

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARIA MARIANA SIMÕES FERREIRA

**CORTE A PLASMA: AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS
NO PROCESSO E NA QUALIDADE DO CORTE**

BELO HORIZONTE

2017

MARIA MARIANA SIMÕES FERREIRA

**CORTE A PLASMA: AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS
NO PROCESSO E NA QUALIDADE DO CORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr Ivan J. de Santana

Coorientador: Prof. Victor Souza Esteves Lima

BELO HORIZONTE

2017

MARIA MARIANA SIMÕES FERREIRA

**CORTE A PLASMA: AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS
NO PROCESSO E NA QUALIDADE DO CORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan J. de Santana

Prof. M.Sc. Aderci de Freitas Filho

Prof. Victor Souza Esteves Lima

Engenheiro de Materiais Leonardo Viana Dias

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por estar ao meu lado sempre, guiando os meus caminhos.

A meus pais, por estarem sempre ao meu lado, me dando todo o suporte que preciso.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ivan J. de Santana, pelo conhecimento compartilhado, pelo exemplo e por toda ajuda durante a realização do trabalho.

A todos os professores e servidores do CEFET-MG que contribuíram com este trabalho.

Aos meus amigos e familiares, que apoiaram e ajudaram a conclusão deste.

RESUMO

Devido à crescente demanda da sociedade por produtos industriais, houve nos últimos anos um aumento na necessidade de desenvolvimento dos processos já existentes. Visando, na maioria das vezes, unir qualidade dos produtos e velocidade de processo. O processo de corte a plasma, já conhecido há algumas décadas, vem recentemente sendo cada vez mais utilizado e estudado, uma vez que, trata-se de um processo que supera em qualidade e velocidade métodos de corte tradicionais, como tesouras industriais e o oxicorte. Trata-se de um processo em que um arco elétrico de plasma gera calor para a fusão do metal, que será removido em seguida por um jato de gás. Neste trabalho, foram investigados os efeitos da corrente elétrica, da velocidade de corte e da distância entre a tocha e a peça, na qualidade da superfície cortada e na microestrutura dos corpos de prova de aço AISI 1045. Os corpos de prova foram cortados encaixados em um suporte, para simular o resfriamento de uma peça de dimensões maiores. Além de análises qualitativas a respeito do processo e das superfícies cortadas, micrografias e macrografias foram realizadas para auxiliar nas análises.

Plavras-chave: Plasma. Corte a plasma

ABSTRACT

Due to the society's growing demand for industrial products in recent years, there has been an increase in the need to develop existing processes. In most cases, aiming to combine product quality and process speed. The plasma cutting process, which has been known for some decades, has recently been increasingly used and studied since it is a process that exceeds in quality and speed traditional cutting methods such as industrial scissors and oxyfuel. It is a process which an electric arc of plasma generates heat for the fusion of the metal, which will be removed by a jet of gas. In this work, the cutting surface and the microstructure of the AISI 1045 steel specimens were analysed when we vary during the process the electric current, the cutting speed and the distance between the torch and the part. The effects of these variables were evaluated. The experiments simulated the cutting and cooling process of a piece of larger dimensions. In addition to qualitative analyzes regarding the process and the cut surfaces, micro- phages and macrographs were performed to aid in the analyzes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Corte a plasma por injeção com fluxo de gás.	15
Figura 2 - Corte a plasma com injeção de água.....	15
Figura 3- Esquema de equipamento de corte ou soldagem a plasma	16
Figura 4- Fonte para corte manual.....	17
Figura 5- Componentes de uma tocha a plasma	18
Figura 6- Ciclos térmicos e repartição térmica.....	23
Figura 7- Diagrama de equilíbrio metaestável ferro-carbono.	24
Figura 8- Fluxograma da parte experimental	29
Figura 9- Desenho esquemático dos corpos de prova.	30
Figura 10- Equipamento utilizado para a análise química.	30
Figura 11- Direções de corte metalográfico	31
Figura 12- Equipamento utilizado no corte para a preparação das amostras a serem analisadas..	31
Figura 13- Lixadeira 115/60 da Struers	32
Figura 14- Lixadeira Politriz Lixadeira Metalográfica	32
Figura 15- Lixadeira modelo Aropol 2V da marca Arotec	33
Figura 16- Politriz modelo 2V Aropol e politriz modelo DP-10 Struers	33
Figura 17- Microscópio modelo IM713	34
Figura 18- Estrutura montada para a realização do corte a plasma.	35
Figura 19- Suporte para encaixe dos corpos de prova.....	35
Figura 20- Desenho técnico do suporte produzido para apoio das peças cortadas.....	36
Figura 21- Equipamento de corte a plasma utilizado.	37
Figura 22- Sentido do corte a plasma (vista superior).....	38
Figura 23- Scanner Samsung.....	41
Figura 24- Micrografia do Metal Base do material utilizado	43
Figura 25- Superfície cortada dos corpos de prova do procedimento 1	44
Figura 26- Superfície cortada dos corpos de prova do procedimento 2.	45
Figura 27- Macrografia dos corpos de prova primeiro procedimento.....	46
Figura 28- Gráfico velocidade de corte X tamanho da ZTA do corpo de prova (Procedimento 1)	47

Figura 29- Superfície cortada dos corpos de prova CP 10 e CP 15.....	48
Figura 30- Macrografia dos corpos de prova CP 10 (largura da ZTA = 1,21 mm) e CP 15 (largura da ZTA = 1,16 mm).....	49
Figura 31- Micrografia da ZTA do corpo de prova CP 5.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Corpos de prova para análise do efeito da variação no sentido de corte.....	38
Tabela 2- Corpos de prova para análise do efeito da variação da velocidade de corte.	39
Tabela 3- Corpos de prova para análise do efeito da variação da velocidade de corte a uma corrente de 48 amperes.	39
Tabela 4- Corpos de prova para análise da influência da diminuição da altura da tocha.....	40
Tabela 5- Corpos de prova para análise da influência do aumento da altura da tocha, utilizando parâmetros em que o corte se realiza.....	40
Tabela 6- Resultado análise química do material dos corpos de prova.....	42
Tabela 7- Dados obtidos do tamanho da ZTA.....	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo Geral.....	13
2.2. Objetivos Específico	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. Definição do processo de corte a plasma.....	14
3.2. Equipamentos.....	16
3.3. Consumíveis.....	18
3.4. Segurança.....	21
3.5. Variáveis	21
3.6. Ciclo térmico.....	22
3.7. Fases e constituintes de equilíbrio do sistema Fe-Fe ₃ C.....	24
3.8. Macroestruturas e microestruturas formadas no processo de corte a plasma	26
3.9. Estado da arte.....	27
4. PARTE EXPERIMENTAL.....	29
4.1. Materiais	30
4.2. Caracterização do material utilizado.....	30
4.3. Procedimento de corte	34
4.4. Caracterização dos corpos de prova.....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. Resultados da caracterização do metal base	42
5.2. Resultados da variação dos parâmetros na qualidade do corte	43
5.3. Resultado da micrografia da Zona Termicamente Afetada	49
6. CONCLUSÃO	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

O processo de corte a plasma consiste em um jato de plasma que gera calor para a fusão do material, que será removido por um jato de gás. É um processo que foi desenvolvido há aproximadamente 35 anos para processar aqueles materiais mais difíceis de serem processados. O aço inoxidável, aço ao manganês, as ligas de titânio, o cobre, o magnésio, o alumínio e suas ligas e o ferro fundido podem ser processados por esse método.

Com o avanço cada vez mais rápido dos processos industriais e com o aumento da demanda por produtos dessas indústrias, tornou-se mais necessário a utilização de processos que possam unir qualidade e velocidade. Sendo assim, o corte a plasma vem sendo introduzido e substituindo processos de corte com tesouras e cortes com chama. Segundo o Portal Metálica (2011) a velocidade de corte em chapas metálicas finas apresentada pelo processo de corte a plasma supera o processo de oxicorte, aliando essa característica ao preço dos equipamentos de plasma cada vez mais baratos.

Devido a gradativa substituição do processo de oxicorte pelo processo de corte a plasma, comparações e estudos em torno dos dois foram realizados. Sendo, de modo geral, concluída a vantagem do oxicorte sobre o corte a plasma nos quesitos financeiros e em cortes de chapas mais espessas. Porém com desvantagens quando se trata de características que dizem respeito à produtividade e características do corte.

Apesar de não se tratar de um processo novo, o estado da arte que este se encontra se caracteriza mais por um grande número de patentes do que por publicações científicas a respeito das características do processo. Há, portanto, uma necessidade de compreensão dos fenômenos mecânicos e físicos do processo, para dessa maneira, estabelecer parâmetros adequados para obtenção de melhores características de corte.

Este trabalho propôs um entendimento a respeito do corte a plasma, juntamente com as variáveis que o influenciam. Para isso, foram analisadas as influências da variação de seus principais parâmetros, velocidade de corte, corrente elétrica e distância entre a peça e à tocha, na qualidade da superfície cortada, na produtividade, na extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e nas microestruturas observadas nessa região. Esperou-se a identificação dos parâmetros que mais influenciariam em cada item citado. Pode-se observar através das micrografias e macrografias realizadas e das análises qualitativas, a influência tanto da

corrente elétrica quanto da velocidade de corte na ZTA da peça e na eficácia do processo. Assim como, pode-se perceber a influência da altura da tocha e da velocidade de corte nas características da superfície cortada.

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar qual a influência das variáveis no processo de corte a plasma e nas características da peça cortada, assim como em sua microestrutura.

2.2.Objetivos Específico

Avaliar a influência, nas características da peça cortada e na sua microestrutura em chapa de aço AISI 1045, das seguintes variáveis:

- Velocidade de deslocamento da tocha
- Corrente elétrica
- Distância entre a peça e a tocha
- Sentido de corte no processo de corte a plasma;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Definição do processo de corte a plasma

É um processo que tem sido introduzido desde 1995 e vem substituindo os processos de corte com tesouras, serras e corte com chama, sendo utilizado somente em peças com espessura entre 3 e 40 mm (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

Neste processo, um arco elétrico comprimido funde uma região do material da peça a ser cortada e um jato de alta velocidade de gás remove o material fundido (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

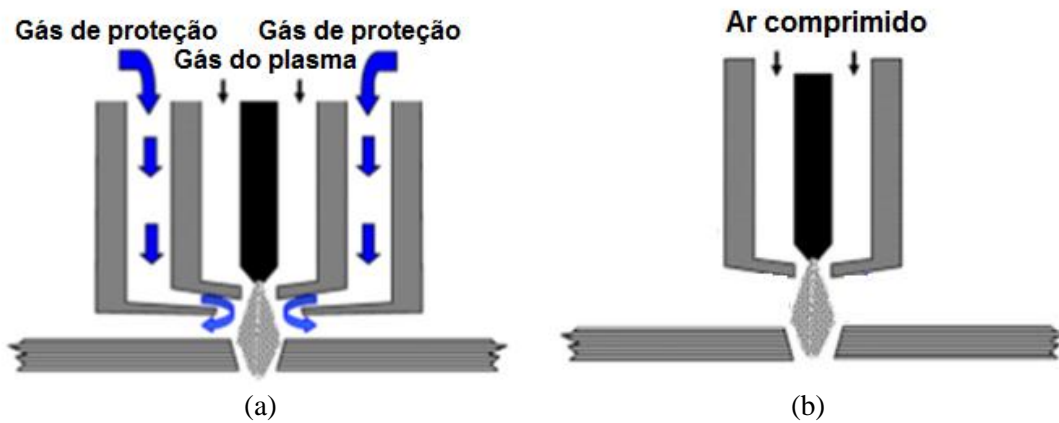
O processo de abertura do arco acontece através de um ignitor de alta frequência ou de um arco-piloto. Este arco piloto pode ser obtido por meio de um circuito de alta frequência ligado a um circuito de alta potência, sendo estabelecido entre um eletrodo que atua como catodo e a peça que atua como anodo. Já o processo de aquecimento do metal ocorre com o auxílio do arco elétrico, que provoca em uma coluna de gás um aumento suficiente de sua temperatura para gerar impactos entre as moléculas que causarão um certo grau de dissociação e ionização. Esse gás ionizado irá passar por um orifício de parede fria, onde sofrerá um gradiente de temperatura entre o centro e a sua parte de fora, fazendo com que a densidade no centro diminua favorecendo o aumento de energia dos elétrons que agora terão energia suficiente para ionizar outros átomos. Este fenômeno acarreta um aumento do grau de ionização e da temperatura do arco, levando a um aumento da taxa de energia transferida para a peça (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

Há dois métodos para iniciar o processo de corte, penetrando a peça pelo meio ou pelos cantos dessa peça. A iniciação do processo pelos cantos da peça é preferível, pois dessa maneira há a proteção da tocha, porém em alguns casos, devido a geometrias, não há maneiras de evitar a iniciação do processo pelo meio da peça. (NEMCHINSKY & SEVERANCE, 2006)

Esse processo possui grande eficiência, deixando a peça com uma superfície com um bom acabamento superficial, controle dimensional, pequena ZTA (zona termicamente afetada) e pouca distorção na peça. Pode ser manual ou mecanizado, em linha reta ou curva e iniciar em qualquer ponto do material (NEMCHINSKY & SEVERANCE, 2006).

O processo pode ser: por duplo fluxo de gás (Figura 1 “a”), onde geralmente usa-se o nitrogênio como gás de plasma e escolhe-se um gás de proteção de acordo com as características do metal base que será cortado; ou por ar comprimido (Figura 1 “b”) por compressor ou cilindro. Figura 1 (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011)

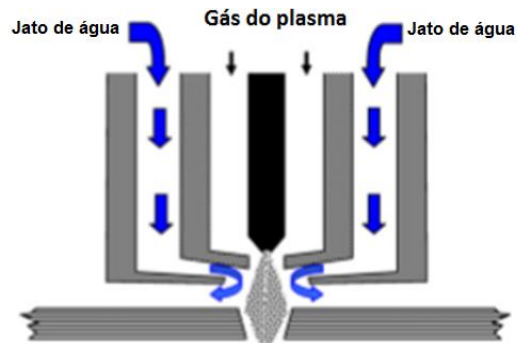
Figura 1- Corte a plasma por injeção com fluxo de gás.



Fonte: Adaptado de (NEMCHINSKY & SEVERANCE, 2006)

A proteção do arco de plasma pelos gases de proteção pode ser realizada também por jato de água. Nesse caso, melhora-se a aparência do corte, a vida útil do bocal e aumenta o confinamento do plasma protegendo-o contra contaminação, Figura 2 (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

Figura 2 - Corte a plasma com injeção de água



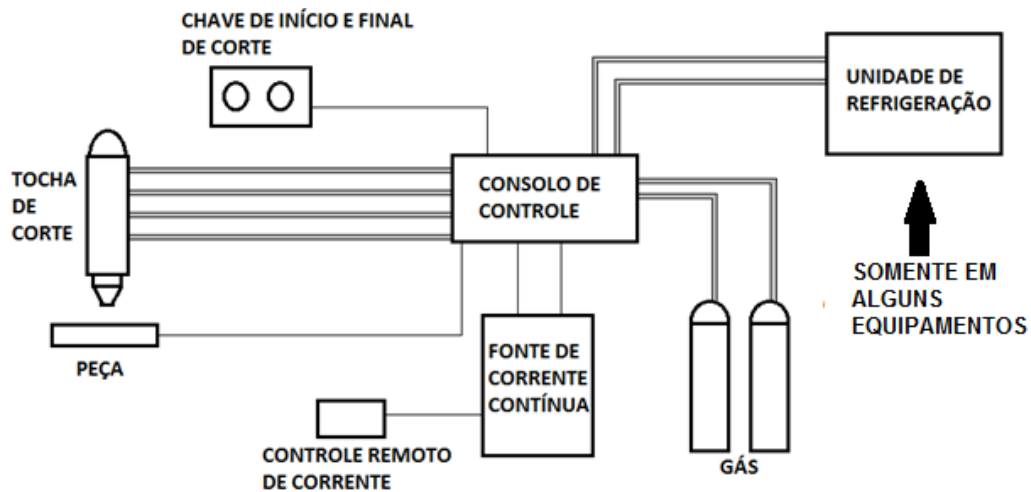
Fonte: Adaptado de (NEMCHINSKY & SEVERANCE, 2006)

3.2. Equipamentos

O equipamento usado consiste em uma fonte de energia, tocha de corte, fonte de gases, unidade de controle e fonte de água (em equipamentos que utilizam água como proteção). Em caso, de corte mecanizado adicionamos dispositivos de deslocamento da tocha (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

A seguir, a Figura 3 apresenta um esquema de equipamento para soldagem ou corte à plasma.

Figura 3- Esquema de equipamento de corte ou soldagem a plasma



Fonte: Adaptado de (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010)

A fonte de energia usada é de corrente constante, sendo contínua ou pulsada. A corrente de saída tem valores entre 70 a 1000 A, e dependerá da velocidade de corte e da espessura da peça. Possui valores de tensão em vazio na faixa de 120 a 400 V, dependendo da tocha, da técnica usada, do material e da espessura da peça (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011). A Figura 4, a seguir, exibe uma imagem de uma fonte de energia para corte manual de aços.

Figura 4- Fonte para corte manual

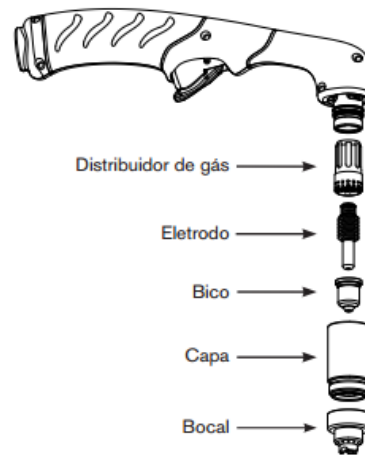


Fonte: Próprio autor

As tochas podem ser para corte manual ou mecanizado, possuem um ou mais orifícios com vários diâmetros, que irão depender da capacidade e da técnica usada. As tochas para corte mecanizado possuem maior capacidade (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011). As tochas servem de suporte para os consumíveis que fazem parte do processo. Algumas possuem em seu interior mangueiras que são utilizadas para refrigeração (utilizando gases ou água) dessa maneira aumentando a sua vida útil e dos consumíveis. O eletrodo é fixado à tocha por meio de uma pinça, o que permite um preciso posicionamento no centro do bocal, garantindo uma maior vida útil desse bocal. (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

A tocha tem como componentes: distribuidor de gás, bico, eletrodo e capa. O distribuidor de gás é constituído por material isolante e tem como função fornecer um sentido rotacional ao gás. Esse sentido é necessário pois dessa forma aumenta-se a constrição do arco e conseqüentemente aumenta-se a sua temperatura. O bico tem como função constrição do plasma e então guiá-lo até o elemento a ser cortado. O eletrodo tem como principal função conduzir corrente elétrica, para que ocorra a emissão dos elétrons e assim gerar o plasma. E a capa tem as funções de manter os componentes alinhados e isolar a parte elétrica do bocal frontal (LIMA, 2006). A Figura 5 exibe uma tocha de corte a plasma.

Figura 5- Componentes de uma tocha a plasma



Fonte: (Hyperterm, 2015)

As fontes de gás consistem em cilindros com gases que formarão o plasma, cilindros de gás de proteção (em equipamentos que se utiliza a proteção) e em reguladores de pressão e de vazão. O sistema também possui dispositivos de segurança que interrompem a operação caso haja alguma falha (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

3.3. Consumíveis

Os consumíveis usados no corte a plasma são: os gases que irão formar o plasma, os gases de proteção (em alguns equipamentos) e os eletrodos (podem ser de cobre ou tungstênio), que apesar de denominados não consumíveis eventualmente são consumidos durante o processo. Os gases serão escolhidos de acordo com o material que será cortado (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

Os eletrodos geralmente são barras do metal puro ou com adição de alguns elementos de liga. O critério para a seleção do eletrodo em função da corrente é de acordo com a norma AWS – A5.12 – 69. A ponta do eletrodo deve ser cônica (ângulos de 20° a 60°) e concêntrica (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

A seguir, os quadros 1 e 2 apresentam alguns gases para a formação do plasma e de proteção, respectivamente, que podem ser utilizados e suas características.

Quadro 1 - Seleção de gases para formação de plasma

Gás	Recomendado para:	Vantagens	Desvantagens
Ar	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Carbono • Alumínio • Aço Inoxidável 	<ul style="list-style-type: none"> • Corte limpo e rápido em aço carbono • Conveniente • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa vida do eletrodo • Nitretação da superfície de corte • Oxidação em Inox e alumínio
Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Inoxidável • Alumínio • Aço Carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Bom acabamento em Inox e alumínio • Excelente vida útil dos consumíveis • Custo relativamente baixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitretação da superfície de corte • Custos podem aumentar para sistemas manuais que requerem alta vazão
Misturas de Argônio e Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Inoxidável • Alumínio 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente qualidade e velocidade de corte em espessuras acima de 12 mm • Menos fumaça e menos fumos 	<ul style="list-style-type: none"> • Caro • Não recomendado para aço carbono
Oxigênio	<ul style="list-style-type: none"> • Aço carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior velocidade de corte • Superfície livre de nitretação • Menor angularidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa vida útil dos consumíveis • Não aplicável em inox ou alumínio

Fonte: Adaptado de (Revista da Soldagem ano 2 nº 9, 2006, página 24)

Quadro 2 - Seleção de gases de proteção

Gás	Usado com:	Vantagens	Desvantagens
Ar	<ul style="list-style-type: none"> • Ar • Nitrogênio • Oxigênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Conveniente • Baixo Custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitretação na superfície de corte
Dióxido de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa proteção para vários tipos de metais • Boa vida útil do consumíveis • Maior flexibilidade de parâmetros 	<ul style="list-style-type: none"> • Inconveniente (pode requerer console de gás específico) • Superfície de corte rugosa
Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrogênio • Argônio/Hidrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente qualidade de corte em Inox e alumínio • Boa vida útil dos consumíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitretação da superfície de corte • Menor flexibilidade dos parâmetros • Menor vida útil dos consumíveis (comparado ao CO₂)
Água	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrogênio • Argônio/Hidrogênio • Oxigênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente qualidade de corte em Inox e alumínio • Menos fumos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sujeita • Requer água de alta qualidade

Fonte: Adaptado de (Revista da Soldagem ano 2 n° 9, 2006, página 24)

3.4.Segurança

Em relação aos cilindros de gases:

- Evitar choques nos reguladores de pressão, pois devido a elevada pressão interna dos cilindros de gases.
- Transportar o cilindro sempre com o capacete de proteção.
- Armazenar os cilindros na posição vertical, em locais limpos e ventilados e que não tenham fonte de calor por perto.
- Verificar sempre as válvulas e reguladores de pressão para evitar vazamentos (WAINER, BRANDI & MELLO, 2010).

Cuidados durante o processo:

- Manter os equipamentos limpos e em bom estado de conservação
- Garantir que as peças a serem cortadas tenham sido limpas adequadamente, pois resíduos de algumas substâncias podem causar explosões.
- Utilizar roupas de proteção durante todo o processo, pois os soldadores estão expostos a todo momento a quantidades elevadas de calor, radiação, partículas que são projetadas em elevadas velocidades.
- O local de trabalho deve ser bem ventilado e possuir a presença de exaustores, pois gases e fumos são gerados no processo e podem causar danos à saúde. (MARQUES, 2002).

3.5.Variáveis

As variáveis mais importantes para o processo de corte são corrente, velocidade de corte, fluxo e pressão do gás de plasma, distância entre bocal da tocha e peça, características da tocha (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

Dependendo do tipo de tocha, a direção de corte pode influenciar no acabamento superficial da peça cortada. A distância do bocal e da peça varia entre 6 e 16 mm. Menores velocidades de corte resultam na maioria das vezes em superfícies com melhor acabamento (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

A escolha dos melhores parâmetros deve ser feita levando em consideração as orientações do fabricante do equipamento utilizado (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

A seguir no Quadro 3, apresenta parâmetros de corte geralmente usados em diferentes materiais.

Quadro 3: Parâmetros de corte a plasma

Material	Espessura (mm)	Diâmetro do orifício (mm)	Corrente (A)	Velocidade de corte (mm/s)
Alumínio (N ₂ e Ar com adição de H ₂ ou O ₂ , com vazões de 45 a 100 l/min)	6	3,2	300	127
	13	3,2	250	86
	25	4,0	400	38
	51	4,0	400	9
	102	4,8	450	5
Aço inoxidável (N ₂ e Ar com adição de H ₂ ou O ₂ , com vazões de 45 a 100 l/min)	6	3,2	300	86
	13	3,2	300	42
	25	4,0	400	21
	51	4,8	500	9
	102	4,8	500	3
Aço inoxidável (Ar comprimido ou N ₂ com adições de H ₂ ou O ₂ , com vazões de 90 a 140 l/min)	6	3,2	275	86
	13	3,2	275	42
	25	4,0	425	21
	51	4,8	550	11

Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011)

3.6.Ciclo térmico

No corte a plasma o calor é fundamental no processo, porém ele causa efeitos nas regiões próximas a ele, devido a sua influência sobre as reações metalúrgicas. Esses efeitos são basicamente: mudança de fase do material, aumento do tamanho de grão, reações químicas, dissolução de precipitados e difusão. Em alguns casos, esses efeitos podem representar potenciais problemas. Desse modo, um estudo da variação de temperatura em função da

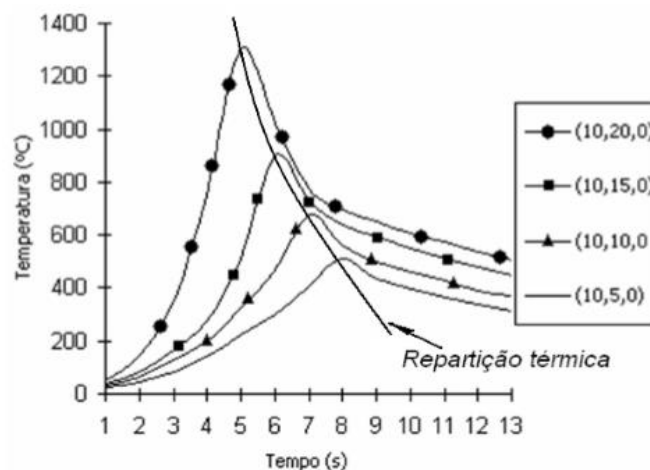
distância e do tempo (ciclos térmicos) é importante, pois todos esses efeitos podem mudar a microestrutura do material e conseqüentemente suas propriedades (RAMALHO, 2008).

Quando ocorre o aquecimento de um ponto do material, as regiões vizinhas sofrem um aumento de temperatura por condução de calor causando um gradiente térmico, que se inicia na maior temperatura de aquecimento até a temperatura ambiente. Desse modo, deve-se considerar para cada ponto da peça suas temperaturas e seus respectivos tempos de permanência em cada uma, e com isso plotar um gráfico indicado esse comportamento (tempo x temperatura). Essa representação é o ciclo térmico do material aquecido (RAMALHO, 2008).

Quando se juntam vários ciclos térmicos em um mesmo gráfico pode-se criar a repartição térmica da peça estudada através da junção dos pontos de máxima temperatura de cada ciclo (RAMALHO, 2008). Na Figura 6 a representação de um exemplo de ciclo térmico e de repartição térmica.

É muito importante conhecer o ciclo térmico ao qual o material foi submetido, uma vez que, influenciará diretamente na estrutura cristalina do material após o processo. O ciclo térmico é dividido em três etapas importantes: etapa de aquecimento que é início do processo, o momento em que a tocha se aproxima do ponto estudado; temperatura máxima do ciclo, o momento em que a tocha chega ao ponto estudado; e etapa de resfriamento, momento em que a tocha se afasta do ponto estudado (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

Figura 6- Ciclos térmicos e repartição térmica.



Fonte: (RAMALHO, 2008)

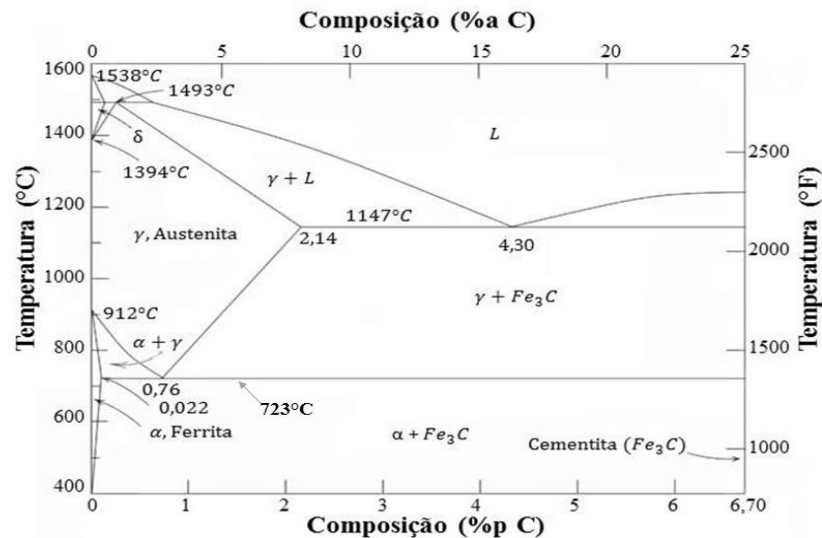
As temperaturas dos ciclos são sempre em função da intensidade da fonte de calor, das propriedades termodinâmicas do material, da temperatura inicial do sólido, da velocidade de deslocamento da fonte e das coordenadas dos pontos estudados. Portanto, para se obter o valor instantâneo da temperatura de qualquer ponto do sólido em estudo basta conhecer as variáveis anteriormente citadas e aplicá-las nas equações de fluxo de calor (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

O controle da velocidade de resfriamento é muito importante para avaliar as tensões internas. A velocidade de resfriamento depende principalmente da entrada de energia, logo, dependerá indiretamente, da velocidade da fonte e da temperatura inicial do material (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

3.7. Fases e constituintes de equilíbrio do sistema Fe-Fe₃C

O diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C, Figura 7, nos dá o estudo da constituição e da estrutura das ligas de ferro e carbono. Ele nos dá as fases que podem existir no aço de acordo com sua composição química e temperatura. Portanto, para se saber sobre as possíveis fases em uma liga a base de ferro, deve se conhecer o estado de equilíbrio desta liga a temperatura em questão (COLPAERT, 2008).

Figura 7- Diagrama de equilíbrio metaestável ferro-carbono.



Fonte: Adaptado de (COLPAERT, 2008).

As fases sólidas normalmente apresentadas pelos aços, a partir do campo onde existe fase líquida, considerando um resfriamento lento são: ferrita, cementita e austenita. Sendo que, pode haver a combinação dessas fases a depender da concentração de Fe e C, gerando a fase perlita. E o diagrama de equilíbrio indica quais são as regiões que delimitam essas fases (COLPAERT, 2008).

A ferrita é uma fase do aço que possui estrutura CCC. Se forma por meio do resfriamento lento (que possibilita a difusão dos átomos) do campo austenítico. A temperatura ambiente, ferro puro ou aços que contenham concentração de carbono de até de 0,002% (abaixo do limite de solubilidade da cementita) apresentam somente a fase ferrita. Estes materiais que apresentam somente a fase ferrita geralmente apresentam baixa dureza (COLPAERT, 2008).

A austenita é uma fase com estrutura CFC observadas acima da temperatura de recristalização. Apresenta, sem a presença de elementos gamagênicos, estabilidade somente em temperaturas elevadas, logo só é observável em equipamentos que possam operar a altas faixas de temperatura. Alternativamente há técnicas metalográficas que revelam os contornos de grão da austenita que existia antes de o material se transformar (COLPAERT, 2008).

A cementita é uma fase do aço que possui estrutura ortorrômbica. Se forma por meio do resfriamento relativamente lento do campo austenítico. A temperatura ambiente, aparece quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida, ou seja, ultrapassa 0,002% (COLPAERT, 2008).

A perlita é um constituinte que possui a presença de lamelas intercaladas das fases cementita e ferrita. Surge a partir do equilíbrio eutetóide entre ferrita, cementita e austenita, a 723°C. A sua formação se dá por meio do mecanismo difusional: inicialmente ocorre o deslocamento de átomos de carbono para uma região, levando ao surgimento de uma fina lamela de cementita. Como consequência, a concentração de átomos de carbono na região ao redor dessa lamela que se formou diminui, se tornando inferior ao limite de solubilidade da ferrita, formando assim esta fase. (COLPAERT, 2008).

Aços que possuem concentração de carbono inferior a concentração do equilíbrio eutetóide são chamados de aços hipoeutetóides e apresentam, a temperatura ambiente, os constituintes ferrita pró-eutetóide e perlita. Já os aços que possuem concentração de carbono superior a

concentração do equilíbrio eutetoide são chamados de aços hipereutetoides e apresentam, a temperatura ambiente, os constituintes cementita pró-eutetoide e perlita (COLPAERT, 2008).

3.8. Macroestruturas e microestruturas formadas no processo de corte a plasma

As regiões básicas formadas pela entrada de calor na peça no processo de corte são: Zona Termicamente Afetada (ZTA), que é a região do metal não fundida pelo calor, mas que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas; e o Metal Base (MB), que é a região mais afastada do ponto onde ocorre o processo e que não é afetada por ele (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

As características da ZTA dependem do tipo de metal de base e do ciclo térmico do processo de corte. Podendo os efeitos do ciclo térmico serem diferentes para cada tipo de metal de base. A ZTA possui três regiões: região de crescimento de grão, refino de grão e região intercrítica (WAINER, BRANDI, & MELLO, 2010).

A região de crescimento de grão é a região que se encontra mais próxima de onde ocorreu o processo, onde a temperatura chegou a cerca de 1200°C. Neste local, a austenita sofre um grande crescimento de grão. A estrutura final dependerá da quantidade de carbono e de elementos de liga, da velocidade de resfriamento e do tamanho do grão austenítico, geralmente sendo composta por ferrita em placas na presença de bainita. Grãos maiores dificultam a transformação durante o resfriamento, aumentando a possibilidade de formação de martensita, isto é, aumentando a temperabilidade do aço. Para condições de corte que apresentam um resfriamento mais rápido e aços com maior teor de carbono ou elementos de liga, pode-se resultar em uma formação completa de martensita nesta região (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

A região de refino de grão é a região onde a temperatura chega entre 900 e 1200°C. Após o processo, essa região geralmente apresenta uma estrutura fina de ferrita e perlita (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

A região intercrítica é a região que a temperatura mais alta varia entre 727°C e a linha A3 do diagrama de equilíbrio, onde ocorre a transformação parcial do metal base, pois somente uma parte do metal base é austenitizado (MARQUES, MODENESI, & BRACARENSE, 2011).

3.9.Estado da arte

Salonitis e Vatousiano (2012) investigaram em seu trabalho os parâmetros mais importantes que influenciam na qualidade do corte a plasma. Assim sendo, investigaram o efeito da corrente de corte, velocidade de corte e altura da tocha em relação a peça e determinaram os melhores parâmetros de projeto. Como resultado obtiveram que o parâmetro que mais influencia na característica superficial do corte (rugosidade e ondulação da superfície cortada) é a altura da tocha, uma vez que, em alturas maiores a tocha adquire um comprimento mais longo e com curvas, gerando irregularidades. Obtiveram também que a velocidade influencia na rugosidade da superfície cortada: velocidades muito altas geram linhas de arraste na superfície da peça e velocidades muito baixas levam a um fenômeno de solidificação e ressolidificação que geram imperfeições na mesma. Concluíram também que a ZTA sofre influência significativa da velocidade e da corrente de corte, pois são elas as responsáveis pelo aporte de calor da peça.

Chamarthia et al. (2013) analisaram, por meio do corte de uma placa Hardox 400, os efeitos de uma alta tensão, da velocidade de corte e da taxa de fluxo de gás na irregularidade da superfície cortada. Utilizaram para análise dos resultados um software chamado “Analysis of Variance” (ANOVA) que identificou os principais parâmetros do processo, determinando sua otimização para um processo de melhor qualidade. Concluíram em seu estudo que a velocidade de corte varia inversamente proporcional a espessura da chapa cortada, que a tensão do arco é o principal parâmetro que influencia na qualidade do corte, seguida pela velocidade de corte.

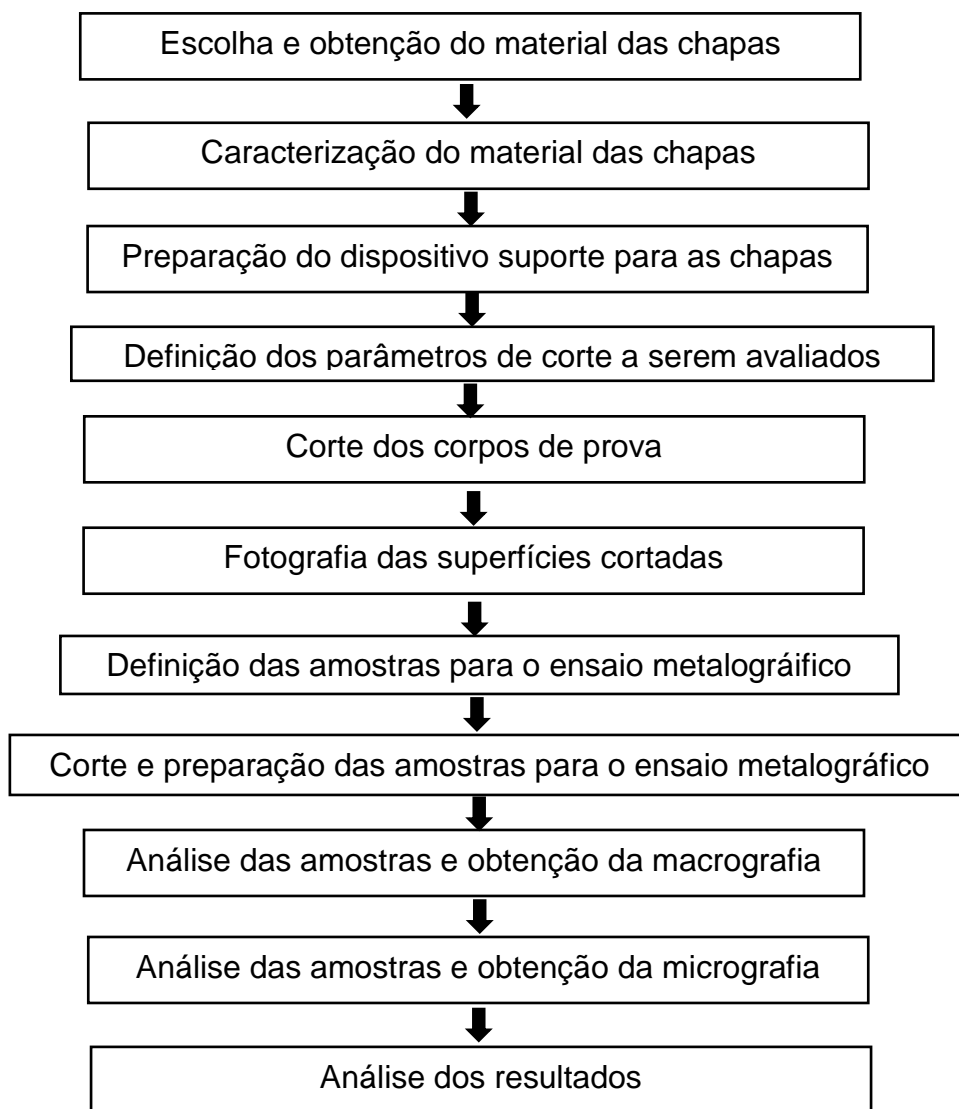
Sanda, Margareta e Adriana (2010) apresentaram em seu estudo a variação da rugosidade da superfície de aços inoxidáveis cortados a plasma. Os cortes foram feitos em um equipamento de CNC a plasma e os parâmetros utilizados para a análise do efeito de suas variações foram: velocidade de corte, espessura do material e intensidade de corrente. Os autores concluíram que o processo é adequado para condutores elétricos de espessura entre 1 e 600 mm, qualquer material condutor incluindo aço carbono, aço inoxidável, cobre, ferro fundido e ligas. A respeito dos parâmetros foi determinado que a espessura do material exerceu a maior influência sobre a rugosidade da superfície cortada, seguida da velocidade e da corrente de corte.

Bini et al. (2017) em seu estudo avaliaram a influência da tensão do arco, velocidade de corte, fluxo de plasma, gás de proteção e composição do gás na posição e no formato do corte. A técnica DoE (*The Design of Experiments*) foi usada para determinar os principais parâmetros que definiriam o perfil do corte. As análises indicaram que a velocidade de corte e a tensão do arco afetaram o mecanismo de formação do corte e a interação entre eles definem a inclinação do corte.

4. PARTE EXPERIMENTAL

O fluxograma com as etapas da parte experimental é representado na Figura 8 a seguir:

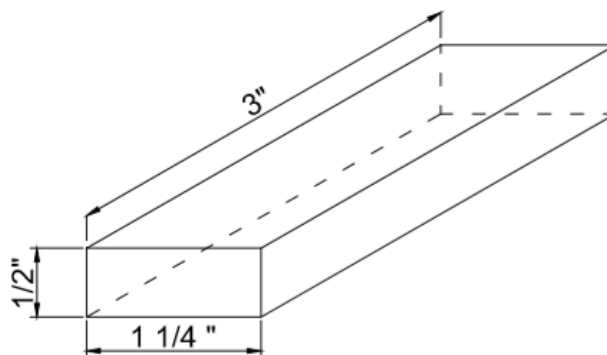
Figura 8- Fluxograma da parte experimental



4.1. Materiais

Para confeccionar os corpos de prova o aço utilizado foi o AISI 1045 e as dimensões determinadas foram: 76,2mm x 31,75mm x 12,7mm (3" x 1 1/4" x 1/2"), representadas na Figura 9, a seguir.

Figura 9- Desenho esquemático dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor

4.2. Caracterização do material utilizado

Foi feita a análise química em uma amostra do material utilizado para os corpos de prova. Para isso, utilizou-se o equipamento Foundry Master Expert da Oxford, representado na Figura 10. Três testes foram realizados nessa mesma amostra.

Figura 10- Equipamento utilizado para a análise química.

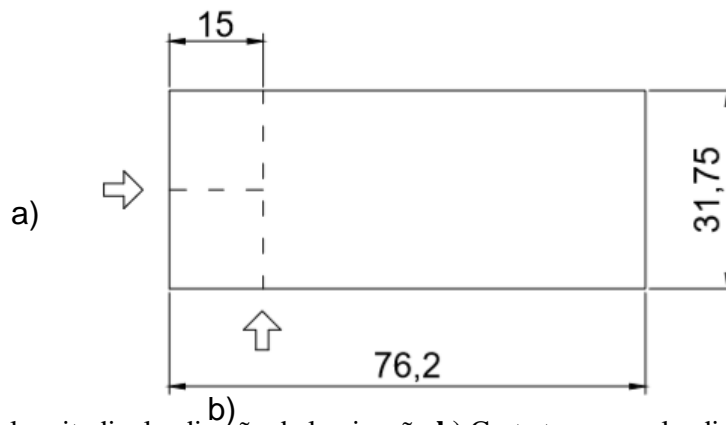


Fonte: Próprio autor.

Conhecendo a composição química do material dos corpos de prova, sua microestrutura foi analisada por meio do ensaio metalográfico. Para isso, uma amostra do corpo de prova foi preparada seguindo as etapas a seguir:

- a) Corte do corpo de prova transversalmente a sua direção de laminação e em seguida longitudinalmente, desenho ilustrativo representado na Figura 11. Utilizou-se o equipamento de corte metalográfico modelo Arocor 80 da marca Arotec, representado na Figura 12.

Figura 11- Direções de corte metalográfico



a) Corte longitudinal a direção de laminação b) Corte transversal a direção de laminação

Fonte: Próprio autor.

Figura 12- Equipamento utilizado no corte para a preparação das amostras a serem analisadas.



Fonte: Próprio autor.

- b) Embutimento a frio da amostra com resina acrílica autopolimerizante.
- c) Lixamento das superfícies das amostras. No lixamento foram utilizadas duas lixadeiras modelo 115/60 da Struers (Figura 13) com lixas de 120 e 240 mesh, uma lixadeira do tipo polítrix lixadeira metalográfica (Figura 14) com lixa de 320 mesh e duas lixadeiras modelo Aropol 2V da marca Arotec (Figura 15) com lixas de 400 e 600 mesh. Jatos de água foram constantemente empregados às lixas durante o procedimento.

Figura 13- Lixadeira 115/60 da Struers



Fonte: Próprio autor.

Figura 14- Lixadeira Polítrix Lixadeira Metalográfica



Fonte: Próprio autor.

Figura 15- Lixadeira modelo Aropol 2V da marca Arotec



Fonte: Próprio autor.

- d) Lavagem com álcool etílico e secagem com secador.
- e) Polimento da superfície exposta da amostra utilizando duas máquinas politriz: uma modelo DP-10 da Struers em pano de pasta de diamante de $9\mu\text{m}$ e outra modelo 2V da Aropol em pano de pasta de diamante de $3\mu\text{m}$. Equipamentos representados na Figura 16. Álcool etílico foi utilizado como lubrificante durante o processo.

Figura 16- Politriz modelo 2V Aropol e politriz modelo DP-10 Struers



Fonte: Próprio autor.

- f) Ataque da superfície da amostra com solução de Nital 3%, seguida da lavagem com água e álcool e secagem com secador.

Após a preparação do corpo de prova, as amostras foram analisadas por meio do microscópio modelo IM713 com número de série 0628894 da empresa Kontrol e distribuído pela Fortel Industria e comercio LTDA, representado na Figura 17. Os aumentos utilizados foram de 200 e 400x e as micrografias de sua microestrutura foram obtidas.

Figura 17- Microscópio modelo IM713

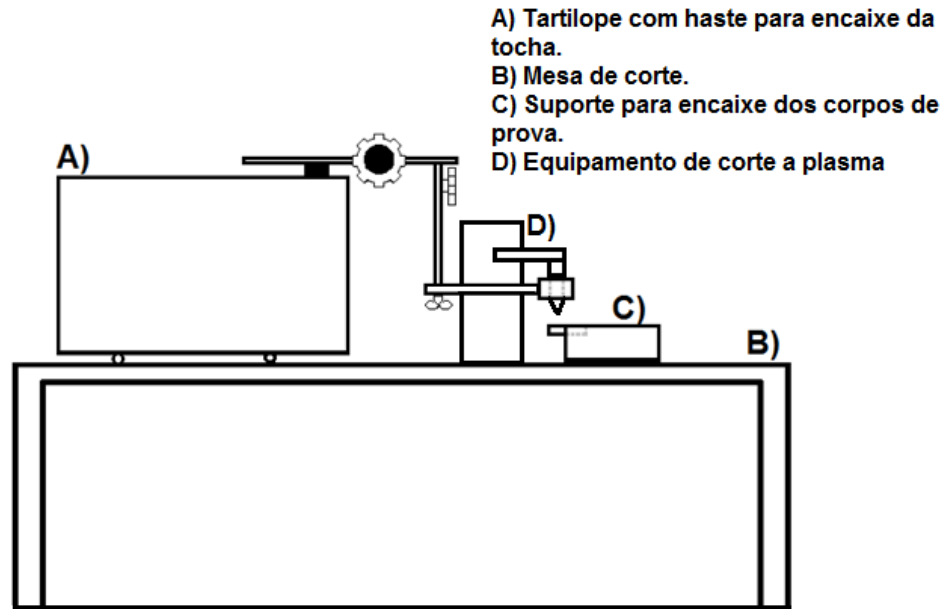


Fonte: Próprio autor

4.3.Procedimento de corte

Para a realização do corte foi utilizada uma estrutura composta por: uma mesa de aço, utilizada em procedimentos de corte e soldagem; um tampo acoplado com hastes para o encaixe da tocha; um suporte de aço para o encaixe dos corpos de prova; e o equipamento de corte a plasma. A Figura 18 mostra essa montagem.

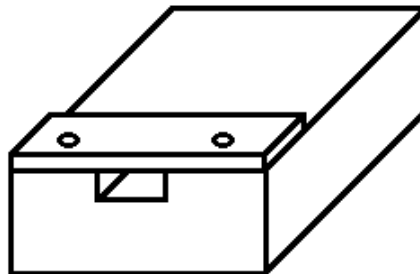
Figura 18- Estrutura montada para a realização do corte a plasma.



Fonte: Próprio autor

A Figura 19 mostra o suporte de aço utilizado para encaixe dos corpos de prova durante o corte. Este suporte foi utilizado com o intuito de acelerar o resfriamento de peça, uma vez que aumenta a condução do calor da peça cortada. Considerando que este corpo se trata de um corpo sólido, sabemos que o mecanismo de transferência de calor mais eficiente será o de condução dentre os três existentes para o aço (convecção, radiação e condução). Com isso, pode-se simular o resfriamento de uma peça de dimensões maiores.

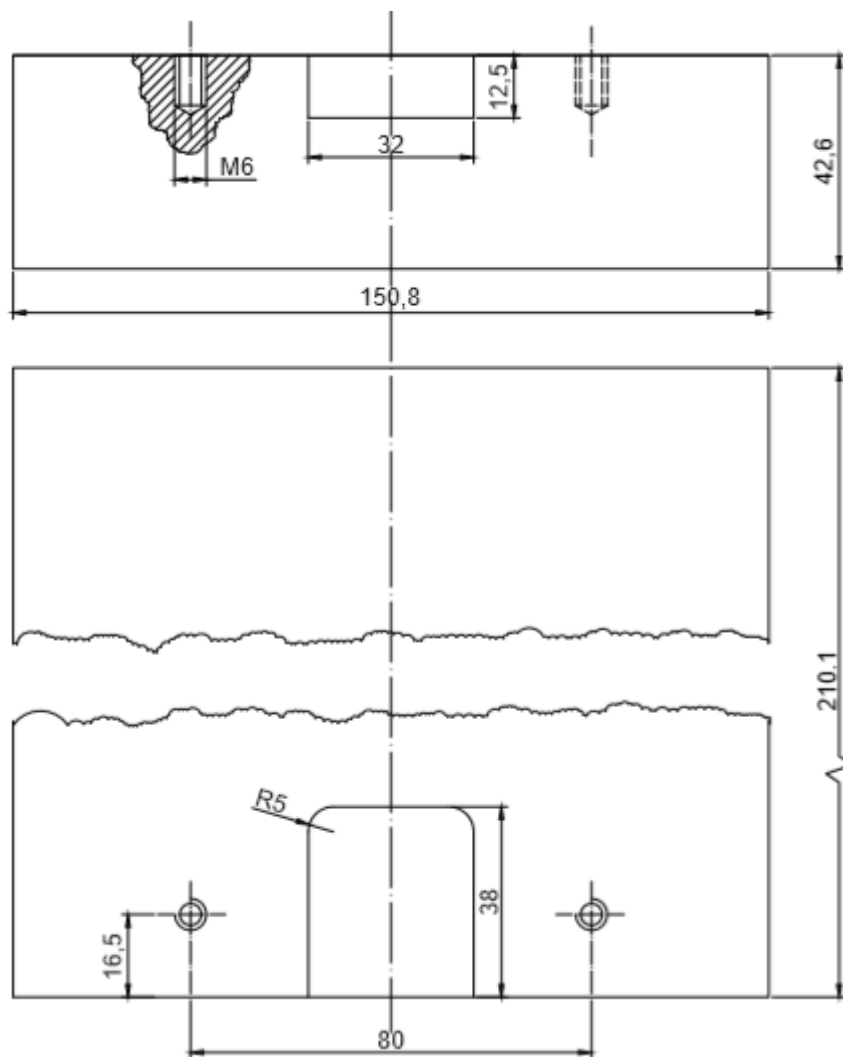
Figura 19- Suporte para encaixe dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

As dimensões do suporte são representadas na Figura 20, a seguir:

Figura 20- Desenho técnico do suporte produzido para apoio das peças cortadas



Fonte: Próprio autor.

O equipamento de corte a plasma utilizado foi o sistema Powermax 85 da Hypertherm. Um sistema que pode ser manual ou mecanizado de 85 amperes (A). Inclui uma tocha de 75° da série Duramax, uma caixa de consumíveis e um cabo obra. A Figura 21, exibe o equipamento utilizado.

Figura 21- Equipamento de corte a plasma utilizado.



Fonte: Próprio autor

O processo de corte a plasma dos corpos de prova foi dividido em 5 procedimentos:

- Procedimento 1: Foram fixados os valores de corrente (60 A), altura da tocha (3,6 mm) e velocidade de corte (19,10 cm/min). Utilizou-se dois corpos de prova (CP1 e CP2), onde o sentido do primeiro foi oposto ao do segundo.
- Procedimento 2: Foram fixados os valores de corrente (60 A), altura da tocha (3,6 mm) e sentido de corte. Utilizou-se sete corpos de prova, variando as velocidades de corte entre eles: 16,4 cm/min; 21,8 cm/min; 24,5 cm/min; 29,9 cm/min; 40,8 cm/min; 57,0 cm/min e 78,7 cm/min.
- Procedimento 3: Foram fixados os valores de corrente (48 A), altura da tocha (3,6 mm) e sentido de corte. Utilizou-se três corpos de prova, variando as velocidades de corte entre eles: 24,5 cm/min; 29,9 cm/min e 35,4 cm/min.
- Procedimento 4: Foram fixados os valores de corrente (48 A), velocidade (35,4 cm/min) e sentido de corte. Utilizou-se dois corpos de prova e variou as alturas da tocha: 2,4 mm e 1,2 mm.
- Procedimento 5: Foram utilizados os valores de corrente (48 A), velocidade (24,5 cm/min) e sentido de corte. Utilizou-se dois corpos de prova e variou as alturas da tocha: 6,0 mm e 7,2mm.

Em todos os procedimentos a distância entre a tocha e o suporte dos corpos de prova foi 12,7 mm.

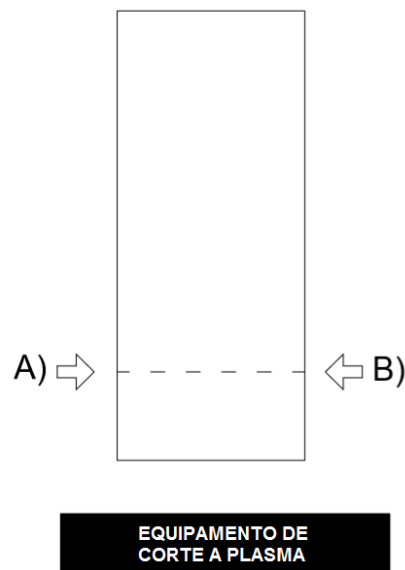
Os corpos de prova do procedimento 1 foram cortados inicialmente. Com base nos resultados, foi definido o sentido de corte a ser fixado nos procedimentos posteriores. A Tabela 1 apresenta o procedimento e a Figura 22 representa os sentidos de corte.

Tabela 1- Corpos de prova para análise do efeito da variação no sentido de corte.

Amostra	Sentido de corte	Velocidade (cm/min)	Corrente (A)	Altura (mm)
CP 01	B	19,1	60	4,2
CP 02	A	19,1	60	4,2

Fonte: Próprio autor.

Figura 22- Sentido do corte a plasma (vista superior)



Fonte: Próprio autor.

Todos os corpos de prova posteriores foram cortados no mesmo sentido de corte do corpo de prova CP 1.

Os corpos de prova do procedimento 2 foram cortados aumentando a velocidade de corte para cada um, até que o corte não fosse possível. A Tabela 2 apresenta o procedimento.

Tabela 2- Corpos de prova para análise do efeito da variação da velocidade de corte.

Amostra	Velocidade (cm/min)	Corrente (A)	Altura (mm)
CP 03	16,4	60	4,2
CP 04	21,8	60	4,2
CP 05	24,5	60	4,2
CP 06	29,9	60	4,2
CP 07	40,8	60	4,2
CP 08	57,0	60	4,2
CP 09	78,7	60	4,2
CP 09 – R	78,7	60	4,2

Fonte: Próprio autor

Para o primeiro corpo de prova do procedimento 3, foi-se reduzido em aproximadamente 20% o valor de corrente e de velocidade utilizado para o corpo de prova 6 do procedimento 2, com o intuito de avaliar se o corte continuaria sendo executado com a mesma eficiência em valores de corrente e velocidade mais baixas. Após esta verificação, aumentou-se apenas a velocidade de corte e manteve-se a corrente de 48 Amperes. A Tabela 3 apresenta o procedimento.

Tabela 3- Corpos de prova para análise do efeito da variação da velocidade de corte a uma corrente de 48 amperes.

Amostra	Velocidade (cm/min)	Corrente (A)	Altura (mm)
CP 10	24,5	48	4,2
CP 11	29,9	48	4,2
CP 12	35,4	48	4,2

Fonte: Próprio autor.

No procedimento 4, os corpos de prova foram cortados utilizando os parâmetros de corrente e velocidade do corpo de prova 12 do procedimento 3, porém reduzindo a altura da tocha. A Tabela 4 apresenta o procedimento.

Tabela 4- Corpos de prova para análise da influência da diminuição da altura da tocha.

Amostra	Velocidade (cm/min)	Corrente (A)	Altura (mm)
CP 13	35,4	48	2,8
CP 14	35,4	48	1,4

Fonte: Próprio autor.

No procedimento 5, os corpos de prova foram testados utilizando os parâmetros do corpo de prova 10 do procedimento 3, porém aumentando a altura da tocha. A Tabela 5 apresenta o procedimento.

Tabela 5- Corpos de prova para análise da influência do aumento da altura da tocha, utilizando parâmetros em que o corte se realiza.

Amostra	Velocidade (cm/min)	Corrente (A)	Altura (mm)
CP 15	24.5	48	7
CP 16	-	-	8,4

Fonte: Próprio autor.

4.4.Caracterização dos corpos de prova

Foram selecionados para análise de sua microestrutura e macroestrutura, os corpos de prova que sofreram o corte.

Para a análise de sua macrografia, foram seguidos os mesmos procedimentos realizados no item 4.4 para preparação da superfície da amostra do material. Porém, o Nital utilizado no ataque foi o de concentração 5%.

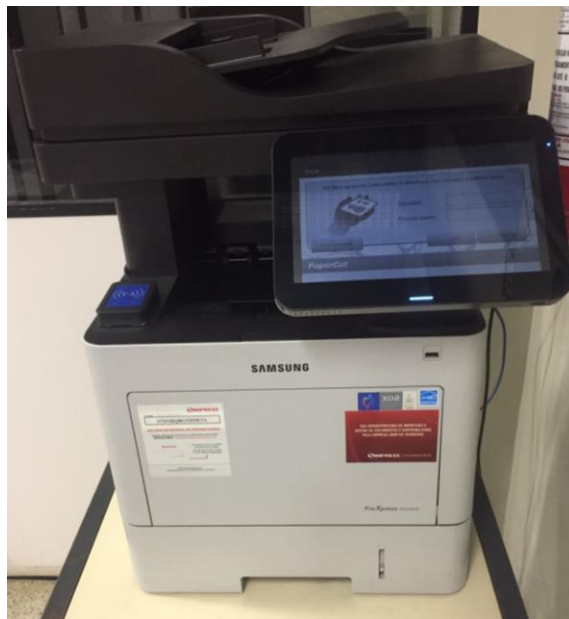
Após a preparação, as imagens de macrografia das amostras foram capturadas por um scanner da Samsung, apresentado na Figura 23.

Após a realização das macrografias das amostras selecionadas, com a imagem obtida foi realizada a medição da largura da ZTA de cada amostra utilizando o software AUTOCAD.

A micrografia foi obtida por meio do lixamento da amostra, na lixa de 600 mesh, após a macrografia. Seguido pelo polimento nos panos de 9 μm e 3 μm , respectivamente. E um

ataque utilizando Nital com concentração de 3%. Utilizando o microscópio modelo IM713 da empresa Kontrol, anteriormente citado, as análises de micrografia foram realizadas.

Figura 23- Scanner Samsung



Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados da caracterização do metal base

A Tabela 6 apresenta a composição química obtida do aço utilizado nos procedimentos.

Tabela 6- Resultado análise química do material dos corpos de prova

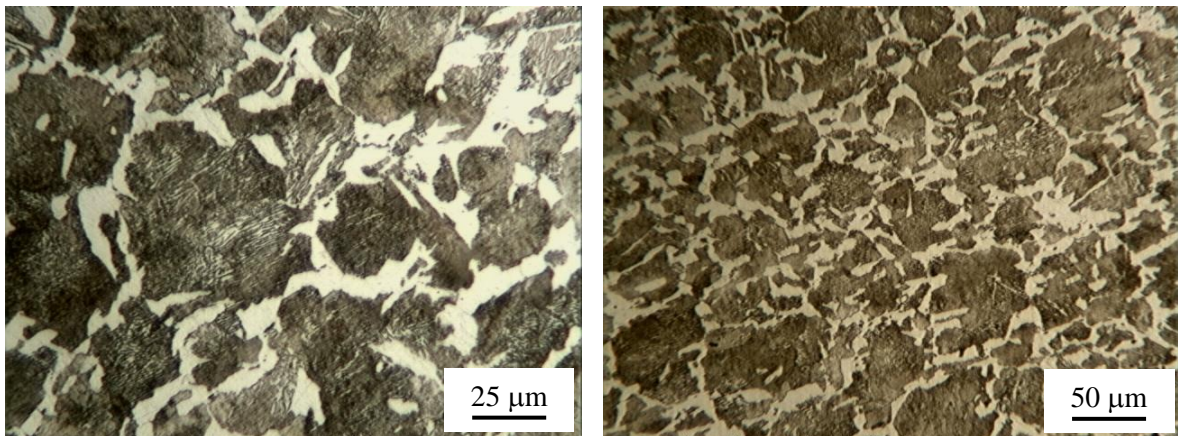
Elemento	1º medição (%)	2º medição (%)	3º medição (%)	Média (%)
Fe	98,50	98,40	98,50	98,50
C	0,42	0,46	0,47	0,45
Mn	0,62	0,62	0,62	0,62
Si	0,24	0,24	0,21	0,23
Cr	0,05	0,05	0,05	0,05
Cu	0,06	0,05	0,05	0,05
Ni	0,03	0,03	0,03	0,03
Al	0,02	0,02	0,02	0,02
P	0,02	0,02	0,02	0,02
S	0,02	0,02	0,02	0,02
Sn	0,007	0,008	0,008	0,008

Fonte: Próprio autor

A análise química mostra que o aço utilizado foi um aço ABNT 1045, pois segundo a NBR 87 (2000) que define as composições químicas dos aços, o aço ABNT 1045 deve

possuir teor de Carbono entre 0,43% e 0,45% e teor de Manganês entre 0,60% e 0,90%. A Figura 24, apresenta a micrografia do metal base utilizado nos processos.

Figura 24- Micrografia do Metal Base do material utilizado



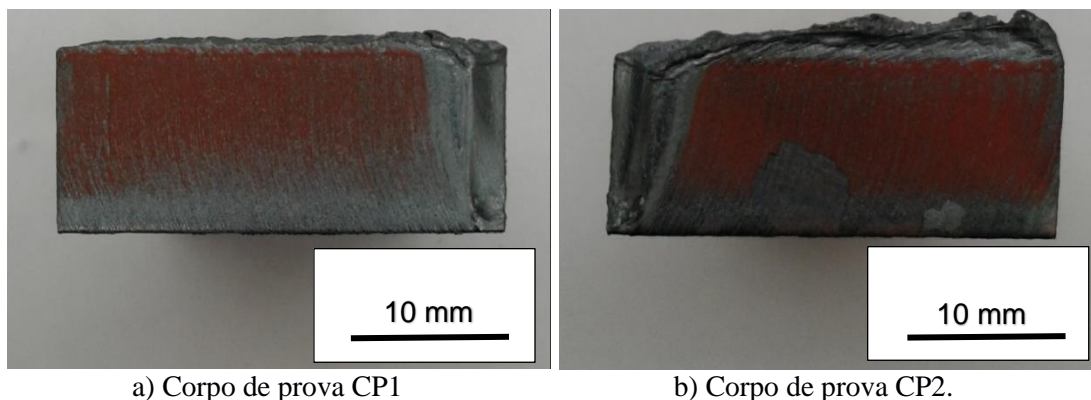
Fonte: Próprio autor.

Observa-se nas imagens a presença de perlita e ferrita pró-eutetóide nos contornos de grão. O que é explicado pela própria composição do aço, que possui concentração de carbono inferior à do ponto eutetóide (0,76% de Carbono).

5.2.Resultados da variação dos parâmetros na qualidade do corte

A Figura 25 apresenta as superfícies cortadas dos corpos de prova do procedimento 1, CP1 e CP2. Onde, entre eles, mantiveram-se todos os parâmetros, variando somente a direção de corte para avaliar se essa variável causaria diferenças significativas no processo.

Figura 25- Superfície cortada dos corpos de prova do procedimento 1



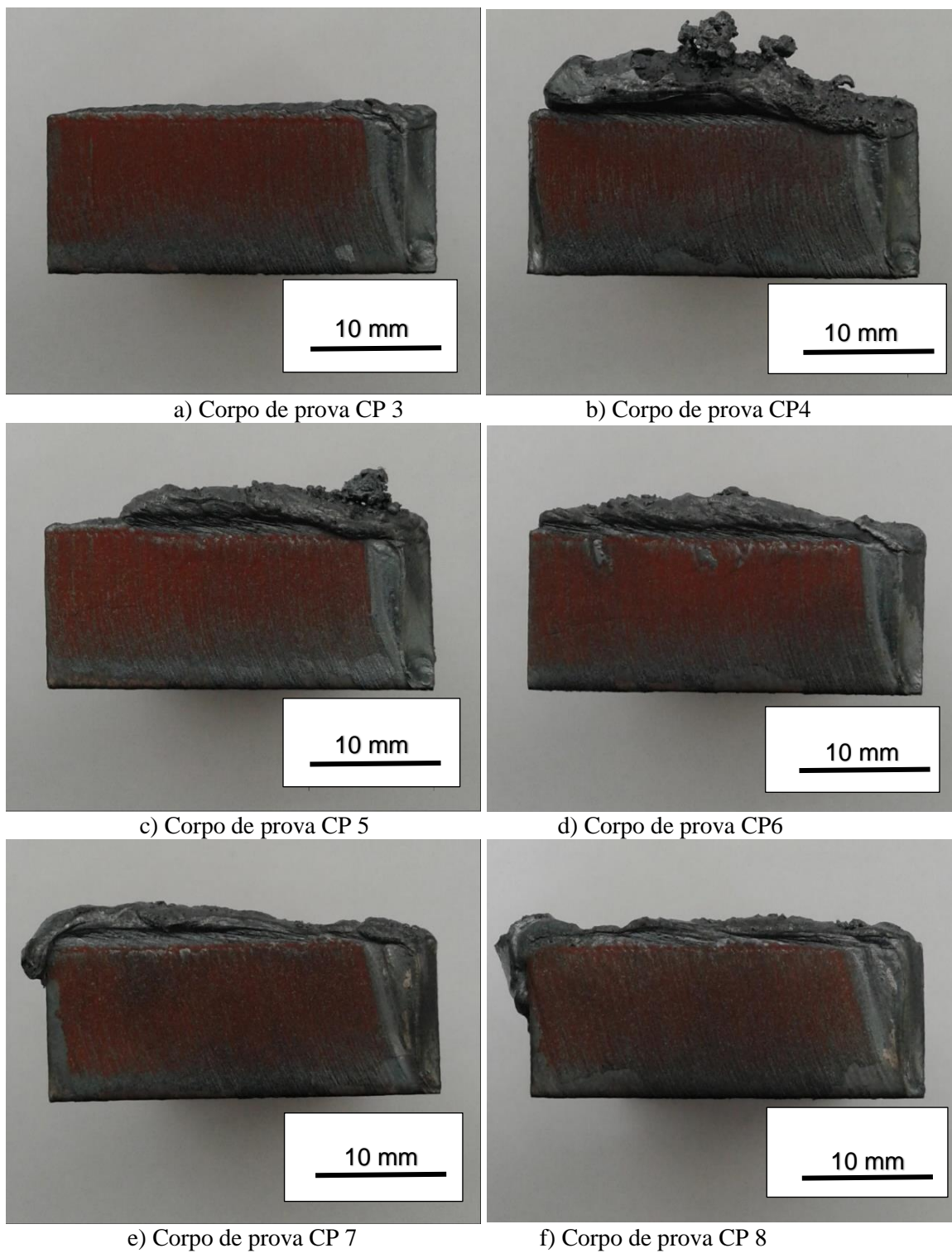
Fonte: Próprio autor

Pela análise das superfícies cortadas não se pôde observar mudanças significativas na qualidade do corte. O que indica que a direção não exerce influência sobre ele.

A Figura 26 apresenta as superfícies cortadas dos corpos de prova do procedimento 2. Foram eles: CP3, CP4, CP5, CP6, CP7 e CP8. O corpo de prova CP 9, não sofreu o corte. Entre eles, verificou-se o efeito da variação da velocidade de corte.

Avaliando as superfícies cortadas do procedimento 2, pode-se verificar a presença de sulcos ao longo de toda sua extensão. Percebe-se também que há uma diferença de inclinação desses sulcos entre os corpos de prova, sendo que, os corpos de prova que foram cortados com velocidades de corte mais altas CP7 e CP8, representados respectivamente nas letras e) e f), possuem sulcos com inclinação mais acentuada. De acordo com a literatura, quando ocorre o aumento da velocidade acima de um certo limite, o plasma não mantém a mesma estabilidade, não sendo capaz de acompanhar a tocha, gerando assim as chamadas linhas de arraste. Influenciando, portanto, na rugosidade da superfície cortada.

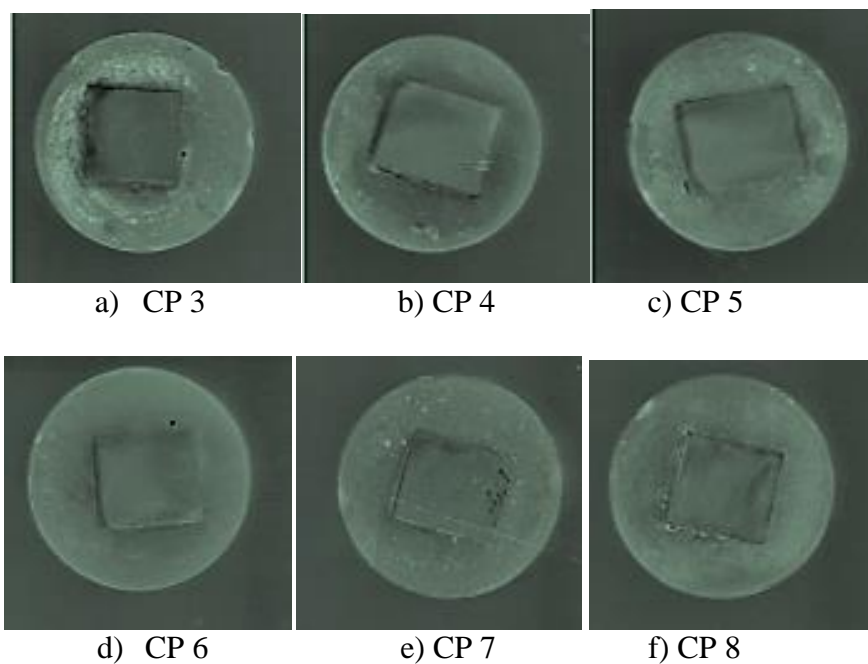
Figura 26- Superfície cortada dos corpos de prova do procedimento 2.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 27 apresenta a macrografia de uma sessão transversal desses corpos de prova do procedimento 2, incluindo a sua zona termicamente afetada (ZTA).

Figura 27- Macrografia dos corpos de prova do segundo procedimento



Fonte: Próprio autor.

Notou-se pela macrografia que os corpos de prova apresentam ZTA com diferentes tamanhos. Os valores do tamanho aproximado da ZTA de cada corpo de prova, seguem na Tabela 7.

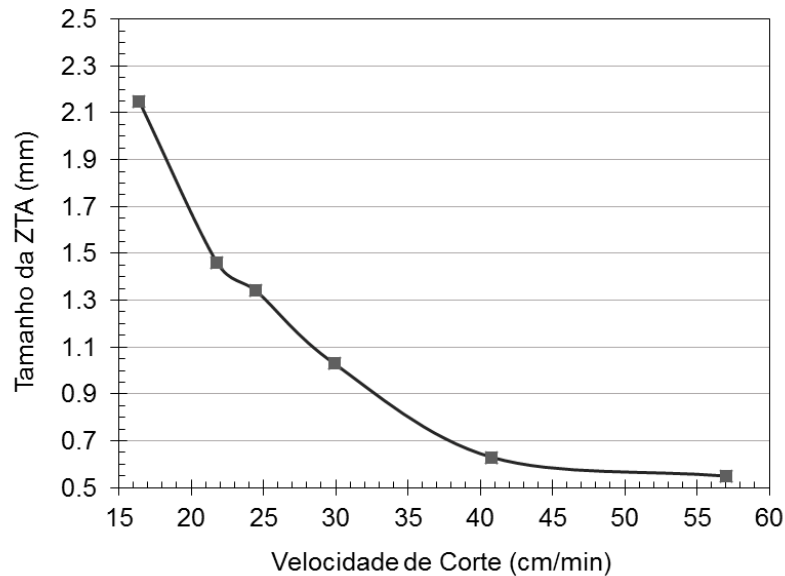
Tabela 7- Dados obtidos do tamanho da ZTA

Corpo de Prova	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
Tamanho ZTA	2,15	1,46	1,34	1,03	0,63	0,55

Fonte: Próprio autor

A Figura 28 apresenta o gráfico do tamanho das ZTAs em função da velocidade usada para cortar cada corpo de prova.

Figura 28- Gráfico velocidade de corte X tamanho da ZTA do corpo de prova (Procedimento 1)

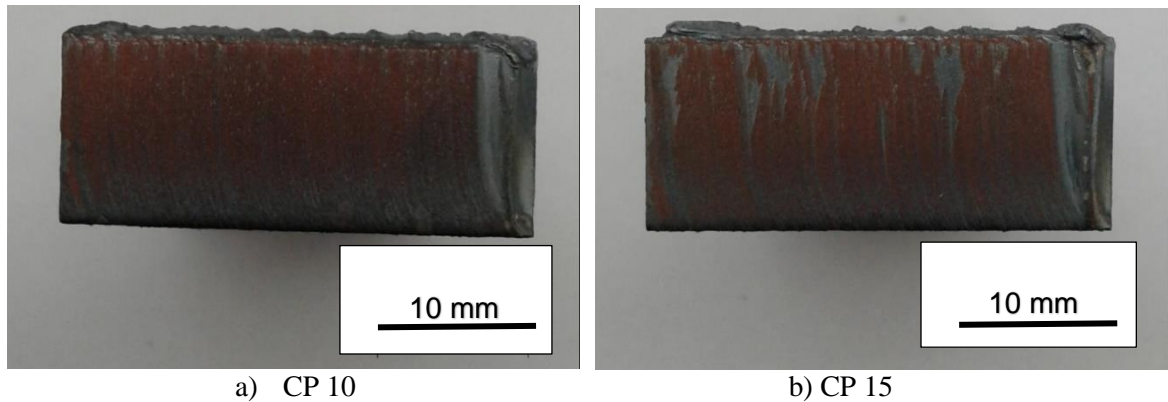


Fonte: Próprio autor.

É possível verificar a diminuição do tamanho da ZTA em função do aumento da velocidade de corte. Isso pode ser explicado, de acordo com a literatura, pelo fato de que cortes realizados em velocidades mais altas têm uma menor quantidade de calor transferido para peça (menor entrada de calor) o que resulta em ZTAs menores se comparados a cortes realizados em velocidades mais baixas onde a entrada de calor é maior.

A Figura 29 “a” representa a superfície do corpo de prova CP 10, único corpo de prova do procedimento 3 que o corte pôde ser realizado utilizando os parâmetros propostos nesse procedimento. A Figura 29 “b” representa a superfície do corpo de prova CP 15, o único corpo de prova do procedimento 5 que o corte pôde ser realizado utilizando os parâmetros propostos nesse procedimento.

Figura 29- Superfície cortada dos corpos de prova CP 10 e CP 15

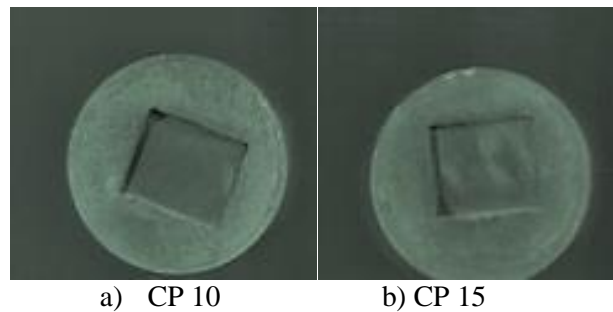


Fonte: Próprio autor.

Avaliando a imagem, nota-se que há linhas de arraste em ambos os corpos de prova e que estas linhas apresentam inclinações muito próximas. Entretanto, as linhas do corpo de prova CP 15 são mais acentuadas e apresentam curvaturas. Lembrando que ambos os corpos de prova apresentam mesmos valores de corrente, velocidade de corte, sentido de corte e distância da tocha ao suporte de corte, variando entre eles somente a altura da tocha (CP 10: 4,2 mm e CP 15: 7 mm). O que explica, segundo a bibliografia, a característica diferente das linhas do CP 15, que afirma que em maiores alturas da tocha o arco de plasma é mais longo e curvo levando a formação de linhas de arraste acentuadas e curvaturas na superfície.

Os parâmetros do corpo de prova CP 10, foram definidos a fim de compara-lo com o corpo de prova CP 6. Onde, os valores de corrente e velocidade do CP 10 seriam 20% menores que os valores do CP 6. Para assim, verificar se o corte continuaria a ocorrer. O que se observou foi que o corte ocorreu. Sendo explicado pelo fato de que apesar da redução do calor transferido à peça com a diminuição da corrente, esta foi compensada com o aumento do calor transferido a mesma ao reduzir a velocidade. Já em relação a característica dos cortes observou-se que o CP 6 possui linhas de arraste mais inclinadas, explicadas pela maior velocidade de corte utilizada. A Figura 30 representa a macrografia desses corpos de prova CP 10 e CP 15.

Figura 30- Macrografia dos corpos de prova CP 10 (largura da ZTA = 1,21 mm) e CP 15 (largura da ZTA = 1,16 mm)



Fonte: Próprio autor.

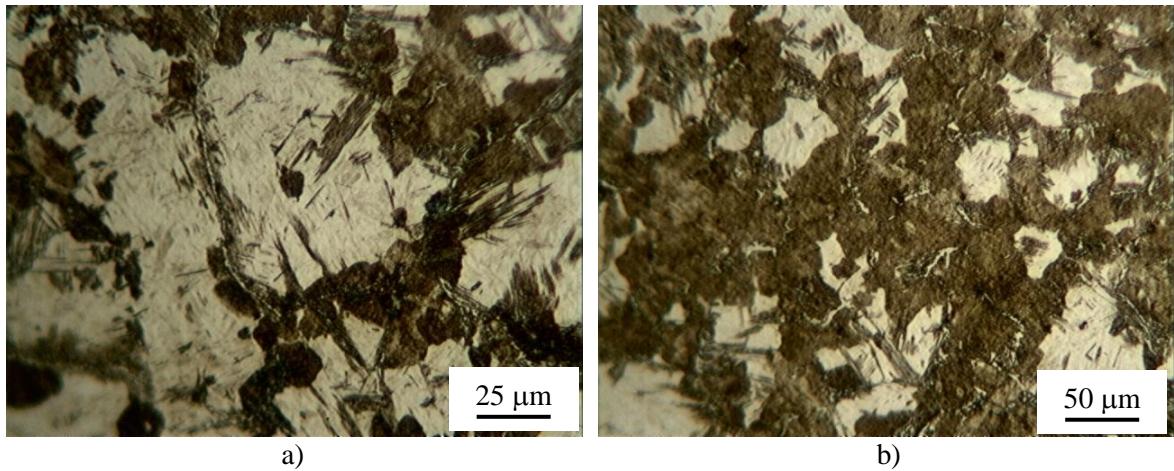
O procedimento 5, onde efetuou-se o corte do CP 15, baseou-se nos parâmetros de corrente e velocidade usados para o corte do corpo de prova CP 10 do procedimento 3. Porém foi-se utilizado uma maior altura da tocha, com o intuito de verificar a partir de qual altura o corte poderia não ocorrer. O fato de o corte do CP 15 ter sido completado com sucesso, juntamente com o fato de que a ZTA de ambos os corpos de prova possuem valores muito próximos, permitiu inferir que a altura da tocha não influencia diretamente na ocorrência corte e nem no calor transferido à peça. O corpo CP 16 desse procedimento, não realizou o corte, o que pode se concluir baseando-se na Revisão Bibliográfica que o arco elétrico de plasma para determinadas alturas da tocha não pode ser estabelecido.

O procedimento 4 foi realizado com o intuito de verificar se os cortes que não ocorreram no procedimento 3, CP 11 e CP 12, devido à combinação não efetiva da corrente e da velocidade ocorreriam ao diminuir a altura da tocha, ou seja, ao aproximar a tocha da peça. O que se verificou foi a não ocorrência dos cortes mesmo com essa aproximação. Pode-se reforçar, por meio deste resultado, que a altura da tocha não influencia diretamente na ocorrência corte e nem no calor transferido à peça.

5.3.Resultado da micrografia da Zona Termicamente Afetada

As microestruturas das amostras foram analisadas e foi notado a formação de uma mesma estrutura na ZTA de todos as amostras. A Figura 31, representa a micrografia do corpo de prova CP 5.

Figura 31- Micrografia da ZTA do corpo de prova CP 5.



Fonte: Próprio autor.

É possível observar na microestrutura da amostra a formação de ferrita pro-eutetóide e martensita. O que segundo a bibliografia pode ser explicado pela composição do aço e pelo tipo de resfriamento que ele sofreu. Nos procedimentos realizados, os corpos de prova foram cortados encaixados em um suporte de aço, o que acelera o processo de resfriamento da peça, uma vez que, o mecanismo de transferência de calor que passa a prevalecer é o de condução (mais eficiente dos três existente para o aço). O resfriamento mais rápido, combinado à composição do aço AISI 1045 contribuiu para a formação de martensita. A ferrita presente se explica pela própria composição do aço, que possui concentração de carbono inferior à do ponto eutetóide (0,76% de Carbono).

6. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos e as discussões entorno dos mesmos, conclui-se que:

- O sentido de corte não influencia nos resultados do processo. O corte ocorreu e o tamanho da ZTA formada, a microestrutura e a superfície cortada não foram alteradas, ao variar somente esse parâmetro.
- A velocidade de corte é um parâmetro que influencia não só na ZTA da peça cortada, mas também na superfície cortada e na formação de rebarba. Velocidades mais altas geram menos rebarbas e linhas de arraste com inclinações mais intensas na superfície, pois quando a tocha se move mais rapidamente o plasma não consegue manter a sua estabilidade, e para se produzir superfícies mais regulares, é necessário a estabilidade do arco.
- Quanto menor a velocidade de corte, maior a ZTA formada, uma vez que, a quantidade de calor que entra na peça no processo será maior.
- A corrente de corte, é um parâmetro que influencia na ZTA formada e a depender de seu valor para determinadas espessuras de chapa, pode não efetuar o corte. Podendo ser compensada com uma diminuição da velocidade de corte.
- A altura da tocha influencia a superfície cortada, uma vez que, alturas maiores formam um arco mais alongado, curvo e mais instável.
- A altura da tocha não influencia na quantidade de energia que entra na peça, logo, não influenciando na ZTA da peça e nem na ocorrência, ou não, do corte.
- Em processos automatizados, portanto, pode-se estabelecer valores de altura de tocha mais altos, para corte de superfícies com ondulações, de maneira que esta altura não chegue a influenciar significativamente na qualidade superficial da peça.
- O resfriamento mais rápido do aço AISI 1045 nesse processo, leva a formação de martensita em algumas regiões

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COLPAERT, H. (2008). Metalografia dos produtos siderurgicos (4ª ed.). São Paulo: Blucher.
- MARQUES, P. V. (2002). Tecnologia da Soldagem.
- MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., & BRACARENSE, A. Q. (2011). Soldagem Fundamentos e Tecnologia (2ª ed.). Belo Horizonte: UFMG.
- WAINER, E., BRANDI, S. D., & MELLO, F. (2010). Soldagem Processos e Metalurgia. São Paulo: Blucher
- RAMALHO, J. P. (2008). Oxicorte: estudo da transferencia de calor e modelamento por redes neurais artificiais de variáveis do processo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalurgica e de Materiais, São Paulo.
- NEMCHINSKY, V., & SEVERANCE, S. (2006). JOURNAL OF PHYSICS. What we know and what we do not know about plasma arc cutting.
- LIMA, E. (2006). Corte a Plama. Revista Soldagem ABS(Ano 2 número 9).
- Hyperterm. (2015). Manual do operador 806657 revisão 3.
- SALONITES, K., VATOUSIANOS, S. (2012). Science Direct. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process.
- CHAMARTHIA, S., REDDYB, N., ELIPEYC, M., REDDYD, D. (2013). Science Direct. Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material.
- SANDA, M., COTEANA, M., MUNTEANU, A. (2010). International Journal of Modern Manufacturing Technologies. Experimental results concerning the Variation of Surface Roughness parameter (Ra) at Plasma arc cutting of a stainless steel workpiece.
- BINI, R., COLOSIMO, B.M., KUTLU, A.E., MONNO, M. (2017). Science Direct. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200 A high tolerance plasma arc cutting system.

ANGELI, Luís Leonardo. Comparação de características do processo de corte a plasma com o oxicorte. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)- Escola de Engenharia de Piracicaba.

Portal Metálica. O processo de corte de metais por plasma. 2011. Disponível em: <<http://www.metlica.com.br/o-processo-de-corte-de-metais-por-plasma>>. Acesso em 24 de junho de 2017.