetam a molhabilidade dos cordões de solda, visando melhorar a qualidade de uniões soldadas e garantir a segurança e a confiabilidade das estruturas. Além disso, observa-se uma escassez em estudos a respeito da relação entre esses parâmetros no meio científico da soldagem.

Serão realizadas medições das rugosidades das placas, soldagens utilizando o processo MIG/MAG, preparação das amostras para macrografias e medição da geometria do perfil dos cordões obtidos.

Com base nos resultados obtidos, espera-se que seja possível determinar e parametrizar a influência da rugosidade superficial na molhabilidade dos cordões de solda.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. Molhabilidade

A molhabilidade fisicamente é definida como a habilidade de um líquido permanecer em contato com uma superfície sólida. Esse conceito foi percebido inicialmente em pesquisas científicas por Galileo em 1612, porém a sistematização desse efeito e a relação com o ângulo de contato só ocorreu em 1805 a partir de estudos feitos por Thomas Young (KUBIAK, WILSON, *et al.*, 2011).

Young foi o responsável por relacionar o ângulo de contato (θ) com as tensões superficiais que atuam em uma gota líquida macroscópica e estática em uma superfície lisa e homogênea. As tensões superficiais atuantes no processo são a tensão superficial entre o sólido e o gás (γ_{SG}), a tensão superficial entre o líquido e o gás (γ_{LG}) e a tensão superficial entre o sólido e o líquido (γ_{SL}) (Figura 1).

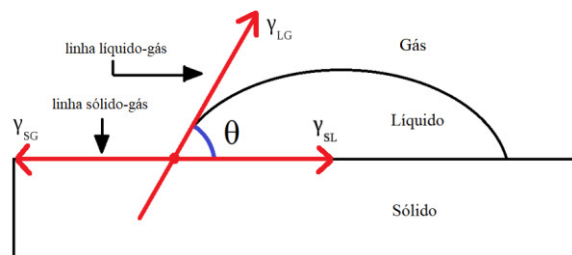


Fig. 1. Ilustração das tensões atuantes de Young. Fonte: Adaptado de (ZANCAN, 2017).

Segundo Zancan (2017), o ângulo de contato é definido, portanto, pelo ponto que se encontram as três fases envolvidas no processo, a partir de uma reta na linha líquido-gás (tangente à base de contato do líquido) e uma reta na linha sólido-gás. Essas retas dividem cada uma das interfaces entre si. Dessa forma, o ângulo de contato é a angulação entre essas retas, medida pela parte de dentro da gota, conforme a Figura 1.

A tensão superficial do líquido é uma energia que tende a minimizar a área da superfície da gota líquida em dada atmosfera. Na ausência das outras tensões, essa tensão irá levar a um formato esférico na gota, que possui a menor área superficial possível (NALAGATLA, 2007).

A molhabilidade será mais alta o quanto menor for o valor deste ângulo. As tensões superficiais atuantes surgem da diferença entre as forças de coesão e adesão presentes entre as moléculas de cada uma das interfaces em contato. Assim, pela equação de Young:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad [1]$$

A partir da equação, é possível fazer as seguintes considerações:

- Quanto maior γ_{SG} : menor o ângulo, maior molhabilidade
- Quanto maior γ_{LG} : maior o ângulo, menor molhabilidade
- Quanto maior γ_{SL} : maior o ângulo, menor molhabilidade

O modelo de Young apresentado é válido apenas para uma superfície lisa e ideal, sem rugosidades. Para superfícies reais, onde há a necessidade de considerar a rugosidade, a dinâmica do processo se altera, e é necessário considerar um novo conceito denominado energia de superfície.

B. Energia de Superfície e Rugosidade Superficial

De acordo com Zancan (2017), quando um líquido está em equilíbrio com sua fase vapor, suas moléculas podem se mover livremente, ocupando uma posição de menor energia potencial. Como as moléculas estão distribuídas de forma igualitária em praticamente todas as direções, as moléculas dentro de um líquido geralmente têm resultante nula da força de coesão.

Ainda de acordo com o autor, devido ao fato de as moléculas da superfície possuírem ligação apenas com moléculas do interior, é provocada uma força resultante não nula dirigida para o interior do líquido sobre as moléculas que estão na superfície do fluido. Como resultado deste fenômeno, a interface líquido-vapor fica sob tensão, denominada tensão superficial do líquido, pois as moléculas da superfície do líquido tendem a ser puxadas em direção ao seu interior (Figura 2).

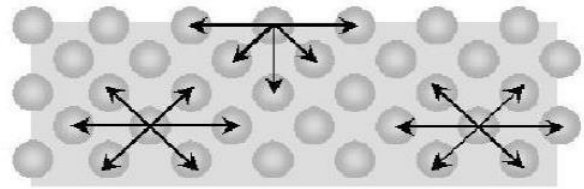


Fig. 2. Ilustração das forças moleculares em um líquido. Fonte: (ZANCAN, 2017).

Assim, a energia de superfície é a quantificação da diferença de energias entre o interior e o exterior. Além disso, “a adesão de um material sobre outro será tanto maior quanto maiores forem as energias de superfície envolvidas” (ZANCAN, 2017).

Dessa forma, a rugosidade superficial acaba influenciando essa situação alterando a área da superfície, o que consequentemente altera a tensão superficial e a resultante de forças: quanto mais área de contato disponível entre o meio líquido e o sólido, maior energia de superfície, maior adesão, maior molhabilidade.

Entretanto, isso não é suficiente para afirmar que alterar a rugosidade superficial irá aumentar ou diminuir a molhabilidade de um depósito. Alguns estudos observam alguma tendência de comportamento conforme o material analisado. Enquanto o modelo de Young não considera a rugosidade, outros dois modelos a abordam de formas diferentes: o modelo de Wenzel e o modelo de Cassie-Baxter.

No modelo de Wenzel (1936), é considerado que o líquido adentra entre as rugosidades do material, ou seja, aumentando a área de contato entre o líquido e o sólido (Figura 3).



Fig. 3. Ilustração de uma gota sobre uma superfície rugosa no modelo de Wenzel. Fonte: (ZANCAN, 2017).

Por conta disso, nesse modelo, um nível de rugosidade superficial maior se traduz em uma ampliação do cosseno do ângulo de contato em relação ao modelo de Young, melhorando

a molhabilidade para ângulo de contato de até 90° e piorando para ângulos acima de 90° .

Já no modelo de Cassie e Baxter (1944), o líquido fica em contato apenas com os picos das rugosidades, enquanto que os espaços entre os picos e os vales ficam preenchidos pelo gás da atmosfera (ZANCAN, 2017) (Figura 4). Dessa forma, a área de contato real considerando a rugosidade é menor que a ideal proposta por Young, o que se traduz em um ângulo de contato maior, oposto ao de Wenzel.

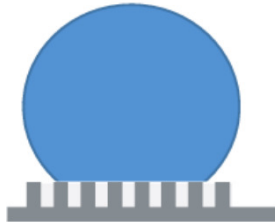


Fig. 4. Ilustração de uma gota sobre uma superfície rugosa no modelo de Cassie-Baxter. Fonte: (ZANCAN, 2017).

Em virtude da pouca quantidade de pesquisas explorando a relação entre esses conceitos e a molhabilidade de cordões de solda depositados por arco elétrico, principalmente no Brasil, o presente trabalho busca observar qual fenômeno será observado em função do aumento da rugosidade: o aumento ou diminuição da molhabilidade.

Os modelos apresentados nesta seção consideram um sistema em equilíbrio, estático, o que não necessariamente ocorre na soldagem, que é um processo dinâmico, com a presença de diversos outros fatores, inclusive transferência de calor e solidificação.

“Outros fatores também influenciam na molhabilidade, como: a natureza das ligações químicas do sólido e do líquido, a adsorção do líquido pelo sólido, reações químicas entre o líquido e o sólido, a heterogeneidade da superfície, o tempo decorrido desde o momento em que a gota do líquido foi depositada sobre a superfície, a atmosfera do ensaio e a temperatura em que estão expostos o líquido e a superfície” (ZANCAN, 2017).

Nas próximas seções será abordado como esse conceito é visto no processo de soldagem.

C. Molhabilidade no Processo MIG/MAG

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção, também conhecida como soldagem MIG/MAG, um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo (FORTES e VAZ, 2005).

O arame fundido se apresenta temporariamente em estado líquido ao entrar em contato com a peça e durante o início da formação da poça de fusão, até que seja resfriado e solidificado para a formação do cordão.

Nesse sentido, surge na soldagem o conceito tradicional de molhabilidade. Entretanto, como mencionado na seção anterior, a dinâmica neste processo possui características únicas, por conta da presença de diversos outros fatores além do previsto no modelo clássico, que serão abordados a seguir.

A transferência de calor e o fluxo de fluido na poça de fusão fundida podem afetar significativamente a geometria da poça e a profundidade de penetração da solda. Isso, por sua vez, influencia os gradientes de temperatura na poça de fusão e o comportamento de solidificação da solda (EASTERLING, 1992). Esses fatores podem afetar a geometria, por exemplo, formando cordões assimétricos e com formato não constante ao longo do cordão, com bastante variação do ângulo de contato tanto na mesma seção quanto entre as diversas seções do cordão (Figura 5).

Em processos de soldagem, além das tensões interfaciais, ocorrem reações intermetálicas entre o substrato e o material de adição, promovendo uma dissolução do material de base, que afeta o escoamento e espalhamento da poça. Essa presença de diversas reações químicas possui um papel importante na dinâmica da molhabilidade em soldagem (NALAGATLA, 2007).

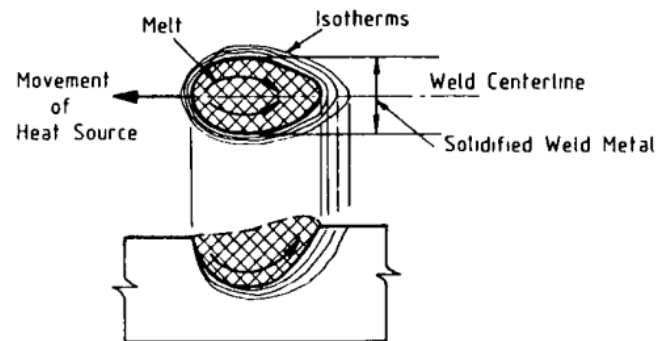


Fig. 5. Ilustração de uma poça de fusão assimétrica devido a efeitos turbulentos. Fonte: (EASTERLING, 1992).

Existem diversos fatores físicos responsáveis por alterar a geometria do cordão ao longo do processo de soldagem relacionadas ao fluxo do fluido, como forças de empuxo devido à diferença de densidade pelo gradiente de temperatura na poça, forças de Lorentz pelo efeito do campo magnético da corrente, gradientes de tensão superficial e efeitos convectivos (KOU, 2003) (Figura 6), que serão alterados pelos mais diversos parâmetros de soldagem.

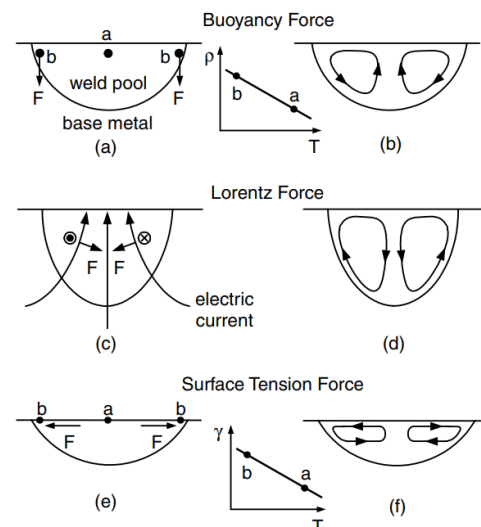


Fig. 6. Fatores causadores de movimento na poça de fusão. Fonte: (KOU, 2003).

Sabendo disso, percebe-se que se torna difícil parametrizar o ângulo de contato em operações de soldagem, tendo em vista a quantidade de fatores influentes. Entretanto, autores como Easterling (1992) ainda utilizam de modelos semelhantes ao de Young para definir o ângulo de contato (Figura 7), porém considerando neste caso o efeito da diluição entre o material de base e o depósito, efeito particular do processo de soldagem a arco elétrico que não ocorre em modelos gerais para meios distintos.

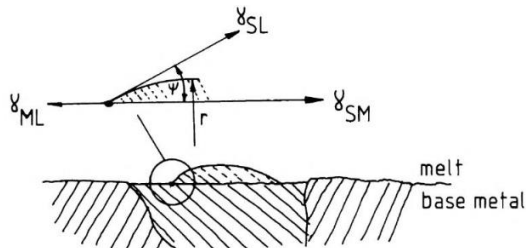


Fig. 7. Energias de superfície na formação da poça de fusão do cordão. Fonte: (EASTERLING, 1992).

Ao considerar que a camada do material de base que está em contato com o depósito fundido também se encontra em estado líquido (o que possibilita a diluição) e que o cordão começa a se solidificar epitaxialmente acima dessa superfície, o autor considera as energias de superfície entre o metal de base-superfície líquida (γ_{ML}), superfície líquida-superfície sólida do cordão (γ_{SL}) e metal de base-superfície sólida do cordão (γ_{SM}).

As mudanças de parâmetros de soldagem vão, portanto, influenciar no balanço entre essas tensões e influenciar na molhabilidade do cordão.

D. Parâmetros de soldagem conhecidos que influenciam na molhabilidade

Zilio et al. (2014) estudaram os efeitos do gás de proteção e do material de adição na molhabilidade de cordões de solda pelo processo MIG/MAG. Foi observado que a compatibilidade química entre o material de adição e o material de base possui forte influência na convexidade do cordão, sendo comprovado neste trabalho pela medida do reforço e largura de cordões de aço inoxidável e liga de níquel, com uma melhor adesão do aço inoxidável em um substrato de aço carbono em relação à liga de níquel.

Segundo Moura et al. (2018), “quanto maior a diferença de composição química entre os materiais de adição e de base pior é a molhabilidade do cordão de solda”. Na Figura 8 é possível observar o efeito da baixa molhabilidade de depósitos de níquel em substrato de aço-carbono em operações de revestimento.

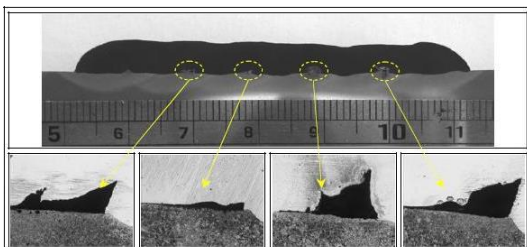


Fig. 8. Falta de preenchimento devido à falta de molhabilidade em operação de revestimento com liga de níquel em substrato de aço-carbono em operações de revestimento. Fonte: (TAVARES, MESQUITA e SOUZA, 2017).

A atmosfera gerada pelo gás de proteção também exerce influência significativa na molhabilidade. Zilio et al. (2014) e Tavares, Mesquita e Souza (2017) mostraram que gases com maior potencial de oxidação, dado pelo teor de CO_2 , resultam em maior molhabilidade em soldagens utilizando arame-eletrodo de aço carbono sempre que se aumenta o teor de CO_2 no gás-mistura.

O gás de proteção influencia a molhabilidade principalmente a partir da temperatura da poça (potencial de ionização e condutividade térmica) e do potencial de oxidação do gás de proteção, que varia conforme sua composição química. A temperatura da poça está associada à quantidade de energia necessária para dissociar e ionizar as moléculas do gás de proteção a fim de formar o arco elétrico na soldagem, fenômeno que transfere posteriormente essa energia para a peça na forma de calor (MOURA, TAVARES, *et al.*, 2018).

Essa transferência de energia térmica vai depender, portanto, da condutividade térmica do gás, que vai regular a taxa de transferência de calor para a solda. Quando a condutividade térmica aumenta, maior tensão de soldagem é necessária para sustentar o arco, o que afeta também a energia total entregue, resultando em uma poça mais quente. O CO_2 possui condutividade maior que o Argônio, o que parcialmente explica o aumento da molhabilidade a partir do aumento de seu teor na mistura de gás (FORTES e VAZ, 2005).

Nesse sentido, velocidades de soldagem mais baixas, aumento da corrente e também da tensão são fatores que tendem a aumentar a molhabilidade pelo efeito da temperatura. Até mesmo as dimensões da chapa a ser soldada podem influenciar. O aumento da espessura da chapa e conseqüentemente uma maior eficiência de refrigeração da poça resultará em cordões mais estreitos (EASTERLING, 1992).

Já o potencial de oxidação do gás afeta a molhabilidade pois altera a tensão superficial da interface entre o metal fundido da poça e o gás. “Gases com baixo potencial de oxidação reduzem a molhabilidade e favorecem a produção de cordões irregulares e convexas” (MOURA, TAVARES, *et al.*, 2018).

Um outro parâmetro importante que afeta diretamente a molhabilidade em cordões de solda é o tecimento. Os estudos de Zilio et al. (2014), Moura et al. (2018) e Tavares, Mesquita e Souza (2017) todos concluíram que o tecimento aumenta a molhabilidade sempre melhora a molhabilidade, independente do arame-eletrodo ou gás utilizado. Esse fenômeno provavelmente ocorre por diversos fatores. Alguns fatores poderiam ser o aumento da temperatura da poça, além de um maior tempo no estado líquido, o que poderia promover um melhor espalhamento do metal antes de solidificar.

Em relação à rugosidade superficial em processos de soldagem, sabe-se atualmente que em processos de brasagem a rugosidade desempenha um papel importante na cinética do espalhamento da poça. Porém, não há consenso no geral em como ela influencia a molhabilidade: alguns autores encontram resultados de melhora na molhabilidade conforme o aumento da rugosidade, pelo efeito de capilaridade em maior quantidade de sulcos na superfície, enquanto outros defendem que as asperidades da superfície agem como barreiras ao movimento do metal fundido, dificultando o espalhamento (NALAGATLA, 2007).

E. Caracterização da rugosidade

Sabe-se a priori pelas seções anteriores que a rugosidade é definida como o nível de irregularidade de determinada superfície. Entretanto, uma definição mais formal, pode ser dada como sendo as micro-irregularidades geométricas deixadas na superfície do material trabalhado decorrentes do processo de fabricação (CARPINETTI, GONÇALVES FILHO, *et al.*, 1996).

Em usinagem, ela consiste basicamente de marcas regulares deixadas pelo perfil da ferramenta combinadas a outras irregularidades, variáveis em função do processo e do material como por exemplo micro-vibrações entre a ponta da ferramenta e peça ou até mesmo deformações térmicas (CARPINETTI, GONÇALVES FILHO, *et al.*, 1996).

No Brasil, a norma que estabelece os parâmetros relacionados a rugosidade é a ISO 4287:2002. Existem diversos parâmetros a fim de caracterizar o estado da superfície das mais diversas formas possíveis, sejam eles parâmetros de altura ou de espaçamento, que configuram o perfil de superfície (Figura 9).

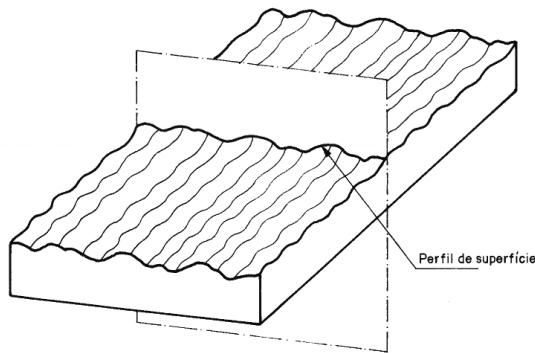


Fig. 9. Ilustração de um perfil de superfície.
Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002).

O principal parâmetro de amplitude de rugosidade média de um perfil é o desvio aritmético médio (R_a) (Figura 10). Esse parâmetro é definido como “a amplitude média do perfil em relação à linha de referência, sobre um comprimento do perfil correspondente à cada comprimento amostral considerado” (CARPINETTI, GONÇALVES FILHO, *et al.*, 1996). Matematicamente ele é dado pela média aritmética dos valores absolutos da ordenada.

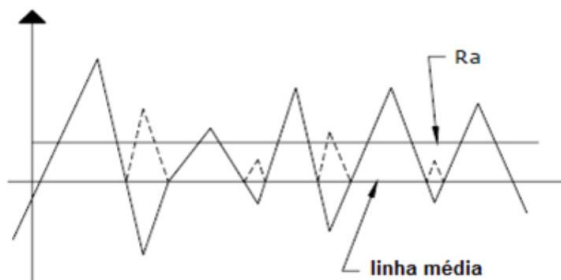


Fig. 10. Ilustração do parâmetro R_a .
Fonte: (MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2023).

Já o principal parâmetro de amplitude de pico e vale é o parâmetro de altura máxima do perfil (R_z). Esse parâmetro é definido como “a soma da altura máxima dos picos do perfil e a maior das profundidades dos vales do perfil” (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). É bastante comum de ser utilizado em conjunto com o parâmetro R_a , já que é capaz de fornecer informações complementares ao parâmetro R_a (que dilui o valor dos picos e vales) (MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2023) (Figura 11).

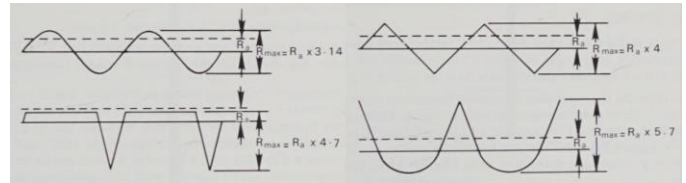


Fig. 11. Perfis de mesmo R_a , porém com formas e R_z diferentes. Fonte: Adaptado de (DAGNALL, 1986).

Embora existam outros parâmetros de caracterização da superfície, como parâmetros de assimetria, espaçamento, achatamento, entre outros, eles não serão considerados neste trabalho, em função de uma tendência de utilização em pesquisas dos parâmetros mencionados acima, mostrando que são suficientes na grande maioria dos casos e também para o presente trabalho.

Leite *et al.* (2020) estudaram a relação entre os parâmetros de rugosidade 3D caracterizada por microscópio eletrônico de varredura (MEV) e a molhabilidade de gota d’água em substrato de titânio. Foi observado neste trabalho que há forte dependência da energia de superfície e também da molhabilidade com os parâmetros R_a e R_z , com o aumento do ângulo de contato de forma não linear conforme o aumento dos parâmetros que caracterizam a rugosidade. Além disso, os autores afirmam que “a maioria dos trabalhos disponíveis na literatura que analisam a influência da rugosidade utiliza convencionalmente somente o valor de R_a ”. Percebe-se, portanto, que o parâmetro R_a é de fato um dos principais marcadores de caracterização da superfície.

Kubiak *et al.* (2011) também estudaram a influência da rugosidade superficial em medições do ângulo de contato a partir da utilização principalmente dos parâmetros R_a e R_z , concluindo que diferentes materiais apresentam comportamento semelhante em função da rugosidade superficial, que apresentou forte influência na molhabilidade de gotas d’água em superfícies usinadas. Os resultados mostraram que existe um valor mínimo do ângulo de contato em rugosidades intermediárias, ou seja, o ângulo é maior em superfícies muito lisas, diminui em rugosidades intermediárias (R_a 0,2 - 0,5 μm) e então aumenta novamente para rugosidades mais altas (R_a acima de 1 μm).

Em processos de brasagem de ligas de chumbo em substrato de cobre, Nalagatla (2007) também utilizou do parâmetro R_a de rugosidade média e parâmetro de distância máxima entre pico e vale para observar o comportamento da molhabilidade de metal fundido em diferentes superfícies. Foi observado uma piora da molhabilidade da liga Sn-Pb conforme o aumento da rugosidade R_a das superfícies de cobre.

Esses e outros estudos mostram compatibilidade no que se refere aos parâmetros de rugosidade utilizados na metodologia deste trabalho, apresentada a seguir. Além disso, mostram que o efeito da molhabilidade de fato depende bastante das propriedades dos materiais, por conta da diferença entre os resultados.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram necessárias diferentes etapas a fim de obter o resultado final de medição dos ângulos de contato do cordão de solda em função da rugosidade superficial de cada condição estudada. A seguir serão detalhadas cada uma das etapas, que vão desde a fabricação e obtenção de diferentes níveis de rugosidade até a posterior medição do ângulo de contato do reforço do cordão com a superfície do metal de base.

A metodologia utilizada neste trabalho foi baseada nos estudos realizados por Moura et al. (2018), Tavares et al. (2017) e também Zilio et al. (2014), mudando basicamente o parâmetro de interesse de estudo. O efeito da influência do gás de proteção, do material de adição e do tecimento já é bem conhecido e validado pelos estudos mencionados. Nesse sentido, utilizou neste trabalho condições de soldagens baseadas nas utilizadas pelos autores mencionados, a fim de estudar um parâmetro ainda não abordado, a rugosidade.

A. Fabricação das placas com diferentes rugosidades

A partir de uma chapa de aço comum ao carbono comercial de 9,5 mm de espessura, foram obtidas quatro placas com dimensões de 300 mm x 250 mm de área. Os cortes foram realizados utilizando uma máquina de corte a plasma modelo Hypertherm – Powermax 105.

Foi feita a definição de 3 métodos diferentes de preparação das placas de teste a serem utilizados em cada uma das chapas para obter diferentes acabamentos superficiais: fresamento, retificação e esmerilhamento. Em uma das chapas não foi feito nenhum processo de usinagem, de forma que não só se mantivesse a rugosidade padrão (como recebido) como também a carepa de oxidação natural do aço (Figura 12). Essa chapa é importante para comparar a partir dos resultados obtidos se vale a pena ou não trabalhar a superfície do material antes de realizar um cordão de solda, além de observar a influência da presença da carepa.



Fig. 12. Chapa de aço na condição como recebida totalmente coberta por carepa. Fonte: Elaboração própria.

No processo de fresamento, foi utilizado um Centro de usinagem ROMI – Modelo D600. O objetivo de utilizar uma máquina com controle numérico computadorizado é principalmente padronizar o processo de corte ao longo de toda a chapa, de forma que ao longo de sua área a rugosidade

superficial seja mantida o mais constante possível. Não só isso, mas também é interessante conhecer os parâmetros de usinagem utilizados, de forma que se possa garantir a repetibilidade do processo de geração de determinada superfície. Buscou-se a partir da regulação dos parâmetros da CNC obter a superfície com a maior quantidade de marcas de avanço possível, com o intuito de obter uma rugosidade superficial bem proeminente. Após a realização dos testes, chegou-se aos parâmetros utilizados: cabeçote fresador de 50 mm, velocidade de rotação de 1250 RPM e avanço de 12000 mm/min. O resultado obtido está presente na Figura 13.



Fig. 13. Chapa de aço após processo de fresamento. Fonte: Elaboração própria.

Para a retificação, foi utilizada uma retífica plana modelo Atlasmaq RPA-800, com rebolo de 355 mm x 30 mm x 127 mm da Dean Abrasive Products Corp. O objetivo do processo de retificação era gerar uma superfície com o menor nível de rugosidade possível entre as condições propostas. Para isso, os parâmetros utilizados foram: profundidade de corte de 0,1 mm por passe e avanço de 0,2 mm por passe. A Figura 14 mostra a superfície obtida.

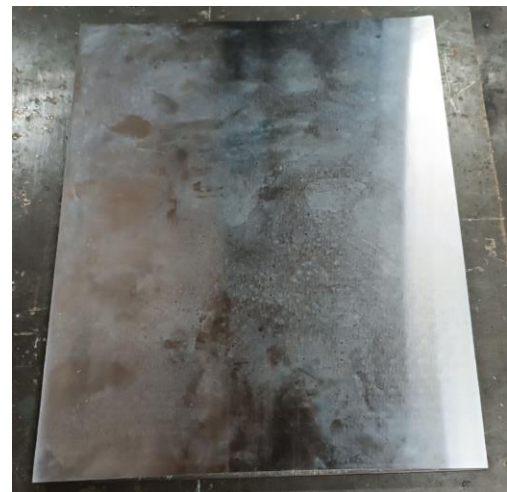


Fig. 14. Chapa de aço após processo de retificação. Fonte: Elaboração própria.

No processo de esmerilhamento, foi usado uma esmerilhadeira modelo Makita GA4534, com diâmetro de disco de 115 mm e 11000 RPM de velocidade nominal. O processo foi dividido em duas etapas. Primeiro foi utilizado um disco de desbaste para retirar a carepa da superfície e depois foi feito o acabamento completo da chapa utilizando um disco abrasivo tipo flap com granulometria 80, modelo FDS115-80FC da Starrett. A primeira etapa foi necessária pois não foi possível retirar a carepa apenas com o disco flap, ou pelo menos não antes de esgotar a vida útil do mesmo. Como esse processo, diferentemente dos anteriores, é de caráter manual pelo operador e não programado numericamente, acabou sendo o único dos três utilizados em que não foi possível obter uma certa regularidade no acabamento da superfície ao longo de toda a chapa, ao menos não visualmente, já que os parâmetros de usinagem não se mantêm constantes ao longo do processo, tais como força de usinagem, velocidade de avanço, entre outros. O resultado é visto na Figura 15.

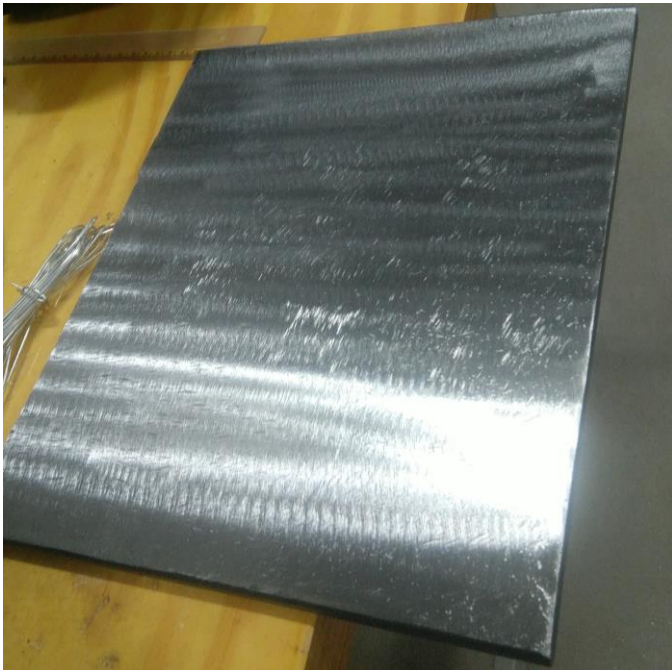


Fig. 15. Chapa de aço após processo de esmerilhamento. Fonte: Elaboração própria.

B. Medição da rugosidade superficial das placas

Para a medição da rugosidade superficial das chapas, foi utilizado um rugosímetro portátil modelo Mitutoyo SJ-210 (Figura 16). O rugosímetro foi previamente calibrado utilizando o padrão de rugosidade que acompanha o próprio aparelho. Feito a calibração de forma correta do instrumento, partiu-se para a definição dos parâmetros desejados de medição no setor de configurações do menu *Measurement Condition*.

Foi utilizada a norma ISO 4287:1997 integrada no próprio instrumento como base para a caracterização do perfil de rugosidade. Além disso, também foi utilizado o perfil R (Roughness Profile) como perfil de avaliação a ser considerado

nas medições. Com isso, definiu-se inicialmente os parâmetros a serem medidos: desvio aritmético médio do perfil (R_a) e altura máxima do perfil (R_z). Os valores de comprimento de amostragem (*cut-off*) definidos no instrumento de medição variaram conforme o grau de rugosidade média R_a obtido na primeira medição de teste, conforme recomendação para perfis aperiódicos (MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2023).

Foram feitas 12 medições de rugosidade em cada uma das chapas, em posições igualmente distribuídas ao longo da superfície, previamente definidas. Todas as medições de rugosidade foram feitas na mesma direção, como exemplificado na Figura 17. Essa direção de medição foi feita na direção das marcas de avanço da ferramenta de cada uma das superfícies usinadas, de forma que se medisse justamente o perfil mais rugoso de cada chapa, a fim de padronizar o nível de rugosidade considerado em cada uma delas. Na Figura 18, isso é exemplificado pela ilustração de letra “A”. Além disso, os cordões de solda terão a direção longitudinal coincidente com essa direção de medição da rugosidade.



Fig. 16. Fotografia exemplificando como foram realizadas as medições de rugosidade com o instrumento. Fonte: Elaboração própria.

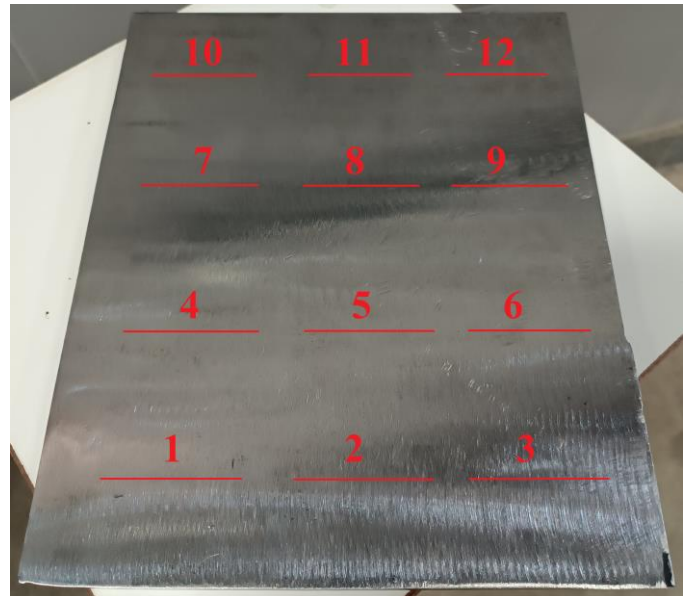


Fig. 17. Ilustração dos pontos de medição da rugosidade das chapas ao longo das marcas de avanço. Fonte: Elaboração própria.

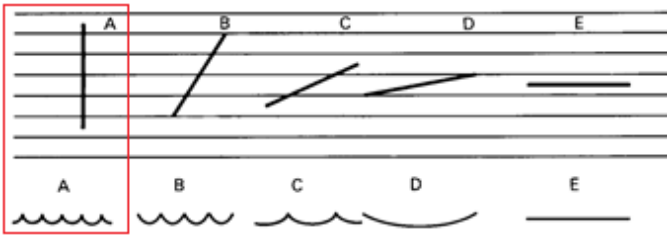


Fig. 18. Efeito da medição em diferentes direções em relação à textura superficial. Fonte: Adaptado de (LEACH, 2001).

C. Realização das soldagens

Para a realização das soldagens, foi utilizada uma Fonte de soldagem multiprocesso - IMC – Modelo Digiplus A7 regulada para operar em modo de soldagem MIG/MAG convencional (Figura 19).



Fig. 19. Fotografia da fonte de soldagem multiprocesso - IMC – Modelo Digiplus A7. Fonte: Elaboração própria.

A tocha foi movimentada por célula robotizada de soldagem, um robô HP-20 Yaskawa Motoman (Figura 20). A movimentação da tocha se deu por meio da programação do trajeto percorrido a partir do controlador do robô, em eixos cartesianos, de forma que o robô apenas se movimentasse na direção do cordão, sem variar a velocidade de soldagem ou a DBCP.



Fig. 20. Fotografia do robô HP-20 Yaskawa Motoman. Fonte: Elaboração

própria.

Durante os testes, foi feita a aquisição dos dados do processo de soldagem de tensão e corrente médias a partir de um sistema de aquisição de dados controlado pelo software LabView 2012, com uma frequência de aquisições de 5 kHz durante um período de 5 segundos após a estabilização do arco elétrico.

Foram feitos cordões sobre chapa, com uma repetição de cada uma das condições de teste. Essas condições foram dadas pela mudança do gás de proteção utilizado. O objetivo de variar o gás é conseguir avaliar se a mudança do gás de proteção irá influenciar na relação rugosidade e molhabilidade. Foram utilizados os gases: 100% Ar e 100% CO₂. O arame-eletrodo utilizado foi o ER70S-6 de aço-carbono comum, com 1,2 mm de diâmetro. A vazão do gás de proteção foi a mesma em todos os testes, de 16 L/min.

A metodologia utilizada foi a de tentar manter a mesma corrente de soldagem ao longo dos testes, mantida em torno de 180 A, com uma variação máxima de 5% deste valor. Para isso foram feitos testes prévios com cada um dos gases para encontrar tanto a tensão necessária quanto a velocidade de alimentação correspondente.

A DBCP foi mantida em 17 mm ao longo de todos os testes. Como a temperatura da superfície é um dos fatores que influenciam na molhabilidade do depósito, pelo efeito do aumento da viscosidade e da diminuição da tensão superficial (NALAGATLA, 2007), foi necessário esperar a chapa resfriar até uma temperatura abaixo de 40 °C a cada cordão feito até ser possível realizar o próximo, e padronizar os experimentos. Para isso, a temperatura foi controlada por meio de um termômetro infravermelho modelo MT-320B da Minipa.

A posição de cada cordão foi marcada nas chapas a uma distância de 30 mm entre si, enquanto a distância de cada cordão até as bordas foi de no mínimo 20 mm para evitar efeitos de borda. Era necessário manter uma distância considerável entre os cordões para que fosse possível cortar entre os cordões com o plasma na preparação das amostras. A exceção foi a chapa fresada, onde os cordões foram posicionados de forma a não ficarem próximos às bordas das marcas de avanço da ferramenta (Figura 21).

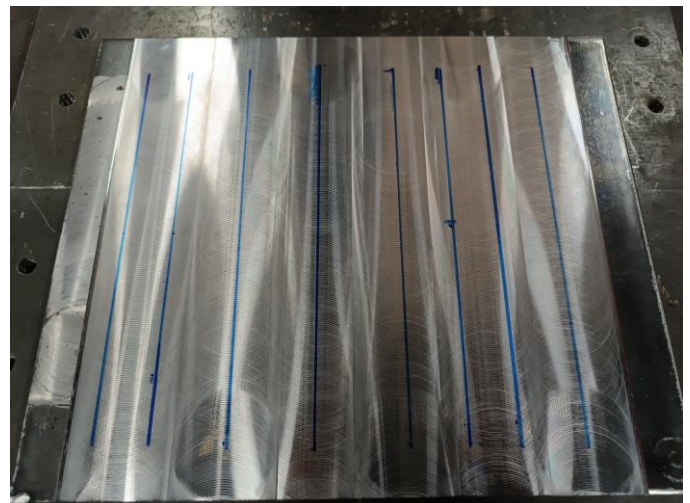


Fig. 21. Exemplo de posições dos cordões ao longo das marcas de avanço. Fonte: Elaboração própria.

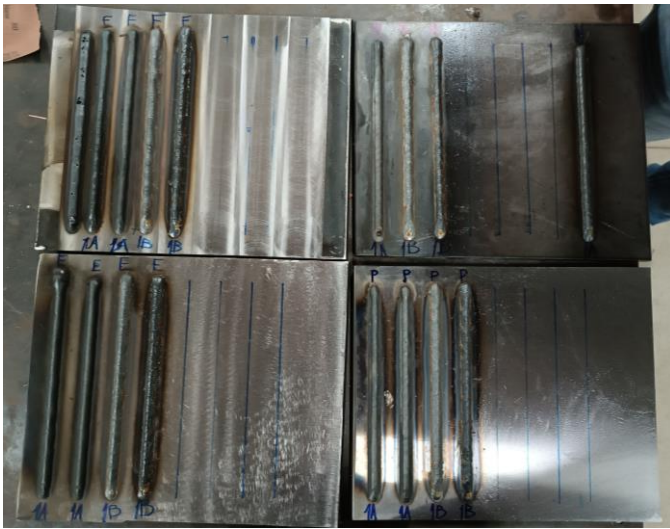


Fig. 22. Resultado da realização dos cordões nas 4 chapas. Fonte: Elaboração própria.

D. Preparação das amostras para macrografia

Para a preparação das amostras, primeiramente foram feitos cortes a plasma entre cada cordão das chapas, separando cada um dos cordões em pequenas partes.

A partir de cada amostra, foi utilizada uma cortadora metalográfica FORTEL Modelo CFIII para se obter cortes perpendiculares ao cordão de solda, de forma a ser possível avaliar a sua seção transversal e, assim, o ângulo de contato do cordão com a superfície. O disco de corte utilizado possui 2 mm de espessura e 12" de diâmetro, da Skill-Tec.

Foram realizados 6 cortes em cada cordão, obtendo, assim, 5 pequenas amostras com duas seções em cada lado (Figura 23). Os cortes foram feitos desconsiderando tanto o início quanto o fim do cordão, que são trechos onde a soldagem e consequentemente a geometria do cordão não é tão estável e regular. Como trechos subsequentes possuem a mesma seção transversal na posição onde ocorreu o corte, no fim em cada conjunto de 5 amostras foi possível obter 6 seções transversais diferentes, 12 no total para cada condição considerando a repetição de cada um. Como 8 condições foram testadas (4 chapas e 2 gases), ao todo foram 96 seções transversais analisadas. Buscou-se realizar o corte na posição em que visualmente o cordão estivesse com uma boa e regular geometria ao longo de seu comprimento.



Fig. 23. Cortes realizados em cada um dos 16 cordões em 6 posições diferentes. Fonte: Elaboração própria.

E. Medição da geometria do perfil dos cordões

Foi utilizado um microscópio modelo ZEISS Stereo Discovery V.8 para realizar a macrografia das seções transversais dos cordões de solda. A captura das imagens foi feita pelo próprio software do microscópio, AxioVision SE64.

Para a medição dos ângulos de contato, foi utilizado o software ImageJ para medir o ângulo entre a base do cordão e a superfície da chapa na imagem obtida pela macrografia, de cada um dos lados do cordão. Dessa forma, obtém-se dois ângulos de contato para cada seção transversal (Figura 24).

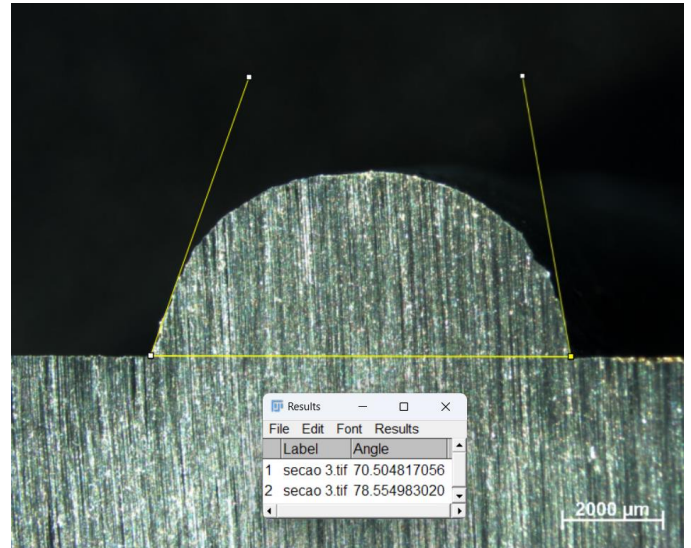


Fig. 24. Ilustração de como foi feito o processo de medição no software ImageJ. Fonte: Elaboração própria.

Devido à irregularidade da geometria do cordão e da dificuldade em medir o ângulo de contato, das 6 seções obtidas foram utilizadas apenas 5 seções, desconsiderando alguma que por ventura tivesse com o formato muito prejudicado para a medição (Figura 25)

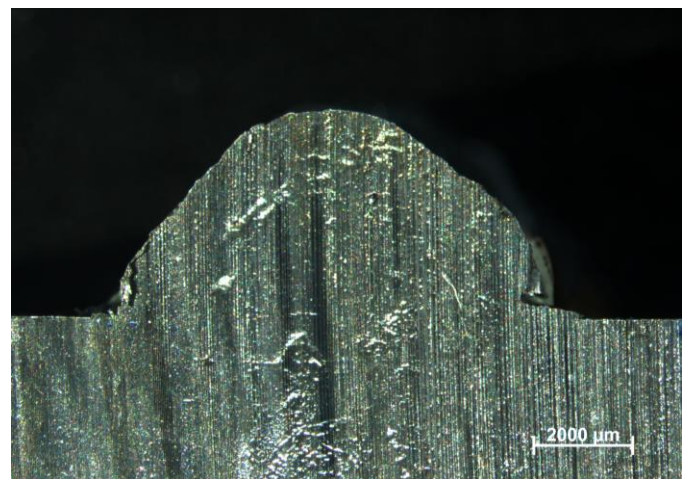


Fig. 25. Exemplo de seção transversal com geometria bastante difícil para a medição do ângulo de contato. Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, no total foram 20 medições de ângulo por condição de soldagem: 2 medições por seção, 5 seções e cada condição com uma repetição, resultando em 160 valores analisados no total.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Medição das rugosidades das chapas

Abaixo estão os valores medidos dos parâmetros Ra e Rz em cada um dos 12 pontos de medição, além da média dos valores de rugosidade em cada uma das superfícies e o desvio padrão das grandezas mensuradas.

TABELA I
TABELA DOS PARÂMETROS MEDIDOS DE RUGOSIDADE

	Como recebida		Retífica		Fresamento		Disco Flap 80	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2.044	13.685	0.026	0.221	1.024	6.383	1.065	8.167
2	1.072	5.585	0.020	0.123	0.784	5.301	1.456	10.551
3	0.553	3.213	0.028	0.197	0.876	6.246	1.362	10.781
4	1.258	7.861	0.029	0.179	0.950	6.087	3.400	24.607
5	0.606	3.936	0.029	0.216	0.987	6.391	3.027	25.462
6	1.228	6.271	0.032	0.247	0.829	6.065	2.180	17.909
7	0.591	2.978	0.037	0.230	1.051	6.204	4.690	27.139
8	0.454	2.958	0.023	0.135	0.948	5.916	2.306	18.324
9	1.609	8.820	0.033	0.205	1.103	6.848	2.283	15.078
10	0.508	3.438	0.044	0.284	1.312	7.843	2.609	16.818
11	0.530	2.897	0.057	0.326	1.141	6.615	2.863	19.485
12	0.482	2.668	0.038	0.247	1.327	7.927	2.834	19.770
Média	0.911	5.359	0.033	0.218	1.028	6.486	2.506	17.841
Desvio Padrão	0.526	3.351	0.010	0.057	0.172	0.756	0.989	6.047
Incerteza %	57.7	62.5	30.5	26.3	16.7	11.7	39.5	33.9

Fonte: Elaboração própria.

A partir do desvio padrão dos valores medidos, é possível perceber que a variação entre os resultados de medição em cada ponto é muito expressiva, de forma que se torna difícil caracterizar toda a rugosidade da superfície a partir desses pontos.

Para a superfície da chapa na condição como recebida, o desvio padrão foi o maior observado, sendo de aproximadamente 60% o valor da média, enquanto que o menor foi para a superfície fresada, com aproximadamente 15% de variação em torno da média.

Entretanto, entre as superfícies feitas com usinagem, não há intersecção entre a faixa de valores expressa pela incerteza de cada medição, como é possível observar nas Figuras 28 e 29. Nesse sentido, torna-se relativamente razoável considerar cada uma dessas 3 chapas diferentes entre si na questão do nível de rugosidade da superfície, de forma que se possa considerá-las como diferentes condições de soldagem para observar a influência da rugosidade em cada um dos cordões.

Há de se atentar ao fato de que, com este método utilizado, não é possível afirmar que todos os cordões da mesma chapa estarão sujeitos ao mesmo nível de rugosidade. Assim, foi feita uma consideração devido às limitações do próprio processo de

caracterização da superfície, que é dificultosa devido à extensão da mesma, do método utilizado e da própria operacionalidade do experimento. O rugosímetro consegue analisar apenas um pequeno trecho a cada medição, de forma que só foi possível caracterizar a superfície realizando a média de diversos pontos, fazendo uma aproximação.

Abaixo estão expressos os gráficos que mostram que cada uma das superfícies está de fato em diferentes faixas de rugosidade, nas Figuras 26 e 27. A superfície fresada e a na condição como recebida se encontram na mesma faixa de rugosidade, o que será interessante para comparação e ver o efeito da presença ou não de oxidação na superfície.

Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade das chapas (Ra) [μm]

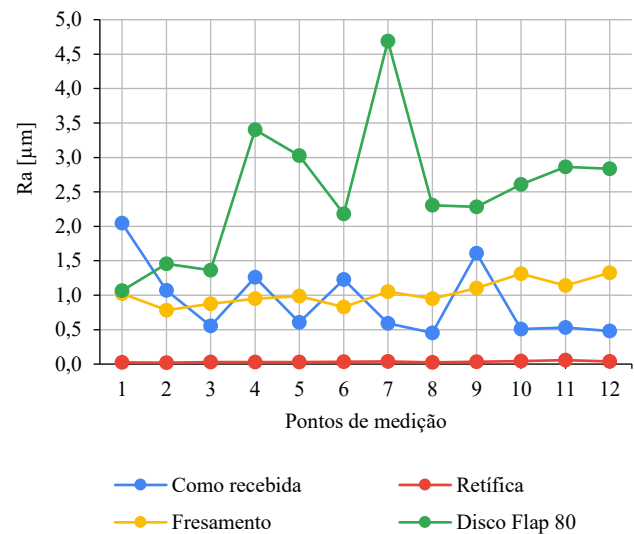


Fig. 26. Gráfico dos valores de medição do parâmetro Ra. Fonte: Elaboração própria.

Altura máxima do perfil de rugosidade das chapas (Rz) [μm]

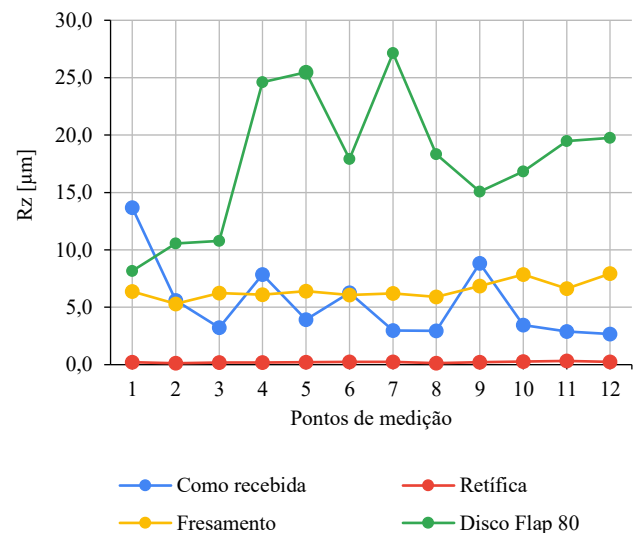


Fig. 27. Gráfico dos valores de medição do parâmetro Rz. Fonte: Elaboração própria.

Média e desvio padrão das medições de Ra

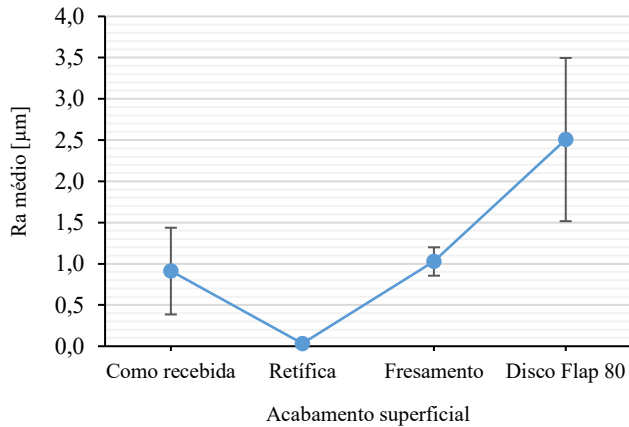


Fig. 28. Gráfico dos valores médios e barras de erro do parâmetro Ra para cada condição de superfície. Fonte: Elaboração própria.

Média e desvio padrão das medições de Rz

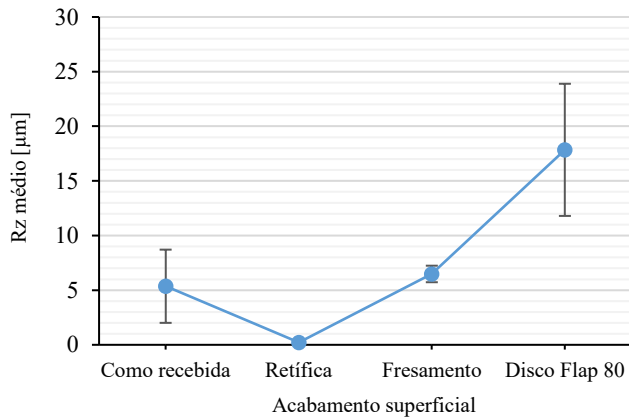


Fig. 29. Gráfico dos valores médios e barras de erro do parâmetro Rz para cada condição de superfície. Fonte: Elaboração própria.

Não houve muita diferença no comportamento do parâmetro de altura máxima (Rz) em relação ao desvio aritmético médio (Ra) entre cada umas das superfícies obtidas neste trabalho, os dois parâmetros variaram de forma bastante semelhante. Entretanto, é preciso considerar que essa situação pode não se aplicar a todas as superfícies ou casos. Dependendo do processo de fabricação utilizado, o parâmetro Rz será necessário para avaliar variações mais sutis, que podem ser úteis e servir como complemento para a caracterização correta da superfície.

B. Parâmetros de soldagem encontrados

Para manter a corrente de soldagem similar ao longo de todo o processo de soldagem em diferentes gases, foi necessário alterar os parâmetros em cada uma das condições. Os valores foram inicialmente testados com base nas configurações utilizadas por Tavares et al. (2017), e alterados conforme os resultados observados até que cordões satisfatórios fossem obtidos.

A Tabela 2 apresenta os valores de tensão e velocidade de alimentação obtidos por meio de testes para alcançar uma corrente de aproximadamente 180 A para cada um dos gases.

TABELA II
PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS

Arame eletrodo	Gás de proteção	Tensão (V)	Velocidade de alimentação (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)	DBCP (mm)
ER70S-6 Aço carbono	100% Ar	23	5,5	25	17
	100% CO ₂	24	6,0		

Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que o gás CO₂ necessitou de fato de valores de tensão e velocidade de alimentação um pouco mais elevados que o argônio para manter a mesma corrente, como explicado na seção de revisão.

O monitoramento da corrente de soldagem média ao longo do processo foi feito a partir da medição utilizando o sistema de aquisição de dados. As Figuras 30 e 31 mostram uma medição típica da corrente de soldagem utilizando gás de proteção 100% Ar e 100% CO₂, respectivamente.

Exemplo de gráfico da corrente de soldagem utilizando gás de proteção 100% Ar

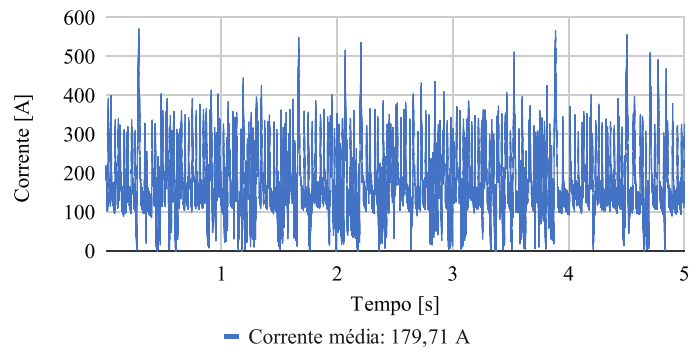
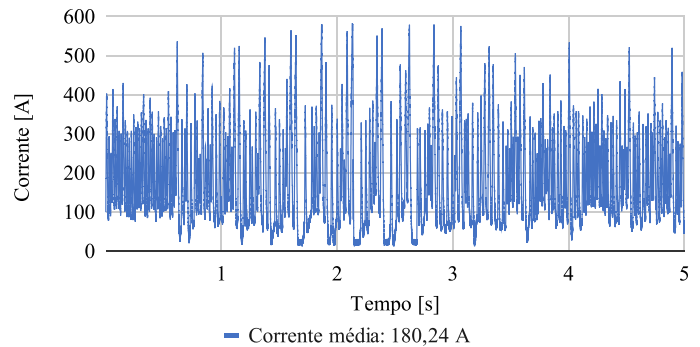


Fig. 30. Gráfico da corrente de soldagem utilizando 100% Ar obtido pelo sistema de aquisição. Fonte: Elaboração própria.

Exemplo de gráfico da corrente de soldagem utilizando gás de proteção 100% CO₂Fig. 31. Gráfico da corrente de soldagem utilizando 100% CO₂ obtido pelo sistema de aquisição. Fonte: Elaboração própria.

O modo de transferência metálica obtido nessas condições de soldagem utilizadas foi o curto-circuito, devido ao formato das curvas de cada um dos gráficos, com picos elevados de corrente, típico deste modo de transferência.

C. Ângulos de contato obtidos

A Tabela 3 sintetiza os valores de ângulo de contato medidos nas amostras analisadas em todas as condições de rugosidade para o gás de proteção 100% Ar, apresentando também a média e o desvio padrão. A Figura 32 ilustra a organização dos dados.

TABELA III
ÂNGULOS DE CONTATO OBTIDOS NA SOLDAGEM COM 100% ARGÔNIO

100% Ar	Ângulo de contato (°)			
	Esmerilhada	Fresada	Como recebida	Retificada
1	82.5	93.0	63.7	95.0
2	89.8	92.7	73.4	92.0
3	77.3	93.9	73.8	90.5
4	77.7	94.2	64.7	86.5
5	97.5	85.7	64.3	94.6
6	98.5	79.9	67.1	96.2
7	92.2	82.1	62.9	94.3
8	85.1	90.9	67.7	95.4
9	97.1	86.7	64.1	93.2
10	80.4	83.9	71.6	78.9
11	81.1	79.0	76.8	91.0
12	86.2	78.2	70.6	79.6
13	85.3	77.8	78.2	78.9
14	92.0	81.2	76.8	78.9
15	87.7	70.5	75.4	79.7
16	86.0	81.8	78.1	79.1
17	85.9	79.6	79.4	71.5
18	87.9	79.1	72.0	84.4
19	95.7	80.9	65.5	74.7
20	86.9	83.3	74.2	79.9
Média	87.6	83.7	71.0	85.7
Desvio Padrão	6.3	6.4	5.6	8.0
Incerteza (%)	7.2	7.6	7.9	9.3

Fonte: Elaboração própria.

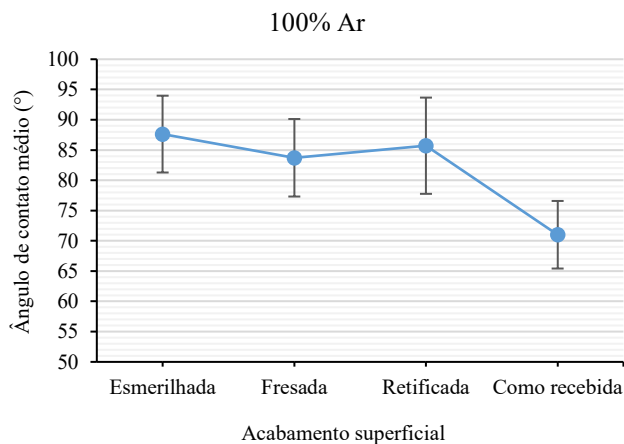


Fig. 32. Gráfico do ângulo de contato médio para cada condição de superfície em soldagem utilizando 100% Ar. Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise dos dados obtidos na Figura 32, não é possível perceber uma relação entre uma mudança no ângulo de contato em função da alteração do método de usinagem utilizado, já que não é possível observar uma curva de tendência ao longo da diminuição da rugosidade entre as condições esmerilhada, fresada e retificada. As três condições de usinagem apresentaram molhabilidade semelhante, em torno de 85° para o gás de proteção 100% Ar.

O desvio padrão de cada uma das medições não permite que seja possível diferenciar matematicamente os valores obtidos, ou seja, poderia se considerar que não houve alteração nenhuma do ângulo de contato em cordões de solda utilizando argônio em função da rugosidade da superfície a partir do método de medição utilizado neste trabalho.

É possível que a influência da rugosidade superficial no ângulo de contato do cordão de solda com a superfície seja tão sutil para o caso analisado que o método utilizado de medição não seja capaz de medir essa diferença. O método de obtenção manual do ângulo de contato a partir das macrografias revelou ser bastante dificultoso em função da irregularidade nas bordas de contato do cordão.

A chapa na condição como recebida foi a que apresentou melhor molhabilidade utilizando argônio. Como o resultado foi bastante diferente da condição fresada, sugere-se que o efeito ocorreu devido à presença da carepa e não da rugosidade.

Ao realizar um gráfico do ângulo de contato em função da rugosidade média medida (Figura 33), obtém-se uma interpretação um pouco diferente. Os valores médios apresentam um comportamento semelhante aos relatado por Kubiak et al. (2011), com uma leve diminuição do ângulo de contato para a rugosidade intermediária e depois um aumento para a maior rugosidade, ao considerar as rugosidades das 3 superfícies usinadas.

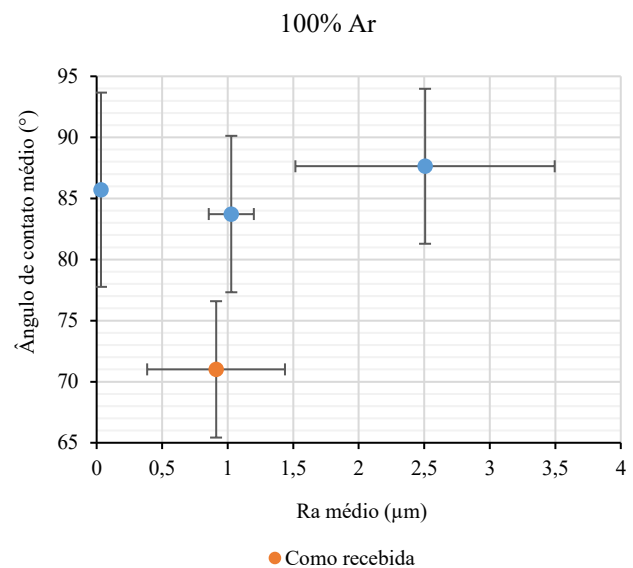


Fig. 33. Gráfico do ângulo de contato médio em função do parâmetro Ra em soldagem utilizando 100% Ar. Fonte: Elaboração própria.

Abaixo na Tabela 4 estão os resultados obtidos utilizando o dióxido de carbono puro como gás de proteção e na Figura 34 a condensação dos dados.

TABELA IV
ÂNGULOS DE CONTATO OBTIDOS NA SOLDAGEM COM 100% CO₂

100% CO ₂	Ângulo de contato (°)			
	Esmerilhada	Fresada	Como recebida	Retificada
1	58.5	68.5	46.9	52.2
2	54.9	47.9	47.7	51.9
3	58.9	53.3	44.0	63.2
4	52.8	61.1	67.4	54.0
5	56.9	57.1	54.4	55.9
6	48.4	54.6	63.3	54.5
7	47.6	59.1	56.7	60.8
8	68.8	52.6	65.4	48.0
9	64.5	51.8	51.3	52.1
10	56.2	54.9	75.2	54.9
11	54.0	50.6	62.1	51.8
12	71.0	50.4	55.5	52.0
13	57.7	50.8	56.2	57.1
14	49.9	59.8	58.3	54.7
15	53.6	47.5	63.2	55.2
16	50.5	59.2	63.9	57.5
17	57.4	49.7	70.9	50.6
18	67.8	55.8	48.6	50.9
19	56.3	55.4	50.5	49.8
20	60.1	54.0	51.7	45.4
Média	57.3	54.7	57.7	53.6
Desvio Padrão	6.6	5.1	8.6	4.1
Incerteza (%)	11.5	9.3	14.8	7.7

Fonte: Elaboração própria.

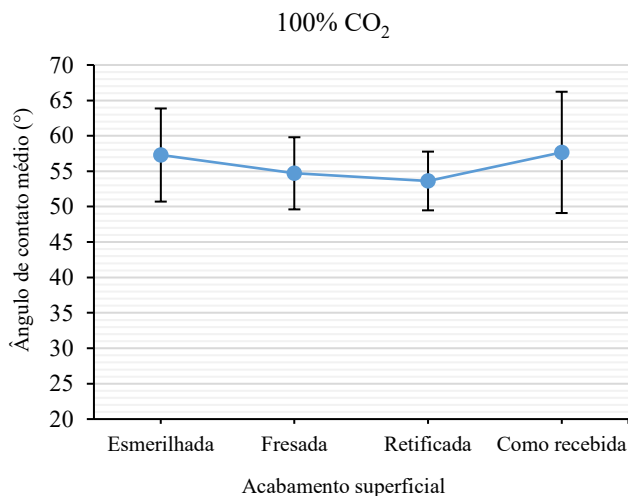


Fig. 34. Gráfico do ângulo de contato médio para cada condição de superfície em soldagem utilizando 100% CO₂. Fonte: Elaboração própria.

Nas soldagens feitas utilizando CO₂, os valores principais de medição (média) nas condições de superfície usinada seguiram uma tendência de diminuição do ângulo de contato (aumento da molhabilidade) conforme a diminuição dos níveis de

rugosidade, sendo o melhor resultado observado na condição de superfície retificada, polida.

Entretanto, novamente é necessário levar em conta o desvio padrão dos valores obtidos. Da mesma forma que na condição de soldagem com argônio, não é possível distinguir os valores de medição devido a intersecção entre as faixas de valores possíveis expressos pela incerteza. Isso pode ser comprovado matematicamente a partir de um teste Z de compatibilidade entre os valores medidos (FURTADO, 2020). Os resultados mostram que todos os valores de ângulo de contato entre cada condição de rugosidade são compatíveis entre si, não havendo discrepância entre eles e, portanto, carregam a mesma informação e significado físico.

Ao realizar novamente um gráfico do ângulo de contato em função da rugosidade medida (Figura), é possível observar um aumento praticamente linear dos valores dos ângulos médios conforme o aumento de Ra entre as 3 superfícies usinadas, agora se assemelhando a resultados já observados por outros autores, como Hitchcock que observou ângulos de contato aumentando linearmente com aumento de Ra (NALAGATLA, 2007).

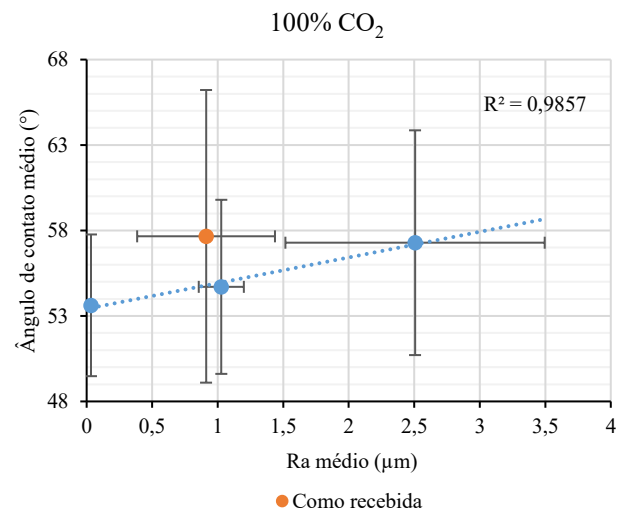


Fig. 35. Gráfico do ângulo de contato médio em função do parâmetro Ra em soldagem utilizando 100% CO₂. Fonte: Elaboração própria.

Dessa vez, utilizando CO₂, a chapa na condição como recebida foi a que apresentou pior molhabilidade em valores médios. Novamente, o resultado foi bastante diferente da condição fresada (de rugosidade semelhante), portanto sugere-se que a presença da carepa resulta em efeitos diferentes na molhabilidade conforme o gás de proteção utilizado.

V. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos com os parâmetros, materiais e condições utilizadas neste trabalho, é possível fazer as seguintes conclusões:

- Não foi possível afirmar que há de fato uma tendência de alteração nos valores de ângulo de contato do cordão de solda em função do nível de rugosidade da superfície para as condições testadas neste trabalho, mesmo que se compare a superfície de maior rugosidade com a de menor rugosidade, devido à incerteza associada.

- A diferença entre os ângulos de contato médios em cada nível de rugosidade tanto utilizando dióxido de carbono quanto argônio puro foram menores que os desvios padrão de cada medição, de forma que não é possível afirmar que houve uma diferença entre as amostras.
- A molhabilidade do cordão de solda utilizando o gás de proteção 100% CO₂ foi melhor que utilizando o 100% Ar, concordando com o comportamento já comprovado e conhecido nas literaturas vigentes.
- De forma prática, a preparação da superfície com os métodos utilizados neste trabalho não irá influenciar em uma melhoria significativa na molhabilidade do cordão, essa sendo muito mais influenciada pelo material de adição, presença ou não da carepa e o gás de proteção utilizado no processo.
- A chapa na condição como recebida com carepa apresentou em valores médios a melhor molhabilidade na condição de soldagem com 100% Ar e a pior molhabilidade na condição de soldagem com 100% CO₂. Entretanto, sugere-se que isso ocorre devido ao efeito ligado a emissão por campo e não pela rugosidade da superfície, já que não apresentou resultados próximos aos da superfície fresada que apresenta nível de rugosidade semelhante em nenhum dos gases.

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se os seguintes pontos:

- Testar para níveis de rugosidade maiores que os obtidos neste trabalho. O maior valor de rugosidade aritmética média obtida na operação de esmerilhamento foi de 2,506 µm. Utilizando outros métodos de geração de acabamento superficial, é possível obter valores de rugosidade bem maiores, até maiores que 15 µm como em peças fundidas ou forjadas (MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2023) de forma que talvez faça seja possível notar diferença significativa na molhabilidade em comparação com uma superfície polida.
- Utilizar algum método mais eficiente na obtenção das rugosidades. Existem métodos melhores para a caracterização de grandes trechos de superfície, como varredura a laser, que serão mais eficientes e precisos em determinar a qual nível de rugosidade de fato o cordão está sujeito. Leite et al. (2020) obtiveram ótimos resultados ao utilizar MEV e interferometria óptica para verificar a qualidade do acabamento obtida na usinagem da superfície, e relacioná-lo com a molhabilidade de titânio.
- Utilizar um método mais sofisticado para obtenção do ângulo de contato do cordão de solda. Devido à irregularidade do cordão, medir o ângulo de contato da borda do cordão a partir da seção transversal acaba sendo um processo difícil de ser realizado, já que nem sempre é possível distinguir corretamente o ponto de medição. Existem estudos que utilizam métodos mais eficazes e precisos para medição do cordão, como sensores ultrassônicos, a laser ou perfilômetros ópticos. É possível que, aumentando a precisão do processo de medição, seja

possível diminuir suficientemente o desvio padrão das medições de forma a ser possível observar as mudanças sutis no comportamento do ângulo de contato em função da rugosidade superficial.

- Testar para diferentes materiais de adição. Sabe-se que a compatibilidade química entre os materiais influencia bastante na molhabilidade. É possível que ao utilizar materiais diferentes não ocorra tão facilmente a dissolução do material de base de forma que talvez a rugosidade da superfície se mostre um parâmetro mais relevante na molhabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro. 2002.
- [2] CARPINETTI, Luiz C. R. *et al.* **Rugosidade Superficial: conceitos e princípios de medição**. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos: SP, p. 51. 1996.
- [3] CASSIE, A. B. D.; BAXTER, S. Wettability of Porous Surfaces. **Trans. Faraday Soc.**, n. 40, p. 546–551, 1944.
- [4] DAGNALL, H. **Exploring Surface Texture**. 2. ed. [S.l.]: Rank Taylor Hobson, 1986. 178 p.
- [5] EASTERLING, Kenneth E. **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**. 2. ed. Oxford: Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [6] FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio T. **Apostila Soldagem MIG/MAG**. ESAB BR. [S.l.], p. 133. 2005.
- [7] FREAR, D. R.; KINSMAN, K. R.; JONES, Wendell B. **Solder Mechanics: A State of the Art Assessment**. United States: Minerals, Metals & Materials Society, 1991.
- [8] FURTADO, W. W. **Apostila de Laboratório de Física I**. Goiânia: UFG, 2020.
- [9] KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] KUBIAK, K.J. *et al.* Wettability versus roughness of engineering surfaces. **Wear**, v. 271, n. 3-4, p. 523-528, 2011.
- [11] LEACH, Richard. **The measurement of surface texture using stylus instruments**. United Kingdom: National Physical Laboratory, 2001.
- [12] LEITE, Gustavo B. *et al.* Relação entre os parâmetros de rugosidade 3D e a molhabilidade do titânio com grãos micrométricos e sub-micrométricos. **Revista Matéria**, v. 25, n. 2, 2020.
- [13] MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS. Parâmetros de avaliação da rugosidade: acabamento superficial. **Moldes Injeção Plásticos**, 2023. Disponível em: <http://moldesinjecao plasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>. Acesso em: 22 jul. 2023.
- [14] MOURA, Edith A. D. M. *et al.* Efeito do material de adição, do gás de proteção e do tecimento sobre a molhabilidade dos cordões de solda usando o processo MIG/MAG. **XLIV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**, Uberlândia, MG, 10/13 set. 2018.

- [15] NALAGATLA, Dinesh R. **Influence of surface roughness of copper substrate on wetting behavior of molten solder alloys**. University of Kentucky Master's Theses. [S.l.]. 2007.
- [16] TAVARES, Amanda; MESQUITA, Aryel; SOUZA, Daniel. Influência do material de adição na geometria de cordões de solda depositados pelo processo MIG/MAG. **XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, Rio Grande, RS, 10/15 set. 2017.
- [17] WELDING TECH. What is Wetting in Welding? **Welding Tech**, 2019. Disponível em: <https://weldingtech.net/wetting/>. Acesso em: 22 jul. 2023.
- [18] WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, p. 988-994, 1936.
- [19] ZANCAN, Paulo H. **Influência dos parâmetros de deposição na molhabilidade de filmes de A-C:H**. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Joinville, p. 73. 2017.
- [20] ZILIO, Gabriel B. *et al.* Influência do gás de proteção e condições de soldagem na diluição e molhabilidade de cordões de solda de aço inoxidável e liga de níquel depositados pelo processo MIG/MAG. **VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, MG, 10/15 ago. 2014.

**APÊNDICE A - PLANO DE TRABALHO
DO PROJETO FINAL DE CURSO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

DECLARAÇÃO

PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO

Título do Trabalho

Influência da Rugosidade Superficial na Molhabilidade de Cordões de Solda
--

Orientador: Daniel Souza

Coorientador: Demostenes Ferreira Filho

Curso

Engenharia Elétrica ()	Engenharia Mecânica (x)	Engenharia de Computação PFC 1 () PFC 2 ()
----------------------------	------------------------------	--

Dados	Discente 1	Discente 2
Matrícula - Nome	201905723- LUCCA CASTRO GONCALVES DE MATEUS	
Telefone		
E-mail	luccamateus@discente.ufg.br	

Resumo

A molhabilidade dos cordões de solda influencia na sua geometria determinando, principalmente, o grau de convexidade do cordão. A convexidade do cordão é importante pois, cordões com alta convexidade produzem um efeito de concentrador de tensão na interface cordão-material de base na face do cordão. Este concentrador de tensão gerado é nocivo, principalmente, à condições onde as peças soldadas são submetidas à esforços de fadiga. O objetivo é verificar o efeito da rugosidade superficial sobre a molhabilidade dos cordões de solda para dois gases de proteção e dois materiais de adição. Para isto, placas de teste serão preparadas por usinagem com diferentes níveis de rugosidade e cordões de solda serão realizados utilizando o processo MIG/MAG. Espera-se determinar a influência da rugosidade superficial na molhabilidade do cordão.

I. Objetivos.

Os objetivos deste projeto são:

- Avaliar a influência da rugosidade superficial na molhabilidade do cordão de solda;
- Avaliar a influência do gás de proteção na relação rugosidade e molhabilidade;
- Avaliar a influência do material de adição na relação rugosidade e molhabilidade.

II. Metodologia (atividades a serem desenvolvidas).

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Preparação de placas de testes com diferentes métodos de usinagem com objetivo de gerar diferentes acabamentos superficiais;
- Medição das rugosidades das placas;
- Realização das soldagens com os materiais de adição e gases propostos;
- Preparação das amostras para macrografias; Medição da geometria do perfil dos cordões obtidos; Análise dos resultados e escrita do relatório final.

III. Resultados Esperados

Com este estudo espera-se avaliar o impacto da rugosidade superficial sobre a molhabilidade dos cordões de solda. Além disso, pretende-se avaliar a influência do gás de proteção e do material de adição.

IV. Cronograma de Atividades

Na Tabela 1 é mostrado o Cronograma de Atividades.

Tabela 1 - Semestre letivo 2023/01

Etapas do Projeto	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
1 - Preparação de placas de testes com diferentes métodos de usinagem com objetivo de gerar diferentes acabamentos superficiais	x	x			
2 - Medição das rugosidades das placas		x			
3 - Realização das soldagens com os materiais de adição e gases propostos		x	x		
4 - Preparação das amostras para macrografias			x		
Etapas do Projeto	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
5 - Medição da geometria do perfil dos cordões obtidos			x	x	
6 - Análise dos resultados e escrita do relatório final				x	x
7 - Defesa					x



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 28/04/2023, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucca Castro Goncalves De Mateus, Discente**, em 28/04/2023, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3705499 e o código CRC A2E34091.