

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME SIRTOLI TONON
LEONARDO DA SILVA SALDANHA
SATIÊ LAGASSE MIRANDA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS NO CORTE A PLASMA:
QUALIDADES DE CORTE E ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS**

ARACRUZ
2025

**GUILHERME SIRTOLI TONON
LEONARDO DA SILVA SALDANHA
SATIÊ LAGASSE MIRANDA**

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS NO CORTE A PLASMA:
QUALIDADES DE CORTE E ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Cristiano Pessotti Del Carro

ARACRUZ

2025

RESUMO

O trabalho aborda os efeitos da variação dos parâmetros do corte a plasma sobre a qualidade do corte e as características microestruturais das peças processadas. O objetivo é avaliar como alterações na velocidade de corte, corrente elétrica e altura da tocha influenciam o arraste de estrias, o paralelismo das superfícies, a formação de escória, bem como as microestruturas da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona fundida (face de corte). Foi utilizado o método de Taguchi para otimizar os parâmetros de corte, e uma análise de variância (ANOVA) foi conduzida para identificar a significância dos fatores. Os resultados indicaram que a velocidade de corte é o fator mais influente no arraste de estrias e na formação de escória, com velocidades baixas e intermediárias resultando em cortes mais uniformes e com menor aderência de resíduos metálicos. A corrente demonstrou maior impacto no paralelismo das superfícies, sendo valores intermediários os mais adequados para minimizar desvios. Já a altura da tocha apresentou indicações de otimização com valores intermediários para altos, minimizando a formação de escória e outros defeitos. As microestruturas encontradas incluem ferrita, martensita, bainita e ferrita acicular, formadas em função das condições térmicas e dos parâmetros de corte aplicados. As análises microestruturais revelaram que a face de corte de grande parte das amostras apresentou predominância de martensita, evidenciando o efeito do rápido resfriamento associado ao processo de corte a plasma. Conclui-se que o controle preciso dos parâmetros de corte é essencial para garantir uma qualidade superior do corte e para minimizar alterações microestruturais indesejadas que possam comprometer o desempenho do material.

Palavras-chave: corte a plasma; parâmetros de corte; qualidades de corte; método de Taguchi; análise de microestruturas.

ABSTRACT

This study examines the effects of plasma cutting parameter variation on the cut quality and the microstructural characteristics of the processed pieces. The objective is to evaluate how changes in cutting speed, electrical current, and torch height influence the drag lines formation, surface parallelism, dross formation, as well as the microstructures of the heat-affected zone (HAZ) and the fusion zone (cutting face). The Taguchi method was employed to optimize the cutting parameters, and an analysis of variance (ANOVA) was conducted to determine the significance of the factors. The results indicated that cutting speed is the most significant factor affecting drag lines formation and dross formation, with low and intermediate speeds leading to more uniform cuts and reduced adhesion of metallic residues. Current had a greater influence on surface parallelism, with intermediate values being the most suitable for minimizing deviations. Torch height exhibited optimal performance at intermediate to high values, contributing to reduced dross formation and minimizing other defects. The microstructures identified include ferrite, martensite, bainite, and acicular ferrite, formed as a result of the thermal conditions and cutting parameters applied. Microstructural analyses revealed that the cutting face of most samples predominantly exhibited martensite, highlighting the effect of rapid cooling associated with the plasma cutting process. It is concluded that precise control of cutting parameters is essential to ensure superior cutting quality and to minimize undesirable microstructural changes that could compromise the material's performance.

Keywords: plasma cutting; cutting parameters; cutting quality; Taguchi method; microstructure analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de corte por plasma	13
Figura 2 - Corte a plasma com duplo fluxo de gás	14
Figura 3 - Corte a plasma com injeção de água.....	15
Figura 4 - Plasma de alta definição	15
Figura 5 - Formato do feixe de plasma.....	18
Figura 6 - Aparência da borda da peça após corte	20
Figura 7 - Comparação entre a direção do fluxo de plasma e o formato frontal do corte	21
Figura 8 - Diferentes formatos de corte em diferentes velocidades	21
Figura 9 - Superfície após corte dos corpos de prova.....	23
Figura 10 - Superfície de corte estrutural com diferentes configurações de parâmetros	26
Figura 11 - Estrutura da Zona Termicamente Afetada	29
Figura 12 - Área afetada pelo calor e zona de transição do corte da amostra	30
Figura 13 - Região do material afetada pelo calor.....	31
Figura 14 - Fotomicrografias ópticas de aços inoxidáveis cortados por plasma.....	32
Figura 15 - Fotomicrografias ópticas de aços carbono cortados por plasma	32
Figura 16 - Microestrutura da Zona Fundida	34
Figura 17 - Dimensões do corpo de prova	36
Figura 18 - Máquina de corte a plasma.....	37
Figura 19 - Computador conectado à máquina plasma.....	37
Figura 20 - Modelo geral de um processo	38
Figura 21 - Modelo arranjo ortogonal L9	43
Figura 22 - Direção de corte plasma do corpo de prova	45
Figura 23 - Direção do corte com serra do corpo de prova	45
Figura 24 - Arraste de estrias	47
Figura 25 - Indicador de paralelismo da superfície.....	48
Figura 26 - Escória aderida a superfície de corte.....	48
Figura 27 - Medição do arraste de estrias através do software ImageJ	50
Figura 28 - Medição do paralelismo de superfície através do software ImageJ	54
Figura 29 - Microestrutura do metal base.....	60

Figura 30 - Microestruturas na face de corte das amostras 1 a 4	61
Figura 31 - Microestruturas na face de corte das amostras 6 a 9	62
Figura 32 - Microestruturas da face de corte da amostra 5.....	63
Figura 33 - Microestruturas encontradas na ZTA das amostras 2, 3, 5 e 6.....	64
Figura 34 - Microestruturas encontradas na ZTA das amostras 7, 8 e 9.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para utilização do corte a plasma	17
Tabela 2 - Composição química do aço 1020	35
Tabela 3 - Arranjos ortogonais	40
Tabela 4 - Parâmetros e níveis do experimento	43
Tabela 5 - Arranjo ortogonal do experimento	44
Tabela 6 - Resultados do experimento	49
Tabela 7 - Medições do arraste de estrias	50
Tabela 8 - Razão S/N para o arraste de estrias	51
Tabela 9 - ANOVA para o arraste de estrias	52
Tabela 10 - Medições do paralelismo de superfície	53
Tabela 11 - Razão S/N para o paralelismo de superfície	55
Tabela 12 - ANOVA para o paralelismo da superfície	56
Tabela 13 - Medições da formação de escória	57
Tabela 14 - Razão S/N para formação de escória	58
Tabela 15 - ANOVA para formação de escória	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 DEFINIÇÃO DE CORTE A PLASMA	12
3.2 PROCESSO DE CORTE A PLASMA	13
3.3 PARÂMETROS DE CORTE	16
3.3.1 Distância entre a tocha e a peça	17
3.3.2 Velocidade de corte	19
3.3.3 Corrente	24
3.3.4 Pressão do gás	26
3.3.5 Fluxo de gás de plasma	28
3.4 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A MICROESTRUTURA	28
3.4.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA)	28
3.4.2 Face de Corte (FC)	31
4 METODOLOGIA	35
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	35
4.1.1 Materiais	35
4.1.2 Corpo de prova	35
4.1.3 Máquina de corte a plasma	36
4.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	38
4.2.1 Definição	38
4.2.2 Método de Taguchi	39
4.2.3 Análise de Variância (ANOVA)	42
4.3 MÉTODO	42
4.3.1 Variação de parâmetros	42
4.3.2 Procedimento de corte	44
4.3.3 Procedimento de análise metalográfica	46
4.3.4 Método de análise	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49

5.1 ARRASTE DE ESTRIAS	49
5.2 PARALELISMO DA SUPERFÍCIE.....	53
5.3 FORMAÇÃO DE ESCÓRIA.....	57
5.4 MICROESTRUTURA.....	60
5.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA	67
6 CONCLUSÃO	69
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

O corte de metal pode ser caracterizado como uma forma de deformação, que se manifesta nos componentes do processo de corte, onde o sistema é configurado de modo a aplicar energia externa para induzir a fratura da camada a ser removida. Também chamado de usinagem, é um dos processos mais antigos da indústria de transformação para a fabricação de componentes (Astakhov, 2006). O processo de corte pode variar conforme o tipo de energia utilizada para a ação, que pode ser mecânica (como em serras ou guilhotinas), térmica (como nos cortes a plasma, oxicorte ou laser) ou química (como no corte a jato de água com abrasivo).

À medida que os processos industriais avançam, a necessidade de empregar métodos capazes de conjugar qualidade e eficiência tornou-se essencial. Nesse contexto, o corte a plasma emerge como uma alternativa que tem sido progressivamente adotada e que, segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017), foi introduzida em 1955, substituindo outros processos como corte por serra, prensa, tesouras e corte com chama e adição de pós. De acordo com Cicero *et al.* (2016), a técnica de corte a plasma permite que o fabricante aumente sua produtividade, reduzindo, conseqüentemente, custos de produção, e permite que sejam realizados cortes com geometrias de alta complexidade e com elevada precisão.

Marques, Modenesi e Bracarense (2017) reafirma que as variáveis operacionais mais importantes do processo são corrente, velocidade de corte, fluxo de gás de plasma e distância bocal-peça ou *stand-off*. Adicionalmente, diz que as variáveis operacionais são determinadas em função do material e da espessura do material a ser cortado.

Diversos estudos são desenvolvidos com o objetivo de realizar comparações entre métodos de corte, a fim de avaliar características de cada processo. Krajcarz (2014), por exemplo, comparou, em seu artigo, a melhor tecnologia para corte de metal entre os métodos de jato d'água, laser e plasma. De acordo com o autor, o corte a plasma se destaca nos quesitos velocidade, baixo custo e dureza do material. Por sua vez, Chamarthi *et al.* (2013) direcionou seu estudo à variação de três parâmetros (velocidade de corte, tensão e fluxo de plasma) com o objetivo aumentar a densidade de energia gerada pelo sistema a fim de atingir maior espessura de corte sem comprometer sua qualidade geral.

Dentre as diversas categorias de aços, o aço SAE 1020 é amplamente utilizado na indústria de estruturas metálicas, sendo considerado um aço estrutural devido à sua boa soldabilidade e capacidade de conformação mecânica. Com baixo teor de carbono e uma composição química simples, esse material é de fácil acesso no mercado e apresenta baixo custo (Rosa *et al.*, 2018). Além disso, de acordo com Manhães (2018), o SAE 1020 é frequentemente empregado em projetos mecânicos, uma vez que não contém muitos elementos de liga além do carbono e ferro, o que reduz a interferência de elementos adicionais nos tratamentos realizados.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é explorar o corte a plasma em relação a três parâmetros influentes: velocidade de corte, intensidade de corrente e distância entre a tocha e a peça. Objetiva-se investigar a influência da variação dos parâmetros nas características qualitativas do processo, e analisar os impactos dessas variações nas microestruturas da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e da Zona Fundida (face de corte) do aço SAE 1020.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência da variação de parâmetros de corte nas características qualitativas do processo de corte a plasma do aço SAE 1020.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar o impacto da variação da velocidade de corte, corrente e altura da tocha no arraste de estrias, paralelismo de superfície e formação de escória;

Aplicar o método de Taguchi no estudo da variação dos parâmetros para, através das relações sinal-ruído, identificar condições ideais de corte;

Aplicar análise de variância (ANOVA) para determinar a relevância relativa de cada fator na variabilidade dos resultados obtidos;

Analisar as mudanças microestruturais no aço SAE 1020 após o processo de corte a plasma.

3 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

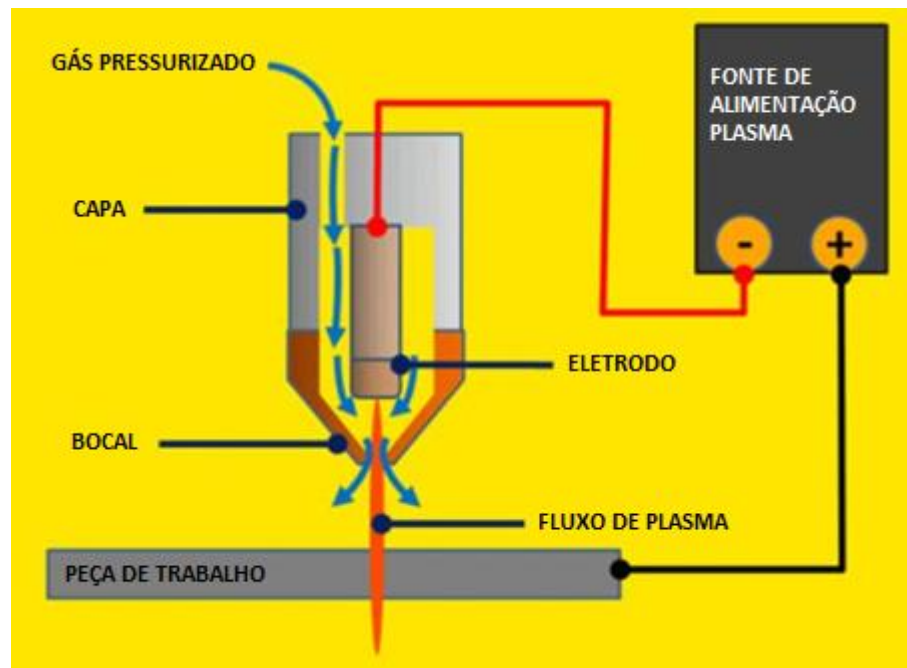
3.1 DEFINICAO DE CORTE A PLASMA

Segundo Wainer *et al.* (1992), o princípio fundamental da geração do arco por plasma, que atualmente é utilizado para finalidades como soldagem, corte, fusão e recobrimentos de superfícies metálicas, pode ser imputado à Gardien, que trabalhou com arcos refrigerados com água, em 1923, para obter iluminação de grande intensidade.

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2017), o princípio de funcionamento do corte a plasma se aproxima com o da soldagem a plasma (Figura 1). Wainer *et al.* (1992) afirma que “a coalescência de metal é obtida através do aquecimento feito pelo arco que sofreu constrição”. A constrição do arco possibilita grandes densidades de corrente e, conseqüentemente, grande concentração de energia e altas temperaturas. Ainda segundo Wainer *et al.* (1992), as diferenças fundamentais entre os processos que utilizam plasma são determinadas pela variação da intensidade de corrente do plasma, pela forma e diâmetro do orifício de constrição, pelo tipo de gás do arco de plasma e pela vazão do gás. Para o corte de metais, são empregadas alta intensidade de corrente, pequeno orifício de constrição, alto fluxo de gás e gás com alta condutividade térmica, aliados a alta velocidade do jato de plasma.

Sob os termos de Marques, Modenesi e Bracarense (2017), “o jato de plasma funde e expulsa o metal de base com grande eficiência, resultando em uma superfície com excelente acabamento, precisão dimensional, pouca ou nenhuma distorção e pequena zona afetada pelo calor”.

Figura 1 - Processo de corte por plasma



Fonte: Adaptado de Esab (2024).

3.2 PROCESSO DE CORTE A PLASMA

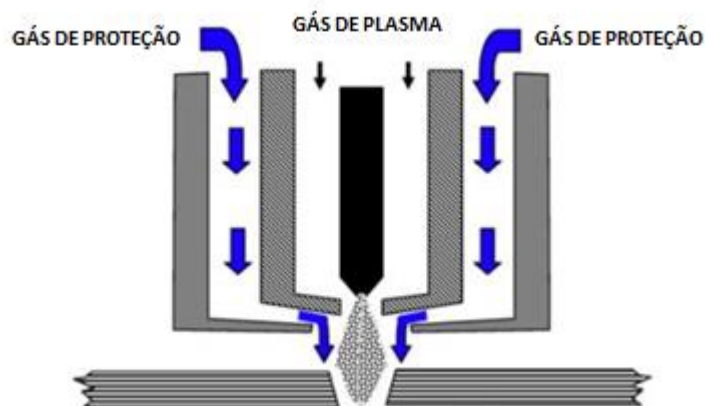
Basicamente, durante o processo de corte a plasma, um gás inerte é expelido em alta velocidade através de um bocal e, simultaneamente, um arco elétrico é formado através desse gás, desde o bocal até a superfície que está sendo cortada, transformando parte desse gás em plasma. Esse plasma é suficientemente quente para fundir o metal que está sendo cortado e sua movimentação veloz permite o arraste do metal fundido (Cicero *et al.*, 2016).

Em mais detalhes, Nemchinsky e Severance (2006) descreve o processo de corte a plasma sendo iniciado com a ignição do arco. Inicialmente, um arco piloto é estabelecido e em seguida, o fluxo de gás expulsa o arco piloto do bocal, formando um circuito de arco que se projeta para fora do bocal. Se a peça de trabalho estiver na posição adequada, o arco se conectará a ela, a fonte de energia detectará essa transferência e o bocal será retirado do circuito. A peça de trabalho atuará como ânodo, e a corrente principal será estabelecida no intervalo entre o eletrodo e a peça de trabalho.

Existem dois métodos para iniciar o processo de corte: pela periferia da peça ou perfurando a peça pelo meio. Geralmente, é preferível iniciar o corte pela periferia, pois dessa maneira é possível preservar a tocha. Entretanto, devido a formas e geometrias específicas da peça, eventualmente pode não ser possível evitar a perfuração pelo meio. Após a definição do método de início, basta iniciar o movimento da tocha. Para garantir uma boa qualidade do corte, o afastamento da tocha em relação a peça deve ser mantido constante (Nemchinsky e Severance, 2006).

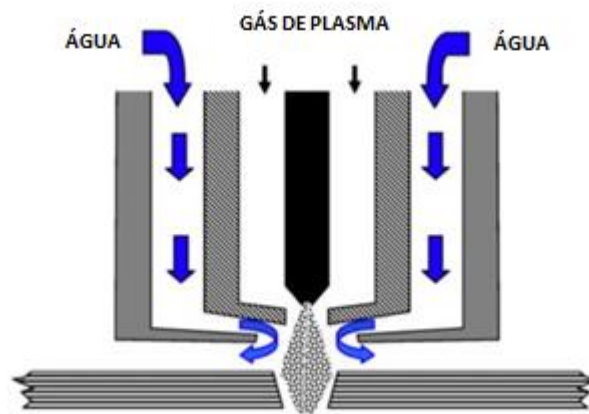
Há diversas variações do processo de corte a plasma, destinadas a otimizar a qualidade do corte conforme a aplicação específica. Em 1964, segundo Nemchinsky e Severance (2006), o uso de ar comprimido como gás de plasma foi introduzido no mercado. O oxigênio presente no ar fornece energia extra devido à sua reação exotérmica com o metal, elevando a velocidade de corte. No processo com duplo fluxo de gás (Figura 2), o nitrogênio é frequentemente utilizado como gás de plasma e o gás de proteção é selecionado de acordo com o material a ser cortado. No corte com proteção por água, substitui-se o gás de proteção por água. No corte a plasma com injeção de água (Figura 3), um jato de água atravessa o bocal restritor, melhorando o confinamento do plasma e protegendo-o contra contaminação. Além dessas variações, o corte a plasma pode ser empregado em situações em que a peça está submersa em água, para casos em que o material a ser cortado pode sofrer variações indesejáveis de propriedades, devidas ao calor do corte (Marques; Modenesi; Bracarense, 2017).

Figura 2 - Corte a plasma com duplo fluxo de gás



Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006).

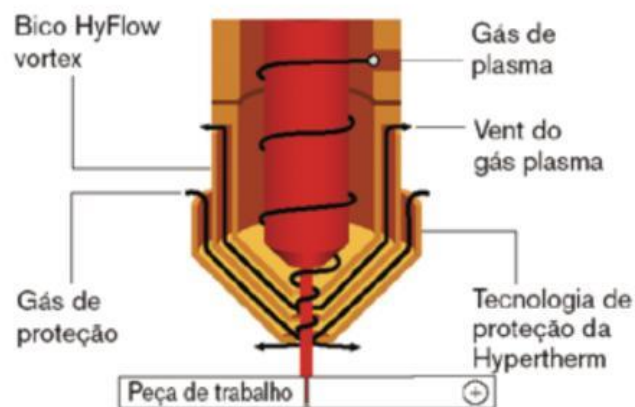
Figura 3 - Corte a plasma com injeção de água



Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006).

Lima (2006) completa que, por volta de 1990, surge o plasma de alta definição, que o torna adequado para peças que demandam alta qualidade de corte. O processo emprega um bico com orifício reduzido e um canal adicional para a liberação do excesso de gás plasma, resultando em cortes praticamente sem chanfro e sem a formação de escória. Na Figura 4 é possível verificar o funcionamento da tocha com plasma de alta definição. Ainda segundo Lima (2006), em 1993, foi introduzido o processo com jato de ar auxiliar aplicado coaxialmente ao jato de plasma e em 2004, novas tecnologias foram incorporadas a este processo com o objetivo de aprimorar seu desempenho e consistência. O resultado dessas melhorias foi a criação do processo *HyPerformance*, ou plasma de alto desempenho.

Figura 4 - Plasma de alta definição



Fonte: Lima (2006).

Santos (2015) afirma que o corte a plasma pode ser executado manualmente ou por meio de equipamentos automatizados. O processo de corte manual é simples e fácil operação. Os sistemas manuais mais modernos possuem um bocal eletricamente isolado, permitindo ao operador apoiar a tocha na peça e/ou utilizar uma régua ou gabarito para guiar o corte. No corte automatizado (também chamado de mecanizado), a tocha de plasma é manipulada por um sistema automático. Um dos sistemas é chamado de *computer numerically controlled* (CNC) (Lima, 2006).

3.3 PARÂMETROS DE CORTE

De acordo com Salonitis e Vatousianos (2012), investigações sobre processos de corte a plasma em diversos materiais identificaram os seguintes parâmetros como dominantes: velocidade de corte, corrente, distância entre a tocha e a peça (afastamento), tipo, pressão e fluxo do gás plasma. Marques, Modenesi e Bracarense (2017) acrescentam que outros parâmetros relevantes incluem o tipo de tocha, bem como o número, o diâmetro e a disposição dos orifícios e que as variáveis operacionais são definidas de acordo com o material e a espessura a serem cortados.

A tabela 1 mostra parâmetros para utilização do corte a plasma de acordo com o material a ser utilizado e sua espessura.

Tabela 1 - Parâmetros para utilização do corte a plasma

Material	Espessura (mm)	Diâmetro do orifício (mm)	Corrente (A)	Velocidade de corte (mm/s)
Alumínio (a)	6	3,2	300	127
	13	3,2	250	86
	25	4	400	38
	51	4	400	9
	102	4,8	450	5
Aço inoxidável (a)	6	3,2	300	86
	13	3,2	300	42
	25	4	400	21
	51	4,8	500	9
	102	4,8	500	3
Aço-carbono (b)	6	3,2	275	86
	13	3,2	275	42
	25	4	425	21
	51	4,8	550	11

(a) N₂ e Ar com adição de H₂, com vazões de 45 a 100 l/min, (ver instruções do fornecedor do equipamento).
(b) Ar comprimido ou N₂ com adições de H₂ ou O₂, com vazões de 90 a 140 l/min (ver instruções do fornecedor do equipamento).

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2017).

3.3.1 Distância entre a tocha e a peça

Salonitis e Vatousianos (2012), através de análise de experimentos pelo método de Taguchi, investigaram e determinaram os parâmetros mais importantes que influenciam na qualidade do corte a plasma com oxigênio. Eles inferiram, por meio de análise de variância para as relações sinal-ruído aplicadas nos testes realizados, que a altura de corte, que foi variada de 4,1mm a 8,1mm, é um dos principais fatores que influenciam as características de qualidade do corte, especialmente a conicidade e a rugosidade da superfície, com influência de 75% e 84% respectivamente. Essa influência ocorre devido à forma do feixe de plasma, que não é cilíndrica, mas se assemelha a uma chama de vela invertida, alterando a conicidade de acordo com a posição relativa do plasma em relação à superfície da peça, como pode ser visto na Figura 5. Em complemento, quando a tocha é posicionada muito acima da superfície

da peça, o arco de plasma se estende e se curva, resultando na formação de marcas de arraste e ondulações, afetando a rugosidade da superfície.

Figura 5 - Formato do feixe de plasma



Fonte: Adaptado de Hypertherm (2024).

Das *et al.* (2014), em seu experimento, que consistiu em utilizar o método Análise Relacional Cinza em conjunto com o método de Taguchi, determinaram os efeitos e otimização de três parâmetros de processo de corte a plasma, sendo eles pressão de gás, corrente e altura da tocha, nas características da rugosidade da superfície e taxa de remoção de material (MRR). Através da análise de variância, eles inferiram que a altura da tocha teve cerca de 5,8% de contribuição nas características de rugosidade e MRR, após variar esse parâmetro de 2mm a 6mm. Uma baixa altura da tocha resulta em um derretimento excessivo da área de processamento, que não pode ser removido e se solidifica novamente dentro da área de corte. Essa ressolidificação ocorre na forma de estrias, aumentando assim a rugosidade da superfície.

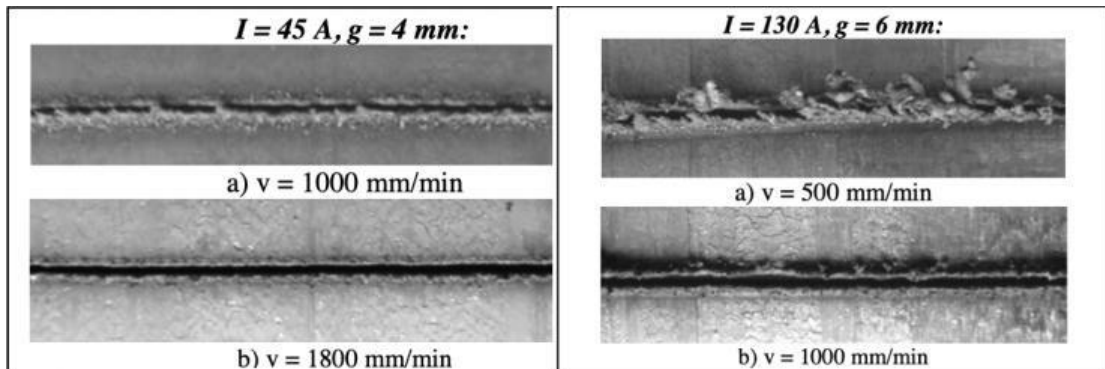
Hussain, Qazi e Abas (2023) basearam seu estudo na otimização simultânea de múltiplas respostas, sendo elas rugosidade superficial, taxa de remoção de material, largura do corte e formação de escória, utilizando parâmetros de processo como corrente, tensão, velocidade de corte e altura da tocha, por meio da integração dos métodos Taguchi, análise de componentes principais e desejabilidade composta. Ao variar a altura da tocha entre 3mm e 5mm, eles identificaram através da análise de variância, que esse parâmetro foi o que mais influenciou a rugosidade da superfície da peça, com mais de 50% de contribuição e, também, teve uma significativa influência na formação da escória, com cerca de 27% de contribuição. No presente

estudo, eles afirmam que o aumento da altura da tocha dispersa o jato de plasma, alterando sua forma cilíndrica e reduzindo a concentração de energia, o que torna o processo de fusão e vaporização do material menos eficiente. Isso resulta em uma velocidade de corte mais baixa, maior rugosidade superficial e acúmulo de escória aderente na peça, devido à instabilidade do arco e à incapacidade de expulsar completamente o metal fundido.

3.3.2 Velocidade de corte

O estudo de Ilii, Coteata e Munteanu (2010) analisou o corte do aço inoxidável AISI 304 por arco de plasma, investigando a variação do parâmetro de rugosidade superficial (R_a) em função da velocidade de corte, da espessura do material e da intensidade de corrente do arco de plasma e a metodologia adotada para comparação dos resultados foi a experimentação fatorial completa. A variação da velocidade ficou entre 1000mm/min e 1800mm/min, sendo fixada cada velocidade em 4 testes, resultando em 8 testes totais. Os resultados obtidos dos experimentos inferem que a quantidade de escória e seu grau de aderência à superfície da placa variam em função da velocidade de corte, da potência aplicada e da composição do material base. Observou-se que a escória pode se formar tanto em velocidades de corte baixas quanto em altas. Quando a velocidade é baixa, a escória tende a aparecer em pedaços discretos, que são facilmente removíveis e apresentam baixa aderência à placa. Em contrapartida, em altas velocidades de corte, a escória tende a formar uma camada contínua e altamente aderente, que geralmente requer lixamento para ser eliminada, conforme pode ser visualizado na Figura 6, onde “I” significa valor de corrente, “g” a distância entre a tocha e a peça e “v” a velocidade.

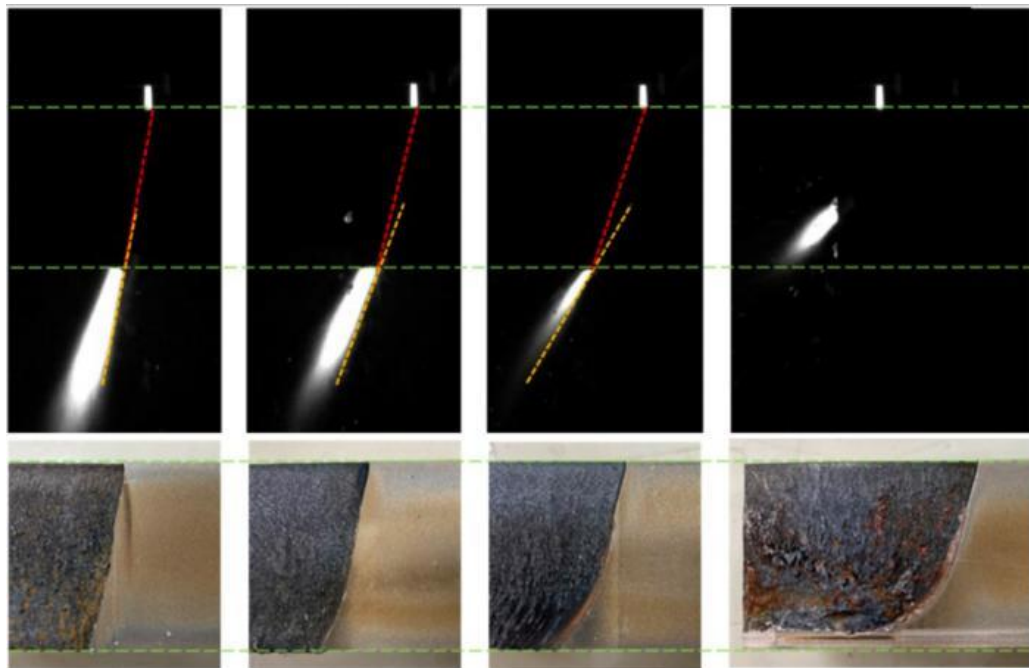
Figura 6 - Aparência da borda da peça após corte



Fonte: Adaptado de Ilii, Coteata e Munteanu (2010).

Tuladhar *et al.* (2024) investigou experimentalmente como os parâmetros de corrente e velocidade de corte afetam a geometria do entalhe no corte por plasma. Utilizando aço inoxidável (STS 304) de 30 mm de espessura, os resultados indicaram que a corrente elevada melhora a eficiência da remoção de material, enquanto velocidades mais altas reduzem a qualidade do corte devido à menor interação entre plasma e material. Em parte do seu experimento, eles fixaram o parâmetro corrente em 70A e variaram o parâmetro velocidade de corte de 100 a 300mm/min e, com o auxílio de um sistema de câmera de alta velocidade, concluíram que em uma menor velocidade o arco de plasma coincide com a linha que representa a frente de corte e com o aumento da velocidade, a direção do arco de plasma se desvia da direção da frente de corte, indicando a presença de curvatura no formato da frente de corte, conforme pode ser visto na Figura 7. Eles, também, através da análise de variância, constataram que a velocidade de corte contribuiu com 50,52% para a variação na qualidade do corte, demonstrando sua significativa influência.

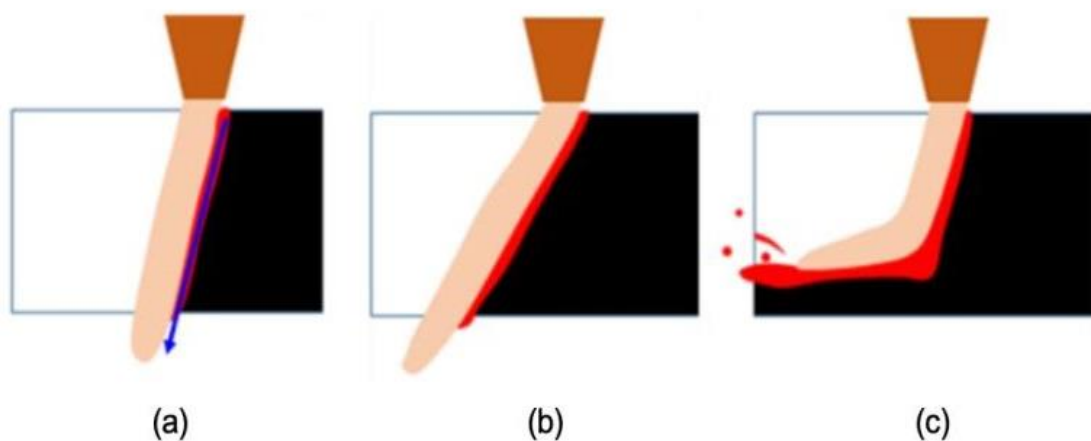
Figura 7 - Comparação entre a direção do fluxo de plasma e o formato frontal do corte



Fonte: Adaptado de Tuladhar *et al.* (2024).

A Figura 8, apresenta de forma esquemática o formato de corte com a variação de velocidade. Em (a) tem-se baixa velocidade de corte, em (b), alta velocidade de corte na qual o plasma penetra na amostra e em (c) alta velocidade de corte na qual o plasma não consegue penetrar na amostra e o material fundido sai pela lateral (Tuladhar *et al.*, 2024).

Figura 8 - Diferentes formatos de corte em diferentes velocidades

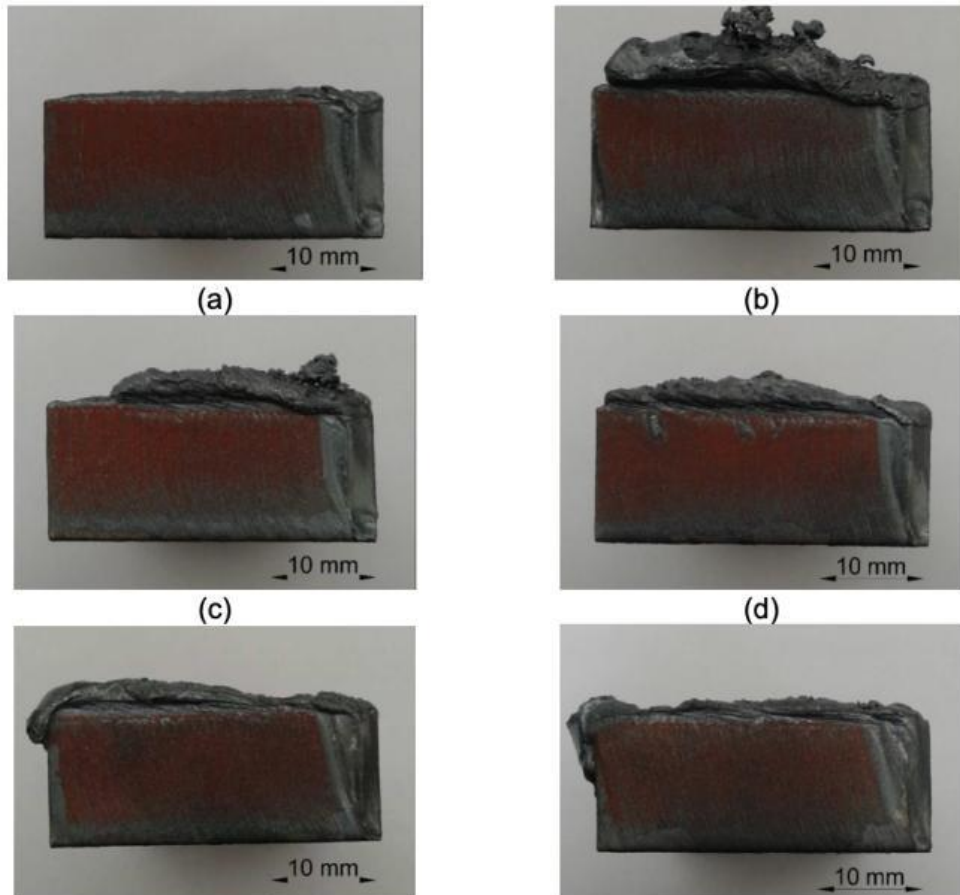


Fonte: Adaptado de Tuladhar *et al.* (2024).

O estudo de Felix, Ramesh e Roseline (2017) investigou os parâmetros de corte por plasma no aço inoxidável SS410, sendo eles tensão do arco, velocidade de corte e tempo de atraso no desempenho do corte, utilizando o método Taguchi, seguindo um arranjo L9, e análise de variância para otimizar a planicidade e a rugosidade superficial. Os parâmetros de velocidade de corte variaram de 3500 a 4000 mm/min, tensão de 152 a 160V e tempo de atraso de 0,25 a 0,75 μ s. A velocidade de corte foi identificada como o parâmetro mais influente na rugosidade, com uma contribuição de 31%. Isso ocorreu porque a velocidade afeta diretamente a interação entre o arco de plasma e o material, influenciando a eficiência na remoção do material fundido. Velocidades de corte mais altas (3750 mm/min e 4000 mm/min) resultaram em maior rugosidade devido à remoção incompleta do material, enquanto velocidades mais baixas (3500 mm/min) reduziram a rugosidade. A configuração ideal para minimizar a rugosidade foi encontrada com uma tensão de 155 V, velocidade de 3500 mm/min e um tempo de atraso de 0,75 μ s.

O artigo de Ferreira *et al.* (2018) avalia a influência de parâmetros como corrente elétrica, velocidade de corte e distância entre a tocha e a peça no corte por plasma do aço AISI 1045. O foco principal é analisar a qualidade da superfície cortada, as características microestruturais e a ZTA resultante. Dentre as variações dos parâmetros (velocidade de corte – 16,4 a 78,7cm/min, corrente – 48 a 60A e altura da tocha – 1,2 a 7,2mm), velocidades mais altas, como 57,0 cm/min, resultaram em maiores linhas de arraste devido à instabilidade do plasma, que não é capaz de acompanhar a tocha, gerando, assim, inclinação acentuada dos sulcos. Por outro lado, a velocidade mais baixa testada (16,4 cm/min) gerou maior formação de rebarbas, atribuída ao maior aporte térmico e tempo de permanência do plasma sobre o material, conforme se observa na Figura 9, onde em (a) tem-se uma velocidade de corte de 16,4cm/min, em (b) 21,8 cm/min, em (c) 24,5 cm/min, em (d) 29,9 cm/min, em (e) 40,8 cm/min e em (f) 57,0 cm/min.

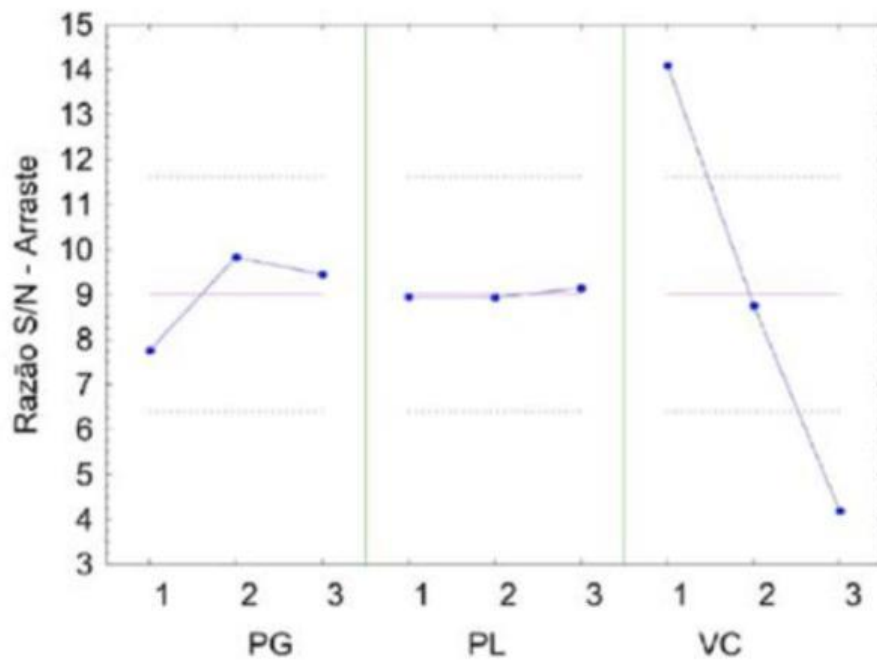
Figura 9 - Superfície após corte dos corpos de prova



Fonte: Ferreira *et al.* (2018).

Segundo o estudo de Jablonski, Lermen e Molin (2014) sobre a otimização de parâmetros de corte LASER CO₂ em chapas de aço ao carbono, que analisou a influência de fatores como velocidade de corte, pressão do gás e potência do LASER, utilizando uma matriz ortogonal L₉ do método de Taguchi para distribuição de testes e o método sinal-ruído para avaliar a variabilidade dos resultados, a velocidade de corte é o fator mais significativo no processo, como pode ser visto no Gráfico 1, com impacto direto no arraste de estrias, contribuindo com 47,8% da variação total, conforme a análise de variância. Velocidades mais altas reduziram o arraste de estrias, ao proporcionar cortes mais lineares e minimizar a formação de irregularidades na superfície. No entanto, velocidades muito elevadas comprometeram a remoção completa do material fundido, afetando a qualidade geral do corte.

Gráfico 1 - Razão S/N do arraste de estrias para os fatores analisados



Fonte: Adaptado de Jablonski, Lermen e Molin (2014).

3.3.3 Corrente

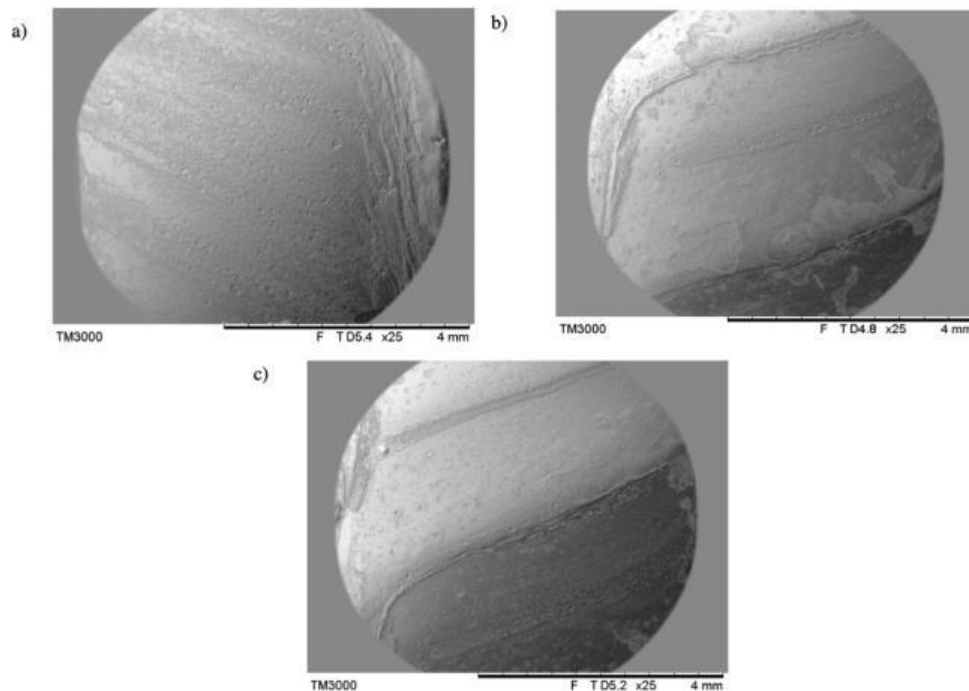
Gani, Ion e Yang (2021) investigaram a otimização de parâmetros de corte por plasma em chapas finas de aço DC01 (0,12% C, 0,6% Mn, 0,045% P, 0,45% S) com 0,6 mm de espessura, avaliando a deformação superficial e a ZTA. Utilizando o método de Taguchi, com uma matriz ortogonal L9, foram testadas 9 combinações de velocidade, pressão e corrente. Análise de variância foi aplicada para verificação dos resultados. A velocidade de corte variou entre 8000 e 9000mm/min, a pressão do gás entre 70 e 80psi e a corrente elétrica entre 20 e 30A. A análise indicou que a intensidade da corrente foi o parâmetro mais influente na deformação, com 51,7% de influência, devido ao aporte térmico gerado diretamente pela intensidade, que aumenta o calor transferido ao material, resultando, assim, em maior deformação superficial.

Tuladhar *et al.* (2024), em seu experimento que investigou a variação dos parâmetros corrente e velocidade de corte na geometria do entalhe no corte por

plasma, inferiu que a corrente aplicada no processo, que variou entre 60A, 70A e 80A, teve um impacto significativo na qualidade do corte. A corrente mais alta resultou em maior eficiência de remoção de material e maior profundidade de penetração, mas, também, aumentou a largura do entalhe, especialmente na base, além de gerar maior formação de escória. Esses efeitos prejudicaram a qualidade superficial do corte, tornando a corrente de 80A mais eficaz para a remoção de material, mas com maior impacto negativo na precisão e acabamento da peça.

O estudo de Bhuvnesh, Norizaman e Manan (2012) investigou a relação entre a taxa de remoção de material (MRR) e a rugosidade superficial (SR) no corte por plasma manual. Um arranjo ortogonal L9 do método Taguchi foi utilizado, variando os parâmetros de pressão do ar (5,5 – 6,5 bar), corrente (70 – 80 A), velocidade de corte (600 – 800 mm/min) e distância entre a tocha e a peça (3 – 5 mm). Foi constatado que a corrente é um dos parâmetros mais influentes, impactando diretamente a eficiência do MRR, pois correntes mais altas resultaram em maior MRR (até 6400 mm³/min) e menor rugosidade superficial (20–30 µm) devido à maior energia disponibilizada para o corte. No entanto, valores inadequados de corrente também contribuíram para a formação de escória, afetando a qualidade do corte. Na Figura 10 é possível verificar em (a) MRR = 5500 - 6400 mm³/min, SR = 20–30 µm, em (b) MRR = 3600 - 4800 mm³/min, SR = 30–50 µm e em (c) MRR = 3000 - 3500 mm³/min, SR = 65–80 µm.

Figura 10 - Superfície de corte estrutural com diferentes configurações de parâmetros



Fonte: Bhuvnesh, Norizaman e Manan (2012).

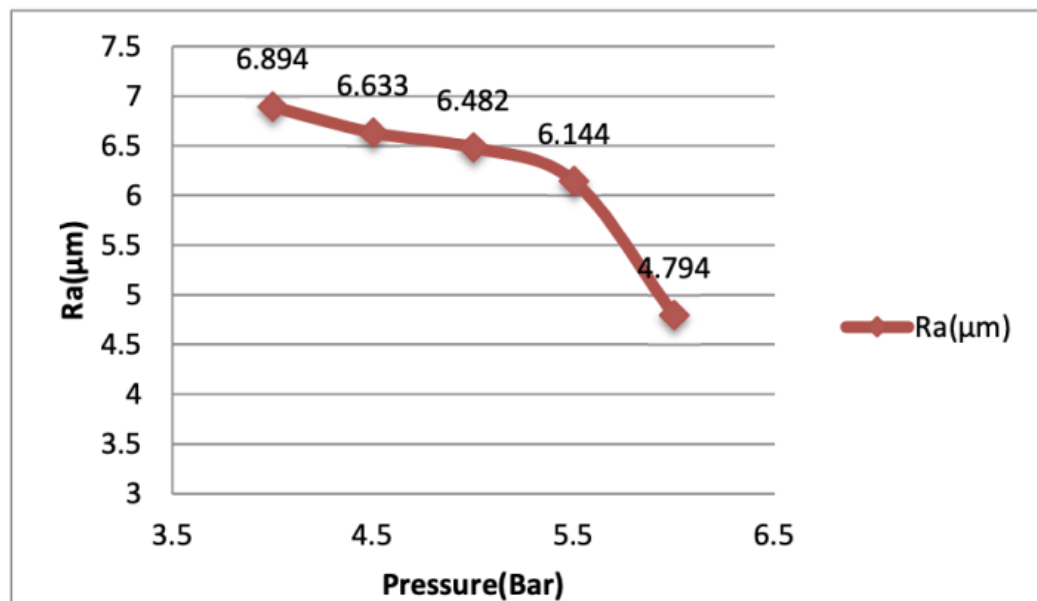
3.3.4 Pressão do gás

De acordo com o estudo de Das *et al.* (2014), que teve como objetivo otimizar os parâmetros do corte por plasma no aço EN 31 (1,07% C, 0,57% Mn, 0,32% Si, 0,04% P, 0,03% S, 1,13% Cr), analisando a Taxa de Remoção de Material (MRR) e a rugosidade superficial (Ra) por meio da Análise Relacional Cinza (GRA) aliado ao método de Taguchi, a pressão de gás, variada entre 4 bar e 6 bar, teve um impacto moderado nos resultados, sendo essencial para a estabilidade do arco e a remoção de resíduos fundidos. O nível intermediário de 5 bar foi identificado como ideal para garantir cortes limpos e consistentes, colaborando para o equilíbrio entre qualidade superficial e eficiência do processo. Através da análise de variância, eles concluíram que a pressão de gás contribui em aproximadamente 24% na MRR e na Ra.

Afifi *et al.* (2021) investigaram a influência de parâmetros de corte por arco de plasma no aço Hardox 400 (0,010% S, 0,70% Si, 0,60% Mo, 1,46% Mn, 0,32% C,

1,50% Ni, 0,04% B, 0,025% P, 2,50% Cr), avaliando a largura do rasgo, rugosidade superficial e Zona Termicamente Afetada (ZTA). Entre os parâmetros analisados, a pressão do gás de plasma, que foi variada de 4 a 6 bar, teve impacto significativo. Pressões mais altas resultaram em menor rugosidade superficial, com diferença de até 2,5 μm , devido à remoção mais eficiente do metal fundido, como pode ser observado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Efeito da pressão na rugosidade da superfície



Fonte: Afifi et al. (2021).

Singh (2011) investigou a otimização de parâmetros do corte por plasma em aço inoxidável 316L, avaliando a taxa de remoção de material (MRR) e a rugosidade superficial (Ra). Os parâmetros estudados foram pressão do gás (6 e 7 bar) corrente elétrica (150 e 200A), velocidade de corte (400 E 600mm/min) e distância da tocha (1 e 4mm). O método de Taguchi, com uma matriz ortogonal L16, foi utilizado para projetar os experimentos e análise de variância foi aplicada para identificar os fatores mais influentes. De acordo com a análise de variância, a pressão do gás contribuiu com 19,6% para a variação da rugosidade superficial (Ra), sendo o segundo fator mais influente. Pressões mais altas (6 bar) reduziram a rugosidade devido à maior estabilidade do arco e melhor remoção do material fundido. Entretanto, a pressão mais baixa (5 bar) favoreceu o MRR máximo, ao concentrar o calor na região de corte.

3.3.5 Fluxo de gás de plasma

O estudo de Chamarthi *et al.* (2013) analisou o impacto dos parâmetros de corte por plasma na irregularidade superficial de placas Hardox-400 de 12mm, utilizando planejamento de experimentos e análise de variância. Com variação de velocidades entre 2100 e 2300mm/min, de tensão entre 125 e 135V e fluxo de gás de plasma entre 70 e 80l/h, a menor irregularidade, medida através de um medidor de profundidade, foi obtida com velocidade de 2100 mm/min, vazão de plasma de 70 L/h e tensão de 125 V. Eles concluíram que a vazão do plasma foi o fator mais influente no processo, com cerca de 55,81% de contribuição.

3.4 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO CORTE SOBRE A MICROESTRUTURA

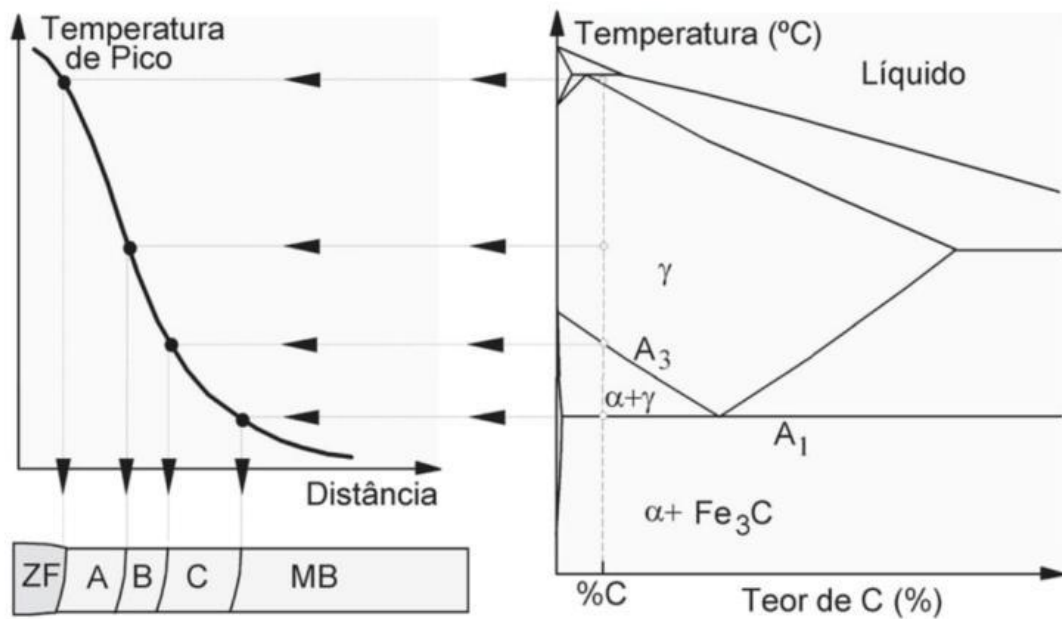
3.4.1 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A variação da velocidade de corte, da intensidade de corrente e da distância entre a tocha e a peça durante o corte a plasma influencia diretamente as propriedades mecânicas do material, especialmente na zona termicamente afetada (ZTA), nas microestruturas formadas e, conseqüentemente, na integridade e aplicabilidade futura do material. As características da ZTA dependem fundamentalmente do tipo de metal de base, bem como do processo e procedimento de corte ou soldagem empregados. De acordo com o tipo de metal utilizado, os efeitos do ciclo térmico poderão variar (Marques; Modenesi; Bracarense, 2017).

A Figura 11 apresenta a estrutura da ZTA de um aço. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017), a região de crescimento de grão compreende a área do metal de base mais próxima do processo, que foi submetida a temperaturas entre aproximadamente 1.200°C e o ponto de fusão (região A). Essa região é frequentemente a mais crítica da ZTA, podendo apresentar baixa tenacidade e sendo um ponto propenso à formação de trincas. A região de refino de grão (região B), que

abrange a porção da junta aquecida a temperaturas entre 900°C e aproximadamente 1.200°C, é geralmente caracterizada por uma estrutura fina de ferrita e perlita e, na maioria dos casos, não apresenta problemas significativos. Para concluir, a região intercrítica (região C) é caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base, sendo apenas uma parte do material alterado pelo ciclo térmico.

Figura 11 - Estrutura da Zona Termicamente Afetada



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2017).

Ananthakumar *et al.* (2018) investigaram os efeitos dos parâmetros do processo de corte a plasma no Monel 400 (61,4% Ni, 31,9% Cu, 2,3% Fe, 2% Mn, 0,6% Si, 1,8% outros), buscando otimizar múltiplas respostas, como taxa de remoção de material, tamanho da ranhura de corte e zona termicamente afetada. Eles utilizaram uma abordagem estatística combinando Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) e a Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS). Foi observado que a ZTA, medida com o auxílio de um microscópio, foi significativamente influenciada pela pressão do gás (38,69%) e pela distância da tocha (16,16%), conforme análise de variância. Foram analisadas as características morfológicas das peças cortadas, usando um microscópio eletrônico de varredura, buscando disparidade da zona de corte. Altas pressões de gás reduziram a ZTA ao favorecer a remoção rápida do material fundido, enquanto maiores distâncias da tocha aumentaram a extensão da ZTA devido à dispersão do jato de plasma. A configuração

ideal, com 2400 mm/min de velocidade, 3 bar de pressão, 45 A de corrente e 2 mm de distância da tocha, minimizou a ZTA e garantiu melhor qualidade de corte.

O artigo de Gullu e Atici (2006) investigou os efeitos dos parâmetros de corte por plasma, como velocidade de corte e altura da tocha, nas alterações microestruturais e na zona termicamente afetada de aços inoxidáveis AISI 304 e aços carbono St 52 (0,025% C, 0,55% Si, 1,60% Mn, 0,51% P, 0,033% S, 0,079% Cr, 0,013% Mo, 0,121% Ni, 0,0069% Al, 0,0123% Co, 0,441% Cu, 0,00321% Nb, 0,00159% Ti, < 0,001% V, 0,0087% W). As velocidades de corte foram ajustadas entre 2000 mm/min e 2400 mm/min, com base nas recomendações do fabricante. Eles observaram que velocidades mais altas resultaram em maior largura da ZTA, variando de 0,397 mm a 0,429 mm no AISI 304 e de 0,341 mm a 0,482 mm no St 52, que foram identificadas através das alterações na microestrutura das regiões próximas ao corte (Figura 12).

Figura 12 - Área afetada pelo calor e zona de transição do corte da amostra

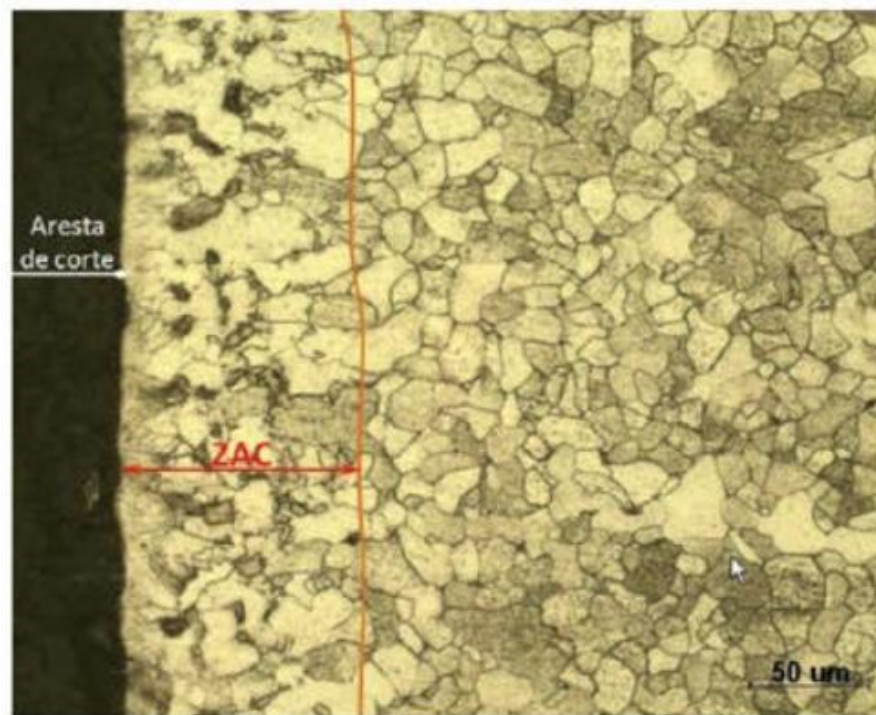


Fonte: Adaptado de Gullu e Atici (2006).

Jablonski, Lermen e Molin (2014) e Umroh *et al.* (2024) conduziram seus experimentos de análise da influência da alteração de parâmetros em cortes a LASER. Umroh *et al.* (2024) inferiu que a ZTA, medida com micrografias obtidas por microscopia estereoscópica e identificada pela descoloração devido a alterações térmicas, em velocidades mais altas (750-800 mm/min) tiveram seu tamanho reduzido, enquanto velocidades mais baixas (500 mm/min) aumentaram para até 1,20 mm, devido ao maior aporte térmico e transferência de calor prolongada. Já Jablonski, Lermen e Molin (2014) constataram que a ZTA, medida através de um software de imagem que converte medidas em pixels para dimensões reais, e identificada por

meio da mudança na microestrutura do material, que se torna menos homogênea em relação ao metal base, como visto na Figura 13, apresentou pouca variação entre os testes, independentemente das mudanças nos parâmetros de corte, permanecendo praticamente constante em torno de 0,07 mm.

Figura 13 - Região do material afetada pelo calor



Fonte: Jablonski, Lermen e Molin (2014).

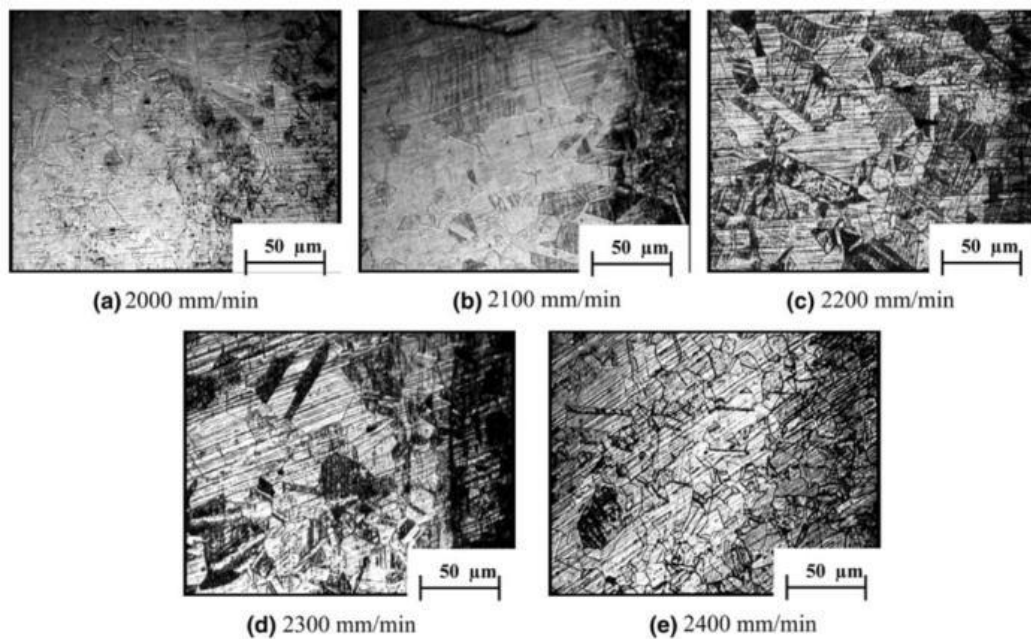
3.4.2 Face de corte (FC)

Na face de corte é onde se estabelece a chamada zona fundida (ZF) do metal. Como a temperatura nessa região pode chegar a 25000K (aproximadamente 24700 celcius), de acordo com Machado (1996), o calor gerado pelo arco plasma derrete o material nessa região. O tamanho da ZF varia conforme a alteração dos parâmetros de corte e do material submetido ao corte.

O artigo de Gullu e Atici (2006) se aprofundou no estudo das alterações microestruturais dos aços AISI 304 e aços carbono St 52 após o corte a plasma. Com variação de velocidade de corte e altura da tocha, eles identificaram as mudanças

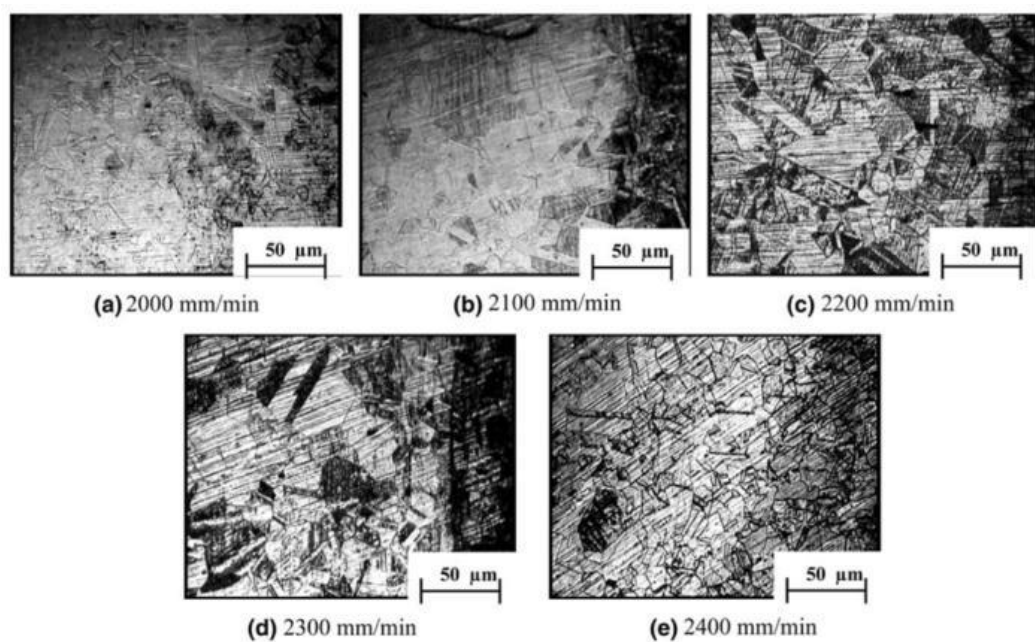
ocorridas nas microestruturas em relação ao metal base. No AISI 304, partículas de austenita foram evidenciadas, enquanto no St 52 ocorreram deformações em estruturas ferríticas e perlíticas, conforme visto na Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Fotomicrografias ópticas de aços inoxidáveis cortados por plasma



Fonte: Gullu e Atici (2006).

Figura 15 - Fotomicrografias ópticas de aços carbono cortados por plasma

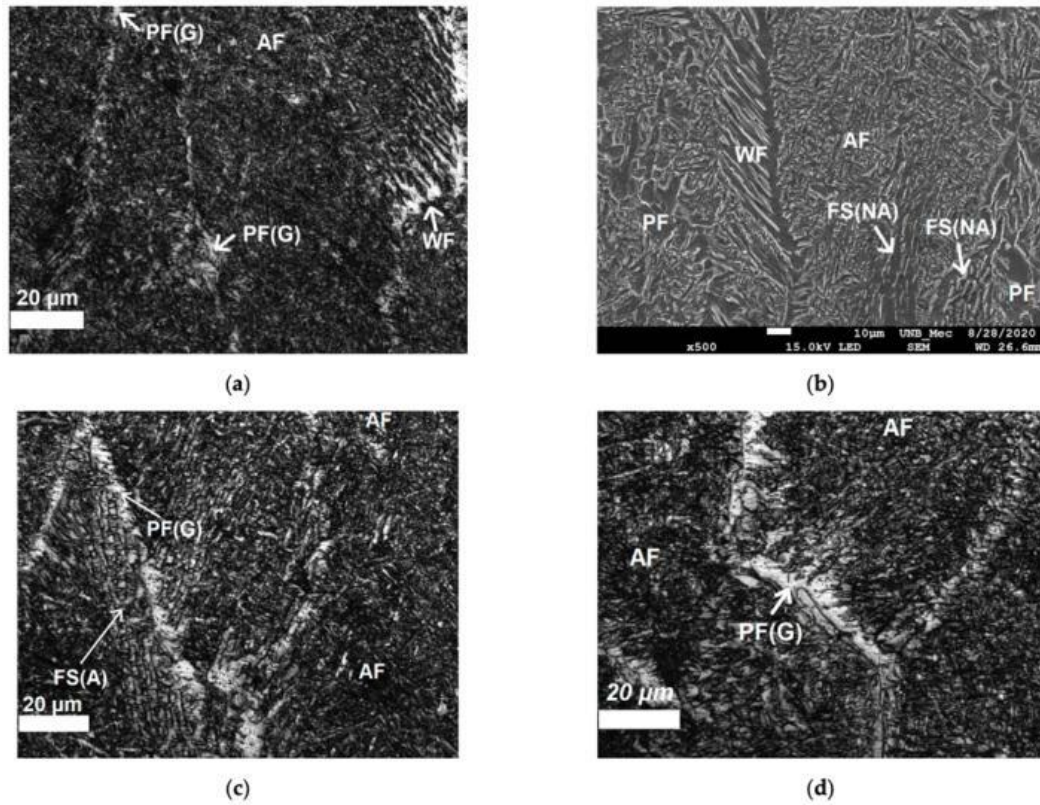


Fonte: Gullu e Atici (2006).

Segundo os experimentos realizados, diferentes velocidades de corte com plasma geraram efeitos semelhantes na microestrutura. As partículas próximas à superfície de corte do material ficaram escurecidas devido ao calor gerado durante o corte do aço inoxidável e no aço carbono, as partículas próximas à superfície de corte formaram uma estrutura equiaxial, o que pode ser caracterizado como uma deformação estrutural. Nesse contexto, as estruturas de ferrita e perlita se interagem, criando uma estrutura mais complexa e após uma certa profundidade, a deformação é substituída por estrias no material central. A variação de altura da tocha e velocidade influenciou diretamente a deformação dos grãos e a dureza superficial, que foi medida utilizando o método Vickers, pois como o método de corte a plasma opera próximo à temperatura de fusão do material, alterações são atribuídas ao calor intenso gerado na zona de atuação do gás plasma, causando mudanças estruturais no material (GULLU e ATICI, 2006).

Caio *et al.* (2021) estudaram a microestrutura da zona fundida e das regiões adjacentes em soldas GMA (*Gas Metal Arc Welding*) de aço carbono. A metodologia combinou experimentos práticos de soldagem com monitoramento em tempo real, usando sensores integrados para capturar dados do processo, como corrente (com variação de 140 a 200A), tensão (20 A 30V), velocidade de avanço (200 a 400 mm/min) e emissões térmicas. Eles inferiram que a corrente e a velocidade de avanço influenciam significativamente o tamanho da zona fundida (ZF) e suas características microestruturais. Correntes mais altas (até 200 A) aumentaram significativamente a ZF devido à maior transferência de calor, enquanto velocidades de avanço mais baixas (200 mm/min) ampliaram ainda mais a ZF ao prolongar o tempo de interação do arco com o material. Já velocidades mais altas (400 mm/min) limitaram o tamanho da ZF ao reduzir o tempo de exposição ao calor. As microestruturas observadas na zona fundida das soldas, identificadas por meio de análise metalográfica utilizando microscopia óptica e técnicas de ataque químico, incluíram ferrita acicular (a, b), predominantemente formada devido às altas taxas de resfriamento do processo de soldagem, ferrita de contorno de grão (c, d), que se formou nas bordas da ZF devido ao crescimento preferencial de grãos, ferrita Widmanstätten (a,b) foi observada com o resfriamento mais lento resultando em uma estrutura lamelar e ferrita de fases secundárias alinhada e não alinhada (b) (Figura 16).

Figura 16 - Microestrutura da Zona Fundida



Fonte: Caio *et al.* (2021).

4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAS E EQUIPAMENTOS

4.1.1 Materiais

Neste estudo, foi analisado o aço de baixo carbono SAE 1020, adquirido no mercado. A composição química desse aço é apresentada na Tabela 2, de acordo com o certificado de qualidade do fornecedor.

Tabela 2 - Composição química do aço 1020

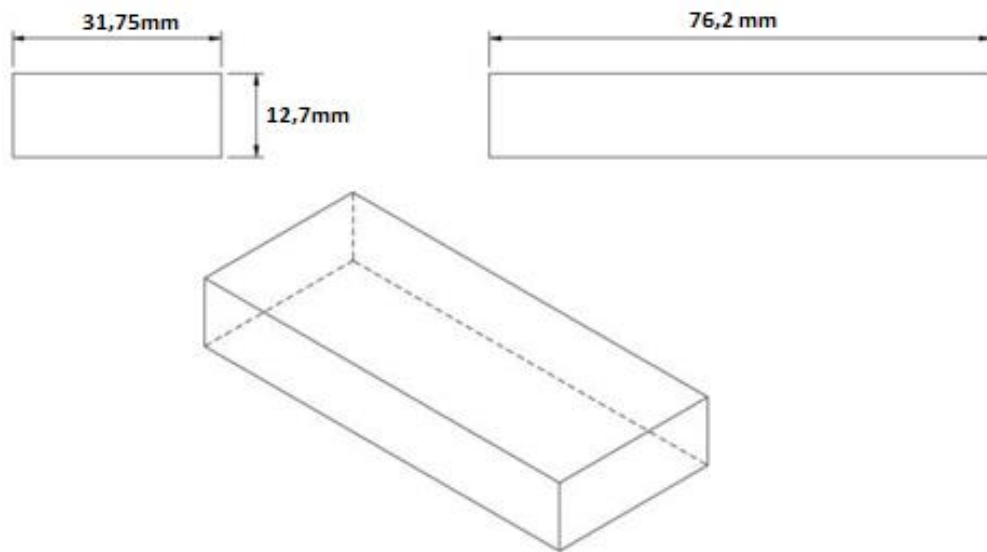
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	N	Sn
0,19	0,008	0,730	0,018	0,0085	0,042	0,006	0,006	0,014	0,001	0,0001	0,0044	0,001

Fonte: Adaptado do certificado de qualidade do fornecedor.

4.1.2 Corpo de prova

Para a confecção dos corpos de prova (CP), foi empregado o aço SAE 1020, com dimensões especificadas em 3" x 1 1/4" x 1/2" (76,2 mm x 31,75 mm x 12,7 mm) conforme representado na Figura 17.

Figura 17 - Dimensões do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os CPs foram preparados por corte a plasma com os seguintes parâmetros configurados: velocidade de corte 1800 mm/min, corrente 130 A, altura da tocha 4,1 mm e pressão de ar 6 bar.

4.1.3 Máquina de corte a plasma

Os procedimentos foram realizados em uma máquina de corte a plasma HySpeed plasma, modelo HSD130, conforme pode ser visto na Figura 18, localizada na empresa NCS Industrial.

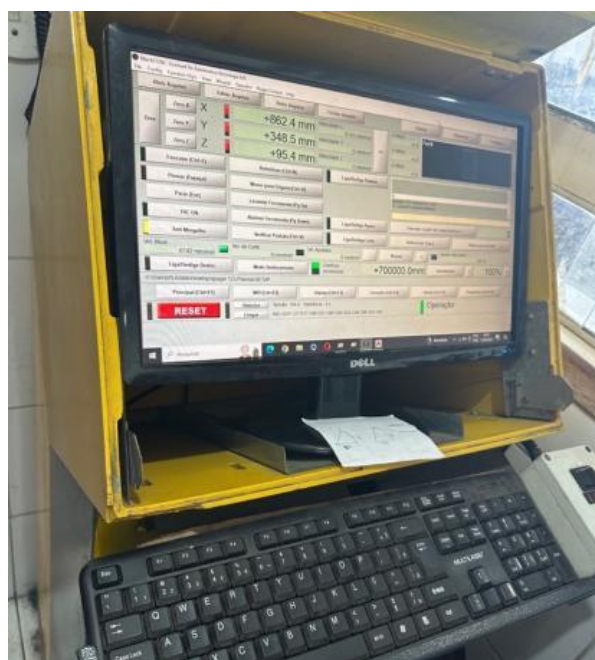
Figura 18 - Máquina de corte a plasma



Fonte: Elaborado pelo autor.

A máquina plasma é conectada a um computador, onde por ele são enviados todos os comandos programados de corte, como dimensões da peça, e inseridos todos os parâmetros necessários para o corte (Figura 19).

Figura 19 - Computador conectado à máquina plasma



Fonte: Elaborado pelo autor.

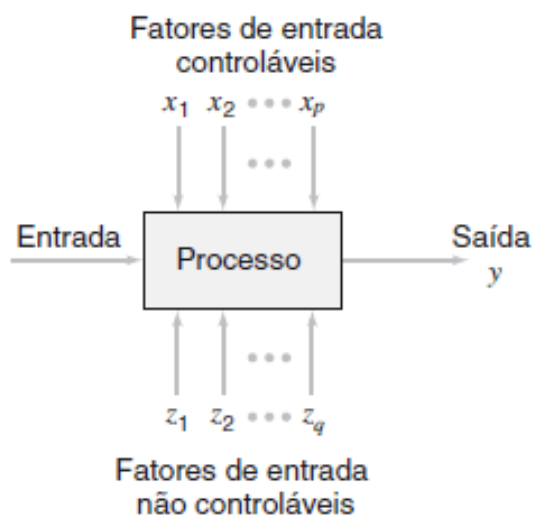
4.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Conforme identificado aproximadamente 57% dos trabalhos, relacionados a variação de parâmetros, pesquisados para a revisão bibliográfica deste presente estudo, o método de planejamento de experimentos, em inglês *Design of Experiments* (DOE), é amplamente utilizado para embasar experimentos práticos, contribuindo para compreensão empírica do impacto dos parâmetros no desempenho do processo e na otimização de diversos processos de fabricação.

4.2.1 Definição

De acordo com a literatura, um planejamento de experimentos, consiste em uma série de testes nos quais se realizam modificações intencionais nas variáveis de entrada de um processo, com o objetivo de observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída. Algumas variáveis do processo são controláveis, enquanto outras, também chamadas de fatores de ruído, não são controláveis. A Figura 20 representa um modelo esquemático geral de um processo.

Figura 20 - Modelo geral de um processo



Fonte: MONTGOMERY (2017).

Os métodos de planejamento experimental são aplicáveis tanto no desenvolvimento de processos quanto na resolução de problemas de processos, buscando melhorar seu desempenho ou torná-los mais robustos e menos sensíveis a fontes externas de variabilidade. Além disso, esses métodos são valiosos para estabelecer o controle estatístico de um processo e identificar as variáveis mais influentes no seu desempenho. O planejamento experimental é uma ferramenta essencial na engenharia, pois contribui significativamente para a melhoria dos processos de fabricação, sendo amplamente utilizado no desenvolvimento de novos processos. Essa metodologia também tem um papel importante no planejamento de engenharia, auxiliando no desenvolvimento de novos produtos e na melhoria dos já existentes, resultando em maior capacidade de fabricação, melhor desempenho, maior confiabilidade, menores custos e redução no tempo de desenvolvimento de produtos (MONTGOMERY, 2017).

4.2.2 Método de Taguchi

O método de Taguchi é uma abordagem específica dentro do DOE, desenvolvida por Genichi Taguchi, para melhorar a qualidade e a robustez de produtos e processos. Conforme descrito por Montgomery (2017), no método de Taguchi as variáveis em um processo são categorizadas como variáveis de controle (ou controláveis) e variáveis de ruído (ou não controláveis). O foco dessa estratégia é definir as especificações para as variáveis controláveis de modo a minimizar a variabilidade transmitida à resposta pelas variáveis não controláveis.

Na metodologia de Taguchi, são empregados arranjos ortogonais, em inglês *orthogonal arrays* (OA), derivados da teoria de planejamento experimental, para examinar diversas variáveis com um número limitado de experimentos. Esse uso de arranjos ortogonais permite reduzir de forma significativa a quantidade de configurações experimentais necessárias para a análise (Dean, 1991). A principal característica de uma OA é a ortogonalidade, que significa que cada fator é testado de maneira independente e equilibrada em relação aos outros fatores, o que garante que os efeitos de cada fator possam ser estimados de forma separada. A escolha do arranjo ortogonal apropriado, que define a quantidade de experimentos a serem

realizados, é baseada na Tabela 3. A seleção do arranjo depende do número de fatores envolvidos e dos níveis atribuídos a cada fator (Rezende; Silveira; Rubio, 2018).

Tabela 3 - Arranjos ortogonais

Arranjo Ortogonal	Nº de linhas	Nº máximo de fatores	Nº máximo de fatores com esses níveis			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	-	-
L'_{16}	16	5	-	-	5	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L'_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L'_{36}	36	16	3	13	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L'_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	-	40	-	-

Fonte: Rezende, Silveira e Rubio (2018).

Em Taguchi, uma relação sinal-ruído (S/N) é empregada para avaliar a magnitude da média de um processo em relação à sua variação, onde "sinal" se refere ao valor desejável da média e "ruído" ao valor indesejável. Essas relações S/N permitem mensurar o impacto dos fatores de ruído nas características de desempenho, levando em conta a variabilidade dos dados de resposta e a proximidade ao valor alvo. Calculadas para cada nível de parâmetro, as relações S/N oferecem diferentes abordagens, como menor é melhor, nominal é melhor e maior é melhor. Em qualquer categoria de característica de qualidade, um índice S/N mais

elevado indica melhores características, de forma que o nível ótimo dos parâmetros é aquele com maior S/N, refletindo o ponto de maximização do desempenho e minimização do ruído (Salonitis e Vatousianos, 2012).

De acordo com Phadke (1989), citado por Rezende, Silveira e Rubio (2018), as relações S/N são calculadas conforme as Equações 1, 2 e 3. Os critérios definidos são utilizados para avaliar a qualidade das respostas em função dos objetivos do processo.

Equação 1 - Menor o melhor

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Equação 2 - Maior o melhor

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

Equação 3 - Nominal o melhor

$$\eta = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

Sendo aplicadas na Equação (3) as Equações (4) e (5).

Equação 4

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

Equação 5

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (5)$$

Nas equações mencionadas, n denota o número de repetições, i detona o índice, y denota o valor observado e μ denota o valor nominal.

4.2.3 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um dos métodos paramétricos mais eficazes para analisar dados experimentais, sendo desenvolvida com o propósito de avaliar diferenças entre diversos grupos de tratamentos (Armstrong; Eperjesi; Gilmartin, 2022).

De acordo com Frost, a ANOVA é um método estatístico utilizado para avaliar diferenças entre as médias de grupos. Ela testa hipóteses para determinar se as médias de pelo menos duas populações são significativamente diferentes. O método analisa as variações nos resultados médios gerados pelas configurações experimentais, estimando seus efeitos e sua significância estatística. O termo "análise de variância" deriva do fato de que a técnica utiliza as variâncias para verificar se há diferenças entre as médias. A ANOVA compara a variância entre as médias dos grupos com a variância dentro de cada grupo e esse processo permite identificar se os grupos pertencem a uma única população ou a populações distintas com médias diferentes.

Aplicando-se a ANOVA no contexto deste estudo, segundo Gani, Ion e Yang, ela é utilizada para analisar o impacto de cada parâmetro estudado, permitindo identificar as variáveis controladas que têm maior influência na resposta e estimar, de forma aproximada, sua contribuição percentual, além de verificar a significância de seus efeitos. Como etapa predecessora, realiza-se uma análise de probabilidade normal para verificar a normalidade da distribuição dos dados coletados.

4.3 MÉTODO

4.3.1 Variação de parâmetros

Para este trabalho, foram selecionados três parâmetros com três níveis cada. Uma matriz ortogonal L9 do método de Taguchi foi aplicada, pois permite testar cada

fator em todos os seus níveis possíveis de forma eficiente. A Figura 21 apresenta o arranjo ortogonal para este experimento.

Figura 21 - Modelo arranjo ortogonal L9

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Fonte: Adaptado de Dean (1991).

A Tabela 4 apresenta os fatores e níveis que foram selecionados para este experimento.

Tabela 4 - Parâmetros e níveis do experimento

PARÂMETROS	N1	N2	N3
Velocidade de corte (mm/min)	1200	1600	2000
Altura da tocha (mm)	4,1	5,1	6,1
Corrente (A)	90	110	130

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 apresenta a Matriz L9 de Taguchi aplicada aos parâmetros e níveis selecionados para este trabalho.

Tabela 5 - Arranjo ortogonal do experimento

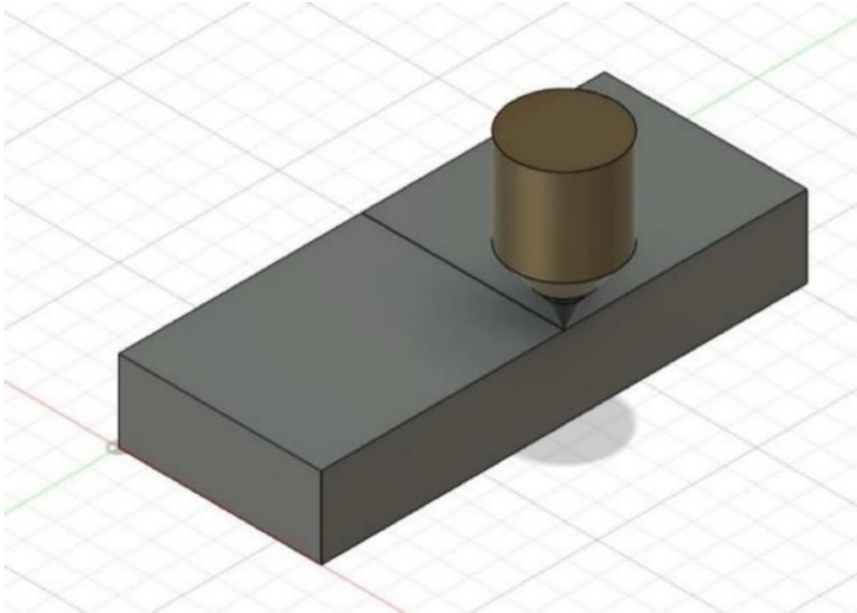
	Velocidade de corte (mm/min)	Altura da tocha (mm)	Corrente (A)
1	1200	4,1	90
2	1200	5,1	110
3	1200	6,1	130
4	1600	4,1	110
5	1600	5,1	130
6	1600	6,1	90
7	2000	4,1	130
8	2000	5,1	90
9	2000	6,1	110

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Procedimento de corte

Os cortes nos corpos de prova foram realizados horizontalmente ao longo da maior aresta do material, posicionados a 38,1 mm de uma das extremidades, correspondendo ao ponto médio da peça, empregando configurações de parâmetros e variáveis estabelecidas no item 4.3.1 desse trabalho. Uma representação do corte realizado pode ser verificada na Figura 22.

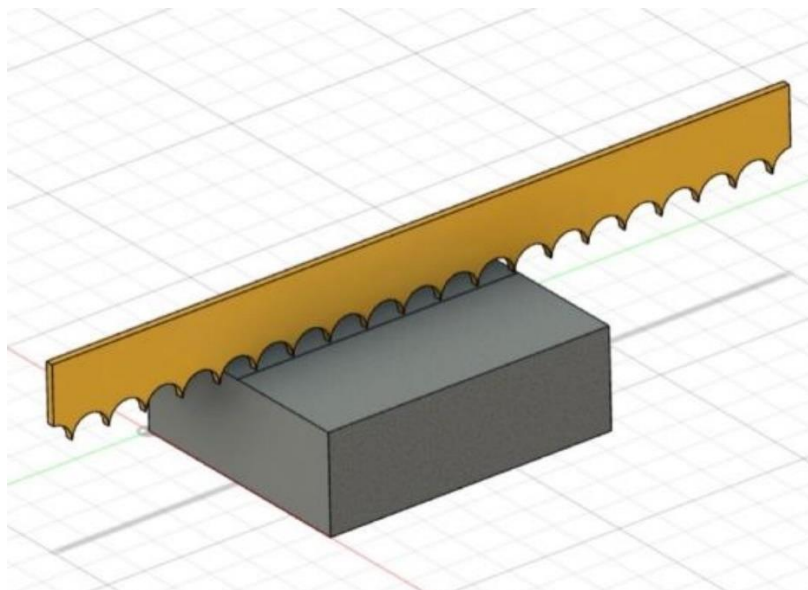
Figura 22 - Direção de corte plasma do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para futuras verificações de resultados, também foi empregado um corte longitudinal, utilizando uma serra elétrica, em uma das partes separadas por plasma, de cada amostra, permitindo o acesso a face interna da peça, conforme pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Direção do corte com serra do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Procedimento de análise metalográfica

Após o corte, os corpos de prova foram submetidos a um processo de preparação de superfície, essencial para a realização da análise metalográfica da zona de corte e da Zona Termicamente Afetada. O tratamento seguiu as etapas descritas a seguir:

Lixamento: As superfícies foram lixadas manualmente em etapas sucessivas, empregando lixas de carbeto de silício de granulações 80, 110, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500, garantindo a remoção de imperfeições e arranhões que pudessem interferir na análise microestrutural. Cada lixamento foi realizado sob pressão moderada e com lubrificação contínua por água para evitar superaquecimento da amostra.

Polimento: O polimento foi realizado utilizando alumina em suspensão com partículas de 0,3 μm e 0,05 μm , aplicadas sequencialmente em uma politriz Aratec APL-2. A rotação da politriz foi ajustada para minimizar vibrações e assegurar uniformidade na remoção de material, garantindo uma superfície livre de marcas e adequada para o ataque químico posterior.

Ataque Químico: As amostras foram submetidas ao ataque químico utilizando uma solução de Nital 2%, composta de ácido nítrico a 2% diluído em etanol. O ataque foi aplicado por um período de 15 segundos (tempo definido por pré-testes para otimização), com o objetivo de revelar as microestruturas presentes, principalmente nas regiões da ZTA e no corte superficial.

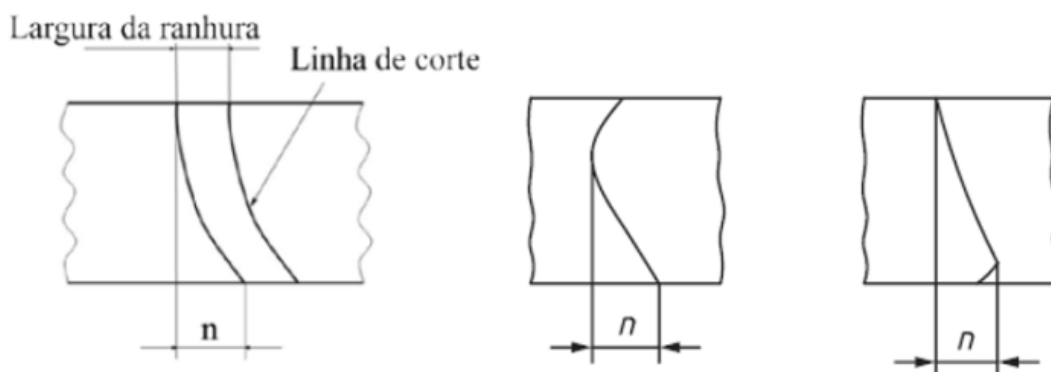
Análise Metalográfica: Após o ataque químico, as amostras foram avaliadas em microscópio óptico, Olympus, com câmera modelo Motacam 1000, disponibilizado pelo Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz. As imagens foram capturadas com ampliações variadas, permitindo a identificação de alterações microestruturais no aço 1020 decorrentes da combinação dos parâmetros de corte.

4.3.4 Método de análise

De acordo com Machado (1996), o processo de corte, independente qual seja, pode ser relacionado a conceitos gerais relativos à qualidade, como aderência, tenacidade e volume de escória formada, descontinuidades nas superfícies de corte, largura do rasgo gerado pelo corte, geometria da superfície de corte, arraste de estrias, arredondamento das bordas, paralelismo da superfície, rugosidade da superfície, entre outros. Este estudo analisará, tanto de forma qualitativa quanto quantitativa, as seguintes características: arraste de estrias, paralelismo e formação de escória. Já a microestrutura das regiões afetadas pelo corte será examinada exclusivamente de maneira qualitativa. Com o auxílio do software Minitab, os resultados obtidos para cada análise de qualidade foram submetidos a uma avaliação estatística, visando identificar a influência de cada parâmetro sobre a resposta desejada.

De acordo com a norma EN ISO 9013, o arraste de estrias equivale a distância projetada entre as duas bordas de uma linha de arraste na direção do corte. Machado (1996) define como sendo o desvio da estria em relação a linha normal a superfície, como ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Arraste de estrias

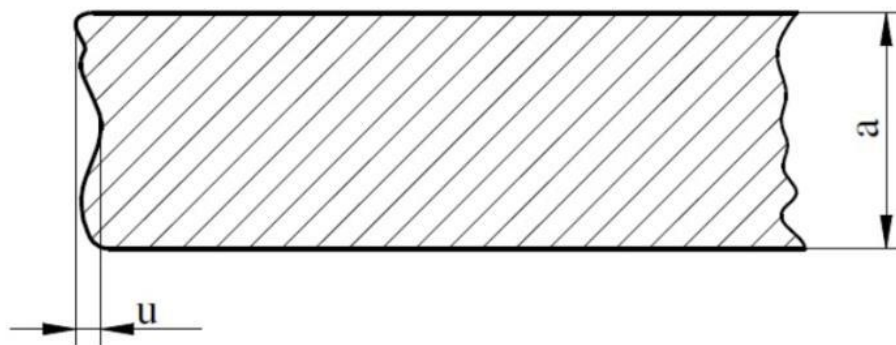


Fonte: Adaptado de EN ISO 9013 e Jablonski, Lermen e Molin (2014).

Onde “n” representa o arraste.

Conforme a norma EN ISO 9013, tolerância de perpendicularidade ou angularidade é definida como a distância entre duas linhas retas paralelas, dentro das quais o perfil da superfície de corte está localizado. Machado (1996) define esse conceito como paralelismo da superfície, sendo uma indicação da diferença entre a superfície de corte e desvios gerados durante o corte. Ambas as definições estão representadas na Figura 25.

Figura 25 - Indicador de paralelismo da superfície

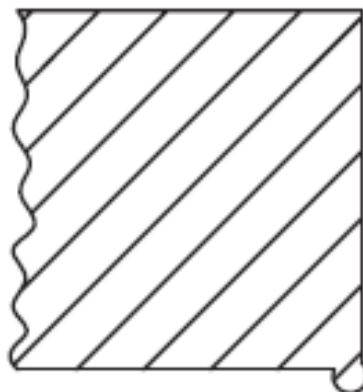


Fonte: Skoczylas (2018).

Onde “u” representa o paralelismo e a representa a espessura da peça.

Em concordância com a norma EN ISO 9013, a escória se refere ao resíduo metálico aderido à parte inferior do corte, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - Escória aderida a superfície de corte



Fonte: ISO EN 9013.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados referentes a cada critério de qualidade analisados quantitativamente foram organizados e apresentados na Tabela 6. Os valores finais correspondem à média calculada com base em múltiplas medições realizadas para cada amostra, assegurando maior precisão na análise.

Tabela 6 - Resultados do experimento

Número do experimento	Arraste de estrias	Paralelismo	Escória
1	1,353	1,093	3,600
2	0,449	0,213	0,700
3	0,541	0,590	0,150
4	1,435	0,402	1,700
5	1,032	0,239	1,800
6	2,564	0,408	2,050
7	0,591	0,380	2,150
8	0,854	1,103	0,850
9	1,900	0,516	2,900

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 ARRASTE DE ESTRIAS

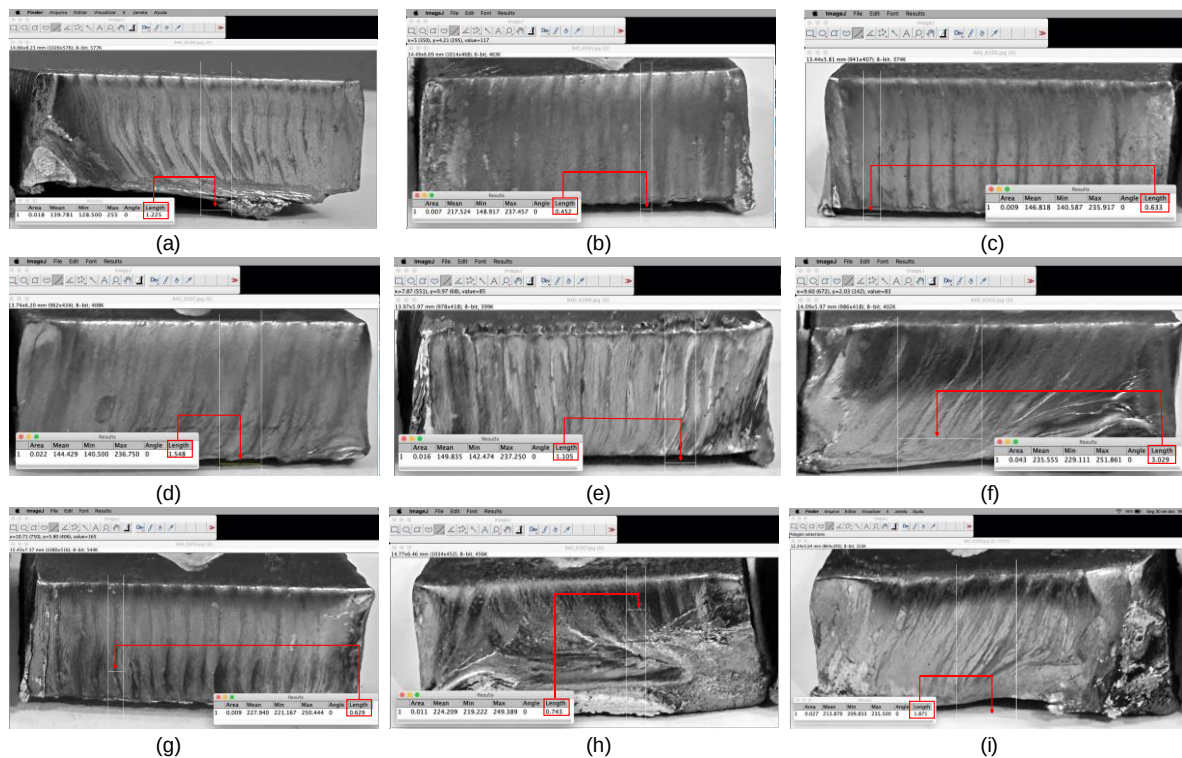
Para este experimento, foram efetuadas três medições, em milímetros, do indicador “n” para cada amostra, através do software ImageJ. A Figura 27 mostra como foram realizadas essas medições, sendo que (a) se refere a amostra 1, (b) a amostra 2, (c) a amostra 3 e assim consequentemente, até (i) que se refere a amostra 9. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Medições do arraste de estrias

	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA
AMOSTRA 1	1,225	1,364	1,471	1,353
AMOSTRA 2	0,452	0,457	0,439	0,449
AMOSTRA 3	0,633	0,514	0,476	0,541
AMOSTRA 4	1,548	1,450	1,307	1,435
AMOSTRA 5	1,105	1,086	0,904	1,032
AMOSTRA 6	3,029	2,450	2,214	2,564
AMOSTRA 7	0,629	0,643	0,500	0,591
AMOSTRA 8	0,743	0,962	0,857	0,854
AMOSTRA 9	1,871	1,829	2,000	1,900

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Medição do arraste de estrias através do software ImageJ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a variação dos parâmetros de corte, foi possível observar mudanças significativas no formato das estrias. Na amostra 6, as estrias apresentaram uma inclinação acentuada enquanto, nas amostras 2, 3 e 7, elas se mostraram quase verticais, com pouca inclinação perceptível. Já a amostra 8 e, parcialmente, a amostra 9 tiveram sua análise prejudicada, pois as estrias não exibiram padrões regulares.

Esse comportamento irregular está relacionado aos parâmetros utilizados, que influenciaram diretamente o processo de formação das estrias. De acordo com a análise dos resultados quantitativos, pode-se observar que o arraste de estrias teve grande variabilidade, sendo 0,449mm o menor valor e 2,564mm o maior valor. Essa diferença representa um aumento de mais de cinco vezes em relação ao menor registro. Através da razão sinal ruído (S/N) do método de Taguchi, sob a condição de qualidade menor é melhor, os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que o fator com maior impacto foi a velocidade de corte, com um delta de 7,0847, ocupando o posto mais relevante na análise. O menor valor de S/N foi registrado no nível 2, sugerindo que ajustes nesse nível são essenciais para minimizar o arraste de estrias. O segundo fator mais significativo foi a corrente, com um delta de 6,3547, sendo o nível 3 o mais favorável para a resposta. Por fim, a altura da tocha apresentou menor influência relativa (delta = 5,4899), com destaque para o nível 2 como o mais adequado.

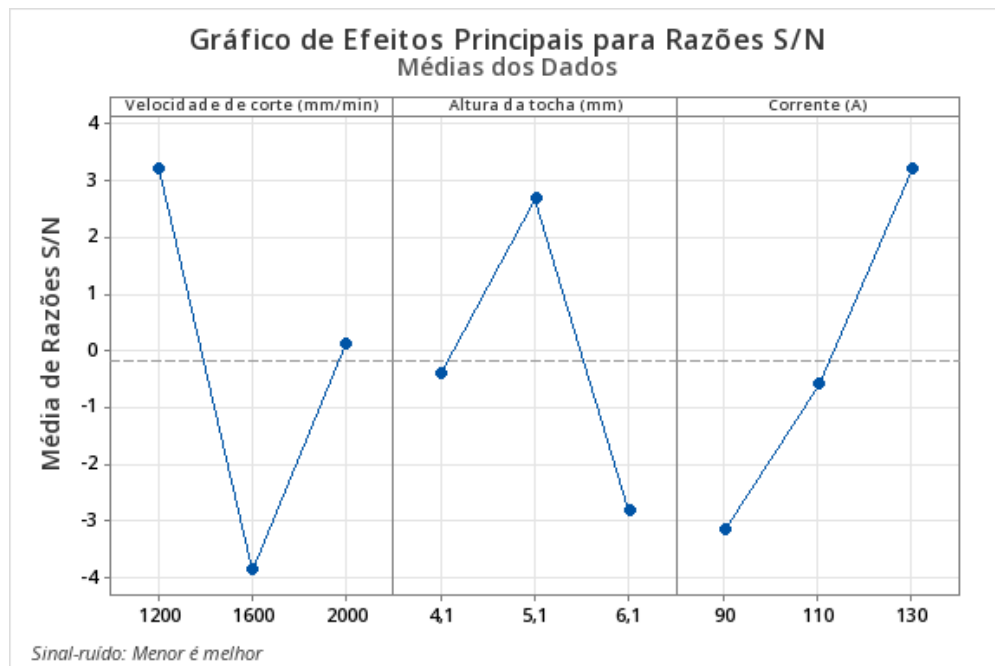
Tabela 8 - Razão S/N para o arraste de estrias

Nível	Velocidade de corte (mm/min)	Altura da tocha (mm)	Corrente (A)
1	3,2217	-0,3982	-3,1445
2	-3,863	2,6841	-0,5857
3	0,1213	-2,8058	3,2102
Delta	7,0847	5,4899	6,3547
Posto	1	3	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados estão em concordância com o estudo de Jablonski, Lermen e Molin (2014) que também identificou que a velocidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou o arraste de estrias em seu experimento com corte a laser. Como também observado por eles, valores mais baixos e intermediários da velocidade proporcionaram melhores condições para corte e velocidades altas apresentaram estrias mais inclinadas e irregulares. Para complementar a análise da Tabela 8, o Gráfico 3 é apresentado. Este gráfico permite visualizar a variação das razões S/N em função dos níveis de cada fator analisado, evidenciando o impacto relativo de cada parâmetro na resposta de saída. Um maior valor de S/N indica que o processo é menos sensível a variações (ruído) e tem um melhor desempenho.

Gráfico 3 – Efeitos principais para Razões S/N para o arraste de estrias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da análise das razões sinal-ruído, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) para determinar a relevância relativa de cada fator de entrada. Essa abordagem oferece informações cruciais para embasar decisões relacionadas ao ajuste dos parâmetros do processo e os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - ANOVA para o arraste de estrias

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Velocidade de corte (mm/min)	2	1,2302	31,18%	1,2302	0,6151	3,48	0,223
Altura da tocha (mm)	2	1,207	30,59%	1,207	0,6035	3,42	0,226
Corrente (A)	2	1,155	29,27%	1,155	0,5775	3,27	0,234
Erro	2	0,3533	8,95%	0,3533	0,1767		
Total	8	3,9455	100,00%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fator velocidade de corte apresentou uma contribuição de 31,18% para a variabilidade total do arraste de estrias, a altura da tocha contribuiu com 30,59% da

variabilidade total e a corrente elétrica explicou 29,27% da variabilidade. Embora os fatores analisados apresentem alta contribuição para a variabilidade do arraste de estrias, os valores de P indicam que nenhum deles foi estatisticamente significativo ao nível de 5%, pois revelaram valores acima de 0,05. Esse resultado será discutido em detalhes no tópico 5.5 deste trabalho.

5.2 PARALELISMO DA SUPERFÍCIE

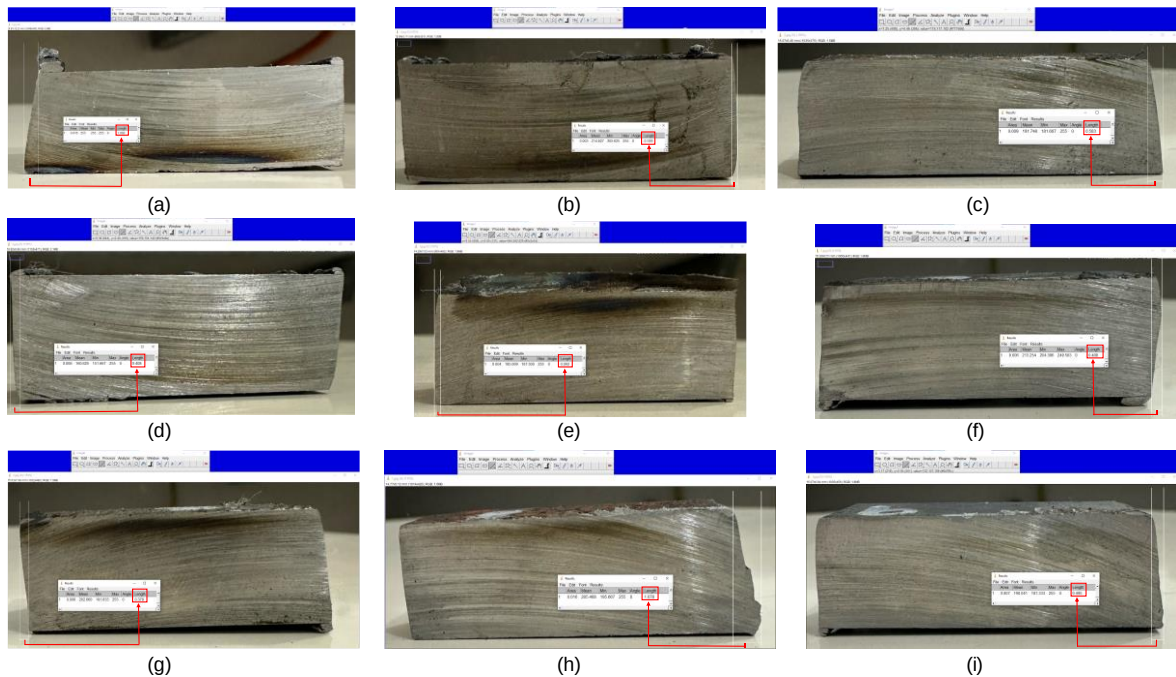
Para este experimento, foram realizadas três medições, em milímetros, do indicador “u”, para cada amostra, através do software ImageJ. A Figura 28 mostra como foram efetuadas essas medições, sendo (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3 e assim por diante até (i) amostra 9. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Medições do paralelismo de superfície

	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA
AMOSTRA 1	1,092	1,092	1,094	1,093
AMOSTRA 2	0,189	0,218	0,233	0,213
AMOSTRA 3	0,583	0,597	0,591	0,590
AMOSTRA 4	0,408	0,393	0,406	0,402
AMOSTRA 5	0,262	0,234	0,220	0,239
AMOSTRA 6	0,408	0,410	0,406	0,408
AMOSTRA 7	0,379	0,379	0,382	0,380
AMOSTRA 8	1,078	1,121	1,109	1,103
AMOSTRA 9	0,495	0,527	0,527	0,516

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Medição do paralelismo de superfície através do software ImageJ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante da variação dos parâmetros de corte, verifica-se que as amostras 1 e 8 sofreram impacto significativo no paralelismo e maior inclinação das superfícies de corte. Em contrapartida, as amostras 2 e 5 demonstraram mínimas diferenças nesse aspecto, resultando em cortes quase perpendiculares. Já as amostras 3, 4, 6, 7 e 9 exibiram visualmente um desvio em relação aos 90 graus, embora esse desnível tenha sido menos expressivo em comparação às amostras 1 e 8. A análise do paralelismo revelou uma variação que oscila entre 0,213 mm, como valor mínimo, e 1,103 mm, como valor máximo. Esse intervalo indica um aumento aproximado de cinco vezes em relação ao menor valor registrado.

Sob a condição de qualidade menor é melhor, a análise da razão sinal-ruído (S/N), apresentada na Tabela 11, revelou que o fator de maior influência foi a corrente, com um delta de 6,977, consolidando-se como o parâmetro mais significativo da análise e o nível 2 destacou-se como o mais indicado para a otimização da resposta. O segundo fator mais relevante foi a velocidade de corte, com um delta de 4,945, também apontando o nível 2 como a melhor escolha para obter uma resposta otimizada. Por sua vez, a altura da tocha, com um delta de 3,155, demonstrou ser o fator de menor impacto em comparação aos demais. No entanto, assim como os outros fatores, o nível 2 manteve-se como o mais apropriado para otimizar a resposta.

Tabela 11 - Razão S/N para o paralelismo de superfície

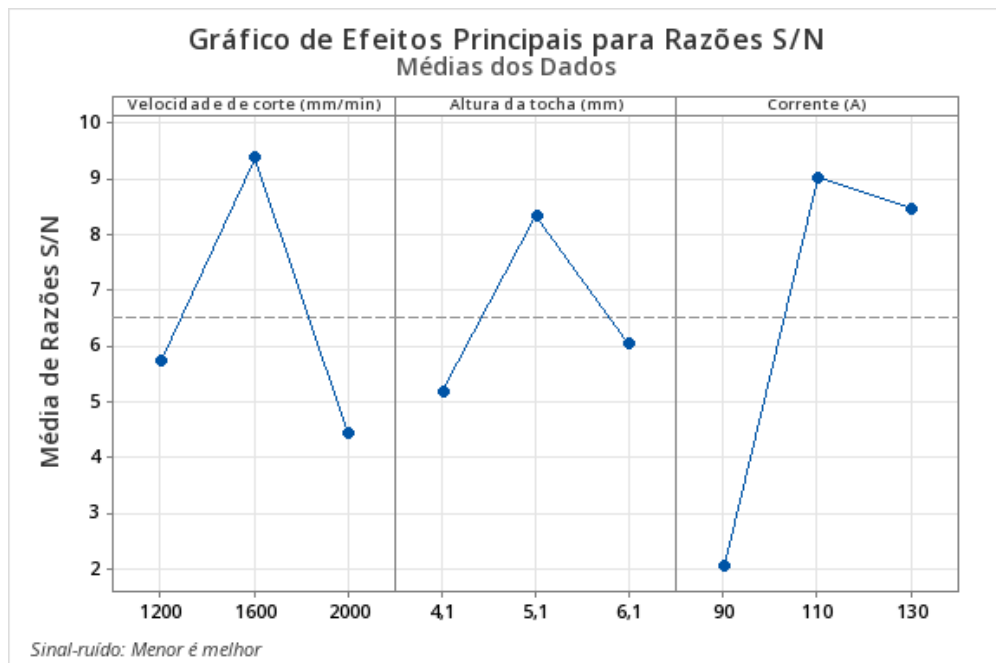
Nível	Velocidade de corte (mm/min)	Altura da tocha (mm)	Corrente (A)
1	5,748	5,182	2,054
2	9,378	8,338	9,032
3	4,433	6,039	8,473
Delta	4,945	3,155	6,977
Posto	2	3	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estudos realizados por Felix, Ramesh e Roseline (2017) e Jablonski, Lermen e Molin (2014) revelam diferentes resultados, em comparação com o este trabalho, quanto a análise do paralelismo da superfície. Jablonski, Lermen e Molin (2014), que estudaram a variação dos parâmetros no corte a laser, identificaram a velocidade de corte como o parâmetro mais influente no paralelismo, resultado que pode ser explicado pela inclusão de variáveis não consideradas no presente estudo, como a pressão do gás e a potência. Possivelmente, a corrente pode ter uma influência mais significativa do que esses parâmetros, evidenciando sua maior relevância no processo e justificando o resultado encontrado neste trabalho. Por outro lado, Felix, Ramesh e Roseline (2017) apontaram a tensão do arco plasma como o parâmetro mais impactante no paralelismo, enquanto a velocidade de corte foi considerada o menos influente (nesse caso, foram analisados os parâmetros tensão do arco, velocidade de corte e tempo de atraso no desempenho do corte). Como os parâmetros tensão do arco e tempo de atraso não foram incluídos no presente estudo, isso pode ter afetado as análises de influência comparadas. Enquanto a altura da tocha parece ter menos relevância que a velocidade de corte, como constatado neste trabalho, o tempo de atraso no corte, mencionado no estudo referenciado, pode desempenhar um papel mais importante, justificando a velocidade de corte como o parâmetro menos relevante no estudo de Felix, Ramesh e Roseline (2017).

O Gráfico 4 possibilita observar como as razões S/N variam conforme os níveis de cada fator avaliado, destacando a influência relativa de cada parâmetro sobre a resposta obtida.

Gráfico 4 - Efeitos principais para Razões S/N para o paralelismo da superfície



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme realizado para o arraste de estrias, a análise de variância para o paralelismo da superfície foi estudada e apresentou resultados conforme Tabela 12.

Tabela 12 - ANOVA para o paralelismo da superfície

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Velocidade de corte (mm/min)	2	0,5217	19,51%	0,5217	0,2608	0,7	0,588
Altura da tocha (mm)	2	0,2117	7,92%	0,2117	0,1059	0,28	0,779
Corrente (A)	2	1,1955	44,72%	1,1955	0,5978	1,61	0,384
Erro	2	0,7446	27,85%	0,7446	0,3723		
Total	8	2,6735	100,00%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

A velocidade de corte contribuiu com 19,51% da variabilidade total no paralelismo, a altura da tocha representou 7,92% da variabilidade total e a corrente apresentou a maior contribuição, com 44,72% da variabilidade total explicada. A soma

de quadrados do erro foi de 0,7446, o que corresponde a 27,85% da variabilidade total. Esse valor evidencia que os fatores estudados explicaram uma proporção razoável da variabilidade, embora não suficientemente para serem significativos isoladamente. Portanto, embora a corrente tenha apresentado a maior contribuição para a variabilidade do paralelismo, nenhum dos fatores foi estatisticamente significativo ao nível de significância de 5%. Conforme descrito no tópico 5.1, a análise de variância será melhor discutida no tópico 5.5.

5.3 FORMAÇÃO DE ESCÓRIA

Para este experimento, foram realizadas cinco medições, em milímetros, de espessura ao longo de cada amostra, utilizando um paquímetro com escala 0,05, e o maior valor obtido (subtraído da espessura da peça) foi registrado, conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Medições da formação de escória

	ESCÓRIA
AMOSTRA 1	3,60
AMOSTRA 2	0,70
AMOSTRA 3	0,15
AMOSTRA 4	1,70
AMOSTRA 5	1,80
AMOSTRA 6	2,05
AMOSTRA 7	2,15
AMOSTRA 8	0,85
AMOSTRA 9	2,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

O tamanho da escória formada variou de 3,60mm (maior valor) e 0,15mm (menor valor). Essa variação significa que a maior escória aderida a peça é 24 vezes maior que o menor valor registrado. Os resultados com base no método de Taguchi, sob a condição menor é melhor, apresentados na Tabela 14, indicam que o fator mais relevante é a velocidade de corte, com um delta de 8,1332, evidenciando sua

importância na redução da formação de escória. O nível 2 apresentou o menor valor de S/N, sugerindo que ajustes nesse nível são fundamentais para alcançar uma maior eficiência no processo. O segundo fator de maior impacto foi a altura da tocha, com um delta de 7,793, sendo o nível 3 o mais adequado para otimizar a resposta. Já a corrente apresentou o menor impacto relativo, com um delta de 6,8912, embora o nível 3 tenha se destacado como a melhor configuração para esse fator.

Tabela 14 - Razão S/N para formação de escória

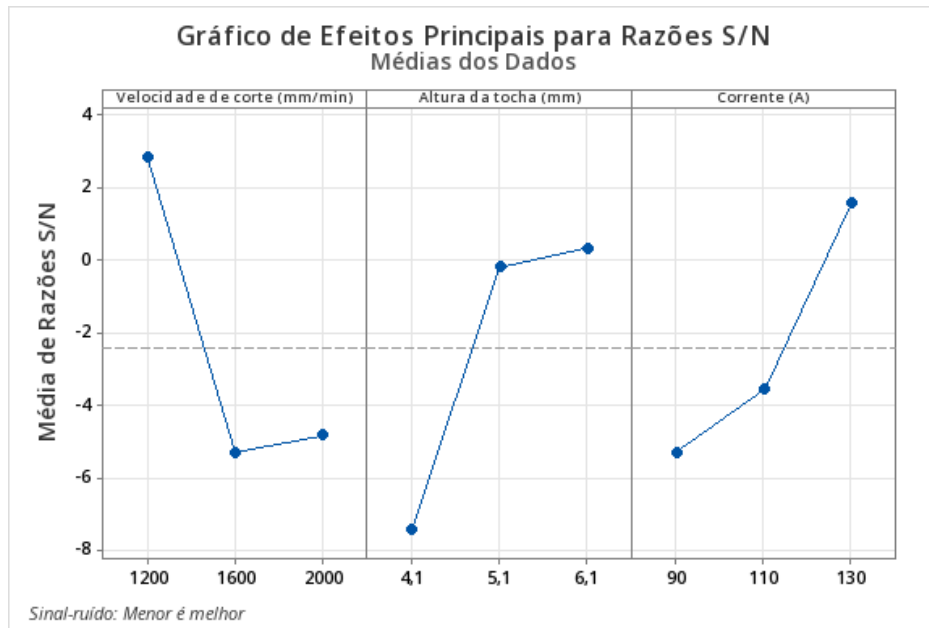
Nível	Velocidade de corte (mm/min)	Altura da tocha (mm)	Corrente (A)
1	2,8167	-7,4613	-5,3165
2	-5,3165	-0,1986	-3,5863
3	-4,8284	0,3317	1,5747
Delta	8,1332	7,793	6,8912
Posto	1	2	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tuladhar *et al.* (2024) identificaram em seu estudo que a corrente é o parâmetro com maior influência na formação de escória, resultado completamente oposto ao identificado neste trabalho, onde a corrente se mostrou o fator menos relevante. Ao comparar os experimentos para entender essa discrepância, destacam-se duas diferenças principais: o tipo de material utilizado e a espessura do corpo de prova (Tuladhar *et al.* (2024) utilizaram aço inoxidável com uma espessura de 30 mm, mais que o dobro da espessura adotada neste estudo). A espessura do material afeta diretamente as características do fluxo de plasma na superfície inferior da peça. A deposição de material fundido na parte inferior e a rugosidade das paredes do corte alteram a velocidade e a direção do fluxo de gás, influenciando, consequentemente, as características do corte. Apesar dessa discrepância, alinhado com os resultados do estudo de referência, observou-se que o aumento da corrente reduz a formação de escória. Isso ocorre porque, em correntes mais altas, o metal é derretido mais rapidamente, evitando uma exposição prolongada do arco de plasma ao material, o que minimiza a deposição de resíduos fundidos.

O Gráfico 5 permite visualizar as variações nas razões S/N em relação aos diferentes níveis de cada fator estudado, evidenciando o impacto relativo de cada parâmetro na resposta final.

Gráfico 5 - Efeitos principais para Razões S/N para a formação de escória



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da análise de variância estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - ANOVA para formação de escória

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Velocidade de corte (mm/min)	2	0,2061	11,86%	0,2061	0,10304	0,23	0,814
Altura da tocha (mm)	2	0,4385	25,23%	0,4385	0,21924	0,48	0,673
Corrente (A)	2	0,189	10,88%	0,189	0,09451	0,21	0,827
Erro	2	0,9043	52,04%	0,9043	0,45217		
Total	8	1,7379	100,00%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

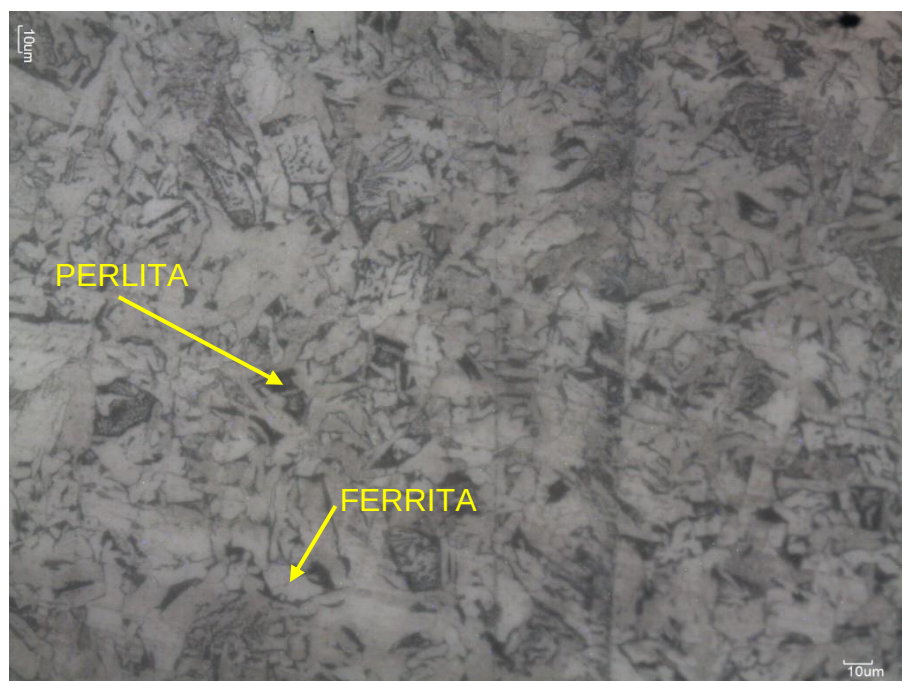
A análise de variância revelou que a altura da tocha foi o fator com maior contribuição relativa (25,23%), seguida pela velocidade de corte (11,86%) e corrente (10,88%). No entanto, o erro residual explicou 52,04% da variabilidade total, indicando que fatores não modelados ou ruídos experimentais desempenharam um papel

significativo na resposta. Esse resultado será discutido em detalhes no tópico 5.5 deste trabalho.

5.4 MICROESTRUTURA

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise microestrutural das amostras submetidas ao corte a plasma. O objetivo dessa avaliação foi identificar as alterações microestruturais geradas pelo processo térmico, buscando compreender os efeitos das variáveis de corte sobre as características internas do material. As microestruturas foram analisadas com o auxílio de microscopia óptica, evidenciando diferentes regiões, como o metal base, a zona de fusão e a zona termicamente afetada (ZTA). As regiões do metal base foram semelhantes em todas as condições estudadas e estão representadas na Figura 29.

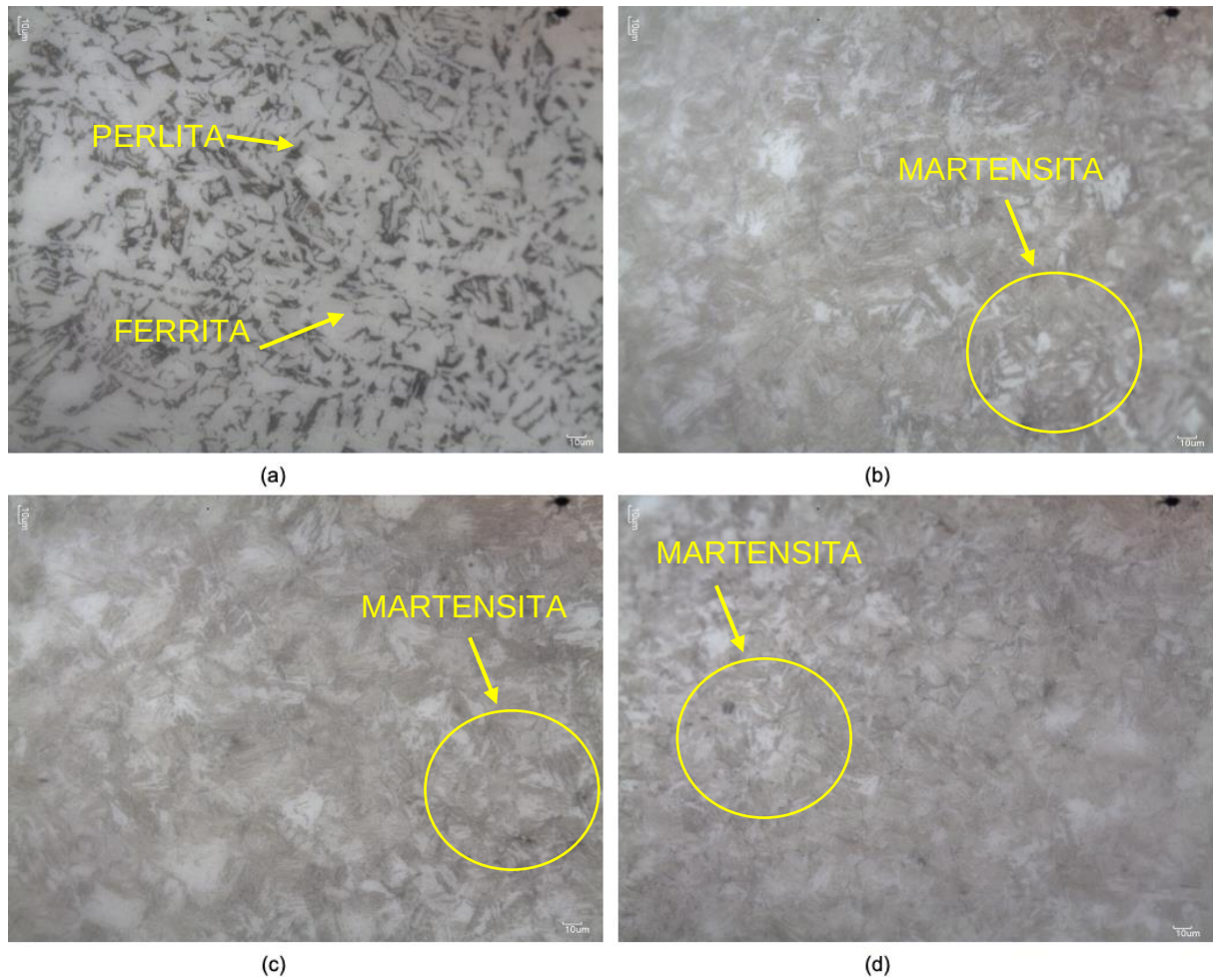
Figura 29 - Microestrutura do metal base



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 30 apresenta as microestruturas identificadas na face de corte das amostras de 1 a 4, sendo (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3 e (d) amostra 4.

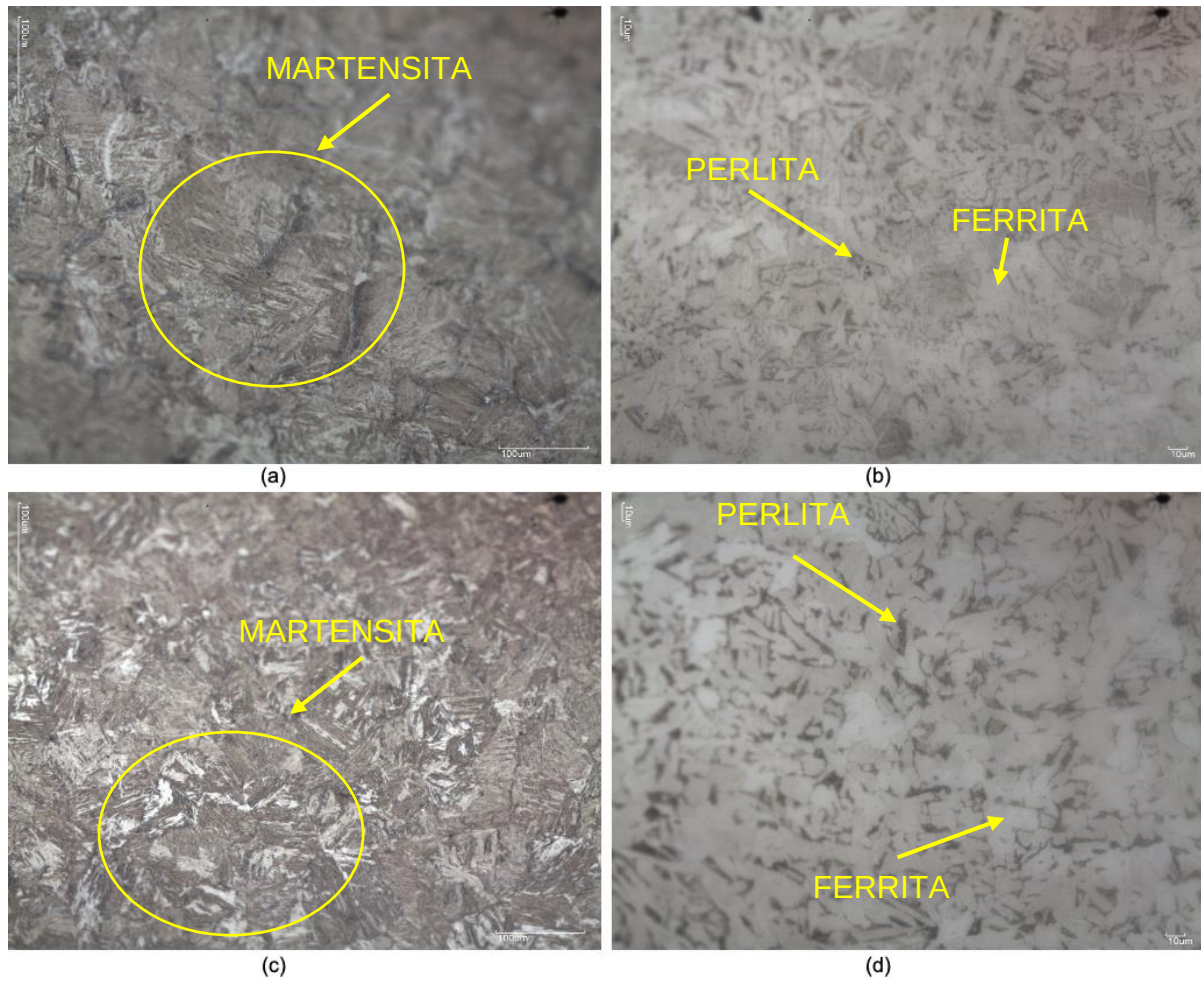
Figura 30 - Microestruturas na face de corte das amostras 1 a 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 apresenta as microestruturas identificadas na face de corte das amostras de 6 a 9, sendo (a) amostra 6, (b) amostra 7, (c) amostra 8 e (d) amostra 9.

Figura 31 - Microestruturas na face de corte das amostras 6 a 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 32 apresenta as microestruturas identificadas na face de corte da amostra 5.

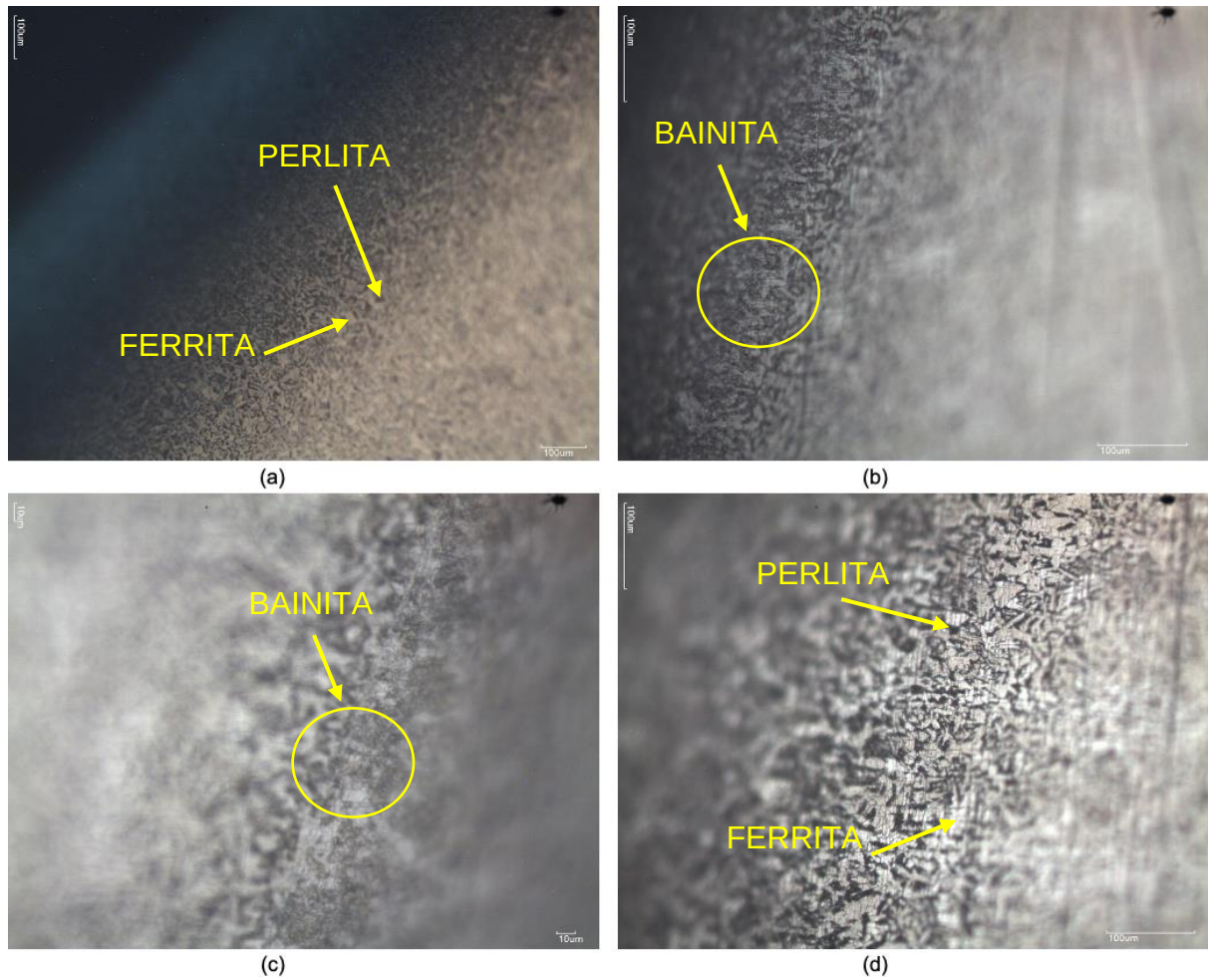
Figura 32 - Microestruturas da face de corte da amostra 5



Fonte: Elaborado pelo autor.

As microestruturas encontradas na ZTA das amostras 2, 3, 5 e 6 estão apresentadas na figura 33, sendo (a) amostra 2, (b) amostra 3, (c) amostra 5 e (d) amostra 6.

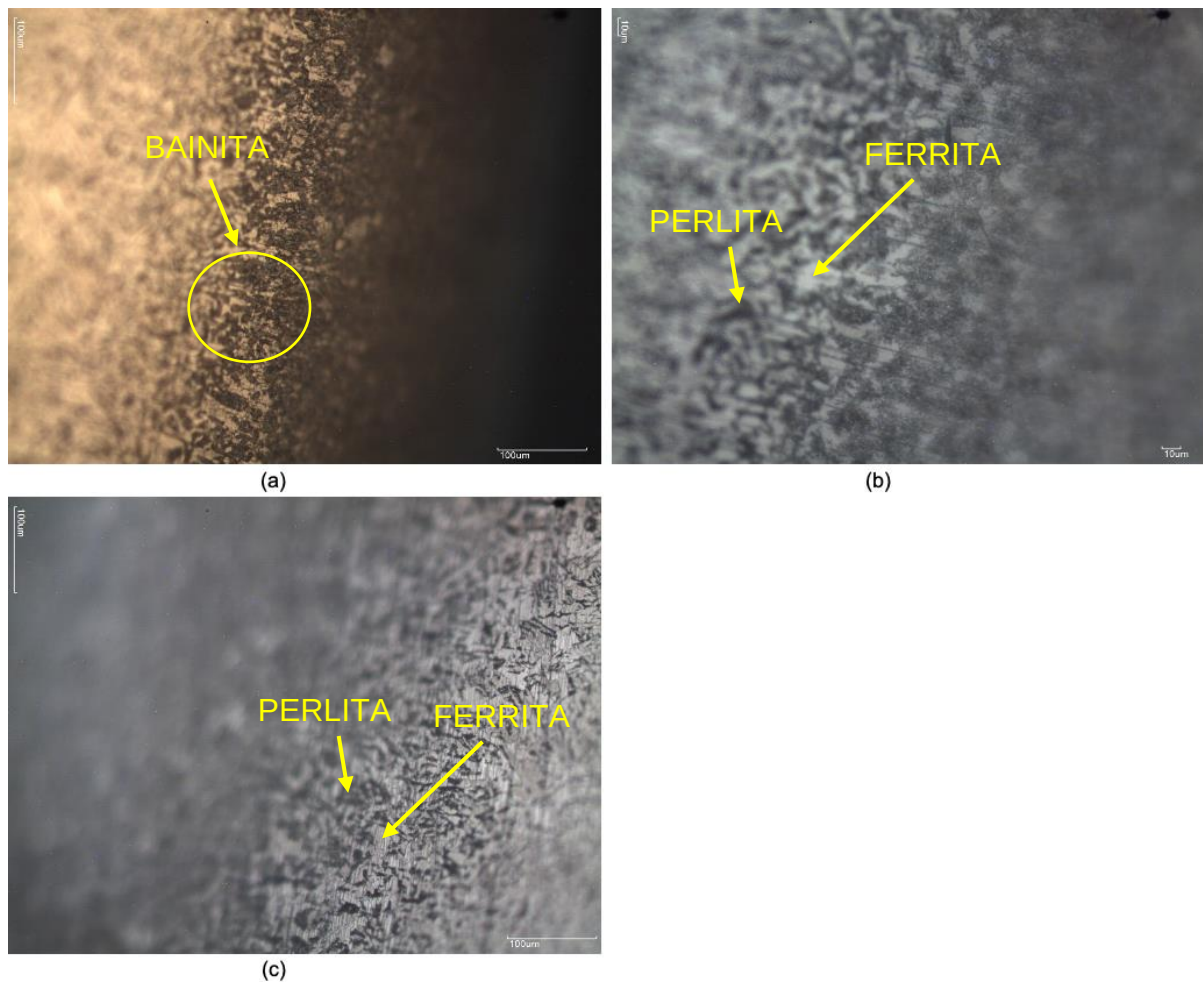
Figura 33 - Microestruturas encontradas na ZTA das amostras 2, 3, 5 e 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 mostra as microestruturas encontradas na ZTA das amostras 7 em (a), 8 em (b) e 9 em (c).

Figura 34 - Microestruturas encontradas na ZTA das amostras 7, 8 e 9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a análise dos corpos de prova submetidos ao corte térmico, constatou-se que, devido à deformação causada pela abertura e fechamento do arco voltaico no processo, a região correspondente à Zona Termicamente Afetada (ZTA) apresentou alto grau de arredondamento em decorrência dos processos de lixamento e polimento. Esse fato gerou dificuldades para a captura de imagens precisas dessa região, especialmente na Amostra 1, onde não foi possível distinguir as microestruturas, e na Amostra 4, que exibiu grau de deformação tão elevado que inviabilizou qualquer análise da ZTA. Resultados semelhantes de deformação e dificuldade de análise foram destacados por Cunha e Elisei (2015) durante o estudo da ZTA em chapas cortadas por plasma.

Nas amostras onde foi possível realizar a análise microestrutural da ZTA, as observações indicaram as seguintes características: nas amostras 2, 6, 8 e 9,

verificou-se o alongamento dos grãos de ferrita, enquanto nas amostras 3, 5 e 7 foram identificadas microestruturas que lembram a bainita. O alongamento dos grãos de ferrita, conforme observado nas amostras 2, 6, 8 e 9, sugere que estas regiões foram submetidas a ciclos térmicos com elevadas tensões térmicas, resultando em deformações plásticas significativas na ferrita. Este fenômeno é característico de regiões que experimentam deformações direcionais durante processos térmicos intensos, como descrito por Bolduann e Turazi (2023) e Silva (2010).

Por outro lado, as amostras onde se constatou a presença de bainita, como nas amostras 3, 5 e 7, indicam que as condições térmicas do corte favoreceram a formação dessa microestrutura. A bainita é tipicamente formada em temperaturas intermediárias, entre as faixas de formação de perlita e martensita, conforme apontado por Silva (2010). Essa microestrutura apresenta uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade, embora tenha dureza inferior à martensita.

Ao se analisar as superfícies cortadas a plasma, observou-se que as nove amostras apresentaram as seguintes características:

Nas amostras 1, 7 e 9, pode-se observar que as microestruturas apresentadas continuaram sendo a ferrita e perlita em sua totalidade. A baixa quantidade de carbono favorece a formação de ferrita e perlita durante o resfriamento, conforme descrito pela curva TTT.

Nas amostras 2, 3, 4, 6 e 8, identificou-se a formação de martensita em certas regiões das amostras, apesar de normalmente não ser encontrada no aço SAE 1020 em condições normais devido seu baixo teor de carbono. Esse resultado pode ser justificado pois o corte a plasma pode elevar a temperatura na região de corte até cerca de 24000 graus Celsius, como descrito por Machado (1996), e pelo rápido resfriamento sofrido pelos corpos de prova (foram resfriados por água imediatamente após o corte). Nessas áreas (superfície ou regiões próximas à zona fundida), o calor pode gerar austenita temporária, que, ao ser resfriada rapidamente, pode se transformar em martensita. Pinto *et al.* (2018) e Guimarães, Siqueira e Costa (2008) identificaram a presença dessa mesma microestrutura em seus testes com aço 1020 demonstrando que houve um resfriamento rápido característico de processos de têmpera.

Na Amostra 05, foi constatada a presença de ferrita acicular, uma microestrutura formada sob baixas taxas de nucleação. Esta configuração é vantajosa

para aplicações sujeitas a cargas dinâmicas, pois combina resistência mecânica com excelente tenacidade, como destacado por Silva (2010) e Bolduann e Turazi (2023).

Portanto, os resultados indicam a perduração das microestruturas originais nas amostras 1, 7 e 9 e, por outro lado, a formação de martensita nas amostras 2, 3, 4, 6 e 8 e a presença de ferrita acicular na amostra 5, que evidencia condições térmicas mais controladas, favorecendo o desenvolvimento de microestruturas equilibradas e desejáveis para aplicações industriais.

5.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Conforme apresentado nos tópicos anteriores, a análise estatística realizada por meio da ANOVA demonstrou que, embora os fatores analisados apresentem contribuições importantes para a variabilidade das respostas, nenhum deles foi estatisticamente significativo ao nível de confiança de 95%. É fundamental destacar que foi realizada a análise de probabilidade normal para verificar a distribuição dos dados coletados no experimento. Os resultados demonstraram que todos os dados seguem uma distribuição normal, atendendo aos pressupostos necessários para a aplicação dos métodos estatísticos.

Alinhado com as literaturas utilizadas como referência para este estudo, é usual que sejam encontrados resultados de P maior que 0,05. Os estudos de Umroh *et al.* (2024), Gani, Ion e Yang (2021), Tuladhar *et al.* (2024), Hussain, Qazi e Abas (2023), Felix, Ramesh e Roseline (2017) e Singh (2011) são alguns exemplos, onde foram realizados o teste de análise de variância e identificados valores de P que não garantiram confiança de 95% para alguns fatores. É importante enfatizar que esse resultado não invalida os testes realizados, nem que os fatores definitivamente não têm efeito, porém indicam que não há evidências estatisticamente significativas de que os fatores ou interações analisadas afetem a resposta de maneira relevante.

A ausência de significância estatística pode indicar que o experimento carece de sensibilidade devido a poucos dados ou poucas replicações, baixa variabilidade entre os fatores (se os níveis dos fatores testados não foram suficientemente distintos, os efeitos podem ser mascarados), alta variabilidade nos resultados (se o ruído ou erro experimental for alto, ele pode obscurecer os efeitos reais) ou problemas na

transformação dos dados (a transformação aplicada aos dados pode não ter sido eficaz para estabilizar a variância ou melhorar a normalidade dos resíduos). Além disso, o modelo experimental pode não ser adequado, deixando de incluir variáveis que influenciam a resposta ou capturar interações importantes.

Portanto, buscando-se melhora nos resultados e no nível de confiança estatístico, é recomendado que sejam tomadas algumas medidas para adequação do experimento, destacando-se o aumento do número de replicações para aumentar a capacidade de detecção de efeitos significativos e reavaliação do planejamento experimental, a fim de verificar se algum fator importante foi omitido.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo explorou o impacto das variações nos parâmetros do corte a plasma sobre a qualidade do corte e as alterações microestruturais do aço SAE 1020. Por meio de uma abordagem experimental, foram analisados os efeitos da velocidade de corte, corrente elétrica e altura da tocha, com o objetivo de compreender como esses fatores influenciam os resultados do processo. O trabalho buscou identificar as melhores configurações para alcançar cortes de alta qualidade, além de avaliar as mudanças ocorridas na estrutura cristalina do material, fornecendo subsídios relevantes para o aprimoramento técnico e operacional do método.

Os resultados das análises de qualidade do corte, avaliados por meio das razões sinal-ruído (S/N), revelaram como a variação dos parâmetros influencia diretamente o desempenho do processo. A velocidade de corte foi o fator mais relevante na formação de estrias, com valores baixos e intermediários proporcionando cortes uniformes e menos defeituosos, enquanto velocidades altas aumentaram a inclinação das estrias e a formação de escória. A corrente elétrica teve maior influência no paralelismo, com valores intermediários mostrando maior robustez, correntes baixas favorecendo estrias mais visíveis e correntes altas melhorando a regularidade. A altura da tocha impactou a estabilidade do arco de plasma, com alturas muito baixas causando cortes instáveis e acúmulo de resíduos, e alturas intermediárias a altas resultando em cortes mais limpos e menos escória.

A análise das razões sinal-ruído reforçou que a combinação otimizada de parâmetros para alcançar características de qualidade ideais no corte a plasma varia de acordo com os aspectos avaliados. Para a redução do arraste de estrias, a configuração mais adequada foi composta por velocidade no nível 1, altura da tocha no nível 2 e corrente no nível 3. No caso do paralelismo das superfícies, os melhores resultados foram obtidos com todos os fatores ajustados ao nível 2. Já para a minimização da formação de escória, a configuração ideal envolveu velocidade no nível 1, altura da tocha no nível 3 e corrente também no nível 3.

A análise microestrutural revelou importantes alterações nas regiões de zona de fusão e na Zona Termicamente Afetada (ZTA), variando conforme os parâmetros de corte aplicados. Foi possível observar o alongamento dos grãos de ferrita nas amostras com correntes intermediárias (ex.: Amostras 2 e 9). As microestruturas

dominantes foram ferrita e perlita em todas as amostras, porém foi identificado, também, a formação de bainita em três amostras, principalmente nas regiões intermediárias entre a ZTA e o material base. Além disso, foi possível observar a presença de martensita em parte das faces de corte das amostras em variados parâmetros, relacionada à grande exposição de calor e rápido resfriamento. Ademais, observou-se a formação de ferrita acicular, na Amostra 5, evidenciando condições térmicas mais controladas.

A análise estatística por meio da ANOVA revelou que, embora os fatores avaliados contribuam de forma relevante para a variabilidade das respostas, nenhum deles apresentou significância estatística ao nível de confiança de 95%. Para aprimorar a sensibilidade dessa análise, faz-se necessário o aumento do número de replicações nos experimentos, e/ou a inclusão de níveis adicionais para os fatores estudados e/ou o controle rigoroso de variáveis externas que possam estar impactando os resultados. Esses ajustes são necessários para reduzir o erro residual e melhorar a capacidade do modelo estatístico de identificar os efeitos reais de cada parâmetro.

Por fim, os resultados deste estudo reforçam a importância do controle rigoroso dos parâmetros de corte no processo de plasma. A identificação de configurações otimizadas para velocidade de corte, corrente elétrica e altura da tocha contribui para a melhoria da qualidade do corte e para o controle das alterações microestruturais no aço SAE 1020, proporcionando uma base sólida para futuras otimizações e aplicações industriais mais eficientes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com as avaliações e conclusões deste trabalho, tem-se como sugestões para trabalhos futuros:

Aplicar uma matriz ortogonal L27 do método Taguchi. Dessa forma, o número de experimentos será triplicado e haverá melhora na capacidade de detecção de efeitos significativos;

Incluir a variação de parâmetros relevantes no corte a plasma, como pressão e vazão do gás de plasma e/ou tensão do arco, no estudo. Essa abordagem eliminará a influência de fatores não considerados no experimento que possam influenciar a resposta, garantindo maior precisão nos resultados.

REFERÊNCIAS

- AFIFI, S. A. *et al.* Experimental Study of Cutting Steel Hardox400 Using Plasma Arc Cutting. **Engineering Research Journal (ERJ)**, v. 1, n. 49, p. 49-59, 2021. DOI: 10.21608/erjsh.2021.227489. Disponível em: https://erjsh.journals.ekb.eg/article_227489.html. Acesso em: 8 jan. 2025.
- ANANTHAKUMAR, K. *et al.* Measurement and Optimization of multi-response Characteristics in Plasma Arc Cutting of Monel 400™ using RSM and TOPSIS. **Measurement**, v. 135, p. 725-737, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224118311552>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. 1 ed. Great Britain: Elsevier, 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=GZk6tuMKhU8C&oi=fnd&pg=PR4&dq=metal+cutting+process&ots=4CqV-qeLyN&sig=aLRvjRm5boLU1QT73i2RXcG2wlk#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 13 jul. 2024.
- BHUVENESH, R.; NORIZAMAN, M. H.; MANAN, M. S. A. Surface Roughness and MRR Effect on Manual Plasma Arc Cutting Machining. **International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 6, n. 2, p. 459-462, 2012. Disponível em: <https://publications.waset.org/6229/surface-roughness-and-mrr-effect-on-manual-plasma-arc-cutting-machining>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- BOLDUANN, W. R.; TURAZI, A. Influência da técnica de dupla camada na microestrutura da ZAC durante soldagem por arco submerso do aço SAE 1020. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 1-11, 2023. DOI: 0000-0003-1901-9353. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/21006>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- CAIO, L. B. A. *et al.* Mild Steel GMA Welds Microstructural Analysis and Estimation Using Sensor Fusion and Neural Network Modeling. **Sensors**, v. 21, n. 16, p. 1-22, 2021. DOI: 10.3390/s21165459. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5459>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- CHAMARTHI, S. *et al.* Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 854-861, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.161. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813016755>. Acesso em: 13 jul. 2024.
- CICERO, S. *et al.* Definition and validation of Eurocode 3 FAT classes for structural steels containing oxy-fuel, plasma and laser cut holes. **International Journal of Fatigue**, v. 87, p. 50-58, 2016. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.01.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014211231600013X?via%3Di%3Dhub>. Acesso em: 13 jul. 2024.

CUNHA, G. A.; ELISEI, C. C. A. Análise e Comparação da Microestrutura da ZTA do Corte Realizado por Plasma e Oxicorte em Chapas de Aço 1020. *In: XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência*, Pindamonhangaba, 2016. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/RE_0589_0694_01.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

DAS, M. K. *et al.* Optimization of Process Parameters in Plasma Arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis. **Procedia Materials Science**, v. 5, p. 1550-1559, 2014. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.342. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221181281400707X. Acesso em: 8 jan. 2025.

EN ISO 9013:2017 E, **Thermal cutting - Classification of thermal cuts - Geometrical product specification and quality tolerances**. Brussels: 2017.

FELIX, P. M.; RAMESH, K.; ROSELINE, S. An Investigation and Prediction of Flatness and Surface Roughness during Plasma Cutting Operation on SS410 Material. **International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research**, v. 5, n. 6, p. 160-169, 2017. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.ijeter.everscience.org/Manuscripts/Volume-5/Issue-6/Vol-5-issue-6-M-29.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

FERREIRA, M. M. S. *et al.* Corte a Plasma: Influência das Variáveis no Processo, na Qualidade do Corte e na ZTA Formada no Aço AISI 1045. *In: 73º Congresso Anual de ABM*, São Paulo, v. 73, n. 73, p. 2599-2609, 2018. DOI: 10.5151/1516-392X-264. Disponível em: https://abmproceedings.com.br/en/article/corte-a-plasma-avaliao-das-variveis-do-processo-na-qualidade-corte-na-zta-formada-e-propriedades-finas-do-aisi-1045. Acesso em: 8 jan. 2025.

GANI, A.; ION, W.; YANG, E. Optimisation of cutting parameters and surface deformation during thin steel sheets plasma processing using Taguchi approach. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 13, n. 7, p. 1-19, 2021. DOI: 10.1177/16878140211030401. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/16878140211030401. Acesso em: 8 jan. 2025.

GUIMARÃES, C. G.; SIQUEIRA, C. A.; COSTA, A. L. M. Influência do caminho de aquecimento nas propriedades mecânicas de um aço 1020 temperado a partir de temperaturas intercríticas. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Porto de galinhas, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304626382_INFLUENCIA_DO_CAMINHO_DE_AQUECIMENTO_NAS_PROPRIEDADES_MECANICAS_DE_UM_ACO_1020_TEMPERADO_A_PARTIR_DE_TEMPERATURAS_INTECRITICAS. Acesso em: 22 jan. 2025.

GULLU, A.; ATICI, U. Investigation of the effects of plasma arc parameters on the structure variation of AISI 304 and St 52 steels. **Materials & Design**, v. 27, n. 10, p. 1157-1162, 2005. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.02.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306905000695>. Acesso em: 8 jan. 2025.

HUSSAIN, S.; QAZI, M. I.; ABAS, M. Investigation and optimization of plasma arc cutting process parameters for AISI 304 by integrating principal component analysis and composite desirability method. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 46, n. 33, p. 1-16, 2023. DOI: 10.1007/s40430-023-04614-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-023-04614-y>. Acesso em: 8 jan. 2025.

ILII, S.; COTEATA, M.; MUNTEANU, A. Experimental Results Concerning the Variation of Surface Roughness Parameter (Ra) at Plasma Arc Cutting of Stainless Steel Workpiece. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, v. 2, n. 1, p. 31-36, 2010. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/EXPERIMENTAL-RESULTS-CONCERNING-THE-VARIATION-OF-\(Ilii-Cotea/44c16a3eeae92549e650dc1964b77832bc5b57e0](https://www.semanticscholar.org/paper/EXPERIMENTAL-RESULTS-CONCERNING-THE-VARIATION-OF-(Ilii-Cotea/44c16a3eeae92549e650dc1964b77832bc5b57e0). Acesso em: 8 jan. 2025.

JABLONSKI, M. F.; LERMEN, R. T.; MOLIN, A. D. Otimização dos Parâmetros de Corte Laser CO2 Em Chapas de Aço ao Carbono Através do Método Taguchi. **CONEM 2014 - VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334986527_Otimizacao_dos_parametros_de_corte_LASER_CO2_em_chapas_de_aco_ao_carbono_atraves_do_metodo_Tagu_chi. Acesso em: 8 jan. 2025.

KRAJCARZ, D. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 838-843, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.061. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003075>. Acesso em: 13 jul. 2024.

LIMA, E. G. Corte a plasma. **Revista da Soldagem**, Ano 2, n. 9, p. 18-26, 2006.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MANHÃES, W. S. **Caracterização metalográfica do aço ABNT/SAE 1020 submetido ao tratamento termoquímico da cementação sólida em caixa e ao tratamento térmico da têmpera**. 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, São Mateus, 2018.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

NEMCHINSKY, V. A.; SEVERANCE, W. S. What we know and what we do not know about plasma arc cutting. **Journal of Physics D: Applied Physics**, United Kingdom, v. 39, p. 423-438, 2006. DOI: 10.1088/0022-3727/39/22/R01. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/39/22/R01>. Acesso em: 13 jul. 2024.

PINTO, J.V.S. *et al.* Ensaio de Cementação em Caixa de um Aço SAE 1020. *In: Congresso Anual da ABM – Internacional*, São Paulo, v. 73, n. 73, p. 1798-1808, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58243>. Acesso em: 8 jan. 2025.

RELA, P. R. Processo de soldagem com plasma. *In: WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. (org.). Soldagem: processos e metalurgia*. São Paulo: Blucher, 1992. p. 156-179.

REZENDE, B. A.; SILVEIRA, M. L.; RUBIO, J. C. C. Aplicação do método Taguchi na otimização dos parâmetros da operação de furação de um material sanduíche. **ForScience: revista científica do IFMG**, Formiga, v. 6, n. 2, p. 1-15, 2018. DOI: 10.29069/forscience.2018v6n2.e402. Disponível em: <https://forscience.ifmg.edu.br/index.php/forscience/article/view/402>. Acesso em: 8 jan. 2025.

ROSA, J. L. *et al.* Análise da microestrutura e da propriedade mecânica do aço SAE 1020 com deformação de 50% soldado por eletrodo revestido – SMAW. *In: XXII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VIII Encontro de Iniciação à Docência*, Universidade Vale do Paraíba, 2018. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2018/anais/arquivos/RE_1041_1114_01.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

SALONITIS, K.; VATOUSIANOS, S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 287-292, 2012. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.050. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112002223>. Acesso em: 13 jul. 2024.

SANTOS, C. E. F. **Processos de Soldagem**: conceitos, equipamentos e normas de segurança. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

SILVA, R. F. **Caracterização da zona termicamente afetada de aço produzido via resfriamento acelerado**. 2010. Dissertação (Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SINGH, V. **Analysis of Process Parameters of Plasma Arc Cutting Using Design of Experiment**. 2011. Tese (Master of Technology in Production Engineering) – Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2011.

SKOCZYLAS, A. Studying the Effect of Finishing Work on the Geometric accuracy of the laser cut elements. **Advances in Science and Technology. Research Journal**, v. 12, n. 1, p. 267-272, 2018. DOI: 10.12913/22998624/87042. Disponível em: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-9b6d7782-e2bc-45cb-8d04-5bfa1f747b6b>. Acesso em: 8 jan. 2025.

TULADHAR, U. *et al.* Experimental investigation of plasma arc cutting process to evaluate the characteristics of kerf geometry using ANOVA. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 38, n. 7, p. 3641-3655, 2024. DOI: 10.1007/s12206-024-0637-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-024-0637-4>. Acesso em: 8 jan. 2025.

UMROH, B. *et al.* Correlation of Cutting Speed on Kerf and HAZ During CO₂ Laser Cutting of Alumina. **Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)**, v. 18, n. 1, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/6645>. Acesso em: 8 jan. 2025.

UNAL, R.; DEAN, E. B. Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: An Overview. *In*: **1991 Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts**, United States, p. 1-10, 1991. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040121019>. Acesso em: 8 jan. 2025.