

**VICTOR EDUARDO SILVA ALVES**

**Desenvolvimento de Metodologia Experimental e  
Modelagem Matemática para a Goivagem a Plasma  
de Aço Estrutural Naval**



UFU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
2023

**VICTOR EDUARDO SILVA ALVES**

**Desenvolvimento de Metodologia Experimental e  
Modelagem Matemática para a Goivagem a Plasma  
de Aço Estrutural Naval**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

**UBERLÂNDIA - MG  
2023**

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

---

A474d Alves, Victor Eduardo Silva, 1990-  
2023 Desenvolvimento de metodologia experimental e modelagem  
matemática para a goivagem a plasma de aço estrutural naval  
[recurso eletrônico] / Victor Eduardo Silva Alves. - 2023.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.7086>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975-  
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de  
PósGraduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.01

---

Glória Aparecida  
Bibliotecária Documentalista - CRB-6/2047



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 638, PPGEM				
Data:	18/07/2023	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	12122EMC016				
Nome do Discente:	Victor Eduardo Silva Alves				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de Metodologia Experimental e Modelagem Matemática para a Goivagem a Plasma de Aço Estrutural Naval				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"Avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas submetidas a múltiplos ciclos térmicos"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Gilmar Ferreira Batalha - UFMG; e Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.





Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/07/2023, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/07/2023, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Gilmar Ferreira Batalha, Usuário Externo**, em 19/07/2023, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4662004** e o código CRC **61434253**.

---

À minha mãe, Vânia, aos meus avós, Sebastiana e Paulo, às minhas tias, Luciene e  
Lucelena, todos *In memoriam*.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*  
*(Marthin Luther King)*

## AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Vânia (*in memoriam*) e Sidney, por me incentivarem e apoiarem incondicionalmente neste longo caminho de aprendizagem e formação profissional.

Aos meus irmãos, Marcell, Syllas e Marcos, pelo companheirismo, amizade, amor e apoio ao longo desse trajeto.

Ao professor Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, pela confiança depositada em mim, disposição para ensinar, paciência no meu processo de aprendizagem e pela amizade.

Aos amigos de trabalho, em especial, Me. Edmundo Benedetti Filho (Mundinho), Dr. Diandro Bailoni Fernandes (Didi), Dr. Lucas Alves do Nascimento (Kbça) e Dr. Henrique Nardon Ferraresi (Cleitinho), por toda ajuda, companheirismo e conselhos.

Aos professores, engenheiros, técnico (João Paulo C. Nascimento), soldadores e alunos de iniciação científica (F. Mendanha, F. Soares, Wander e Ytalo) do Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva (LAPROSOLDA) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, que contribuíram para meu desenvolvimento profissional e acadêmico.

À empresa Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) e ANP, pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela oportunidade de cursar o mestrado e aos órgãos de fomento: CNPq e CAPES.

A todos os meus amigos que de certa forma colaboraram e fizeram parte da minha trajetória até aqui.

ALVES, V. E. S. **Desenvolvimento de Metodologia Experimental e Modelagem Matemática para a Goivagem a Plasma de Aço Estrutural Naval**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023, 97f.

## RESUMO

A goivagem a plasma é um processo térmico que remove metal por fusão, sendo bastante utilizada em reparos de soldagem, quando o objetivo é remover cordões de solda, trincas, porosidades, corrosões localizadas ou quando alguma descontinuidade é detectada. Durante a fabricação de estruturas, obras e manutenções, podem ocorrer demandas de reparos em decorrência da fabricação ou manutenção, em especial envolvendo técnicas de soldagem. Essas demandas podem impactar diretamente em prazo e custos de construção, montagem e manutenção. Dessa forma, este trabalho apresenta uma metodologia experimental do processo de goivagem a plasma na busca por um levantamento de parâmetros para se determinar um modelo matemático, no qual seja possível determinar os parâmetros de saída, a saber largura e profundidade de remoção, a partir dos parâmetros de entrada, que são: corrente, velocidade de goivagem ( $V_G$ ), distância do bico a peça (DBP), pressão do ar comprimido e ângulo de ataque da tocha, necessários para uma remoção proposital de material em regiões de interesse de uma junta soldada. A partir disso, na primeira etapa do trabalho, foram realizadas goivagens sem oscilação da tocha, variando a corrente em três níveis (60, 80 e 100 A) e velocidade de goivagem (com vários valores, sendo que o mínimo é 5,1 e máximo é 37,3 mm/s), mantendo fixos a pressão do ar comprimido (55 psi), DBP de 1,5 mm e ângulo de ataque de 45°. Todavia os resultados médios obtidos de largura (5,64 mm) e profundidade (3,87 mm), foram relativamente pequenos. Devido à variação de largura e profundidade dos perfis de juntas soldadas, foi necessária uma busca por parâmetros de goivagem que atendam essas variações. Assim, para obter maiores larguras, optou-se por aplicar oscilação da tocha durante o processo de goivagem. Para esta segunda abordagem, foi adotado um Planejamento Composto Central de Face Centrada, levantado por meio de um software estatístico, totalizando 46 testes em que foram consideradas as variáveis em três níveis: corrente (60, 80 e 100 A), DBP (5, 10 e 15 mm), amplitude (10, 20 e 30 mm), pressão do ar (50, 55 e 60 psi), ângulo de ataque (20, 32,5 e 45°) e  $V_G$  (3, 4,5 e 6 mm/s). Após a realização das goivagens, foram medidos as larguras e profundidades de cada remoção, bem como suas respectivas macrografias. Foi realizada a análise dos resultados obtidos através de um software estatístico, possibilitando definir um modelo matemático para estimação da largura e profundidade de goivagem em função dos parâmetros considerados significativos. Por fim, desenvolveu-se um programa computacional, em que são inseridos no programa, os valores de largura e profundidade desejados, para que este entregue uma sugestão de valores dos parâmetros inerentes ao processo (corrente,  $V_G$ , DBP, amplitude, ângulo de ataque e pressão do ar comprimido).

**Palavras-chave:** Goivagem a plasma, parametrização, remoção, modelo matemático;

ALVES, V. E. S. **Development of Experimental Methodology and Mathematical Modeling for Plasma Gouging of Naval Structural Steel**. Dissertation (Master Thesis in Mechanical Engineering) – Federal University of Uberlandia, Brazil, 2023, 97f.

### ABSTRACT

Plasma gouging is a thermal process that removes metal by fusion and it is widely used in welding repairs, when the objective is to remove weld beads, cracks, porosity, localized corrosion or when some discontinuity is detected. During the fabrication of structures, construction and maintenance, repair demands may occur as a result of fabrication or maintenance, especially involving welding techniques. These demands can directly impact on time and costs of construction, assembly, and maintenance. Thus, in this work we developed an experimental methodology of the plasma gouging process in search of a survey of parameters to determine a mathematical model, in which it is possible to determine the output parameters, namely width and depth of removal, from the input parameters, which are: current, gouging speed ( $V_G$ ), contact tip to workpiece distance (CTWD), compressed air pressure and torch angle of attack, necessary for a purposeful removal of material in regions of interest in a welded joint. From this, in the first stage of the work, gouging was performed without oscillation of the torch, varying the current in three levels (60, 80 and 100 A) and gouging speed (with several values, the minimum is 5,1 and maximum is 37,3 mm/s), keeping fixed the pressure of compressed air (55 psi), CTWD of 1,5 mm and angle of attack of 45°. However, the average results obtained for width (5,64 mm) and depth (3,87 mm), were relatively small. Due to the variation in width and depth of the welded joint profiles, a search for gouging parameters that meet these variations was necessary. Thus, to obtain larger widths, it was decided to apply torch oscillation during the process. For this second approach, a Central Face Central Composite Planning was adopted, raised through statistical software, totaling 46 tests in which the variables were considered in three levels: current (60, 80 and 100 A), CTWD (5, 10 and 15 mm), width (10, 20 and 30 mm), air pressure (50, 55 and 60 psi), angle of attack (20, 32,5 and 45°) and  $V_G$  (3, 4,5 and 6 mm/s). After the gouging, the widths and depths of each removal were measured, as well as their respective macrographs. The analysis of the results obtained was performed using statistical software, making it possible to define a mathematical model for estimating the width and depth of the gouging as a function of the parameters considered significant. Finally, a software code was developed, in which the desired width and depth values are inserted in the program, so that it delivers a suggestion of values for the parameters inherent to the process (current,  $V_G$ , CTWD, amplitude, attack angle and compressed air pressure).

**Keywords:** Plasma gouging, parameterization, removal, mathematical model

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_G$	Velocidade de goivagem [mm/s]
DBP	Distância do bico à peça [mm]
CTWD	<i>Contact tip to workpiece distance</i> [mm]
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
OGC	<i>Oxyfuel Gas Cutting</i>
PAC	<i>Plasma Arc Cutting</i>
CAC-A	<i>Air Carbon Arc Cutting</i>
LBC	<i>Laser Beam Cutting</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZAC	Zona afetada pelo calor
CC	Corrente Constante
F	Frequência [Hz]
$\alpha$	Ângulo de ataque da tocha [°]
L	Distância entre o eixo do motor de oscilação até a chapa [mm];
$\theta$	Ângulo inserido na interface da mesa controladora [°];
A	Amplitude requerida no planejamento experimental [mm];
EPI	Equipamento de proteção individual
ANOVA	Análise de variância
I	Corrente [A]
3D	Tridimensional

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	13
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 Bibliometria .....	17
2.2 Revisão Bibliográfica .....	19
2.2.1 Processos de Remoção/Corte Térmicos .....	19
2.2.2 Oxicorte .....	20
2.2.3 Goivagem com Eletrodo de Grafite .....	21
2.2.4 Processo Plasma .....	22
2.2.5 Processo de Corte e Goivagem com Arco Plasma .....	23
2.2.6 Comparação entre os Processos de Remoção .....	27
2.2.7 Efeito das Principais Variáveis do Processo de Goivagem a plasma Sobre a Geometria da Remoção .....	29
METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	33
3.1 Material de Base .....	34
3.2 Equipamentos .....	36
3.3 Consumíveis .....	37
3.4 Goivagem sem Oscilação Angular .....	39
3.5 Goivagem com Oscilação Angular .....	39
3.6 Procedimentos Experimentais .....	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
4.1 Goivagem sem Oscilação Angular .....	50
4.2 Goivagem com Oscilação Angular .....	55
CONCLUSÕES .....	67
TRABALHOS FUTUROS .....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70
APÊNDICE .....	72
8.1 Macrofotografias dos Testes de Goivagem Sem Oscilação da Tocha .....	72
8.2 Macrografias e Goivagens com Oscilação da Tocha .....	77



# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A goivagem é um processo de corte térmico que remove metal por fusão, sendo ele bastante utilizada quando se tem a intenção de remover cordões de solda, ou parte desses, em casos em que alguma descontinuidade for detectada ou, ainda, para a criação de canais para posterior preenchimento com solda (SERRATI, 2022). A goivagem é um dos métodos mais eficientes para remoção de material em uma solda para reparos. O método mais tradicional é o realizado por arco-grafite, mas a cerca de 15 anos vem crescendo a aplicação por plasma a ar comprimido, como processo de goivagem (CASTRO; SCOTTI, 2013).

A goivagem a plasma possui relevância em diferentes setores industriais, pois permite uma remoção precisa e controlada de diferentes materiais. Este processo evoluiu nos últimos anos, aumentando a variedade de materiais que podem ser processados, bem como suas capacidades de remoção, corte, precisão e controle. Essa abordagem se expandiu para várias indústrias, principalmente nos setores de óleo e gás, aeroespacial, automotivo, naval e construção de estruturas metálicas.

Outra técnica, que também é bastante utilizada em construção e manutenção mecânica, para remoção de material, é o esmerilhamento, que tem como principais vantagens: a) a simplicidade e portabilidade do equipamento (esmerilhadeira com disco apropriado); b) menor calor imposto à peça, pois os cortes térmicos dos demais processos, podem gerar transformações metalúrgicas e microestruturais indesejadas, que podem deteriorar as propriedades mecânicas das peças. Não obstante, o esmerilhamento é um processo mais lento e que exige um esforço mais severo do operador técnico de forma que, é importante avaliar a aplicação de cada um em função de cada necessidade.

A história do corte e goivagem a arco de plasma começa nas décadas de 1950 e 1960, quando engenheiros e pesquisadores começaram a explorar as propriedades especiais do plasma para uso industrial. Embora o foco inicial fosse a utilização do arco de plasma na soldagem, logo foi percebido que essa tecnologia poderia ser aplicada para corte e remoção de material.

Nessa época, equipamentos eletromecânicos primitivos foram usados para desenvolver os primeiros sistemas de goivagem a arco de plasma. A capacidade de extrair materiais de forma rápida e precisa chamou a atenção de vários setores, aumentando a

demanda por desenvolvimentos adicionais nessa tecnologia promissora. Foi nessa época que os termos "goivagem a arco de plasma" e "corte a arco de plasma" ou simplesmente corte a plasma, foram criados para descrever esses processos inovadores. Contudo, somente na década de 80, com o advento de sistemas portáteis e de baixo custo, tornou-se um processo popular e sua utilização vem crescendo no mercado industrial (REIS; SCOTTI, 2007).

A goivagem a arco de plasma melhorou significativamente com o desenvolvimento e a pesquisa. O desempenho do processo melhorou como resultado de melhorias nas fontes de energia, sistemas de controle, design de tochas e escolha de gases. A capacidade de cortar materiais espessos aumentou significativamente enquanto a qualidade do acabamento da superfície melhorou.

Para aprimoramento dos processos em geral, ao longo do tempo, diferentes melhorias tecnológicas foram implementadas. O desenvolvimento de sistemas automatizados de controle, permitiram que as fontes atuassem com precisão e a reprodutibilidade, pois possibilitou um maior controle sobre parâmetros inerentes do processo. O uso de tochas com eletrodos intercambiáveis gerou uma maior flexibilidade, permitindo a aplicação deste processo em uma ampla gama de geometrias e materiais.

O desenvolvimento contínuo do uso do plasma foi impulsionado por fontes de energia mais eficientes, sistemas de controle sofisticados, tochas e consumíveis específicos. Este desenvolvimento, foi um passo importante na história da engenharia mecânica. As melhorias contínuas nesses processos têm ajudado a indústria manufatureira a avançar, oferecendo métodos de remoção e corte de materiais eficientes e adaptáveis.

A evolução dessas técnicas e outras, depende de pesquisas e desenvolvimento contínuos, que forneçam uma base sólida para inovações futuras e contribuam para o avanço da engenharia mecânica como um todo. É fundamental estudar a goivagem a arco de plasma, o corte a plasma e suas peculiaridades a fim de ser assertivo na determinação dos parâmetros para as aplicações em que ele pode ser empregado.

De acordo com esse cenário de desenvolvimento tecnológico, sabe-se que durante a fabricação de estruturas, obras e manutenções, na indústria de óleo e gás (*onshore* ou *offshore*), podem ocorrer demandas de reparos em decorrência da fabricação ou manutenção, em especial envolvendo técnicas de soldagem, cujas normas e especificações limitam o número de reparos em dois reparos localizados, quando há requisito de impacto Charpy, ou três reparos localizados quando não há este requisito. Particularmente o Item 5.2.9.1 da Norma PETROBRAS N-133 impõe que "a mesma área de solda não pode ser reparada mais do que duas vezes quando houver requisito de tenacidade. Quando não há requisito de tenacidade o número máximo de reparos fica limitado a três vezes" (CONTEC. Norma Petrobras N-133 Rev. N 03/2017 – Soldagem, 2017, 115p.).

Nesta conjuntura, destaca-se que o controle da quantidade de reparos em uma mesma região de uma junta soldada somente ocorre nos casos em que o defeito for verificado por ensaios volumétricos. Desse modo, tal controle impacta diretamente em prazo e custos de construção e montagem e manutenção. Esse impacto em prazo e custos é ainda maior em estruturas, já que a rejeição de uma junta soldada após atingir o número máximo de reparos é praticamente impossível. Diferentemente de uma tubulação, na qual é possível descartar um segmento contendo a junta soldada, o descarte de uma junta soldada reprovada inserida em uma estrutura, comumente de grandes dimensões, é impraticável. Assim, abordagens que contribuam para a correta determinação do número máximo de reparos que uma junta soldada possa sofrer, é de suma importância.

Inserido neste contexto, o Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva - Laprosolda/UFU, desenvolveu metodologia para se avaliar o número máximo de reparos por soldagem, sem que ocorra perda significativa das propriedades mecânicas, em aços estruturais navais ASTM A131, a fim de se evitar custos desnecessários com fabricação e controle da qualidade da produção/soldagem, visando, portanto, redução de tempo e custos.

De acordo com a Açobril (2022), esta classe de aços (ASTM 131) é destinada à fabricação de cascos de navios, embarcações em geral e diversos outros tipos de estruturas oceânicas, em especial plataformas *offshore* fixas ou auto eleváveis e navios sonda, nas quais a exigência de garantia de propriedades mecânicas na soldagem é requerida.

As remoções dos cordões de solda realizadas no referido estudo foram realizadas pelo processo de goivagem por plasma a ar comprimido. Optou-se pela aplicação deste processo, pois nas atividades de campo de montagem e manutenção, a goivagem a plasma é comumente utilizada, além de proporcionar: maior capacidade de remoção de material, apresentar menos ruídos e geração de fumos, baixa contaminação por elementos aderidos na superfície, custo mais baixo e velocidades que podem ser até quatro vezes mais rápida, se comparada com a goivagem realizada por arco-grafite, além de apresentar também um melhor acabamento da superfície goivada.

Sendo assim, neste trabalho são abordadas este capítulo de Introdução, revisão bibliográfica, apresentação da metodologia, resultados e discussão dos ensaios experimentais realizados, referente aos testes de levantamento de parâmetros de goivagem a plasma, necessários para a remoção proposital de material em regiões de interesse de uma junta soldada. Por fim, são apresentadas as conclusões.

Para a determinação da influência dos parâmetros intrínsecos ao processo de remoção por goivagem a plasma, neste trabalho propõe-se a executar testes práticos para se determinar um modelo matemático, no qual seja possível determinar os parâmetros de saída,

a saber largura e profundidade de remoção, a partir dos parâmetros de entrada, a serem especificados adiante.

Portanto, o objetivo principal desse trabalho é o estudo do processo de goivagem por plasma a ar comprimido, visando a remoção proposital de material em regiões de interesse de uma junta soldada. Para tanto, os seguintes objetivos específicos são destacados:

- Estabelecer os limites operacionais do processo de goivagem a plasma por ar comprimido a partir da parametrização adequada;
- Estudar os efeitos da oscilação da tocha nas variáveis largura e profundidade da remoção; e
- Propor modelo matemático, baseado em análises estatísticas, que calcule os parâmetros do processo, a partir de valores de largura e profundidade desejados pelo usuário.

Dessa forma, ao final do trabalho, espera-se responder à questão técnico-científica sobre os parâmetros da goivagem a plasma que mais influenciam no desempenho do processo em termos da geometria da remoção.

## CAPÍTULO II

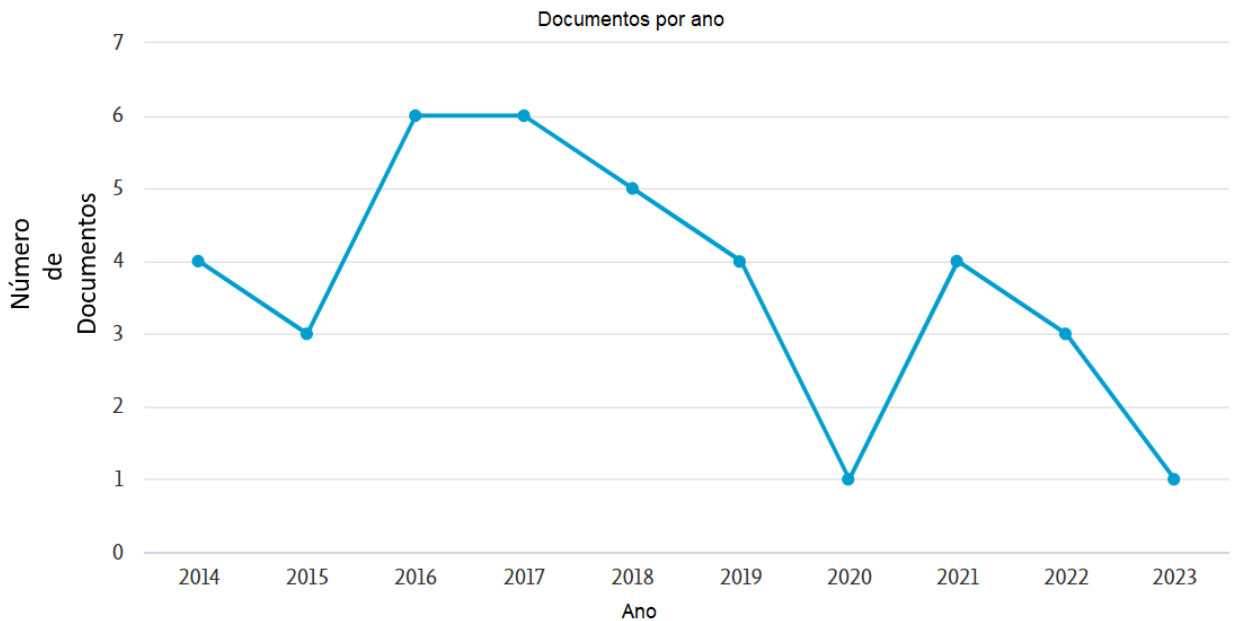
### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica acerca do processo de goivagem e afins. Foi realizada, inicialmente, uma bibliometria para melhor avaliar as pesquisas existentes, até o presente momento. Esta é uma forma estatística de construir indicadores e verificar a evolução de produção científica referente à um determinado tema.

#### 2.1 Bibliometria

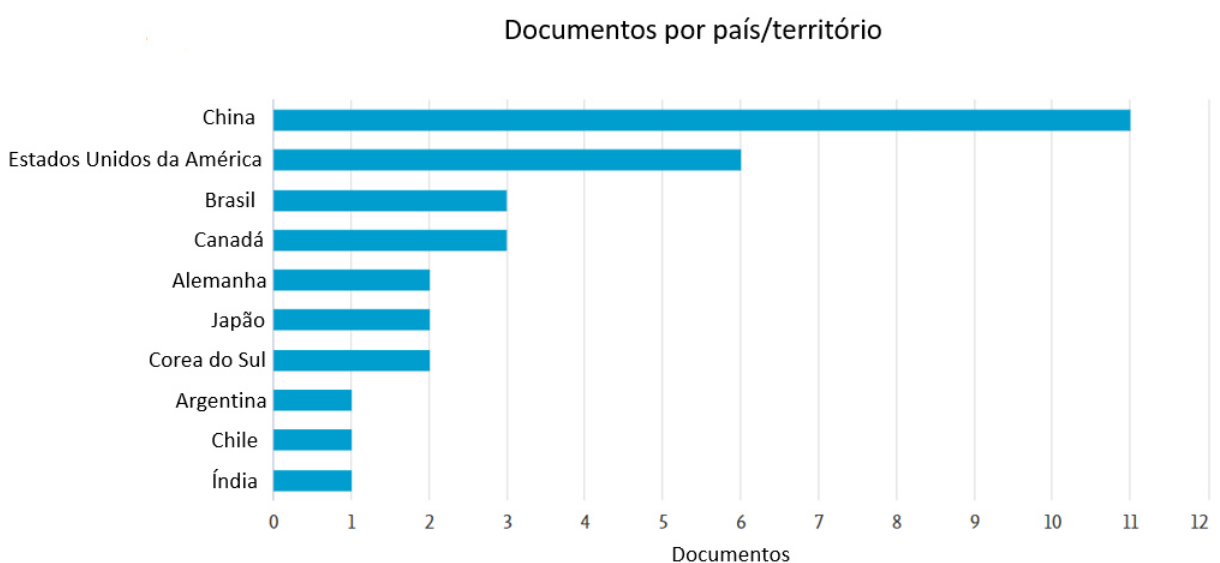
Por meio da plataforma *Scopus*, fazendo busca pelo título dos trabalhos pelas palavras chaves “*gouging*” (goivagem) e *plasma* ou “*arc*” (arco), aplicando filtros de data (de 2014 até 2023) e de trabalhos na linguagem inglesa. Foram encontrados apenas 37 documentos nesta pesquisa.

Na Figura 1 é possível verificar o número de documentos publicados por ano, no período de 2014 até 2023, em que os dois anos que mais houve publicações foram os anos de 2016 e 2017, ambos com 6 publicações.



**Figura 1 – Documentos com termos goivagem e arco plasma publicados por ano - De 2014 até 2023 – (Adaptado da Plataforma Scopus)**

Na Figura 2 é apresentado o resultado de busca pelos países que mais realizaram publicações sobre o tema goivagem a arco plasma, de 2014 a 2023. É possível destacar o trabalho da China, com o maior número de publicações no período, seguido por Estados Unidos da América, em segundo lugar e o Brasil, destacando-se na terceira colocação.



**Figura 2 - Documentos Publicados por País com termos goivagem e arco plasma – de 2014 até 2023 (Adaptado da Plataforma Scopus)**

## 2.2 Revisão Bibliográfica

### 2.2.1 Processos de Remoção/Corte Térmicos

Os processos de corte térmico são extremamente utilizados nos mais variáveis setores da fabricação mecânica. Os mais utilizados nas indústrias são: oxicorte (OGC – *oxyfuel Gas Cutting*), arco de plasma (PAC – *Plasma Arc Cutting*), arco por eletrodo grafite (CAC-A – *Air Carbon Arc Cutting*) e corte a laser (LBC – *Laser Beam Cutting*) (WELD HANDBOOK, 2001).

A Figura 3 apresenta uma visão geral de suas capacidades e limitações. O processo de corte térmico corta ou remove material por fusão, queima ou até mesmo vaporizando o material desejado. Embora todos estes processos façam o uso de calor para cortar, cada processo funciona de maneira diferente. Além disso, os diferentes processos diferem em relação aos materiais e espessuras.

Material	Processos de Corte			
	OFC	PAC	CAC-A	LBC
Aço Carbono	X	X	X	X
Aço Inoxidável	X	X	X	X
Ferro Fundido	X	X	X	X
Alumínio		X	X	X
Titânio	X	X	X	X
Cobre		X	X	X
Materiais Refratários		X	X	X

- Esta tabela deve ser considerada apenas um guia geral para a aplicabilidade do processo. Para processos a serem utilizados com ligas específicas, deve-se consultar o fabricante ou outro fornecedor apropriado.

- OGC = Oxicorte; PAC = Arco de Plasma; CAC-A = Arco por Eletrodo Grafite e LBC = Corte a Laser

- Processo aplicável com técnicas especiais; todos os outros processos (x) são aplicados comercialmente.

Figura 3 – Visão geral dos processos de remoção/corte térmico (Traduzido de *Welding Handbook*, 2001)

A seguir será feito um breve comentário sobre cada um destes processos.

### 2.2.2 Oxicorte

Com mais de um século de sua ampla utilização, o oxicorte é uma técnica de manufatura de corte de ferros e, principalmente aços carbono, que manteve sua relevância para fabricação contemporânea devido aos baixos custos e desempenho inigualável em peças grossas (POND; MARTIN, 2019).

O processo de oxicorte, utiliza o calor gerado por uma chama de oxicombustível para realização do corte. Ele envolve a utilização de uma mistura de gás (combustível e oxigênio) para aquecer o metal que será cortado até a temperatura de ignição, que é a temperatura na qual o aço oxida rapidamente (WELD HANDBOOK, 2001).

Alguns exemplos de combustíveis que são usados neste processo incluem: gás natural, propano, acetileno (mais utilizado) e outros. Neste ponto, um fluxo de oxigênio de alta velocidade é introduzido e ocorre uma oxidação rápida. Parte do metal fundido é soprado por baixo pela reação, que penetra rapidamente na espessura da peça.

Ramalho em 2008 estudou a transferência de calor que se dá através do processo oxicorte, e o esquema de funcionamento é mostrado na Figura 4.

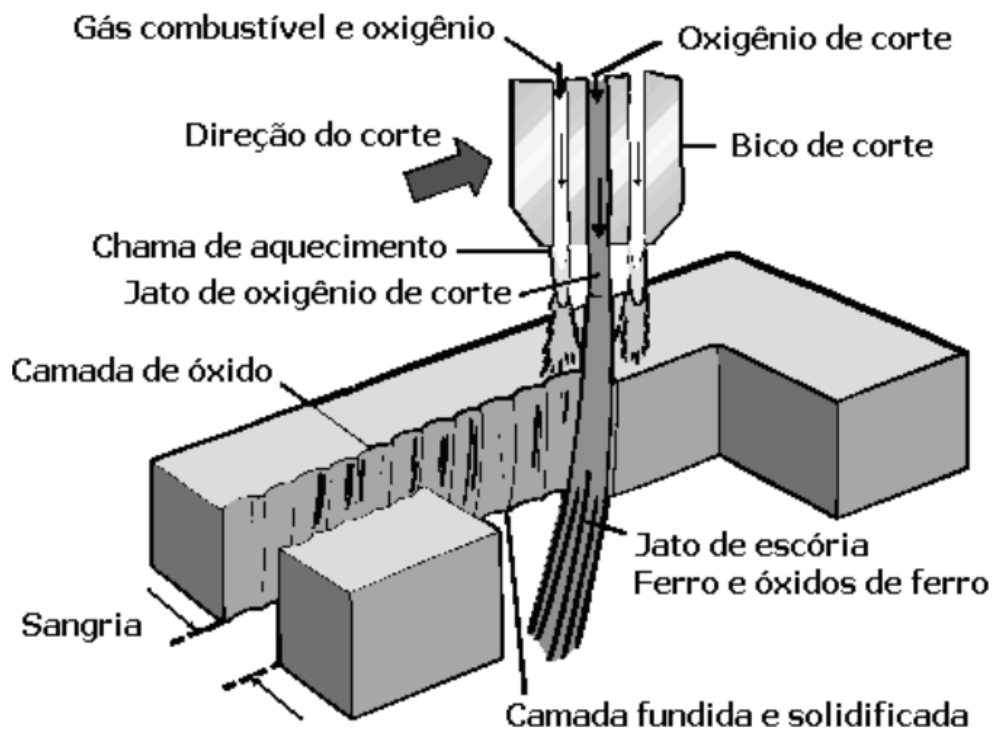


Figura 4 – Processo de Oxicorte (Ramalho, 2008)



### 2.2.3 Goivagem com Eletrodo de Grafite

A goivagem com utilização de eletrodo de grafite consiste na remoção do metal pela ação conjunta de um arco elétrico, estabelecido entre a peça e um eletrodo de grafite, e um jato de ar comprimido. O arco elétrico tem como fonte de energia um retificador ou transformador, que fornece uma corrente elétrica do tipo contínua ou alternada, de acordo com o metal base a ser trabalhado. Este processo, também é conhecido por goivagem com eletrodo de carvão, sendo usualmente manual, é muito empregado na remoção de discontinuidades em soldas (por exemplo, poros, falta de fusão, inclusão de escória, trincas e raízes mal executadas), remoção de dispositivos fixados por solda, desmontagem de estruturas metálicas e na confecção de chanfros para solda (NETO; COSTA, 2018).

Na Figura 4 está a ilustração esquemática de tocha de goivagem com eletrodo de grafite.

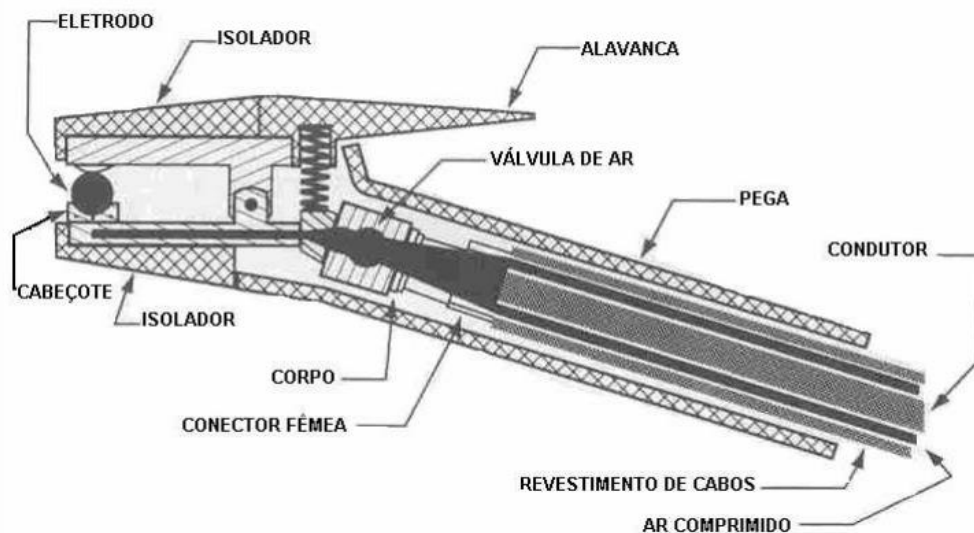


Figura 4 - Tocha de Goivagem com Eletrodo de Grafite (Neto; Costa, 2018)

De acordo com Neto e Costa, 2018 *apud* Serrati, 2022, a execução da goivagem com uso de eletrodo de grafite é realizada de forma análoga à goivagem com eletrodos revestidos. Nesse processo é necessário o uso de ar comprimido para remover o metal líquido a uma pressão de 5,6 ~ 7,0 kgf/cm<sup>2</sup>. Esse método de goivagem pode ser realizado com corrente alternada ou contínua, cuja aplicação é dependente do metal base e tipo de eletrodo, podendo o eletrodo ser de dois tipos:

- Eletrodo de grafite com revestimento de cobre: o revestimento dá ao eletrodo maior capacidade de conduzir eletricidade. Esse tipo de eletrodo é utilizado em corrente contínua, mas caso a corrente alternada seja impositivamente a que deve ser utilizada no processo, o

revestimento de cobre deve ter em sua composição elementos estabilizadores de arco elétrico.

- Eletrodo nu: são eletrodos de grafite sem revestimento que apresentam maior desgaste se comparado aos eletrodos revestidos por ter menor capacidade de condução da eletricidade. Geralmente é empregado com corrente alternada para reduzir seu desgaste.

#### **2.2.4 Processo Plasma**

A compreensão do processo de soldagem a plasma, pode ser de suma importância para um melhor entendimento referente à goivagem a plasma. Sendo assim, serão apresentados e comentadas as semelhanças e diferenças entre os dois processos.

A soldagem a arco de plasma (PAW), produz a fusão do material, por meio de um arco formado entre o eletrodo e a peça, sendo denominado arco transferido; ou entre o eletrodo e o bocal de constrição da tocha, denominado arco não transferido. É utilizado um gás de proteção inerte proveniente da tocha, que protege contra oxidação e, principalmente, serve como meio ionizante.

Este processo é semelhante à soldagem TIG (Tungstênio Inerte Gás), que utiliza um eletrodo não-consumível e um bocal que proporciona uma câmara de gás ao redor do eletrodo. O arco aquece o gás desta câmara até uma determinada temperatura, que possibilita sua ionização, passando a conduzir corrente elétrica, ou seja, tornando-se Plasma.

De acordo com Reis (2007), este processo pode ser utilizado para soldar a maioria dos materiais em todas as posições, fornecendo um melhor controle direcional do arco e uma menor Zona Afetada pelo Calor (ZAC) do que o processo TIG. O que costuma pesar neste caso, é o custo relativamente alto do equipamento de controle, bem como um treinamento mais detalhado do operador.

Segundo Bracarence (2000), o processo de soldagem a arco de plasma é basicamente uma extensão do processo de soldagem TIG. Contudo, tem-se uma maior densidade de energia e uma maior velocidade do gás plasma, devido ao gás ser forçado através do bocal de constrição, provocando um aumento significativo da temperatura do plasma.

É possível verificar as diferenças básicas entre os dois processos de soldagem na Figura 5.

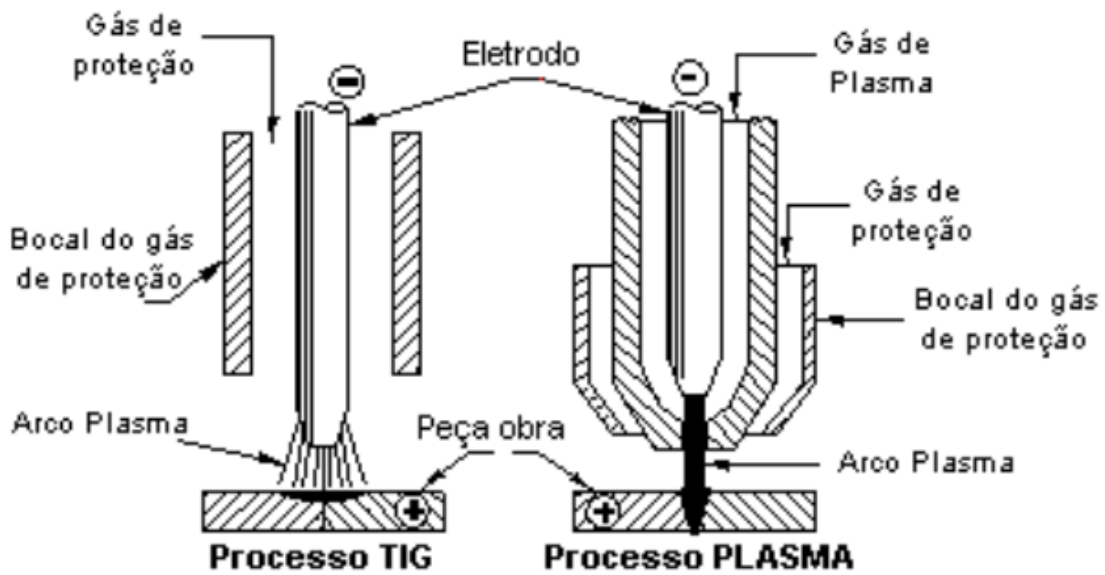


Figura 5 – Ilustração esquemática para diferenciar os processos TIG e Plasma (Diaz; Dutra, 2002)

### 2.2.5 Processo de Corte e Goivagem com Arco Plasma

O processo de corte e goivagem a plasma envolve fusão e remoção do metal do sulco goivado por meio de um arco de plasma elétrico altamente concentrado formado entre o eletrodo e o alvo. Este processo requer o uso de bicos especialmente projetados, que restringem o arco a um grau menor do que seria o caso do corte, e espalharia o feixe de plasma em um ângulo mais amplo, mas a uma taxa menor de fluxo. O gás de plasma utilizado, pode ser argônio, hélio, uma mistura de argônio e hidrogênio, oxigênio ou, mais frequentemente, por razões de economia, ar. O argônio, como gás de plasma, garante a melhor qualidade do sulco goivado (redução de oxidação), mas o uso de ar, reduz substancialmente o custo do processo de goivagem (GORKA, 2002).

A utilização de gases nobres nos processos a plasma, só é interessante, em operações específicas em que se trabalha com metais nobres, em busca do mínimo de oxidação da superfície goivada e um aprimorado acabamento. Nas operações de construções e/ou manutenções em campo, o ar comprimido é a opção mais utilizada, devido ao baixo custo, se comparado com o uso de outros diferentes gases.

Conforme Tavares (2009), o corte a plasma é atualmente chamado de corte a plasma convencional, sendo aplicado a cortes de vários metais com espessuras diferentes. Aplicado em cortes de aços inoxidáveis, aço carbono e alumínio, sendo que o bom rendimento de trabalho é consequência da utilização do gás adequado para cada material, do controle da vazão do gás e a tensão do arco elétrico, bem como levar em consideração as propriedades do metal a ser cortado.

Há uma divergência de ideias deste trabalho com relação ao trabalho de Tavares (2009), no quesito de controle da tensão, mencionado no parágrafo anterior, visto que neste processo, a regulagem na fonte do plasma, é feita através da corrente e não da tensão, logo, a tensão é consequência da corrente regulada na máquina e da distância do bico à peça.

Ainda de acordo com Tavares (2009), as principais características do processo de corte a plasma são as altas velocidades do gás e uma focalização maior da coluna do arco, possibilitando uma maior concentração de energia gerando o corte. No caso da goivagem a plasma, o arco é ligeiramente desfocado, devido ao aumento do furo constritor, que deixa a seção transversal do arco um pouco maior do que o especificado para a realização do corte. Além do arco voltaico ser desfocado no processo de goivagem, existem outras diferenças na utilização dessa técnica para o corte. O arco no corte é direcionado para baixo através do metal em um ângulo reto, diminuindo a seção do corte, facilitando a expulsão do metal fundido para fora da junta, enquanto na goivagem a plasma, a tocha está inclinada a um ângulo menor que 70° em relação à peça de trabalho. Entretanto, foi possível verificar no trabalho de Castro e Scotti (2013), que não foi aplicado nenhum ângulo acima de 45° para execução das goivagens.

Na Figura 6 é possível verificar o esquema representativo de um bocal de corte a plasma.

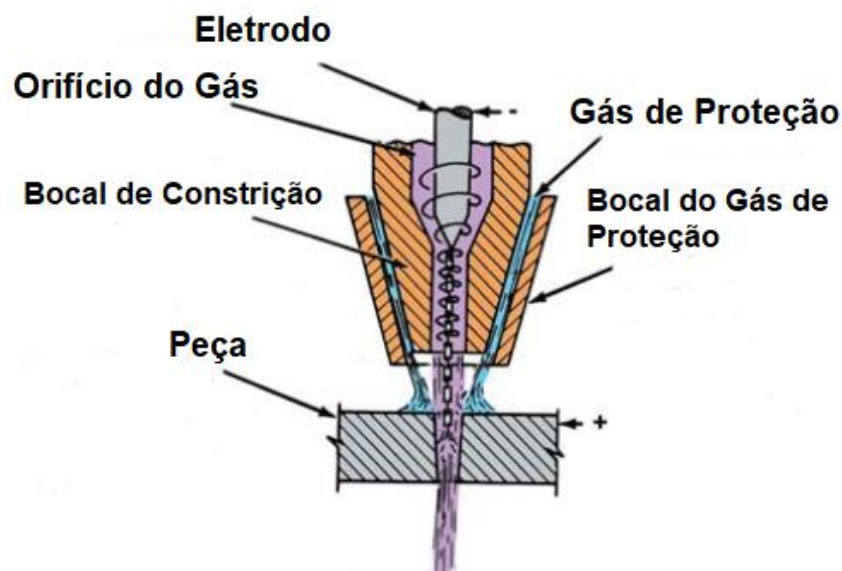


Figura 6 – Bocal de corte a plasma (Traduzido de Weld Handbook, 2001)

Já na Figura 7 são apresentadas as diferenças dos consumíveis de uma tocha do processo de goivagem a plasma, em que a tocha serve de suporte para os consumíveis. O distribuidor de gás é feito de material isolante, tendo como principal finalidade, direcionar o gás de uma forma rotacional. O eletrodo é o responsável pela passagem de corrente. O bico

tem o papel de restringir o arco de plasma e guiá-lo para o corte. A capa é responsável pela sustentação e alinhamento dos consumíveis e isolamento elétrico do bocal externo. O bocal, por sua vez, guia o fluxo de jato de ar coaxial.

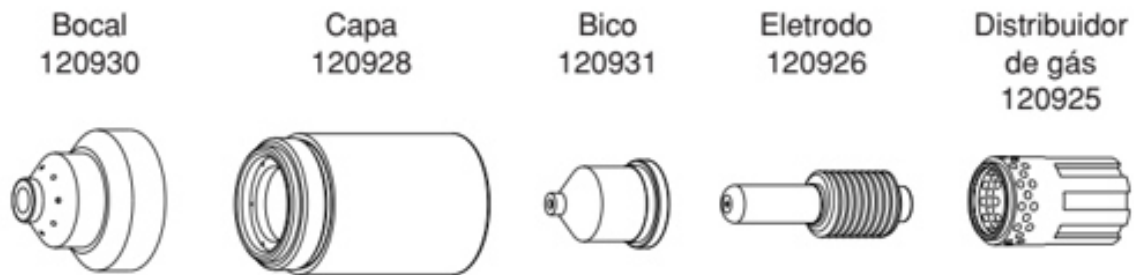


Figura 7 – Formas de consumíveis de uma tocha do processo de goivagem a plasma (HyperTherm, 2003)

Dentre estes consumíveis, os que mais se desgastam e exigem trocas mais frequentes, são o bico e o eletrodo, respectivamente. O bico, quando desgastado, perde a forma circunferencial de seu orifício de saída. Esse desgaste provoca alteração do comportamento do arco plasma, ou seja, o plasma pode alterar sua direção de saída, gerando irregularidades durante o processo de goivagem. A ponta é a região do eletrodo que mais sofre desgaste, no qual é responsável pelo contato elétrico e geração de centelha. Quando esta ponta se desgasta, há grande dificuldade de abertura do arco, impossibilitando a operação, sendo necessário, neste caso, sua troca imediata. Por isso sempre é importante verificar a integridade dos consumíveis antes de se iniciar uma goivagem ou corte, para se obter um processo controlado, eficiente e preciso.

Segundo os estudos de Silva (2012), o arco elétrico usado em processos de plasma também é chamado de arco plasma. Quando a corrente elétrica flui entre a tocha plasma (cátodo) e a peça de trabalho (ânodo), o arco plasma é considerado transferido. Alternativamente, quando a corrente elétrica flui entre o eletrodo e o bocal da tocha, o arco plasma é considerado não transferido. Embora os dois modos de operação usem o calor do arco plasma para emergir o bocal, o modo transferido é o que corta porque o "calor impulsivo" útil da peça de trabalho é aplicado mais eficientemente quando o arco está em contato elétrico com ela. No arco não transferido, o gás fornece o calor necessário para a fusão às peças; isso pode ser usado para unir materiais. Na Figura 8 é apresentado um desenho esquemático dos dois tipos de arco elétrico para tochas de plasma.

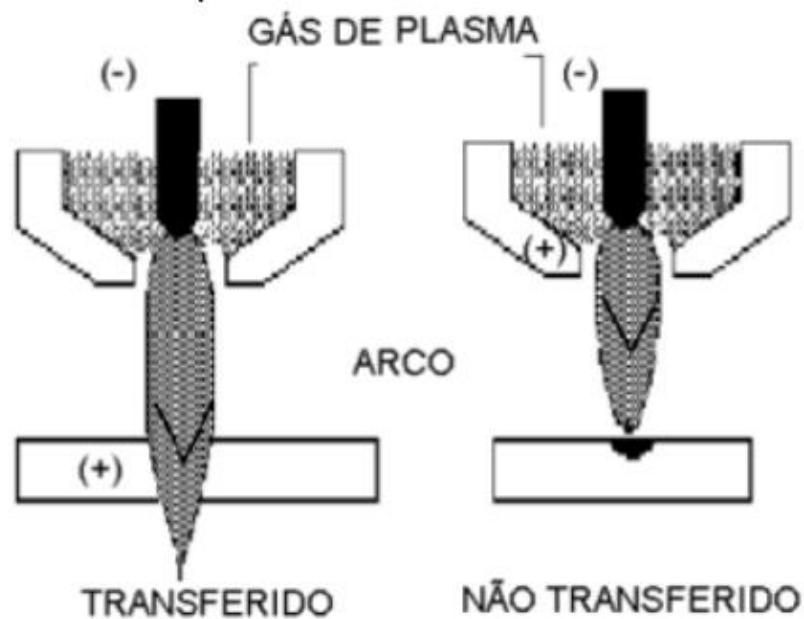


Figura 8 – Modos de transferência do arco de plasma (Silva, 2012)

Conforme Tavares (2009), existem dois tipos de partida para abertura de arco. A primeira, conforme ilustrado na Figura 9 (a), é a partida por contato entre o eletrodo e o bico (curto-circuito) que estão conectados à fonte de plasma. A pressão do gás que é responsável pelo distanciamento entre o eletrodo e o bico, gerando o arco. Este arco piloto é autossustentável (corrente CC). A segunda, ilustrada na Figura 9 (b), é a partida por alta frequência em que se utiliza uma tensão elétrica (entre 5 e 10 kVCA) em elevada frequência para gerar o arco piloto. Este método é aplicado em sistemas no qual o eletrodo é refrigerado por líquido. Um inconveniente deste tipo de partida é que ele pode causar interferências na rede elétrica, caso não haja um aterramento adequado.

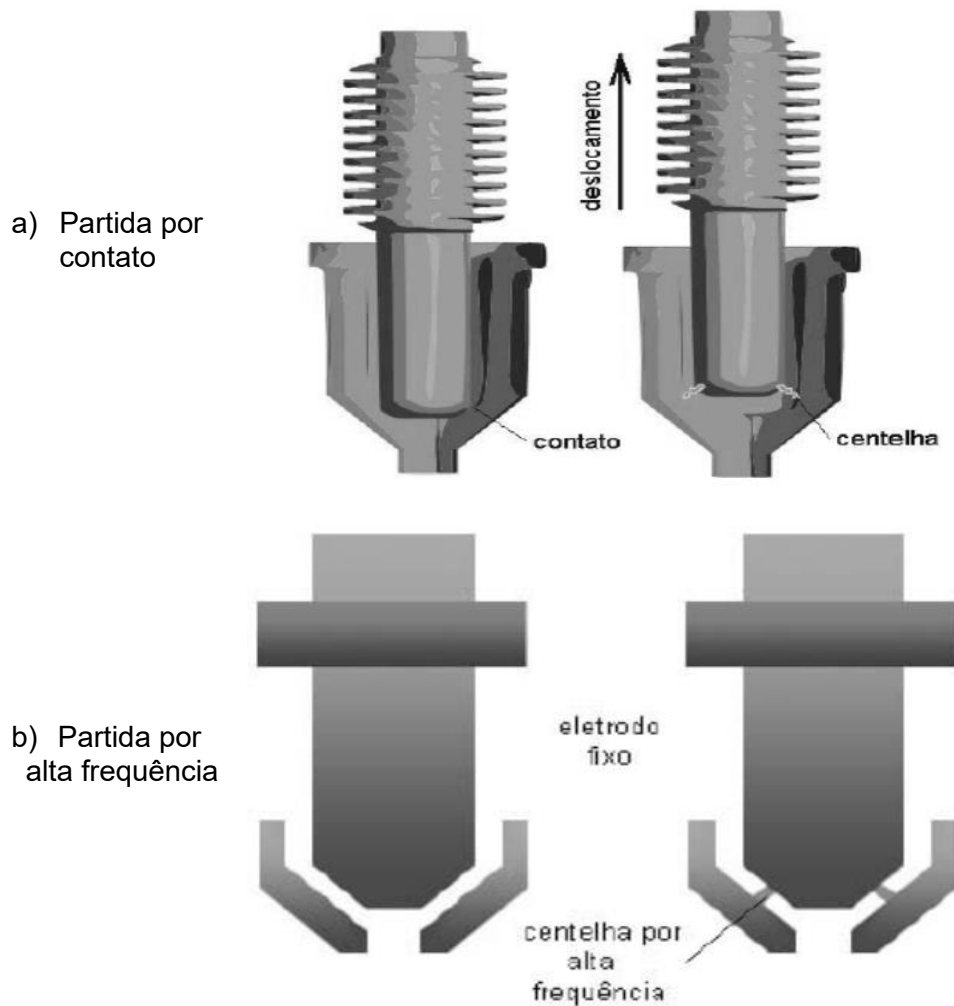


Figura 9 – Modos de partida para abertura de arco (Tavares, 2009)

### 2.2.6 Comparação entre os Processos de Remoção

A goivagem a ar com um eletrodo de grafite produz fumos potencialmente prejudiciais à saúde. O material da peça é fundido pelo arco no final da vareta de carbono. O jato de ar causa uma forte explosão do metal fundido, que expulsa o material líquido da poça de fusão. A alta temperatura provoca uma forte reação dos componentes do metal líquido com o ar, evaporando grande parte do metal fundido em finas gotículas. Isso cria uma fase que consiste em vapor de metal, pó de carvão e derivados de metal. Normalmente, esta reação de goivagem com eletrodo de grafite produz fumos em um nível que está muito além do que pode ser visto em um ambiente de soldagem. A exposição às toxinas de metal base, que podem intensificar o problema, depende do material a ser goivado. Uma vantagem do processo de goivagem com eletrodo de grafite é que, como ele é protegido pelo ar atmosférico, não produz poluentes como ozônio ou óxidos de nitrogênio.

A quantidade de fumos produzida é significativamente menor quando o processo de goivagem a plasma é aplicado para realizar uma mesma operação. No entanto, o gás plasma utiliza uma menor quantidade de ar para empurrar o metal líquido do que a goivagem a ar com eletrodo de grafite. Isso é feito com muito menos "intensidade" do que com um eletrodo de grafite. Como resultado, há muito menos vaporização de metal líquido e reações com o ambiente. Quando o ar é usado como gás de plasma, ocorrem outras reações que eliminam "alguns fumos", porém o volume produzido é muito maior do que a goivagem com eletrodo de grafite. A quantidade de fumos produzidos é significativamente reduzida quando o gás de plasma é inerte. Atualmente, o gás inerte do fluxo de plasma protege o metal líquido da atmosfera circundante e tem poucas chances de reagir com o ar. Na maioria das vezes, isso resulta em um nível muito baixo de fumaça (ROBERT, 2006).

Corroborando com o estudo de Robert (2006), o trabalho de Fazakas e Machedon (2017), apresentou um comparativo da concentração de micropartículas no ambiente de trabalho, geradas pelos diferentes processos de goivagem. O processo que menos apresentou micropartículas, foi o de goivagem a plasma. A goivagem com eletrodo revestido, foi o processo que apresentou o mais alto nível de concentração de partículas, que pode ser explicado pelo do gás (fonte externa) para expulsar o material fundido.

Ao se tratar do nível de ruídos gerados por esses processos, um benefício adicional da goivagem a plasma sobre a goivagem com eletrodo de carbono é que gera menos ruído. Em equivalentes aplicações, a goivagem a plasma gera cerca de 10 dB a menos de ruído do que a goivagem com eletrodo grafite. No entanto, o uso de proteção auditiva ainda é necessário quando se utiliza goivagem a plasma e os níveis de ruído podem variar de acordo com a distância do arco (TAVARES, 2009).

Ainda de acordo com Robert (2006), os resultados dos testes mostram que os níveis de ruído do processo de goivagem com eletrodo de grafite são tão elevados que, apesar do uso de protetores auriculares, os níveis continuam altos, o que significa que o processo pode ser usado por apenas alguns minutos por dia. Os limites toleráveis para o uso do processo por mais tempo durante o dia aumentam quando os níveis de ruído da goivagem a plasma são reduzidos. Sendo assim, medições de ruído devem ser realizadas para cada caso específico, para determinar os níveis de proteção adequados e o tempo de exposição do operador.

Ao se avaliar a qualidade dos processos, a goivagem a arco de plasma tem algumas vantagens em comparação com a goivagem com eletrodo de grafite. A utilização do eletrodo de grafite pode contaminar o material de base com excesso de carbono. Este excesso volta a solidificar na região, criando as condições ideais para que ocorram mecanismos de difusão e



resultem em uma camada rica em carbono. Este fato pode gerar fragilidade nessas regiões, aumentando o risco de surgirem defeitos.

Fazakas, Seculin, Machedon e Pop (2015), realizaram um trabalho sobre a utilização do processo de goivagem com eletrodos revestidos, com eletrodo de grafite e goivagem a plasma, em estruturas soldadas. A pesquisa consistiu na goivagem de um aço estrutural, da qualidade S275JR e na comparação das superfícies obtidas pelos processos. A Figura 10, mostra como ficaram os aspectos superficiais de cada processo de goivagem.



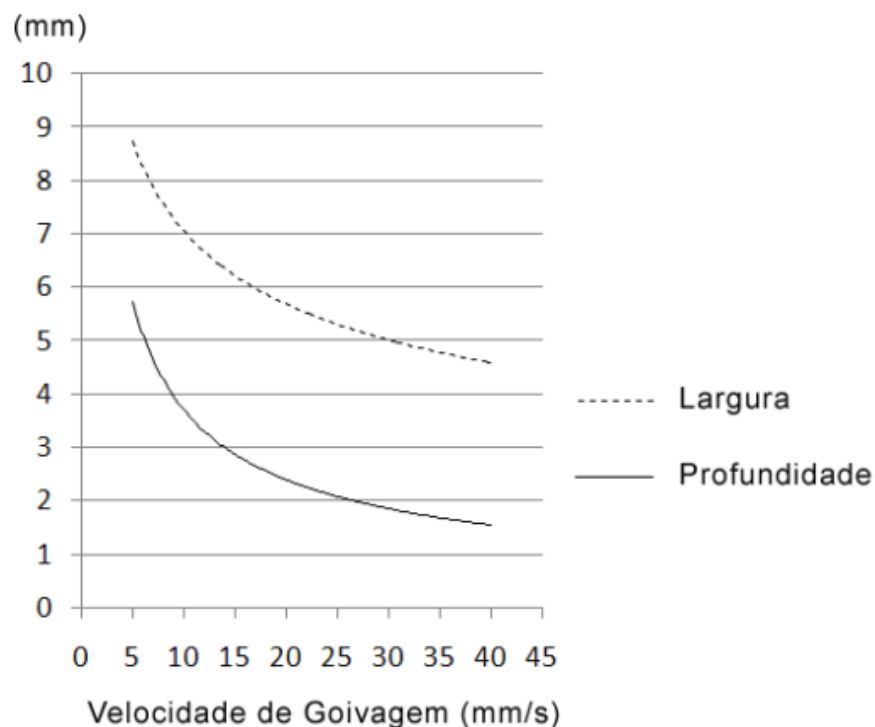
Figura 10 – Aspectos superficiais obtidos por processos de goivagens (Fazakas et al. 2015)

Fica claro com este estudo realizado, que a qualidade superficial da goivagem a arco de plasma é bem superior às demais. Torna-se ainda mais gritante essa diferença, quando o processo passa de manual para mecanizado. Por esses e outros motivos, conforme já discutido anteriormente, este trabalho optou pela utilização da goivagem a plasma mecanizada.

### 2.2.7 Efeito das Principais Variáveis do Processo de Goivagem a plasma Sobre a Geometria da Remoção

Castro e Scotti (2013) realizaram um estudo, que visou auxiliar futuros operadores da fonte Powermax1650, na regulagem dos parâmetros do processo de goivagem a plasma, para obter-se uma profundidade, largura e operacionalidade desejada de uma peça a ser goivada. Eles observaram que as variáveis mais influentes na operação de goivagem a plasma são a

corrente, a velocidade de goivagem, a distância do bico à peça (DBP) e o ângulo de ataque da tocha, assumindo que outros parâmetros, como pressão do ar comprimido, tipo e dimensão do bocal estejam dentro do recomendado pelo equipamento. Quanto maior a corrente, maior a remoção de material; quanto maior a velocidade de deslocamento da tocha, menor é o volume de material removido, no entanto de forma não linear, conforme pode ser verificado na Figura 11.



**Figura 11 - Relação entre a velocidade de goivagem e a largura e profundidade da região removida, utilizando uma corrente de 100 A, DBP de 11 mm e ângulo de ataque de 30 °, em uma chapa de aço carbono de 12,7 mm de espessura (Castro e Scotti, 2013)**

Na sequência do trabalho, Castro e Scotti (2013) desenvolveram um envelope operacional para remoção de material. Na Figura 12 é ilustrado esse envelope operacional. A região “A” representa o limite físico de operação, ou seja, a menor distância entre a tocha e a peça que se pode trabalhar sem encostar a tocha na peça. A região “B”, é a região na qual o arco não se mantém mais aceso, devido à grande distância entre o bico e a peça. A região “C”, por sua vez, é considerada como uma região não operacional, devido à maior dificuldade de remoção do material fundido, bem como severas irregularidades.

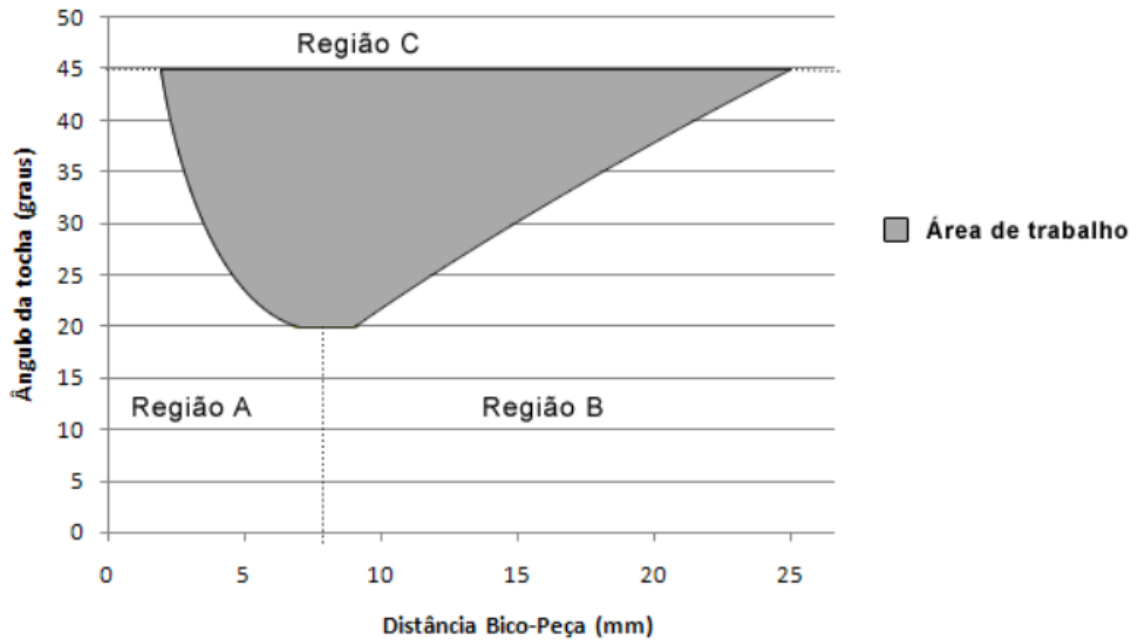


Figura 12 – Envelope operacional de goivagem a plasma. Corrente de 100 A, velocidade de goivagem de 10 mm/s, em uma chapa de aço carbono de 12,7 mm de espessura (Castro e Scotti, 2013)

O acabamento também foi avaliado nos estudos de Castro e Scotti (2013), podendo apresentar grandes variações. Não obstante, existe uma faixa de trabalho em que se obteve um ótimo acabamento na região goivada, conforme é possível comparar entre as duas goivagens da Figura 13 (a) e (b).

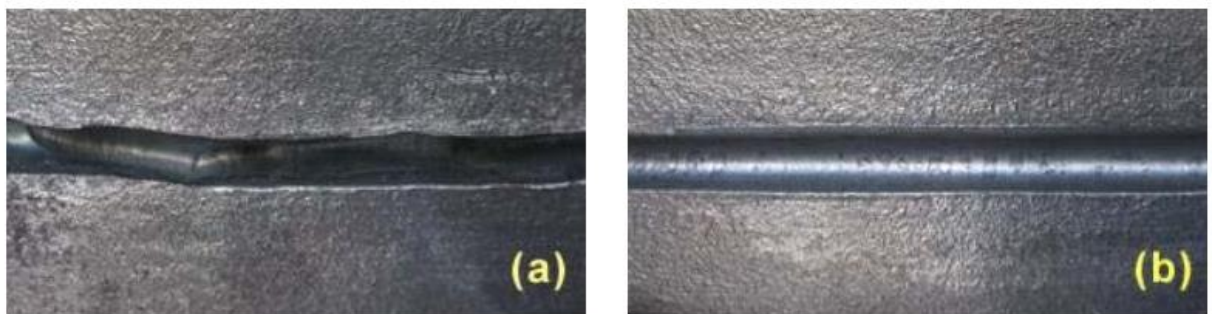


Figura 13 – Aparência de regiões goivadas com diferentes parâmetros: (a) DPB de 5 mm e ângulo de ataque de 45°; (b) DPB de 7 mm e ângulo de 20°, ambas com corrente de 100 A e velocidade de goivagem de 10 mm/s (Castro e Scotti, 2013)

Na Figura 14 são mostradas as áreas geradas pela combinação entre ângulo da tocha versus distância do bocal. Os parâmetros compreendidos na área hachurada do gráfico, geram um arco de plasma que consegue retirar, de uma maneira mais uniforme, todo o material fundido, apresentando uma região goivada com ótimos acabamentos.

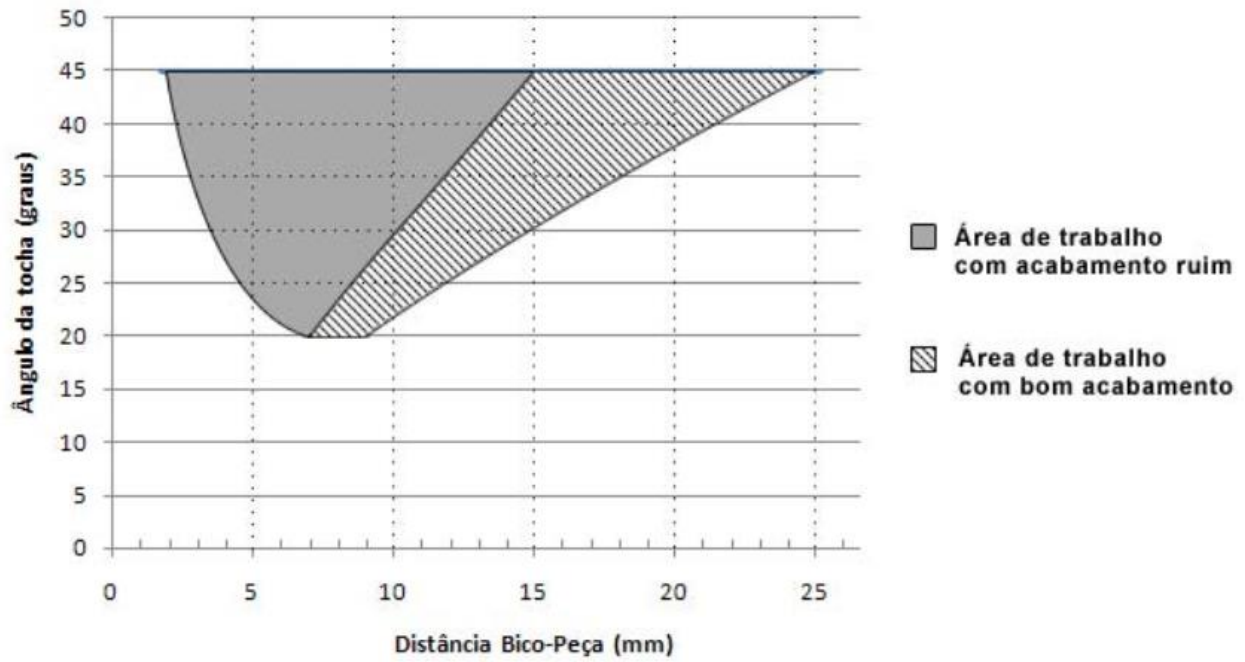


Figura 14 – Refinamento do envelope operacional, indicando a região de regulação de parâmetros para se obter um melhor acabamento em goivagem sobre a superfície da chapa (Castro e Scotti, 2013)

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Experimentalmente, o trabalho se desenvolve de forma linear, cujos detalhes são apresentados no decorrer desse capítulo. Porquanto, o objetivo principal desse estudo é a parametrização do processo de goivagem por plasma a ar comprimido, necessários para a remoção proposital de material em regiões de interesse de uma junta soldada.

A sequência de execução da metodologia experimental segue o fluxograma da Figura 15.

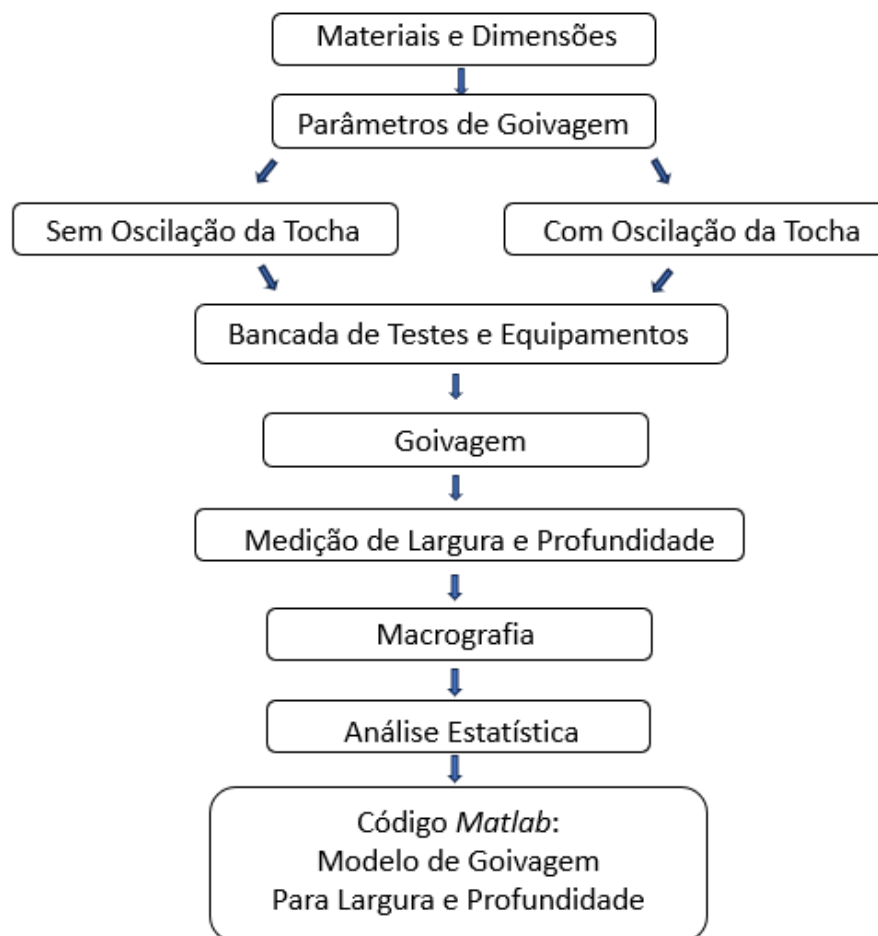


Figura 15 – Fluxograma para execução da Metodologia Experimental

Sabe-se que os parâmetros mais comuns e que influenciam de forma efetiva a remoção de material por goivagem são: corrente, velocidade de deslocamento da tocha (velocidade de goivagem), distância do bico à peça (DBP), ângulo de ataque da tocha e pressão do gás, além do tipo e dimensões do bico de corte da tocha. Neste caso, os bocais adquiridos para execução dos testes, para a tocha utilizada, possuem material e dimensão únicos, eliminando assim esta variável.

Inicialmente, decidiu-se avaliar o desempenho do processo de remoção aproveitando-se os parâmetros de corte do manual do fabricante (uma vez que ele não sugere parâmetros para goivagem), o qual indica valores de velocidade de acordo com a corrente utilizada e com a espessura a ser cortada, mantendo a DBP, ângulo de ataque e pressão constantes.

Após a execução dos testes realizados inicialmente, viu-se a necessidade de se ampliar a largura da região de remoção, o que seria possível através da oscilação angular da tocha. Sendo assim, decidiu-se realizar uma segunda abordagem, onde também foram agregadas as demais variáveis do processo, buscando assim definir um modelo matemático para a estimação tanto da largura quanto da profundidade de goivagem em função dos parâmetros considerados significativos por meio de análise estatística.

Dessa forma, esta etapa do trabalho foi desenvolvida em duas fases, detalhadas adiante nos Itens 3.4 e 3.5.

### **3.1 Material de Base**

Com o intuito de garantir uma melhor repetibilidade dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles a serem utilizados em remoções de material em juntas soldadas, utilizou-se placas de teste do aço estrutural naval ASTM A131, de grau EH36, de dimensões 500 x 300 x 35 mm (comprimento, largura e espessura), buscando um comprimento de goivagem no qual seja possível atingir um regime térmico, conforme mostra a Figura 16. Já na Figura 17, é possível verificar a composição química deste aço.

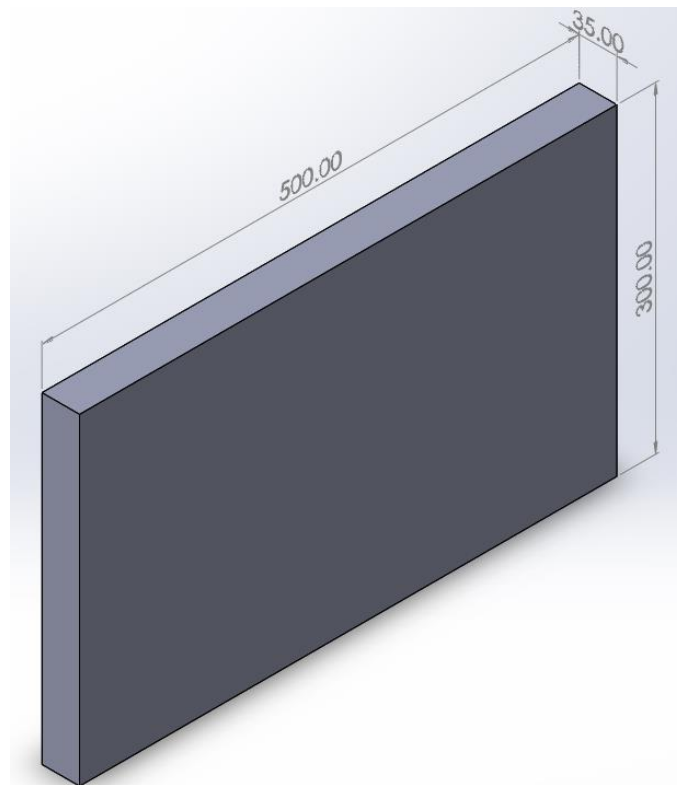


Figura 16 - Croqui da placa para testes

Grau	Faixa de Espessura (mm)	Composição Química (% em massa)				
		C	Si	Mn	P	S
AH-32				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
.....				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
DH-32				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60	0,035 máx.	0,035 máx.
.....				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
EH-32	6,00 ≤ E ≤ 80,00			0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
.....				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
AH-36			0,50 máx.	0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
.....				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
DH-36		0,18 máx.		0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60	0,035 máx.	0,035 máx.
.....				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
EH-36				0,70 ~ 1,60 0,90 ~ 1,60		
.....						

Figura 17 - Composição química nominal do aço estrutural naval ASTM 131 EH36 (AÇOBRIL, 2022)

### 3.2 Equipamentos

A fonte utilizada para a goivagem foi a Powermax1650 da HyperTherm, como mostra a Figura 18.



Figura 18 – Fonte de plasma - Powermax 1650 (HyperTherm, 2003)

Para a execução dos testes, optou-se por utilizar uma mesa de coordenadas XY visando a automatização do processo de goivagem e conseqüentemente, um maior controle e precisão dos parâmetros analisados.

Nas Figura 19 (a) e (b) são apresentadas a bancada experimental utilizada para este estudo, cujos equipamentos e componentes estão listados abaixo.



- (a)
- 1: acionamento (eixo X);
  - 2: acionamento (eixo Y);
  - 3: oscilação (tecimento);
  - 4: tocha;
  - 5: placa para testes.



- (b)
- 1: controlador;
  - 2: acionamento da fonte;



**Figura 19 - Equipamentos da Bancada Experimental**

### 3.3 Consumíveis

Para realização das goivagens, foram utilizados consumíveis da mesma marca da fonte para as correntes de 60, 80 e 100 amperes, todos compatíveis com a tocha T100M MATCH TCH ASSY 25, que pode ser visualizada na Figura 20. Já na Figura 21, é possível observar os consumíveis utilizados, bem como seus números de série.



Figura 20 – Tocha Mecanizada, modelo T100M MATCH TCH ASSY 25

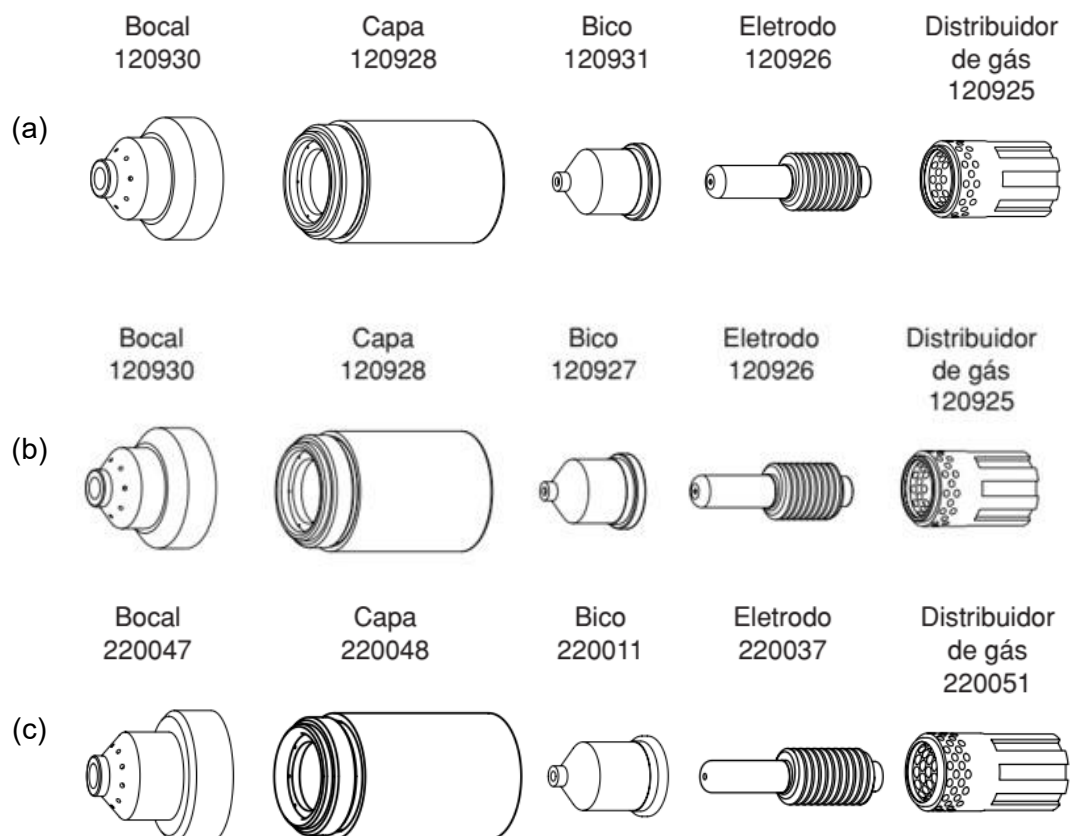


Figura 21 - Consumíveis protegidos para tocha T100M de (a) 60 A, (b) 80 A e (c) 100 A.

### 3.4 Goivagem sem Oscilação Angular

Nesta primeira abordagem, foram inicialmente adotados os parâmetros de velocidade de corte sugeridos pelo fabricante para uma espessura de material de 12,7 mm, em três níveis, sendo que o nível intermediário é o valor de velocidade sugerido como ótimo, o nível mais alto sendo a velocidade máxima de corte permitida e o nível inferior de velocidade seria o valor intermediário decrescido da diferença entre o valor máximo e o otimizado, permitindo assim um espaçamento quantitativo equalizado entre os níveis. Para a corrente, os níveis selecionados foram de 60, 80 e 100 A, de acordo com seus respectivos consumíveis mencionados anteriormente. A DBP foi fixada em 1,5 mm, de acordo com a recomendação do fabricante da fonte para o corte a plasma, visto que o fabricante não sugere valores de DPB para o processo de goivagem. A pressão do ar comprimido regulada na fonte e recomendada pelo fabricante para operações de goivagem é entre 50 e 60 psi, neste caso, optou-se por utilizar uma pressão intermediária de 55 psi, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros para remoção por goivagem sem oscilação angular**

Teste	Pressão do ar (psi)	DBP (mm)	Ângulo de Ataque (graus)	Corrente (A)	Velocidade de Goivagem - $V_G$ (mm/s)
1	55	1,5	45	60	5,1
2				60	11,4
3				60	17,8
4				80	7,6
5				80	16,5
6				80	25,4
7				100	11,0
8				100	24,1
9				100	37,3

### 3.5 Goivagem com Oscilação Angular

Devido à variação de largura e profundidade dos perfis de juntas soldadas, foi necessária uma busca por parâmetros de goivagem que atendam essas variações. Assim, para obter maiores larguras, optou-se por aplicar oscilação da tocha durante o processo de goivagem.

Foram realizados pré-testes aplicando oscilação da tocha para verificar como seria a cinética do movimento. Inicialmente, foram utilizadas 3 variações de frequência: 1, 2 e 3 Hz. Assim, observou-se que os testes que continham maiores frequências e maiores amplitudes

não apresentaram reprodutibilidade, fazendo com que a frequência de tecimento fosse fixada em 1 Hz.

Na Figura 22, é possível verificar alguns dos pré-testes executados com oscilação da tocha de plasma, no intuito de avaliar e conhecer melhor as condições operacionais.

É possível verificar que em algumas goivagens, todo o material fundido foi removido e o perfil de largura e profundidade se manteve ao longo de toda remoção. Todavia, houve algumas goivagens que não foram bem-sucedidas, ocorrendo até mesmo um desvio de trajetória, que pode ser explicado pelo fato de que o material fundido, não foi totalmente removido. Este material se acumulou nas bordas da remoção, ocasionando um impacto com a tocha em movimento, fazendo com que tocha se desviasse do seu trajeto normal de remoção. Houve também goivagens em que o perfil de largura e profundidade se manteve, porém, com leve acúmulo de material no fundo da remoção. Este fato pode ser explicado pelo uso de uma elevada velocidade de goivagem, não havendo tempo suficiente para o material ser removido ou por uma pressão do ar comprimido insuficiente.

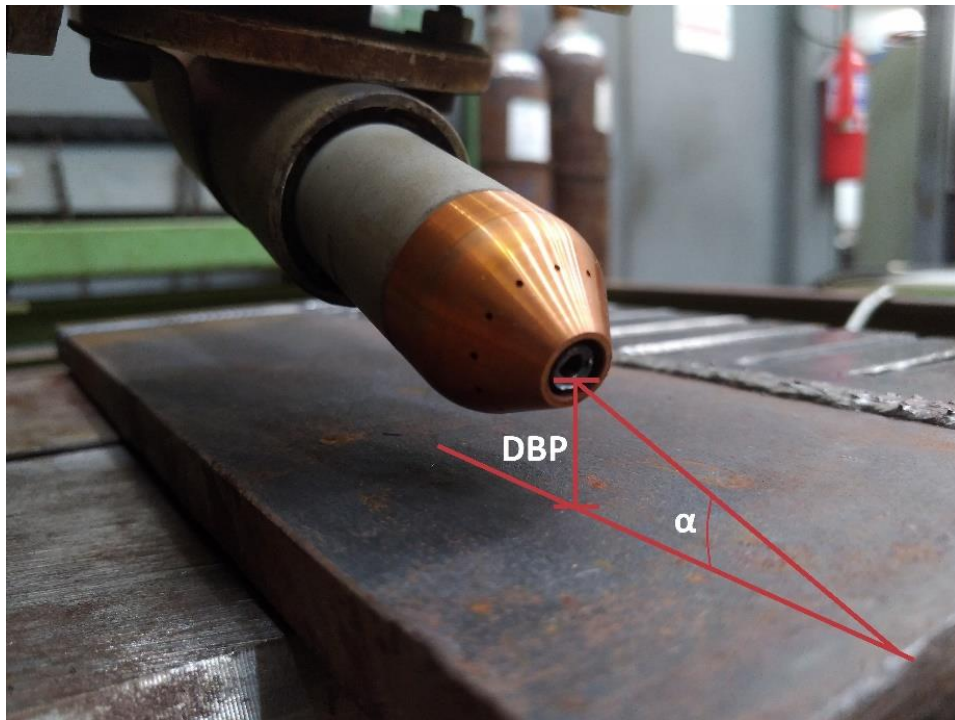


Figura 22 – Pré-testes de goivagem com oscilação da tocha

Conforme já citado anteriormente, nesta abordagem foram consideradas as variáveis influentes nos resultados de remoção (corrente, DBP, amplitude de oscilação, pressão do ar, ângulo de ataque e a relação  $V_G/F$  - relação entre velocidade de goivagem e frequência). Como a frequência de oscilação foi fixada em 1 Hz, a relação  $V_G/F$  representa diretamente a velocidade de goivagem.

Para referência, a medição da DBP foi tomada como sendo a distância entre a região inferior do orifício de saída do bico e a superfície da placa de teste, a qual foi referência para a medição do ângulo de ataque da tocha ( $\alpha$ ), como ilustra a Figura 23.





**Figura 23 - Representação da referência para a medição da distância entre bico e peça (DBP) e do ângulo de ataque ( $\alpha$ );**

Diante dessas seis variáveis e uma variação delas em uma quantidade mínima para a definição de um comportamento de cada uma, ou seja, em três níveis, o total de experimentos para um planejamento experimental fatorial completo seria de 729 testes, o que demandaria uma elevada quantidade de testes, consumíveis e materiais de base, além do tempo necessário para a execução de todos eles. Dessa forma, foi adotado um Planejamento Composto Central de Face Centrada, levantado através de um software estatístico, no qual foi possível uma redução do número de testes para 46, sendo os testes 45 e 46 representando o ponto central.

A Figura 24 apresenta o Planejamento Experimental fornecido pelo software estatístico, enquanto a Tabela 2 apresenta o mesmo planejamento contemplando os valores utilizados para cada fator.

Standard Run	2**(6-1) central composite, nc=32 ns=12 n0=2 Runs=46 ([No active dataset					
	Corrente	DBP	VG/f	Amplitude	Pressão	Angulo
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	1	1
3	-1	-1	-1	1	-1	1
4	-1	-1	-1	1	1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1	1
6	-1	-1	1	-1	1	-1
7	-1	-1	1	1	-1	-1
8	-1	-1	1	1	1	1
9	-1	1	-1	-1	-1	1
10	-1	1	-1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1	-1
12	-1	1	-1	1	1	1
13	-1	1	1	-1	-1	-1
14	-1	1	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1	-1	1
16	-1	1	1	1	1	-1
17	1	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	-1	-1	1	-1
19	1	-1	-1	1	-1	-1
20	1	-1	-1	1	1	1
21	1	-1	1	-1	-1	-1
22	1	-1	1	-1	1	1
23	1	-1	1	1	-1	1
24	1	-1	1	1	1	-1
25	1	1	-1	-1	-1	-1
26	1	1	-1	-1	1	1
27	1	1	-1	1	-1	1
28	1	1	-1	1	1	-1
29	1	1	1	-1	-1	1
30	1	1	1	-1	1	-1
31	1	1	1	1	-1	-1
32	1	1	1	1	1	1
33	-1	0	0	0	0	0
34	1	0	0	0	0	0
35	0	-1	0	0	0	0
36	0	1	0	0	0	0
37	0	0	-1	0	0	0
38	0	0	1	0	0	0
39	0	0	0	-1	0	0
40	0	0	0	1	0	0
41	0	0	0	0	-1	0
42	0	0	0	0	1	0
43	0	0	0	0	0	-1
44	0	0	0	0	0	1
45 (C)	0	0	0	0	0	0
46 (C)	0	0	0	0	0	0

Figura 24 - Planejamento Composto Central de Face Centrada para 6 fatores a 3 níveis

Tabela 2. Parâmetros para a execução dos testes de remoção com oscilação

Teste	Corrente (A)	DBP (mm)	V <sub>G</sub> /F	Amplitude (mm)	Pressão do ar (psi)	Ângulo de ataque (°)
1	60	5	3,0	10	50	20,0
2	60	5	3,0	10	60	45,0
3	60	5	3,0	30	50	45,0
4	60	5	3,0	30	60	20,0
5	60	5	6,0	10	50	45,0
6	60	5	6,0	10	60	20,0
7	60	5	6,0	30	50	20,0
8	60	5	6,0	30	60	45,0
9	60	15	3,0	10	50	45,0
10	60	15	3,0	10	60	20,0
11	60	15	3,0	30	50	20,0
12	60	15	3,0	30	60	45,0
13	60	15	6,0	10	50	20,0
14	60	15	6,0	10	60	45,0
15	60	15	6,0	30	50	45,0
16	60	15	6,0	30	60	20,0
17	100	5	3,0	10	50	45,0
18	100	5	3,0	10	60	20,0
19	100	5	3,0	30	50	20,0
20	100	5	3,0	30	60	45,0
21	100	5	6,0	10	50	20,0
22	100	5	6,0	10	60	45,0
23	100	5	6,0	30	50	45,0
24	100	5	6,0	30	60	20,0
25	100	15	3,0	10	50	20,0
26	100	15	3,0	10	60	45,0
27	100	15	3,0	30	50	45,0
28	100	15	3,0	30	60	20,0
29	100	15	6,0	10	50	45,0
30	100	15	6,0	10	60	20,0
31	100	15	6,0	30	50	20,0
32	100	15	6,0	30	60	45,0
33	60	10	4,5	20	55	32,5
34	100	10	4,5	20	55	32,5
35	80	5	4,5	20	55	32,5
36	80	15	4,5	20	55	32,5
37	80	10	3,0	20	55	32,5
38	80	10	6,0	20	55	32,5
39	80	10	4,5	10	55	32,5
40	80	10	4,5	30	55	32,5
41	80	10	4,5	20	50	32,5
42	80	10	4,5	20	60	32,5
43	80	10	4,5	20	55	20,0
44	80	10	4,5	20	55	45,0
45	80	10	4,5	20	55	32,5
46	80	10	4,5	20	55	32,5



### 3.6 Procedimentos Experimentais

Para execução dos testes de goivagem, foram adotados os seguintes procedimentos experimentais:

#### Montagem da chapa base

1. Verificar se a chapa se encontra livre de oxidações, principalmente no contato com a garra de aterramento;
2. Posicionar a chapa de teste na bancada experimental;
  - a. Fixar a chapa na bancada com grampos posicionadores;
  - b. Verificar o nivelamento da chapa utilizando um nível de bolha e realizar ajustes, caso seja necessário;
  - c. Verificar o alinhamento da chapa em relação ao eixo de deslocamento da tocha, de forma a garantir que a goivagem seja feita paralelamente a lateral do material de base.

#### Montagem da fonte

1. Verificar a conexão da tocha;
2. Verificar se o aterramento foi feito adequadamente;
  - a. Montar a garra diretamente na chapa base;
  - b. Remover toda oxidação no contato entre a garra e a chapa com uma escova de aço, garantindo o melhor contato elétrico possível;
3. Verificar se os cabos (aterramento, tocha, cabo de energia) não estão enrolados;
4. Verificar se o conjunto de consumíveis (difusor, eletrodo, bico, capa e bocal) estão:
  - a. Montados adequadamente de acordo com o nível de corrente desejado;
  - b. Não apresentem desgaste ou avarias;
  - c. Limpos;
5. Ligar a fonte;

#### Mesa de coordenadas XY

1. Ligar o controlador da mesa de coordenadas;
2. Ligar o computador de interface com a mesa;
  - a. Abrir o programa de comandos da mesa XY;
3. Verificar se a gaveta para recolhimento do material removido está adequadamente posicionada na parte inferior da bancada de testes;

### Ajuste e posicionamento da tocha

1. Posicionar o goniômetro entre a chapa de teste e a tocha para ajustar o ângulo de ataque desejado;
2. Posicionar a tocha de maneira que o ângulo de trabalho seja paralelo à sua trajetória de deslocamento. Este ajuste é feito na mesa controladora através do motor responsável pelo movimento de oscilação;
3. Ajustar manualmente a DBP (eixo Z) desejada fazendo a medição com o paquímetro;
4. Utilizando o controlador da mesa de coordenadas, posicionar a tocha na região de interesse da goivagem;
5. Marcar o ponto inicial da trajetória antes da chapa de testes, a uma pequena distância, garantindo a uniformidade da remoção do material ao longo do comprimento a ser goivado;
6. Marcar o ponto final da trajetória 30 mm após o fim da chapa de testes.

### Cálculo dos parâmetros do processo

1. Após o ajuste do ângulo de ataque da tocha e DBP, medir a distância (L), conforme mostra a Figura 25. entre o eixo do motor de oscilação e a chapa tendo como base a inclinação do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) regulado;

OBS: Somente para os casos em que houver oscilação da tocha.

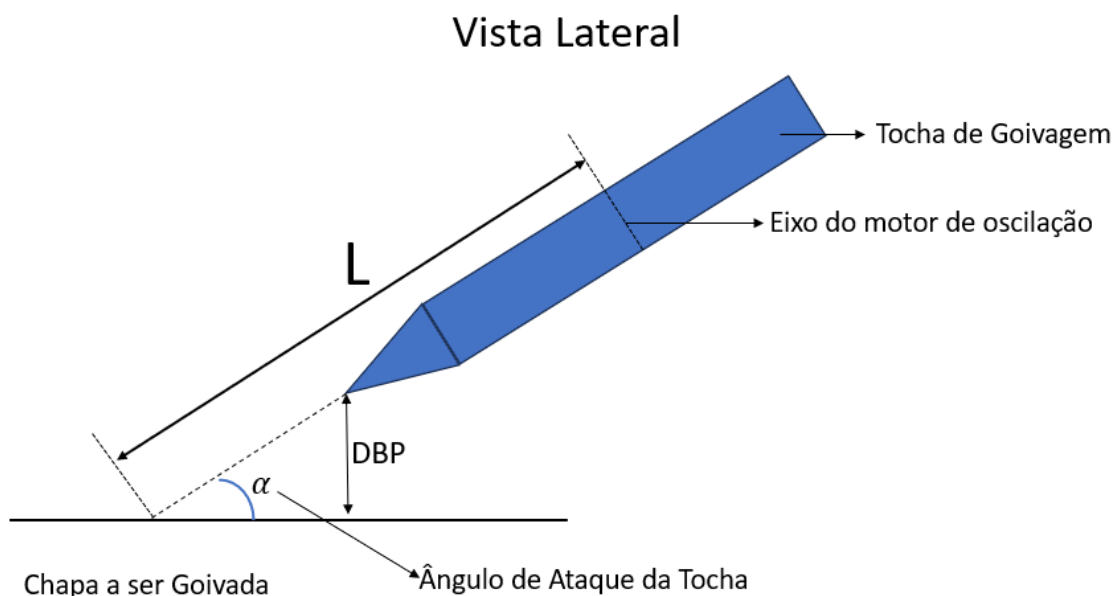


Figura 25 – Referência para medição da distância (L)

Sendo que:

$\alpha$  = ângulo de ataque da tocha de goivagem [°];

L = Distância entre o eixo do motor de oscilação até a chapa [mm];

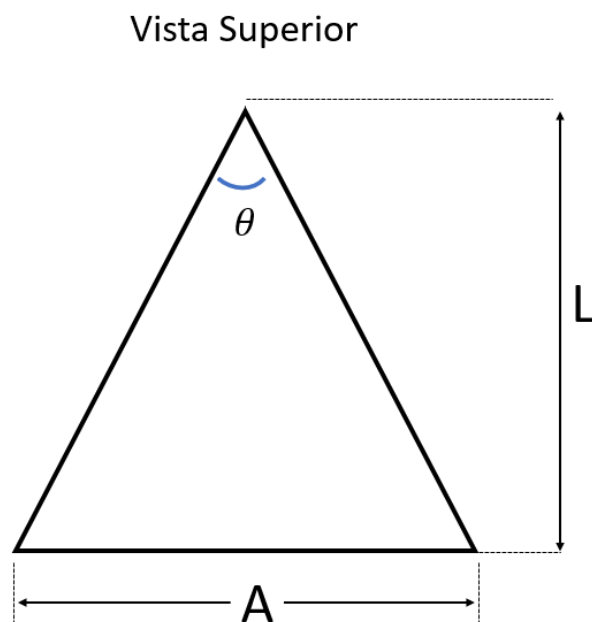
DBP = Distância do bico de contato até a peça [mm];

Após a medição da distância (L), é necessário realizar o cálculo do ângulo ( $\theta$ ). No planejamento prévio, foram determinados 3 níveis de amplitudes de remoções: 10, 20 e 30 mm de largura, entretanto, no programa da mesa controladora, tem-se que efetuar a entrada em graus e não em milímetros, sendo necessário realizar um cálculo para obter a relação da amplitude mm – grau para cada combinação de DPB - ângulo de ataque. O cálculo tem como referência a Figura 26.

Admitindo que:

$\theta$  = ângulo inserido na interface da mesa controladora [°];

A = Amplitude requerida no planejamento experimental [mm];



**Figura 26 - Referência para cálculo do ângulo ( $\theta$ )**

O ângulo ( $\theta$ ), que será inserido no controlador, pode ser calculado de acordo com a seguinte fórmula (1):

$$\theta = 2 * \frac{180}{\pi} * \arctan \left( \frac{A}{L} \right); \quad (1)$$

Em que:

$\theta$  = ângulo inserido na interface da mesa controladora [°];

A = Amplitude requerida no planejamento experimental [mm];

$\alpha$  = ângulo de ataque da tocha de goivagem [°];

L = Distância entre o eixo do motor de oscilação até a chapa [mm];

### **Regulagem de parâmetros**

1. Os parâmetros:  $V_G$  (velocidade de goivagem) [mm/s], frequência [Hz] e amplitude de oscilação ( $\theta$ ) [°] são inseridos na interface da mesa controladora.
2. Ajustar os parâmetros requeridos na fonte: corrente e pressão do ar comprimido;

### **Verificação de itens de segurança**

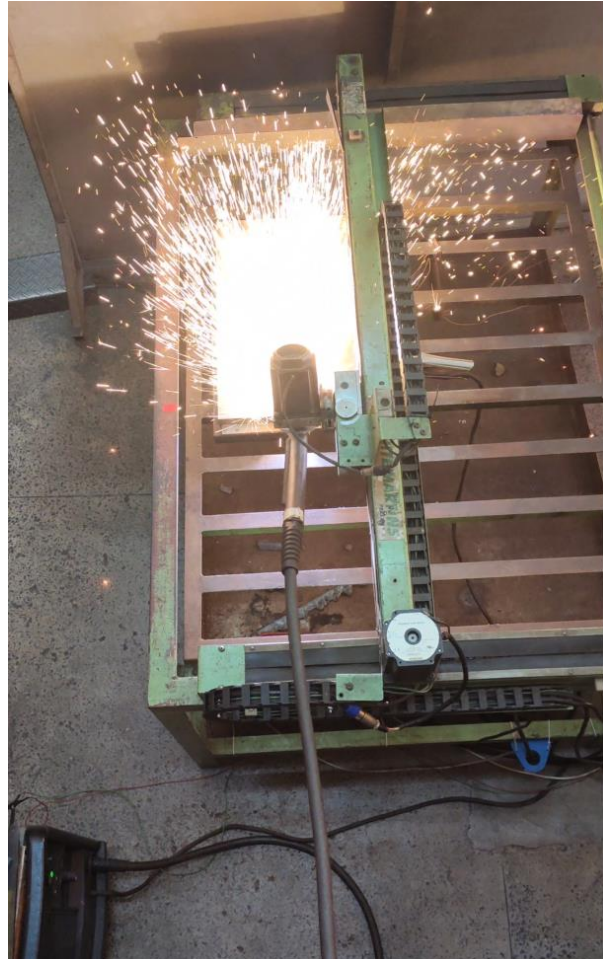
1. Colocar o extrator de fumos na região acima da bancada de goivagem;
2. Colocar os devidos Equipamentos de proteção individual (EPI's - máscara e protetor auricular);
3. Colocar o biombo protegendo e isolando o ambiente de trabalho;

### **Acionamento**

1. Ligar o extrator de fumos;
2. Iniciar a goivagem;
3. Disparar o acionamento da fonte para a abertura do arco piloto;
4. Executar o deslocamento na mesa de coordenadas;

Na Figura 27, é possível visualizar como ocorreu um dos processos de remoção por goivagem a plasma, com oscilação da tocha, observando o material sendo fundido e removido. É possível verificar também a gaveta para coleta de material, abaixo da bancada, o biombo protegendo o ambiente de trabalho, bem como a fonte do plasma no canto inferior esquerdo da foto. Ainda que este processo gere menos partículas e fumos,

comparados a outros processos de goivagem, este ainda ocorre de forma ruidosa e com bastante emissão de fumos, respingos e particulados.



**Figura 27 - Processo de Remoção por Goivagem a plasma**

Seguindo os procedimentos experimentais explicados anteriormente, juntamente com o planejamento experimental prévio estabelecido, foram executados todos os ensaios previstos, os quais serão mostrados no item a seguir de resultados e discussão.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Goivagem sem Oscilação Angular

Após a execução das goivagens sem oscilação, foram realizadas as medições de largura e profundidade, as quais foram tomadas em três posições específicas (início, meio e fim das goivagens), cujos resultados médios são apresentados na Tabela 3.

Após as devidas medições, a placa de testes foi seccionada transversalmente na região das goivagens para a confecção de macrografias, utilizadas para avaliar o perfil de cada remoção.

**Tabela 3. Resultados obtidos na goivagem sem oscilação angular**

Teste	Largura Média (mm)	Profundidade Média (mm)
1	6,27	4,29
2	5,84	2,63
3	5,22	2,08
4	6,47	5,69
5	5,90	4,42
6	5,43	3,55
7	6,07	5,86
8	5,08	3,50
9	4,50	2,81

Dentre os resultados obtidos desta primeira abordagem, destacam-se três remoções que serão mostradas a seguir, na Figura 28. No Apêndice encontram-se todas as demais macrografias obtidas com os testes sem oscilação.

De acordo com o Teste 1, utilizando-se uma corrente de 60 A e velocidade de goivagem de 5,1 mm/s, foi possível observar um perfil homogêneo da remoção na peça, sem a presença de escórias e material refundido nas regiões mais profundas, apresentando um ótimo acabamento. Este comportamento já era esperado para uma velocidade de goivagem mais baixa que as demais, havendo, neste caso, tempo suficiente para fusão e remoção completa de todo material.

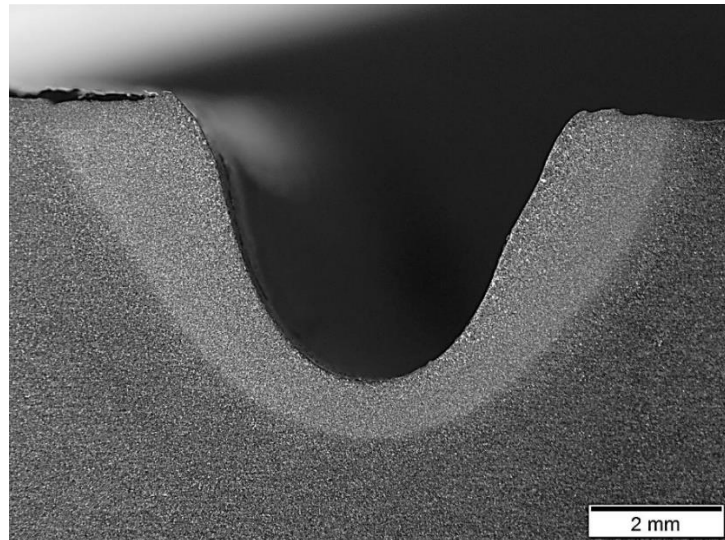
Ao empregar o Teste 4, utilizando-se uma corrente de 80 A e velocidade de goivagem de 7,6 mm/s, foi possível observar que praticamente não restou escória e material refundido remanescente nas regiões mais profundas, apresentando um bom acabamento. O teste apresentou a maior profundidade alcançada sem apresentar material refundido, visto que a maior profundidade foi obtida pelo Teste 7, todavia, com acabamento ruim e material refundido remanescente. Este comportamento pode ser explicado pela aplicação de uma velocidade de goivagem relativamente baixa, havendo tempo e energia suficiente para fusão e remoção de todo material.

Ao empregar o Teste 9, utilizando-se uma corrente de 100 A e velocidade de goivagem de 37,3 mm/s, foi possível observar um perfil de taça bem mais afunilado que os demais, grande volume de escória e material refundido nas regiões mais profundas e laterais, apresentando um acabamento ruim. Este comportamento era esperado para uma velocidade de goivagem bem elevada que as demais (37,3 mm/s), em que neste caso, não houve tempo e energia suficiente para fusão e remoção de todo material.

### Teste 1

$I = 60 \text{ A}$ ;  $V_G = 5,1$   
mm/s; DBP = 1,5 mm;  
Pressão do ar = 55 psi;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

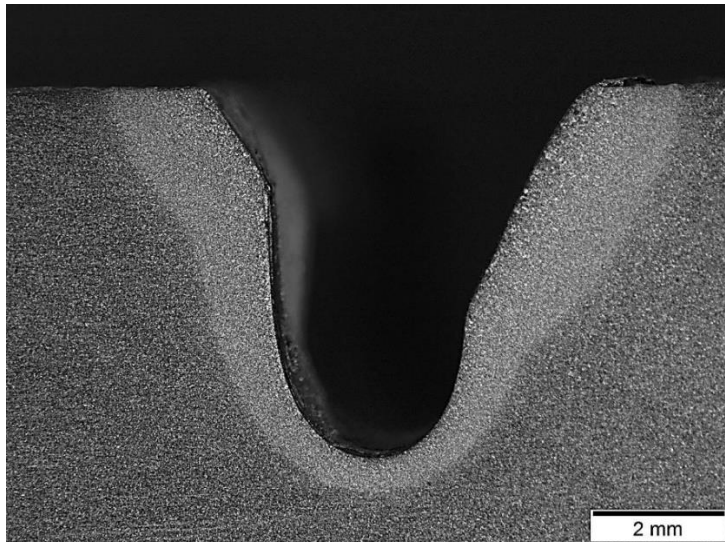
Largura média = 6,27  
mm;  
Profundidade média =  
4,29 mm;



### Teste 4

$I = 80 \text{ A}$ ;  $V_G = 7,6$   
mm/s; DBP = 1,5 mm;  
Pressão do ar = 55 psi;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

Largura média = 6,47  
mm;  
Profundidade média =  
5,69 mm



### Teste 9

$I = 100 \text{ A}$ ;  $V_G = 37,3$   
mm/s; DBP = 1,5 mm;  
Pressão do ar = 55 psi;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

Largura média = 4,50  
mm;  
Profundidade média =  
2,81 mm;

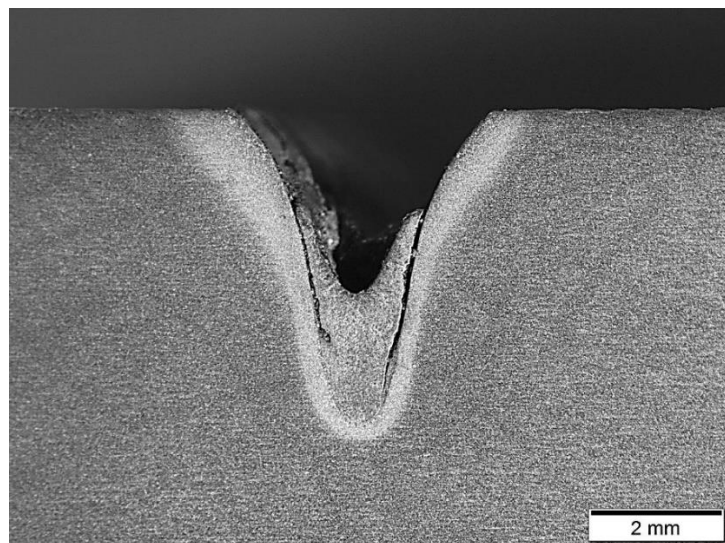


Figura 28 – Macrografias de remoções sem oscilação da tocha



Analisando os valores obtidos de largura e profundidade das remoções, nota-se que a largura obtida não sofreu muita variação, mesmo com a alteração da corrente e da velocidade de goivagem. Quanto à profundidade, os testes 4 e 7 foram os únicos que atingiram valores acima de 5 mm, que era o mínimo pretendido para a profundidade de uma possível região a ser removida em uma junta soldada.

A partir dos resultados obtidos de largura e profundidade, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) para determinar se os efeitos da corrente e velocidade de goivagem foram estatisticamente influentes e qual nível utilizado levaria à uma melhor remoção de material.

Considerando como variáveis independentes os parâmetros regulados para o processo (corrente e velocidade de goivagem), por meio da Análise de Variância foi possível observar que o efeito da corrente e velocidade de goivagem foram estatisticamente significativos, com índice  $p < 0,05$ , haja vista que as demais variáveis foram mantidas constantes para cada goivagem. Através desta análise, foram levantadas as curvas de tendência apresentadas na Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32. Conforme a análise, fica estabelecido que o efeito da corrente em seu valor intermediário (80 A) leva à uma maior remoção de material referente à largura e profundidade. Entretanto, se considerado a influência do efeito da velocidade de goivagem, obteve-se maiores remoções nos níveis inferiores de velocidade.

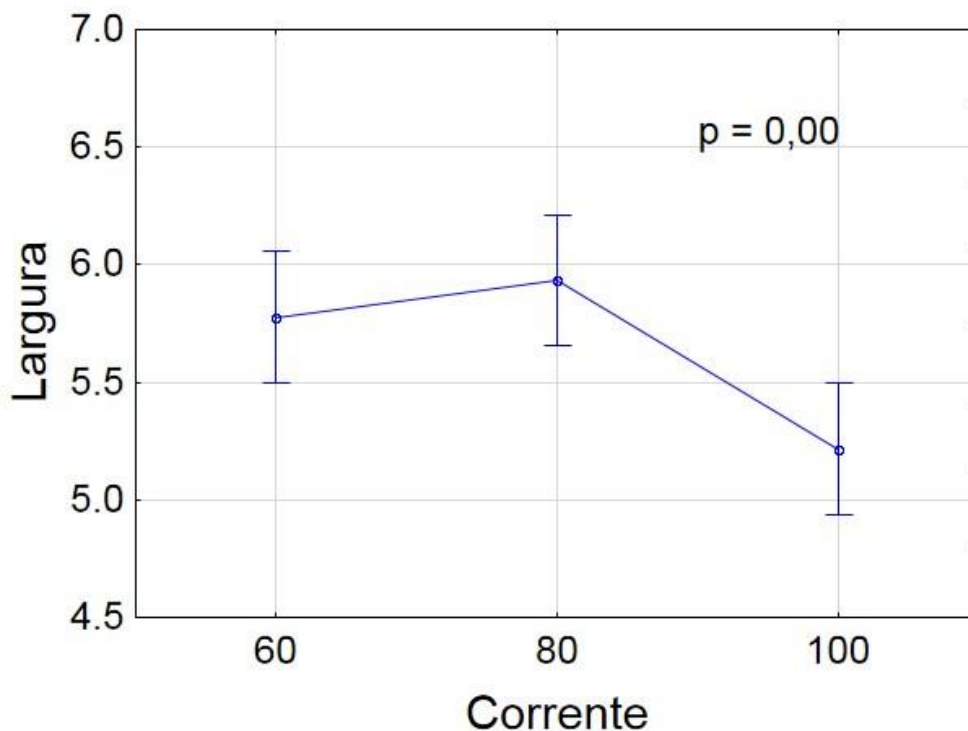


Figura 29 - Gráfico de tendência obtido da Análise de Variância (ANOVA) considerando-se a influência do efeito da corrente na largura da remoção

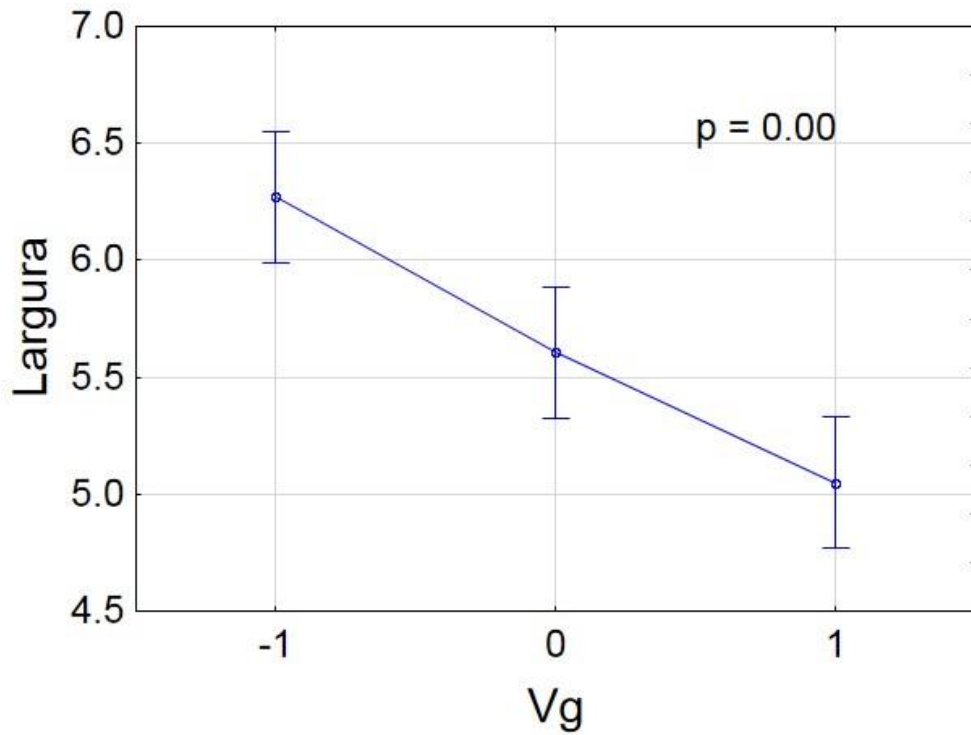


Figura 30 - Gráfico de tendência obtido da Análise de Variância (ANOVA) considerando-se a influência do efeito da velocidade de goivagem na largura

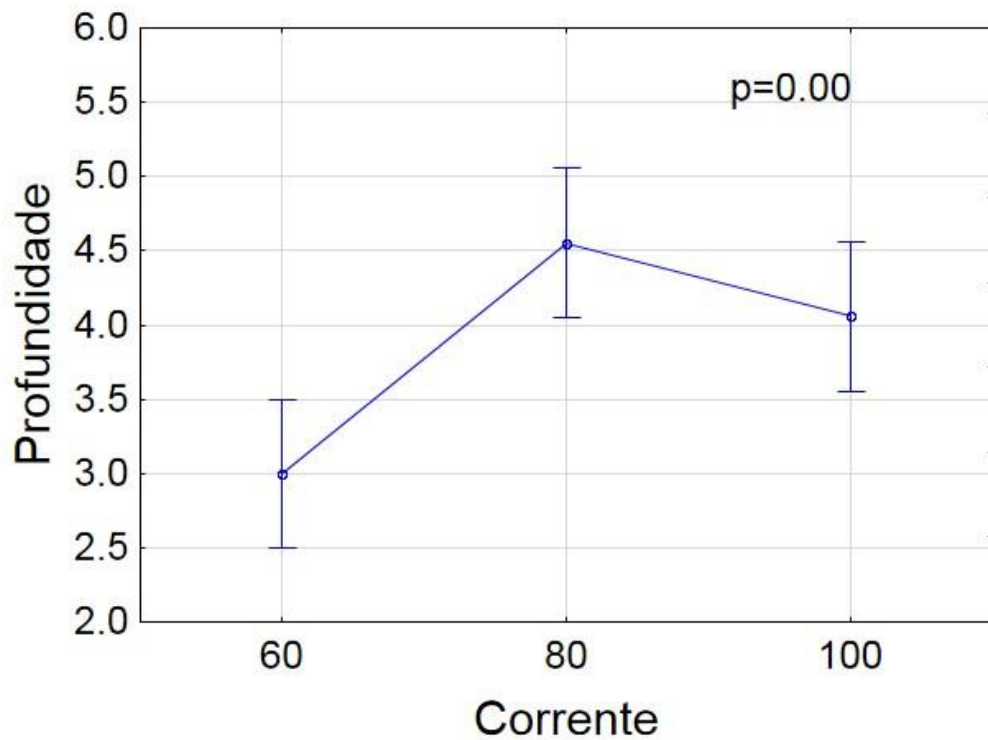


Figura 31 - Gráfico de tendência obtido da Análise de Variância (ANOVA) considerando-se a influência do efeito da corrente na profundidade da remoção

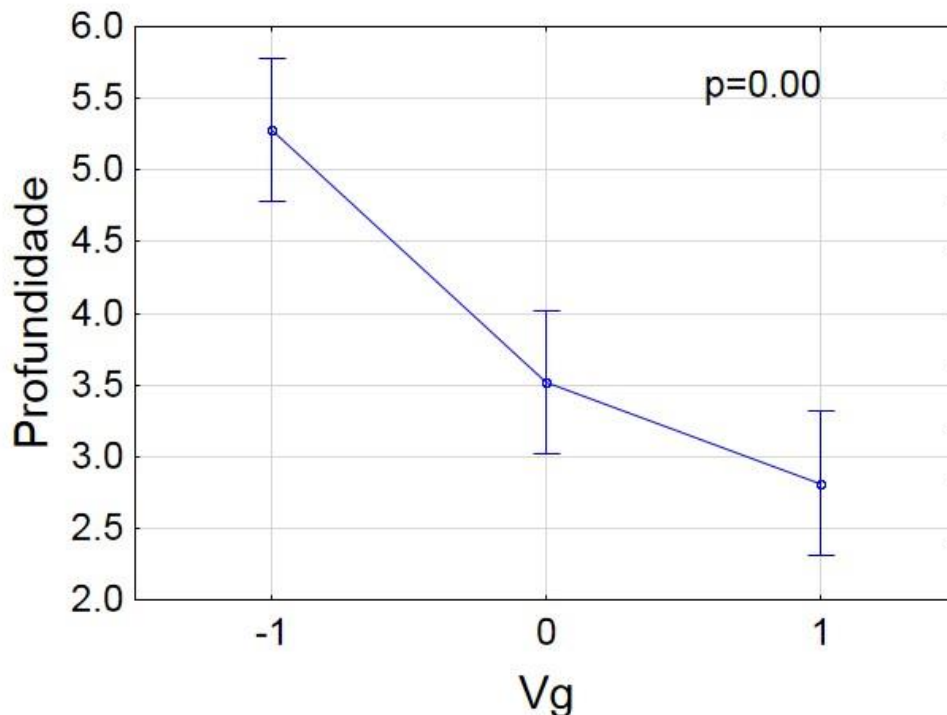


Figura 32 - Gráfico de tendência obtido da Análise de Variância (ANOVA) considerando-se a influência do efeito da velocidade de goivagem na profundidade

#### 4.2 Goivagem com Oscilação Angular

Nesta fase adotou-se o mesmo procedimento para obtenção das larguras e profundidades médias, utilizado para as amostras sem oscilação da tocha e, posteriormente, as regiões de remoção de material foram seccionadas e macrografadas para a obtenção dos perfis de largura e profundidade de cada teste, cujos resultados são representados na Tabela 4. Nesta tabela, os testes onde não houve abertura de arco em função da combinação de parâmetros foram grifados em cinza, enquanto aqueles demarcados em amarelo houve a abertura do arco, mas sem remoção mensurável de material.

Dentre os resultados obtidos desta segunda abordagem, ou seja, com oscilação da tocha, é possível destacar algumas remoções que serão mostradas a seguir, na Figura 33 (a) e (b), Figura 34 (a) e (b) e Figura 35 (a) e (b). No Apêndice encontram-se todas as demais remoções e macrografias obtidas com os testes.

Tabela 4. Resultados provenientes dos testes com oscilação angular

TESTE	Largura Média (mm)	Profundidade Média (mm)
1	12,39	2,31
2	11,28	6,95
3	30,45	2,26
4	29,83	0,00
5	10,89	3,91
6	10,08	0,33
7	31,91	0,00
8	28,99	1,02
9	12,73	3,95
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	30,69	0,40
13	0,00	0,00
14	12,67	1,47
15	28,63	0,29
16	0,00	0,00
17	11,14	8,65
18	12,38	3,82
19	31,37	3,31
20	30,07	3,67
21	12,05	3,71
22	10,88	4,91
23	30,90	1,99
24	31,99	0,87
25	0,00	0,00
26	12,65	9,72
27	29,19	5,62
28	0,00	0,00
29	12,31	6,09
30	0,00	0,00
31	0,00	0,00
32	29,37	2,41
33	19,53	6,10
34	20,41	5,87
35	18,97	5,51
36	20,96	4,41
37	21,71	6,01
38	20,93	2,79
39	11,52	4,41
40	31,26	2,61
41	21,13	4,36
42	20,14	4,27
43	20,97	1,29
44	19,68	4,69
45	20,18	4,99
46	20,77	4,95

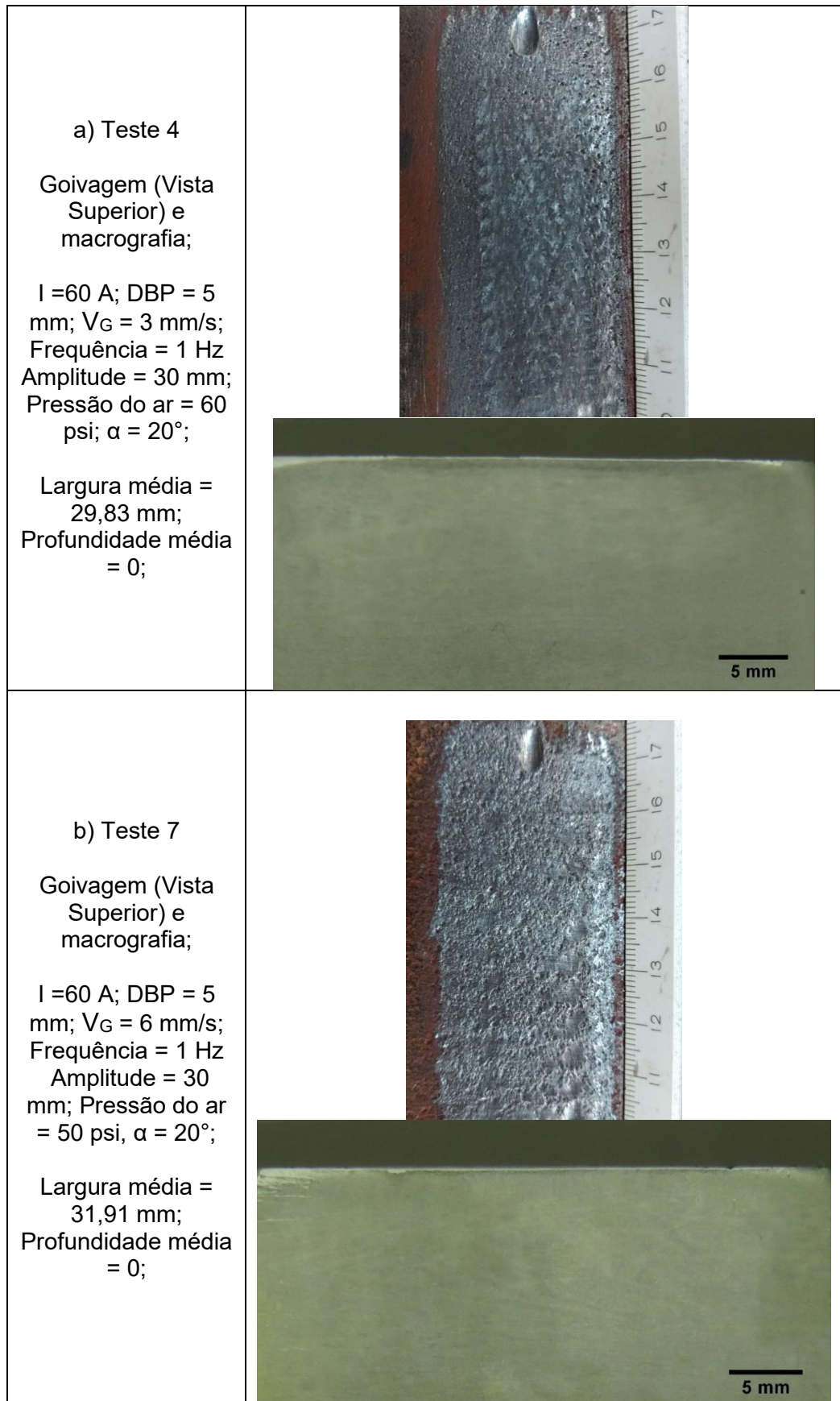


Figura 33 - Testes 4 e 7 - Remoção com oscilação da tocha

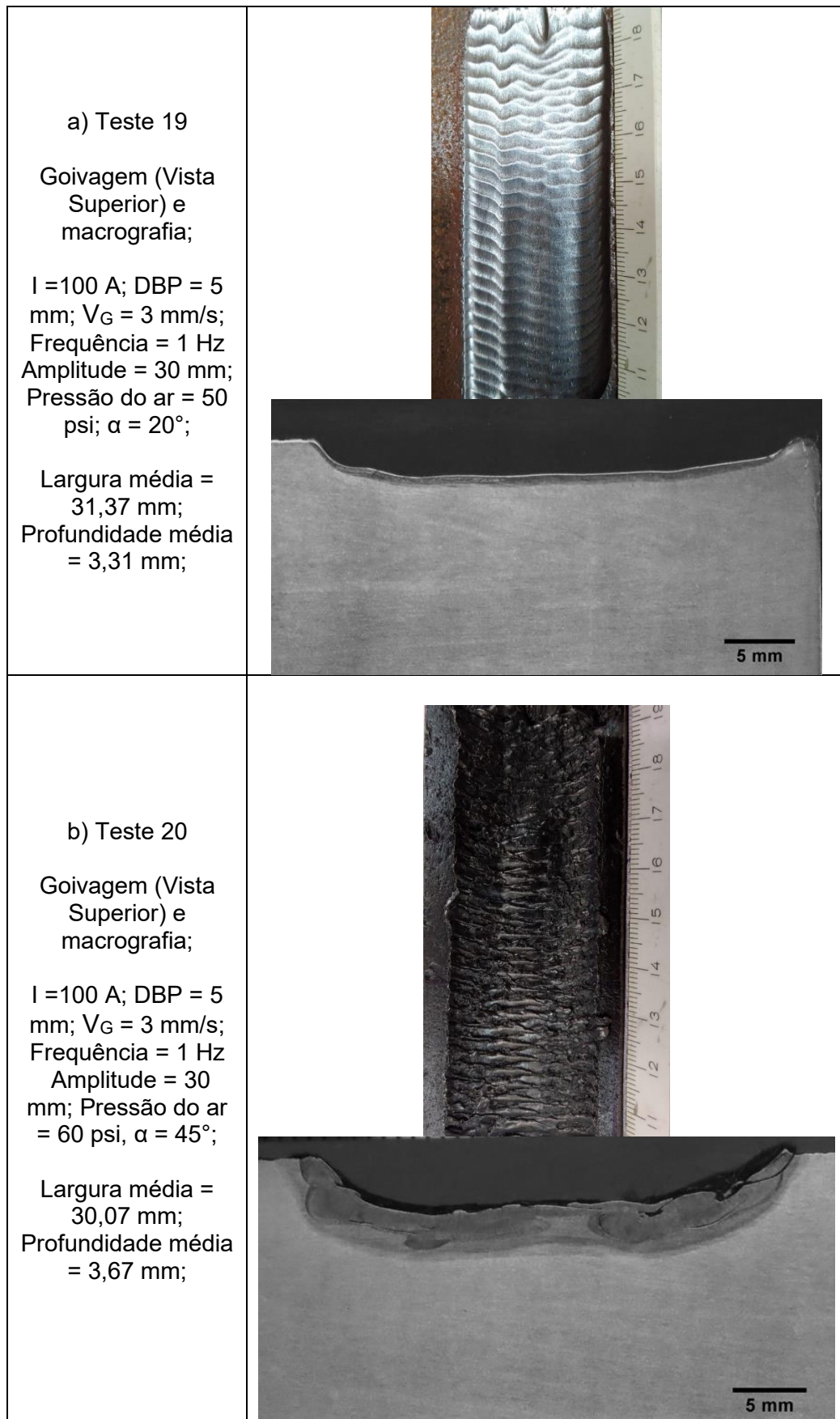


Figura 34 - Testes 19 e 20 - Remoção com oscilação da tocha



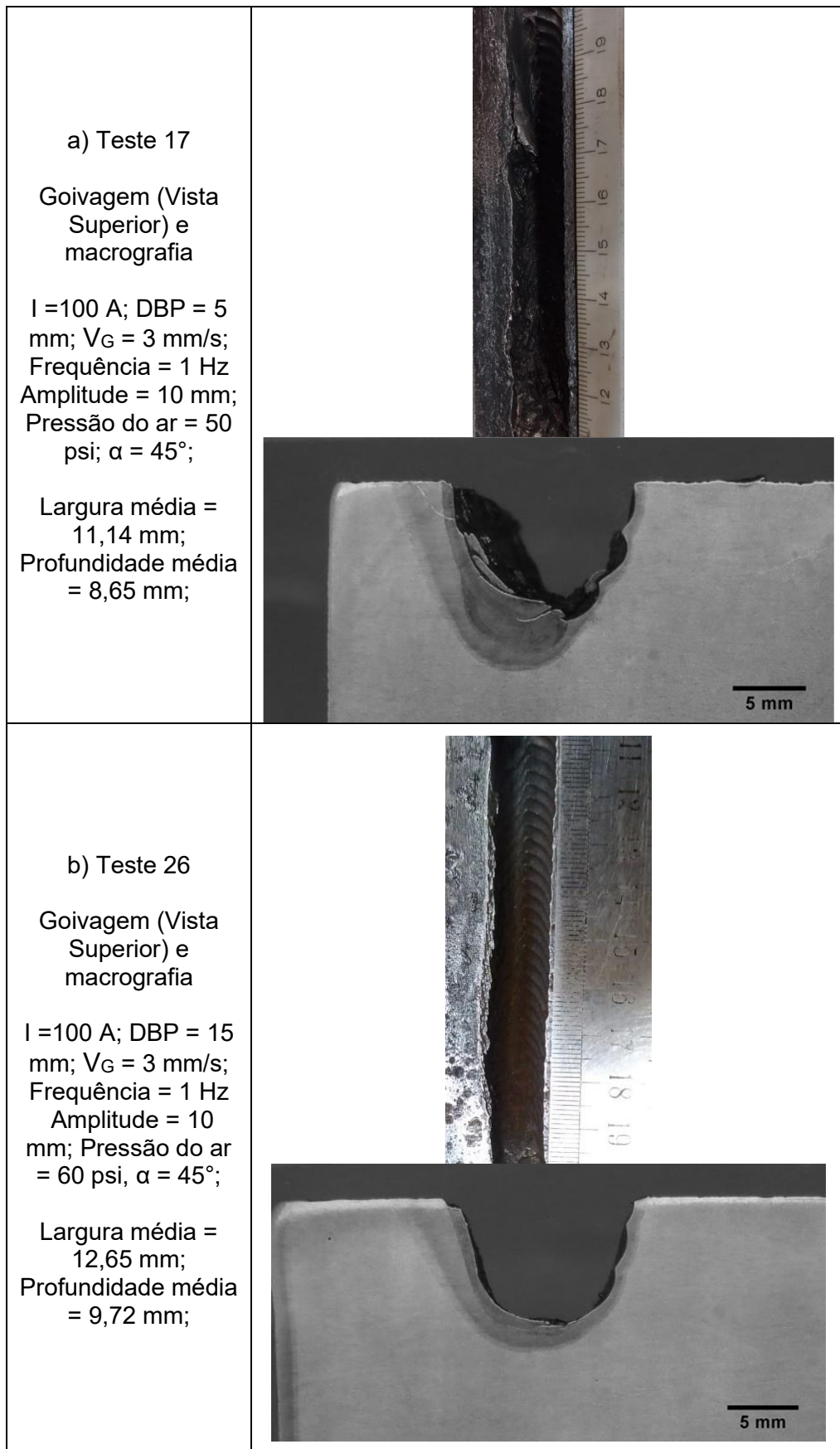


Figura 35 - Testes 17 e 26 - Remoção com oscilação da tocha

As peças que foram goivadas indicadas nos testes 10, 11, 13, 16, 25, 28, 30 e 31, conforme já explicado anteriormente (grifados na cor cinza da Tabela 4), não só, não sofreram uma remoção mensurável de material, como também, não foi possível a realização de transferência do arco para a peça. Isto pode ser explicado pela combinação de parâmetros, principalmente pelo ângulo de ataque baixo ( $20^\circ$ ), juntamente com o maior valor de DBP (15 mm), ou seja, a tocha estava mais distante da peça, sendo necessário um comprimento de arco muito grande, para que ele pudesse se transferir para a peça, o que não foi possível.

As peças que foram goivadas indicadas nos testes 4 e 7, são mostrados na Figura 33, ambos utilizando-se uma corrente de 60 A, ângulo de ataque de  $20^\circ$ , amplitude de 30 mm e uma DPB de 5 mm, foi possível observar que, de acordo com estas combinações de parâmetros, não foi possível realizar uma remoção significativa de material. Houve abertura do arco, que se transferiu para a peça, no entanto não efetuou uma remoção mensurável de material.

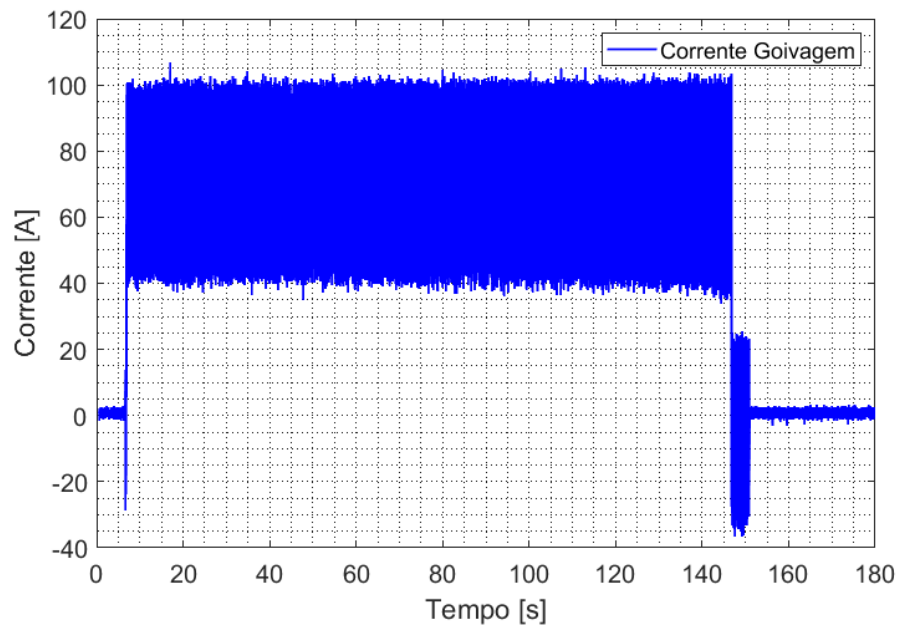
As peças que foram goivadas indicadas nos testes 19 e 20, mostrados na Figura 34, para ambos foram utilizados uma corrente de 100 A, amplitude de 30 mm, DBP de 5 mm e velocidade de goivagem de 3,0 mm/s, foram os testes que apresentaram as maiores profundidades, para o maior nível de amplitude (30 mm). Os parâmetros diferentes entre eles, foram a pressão do ar comprimido e o ângulo de ataque, parâmetros estes, que podem explicar a grande diferença entre essas remoções. Para a peça relacionada ao teste 19, com pressão do ar comprimido de 60 psi e ângulo de ataque de  $20^\circ$ , observou-se um valor médio de profundidade, ligeiramente menor que o Teste 20, em contrapartida, um ótimo acabamento, não restando material refundido na área goivada. Já a peça relacionada ao teste 20, apresentou uma profundidade ligeiramente maior, que pode ser explicada pelo maior ângulo de ataque ( $45^\circ$ ), todavia, com um acabamento ruim, restando na região inferior da remoção: escória e material refundido. Este acabamento ruim pode ser justificado pelo ângulo de ataque de  $45^\circ$ , que normalmente apresenta pior acabamento, se comparado com as goivagens com o ângulo de  $20^\circ$ , juntamente com a aplicação de uma pressão do ar comprimido de 50 psi, insuficiente para uma remoção completa.

As peças que foram goivadas indicadas nos testes 17 e 26, mostrados na Figura 35, ambos utilizando-se uma corrente de 100 A, amplitude de 10 mm, velocidade de goivagem de 3,0 mm/s e ângulo de ataque de  $45^\circ$ , foram os testes que apresentaram as maiores profundidades entre todos os testes. Este fato pode ser explicado devido a diversos motivos, sendo eles: ângulo de ataque de  $45^\circ$ , menor velocidade de goivagem e menor amplitude de oscilação, em que, para estes casos, o arco incide na região por mais tempo, elevando o nível de energia aplicado, sendo possível “escavar” mais, havendo tempo para fundir e remover o material. Ao se comparar o acabamento entre os dois testes, verificou-se que a peça

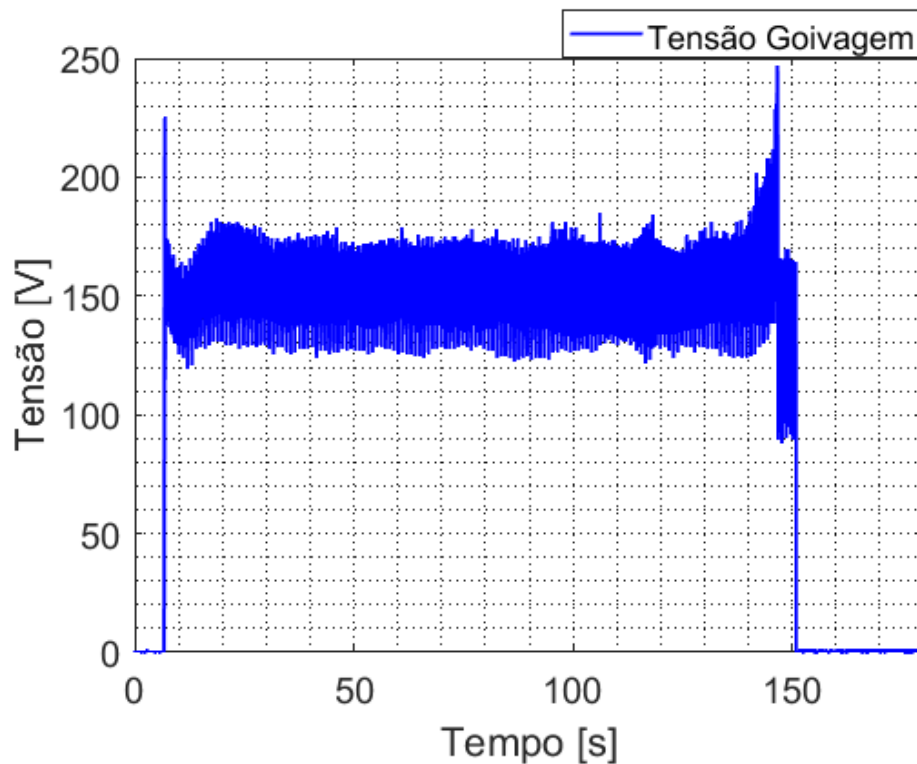


relacionada ao teste 17, por utilizar uma pressão do ar comprimido menor (50 psi), apresentou um acabamento pior que o Teste 26, com escória e material refundido remanescente na remoção.

De forma a exemplificar o comportamento dos sinais elétricos de tensão e corrente durante o processo de goivagem, realizou-se uma aquisição de sinais, que pode ser visualizada nas Figuras Figura 36 Figura 37. A corrente regulada na fonte para esta aquisição foi de 80 A. O sinal abrange desde a abertura inicial do arco piloto e, com a aproximação da tocha à placa de teste, há a transferência do arco para a peça, liberando a corrente de goivagem, iniciando o processo de remoção, a qual finaliza com a extinção do arco principal quando a tocha percorre toda junta da placa de teste, restando então somente o arco piloto. O operador então aciona o controlador da fonte apagando o arco piloto, finalizando a remoção.



**Figura 36 - Sinal de Corrente durante um passe de remoção**



**Figura 37 - Sinal de Tensão durante um passe de remoção**

Já na Figura 37 e Figura 38, encontra-se os mesmos sinais dos gráficos de tensão e corrente, porém com mais detalhe, em um intervalo de tempo bem mais curto (menos de 1s para o gráfico da corrente e 3s para o de tensão).

É interessante observar, no sinal de tensão (Figura 38), a frequência de oscilação da tocha de 1 Hz, no qual os picos e, principalmente os vales se alternam no intervalo de 1s. Isto ser explicado pois quando a tocha se desloca para as laterais da remoção, o comprimento do arco do plasma aumenta, por conseguinte, um aumento da tensão. O contrário ocorre (redução da tensão) quando a tocha está posicionada no centro.

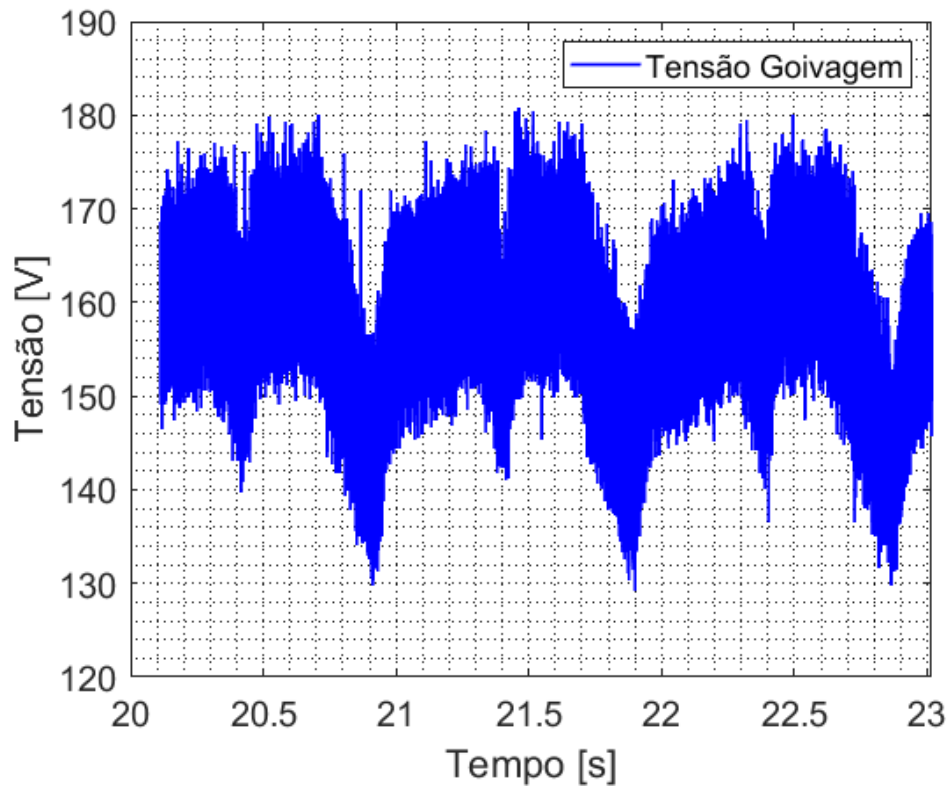


Figura 38 - Sinal de Tensão durante um passe de remoção com detalhe

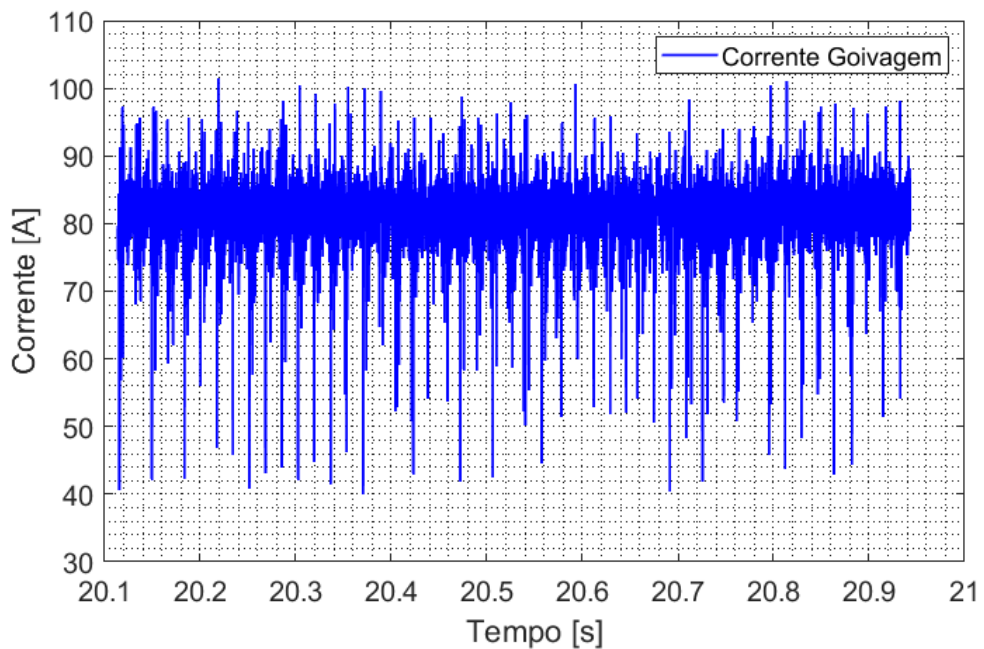


Figura 39 – Sinal de corrente durante um passe de remoção com detalhe

Como já citado anteriormente no Item 3.5, o planejamento experimental utilizado foi definido através de software estatístico, onde também foi realizada a análise dos resultados

obtidos, possibilitando definir um modelo para estimação da largura e profundidade de goivagem em função dos parâmetros considerados significativos.

Com isso, as Tabelas 5 e 6 apresentam as variáveis apontadas como estatisticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ) nos resultados obtidos de largura e profundidade de goivagem, respectivamente, além das interações entre variáveis detectadas por ela, juntamente com os coeficientes lineares e/ou quadráticos do modelo matemático.

Tabela 5. Resultados da análise estatística para a largura

Fator	Nível de significância (p)	Coefficientes do modelo matemático
Mean/Interc.	<b>0,00</b>	21,12
Corrente(Q)	<b>0,00</b>	-2,62
(2)DBP (L)	<b>0,00</b>	-4,89
DBP (Q)	<b>0,00</b>	-2,63
(4)Amplitude(L)	<b>0,00</b>	7,11
(6)Angulo (L)	<b>0,00</b>	4,69
2L by 4L	<b>0,00</b>	-2,72
2L by 6L	<b>0,00</b>	5,49
4L by 6L	<b>0,00</b>	2,05

Tabela 6. Resultados da análise estatística para a profundidade

Fator	Nível de significância (p)	Coefficientes do modelo matemático
Mean/Interc.	<b>0,00</b>	4,75
(1)Corrente(L)	<b>0,00</b>	0,93
Corrente(Q)	<b>0,00</b>	1,05
(2)DBP (L)	<b>0,00</b>	-0,55
(3)VG/f(L)	<b>0,00</b>	-0,79
(4)Amplitude(L)	<b>0,00</b>	-1,05
Amplitude(Q)	<b>0,04</b>	-1,43
(5)Pressão (L)	<b>0,00</b>	-0,19
(6)Angulo (L)	<b>0,00</b>	1,54
Angulo (Q)	<b>0,06</b>	-1,94
1L by 3L	<b>0,00</b>	-0,19
1L by 6L	<b>0,00</b>	0,43
2L by 4L	<b>0,00</b>	0,28
2L by 6L	<b>0,05</b>	0,34
3L by 4L	<b>0,00</b>	0,20
3L by 6L	<b>0,00</b>	-0,46
4L by 6L	<b>0,00</b>	-0,69

A partir dos coeficientes apresentados, foi possível estabelecer o equacionamento para a definição da largura (L) e da profundidade (P) de goivagem apresentados nas Equações 1 e 2.

$$Largura = 21,12 - 2,62 \cdot I^2 - 4,89 \cdot DBP - 2,63 \cdot DBP^2 + 7,11 \cdot A + 4,69 \cdot \alpha - 2,72 \cdot DBP \cdot A + 5,49 \cdot DBP \cdot \alpha + 2,05 \cdot A \cdot \alpha; \quad (1)$$

$$Profundidade = 4,75 + 0,93 \cdot I + 1,05 \cdot I^2 - 0,55 \cdot DBP - 0,79 \cdot \frac{V_g}{f} - 1,05 \cdot A - 1,43 \cdot A^2 - 0,19 \cdot p + 1,54 \cdot \alpha - 1,94 \cdot \alpha^2 - 0,19 \cdot I \cdot \frac{V_g}{f} + 0,43 \cdot I \cdot \alpha + 0,28 \cdot DBP \cdot A + 0,34 \cdot DBP \cdot \alpha + 0,20 \cdot \frac{V_g}{f} \cdot A - 0,46 \cdot \frac{V_g}{f} \cdot \alpha - 0,69 \cdot A \cdot \alpha; \quad (2)$$

A partir da estimacão definida, desenvolveu-se um código em *Matlab*, em que são inseridos no programa, os valores de largura e profundidade desejados, desde que estes valores não sejam exorbitantes ou impraticáveis, para que o software entregue uma sugestão de valores dos parâmetros (corrente, DBP, amplitude, ângulo de ataque e pressão do ar comprimido) a serem regulados para o processo. A Figura 40 mostra o código do programa desenvolvido.

No código, foi definido os valores máximos e mínimos, de acordo com o planejamento experimental, para corrente, DBP,  $\frac{V_g}{f}$ , amplitude, pressão e ângulo de ataque da tocha. A função "fgoiva(x)" foi estabelecida pela mesma relação encontrada na análise estatística para os valores de largura e profundidade.

```

clc
close all
clear all

tic
global Largura
global Profundidade
Largura = 11
Profundidade = 6
%x0=[0 0 0 0 0 0];
%x0=[1 1 1 1 1 1];
x0=[-1 -1 -1 -1 -1 -1];

options = optimset('MaxIter',1e5,'TolX',1e-3,...
'MaxFunEvals',1e5,'MinAbsMax',3,'Display','iter');
[x,fval] = fminimax(@fgoiva,x0,[],[],[],[],[-1 -1 -1 -1 -1]...
,[1 1 1 1 1 1],[],options)

xu = 100;
xl = 100;
I = x(1)*((xu-xl)/2) + ((xu+x1)/2)

xu = 15;
xl = 5;
DBP = x(2)*((xu-xl)/2) + ((xu+x1)/2)

xu = 6;
xl = 3;
Vg_f = x(3)*((xu-xl)/2) + ((xu+x1)/2)

xu = 30;
xl = 10;
A = x(4)*((xu-xl)/2) + ((xu+x1)/2)

xu = 60;
xl = 50;
P = x(5)*((xu-xl)/2) + ((xu+x1)/2)

xu = 35.5;
xl = 35.5;
Ang = x(6)*((xu-xl)/2) + ((xu+x1)/2)

function f = fgoiva(x)

global Largura
global Profundidade

f(1) = abs( (21.12 -2.62*x(1)*x(1) -4.89*x(2) -2.63*x(2)*x(2) +7.11*x(4)...
+4.69*x(6) -2.72*x(2)*x(4) +5.49*x(2)*x(6) +2.05*x(4)*x(6)) - Largura);

f(2) = abs ( (4.75 +0.93*x(1) +1.05*x(1)*x(1) -0.55*x(2) -0.79*x(3)...
-1.05*x(4) -1.43*x(4)*x(4) -0.19*x(5) +1.54*x(6) -1.94*x(6)*x(6) ...
-0.19*x(1)*x(3) +0.43*x(1)*x(6) +0.28*x(2)*x(4) +0.34*x(2)*x(6) ...
+0.20*x(3)*x(4) -0.46*x(3)*x(6) -0.69*x(4)*x(6)) - Profundidade);

```

Figura 40 - Código do *Matlab* de acordo com o modelo matemático

# CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, é possível estabelecer as seguintes conclusões:

a) Para as goivagens realizadas **sem oscilação**:

- O aumento da velocidade de goivagem implica em uma menor profundidade e, conseqüentemente à uma menor remoção de material. Este efeito é bem menos significativo em relação à largura;
- Esperava-se que quanto maior o valor da corrente aplicada, maior seria o volume de material removido, porém de acordo com os resultados obtidos na Tabela 3, observou-se que as maiores larguras e profundidades não se encontravam necessariamente para o maior valor de corrente ( $I = 100 \text{ A}$ ), isso pode ser explicado devido às maiores velocidades de goivagem no maior nível de corrente testado;
- Ao empregar a corrente de 80 A, verificaram-se larguras e profundidades ligeiramente maiores do que para a corrente de 100 A. Isto pode ser explicado por apresentar velocidades de goivagem intermediárias, possibilitando um tempo necessário para a fusão e remoção mais completa do material;
- Para as maiores velocidades de goivagem (24,1 e 37,3 mm/s para  $I = 100 \text{ A}$ ), notou-se que o material se fundiu, como pode ser observado nas macrografias, mas não foi totalmente removido, restando uma quantidade de escória no processo;
- Os melhores acabamentos foram encontrados para os dois menores níveis de corrente (60 e 80 A), que pode ser explicado devido a menores velocidades de goivagem.

b) Para as goivagens realizadas **com oscilação**:

- O tecimento favorece o aumento da largura da goivagem, ou seja, quanto maior a amplitude do tecimento, maior será a largura, sendo que este fator pouco afeta na profundidade;
- Foi constatado que a profundidade de material retirado é maior quando utilizado o ângulo de ataque maior ( $\alpha = 45^\circ$ );
- Com relação ao ângulo de ataque, constatou-se os melhores acabamentos, quando utilizado o ângulo de ataque menor ( $\alpha = 20^\circ$ );
- A utilização do menor nível da pressão do ar comprimido (50 psi), pode influenciar ligeiramente para que a remoção contenha mais escória aderida ao final do processo;
- As variáveis que mais influenciam na largura das goivagens foram: corrente, DBP, amplitude e o ângulo de ataque, além das interações entre elas (DBP x A, DBP x  $\alpha$ , A x  $\alpha$ ), como pode ser observado na equação obtida pelo equacionamento gerado pelo modelo estatístico;
- Já a profundidade sofre influência por um número bem maior de variáveis do que a largura: corrente, amplitude, ângulo de ataque, DBP,  $V_g/f$ , e pressão do ar, além das múltiplas interações entre elas ( $I \times V_g/f$ ,  $I \times \alpha$ , DBP x A, DBP x  $\alpha$ ,  $V_g/f \times A$ , A x  $\alpha$  e por último,  $V_g/f \times \alpha$ ), como mostra a equação obtida pelo equacionamento gerado pelo modelo estatístico;



# CAPÍTULO VI

## TRABALHOS FUTUROS

Como forma de sedimentar e expandir os conhecimentos obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho e contribuir para o aumento da aplicação, sugere-se como possibilidade para trabalhos futuros:

- Avaliar em uma ampla faixa, incluindo extrapolação, a resposta do modelo matemático desenvolvido através da análise estatística, ou seja, executar testes baseados nos parâmetros que serão fornecidos pelo código desenvolvido no *Matlab*, de acordo com os valores de largura e profundidade inseridos no programa.
- Realizar reparos em juntas soldadas, aplicando o processo de remoção por goivagem à plasma, com intuito de validar a parametrização desenvolvida neste trabalho.
- Realizar escaneamento 3D nas placas de testes que foram goivadas para cálculo do volume total de material removido.
- Com base no modelo matemático desenvolvido, propor um controle adaptativo do processo de goivagem, visando melhoria de produtividade e robustez.
- Testar a metodologia desenvolvida em outros materiais, consumíveis, técnicas operatórias e posições de trabalho.

# CAPÍTULO VII

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOBRIL. **Chapas de Aço Carbono – ASTM A 131**. Disponível em: <https://acobril.com.br/wp-content/uploads/2022/04/ASTM-A-131.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRACARENCE, A. Q.: **Processo de Soldagem PAW**. Belo Horizonte, 2000.

CASTRO, J. F.; SCOTTI, A. **Manual prático-operacional para goivagem por plasma a ar comprimido**. Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem, 2013.

CONTEC. **Norma Petrobras N-133 Ver. N 03/2017 – Soldagem**, 2017, 521p.

DIAZ, V. V.; DUTRA, J. C. **Análise dos Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma “Keyhole” - LABSOLDA**. Disponível em: <<https://labsolda.ufsc.br/projetos/realizados/566-analise-dos-parametros-e-variaveis-da-soldagem-plasma-keyhole>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

FAZAKAS, B., SECULIN, R.C., MACHEDON-PISU, T., POP, A. (2015): **Aspects regarding the Characterization of the Gouged Surface**. Advanced Materials Research, ISSN 1022-6680, Vol. 1128, p. 217-223, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1128.217>.

FAZAKAS, B.; MACHEDON-PISU, T. **Determining Microparticle Concentration in the Workplace Atmosphere during Plasma Gouging**. 2017.

GORKA, J. **Welding technologies for the removal of defects in welded joints and iron-castings**. Welding International, v. 16, n. 5, p. 341–346, jan. 2002. <https://doi.org/10.1080/09507110209549543>.

HYPERTHERM. **Sistema de Corte e Goivagem arco plasma**. Manual de operação 804487 – Revisão 1, 2003.

NETO, L. F. C.; COSTA, D. A. **Discussão Sobre os Processos de Goivagem e a Utilização de Suporte de Solda**. Infosolda, 2018.

POND, T. L.; MARTIN, C. R. **Electrical characteristics of the oxyfuel flame while cutting steel**. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 112, p. 109985, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109985>

RAMALHO, J. P. **Oxicorte: Estudo da Transferência de Calor e Modelamento por redes Neurais Artificiais de Variáveis do Processo**. 2008. 150f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo.

REIS, R. P., SCOTTI, A. **“Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma”**, Editora Artliber, 2007.

ROBERT, F. “Focus on Cutting”, SVETSAREN – **The ESAB welding and Cutting Journal**. Vol. 60 NO. 2005.

SERRATI, Douglas Silva Marques. **Simulação Numérica de Processo de Goivagem a Plasma**. 2022. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.684>

SILVA, Gilson Garcia Da. **Apostila de Processamento de Materiais por Plasma**. Rio Grande do Norte, 2012. (Apostila).

TAVARES, W. S. **“Estudo das Técnicas de Remoção de Material na Manutenção de Estruturas Construídas com Aços Baixa Liga”**. 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

WELDING HANDBOOK COMMITTEE. **Welding handbook**. 9ª ed. American Welding Society, Miami, FL, 2001. v. 2.

## CAPÍTULO VIII

### APÊNDICE

#### 8.1 Macrofotografias dos Testes de Goivagem Sem Oscilação da Tocha

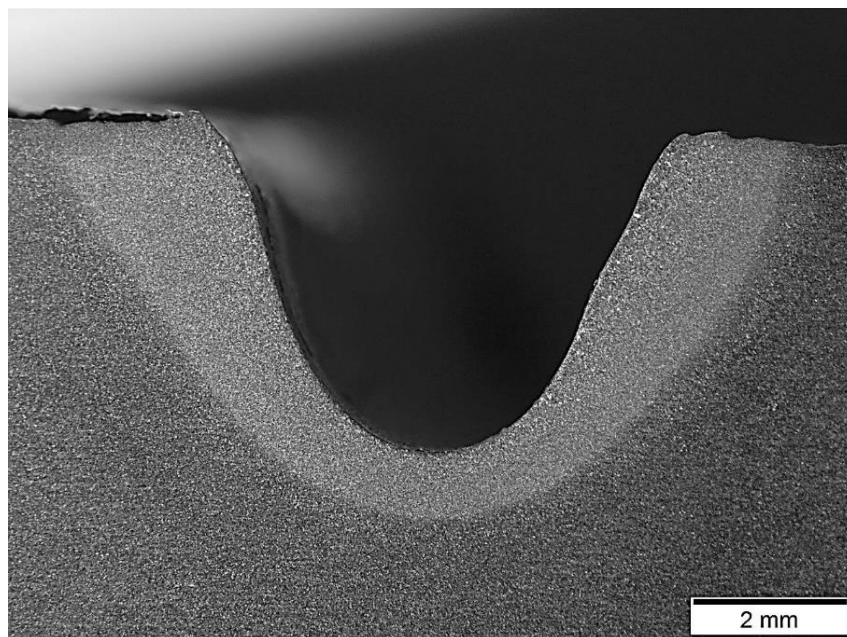
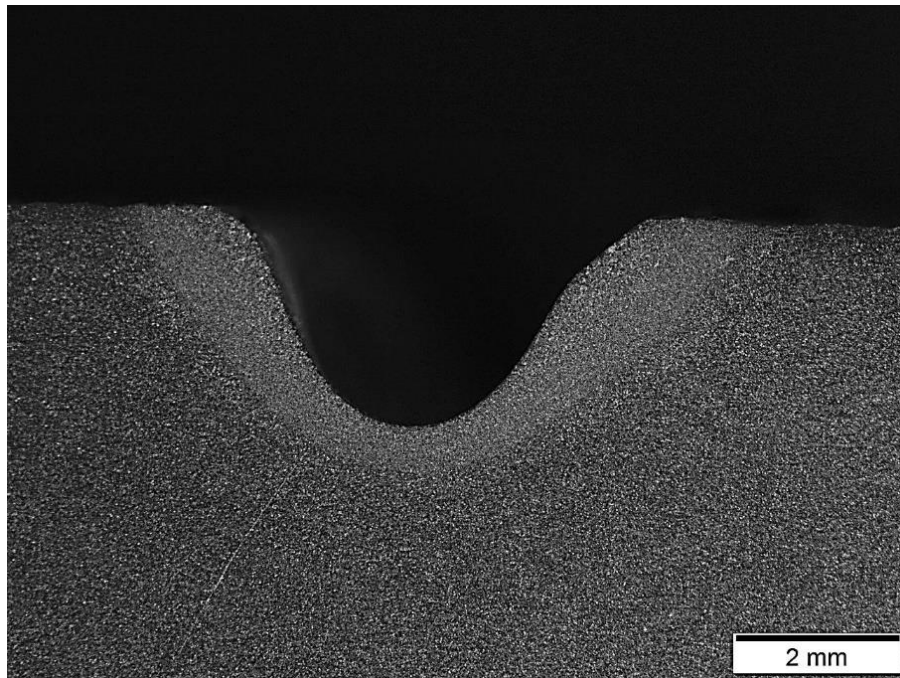
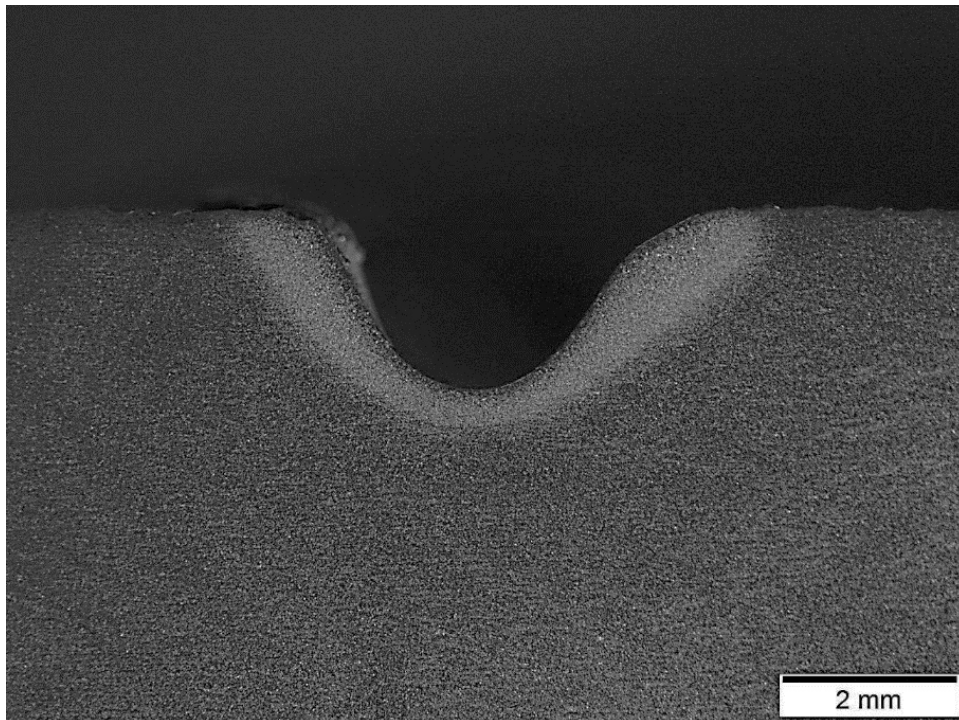


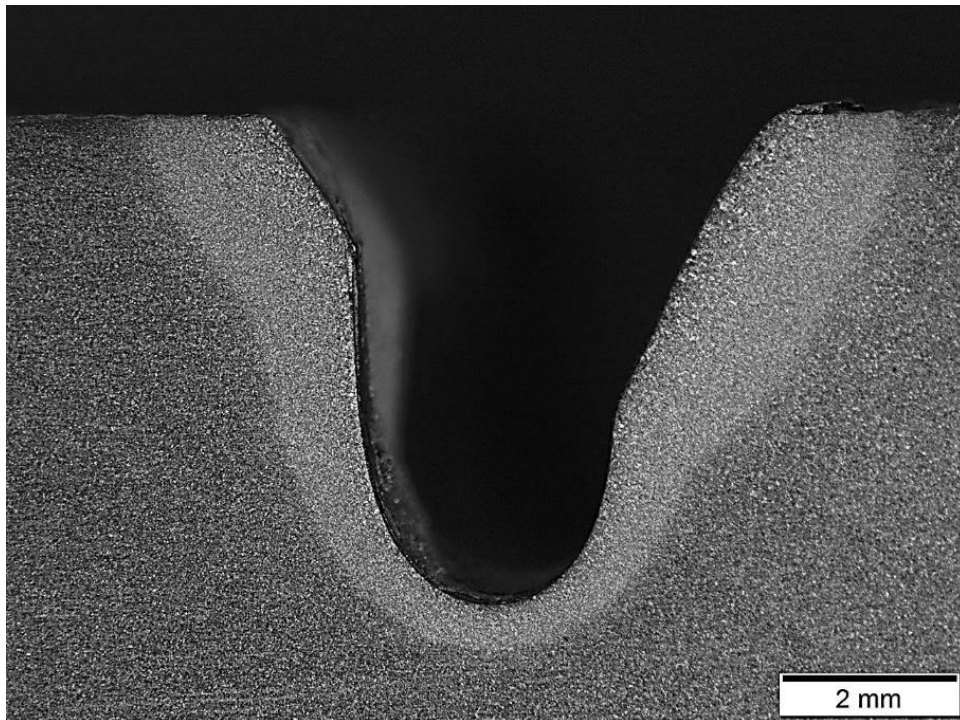
Figura 41 - Teste 1 – ( $I = 60$  A;  $VG = 5,1$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 6,27 mm; Profundidade média = 4,29 mm)



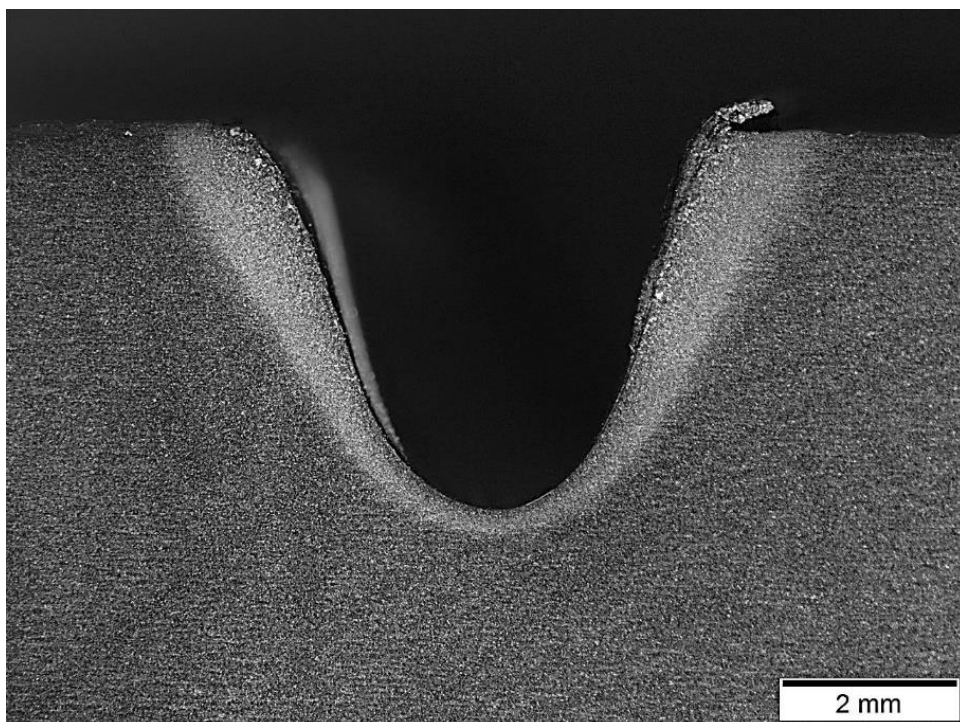
**Figura 42 - Teste 2 - ( $I = 60$  A;  $VG = 11,4$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 5,84 mm; Profundidade média = 2,63 mm)**



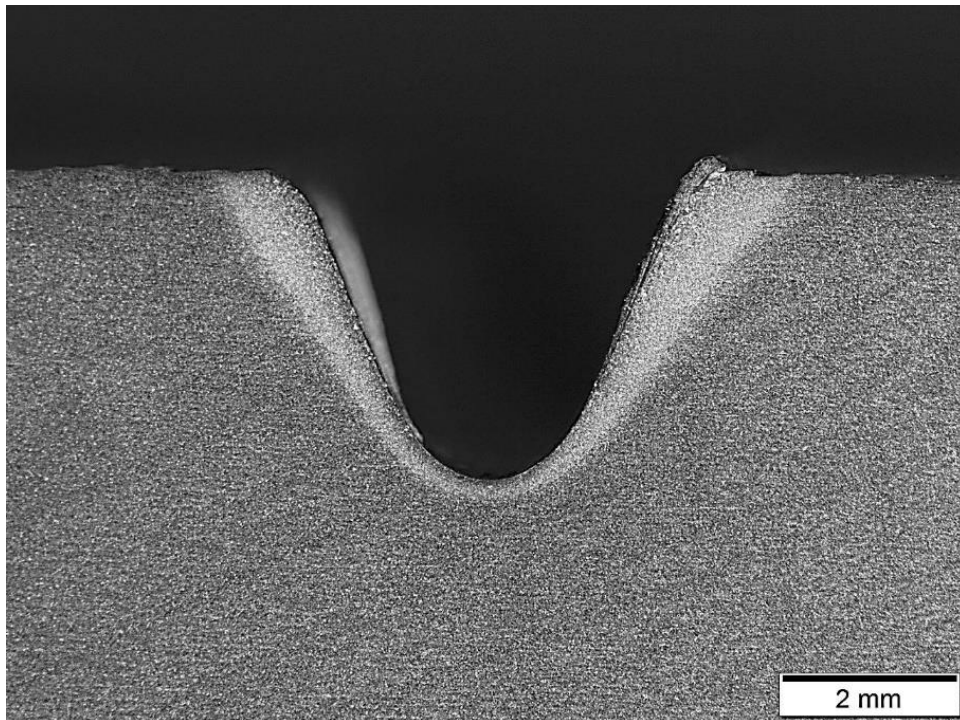
**Figura 43 - Teste 3 - ( $I = 60$  A;  $VG = 17,8$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 5,22 mm; Profundidade média = 2,08 mm)**



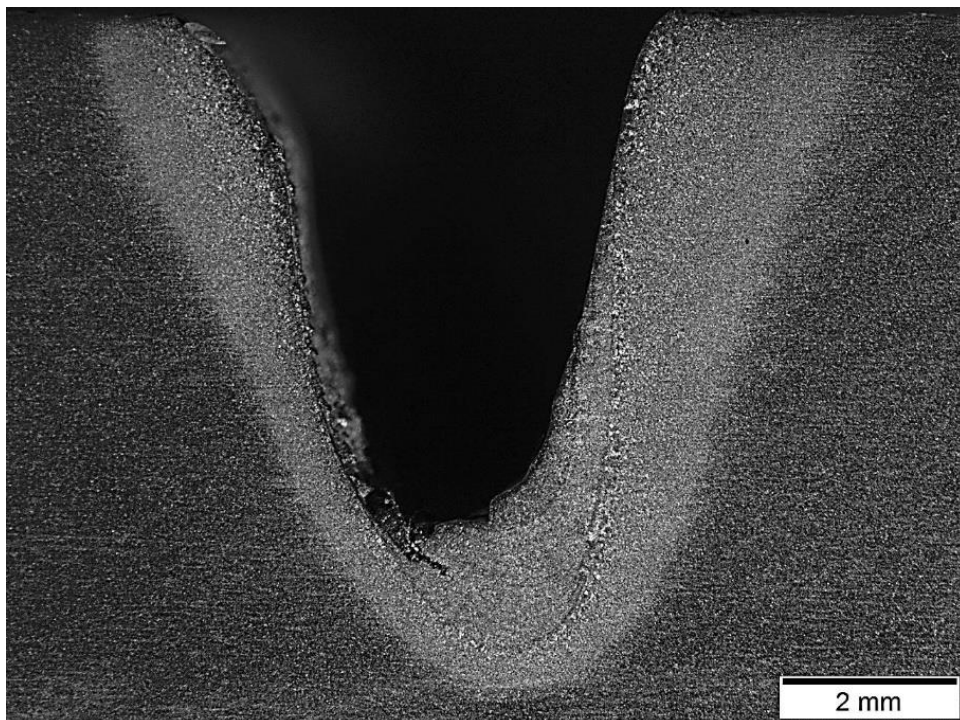
**Figura 44 - Teste 4 - ( $I = 80$  A;  $VG = 7,6$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 6,47 mm; Profundidade média = 5,69 mm)**



**Figura 45 - Teste 5 - ( $I = 80$  A;  $VG = 16,5$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 5,90 mm; Profundidade média = 4,42 mm)**

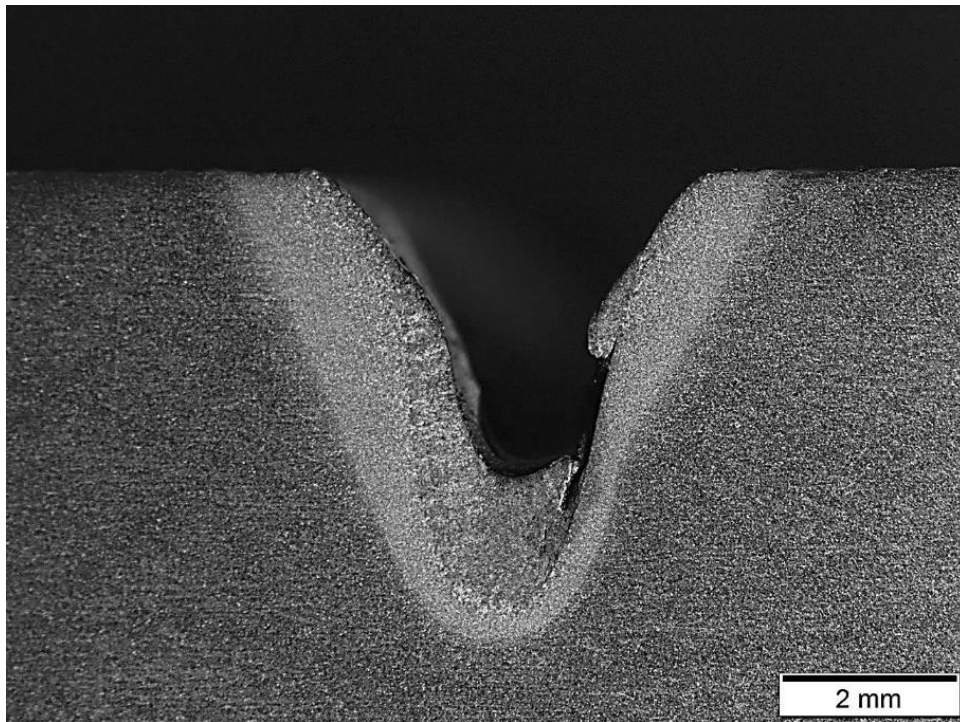


**Figura 46 - Teste 6 - ( $I = 80$  A;  $VG = 25,4$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 5,43 mm; Profundidade média = 3,55 mm)**

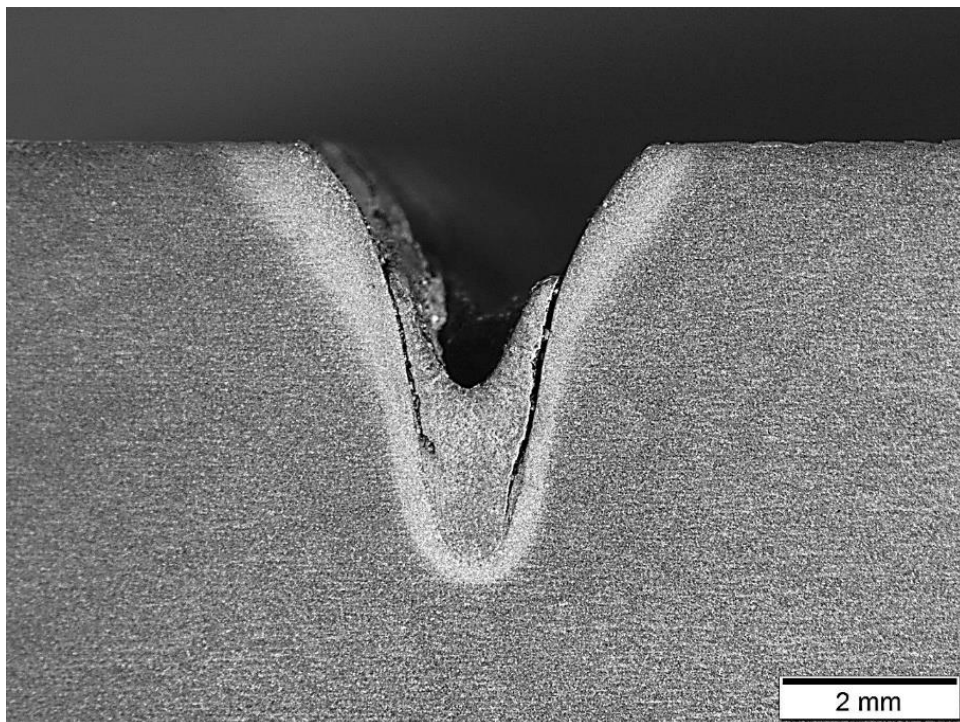


**Figura 47 - Teste 7 - ( $I = 100$  A;  $VG = 11,0$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 6,07 mm; Profundidade média = 5,86 mm)**





**Figura 48 - Teste 8 - ( $I = 100$  A;  $VG = 24,1$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 5,08 mm; Profundidade média = 3,50 mm)**

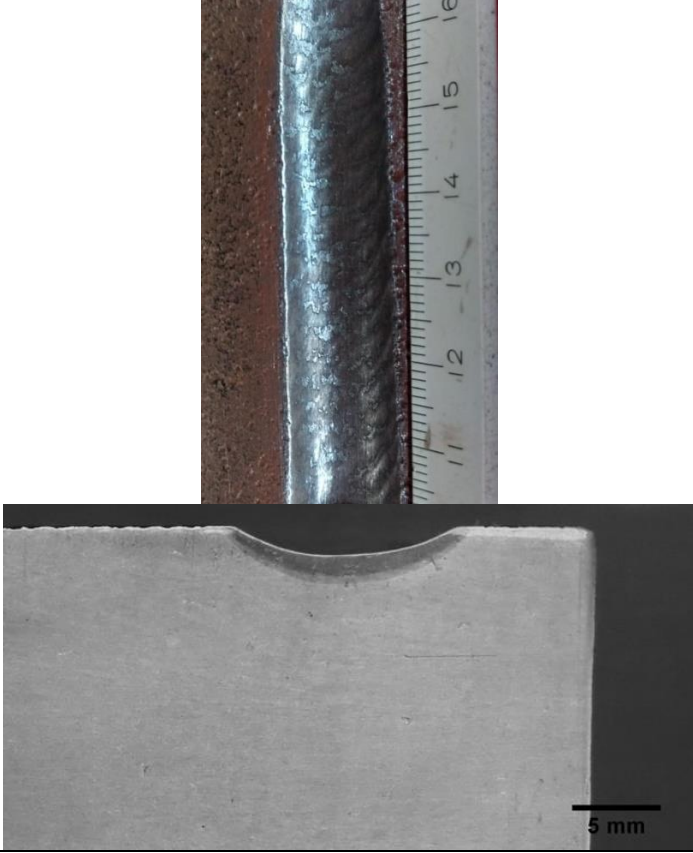
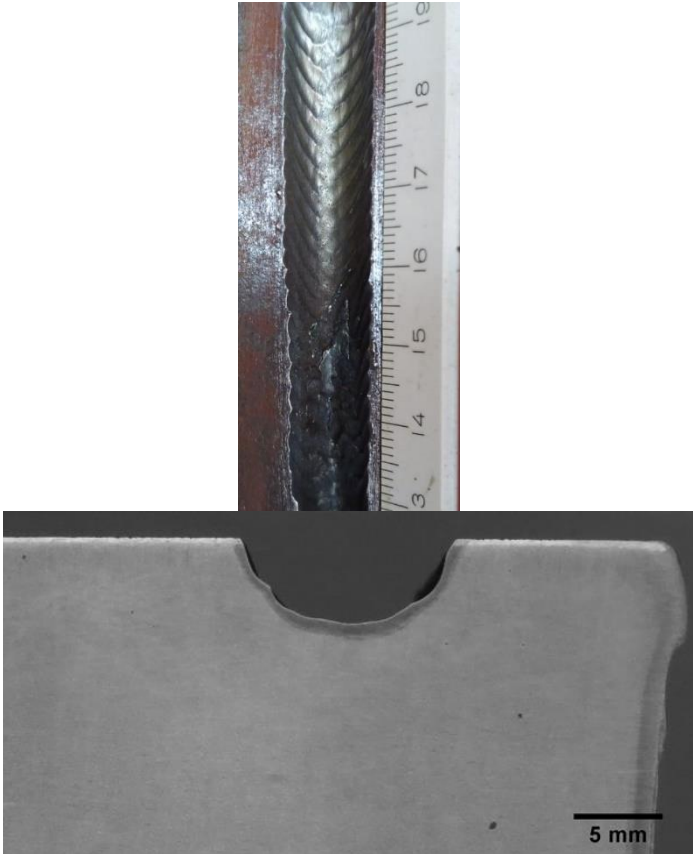




**Figura 49 - Teste 9 - ( $I = 100$  A;  $VG = 37,3$  mm/s;  $DBP = 1,5$  mm; Pressão do ar = 55 psi;  $\alpha = 45^\circ$ ; Largura média = 4,50 mm; Profundidade média = 2,81 mm)**

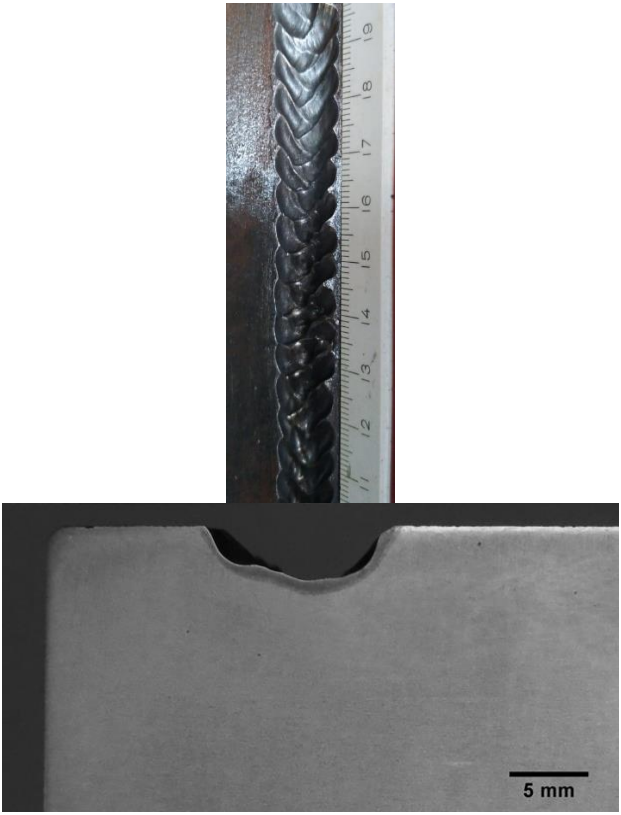
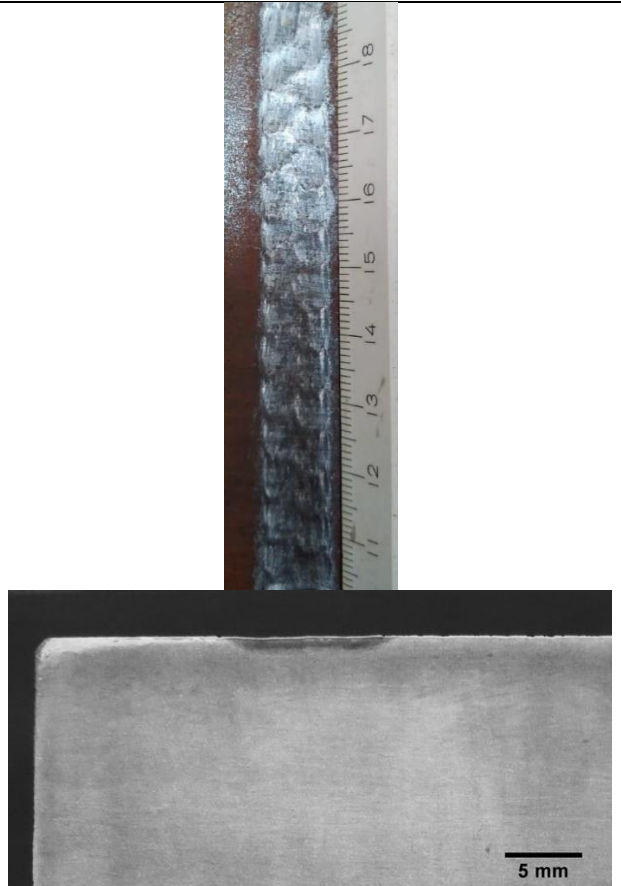


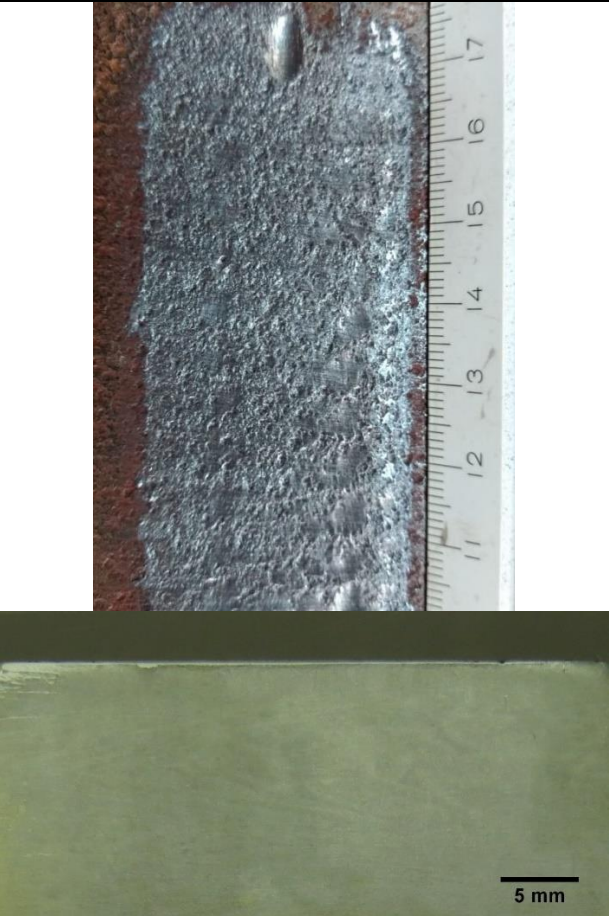
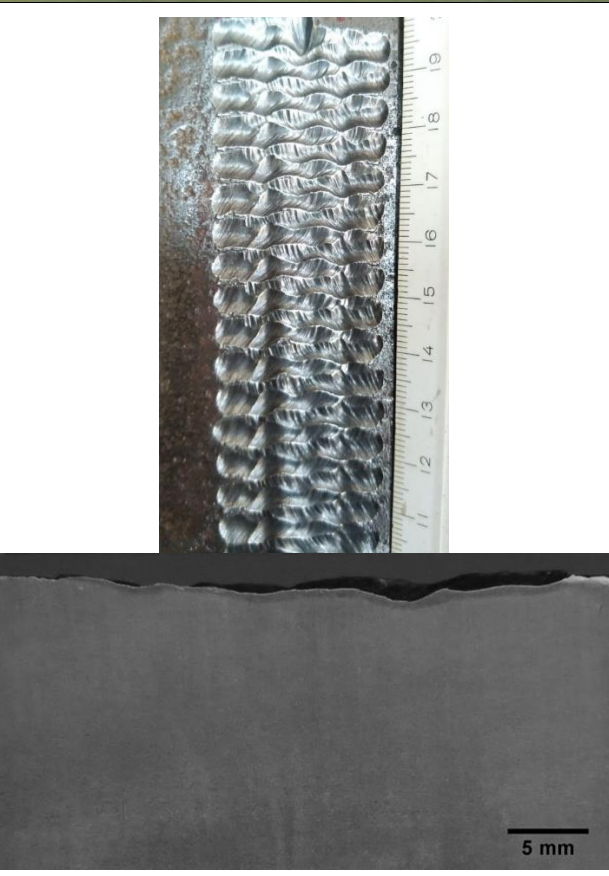
## **8.2 Macrografias e Goivagens com Oscilação da Tocha**

Após a execução dos testes referentes à segunda abordagem (com oscilação da tocha), foram realizadas as fotografias das remoções e suas respectivas macrografias, que seguem abaixo.

<p>a) Teste 1</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I = 60 A; DBP = 5 mm; V<sub>G</sub> = 3 mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 50 psi; <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 12,39 mm; Profundidade média = 2,31 mm;</p>	 <p>The image shows a vertical metal rod with a groove cut into its top surface. A ruler is positioned to the right of the rod, showing markings from 11 to 16. Below the rod, a macrograph shows a cross-section of the groove, which is wider at the top and tapers towards the bottom. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner of the macrograph.</p>
<p>b) Teste 2</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I = 60 A; DBP = 5 mm; V<sub>G</sub> = 3 mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 60 psi, <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 11,28 mm; Profundidade média = 6,95 mm;</p>	 <p>The image shows a vertical metal rod with a groove cut into its top surface. A ruler is positioned to the right of the rod, showing markings from 13 to 19. Below the rod, a macrograph shows a cross-section of the groove, which is wider at the top and tapers towards the bottom. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner of the macrograph.</p>

<p>a) Teste 3</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 60</math> A; DBP = 5 mm; <math>V_G = 3</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 50 psi, <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 30,45 mm; Profundidade média = 2,26 mm;</p>	 <p>The macrograph shows a series of overlapping, wavy, scale-like structures on a metal surface, with a ruler indicating a length of approximately 19 mm. The cross-section below shows a dark, irregularly shaped layer on a lighter substrate, with a 5 mm scale bar.</p>
<p>b) Teste 4</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 60</math> A; DBP = 5 mm; <math>V_G = 3</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 60 psi, <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 29,83 mm; Profundidade média = 0;</p>	 <p>The macrograph shows a relatively smooth, dark surface with a ruler indicating a length of approximately 17 mm. The cross-section below shows a very thin, uniform layer on a substrate, with a 5 mm scale bar.</p>

<p>a) Teste 5</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I =60 A; DBP = 5 mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 50 psi, <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 10,89 mm; Profundidade média = 3,91 mm;</p>	
<p>b) Teste 6</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I =60 A; DBP = 5 mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 60 psi, <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 10,08 mm; Profundidade média = 0,33 mm;</p>	

<p>a) Teste 7</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 60</math> A; <math>DBP = 5</math> mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 50 psi; <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 31,91 mm; Profundidade média = 0;</p>	 <p>The image shows two views of a metal surface. The top view is a macrograph of a metal surface with a fine, granular texture. A ruler is visible on the right side, showing markings from 11 to 17. The bottom view is a cross-section of the metal surface, showing a smooth, flat top surface. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner.</p>
<p>b) Teste 8</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 60</math> A; <math>DBP = 5</math> mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 60 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 28,99 mm; Profundidade média = 1,02 mm;</p>	 <p>The image shows two views of a metal surface. The top view is a macrograph of a metal surface with a distinct, wavy, and textured appearance. A ruler is visible on the right side, showing markings from 11 to 19. The bottom view is a cross-section of the metal surface, showing a wavy, textured top surface. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner.</p>



## a) Teste 9

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 60$  A; DBP = 15 mm;  
 $V_G = 3$  mm/s;  
Frequência = 1 Hz;  
Amplitude = 10 mm;  
Pressão do ar = 50 psi;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

Largura média = 12,73 mm;  
Profundidade média = 3,95 mm;

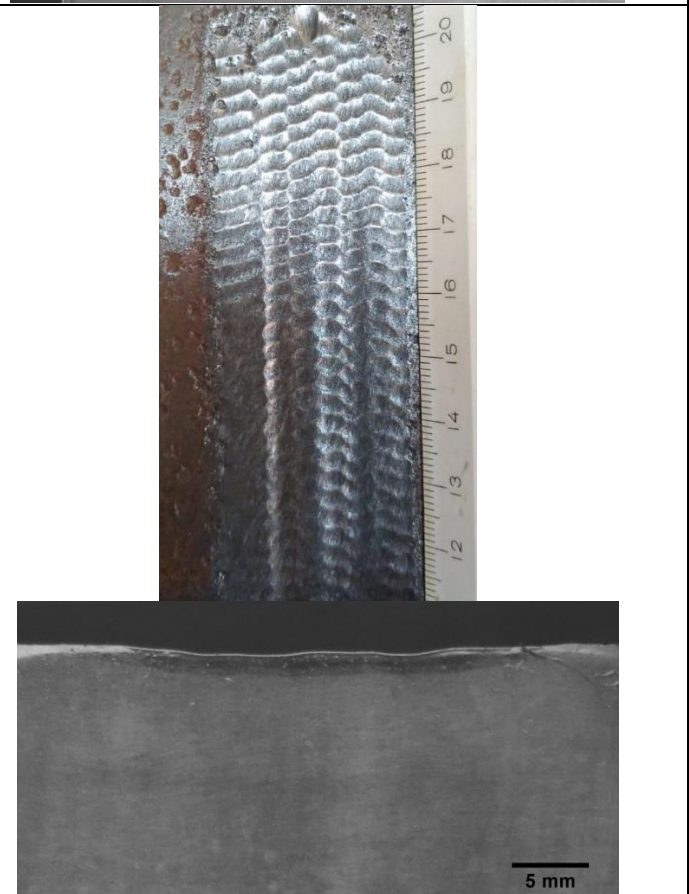


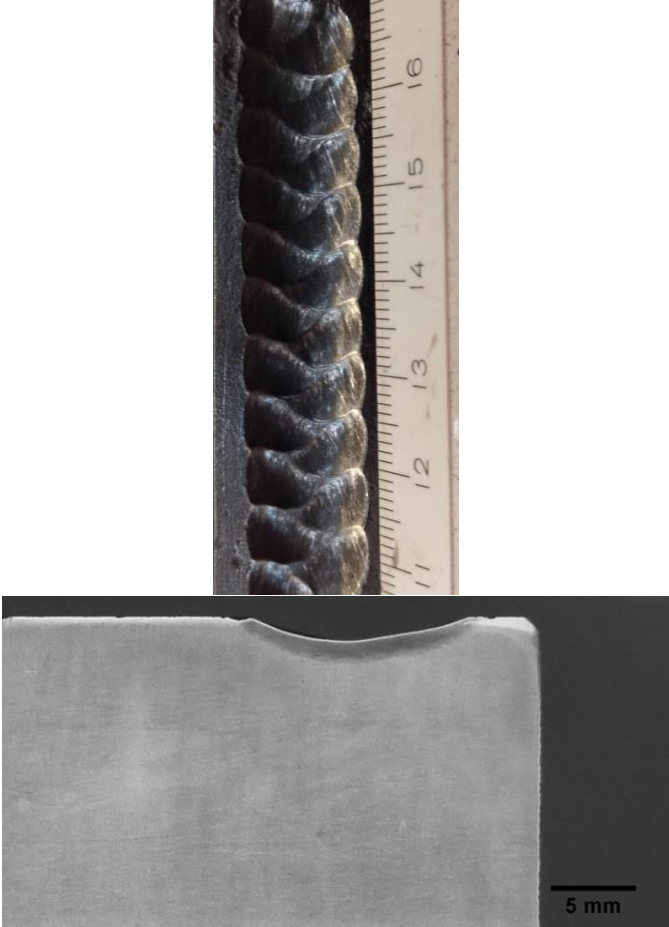
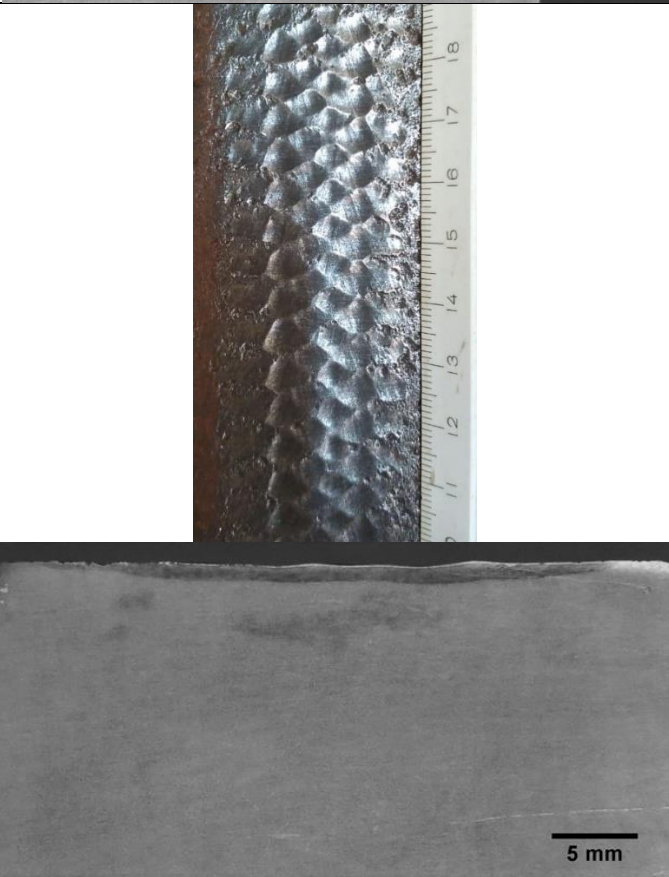
## b) Teste 12

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 60$  A; DBP = 15 mm;  
 $V_G = 3$  mm/s;  
Frequência = 1 Hz;  
Amplitude = 30 mm;  
Pressão do ar = 60 psi;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

Largura média = 30,69 mm;  
Profundidade média = 0,40 mm;



<p>a) Teste 14</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I =60 A; DBP = 15 mm; V<sub>G</sub> = 6 mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 60 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 12,67 mm; Profundidade média = 1,47 mm;</p>	
<p>b) Teste 15</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I =60 A; DBP = 15 mm; V<sub>G</sub> = 6 mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 50 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 28,63 mm; Profundidade média = 0,29 mm;</p>	

## a) Teste 17

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 100 \text{ A}$ ;  $DBP = 5 \text{ mm}$ ;  
 $V_G = 3 \text{ mm/s}$ ;  
Frequência =  $1 \text{ Hz}$ ;  
Amplitude =  $10 \text{ mm}$ ;  
Pressão do ar =  $50 \text{ psi}$ ;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

Largura média =  $11,14 \text{ mm}$ ;  
Profundidade média =  $8,65 \text{ mm}$ ;

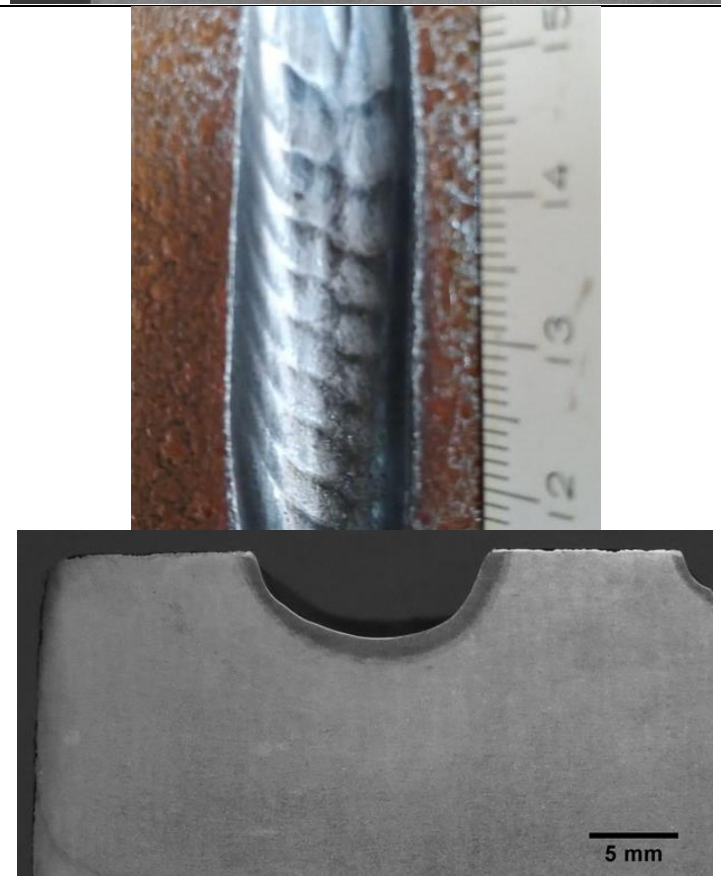


## b) Teste 18


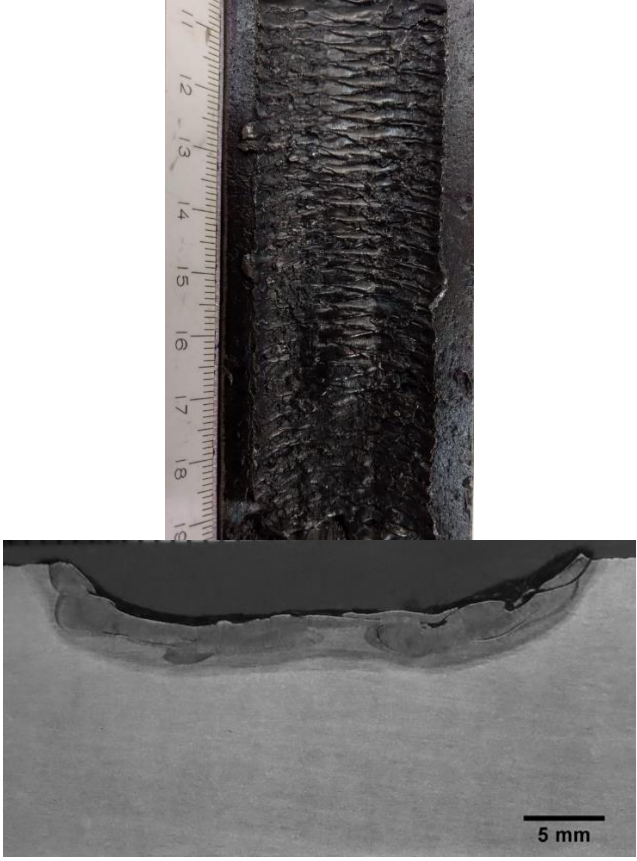
Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 100 \text{ A}$ ;  $DBP = 5 \text{ mm}$ ;  
 $V_G = 3 \text{ mm/s}$ ;  
Frequência =  $1 \text{ Hz}$ ;  
Amplitude =  $10 \text{ mm}$ ;  
Pressão do ar =  $60 \text{ psi}$ ;  
 $\alpha = 20^\circ$ ;



Largura média =  $12,38 \text{ mm}$ ;  
Profundidade média =  $3,82 \text{ mm}$ ;

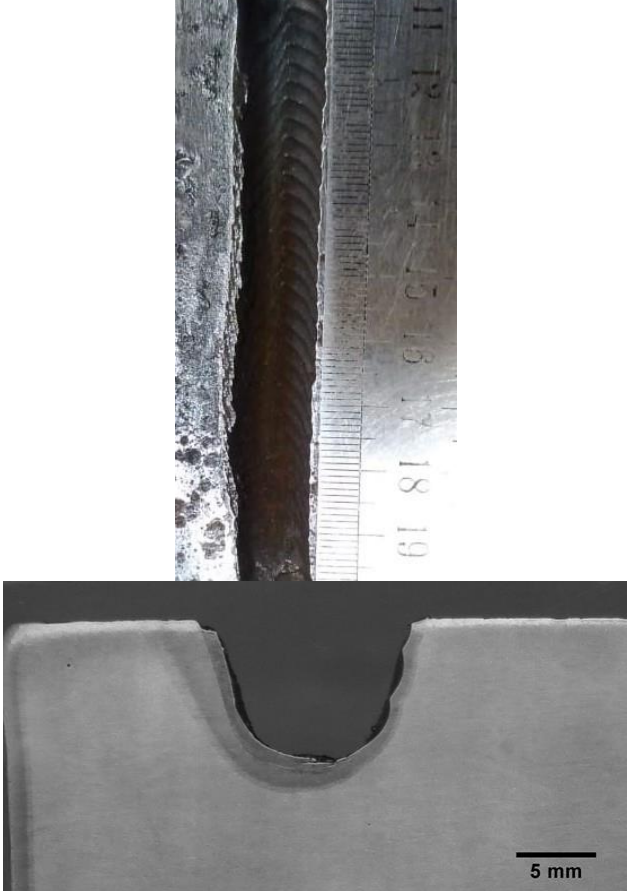





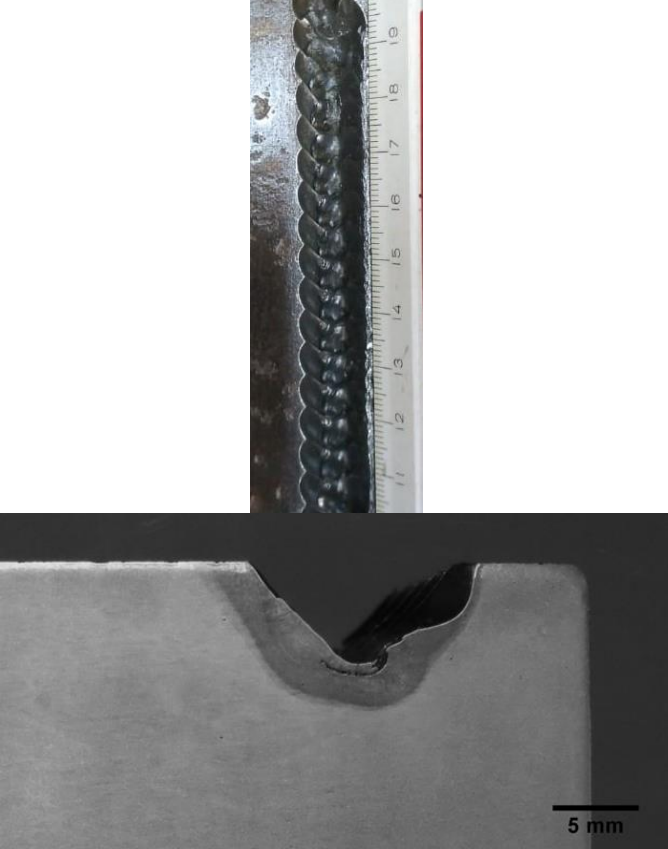

<p>a) Teste 19</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100 \text{ A}</math>; <math>DBP = 5 \text{ mm}</math>;  <math>V_G = 3 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>;  Amplitude = <math>30 \text{ mm}</math>;  Pressão do ar = <math>50 \text{ psi}</math>;  <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>31,37 \text{ mm}</math>;  Profundidade média = <math>3,31 \text{ mm}</math>;</p>	 <p>The macrograph shows a cylindrical metal rod with a series of wavy, parallel grooves along its length. A vertical ruler is placed to the right of the rod, with markings from 11 to 18 cm. Below the macrograph is a top view of the rod, showing the cross-section of the grooves. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner of the top view.</p>
<p>b) Teste 20</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100 \text{ A}</math>; <math>DBP = 5 \text{ mm}</math>;  <math>V_G = 3 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>;  Amplitude = <math>30 \text{ mm}</math>;  Pressão do ar = <math>60 \text{ psi}</math>;  <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>30,07 \text{ mm}</math>;  Profundidade média = <math>3,67 \text{ mm}</math>;</p>	 <p>The macrograph shows a cylindrical metal rod with a series of wavy, parallel grooves along its length. A vertical ruler is placed to the left of the rod, with markings from 11 to 19 cm. Below the macrograph is a top view of the rod, showing the cross-section of the grooves. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner of the top view.</p>

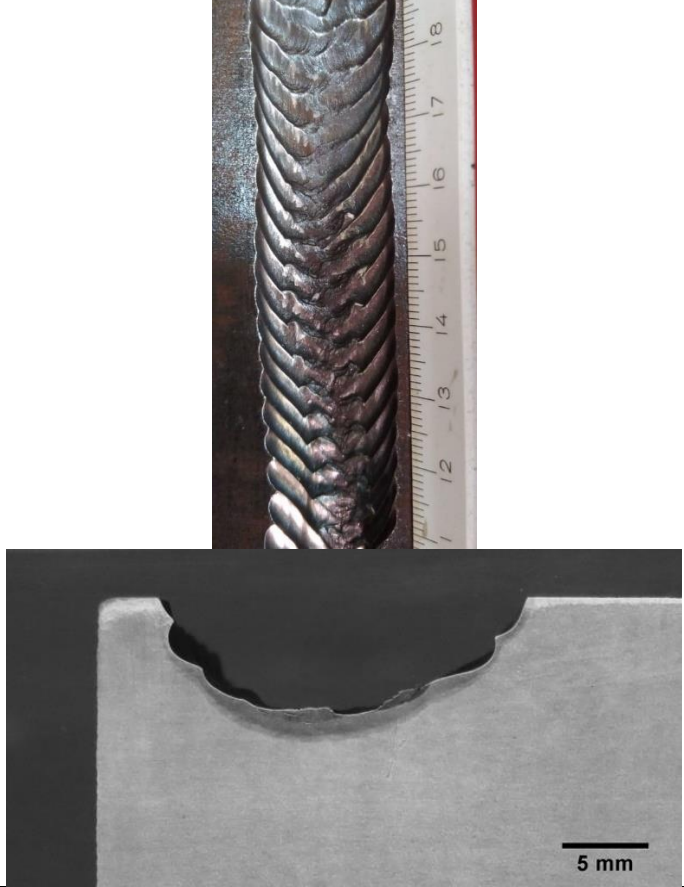
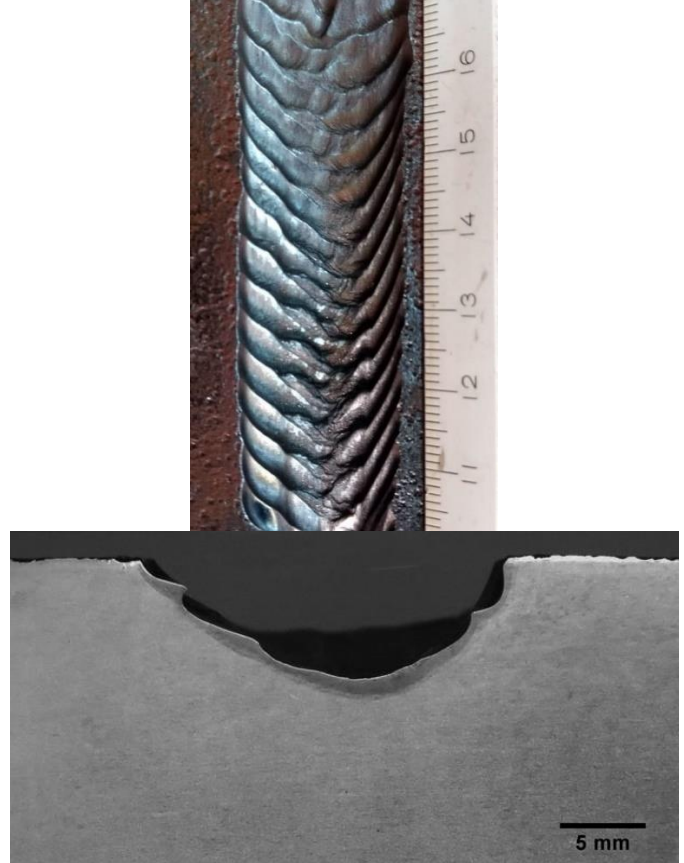
<p>a) Teste 21</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100</math> A; DBP = 5 mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 50 psi; <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 12,05 mm; Profundidade média = 3,71 mm;</p>	 
<p>b) Teste 22</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100</math> A; DBP = 5 mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 60 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 10,88 mm; Profundidade média = 4,91 mm;</p>	 


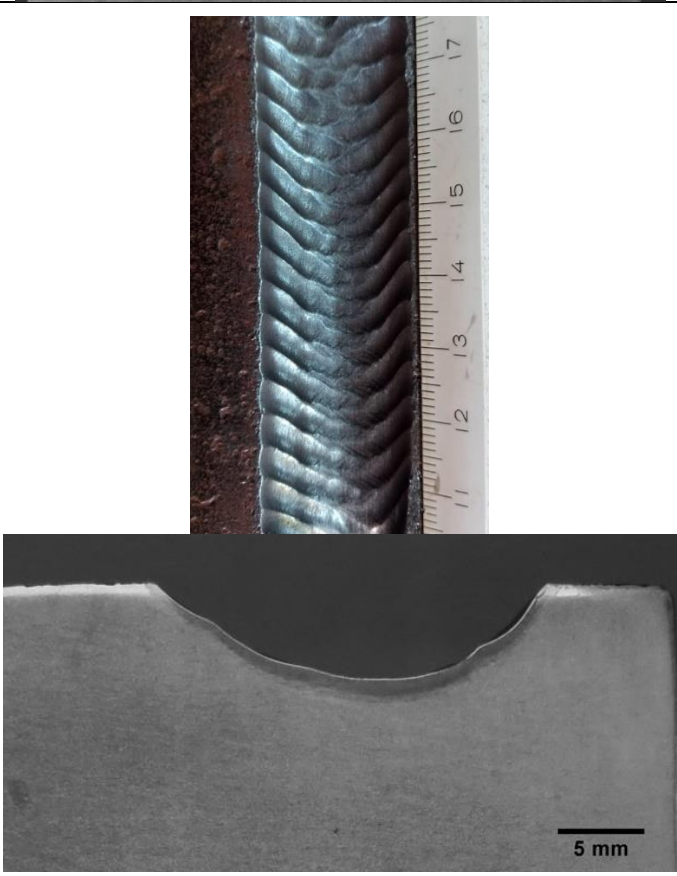
<p>a) Teste 23</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100 \text{ A}</math>; <math>DBP = 5 \text{ mm}</math>;  <math>V_G = 6 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>;  Amplitude = <math>30 \text{ mm}</math>;  Pressão do ar = <math>50 \text{ psi}</math>;  <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>30,90 \text{ mm}</math>;  Profundidade média = <math>1,99 \text{ mm}</math>;</p>	 <p>The image shows a macrograph of a metal surface with a series of parallel, wavy grooves. A vertical ruler is placed to the right of the grooves, showing measurements from 11 to 18 mm. Below the macrograph is a cross-sectional view of the grooves, showing their depth and width. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner of the cross-section.</p>
<p>b) Teste 24</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100 \text{ A}</math>; <math>DBP = 5 \text{ mm}</math>;  <math>V_G = 6 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>;  Amplitude = <math>30 \text{ mm}</math>;  Pressão do ar = <math>60 \text{ psi}</math>;  <math>\alpha = 20^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>31,99 \text{ mm}</math>;  Profundidade média = <math>0,87 \text{ mm}</math>;</p>	 <p>The image shows a macrograph of a metal surface with a series of parallel, wavy grooves. A vertical ruler is placed to the right of the grooves, showing measurements from 11 to 18 mm. Below the macrograph is a cross-sectional view of the grooves, showing their depth and width. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner of the cross-section.</p>

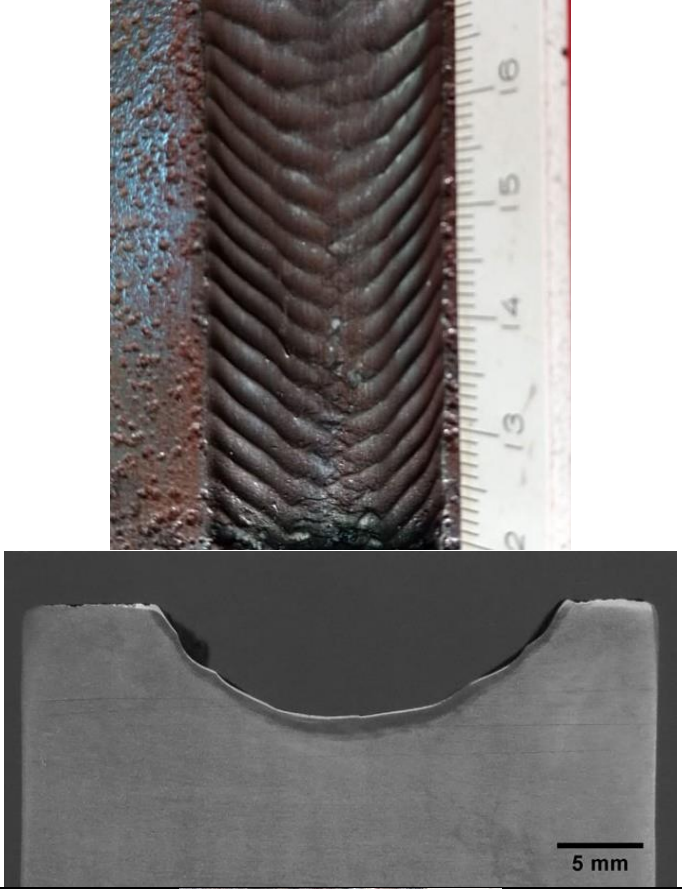

<p>a) Teste 26</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100</math> A; DBP = 15 mm; <math>V_G = 3</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 60 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 12,65 mm; Profundidade média = 9,72 mm;</p>	 <p>The top image shows a macro view of a metal workpiece with a series of parallel, slightly curved grooves. A ruler is visible on the right side, showing markings from 18 to 19 mm. The bottom image is a cross-sectional view of the workpiece, showing a U-shaped groove with a smooth, rounded bottom. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner.</p>
<p>b) Teste 27</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100</math> A; DBP = 15 mm; <math>V_G = 3</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 50 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 29,19 mm; Profundidade média = 5,62 mm;</p>	 <p>The top image shows a macro view of a metal workpiece with a series of parallel, slightly curved grooves. A ruler is visible on the right side, showing markings from 12 to 18 mm. The bottom image is a cross-sectional view of the workpiece, showing a U-shaped groove with a smooth, rounded bottom. A 5 mm scale bar is located in the bottom right corner.</p>



<p>a) Teste 29</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100</math> A; <math>DBP = 15</math> mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 10 mm; Pressão do ar = 50 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 12,31 mm; Profundidade média = 6,09 mm;</p>	 <p>The image shows two views of a metal specimen after a gouging test. The top view is a macrograph of a vertical specimen with a ruler on the right side, showing a series of dark, rounded, overlapping gouges along its length. The bottom view is a top-down macrograph of a single gouge, showing a V-shaped profile with a dark, textured interior. A 5 mm scale bar is present in the bottom right corner of the top view.</p>
<p>Teste 32</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 100</math> A; <math>DBP = 15</math> mm; <math>V_G = 6</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 30 mm; Pressão do ar = 60 psi; <math>\alpha = 45^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 29,37 mm; Profundidade média = 2,41 mm;</p>	 <p>The image shows two views of a metal specimen after a gouging test. The top view is a macrograph of a vertical specimen with a ruler on the right side, showing a series of dark, overlapping, rectangular gouges along its length. The bottom view is a top-down macrograph of a single gouge, showing a wide, shallow profile with a dark, textured interior. A 5 mm scale bar is present in the bottom right corner of the top view.</p>

<p>a) Teste 33</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I = 60 A; DBP = 10 mm; <math>V_G = 4,5</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 20 mm; Pressão do ar = 55 psi; <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 19,53 mm; Profundidade média = 6,10 mm</p>	
<p>b) Teste 34</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p>I = 100 A; DBP = 10 mm; <math>V_G = 4,5</math> mm/s; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 20 mm; Pressão do ar = 55 psi; <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 20,41 mm; Profundidade média = 5,87 mm;</p>	

<p>a) Teste 35</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 5 \text{ mm}</math>;  <math>V_G = 4,5 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>;  Amplitude = <math>20 \text{ mm}</math>;  Pressão do ar = <math>55 \text{ psi}</math>;  <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>18,97 \text{ mm}</math>;  Profundidade média = <math>5,51 \text{ mm}</math>;</p>	
<p>b) Teste 36</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 15 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 4,5 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>;  Amplitude = <math>20 \text{ mm}</math>;  Pressão do ar = <math>55 \text{ psi}</math>;  <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>20,96 \text{ mm}</math>;  Profundidade média = <math>4,41 \text{ mm}</math>;</p>	

<p>a) Teste 37</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 10 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 3 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = 1 Hz;  Amplitude = 20 mm;  Pressão do ar = 55 psi;  <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 21,71 mm;  Profundidade média = 6,01 mm;</p>	
<p>b) Teste 38</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 10 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 6 \text{ mm/s}</math>;  Frequência = 1 Hz;  Amplitude = 20 mm;  Pressão do ar = 55 psi;  <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 20,93 mm;  Profundidade média = 2,79 mm;</p>	

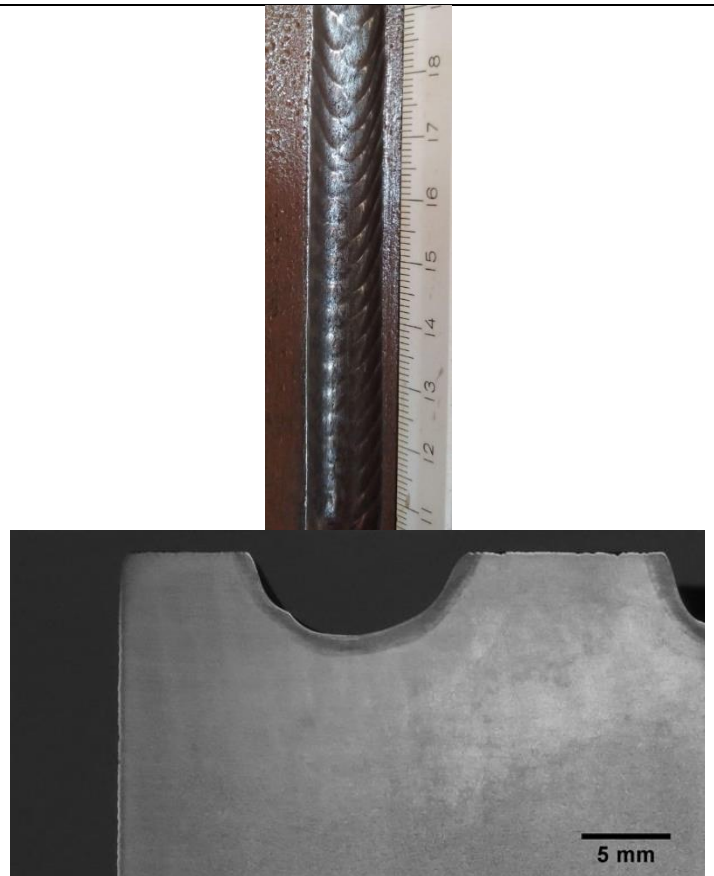


## a) Teste 39

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 80 \text{ A}$ ;  $DBP = 10 \text{ mm}$ ;  
 $V_G = 4,5 \text{ mm/s}$ ;  
 Frequência =  $1 \text{ Hz}$ ;  
 Amplitude =  $10 \text{ mm}$ ;  
 Pressão do ar =  $55 \text{ psi}$ ;  
 $\alpha = 32,5^\circ$ ;

Largura média =  $11,52 \text{ mm}$ ;  
 Profundidade média =  $4,41 \text{ mm}$ ;




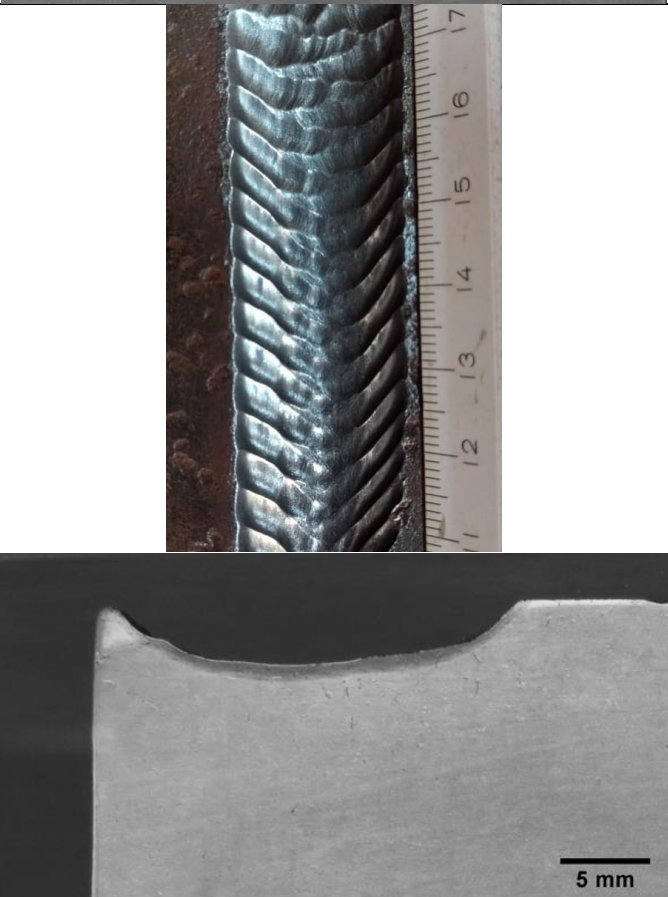
## b) Teste 40

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 80 \text{ A}$ ;  $DBP = 10 \text{ mm}$ ;  
 $V_G = 4,5 \text{ mm/s}$ ;  
 Frequência =  $1 \text{ Hz}$ ;  
 Amplitude =  $30 \text{ mm}$ ;  
 Pressão do ar =  $55 \text{ psi}$ ;  
 $\alpha = 32,5^\circ$ ;

Largura média =  $31,26 \text{ mm}$ ;  
 Profundidade média =  $2,61 \text{ mm}$ ;



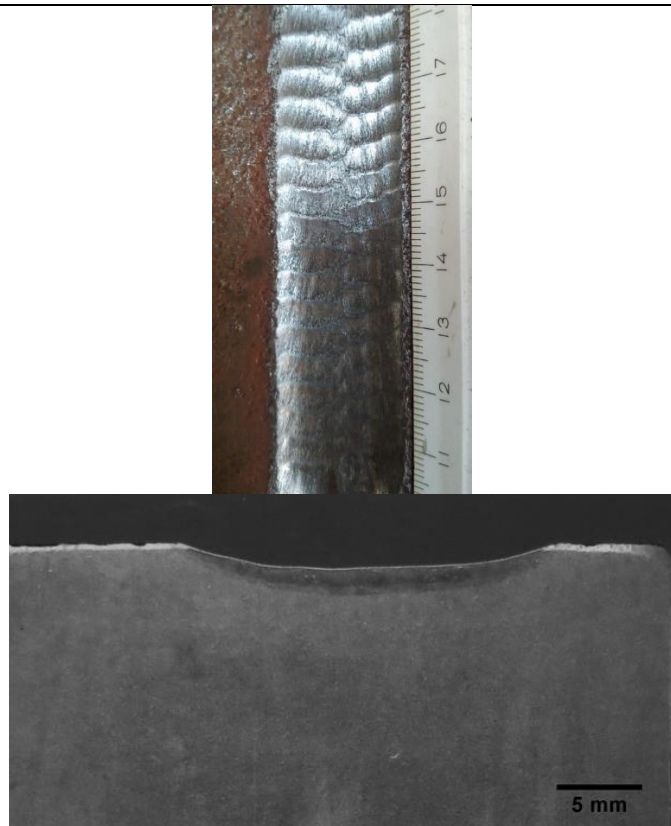
<p>a) Teste 41</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 10 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 4,5 \text{ mm/s}</math>; Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>; Amplitude = <math>20 \text{ mm}</math>; Pressão do ar = <math>50 \text{ psi}</math>; <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>21,13 \text{ mm}</math>; Profundidade média = <math>4,36 \text{ mm}</math>;</p>	 <p>The image shows a macrograph of a metal surface with a series of overlapping, V-shaped grooves. A ruler is visible on the right side, showing markings from 12 to 16 mm. Below the macrograph is a cross-sectional view of the grooves, showing their depth and width. A scale bar labeled '5 mm' is located in the bottom right corner of the cross-section.</p>
<p>b) Teste 42</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 10 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 4,5 \text{ mm/s}</math>; Frequência = <math>1 \text{ Hz}</math>; Amplitude = <math>20 \text{ mm}</math>; Pressão do ar = <math>60 \text{ psi}</math>; <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = <math>20,14 \text{ mm}</math>; Profundidade média = <math>4,27 \text{ mm}</math>;</p>	 <p>The image shows a macrograph of a metal surface with a series of overlapping, V-shaped grooves, similar to Teste 41 but with a slightly different appearance. A ruler is visible on the right side, showing markings from 12 to 17 mm. Below the macrograph is a cross-sectional view of the grooves, showing their depth and width. A scale bar labeled '5 mm' is located in the bottom right corner of the cross-section.</p>

a) Teste 43

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 80 \text{ A}$ ;  $DBP = 10 \text{ mm}$ ;  
 $V_G = 4,5 \text{ mm/s}$ ;  
 Freqüência =  $1 \text{ Hz}$ ;  
 Amplitude =  $20 \text{ mm}$ ;  
 Pressão do ar =  $55 \text{ psi}$ ;  
 $\alpha = 20^\circ$ ;

Largura média =  $20,97 \text{ mm}$ ;  
 Profundidade média =  $1,29 \text{ mm}$ ;

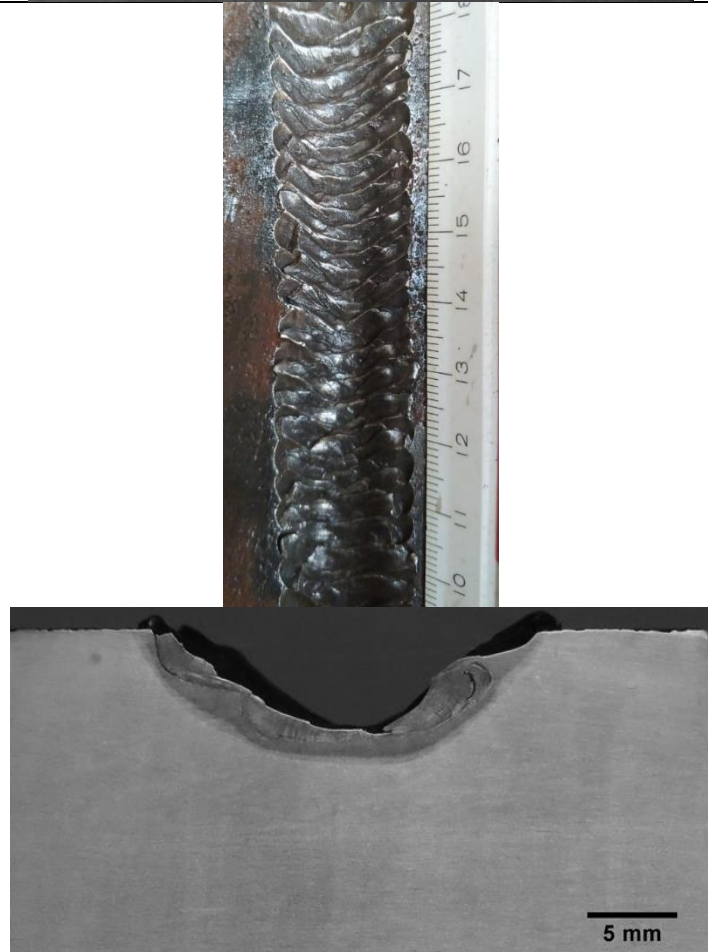



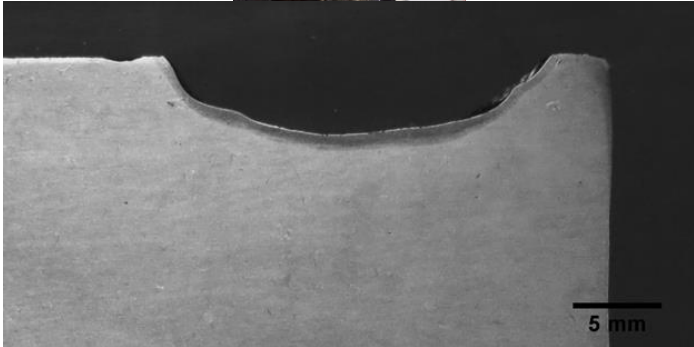
b) Teste 44

Goivagem (Vista Superior) e macrografia;

$I = 80 \text{ A}$ ;  $DBP = 10 \text{ mm}$ ;  
 $V_G = 4,5 \text{ mm/s}$ ;  
 Freqüência =  $1 \text{ Hz}$ ;  
 Amplitude =  $20 \text{ mm}$ ;  
 Pressão do ar =  $55 \text{ psi}$ ;  
 $\alpha = 45^\circ$ ;

Largura média =  $19,68 \text{ mm}$ ;  
 Profundidade média =  $4,69 \text{ mm}$ ;



<p>a) Teste 45</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 10 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 4,5 \text{ mm/s}</math>; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 20 mm; Pressão do ar = 55 psi; <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 20,18 mm; Profundidade média = 4,99 mm;</p>	 
<p>b) Teste 46</p> <p>Goivagem (Vista Superior) e macrografia;</p> <p><math>I = 80 \text{ A}</math>; <math>DBP = 10 \text{ mm}</math>; <math>V_G = 4,5 \text{ mm/s}</math>; Frequência = 1 Hz; Amplitude = 20 mm; Pressão do ar = 55 psi; <math>\alpha = 32,5^\circ</math>;</p> <p>Largura média = 20,77 mm; Profundidade média = 4,95 mm;</p>	