

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ESTUDOS EM CORTE POR PLASMA USANDO
DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Fabio Norikazu Kashiwagi

Itajubá, abril de 2016.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Fabio Norikazu Kashiwagi

**ESTUDOS EM CORTE POR PLASMA USANDO
DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**

Área de Concentração: Qualidade e Produtos

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Co-orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos Costa

Itajubá, abril de 2016

DEDICATÓRIA

À minha querida esposa Rosa e aos meus
filhos Gustavo e Sara.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Pedro Paulo Balestrassi pela orientação, incentivo e amizade que resultaram deste trabalho.

Ao professor Sebastião Carlos Costa pelo apoio em solucionar problemas decorrentes deste trabalho.

Aos meus pais, irmãos e familiares que sempre me incentivaram e apoiaram as minhas decisões, torcendo pelo meu sucesso.

Aos amigos do programa de Mestrado em Engenharia de Produção que contribuíram direta e indiretamente, mesmo sem perceber.

Aos amigos Erik Bonaldi, Joana Teodoro e Levy Ely pelo inestimável apoio.

Aos professores Carlos Sanches, Carlos Mello, Anderson Paiva, João Turrioni e José Henrique pela colaboração no curso.

Ao professor Gilberto Martha Souza (USP) por ceder o laboratório de confiabilidade para pesquisa.

A CAPES e à UNIFEI pelo apoio financeiro e estrutural à pesquisa brasileira que através do programa "Demanda Social" viabilizaram a realização deste trabalho.

A Deus que sempre me ilumina no momento certo.

EPÍGRAFE

"Aventure-se, pois, da mais insignificante pista
surgiu toda riqueza que o homem já
conheceu".

John Masefield

RESUMO

O presente trabalho utilizou a técnica de multivariáveis para otimização do processo através da função desejabilidade (*desirability*), método que permite avaliar um conjunto de dados simultaneamente para determinar as condições mais desejáveis para as propriedades estudadas no processo de corte por plasma a ar comprimido com controle manual. O processo de corte por plasma pertence a uma parte de cortes térmicos e aplica-se em diferentes campos da engenharia mecânica, estaleiros e tecnologia de processo. Os requisitos necessários para um corte desejado são: assegurar a qualidade das peças por meio de geometria de corte, ter uma pequena zona termicamente afetada (ZTA) na região do corte, possuir pequena perda de massa e baixa formação de escórias. O objeto deste estudo foi avaliar e aplicar os conhecimentos aos três estudos de caso cujos experimentos foram realizados no laboratório da engenharia mecânica da UNIFEI por Montalvão (1997) e Pereira (2000) utilizando como corpos de prova os aços carbono ABNT 1020 e 1045. Apesar das dificuldades inerentes ao processo, os resultados encontrados pela função desejabilidade neste presente trabalho foram satisfatórios. De forma geral, percebeu-se que as respostas dos experimentos é influenciada, principalmente, pelo fator velocidade de corte.

Palavras-chave: corte por plasma a ar comprimido, desejabilidade, delineamento de experimentos

ABSTRACT

This present work has used the multivariate technique for process optimization through function desirability, i.e., method that permit to evaluate database simultaneously to determine the desirable conditions to the explored characteristics in compressed air plasma arc cutting with manual control. The plasma arc cutting belongs a part of thermal cuttings and applies in different fields of mechanical engineering, naval industries and process technology. The requirements for desirable cutting are: to assure the parts quality through cut geometry, to have small heat affected zone (HAZ), to have small mass loss and small dross formation. The objective of this work is to evaluate and apply the knowledge in three study cases whose experiments were done in Mechanical Engineering Laboratories at Itajuba Federal University by Montalvão (1997) and Pereira (2000). The materials used in experiments were carbon steel AISI 1045 and AISI 1020. Although difficulty in process, the results found by desirability in this work were satisfactory. Overall, it is understood that experiments responses is influenced, mainly, cutting speed.

Keywords: Compressed air plasma arc cutting, desirability, design of experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Classificação das pesquisas científicas	5
Figura 2.1: Velocidade de corte do aço carbono	8
Figura 2.2: Geometria da peça.....	11
Figura 2.3: Processo de corte por plasma.....	13
Figura 2.4: Constituição de uma tocha plasma.....	14
Figura 2.5: Corte por plasma com gás dual.....	16
Figura 2.6: Corte por plasma com injeção de água	16
Figura 2.7: Corte por plasma com película de água	17
Figura 2.8: Corte por plasma HTPAC	18
Figura 2.9: Corte por plasma a ar comprimido.....	18
Figura 2.10: Bancada de um processo por corte por plasma.....	19
Figura 2.11: Representação de um corte de metal	20
Figura 2.12: Ângulo de corte.....	21
Figura 2.13: Fluxo do gás do corte por plasma	21
Figura 2.14: Direção do corte visto na transversal horizontal do jato e o metal	22
Figura 2.15: Direção do corte visto na transversal vertical do jato e o metal	22
Figura 2.16: Vista lateral do corte	24
Figura 2.17: Vista de trás do corte.....	24
Figura 2.18: Aplicações do DOE.....	25
Figura 2.19: Modelo geral de um processo ou sistema.....	26
Figura 2.20: Características das principais técnicas de delineamento de experimentos	27
Figura 2.21: Progressão de vários métodos estatísticos	28
Figura 2.22: Tipos de arranjos compostos	31
Figura 2.23: Função Desejabilidade	36
Figura 2.24: Alguns exemplos de formas da função Desejabilidade.....	37
Figura 3.1: Caso 1 Gráfico de Pareto para perda de massa	40
Figura 3.2: Caso 1 Gráfico Normal de Probabilidade para perda de massa.....	41
Figura 3.3: Caso 1 Gráficos de Resíduos para perda de massa	41
Figura 3.4: Caso 1 Gráfico de Pareto para escória	42
Figura 3.5: Caso 1 Gráfico Normal de Probabilidade para escória	43
Figura 3.6: Caso 1 Gráficos de Resíduos para escória.....	43
Figura 3.7: Caso 1 Gráfico de Pareto para acabamento	44

Figura 3.8: Caso 1 Gráfico Normal de Probabilidade para acabamento.....	45
Figura 3.9: Caso 1 Gráficos de Resíduos para o acabamento	45
Figura 3.10: Caso 1 Gráfico para solução global praticável	48
Figura 4.1: Caso 2 Gráfico de Pareto para Orto_d	51
Figura 4.2: Caso 2 Gráfico Normal de Probabilidade para ortogonalidade direita	51
Figura 4.3: Caso 2 Gráficos de Resíduos para Orto_d.....	52
Figura 4.4: Caso 2 Gráfico de Pareto para Orto_e.....	53
Figura 4.5: Caso 2 Gráfico Normal de Probabilidade para ortogonalidade esquerda	53
Figura 4.6: Caso 2 Gráficos de Resíduos para Orto_e.....	54
Figura 4.7: Caso 2 Função Desejabilidade.....	56
Figura 5.1: Caso 3 Gráfico de Pareto para ZTA com aço ABNT 1045	58
Figura 5.2: Caso 3 Gráfico Normal de Probabilidade para ZTA.....	59
Figura 5.3: Caso 3 Gráficos de Resíduos para ZTA	59
Figura 5.4: Caso 3 Dureza nos pontos da ZTA no aço ABNT 1045	60
Figura 5.5: Caso 3 Gráfico de Pareto para Hv médio do aço ABNT 1045.....	61
Figura 5.6: Caso 3 Gráficos de Resíduos para Hv médio do aço ABNT 1045	62
Figura 5.7: Caso 3 Dureza nos pontos da ZTA no aço ABNT 1020	63
Figura 5.8: Caso 3 Gráfico de Pareto para Hv médio do aço ABNT 1020.....	63
Figura 5.9: Caso 3 Gráficos de Resíduos para Hv médio do aço ABNT 1020	64
Figura 5.10: Caso 3 Gráfico de Pareto para força média do aço ABNT 1045	66
Figura 5.11: Caso 3 Gráficos de Resíduos para força média do aço ABNT 1045	66
Figura 5.12: Caso 3 Gráfico de Pareto para força média do aço ABNT 1020.....	67
Figura 5.13: Caso 3 Gráficos de Resíduos para força média do aço ABNT 1020	67
Figura 5.14: Caso 3 Função Desejabilidade na ZTA para o aço ABNT 1045	70
Figura 5.15: Caso 3 Função Desejabilidade na ZTA para o aço ABNT 1020	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Norma ISO 9013 níveis de qualidade de superfície de corte	22
Tabela 2.2: Resumo de CCD	31
Tabela 2.3: Análise de variância.....	32
Tabela 3.1: Composição química aproximada do aço ABNT 1020	38
Tabela 3.2: Caso 1 Respostas	39
Tabela 3.3: Caso 1 Valores de P-value para perda de massa	40
Tabela 3.4: Caso 1 Valores de P-value para escórias	42
Tabela 3.5: Caso 1 Valores de P-value para acabamento superficial	44
Tabela 3.6: Caso 1 Coeficientes estimados	46
Tabela 3.7: Caso 1 ANOVA.....	46
Tabela 3.8: Caso 1 Faixas pré-estabelecidas para solução global	47
Tabela 3.9: Caso 1 Solução global praticável	48
Tabela 3.10: Caso 1 Respostas previstas para solução global praticável.....	48
Tabela 4.1: Composição química aproximada ao aço ABNT 1045	49
Tabela 4.2: Caso 2 Respostas	49
Tabela 4.3: Caso 2 Valores de P-value para ortogonalidade direita.....	50
Tabela 4.4: Caso 2 Valores de P-value para ortogonalidade esquerda	52
Tabela 4.5: Caso 2 coeficientes estimados.....	55
Tabela 4.6: Caso 2 ANOVA.....	55
Tabela 4.7: Caso 2 faixas pré-estabelecidas para solução global	55
Tabela 4.8: Caso 2 Solução global praticável	56
Tabela 4.9: Caso 2 Respostas previstas para solução global praticável.....	56
Tabela 5.1: Caso 3 Medição da ZTA para aço ABNT 1045	57
Tabela 5.2: Caso 3 Valores de P-value para ZTA no aço ABNT 1045	58
Tabela 5.3: Caso 3 Dureza média Hv do aço ABNT 1045 e ABNT 1020	61
Tabela 5.4: Caso 3 Força média para aço ABNT 1045 e ABNT 1020.....	65
Tabela 5.5: Caso 3 faixas pré-estabelecidas para solução global	69
Tabela 5.6: Caso 3 Solução global praticável para aço carbono	69
Tabela 5.7: Caso 3 Respostas previstas para solução global praticável.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI:	American Iron and Steel Institute
ANN:	Redes neurais artificiais
ANOVA:	Análise de variância
CCC:	Arranjo composto circunscrito
CCD:	Arranjo composto central
CCF:	Arranjo composto faceado
CCI:	Arranjo composto inscrito
CNC:	Comando numérico computadorizado
CP:	Corpo de prova
DOE:	Delineamento de experimentos
F:	Fischer
Fr:	Grau de liberdade regressão
Ft:	Grau de liberdade total
HTPAC:	Corte por plasma de alta tolerância
Hv:	Dureza Vickers
I:	Corrente
MRR:	Taxa de material removível
MSR:	Metodologia Superfície de Resposta
OA:	Arranjo ortogonal
Orto_d:	Ortogonalidade direita
Orto_e:	Ortogonalidade esquerda
PAC:	Corte por plasma
PM:	Perda de massa
Q:	Qualidade
R ² :	Coefficiente de determinação
R ² a:	Coefficiente de determinação de ajuste
SAE	Society of Automotive Engineers
SSE:	Soma dos quadrados residuais
SSR:	Soma dos quadrados regressão
SST:	Soma total de quadrados
TWI:	Instituto de Soldagem Londres
Vc:	Velocidade de corte
ZTA:	Zona termicamente afetada

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Limitações	4
1.4	Método de pesquisa	5
1.5	Estrutura do trabalho	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Corte por plasma	7
2.1.1	Corte por plasma convencional	12
2.2	Fenômenos limitantes do corte por plasma	14
2.2.1	Erosão do catodo	14
2.2.2	Arco duplo	14
2.3	Variantes de corte por plasma	15
2.3.1	Corte por plasma com gás dual	15
2.3.2	Corte por plasma com injeção de água	16
2.3.3	Corte por plasma com película de água	17
2.3.4	Corte por plasma de alta tolerância	17
2.3.5	Corte por plasma a ar comprimido	18
2.4	Requisitos de corte	20
2.4.1	Qualidade de corte	20
2.4.2	Ortogonalidade de corte	20
2.4.3	Inclinação do corte	23
2.5	Delineamento de experimentos (DOE)	24
2.5.1	Notação do delineamento de experimento	26
2.5.2	Escolha do projeto e experimento	27
2.5.3	Análise estatística de dados	27
3	ESTUDO DE CASO Nº 1	38
3.1	Análise dos resultados do estudo de caso nº 1	38
3.1.1	Análise gráfica do estudo de caso nº 1	39

3.1.2	Modelagem matemática do estudo de caso nº 1	46
3.2	Desejabilidade do estudo de caso nº 1	47
4	ESTUDO DE CASO Nº 2	49
4.1	Análise gráfica do estudo de caso nº 2	50
4.1.1	Ortogonalidade direita do estudo de caso nº 2	50
4.1.2	Ortogonalidade esquerda do estudo de caso nº 2	52
4.2	Modelagem matemática do estudo de caso nº 2.....	54
4.3	Desejabilidade do estudo de caso nº 2.....	55
5	ESTUDO DE CASO Nº 3	57
5.1	Análises da ZTA.....	57
5.2	Análises da dureza na ZTA.....	60
5.3	Análises da força na ZTA	64
5.4	Desejabilidade do estudo de caso nº 3.....	68
6	CONCLUSÃO	71
6.1	Conclusões gerais	71
6.2	Contribuições para estudos futuros	72
6.3	Sugestões para estudos futuros.....	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	ANEXOS.....	78
	ANEXO I - Força de corte na operação de usinagem.....	78
	ANEXO II - Dinamômetro.....	83
	ANEXO III - Dados do estudo de caso Nº1	92
	ANEXO IV - Dados do estudo de caso Nº 2.....	96
	ANEXO V - Dados do estudo de caso Nº 3	99
	ANEXO VI - Catálogo Plasmarc C-70 White Martins	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O mercado competitivo no segmento de manufatura exige que os sistemas de produção sejam mais flexível, mais adaptáveis, mais produtivos, com menor custo, menor prazo de produção e com mais qualidade (LAYER, KARWOWSKI e FURR, 2009).

Segundo Gomes (2010), os processos de fabricação (corte, usinagem, forjamento, soldagem, fundição, trefilação, extrusão, laminação etc.) sempre se caracterizaram como elementos importantes dentro de um sistema produtivo, sendo responsáveis por boa parte das operações de transformação e agregação de valor dos bens produzidos. O processo de corte tem uma participação significativa no processo de fabricação, pois, todos os demais processos dependem da sua execução inicial.

Asiabanpour *et al.* (2009) afirma que os avanços recentes na tecnologia de manufatura têm encorajados os fabricantes a desenvolver peças mais complexas em menor tempo e de melhor qualidade. Tecnologias de corte a laser, por jato de água e por plasma são algumas tecnologias bem estabelecidas em manufatura.

Conforme Cícero *et al.*(2016), os produtos de aciarias provenientes da laminação são disponibilizadas de acordo com as geometrias padronizadas (por exemplo chapas) e necessitam ser modificadas para obter a geometria final do componente estrutural específico. Algumas das principais alternativas usadas pelas indústrias se refere aos processos de cortes térmicos que inclui o oxicorte, o corte por plasma e o corte a laser.

Cícero *et al.*(2016) indica que a diferença fundamental entre esses processos de cortes térmicos é a metodologia aplicada para fundir o metal. O oxicorte utiliza uma tocha para aquecer o metal até a sua temperatura de fulgor. Então, um fluxo de oxigênio é apontado no metal, queimando-o no interior do óxido metálico que flui para fora da largura de corte como escória. No corte por plasma, um gás inerte é assoprado a alta temperatura para fora do bocal e, simultaneamente, um arco elétrico é formado através do gás originado do bocal a superfície a ser cortada, girando alguns dos gases para o plasma (quarto estado da matéria). O plasma é quente suficiente para fundir o material a ser cortada e move com rapidez para assoprar o metal fundido. O corte a laser trabalha por direcionar a saída de um laser de alta potência no material a ser cortada. Dessa forma, o material se funde, queima, vaporiza ou é assoprada por um jato de gás, deixando a borda com alta qualidade na superfície final.

Lima (2009) indica que o corte por plasma ocupa uma área de aplicação com vantagens técnicas e econômicas nas espessuras intermediárias de peças entre 6 mm a 40 mm. Para peças em aço carbono, com espessura acima de 40 mm, o processo mais recomendado é o oxicorte por ter um custo inicial e operacional baixos. Para peças abaixo de 6 mm, recomenda-se o corte a laser com requisito de ângulo reto.

Já Radovanovic e Madic (2011) afirmam que o corte por plasma pode ser utilizado para chapas de até 180 mm de espessura.

Krajcarz (2014) comparou os métodos de corte por jato de água, laser e por plasma classificando-os em 14 critérios. Conforme os critérios, o processo de corte por plasma foi classificado e mostrado em () por: velocidade (rápida) , espessura do material (médio e grosso), tamanho do material (grande), formas (simples), materiais adequados para união (metais e materiais condutivos), materiais cobertos com ferrugem (médio), compósitos (não), dureza do material (sim), deformação térmica (sim, área maior), emissão de vapores tóxicos (sim), corte multi camada (impossível), precisão do corte (boa), formação de rebarbas (sim) e custo operacional (baixo). Segundo o autor, a vantagem competitiva do corte por plasma foram no custo operacional, na velocidade e na dureza do material. Como vantagem intermediária foram a precisão do corte e ser apropriados para cortar materiais de espessura média e grossa.

Os metais comumente mais comercializados e utilizados nas indústrias são: o alumínio, o latão, aços carbono, ferro fundido, ligas de cobre, cobre, materiais com elevado teor de níquel, magnésio, aço macio, ligas de níquel e aço inox.

Dentre os materiais, destaca-se o aço carbono que é a composição da liga que confere ao aço o seu nível de resistência mecânica. Originado do ferro gusa, primeira etapa de fabricação do aço, o aço carbono é o produto da adição ou supressão dos elementos de liga para determinar as grandes famílias de aço, dos mais rígidos aos mais estampáveis. O Carbono é o principal elemento endurecedor em relação ao ferro. Outros elementos, como o manganês, o silício e o fósforo participam igualmente do ajuste do nível de resistência. A classificação do aço varia de acordo com a quantidade de Carbono: baixo carbono possui até 0,30% do elemento, médio carbono apresenta de 0,30 a 0,60% e o alto teor de carbono possui de 0,60 a 1,00%. Aços de baixo carbono possuem baixa resistência e dureza e alta tenacidade e ductibilidade facilitando a usinagem e soldagem e possui baixo custo de produção. Sua aplicação destaca-se em chapas automotivas, perfis estruturais, fabricação de tubos, construção civil, pontes e latas de folhas de flandres. Aços de médio carbono possuem maior resistência e dureza e menor tenacidade e ductibilidade do que o baixo carbono. Neste

patamar de carbono pode receber tratamento térmico de têmpera e revenimento. As aplicações destacam-se em rodas e equipamentos ferroviários, engrenagens, virabrequins e peças de máquinas. Aços de alto carbono possuem a maior resistência e dureza e a menor ductibilidade entre aços carbono. As aplicações destacam-se em talhadeiras, folhas de serrote, martelo e facas (INFOMET, 2016).

Vários trabalhos utilizam o delineamento de experimentos no processo de corte por plasma para metais.

O trabalho de Chamarthi *et al.* (2013) realizou experimento com sistema de corte por plasma de alta tolerância (HTPAC) com comando numérico computadorizado (CNC) utilizando o aço estrutural Hardox-400 de espessura 12 mm para verificar as irregularidades nas regiões do corte (micron). Foram utilizados 3 fatores a saber: velocidade de corte (mm/min), fluxo do plasma (l/h) e tensão (V). Foi aplicado o fatorial completo com 2 níveis e para reduzir os esforços experimentais foram aplicadas 2 réplicas totalizando uma combinação de 16 triagens ($2^3 \times 2$). O trabalho concluiu-se que a velocidade de corte aumenta ou diminui inversamente proporcional à espessura da chapa. As irregularidades da região de corte podem ser reduzidas com a redução da velocidade de corte. Eventualmente, mostra-se que uma qualidade muito boa pode ser alcançada variando somente a velocidade do corte, o fluxo do plasma e a tensão de arco. Os valores dos parâmetros otimizados para atingir a menor irregularidade para o material HARDOX-400 de 421 microns foram: 70 l/h para fluxo de plasma, 125 V para tensão e 2100 mm/min para velocidade de corte.

Ferreira *et al.* (2009) realizou experimento com sistema de corte por plasma com comando numérico computadorizado (CNC) modelo ESAB SUPRAREX SXE P 6500 utilizando chapa de aço de alta resistência QstE-380 (equivalente a EN 355MC) de espessura 15 mm para avaliar em termos de inspeção de qualidade: chanfro (mm), seção da escória (mm^2) e tamanho de corte (mm) e em termos condições de produção industrial: velocidade de corte (mm/min) e custo do corte em Euro por unidade de comprimento (€/m). Foram utilizados 4 fatores a saber: corrente (A), tensão (V), pressão do gás de corte (bar) e pressão do gás de proteção (bar). Foi aplicada a metodologia superfície de resposta (MSR) de arranjo de composto central (CCD) com 5 níveis totalizando uma combinação de 26 triagens. O trabalho concluiu-se que para uma melhoria adicional da produtividade ocorre em detrimento do aumento da velocidade de corte e conseqüente redução de custo de corte por unidade de comprimento. Para a inspeção de qualidade não foi mostrado no artigo, porém, estão em conformidade com o padrão da organização. O uso do MSR fez uma mudança de atitude por parte do corpo técnico e operadores de sistemas da organização, no que diz respeito a

sistematização e quantificação dos conhecimentos empíricos que podem ser adquiridos sem alterar as condições de produção.

Isto mostra que o aprimoramento dos processos e a busca por condições otimizadas são elementos importantes para que o processo de corte por plasma em aço carbono apresentem a qualidade requisitada nas características mecânicas e geométricas.

A melhoria continuada dos processos para que atenda o cliente final de forma eficiente fez com que diversas técnicas de otimização fossem desenvolvidas. Desta forma, métodos que permitem otimização simultânea de múltiplas características como Desejabilidade (*Desirability*) são aplicados constantemente. Sendo assim, o uso de ferramentas estatísticas avançadas como Delineamento de Experimentos (DOE) permite uma compreensão ampla e profunda a respeito de um determinado fenômeno contribuindo para a melhoria dos processos produtivos e elevação do patamar de qualidade.

1.2 Objetivos

Diante do exposto no item anterior, neste trabalho foi estudado os experimentos do processo de corte por plasma a ar comprimido nos aços carbono ABNT 1020 e ABNT 1045 desenvolvidos por Montalvão (1997) e Pereira (2000) tendo como objetivos principais:

- Aplicar a otimização simultânea de múltiplas características por meio da função Desejabilidade (*Desirability*) nos experimentos para enriquecer os trabalhos;
- Utilizar o recurso do software MINITAB para verificar os experimentos realizados;

O objetivo secundário foi complementar os resultados obtidos nos estudos de caso de Montalvão (1997) e Pereira (2000) por utilizar a mesma sistemática e recursos do mesmo laboratório de pesquisa e mostrar que os trabalhos estão no mesmo nível aos realizados recentemente ao redor do mundo na área de corte por plasma.

1.3 Limitações

O presente trabalho tem as seguintes limitações:

- O processo estudado foi somente o corte por plasma a ar comprimido. Portanto, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros casos, por exemplo, corte por plasma dual.
- Os materiais empregados foram os aços carbono do tipo ABNT 1020 e ABNT 1045 para corte, o que não permite extrapolação dos resultados para outras especificações de aço carbono e de outros materiais.

1.4 Método de pesquisa

Nas definições de Martins, Mello e Turrioni (2012) mostrada na Figura 1.1, o presente trabalho classifica-se em:

- Natureza: Aplicada;
- Objetivos: Normativa;
- Abordagem: Quantitativa;
- Método: Experimentação

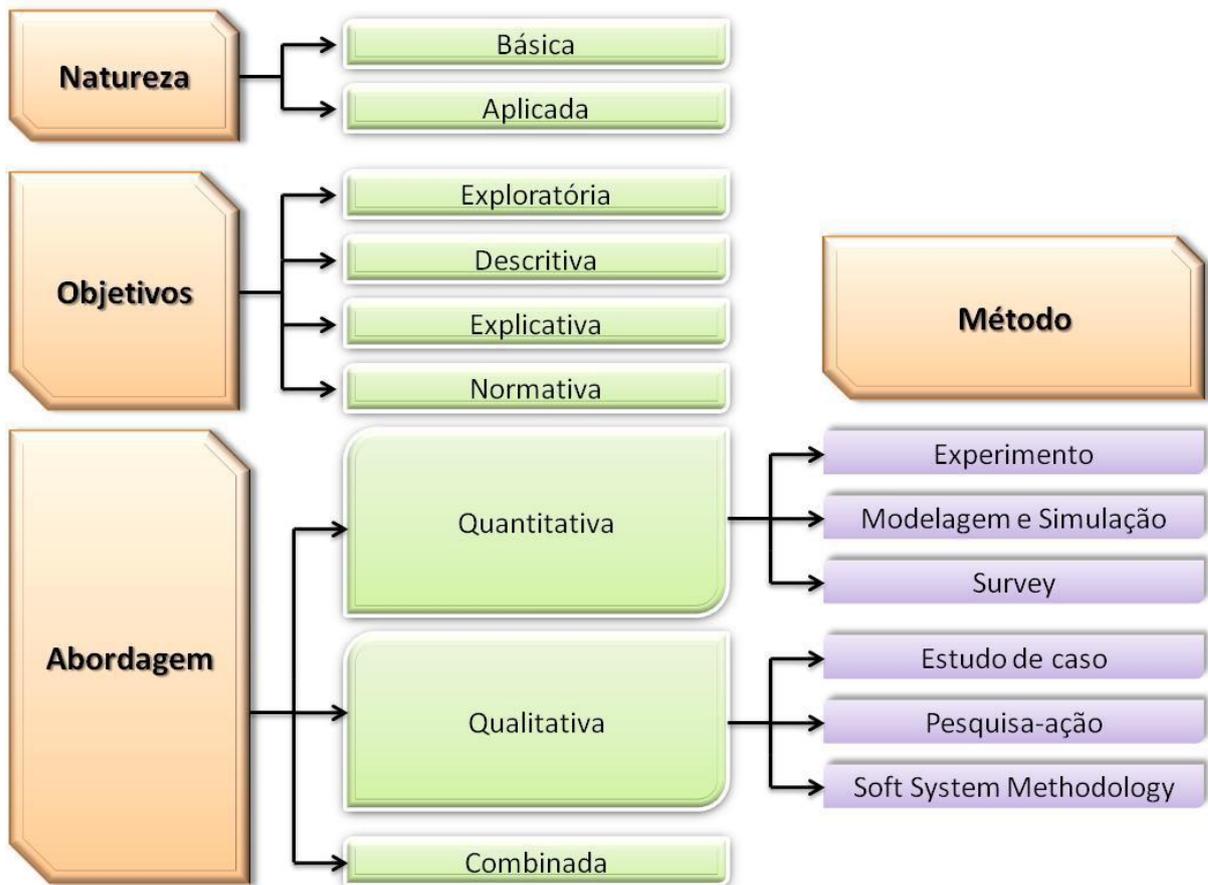


Figura 1.1: Classificação das pesquisas científicas
Fonte: Martins, Mello e Turrioni (2012).

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a pesquisa classifica-se de abordagem quantitativa, axiomática e normativa onde o pesquisador parte diretamente para a solução do modelo matemático, sem conduzir o experimento simulado.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está subdividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma introdução, justificando a escolha do tema, o objetivo que se pretende alcançar e a organização da dissertação.

O capítulo 2 descreve os conceitos essenciais para a fundamentação teórica deste trabalho. São apresentados os conceitos relacionados ao processo de corte por plasma e o delineamento de experimentos.

O capítulo 3 descreve o método experimental e analisa os resultados obtidos por Montalvão (1997). Foi denominado de Estudo de Caso N° 1.

O capítulo 4 descreve a primeira parte do método experimental e analisa os resultados obtidos por Pereira (2000). Foi denominado de Estudo de Caso N° 2.

O capítulo 5 descreve a segunda parte do método experimental e analisa os resultados obtidos por Pereira (2000). Foi denominado de Estudo de Caso N° 3.

O capítulo 6 encerra o trabalho, apresentando a conclusão e contribuição para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

2.1 Corte por plasma

O corte por plasma (PAC) é bem conhecido como uma ferramenta de corte para diferentes metais de alta velocidade e precisão no campo industrial definido por Long, Tanaka e Uesugi (2012).

Segundo Das *et al.* (2014), uma larga faixa de técnicas de cortes térmicos são aplicados em chapas nos diferentes campos de tecnologia de processos. O corte por plasma (PAC) é um processo importante de corte térmico e são usados com sucesso para cortes em aço inoxidável, metais de alta dureza, metais com alto ponto de fusão entre outros.

Gariboldi e Previtali (2004) afirma que entre os processos de corte térmico, o corte por plasma é um dos processos mais difundidos devido a sua alta produtividade e alta flexibilidade a um custo razoável.

De acordo com Nemchinsky e Severance (2006), o processo de corte por plasma ocupa uma área extensa de aplicação comparada ao corte a laser e ao oxicorte.

Os estudos de Ilii e Coteata (2008) concluíram que o corte por plasma prevê uma mistura otimizada de qualidade, produtividade e custo operacional para aço carbono, aço inoxidável e alumínio em função da faixa de espessura e um preço competitivo de equipamento. Morrefzadeh (2011) afirma que os custos do corte por plasma por injeção de água ficaram tipicamente de 1/2 a 1/4 do oxicorte.

Os estudos de Sember *et al.* (2011) indicam que o processo de corte por plasma tem se desenvolvido nos últimos 15 anos com lançamentos de novidades e praticidade que compete com igualdade frente ao corte a laser e o oxicorte.

O processo de corte por plasma (PAC) foi desenvolvido e patenteado por Dr. Robert Gage em 1957 a serviço da Union Carbide para o corte de aço inoxidável e alumínio. O gás plasma utilizado era o nitrogênio ou mistura de hidrogênio com argônio (ILII, COTEATA e MUNTEANU, 2010).

A Figura 2.1 apresenta um comparativo entre o corte por plasma, oxicorte e a laser para o aço carbono com referência à velocidade de corte em função da espessura da chapa. Os números indicados 1, 2 e 3 indicam o processo de corte por plasma aplicando as correntes 65 A, 200 A e 400 A, respectivamente. O número 4 indica o corte a laser com potência de 5 kW. Finalmente, o número 5 indica o processo de oxicorte.

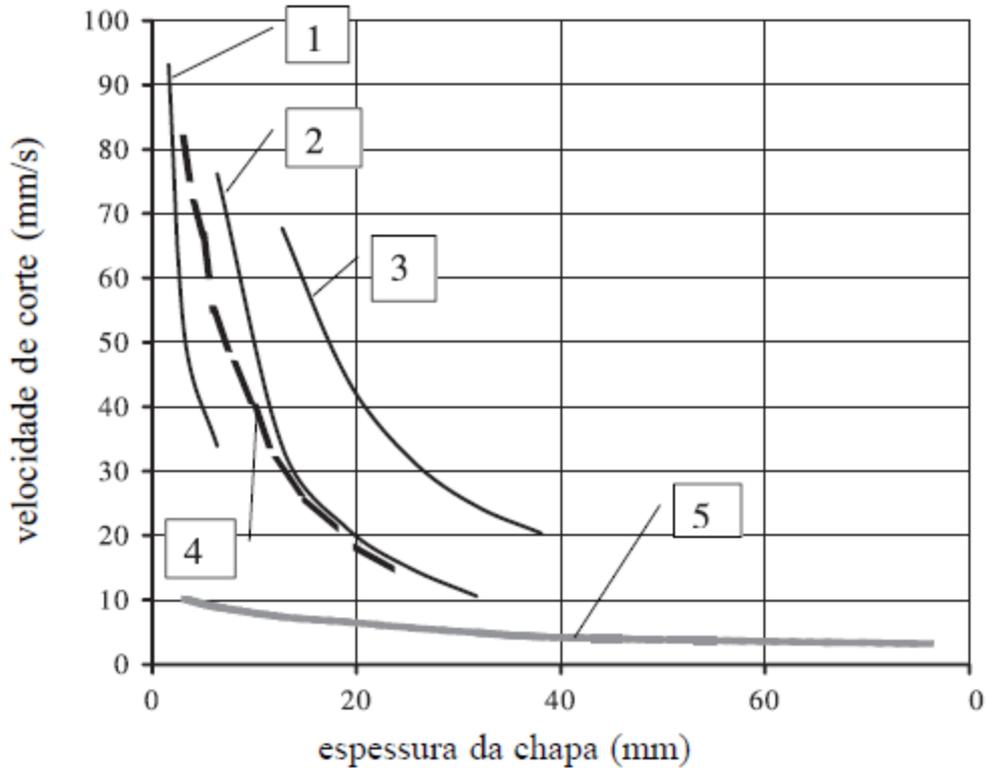


Figura 2.1: Velocidade de corte do aço carbono
 Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006)

Existem vários pesquisadores que estudam o processo de corte por plasma em vários aspectos.

Das *et al.* (2014) tem apresentado uma investigação na otimização e das características do efeito dos parâmetros de usinagem (pressão do gás [bar], corrente de arco [A] e altura da tocha [mm]) na taxa de material removível (MRR) e da rugosidade da superfície do processo de corte por plasma utilizando bloco retangular de espessura 10mm do aço de alto teor de carbono EN31 (equivalente a ABNT 52100) sob o arranjo ortogonal (OA) de Taguchi com análise relacional cinzenta com 3 níveis totalizando 27 triagens (L_{27}). O equipamento utilizado foi o corte por plasma utilizando o comando numérico computadorizado (CNC) do modelo EPP-450 da marca ESAB. O trabalho concluiu-se que a combinação otimizada dos parâmetros de processo foi nível médio para a pressão do gás (6 bar), nível alto da corrente de arco (200 A) e nível alto da altura da tocha (6 mm). Houve uma melhoria da análise relacional cinzenta sobre o parâmetro de processo otimizado em 21%. A taxa de material removível é proporcional à pressão do gás e a rugosidade da superfície é proporcional ao arco de corrente.

Os autores Salonitis e Vatousianos (2012) têm estudado a influência de 4 parâmetros de usinagem (velocidade de corte, corrente de corte, pressão do gás plasma e altura da tocha) no corte por plasma para rugosidade da superfície, zona termicamente afetada (ZTA) e a

conicidade da geometria de corte utilizando o aço macio S235 (equivalente à ABNT 1015) de espessura de 15 mm sob o arranjo ortogonal de Taguchi com 3 níveis totalizando 9 triagens (L_9). O modelo de regressão desenvolvido foi de primeira ordem e interação dos efeitos principais mostrada na Equação (2.1).

$$Y_j = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + a_7x_1x_4 + a_8x_2x_3 + a_9x_2x_4 + a_{10}x_3x_4 \quad (2.1)$$

onde Y_j é o parâmetro de corte (Y_1 : conicidade, Y_2 : zona termicamente afetada, Y_3 : rugosidade da superfície de corte), x_1 é corrente de corte, x_2 é velocidade de corte, x_3 é altura da tocha e x_4 é pressão do gás plasma. O equipamento utilizado foi o corte por plasma utilizando o comando numérico computadorizado (CNC) do modelo KF 2512 - HPR 260 da marca KALTENBACH de tocha de fluxo duplo. O gás plasma primário utilizado foi o oxigênio e o gás de proteção utilizado foi o ar. Concluiu-se que a rugosidade da superfície e conicidade são afetados, principalmente, pela altura da tocha, enquanto a zona termicamente afetada (ZTA) é influenciada pela corrente de corte.

O estudo de Bhuvnesh, Norizaman e Manan (2012) tem otimizado os 4 parâmetros do processo de corte por plasma: pressão do ar, corrente de corte, velocidade de corte e distância do arco com a consideração de características múltiplas de desempenho no qual inclui a taxa de material removível (MRR) e a rugosidade superficial por meio de arranjo ortogonal de Taguchi (L_9) no processo de corte por plasma usando o aço AISI 1017 (equivalente ao aço ABNT 1017) de espessura 6 mm. O equipamento utilizado foi o corte por plasma manual do modelo GENESIS 90 da marca SELCO. Concluiu-se que os valores de rugosidade superficial são inversamente proporcional aos valores de taxa de material removível (MRR). O tamanho da escória determina a qualidade do corte por plasma em termos de rugosidade superficial.

Ozek, Caydas e Unal (2012) utilizou a lógica Fuzzy, uma ferramenta da inteligência artificial, para prever os parâmetros (corrente de arco, velocidade de corte e espessura do material) no processo de corte por plasma (PAC) do aço AISI 4140 (equivalente ao aço ABNT 4140) verificando a rugosidade da superfície. O equipamento empregado neste experimento foi o modelo HP 260A da marca turca AJAN. Este trabalho no primeiro momento utilizou o projeto experimental de fatorial completo com 5 níveis para os parâmetros de velocidade de corte [mm/min] e espessura do material [mm] e 2 níveis para a corrente [A] devido a limitação do equipamento para a resposta rugosidade [μm] totalizando 50 triagens ($5 \times 5 \times 2$). Com a obtenção das respostas do fatorial completo, foram colocadas a regra base Fuzzy em forma linguística para cada resposta e expressões de Fuzzy para as

entradas (corrente de arco, velocidade de corte e espessura do material). Para validação das estimações Fuzzy um estudo experimental adicional de segunda ordem com 27 triagens foi conduzido. Os resultados finais na forma de rugosidade superficial "defuzzilado" foi comparado com a do fatorial completo. Pelo estudo acadêmico concluiu-se que a lógica Fuzzy, um sistema especializado em inteligência artificial, pode ser adotado com sucesso na previsão de rugosidade superficial nesta aplicação. Pela análise de variância (ANOVA) mostrou-se que o fator mais importante na rugosidade superficial foi a velocidade de corte enquanto a corrente de arco foi de baixa importância. Superfícies livres de defeitos foram obtidos através do aumento da velocidade de corte e espessura do material e diminuição da corrente de plasma.

O trabalho de Morrefzadeh (2011) investiga o efeito térmico do corte por plasma que depende do próprio plasma, tipo de gás e campo de temperatura na peça. Para tanto realizou simulações por elementos finitos utilizando parâmetros industriais que foram distribuídas em 3 etapas com as peças principais: modelagem por elementos finitos, estudo e processamento térmico e pós processamento da análise do resultado através do software de engenharia ANSYS®. As técnicas dos elementos finitos foram: modelagem, tipos e propriedades dos elementos finitos para modelos de diferentes peças; definição das propriedades do material; definição dos parâmetros. Concluiu-se que o modo de transferência de calor no campo difere para o aço e para o alumínio entre o gás de proteção e ambiente com temperatura e velocidades. Avaliou-se virtualmente que o corte por plasma por injeção de água consegue cortar todos os metais de 1/8 de polegada (3,18 mm) a 3 polegadas (76,2 mm) de espessura.

O experimento realizado por Chen, Ye e Cox (2009) tem otimizado o processo de corte por plasma nos 4 fatores a saber: tamanho da ponta, taxa de alimentação, tensão e corrente. A resposta foram: tamanho do chanfro e o menor desvio do diâmetro do orifício. O experimento utilizado foi o arranjo ortogonal de Taguchi (L_9) com 3 níveis dentro da metodologia Seis Sigma para uma companhia americana localizada em Des Moines no estado de Iowa. O estudo concluiu-se que utilizando o arranjo de Taguchi, a quantidade de experimentos reduziu de 81 (3^4) para arranjo fatorial completo para 36. Além disso, a combinação otimizada para obter o menor chanfro e o menor desvio do diâmetro do orifício da tocha a partir do experimento de Taguchi foi: pequena para o tamanho da ponta, 93 pol/min (236,2 cm/min) para velocidade de corte, 100V para tensão e 63A para corrente.

Radovanovic e Madic (2011) tem desenvolvido modelo de redes neurais artificiais (ANN) utilizando fatores de corrente de corte, espessura do material (4, 8 e 15 mm) e a velocidade de corte como três neurônios de entrada, para prever a saída dos valores da

rugosidade superficial R_z (μm) no corte por plasma do aço inoxidável, alumínio e níquel. Os autores utilizaram a base de dados do experimento da tese de doutorado do Lazarevic na Universidade de Nis na Sérvia em 2010 na qual realizou 96 triagens. A partir disso, os autores aplicaram a caixa de ferramentas de ANN do MATLAB selecionando aleatoriamente $2/3$ dos dados, isto é, um subconjunto de 67 resultados para treinamento e $1/3$ dos dados, isto é, um subconjunto de 29 resultados para testar o ANN. Concluiu-se por meio de gráfico de contorno do efeito combinado da velocidade de corte e corrente de corte, a rugosidade superficial aumenta com aumento da velocidade de corte e diminui com aumento da corrente. Além disso, observou-se que a espessura de 8 mm alcançou um bom acabamento quando a corrente e a velocidade de corte foram ajustados próximos aos seus níveis alto e baixo respectivamente.

Asiabanpour *et al.* (2009) tem otimizado os 7 fatores corrente de arco, pressão, velocidade de corte, distância da tocha e peça (*standoff*), tipos de ferramentas, lentidão nas curvas, direção do corte em relação às características de desempenho incluindo a planicidade, corte limpo isento de rebarbas e ângulo de chanfro no processo de corte por plasma com comando numérico computadorizado (CNC) do modelo Cut Master™ 101 da marca THERMAL DYNAMICS utilizando chapa de aço inoxidável de 0,25 polegadas de espessura (6,35 mm) de formato misto (junção de quadrado com meio círculo e contendo um orifício no ponto médio do perímetro) mostrada na Figura 2.2 para descobrir os resultados de 18 respostas e a validação nos pontos ótimos dos fatores.

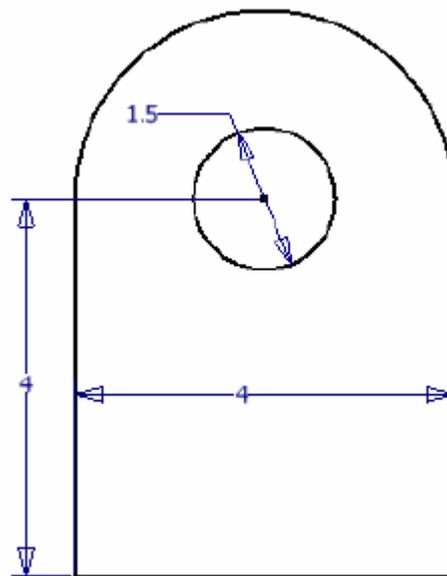


Figura 2.2: Geometria da peça
Fonte: Asiabanpour *et al.* (2009)

Para os 6 fatores haviam 3 níveis e apenas para a direção do corte havia 2 níveis resultando em 1458 experimentos ($3^6 \times 2^1$) caso fosse aplicado o arranjo fatorial completo. Para contornar a quantidade enorme de experimento, foi utilizada a metodologia de superfície de resposta (MSR) conjugado com o arranjo ortogonal (L18) com a seleção de 1 fator em 2 níveis e 7 fatores em 3 níveis reduzindo o número de experimentos para 89. Aplicou-se a função Desejabilidade (*Desirability*) para encontrar os melhores valores dos fatores para as respostas. Concluiu-se que o efeito da distância tocha e peça, o tipo de ferramenta e a direção do corte têm papel fundamental nas características da qualidade da superfície do aço inox.

Yang (2001) descreve a otimização dos processos para a máxima profundidade da zona endurecida em amostras de aço ASSAB 760 (equivalente ao aço ABNT 1045) de 6 mm de espessura por processo de corte por plasma usando o modelo MICROPLASMA-50 com o método de Taguchi de arranjo ortogonal 4 fatores e 3 níveis (L_9). Concluiu-se que os valores otimizados dos 4 parâmetros foram para: corrente de arco (35 A), velocidade da tocha (5 mm/s), fluxo do gás plasma (1 l/min) e a distância tocha e peça (2,3 mm). Obteve-se também que a profundidade máxima da zona endurecida foi de 0,36 mm e a dureza máxima foi de 753 Hv.

2.1.1 Corte por plasma convencional

Denomina-se de corte por plasma convencional, o primeiro processo desenvolvido e patenteado por Dr. Robert Gage em 1957. O corte por plasma convencional foi descoberto em detrimento às pesquisas realizadas na soldagem a arco de gás Tungstênio conhecida por solda TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*).

Para melhor entendimento, o diagrama esquemático de um processo de corte por plasma convencional é ilustrado na Figura 2.3.

Segundo Ozek, Caydas e Unal (2012), um arco forma entre o eletrodo e a peça, e então este é comprimido por um pequeno orifício do bocal de cobre. Isto eleva a temperatura e velocidade do plasma emanada a partir do bocal. Como ordem de grandeza a temperatura do plasma excede os 20000°C. Morrefzadeh (2011) indica que a temperatura típica do plasma localiza-se na faixa de 25000°C. Nos experimentos realizados por Long, Tanaka e Uesugi (2012), a temperatura do plasma no bocal atingiu a marca de 34720°C. Radovanovic e Madic (2011) afirmam que a temperatura pode atingir até 50000K ou 49727°C. Para velocidade do plasma pode se aproximar à velocidade do som, isto é, 343 m/s considerando pressão ao nível do mar e temperatura de 20°C. Operações de corte de metal, o fluxo de gás de plasma é

elevado para que o jato do plasma penetre profundamente cortando a peça e o material fundido seja removido pelo fluxo do plasma.

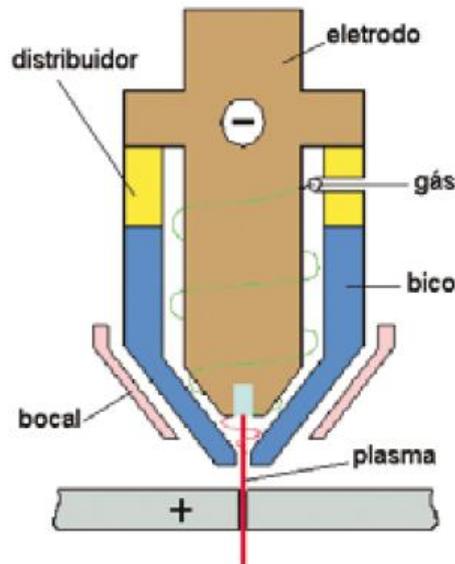


Figura 2.3: Processo de corte por plasma
Fonte: Lima (2009)

Segundo Morrefzadeh (2011), os cortes executados nas peças pelo processo de corte por plasma convencional são usualmente chanfrados e possui borda superior arredondada. Os chanfros nos cortes são resultados de um desbalanceamento no calor de entrada no interior da face do corte. O ângulo do chanfro positivo resultará se a entrada de calor no topo do corte exceder o calor na parte inferior. Para reduzir este desbalanceamento, é aumentar a constrição do arco causando mais uniformidade do perfil da temperatura do jato de plasma oferecendo um corte mais quadrado.

De acordo com Lima (2009), a tocha serve de suporte para os consumíveis e fornece um fluido refrigerante (gás ou água) para estas peças. O distribuidor ou difusor de gás é construído de material isolante e resistente a altas temperaturas com finalidade de dar sentido rotacional (redemoinho) ao gás. O eletrodo conduz a corrente até um inserto de háfnio que emite os elétrons para geração do plasma. O bico comprime o plasma e o guia para a peça a ser cortada. A capa tem função de manter os consumíveis alinhados e isolar a parte elétrica do bocal frontal. O bocal frontal guia o fluxo de jato de ar coaxial. Por ser refrigerado e isolado, o bocal pode ser apoiado à peça. A Figura 2.4 mostra a constituição de uma tocha plasma.

O entendimento de detalhe das interações entre o eletrodo e o arco de plasma sob diferentes condições de operações é necessário para melhorar o desempenho e a vida útil dos dispositivos que compõem o processo de corte por plasma.

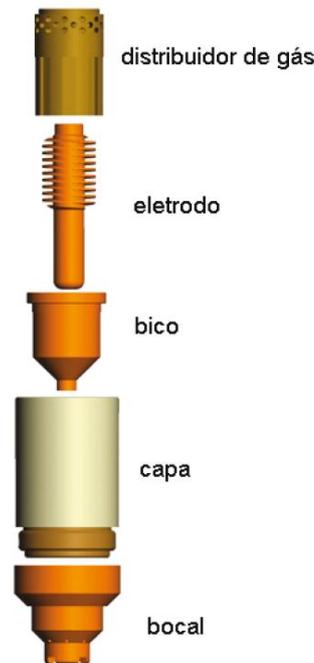


Figura 2.4: Constituição de uma tocha plasma
Fonte: Lima (2009)

2.2 Fenômenos limitantes do corte por plasma

2.2.1 Erosão do catodo

Erosão do catodo é um fator limitante em muitos sistemas que utilizam o arco como propulsores, tochas para tratamento de lixo, fornos metalúrgicos entre outros. Em sistema de corte por plasma, a erosão do catodo tem sua própria peculiaridade.

De acordo com Nemchinsky e Severance (2006), utilizando um gás quimicamente inativo (nitrogênio, mistura de hidrogênio e argônio) o catodo de tungstênio terá baixa erosão. Na maioria dos casos com exceção de corrente muito alta ou refrigeração muito fraca, o fenômeno de erosão do catodo não causa problema no sistema de corte por plasma.

Por outro lado, o tungstênio numa atmosfera de oxigênio erode rapidamente. Dessa forma, houve a entrada de novos materiais como o háfnio e composto de zircônio para serem utilizados no PAC a oxigênio e a ar. Lembrando que a taxa de erosão é diretamente proporcional à corrente de arco e da pressão do gás o que impõe um limite nas inovações tecnológicas do PAC.

2.2.2 Arco duplo

Em modo normal de operação, o bocal é eletricamente neutro, isto é, não é conectada eletricamente a nenhuma parte do circuito. Normalmente, o arco conecta-se ao catodo e a

peça. De acordo com Nemchinsky e Severance (2006) e Moarrefzadeh (2011), no fenômeno de arco duplo, haverá dois circuitos: o primeiro arco conecta-se ao catodo e o bocal e o segundo arco conecta-se o bocal e a peça fazendo um dano catastrófico do bocal e do eletrodo.

Na prática, o arco duplo acontece na combinação das condições abaixo:

- (a) A corrente de arco é muito alta;
- (b) O orifício do bocal é muito estreito;
- (c) O orifício do bocal é muito comprido;
- (d) O fluxo de gás é muito baixo;
- (e) O fluxo de gás não tem redemoinho suficiente.

Além disso, é noticiado que os consumíveis (eletrodos e bocais) no fim de uso estão mais suscetíveis ao arco que os eletrodos e bocais novos.

2.3 Variantes de corte por plasma

Conforme o Instituto de Soldagem (TWI) seguem a seguir as principais variantes do processo de corte por plasma que foram projetados com objetivo de melhorar a qualidade do corte, estabilidade do arco, redução de ruído e fumo ou aumentar a velocidade de corte.

2.3.1 Corte por plasma com gás dual

O processo funciona basicamente da mesma maneira que o sistema convencional, porém, o gás secundário de proteção é introduzido no bocal conforme mostrado na Figura 2.5. O efeito benéfico do gás secundário é para melhorar a o estreitamento do arco e ser mais eficaz para expelir a escória. O gás de formação do plasma é normalmente o argônio, mistura de hidrogênio e argônio ou nitrogênio e o gás secundário é selecionado conforme o tipo de metal a ser cortado. O gás secundário apropriado são o ar, oxigênio ou nitrogênio para o aço. Para corte de aço inoxidável e alumínio o gás secundário são o nitrogênio, mistura de argônio e hidrogênio e gás carbônico. As vantagens comparadas com o plasma convencional são a redução de risco do arco duplo, aumento da velocidade de corte e redução de pontas arredonda.

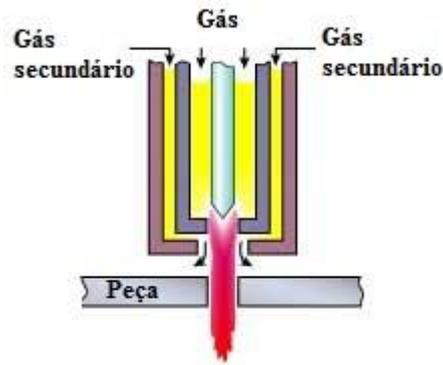


Figura 2.5: Corte por plasma com gás dual
Fonte: Adaptado de TWI

2.3.2 Corte por plasma com injeção de água

O nitrogênio é normalmente usado como gás de plasma. A água é injetada radialmente no interior do arco para aumentar o grau de estreitamento conforme mostra a Figura 2.6.

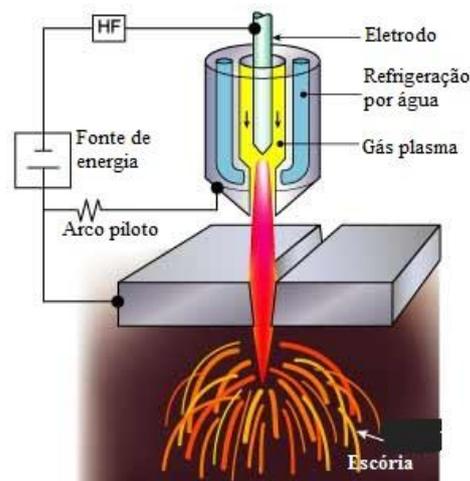


Figura 2.6: Corte por plasma com injeção de água
Fonte: Adaptado de Ozek, Caydas e Unal (2012)

De acordo com Nemchinsky e Severance (2006), neste processo um fluxo de 1 a 2 litros de água por minuto é injetado no interior do arco onde a metade deste é dissociada ou evaporada pelo arco. Este tipo de PAC produz cortes extremamente quadrados isento de pontas arredondadas. Corte mecanizado com injeção de água tornou-se padrão de ouro em qualidade de corte para materiais de espessuras menores que 75 mm.

O estudo de Weller e Haavisto (1984) indicara que a aparência de corte e vida útil do bocal é melhorada pelo uso da água em detrimento ao gás para proteção auxiliar.

Moarrefzadeh (2011) completa que a vida útil do bocal é prolongada com a técnica de injeção de água devido à camada limite do vapor isolar o bocal do intenso calor do arco, e a água refrigera o bocal no ponto máximo da constrição do arco. A proteção oferecida pela

camada limite do vapor permite uma inovação ímpar do projeto que é permitir a construção do bocal com pequena porção material cerâmico. Conseqüentemente, o arco duplo do contato do bocal a peça (maior causa de destruição) é virtualmente eliminado.

2.3.3 Corte por plasma com película de água

O plasma pode ser operado com película de água ou mesmo com a peça submersa entre 50 a 75 mm conforme mostra a Figura 2.7. Conforme o Instituto de Soldagem (TWI), num exemplo típico de nível de ruído para um processo de corte por plasma convencional indica 115dB para o plasma operado com película de água houve redução efetiva para 96dB e no corte submerso de água o nível de ruído ficou entre 52dB e 85dB.

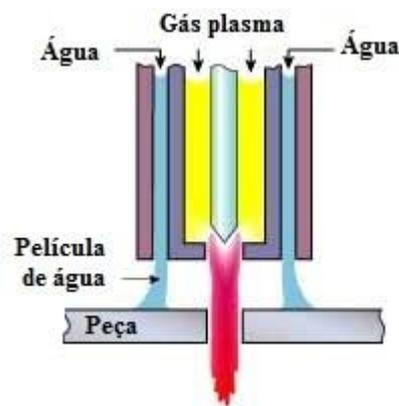


Figura 2.7: Corte por plasma com película de água
Fonte: Adaptado de TWI

2.3.4 Corte por plasma de alta tolerância

Na tentativa de melhorar a qualidade de corte para competir com o sistema laser, o corte por plasma de alta tolerância (HTPAC) estão disponíveis para operar com plasma altamente estreita. Concentrando o plasma é efetivado pela força exercida do oxigênio gerado do plasma para redemoinho como ele entra no orifício do plasma e o fluxo secundário do gás é injetado na jusante do bocal do plasma conforme a Figura 2.8.

Alguns sistemas tem um campo magnético separado entorno do arco. Isto estabiliza o jato de plasma por manter a rotação induzida pelo gás redemoinho. As vantagens do HTPAC são a qualidade do corte, faixa estreita de largura de corte e baixa distorção devido a menor zona termicamente afetada (ZTA). As desvantagens do HTPAC são a necessidade de técnicas mecanizadas, equipamento de alta velocidade, limitação de corte do material para espessura até 6 mm e velocidade de corte menor que o processo de corte por plasma convencional e 60 a 80% da velocidade do corte a laser.

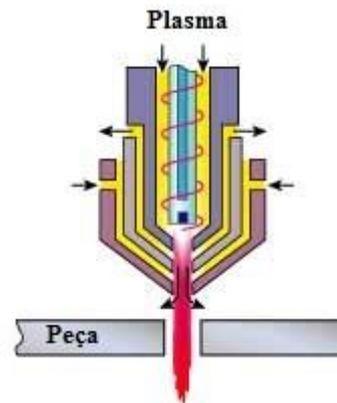


Figura 2.8: Corte por plasma HTPAC
Fonte: Adaptado de TWI

2.3.5 Corte por plasma a ar comprimido

De acordo com TWI, o gás inerte ou não reativo para o gás de formação do plasma (argônio ou nitrogênio) pode ser substituída por ar comprimido ou ar atmosférico. O ar comprimido também pode substituir a água para refrigeração da tocha. A Figura 2.9 mostra o corte por plasma a ar comprimido.

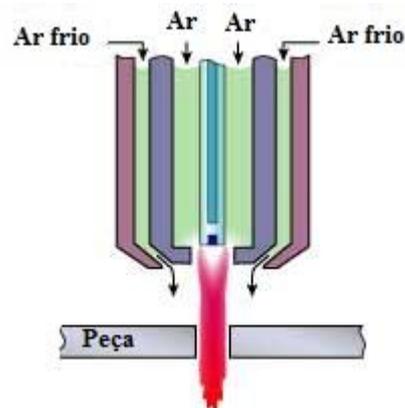


Figura 2.9: Corte por plasma a ar comprimido
Fonte: Adaptado de TWI

De acordo com Pereira (2000), o corte por plasma a ar comprimido surgiu no início dos anos de 1960 para o corte em aço carbono. O oxigênio presente no ar fornece uma energia adicional, devida à reação exotérmica com o metal, aumentando a velocidade de corte em aproximadamente 25% em relação ao plasma com nitrogênio. Esse processo se presta melhor para materiais oxidáveis como aço carbono.

Segundo Nemchinsky e Severance (2006), Pereira (2000) e TWI, a principal desvantagem do processo de corte por plasma a ar comprimido é a rápida erosão do eletrodo. Utilização de materiais especiais compostos de zircônio, háfnio ou ligas de háfnio é requerida,

mesmo assim, a vida útil deles continua a serem bem menores comparados com o uso de mesmos eletrodos no processo de corte por plasma convencional.

Conforme Ziedas e Tatini (1997), a partir da utilização de equipamentos de corte por plasma a ar comprimido de baixa corrente, este processo ganhou popularidade com aumento de mercado em 50 vezes. Pereira (2000) reforça que algumas inovações no equipamento de corte por plasma também contribuíram para o aumento da popularidade como: utilização de inversores para melhorar as características do arco, redução das dimensões físicas e peso dos equipamentos; arco piloto por contato (*blow back* - retração do eletrodo) eliminou-se a alta frequência da tocha e inserção do anel injetor de ar ofereceu maior proteção das partes frontais da tocha durante a operação de corte.

A Figura 2.10 mostra a bancada de um processo de corte por plasma a ar comprimido.

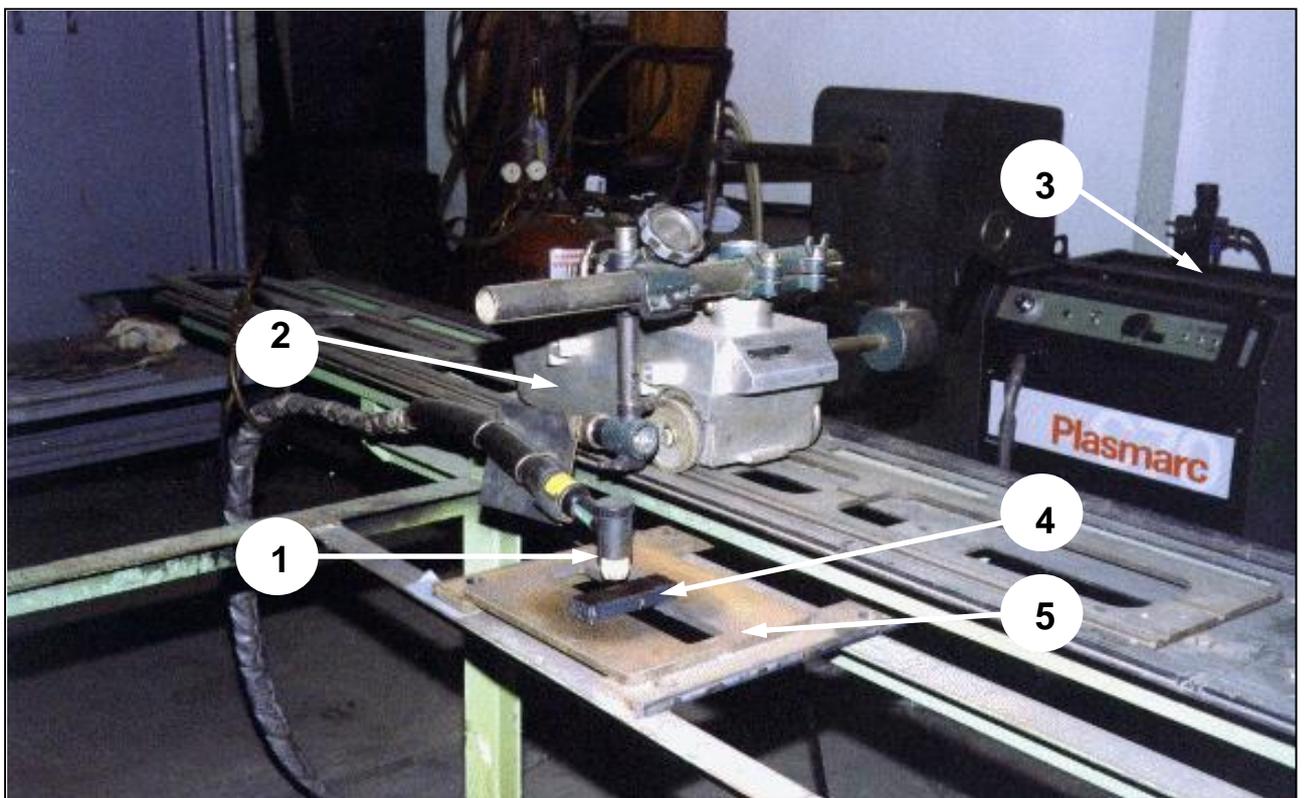


Figura 2.10: Bancada de um processo por corte por plasma
Fonte: Montalvão (1997)

Onde:

- (1) Tocha;
- (2) Carrinho;
- (3) Fonte e manômetro;
- (4) Calço;
- (5) Mesa de corte.

2.4 Requisitos de corte

2.4.1 Qualidade de corte

Segundo os critérios apresentados por Nemchinsky e Severance (2006), o corte de boa qualidade deve possuir as seguintes características:

- (a) Ser quadrada;
- (b) Ter pontas afiadas (sem arredondamento na ponta do corte);
- (c) Ter pelo menos um lado do corte que é vertical.

Existem inúmeros parâmetros de controle para obter a melhor qualidade de corte são eles: corrente de arco, tipo de gás do plasma, velocidade de corte, taxa de fluxo de gás, quantidade de redemoinho de gás e distância tocha e peça (*standoff*).

2.4.2 Ortogonalidade de corte

Referente ao corte térmico, a norma ISO 9013 recomenda que um bom corte deva ter ângulo de 0 a 4 graus dependendo da fonte em todos os lados.

A Figura 2.11 mostra a representação de um corte de metal pelo processo por plasma indicando as larguras de corte na parte superior (l_{sup}) e inferior (l_{inf}) e a formação de escórias.

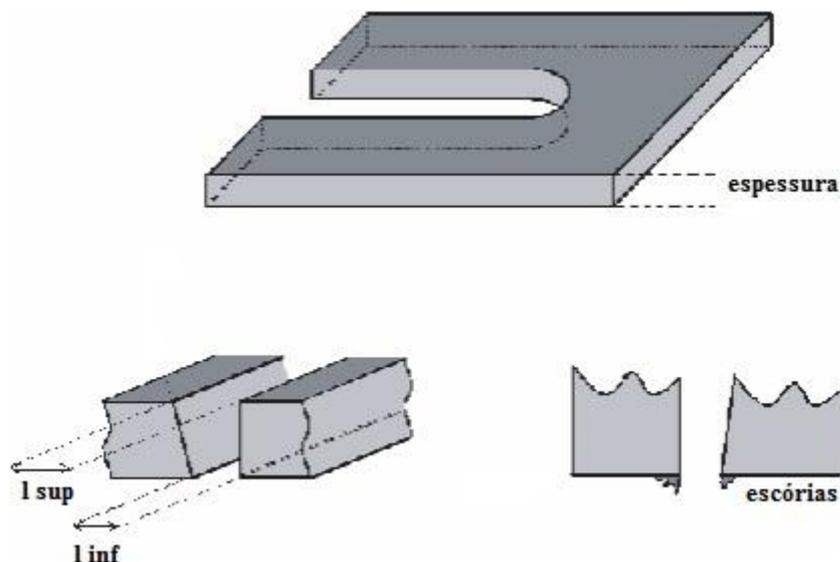


Figura 2.11: Representação de um corte de metal
Fonte: Adaptado de Fretton *et al.* (2002)

Observa-se que a parte superior do corte onde se inicia o corte por plasma é tipicamente mais largo que a parte inferior. Por consequência, as ortogonalidades do lado esquerdo representado por β_{left} e do lado direito representado por β_{right} não são zeros e não existem

simetria entre eles. Para melhor visualização, a Figura 2.12 mostra as ortogonalidades esquerda e direita.

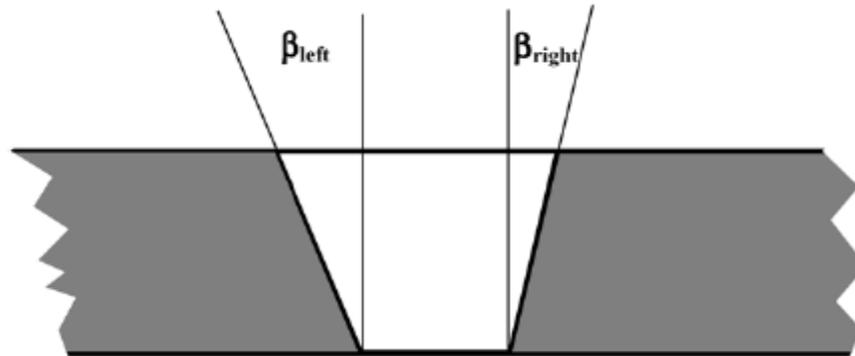


Figura 2.12: Ângulo de corte
Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006)

Dependendo da direção do corte e a direção do redemoinho do gás, um dos ângulos sempre é maior que o outro. Segundo Nemchinsky e Severance (2006), em outras palavras, existe um lado "bom" e lado "ruim" do corte devido ao redemoinho de gás oriunda da tocha.

Moarrefzadeh (2011) mostra que se o fluxo do gás não fosse em redemoinho os chanfros seriam mais nítidos tanto do lado esquerdo quanto do lado direito. A Figura 2.13 visualiza a diferença de ortogonalidades se fluxo do gás fosse reto e em redemoinho. Pode-se verificar que o fluxo de gás em redemoinho minimiza as ortogonalidades de ambos os lados e tornou-se convencional aos equipamentos de corte por plasma.



Figura 2.13: Fluxo do gás do corte por plasma
Fonte: Adaptado de Moarrefzadeh (2011)

Segundo Lima (2009), a norma ISO 9013 possui critérios de qualidade de corte de desvio e de ângulos cujos níveis variam de 1 a 5 sendo 1 de maior qualidade. A Tabela 2.1 mostra os valores limítrofes.

Tabela 2.1: Norma ISO 9013 níveis de qualidade de superfície de corte

Espessura [mm]	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Nível 4		Nível 5	
	Desvio	Ângulo								
1,50	0,05	2,20	0,16	6,54	0,41	16,51	0,83	30,66	1,25	41,82
3,40	0,06	1,10	0,17	3,21	0,43	7,97	0,87	15,64	1,32	23,05
6,40	0,07	0,70	0,20	1,93	0,46	4,59	0,93	9,13	1,42	13,85
9,50	0,08	0,50	0,22	1,39	0,50	3,18	0,99	6,33	1,53	9,75
12,70	0,09	0,40	0,24	1,17	0,53	2,58	1,05	5,15	1,64	8,00

Fonte: Lima (2009)

O gás plasma sai em forma de redemoinho pelo jato do plasma. A Figura 2.14 mostra a direção do corte na peça visto na transversal horizontal do jato e o metal.

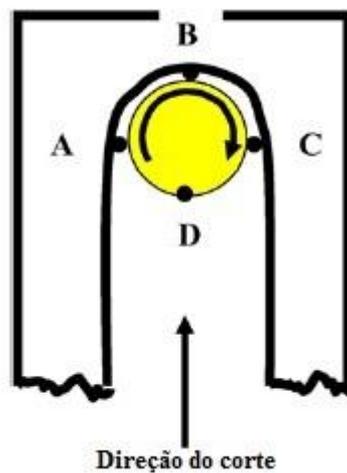


Figura 2.14: Direção do corte visto na transversal horizontal do jato e o metal
Fonte: Adaptado por Nemchinsky e Severance (2006)

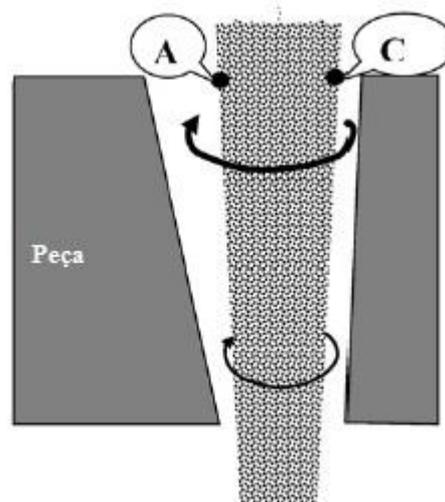


Figura 2.15: Direção do corte visto na transversal vertical do jato e o metal
Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006)

Nesta Figura 2.14 o jato de plasma é representado por um círculo indicando a direção da rotação. É razoável sugerir que a parte mais fria do jato fica próximo ao ponto C e a parte mais quente fica no ponto A.

Observando o corte na vista transversal vertical do jato e o metal conforme mostra a Figura 2.15, a entrada do plasma é mais quente no ponto onde o derretimento da peça é mais intenso.

A assimetria do corte é causada pela assimetria do jato, entretanto, com a fricção do plasma sobre o corte, velocidade do redemoinho do gás do plasma diminui na medida em que vai se aprofundando o corte na peça. Portanto, quanto mais profundo o corte menos é a sua assimetria. Isto explica por que o jato orienta para o maior ângulo de chanfro de um lado do que do outro.

Segundo Moarrefzadeh (2011), o corte do lado direito é retangular e o lado esquerdo é levemente inclinado, devido ao gás de corte ter movimento de redemoinho no sentido horário fornecendo mais energia de arco expelido para o lado direito.

2.4.3 Inclinação do corte

Para qualquer velocidade, o corte não é vertical. Nas velocidades próximas ao máximo de corte, este efeito é mais pronunciado. O fenômeno característico não é exclusivamente ao corte por plasma, mas também ao oxicorte afirma Nemchinsky e Severance (2006).

O fenômeno é natural devido à queda na potência do jato de plasma (resfriador de jato) quando ele vai se movendo mais profundo ao corte. O resfriador de jato não acompanha a velocidade de corte nas regiões no topo da placa, e nas seções mais profundas do corte inicial devido à resistência física do material. O jato inclinado possui uma capacidade mais alta de corte por unidade de espessura (não por unidade de comprimento de corte) e neste modo mesmo o jato enfraquecido pode manter até a velocidade mais alta do corte.

O jato possui um caminho adicional de aumento da sua habilidade de corte quanto ao seu enfraquecimento descendente; a largura do corte decresce a partir de cima para baixo da placa. Este tem efeitos positivos e negativos na habilidade de corte do jato. De um lado, o corte mais estreito necessita de menor potência para cortar em dada velocidade. Entretanto, por outro lado, o corte decresce tem um efeito negativo na habilidade do jato para derreter: como a largura de corte (Δ) decresce para baixo, a espessura da camada de metal fundido (δ) aumenta. As Figura 2.16 e Figura 2.17 mostram o detalhe deste fenômeno.

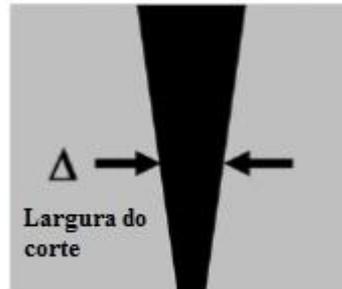


Figura 2.16: Vista lateral do corte
 Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006)



Figura 2.17: Vista de trás do corte
 Fonte: Adaptado de Nemchinsky e Severance (2006)

Esta camada fundida separa o jato do metal sólido a ser fundido e, portanto, decresce a eficiência do jato em fundir. Além disso, o corte muito estreito na parte inferior cria uma força de tensão superficial muito alta que se opõe ao movimento de fundir tornando a sua separação a partir da parte inferior da placa mais difícil.

2.5 Delineamento de experimentos (DOE)

O delineamento de experimentos (DOE) tem-se utilizados em inúmeras aplicações. A experimentação faz parte do processo científico e de aprendizagem sobre o comportamento de sistemas e ou processos. A Figura 2.18 mostra as aplicações do DOE de acordo com o nível de conhecimento do processo.

Montgomery (2005) afirma que o aprendizado ocorre por meio de uma série de atividades na qual se levantam as hipóteses sobre o processo, os experimentos são realizados para gerar dados a partir do processo; as informações obtidas são bases para estabelecer novas hipóteses levando-se a novos experimentos e assim por diante.

Segundo Balestrassi *et al.* (2008), o delineamento de experimentos (DOE) é considerado um dos métodos mais importantes para pesquisadores que trabalham com experimentos em aplicações práticas obtendo vários casos de sucesso. Chan e Spedding (2001) afirmaram que os recursos do DOE incorporados em muitos pacotes de software de estatísticas vem facilitando o cálculo e sua interpretação. O delineamento de experimentos

tem a função de melhorar o desempenho de um processo de manufatura e facilitar o desenvolvimento de novos produtos e processos.

De acordo com Montgomery (2005) e Prasad, Rao e Rao (2012), a aplicação de técnicas de delineamento de experimentos precocemente em desenvolvimento de processo pode resultar em: melhoria de rendimentos do processo, redução de variabilidade e conformidade mais próxima ao nominal ou requisito de meta, redução de tempo de desenvolvimento e redução de custos gerais.

Baixo	Conhecimento do processo no estado atual			Alto
	→			
Tipo de Projeto	Efeito Principal / Exploratório	Fatorial Fracionado	Fatorial Completo	Superfície de Resposta
Nº de fatores	> 5	4-10	1-5	2-3
Objetivos - Identificar	Efeito principal fatores críticos	Algumas interações	Relação entre fatores	Configuração do fator ideal
- Estimativa	Direção bruta para melhoria	Algumas interações	Todos os efeitos principais e interações	Curvatura na resposta, modelos empíricos
	Exploratório			
		Otimização		

Figura 2.18: Aplicações do DOE
Fonte: Adaptado de Montgomery (2005)

Os estudos de Coleman e Montgomery (1993) apresentam alguns roteiros para projeto de um experimento:

- (a) Conhecimento e exposição do problema;
- (b) Escolha de fatores e níveis;
- (c) Seleção de resposta(s);
- (d) Escolha do projeto de experimentos;
- (e) Realização do experimento;
- (f) Análise estatística de dados;
- (g) Conclusões e recomendações.

Esses roteiros são usualmente interativos e a estrutura não é rígida quando aplicada na prática. Algumas etapas podem ser realizadas simultaneamente outras em ordem inversa. As etapas (a), (b) e (c) são denominadas de planejamento pré-experimental.

2.5.1 Notação do delineamento de experimento

O objetivo de um experimento é determinar quais fatores influenciam na resposta de saída. A Figura 2.19 ilustra este processo.

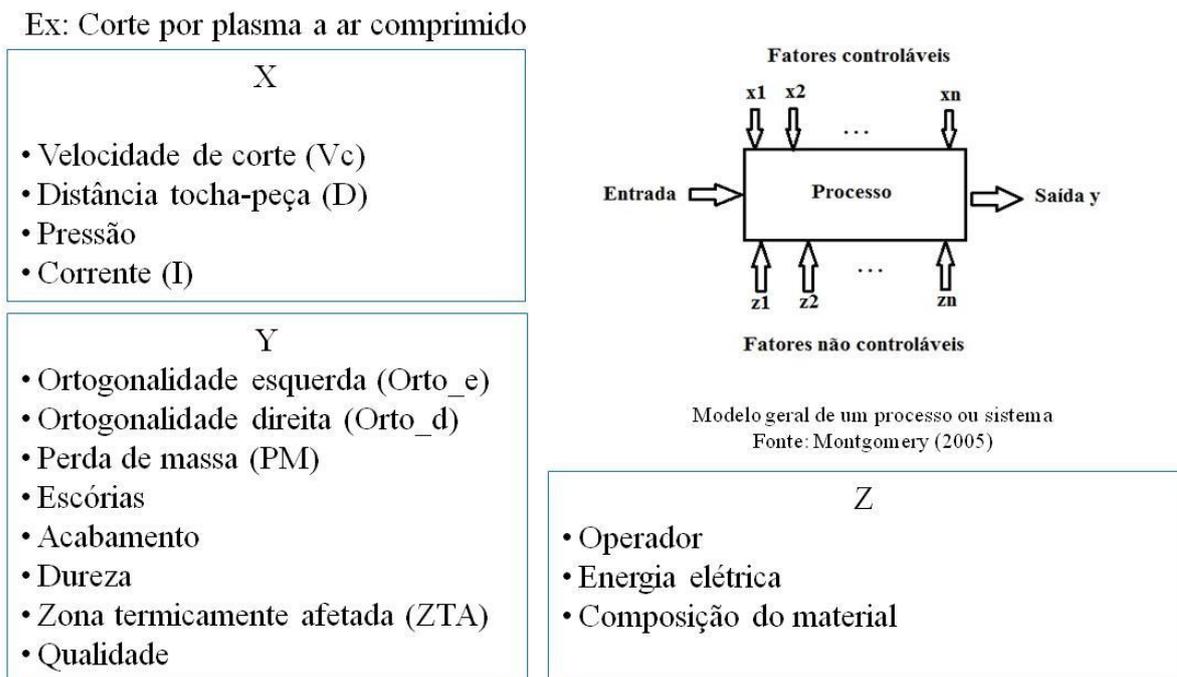


Figura 2.19: Modelo geral de um processo ou sistema
Fonte: Montgomery (2005)

De acordo com Montgomery (2005), o experimento pode-se usualmente visualizar o processo como uma combinação de equipamentos, métodos, pessoas e outros recursos que transformam algumas entradas (sempre um material) dentro da saída que tenha um ou mais respostas observáveis.

Os objetivos do experimento podem ser:

- (1) Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta y ;
- (2) Determinar onde ajustar as influências de x então qual y é quase sempre próximo ao valor nominal desejado;
- (3) Determinar onde ajustar as influências de x então qual variabilidade em y é menor;
- (4) Determinar onde ajustar as influências de x então quais os efeitos das variáveis incontroláveis $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ são minimizados.

2.5.2 Escolha do projeto e experimento

De acordo com Montgomery (2005), entende-se por projeto como uma matriz onde as colunas representam os fatores de entrada e cada linha representa a combinação de seus níveis. A escolha do projeto envolve o tamanho da amostra, a ordem de corrida do experimento e as restrições impostas para compor a matriz final gerada para saída. Esses projetos são normalmente gerados com níveis codificados e são escolhidos baseados no número de fatores e níveis, estruturas com alias e resolução, tempo e recursos necessários.

2.5.3 Análise estatística de dados

Os métodos estatísticos não serão muito elaborados caso o roteiro pré estabelecido não for seguido. Os métodos gráficos, análises de resíduos e adequação do modelo desempenha um importante papel nesta fase. A análise estatística auxilia na objetividade para processo de tomada de decisão.

Para facilitar o entendimento, Nilo Junior (2003) apresenta uma síntese das principais técnicas de delineamento de experimentos (DOE) através da Figura 2.20.

Projeto Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois, trabalha apenas em dois níveis. Demanda um alto número de triagens para problemas que possuem um grande número de variáveis.	Em processos onde há o domínio prévio e onde a realização das triagens não demanda maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com número reduzido de triagens.	Não promove a varredura completa da região.	Em processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Triagens que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise do processo que possui muitas variáveis de entrada com número reduzido de experimentos.	Fornecer uma idéia do processo, mas pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos que possuem dispersão elevada ou em que triagens demandam alto custo ou tempo.
Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos níveis extremos - 2 e +2, pois poucas triagens são realizadas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente quando os mesmos são bem conhecidos e com baixa dispersão.

Figura 2.20: Características das principais técnicas de delineamento de experimentos

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003)

Os autores Prasad, Rao e Rao (2012) através da Figura 2.21 apresenta os vários métodos estatísticos utilizados de acordo com número de fatores e restrições e complexidade da superfície.

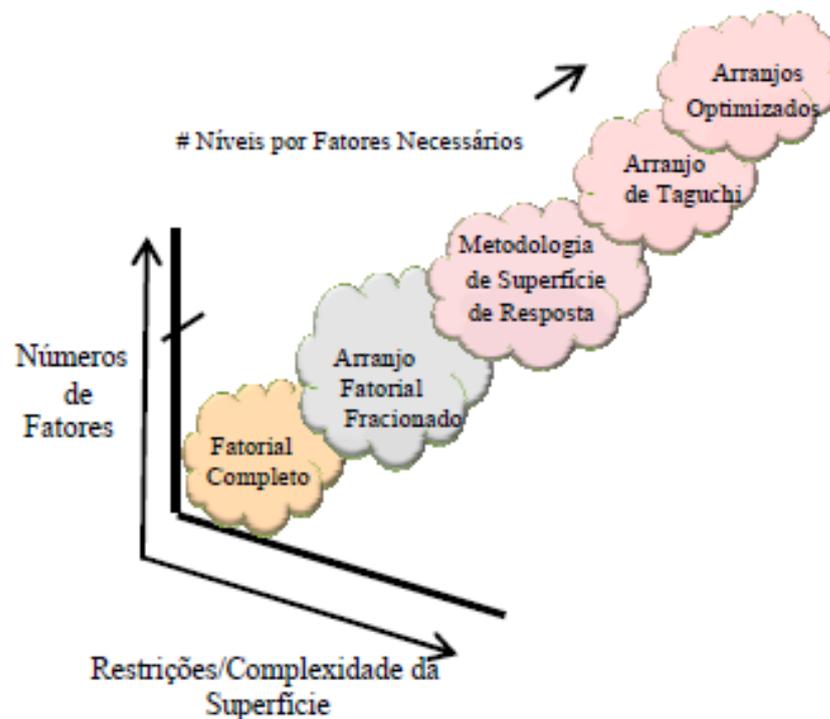


Figura 2.21: Progressão de vários métodos estatísticos
Fonte: Adaptado de Prasad, Rao e Rao (2012)

2.5.3.1 Arranjo fatorial fracionado

Para realização de experimentos industriais, uma prática comum é verificar a necessidade de estudar o efeito de um ou mais fatores de controle ao mesmo tempo segundo afirma Abraham, Chipman e Vijayan (1999).

Segundo Montgomery (2005), a aplicação das técnicas de planejamentos de experimentos fatoriais fracionados 2^{k-p} é uma das soluções para o estudo e torna-se possível analisar os efeitos sobre uma resposta de interesse, de k fatores com dois níveis cada um, para uma combinação de 2^{k-p} de testes, realizando-se somente uma parte podendo ser a metade do experimento caso p é igual a um ou um quarto do experimento quando p é igual a dois, sem comprometer a precisão das conclusões da análise de resultados. Os custos e o tempo de duração dos ensaios são reduzidos nitidamente.

Montgomery (2005) justifica o uso dessa técnica por três ideias importantes de sustentação:

a) Dispersão de efeitos: quando existem vários fatores de controle, torna-se provável que o processo seja influenciado por somente alguns efeitos principais e de interação de ordem inferior;

b) Propriedade de projeção: os experimentos fatoriais fracionados podem ser planejados em matrizes maiores, que podem ser construídas a partir de um subconjunto de fatores significativos;

c) Experimentação sequencial: quando é possível combinar as corridas de dois ou mais experimentos fatoriais fracionados.

2.5.3.2 Metodologia superfície de resposta (MSR)

A metodologia superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para desenvolvimento, melhoria, e otimização de processos. Ele também tem aplicações importantes no projeto, desenvolvimento e formulação de novos produtos, como também na melhoria de projetos do produto existente (MYERS, MONTGOMERY e ANDERSON-COOK, 2009), (PRASAD, RAO e RAO, 2012) e (YE, *et al.*, 2014).

Conforme os autores Prasad, Rao e Rao (2012), as aplicações mais extensivas do MSR encontram-se no mundo industrial, particularmente em situações onde várias variáveis de entrada potencialmente influenciam algumas medidas de desempenho ou característica de qualidade do produto e processo. Esta medida de desempenho ou característica de qualidade é denominada de resposta. É tipicamente medido em escala contínua, apesar resposta atributiva, ranques, e resposta sensorial não são usuais.

De acordo com Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), maioria da aplicação do mundo real do MSR envolverá mais que uma resposta. As variáveis de entrada são às vezes denominadas de variáveis independentes, e eles estão sujeito ao controle de engenheiros e cientistas, pelo menos para proposta de teste ou um experimento.

O MSR é uma metodologia de otimização introduzida por Box e Wilson no início dos anos de 1950. Este consiste de um grupo de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas no estudo empírico de relacionamento entre um ou mais respostas medidas e os fatores de entrada conforme Equação (2.2).

Dado uma resposta y , e um vetor de variáveis x influenciando y , a relação entre x e y fica:

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (2.2)$$

Onde ε é um erro aleatório experimental assumido a ter média zero. Desde a função resposta verdadeira $f(x)$ é usualmente desconhecida, a resposta estimada $g(x)$ é criada para aproximar $f(x)$ mostrada pela Equação (2.3):

$$\hat{y} = g(x) \quad (2.3)$$

A mais largamente utilizada superfície de resposta aproximando funções são modelos polinomiais de baixa ordem. Em geral o modelo de primeira ordem fica conforme Equação (2.4):

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i \cdot x_i \quad (2.4)$$

E da segunda ordem fica de acordo com a Equação (2.5):

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1, i < j}^p b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^p b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (2.5)$$

Onde p é o número de parâmetros no modelo ajustado, b_0 é o coeficiente constante, b_i é o coeficiente linear, b_{ij} é o coeficiente de interação entre x_i e x_j , e b_{ii} é o coeficiente quadrático do x_i .

O procedimento de MSR consiste das seguintes etapas:

- (1) Experimentos de triagem são usados para reduzir o número de variáveis para aqueles que são mais influentes para a resposta, quando o número de variáveis é grande ou quando a carga do experimento é pesada.
- (2) Projetando e conduzindo uma série de experimentos para ficar adequado e medidas confiáveis de resposta.
- (3) Desenvolvendo modelos matemáticos de superfície de resposta de primeiro e segunda ordem com o melhor ajuste.
- (4) Encontrando a série ótima de parâmetros de projeto que produz valores máximos ou mínimos da resposta.

Em projetos de segunda ordem, MSR usualmente emprega o arranjo composto central (CCD), polinômios de segunda ordem e análise de regressão de mínimos quadrados. O projeto mais comum de segunda ordem ajusta para reduzir o número de pontos de projetos, são arranjo de composto central (CCD) e o Box-Behnken. O arranjo composto central (CCD)

é um projeto largamente utilizado para estimar as superfícies de segunda ordem. (MYERS, MONTGOMERY e ANDERSON-COOK, 2009), (YE, *et al.*, 2014).

2.5.3.3 Arranjo composto central (CCD)

O arranjo composto central (CCD) também conhecido como arranjo Box-Wilson é apropriado para calibrar modelos quadráticos completos descritos na superfície de resposta. Existem três tipos de CCD denominados de circunscritos, inscritos e faceado. As geometrias dos CCDs são mostradas na Figura 2.22 conforme Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009) e Prasad, Rao e Rao (2012).

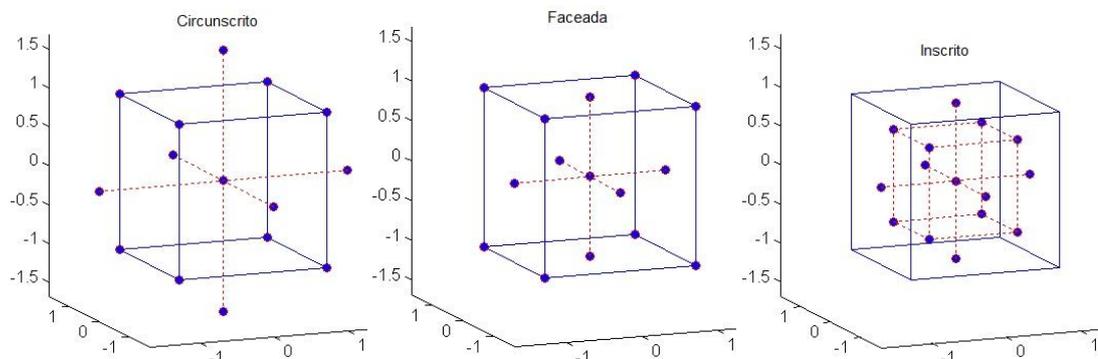


Figura 2.22: Tipos de arranjos compostos
Fonte: Adaptado de Prasad, Rao e Rao (2012)

Cada arranjo consiste num arranjo fatorial (os cantos de um cubo) juntos com o centro e os pontos estrela que permite estimar efeitos de segunda ordem.

Para um modelo quadrático completo com n fatores, CCDs têm pontos de arranjos suficientes para estimar o $((n + 2).(n - 1)) / 2$ coeficientes no modelo quadrático completo com n fatores.

O tipo de CCD usado (a posição do fatorial e pontos estrelas) é determinado pelo número de fatores e pelas propriedades desejadas de um arranjo. A Tabela 2.2 resume algumas propriedades importantes.

Tabela 2.2: Resumo de CCD

Arranjo	Rotacionável	Níveis de Fatores	Usa Pontos Externos ± 1	Precisão da Estimativa
Circunscrito (CCC)	Sim	5	Sim	Bom sobre espaço completo do arranjo
Inscrito (CCI)	Sim	5	Não	Bom sobre subconjunto central do espaço do arranjo
Faceado (CCF)	Não	3	Não	Razoável sobre espaço completo do arranjo; pobre para coeficientes quadráticos puros.

Fonte: Prasad, Rao e Rao (2012)

Um arranjo é rotacionável se a variância prevista depende somente da distância do ponto de arranjo a partir do centro do arranjo.

Alguma extensão do RSM lida com problemas de múltiplas respostas. Variáveis de resposta múltipla criam dificuldade, pois o que é ótimo para uma resposta pode não ser ótimo para outras respostas. Outras extensões são usadas para reduzir variabilidade numa resposta unitária enquanto mirando um valor específico, ou aproximando num máximo ou mínimo enquanto prevenindo variabilidade naquela resposta a partir de tão largo.

Críticas significantes do RSM inclui o fato que a otimização é quase sempre feita com um modelo para quais os coeficientes são estimados e não conhecidos. Aquilo é um valor ótimo pode somente aparentar ótimo, mas estar distante do verdadeiro por causa da variabilidade nos coeficientes.

Os coeficientes de regressão são calculados, então o modelo de superfície de resposta será obtido. Na ordem para testar a significância do modelo de superfície de resposta, a análise de variância (ANOVA) é utilizada para verificar a validade do modelo de superfície de resposta mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Análise de variância

SV	SS	DF	MS
Regressão	SSR	F_R	SSR / F_R
Residual	SSE	$F_T - F_R$	$SSE / (F_T - F_R)$
Total	SST	F_T	-
SV – fonte de variação	SS – soma dos quadrados	DF – grau de liberdade	MS – média quadrada

Fonte: Prasad, Rao e Rao (2012)

A variação total numa série de dados é denominada de soma total de quadrados (SST). SST é computado como mostra a Equação (2.6):

$$SST = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.6)$$

onde \bar{y} representa o valor médio de resposta e N é o número de experimentos.

SST compõe de duas partes. A primeira é a soma dos quadrados dos residuais (SSE) mostrada pela Equação (2.7).

$$SSE = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (2.7)$$

onde \hat{y}_i representa o i ésimo valor de resposta previsto pelo modelo ajustado.

O segundo é a soma dos quadrados devido à regressão (SSR) mostrada pela Equação (2.8):

$$SSR = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.8)$$

O total de grau de liberdade é $F_T = N - 1$.

O grau de liberdade para regressão é mostrada pela Equação (2.9):

$$F_R = 2p + (p(p - 1))/2 \quad (2.9)$$

O modelo de superfície de resposta é testado pelo uso da estatística F (Fischer) para determinar a validade e precisão do modelo de superfície de resposta mostrada pela Equação (2.10):

$$F = \frac{SSR / F_R}{SSE / (F_T - F_R)} \quad (2.10)$$

O coeficiente de determinação R^2 é um acompanhamento estatístico para a estatística F e é mostrada pela Equação (2.11). Segundo Lima (2010), ele é usado no contexto de modelos estatísticos, cuja principal finalidade é a previsão de resultados futuros com base em outras informações relacionadas. Representa também a proporção da variabilidade em um conjunto de dados e fornece uma medida de quão bem os resultados futuros podem ser previstos pelo modelo.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (2.11)$$

É uma medida da proporção de total variação dos valores de y_i dos dados experimentais. De uma forma geral, R^2 pode ser visto relacionado com a variância inexplicável. R^2 é uma estatística que fornece algumas informações sobre a qualidade do ajuste de um modelo. Na regressão linear, o coeficiente de determinação R^2 é uma medida estatística de quão bem a linha de regressão se encaixa perfeitamente nos dados. Valores de R^2 fora do intervalo de 0 a 1 podem ocorrer quando este é utilizado para medir a concordância entre valores observados e modelados.

Na maioria dos casos onde R^2 é utilizado, os preditores são calculados por meio da regressão dos mínimos quadrados ordinários. No presente caso, o coeficiente de

determinação R^2 aumenta na medida em que aumentar a quantidade de variáveis no modelo. Isto resulta um possível uso inconveniente de R^2 , onde se pode tentar incluir mais variáveis no modelo até que não haja mais melhorias.

Pois o R^2 aumenta com o crescimento do número de variáveis se o modelo de superfície de resposta for efetivo, R^2 não reflete adequadamente o grau de ajuste da equação de regressão.

Dessa forma, surge o coeficiente de determinação de ajuste (R_A^2) mostrado pela Equação (2.12):

$$R_A^2 = 1 - \frac{SSE/(F_T - F_R)}{SST/F_T} \quad (2.12)$$

Conforme Lima (2010), o coeficiente de determinação de ajuste (R_A^2) surgiu como uma abordagem alternativa de avaliação e não se pode interpretar da mesma forma que o R^2 . O (R_A^2) é particularmente útil na fase de seleção de fatores para construção de modelos. Segundo Barbetta, Ribeiro e Samohyl (2000), o (R_A^2) será mais útil apenas se o R^2 for calculado com base em uma amostra e não com base na população.

2.5.3.4 Função *desirability*

Segundo Das *et al.* (2014), os dilemas entre os efeitos dos fatores nas respostas podem ser observadas a partir de análise de modelos matemáticos e de gráficos de otimização. Selecionando um fator e elevando o seu valor tem diferente impacto em um ou mais resposta e pode não ter impacto em outras respostas. Logo, para balancear esses dilemas, uma técnica de múltiplas respostas foi utilizada.

Essa técnica é conhecida por função *desirability* ou deseabilidade em português foi proposta inicialmente por Harrington (1965) e modificada e disseminada por Derringer e Suich (1980). A função deseabilidade exige a sistematização de recursos computacionais que possam estimar a melhor combinação dos fatores resultando na melhor combinação possível de respostas, sempre considerando a importância relativa de cada resposta para o sistema estudado.

Os autores Derringer e Suich (1980) propuseram uma algoritmo que otimiza simultaneamente várias respostas, as quais dependem de um número de fatores independentes ou de um conjunto de condições. Por meio deste algoritmo, cada uma das respostas resulta

numa função desejabilidade individual denominada d_i onde este varia de 0 a 1. A técnica de mínimos quadrados ordinários é utilizada para se obter o modelo estatístico.

O índice de desejabilidade global (D) é obtido através da média geométrica dos valores individuais conforme a equação:

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} (\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (2.13)$$

onde: w_i : peso individual da resposta \hat{Y}_i e W : média geométrica.

O peso define a função desejabilidade para cada resposta. Para cada resposta é possível selecionar um peso de 0,1 a 10 para diminuir ou aumentar a ênfase em cada alvo.

A utilização da função desejabilidade é um dos métodos mais utilizados no ramo industrial para otimização dos processos de resposta múltipla. A idéia central do algoritmo se baseia na qual a qualidade de um produto ou processo possui múltiplas características cada um com limites desejados. O método avalia essas condições de funcionamento e calcula os valores mais desejáveis para as respostas requeridas.

As etapas a serem seguidas para conduzir a função desejabilidade estão descritas a seguir:

1. Realizar os experimentos ajustando os modelos de resposta para todas as \hat{Y}_i respostas;
2. Definir quais limites desejados para cada resposta;
3. Fazer ajustes para maximizar, minimizar ou atingir o alvo da desejabilidade global D em função dos fatores controláveis.

A Figura 2.23 mostra a função de desejabilidade em relação aos pesos definidos para cada resposta e a meta a ser obtida do conjunto.

A função desejabilidade é uma transformação de cada resposta a uma escala de 0 a 1. A resposta transformada é denominada de d_i pode ter várias formas. Porém, uma resposta 0 (zero) indica que ela é totalmente indesejável e a resposta 1 (um) mostra que é mais desejável.

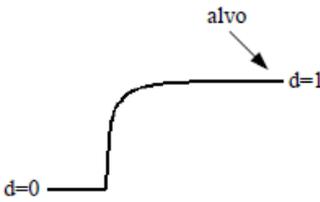
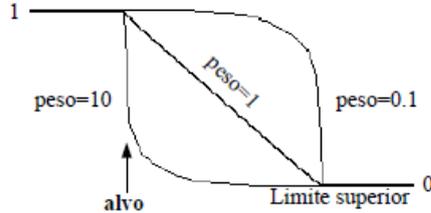
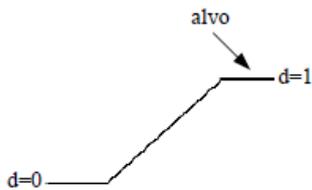
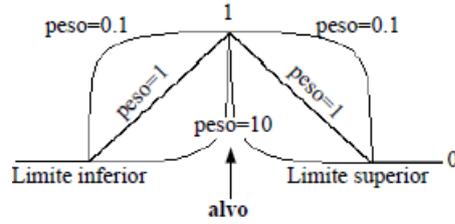
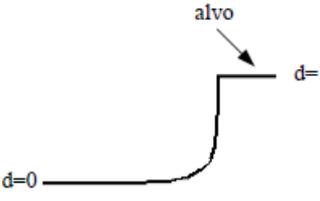
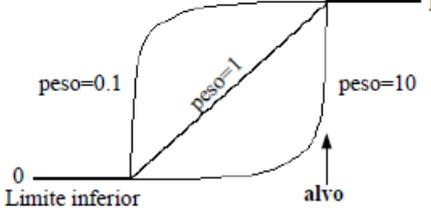
Peso	Função de Desejabilidade (d)	Quando a meta é:
0,1	<p>Um peso menor que 1 coloca menos ênfase no alvo; uma resposta longe do alvo pode levar a uma desejabilidade alta.</p> 	<p>-Minimizar a resposta.</p> <p>Abaixo do alvo a desejabilidade é 1 e acima do limite superior é 0.</p> 
1	<p>Um peso igual a 1 coloca ênfase idêntica no alvo e nos limites. A desejabilidade para a resposta aumenta linearmente.</p> 	<p>-Acertar a resposta.</p> <p>Abaixo do limite inferior, a desejabilidade é 0, no alvo é 1 e acima do limite superior é 0.</p> 
10	<p>Um peso maior que 1 coloca mais ênfase no alvo. A resposta deverá estar muito próxima do alvo para ter uma desejabilidade alta.</p> 	<p>-Maximizar a resposta.</p> <p>Abaixo do limite inferior a desejabilidade é 0 e acima do alvo é 1.</p> 

Figura 2.23: Função Desejabilidade
Fonte: Adaptado de Lima (2010)

A Figura 2.24 mostra como obter algumas formas da função Desejabilidade, pois, criá-las requer conhecimento prévio do pesquisador e existe grande flexibilidade de forma.

Nº	Para obter:	Forma de Desejabilidade
1	Maximizar (maior é melhor)	
2	Minimizar (menor é melhor)	
3	Alvo (um valor específico é melhor)	
4	Maximum Plateau (o produto é melhorado para um ponto, acima deste não é importante)	
5	Máximo Retorno Diminuindo (o produto é melhorado para um ponto, acima deste a melhoria é vista, mas não tão forte)	
6	Minimum Plateau (nenhum valor até um certo ponto)	
7	Mínimo Retorno Diminuindo (pequena melhoria até um ponto, a partir deste uma rápida melhoria)	

Figura 2.24: Alguns exemplos de formas da função Desejabilidade
 Fonte: Adaptado de Lima (2010)

O valor da desejabilidade composta (D) indica uma solução de compromisso das respostas avaliadas e fica restrito entre 0 e 1. Para D próximo de 1, indica que as respostas estão perto das especificações. O tipo de transformação depende da direção da otimização desejada.

3 ESTUDO DE CASO Nº 1

O experimento do estudo de caso nº 1 foi desenvolvido e realizado por Montalvão em seu trabalho de mestrado concluído em 1997 nesta universidade.

O trabalho da época teve como objetivo atingir um corte ótimo definido pelo bom acabamento superficial, a baixa perda de massa durante o corte e ausência de escórias no material em aço carbono ABNT 1020 com 15,9 mm de espessura cuja composição química aproximada é mostrada pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química aproximada do aço ABNT 1020

Classificação	C	Si	Mn	S máx	P máx
ABNT 1020					
SAE 1020	0,18% a 0,23%	0,25%	0,30% a 0,60%	0,05%	0,03%
AISI 1020					

O delineamento de experimentos utilizado foi o arranjo fatorial fracionado 2^{4-1}_{IV} com 3 réplicas totalizando 24 triagens (8 x 3). Foram selecionados 4 fatores a saber: Pressão, Corrente, Velocidade e Distância tocha-peça. Para cada fator foi estabelecido 2 níveis.

Para execução do experimento foi utilizado o equipamento de corte por plasma a ar comprimido operado manualmente do modelo Plasmarc C-70 da marca White Martins.

Maiores detalhes do experimento encontram-se no Anexo III.

3.1 Análise dos resultados do estudo de caso nº 1

Foram realizadas as análises de acordo com as respostas obtidas através do experimento: perda de massa, formação de escórias e acabamento. Os resultados estão disponíveis na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Caso 1 Respostas

Sequência	Fatores				Saídas		
	Pressão	Velocidade	Corrente	Distância	Perda Massa	Escória	Acabamento
1	5,3	12,4	62,5	3,04	7,930	5,895	8,49
2	7,1	12,4	62,5	4,38	7,983	5,827	12,84
3	5,3	23,7	62,5	4,38	9,580	7,586	116,29
4	7,1	23,7	62,5	3,04	7,652	5,142	15,21
5	5,3	12,4	70,0	4,38	6,543	4,587	9,26
6	7,1	12,4	70,0	3,04	4,857	4,018	28,04
7	5,3	23,7	70,0	3,04	6,404	4,246	7,35
8	7,1	23,7	70,0	4,38	7,463	5,265	2,55
9	5,3	12,4	62,5	3,04	7,515	5,400	35,05
10	7,1	12,4	62,5	4,38	8,088	6,164	5,02
11	5,3	23,7	62,5	4,38	9,766	7,405	114,64
12	7,1	23,7	62,5	3,04	7,737	5,608	14,44
13	5,3	12,4	70,0	4,38	6,759	5,212	8,28
14	7,1	12,4	70,0	3,04	4,911	4,161	9,57
15	5,3	23,7	70,0	3,04	6,513	4,104	12,25
16	7,1	23,7	70,0	4,38	7,398	5,129	5,95
17	5,3	12,4	62,5	3,04	7,248	5,637	13,59
18	7,1	12,4	62,5	4,38	7,898	6,454	8,22
19	5,3	23,7	62,5	4,38	9,159	7,701	10,05
20	7,1	23,7	62,5	3,04	7,396	5,408	10,53
21	5,3	12,4	70,0	4,38	6,360	5,045	38,95
22	7,1	12,4	70,0	3,04	5,501	4,748	30,74
23	5,3	23,7	70,0	3,04	6,251	4,191	6,75
24	7,1	23,7	70,0	4,38	7,116	5,119	23,68

3.1.1 Análise gráfica do estudo de caso nº 1

A análise foi realizada através do gráfico de Pareto dos efeitos para determinar a magnitude e a importância de um efeito. Este gráfico visualiza o valor absoluto dos efeitos e desenha uma linha referencial (P_{Lenth}) no mesmo. Qualquer efeito que ultrapasse a linha referencial é estatisticamente significativo.

Foram realizadas as análises na sequência de respostas: perda de massa, escória e acabamento.

3.1.1.1 Perda de massa do estudo de caso nº 1

Inicialmente, os cálculos foram realizados através do uso do software MINITAB cujos resultados encontram-se na Tabela 3.3. A magnitude de cada fator é mostrada pelo valor de T-value que é inserida no gráfico de Pareto e comparado com a linha referencial (P_{Lenth}).

Tabela 3.3: Caso 1 Valores de P-value para perda de massa

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constante		7,2512	0,0497	145,90	0,000
Pressão	-0,5023	-0,2512	0,0497	-5,05	0,000
Corrente	0,9035	0,4518	0,0497	9,09	0,000
Velocidade	-1,8230	-0,9115	0,0497	-18,34	0,000
Distância	1,1832	0,5916	0,0497	11,90	0,000
Pressão*Corrente	0,0172	0,0086	0,0497	0,17	0,865
Pressão*Velocidade	0,2383	0,1192	0,0497	2,40	0,029
Pressão*Distância	0,1322	0,0661	0,0497	1,33	0,202

A Figura 3.1 mostra o gráfico de Pareto para perda de massa mostrando quais fatores são significativos.

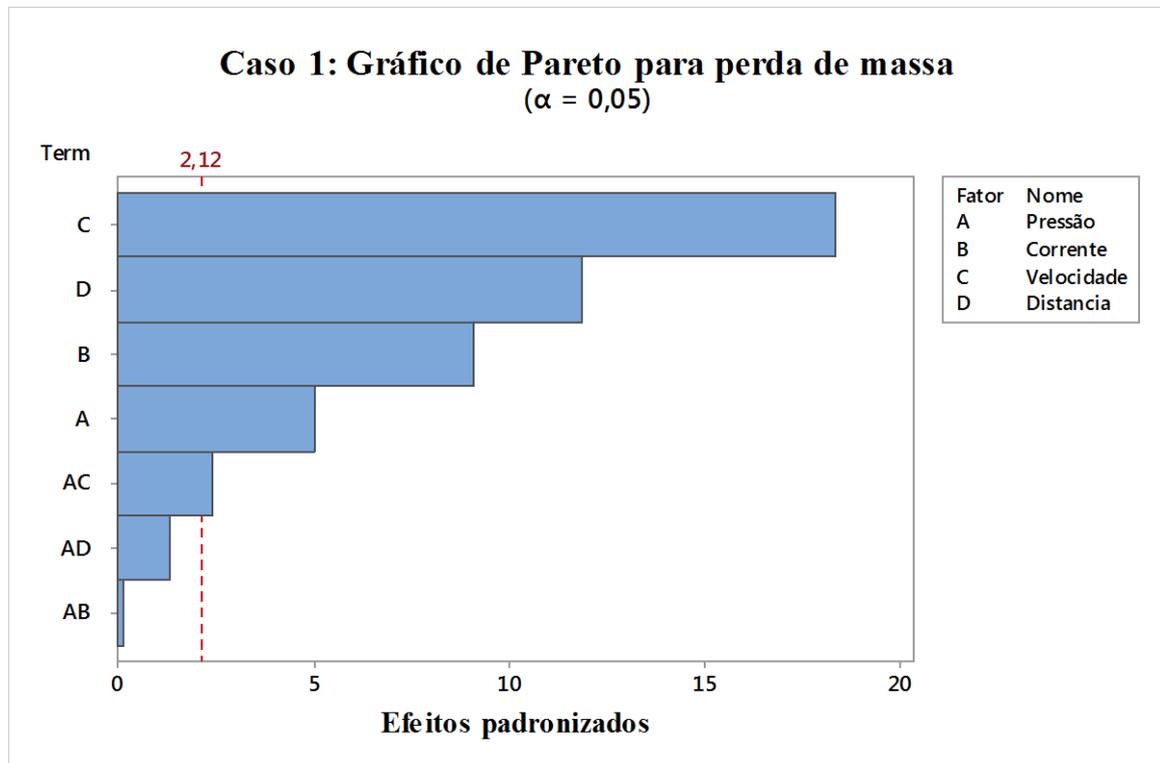


Figura 3.1: Caso 1 Gráfico de Pareto para perda de massa

Observou-se que para a perda de massa, o fator Velocidade é o mais significativo, seguido pela Distância, Corrente, Pressão e finalizando com a interação de Pressão e Velocidade.

Para avaliar se os resíduos da perda de massa é Normal, foi calculado por meio de técnica Anderson-Darling (AD) o valor de P-value está acima do nível de significância, isto é, maior que 0,05 e é mostrada pela Figura 3.2. Observe que o valor de P-value é de 0,397 acima dos 0,05, portanto, os dados tem distribuição Normal.

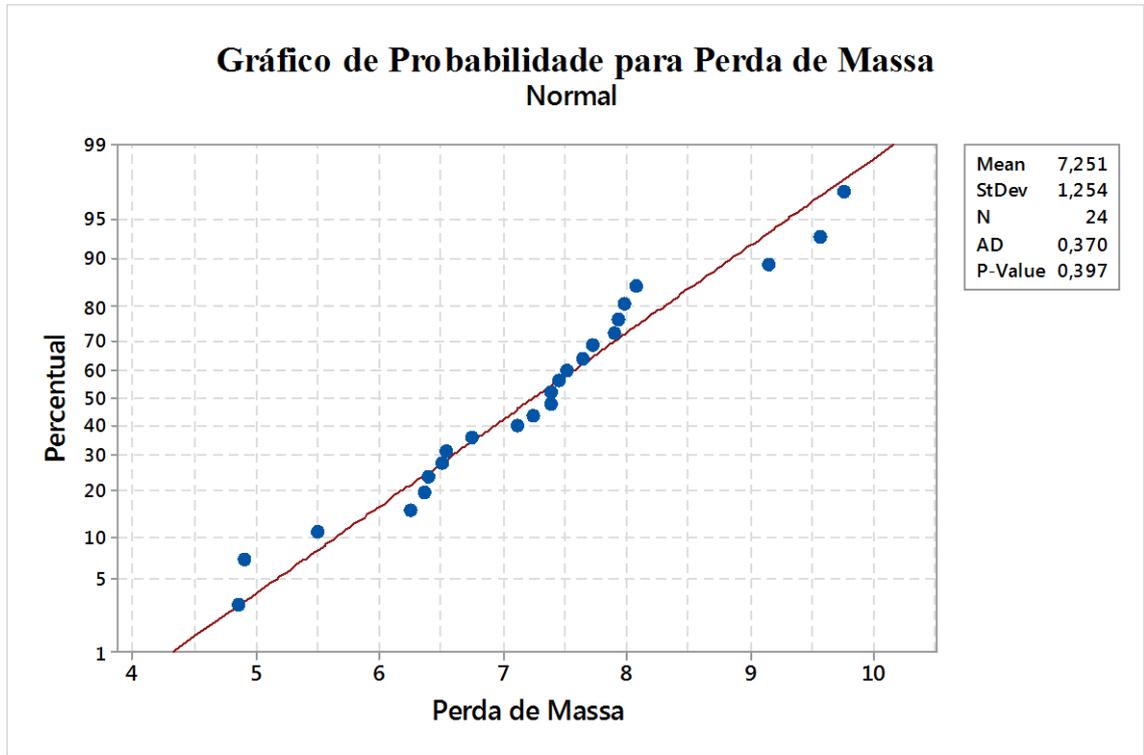


Figura 3.2: Caso 1 Gráfico Normal de Probabilidade para perda de massa

Quanto à distribuição de resíduos, a Figura 3.3 mostra formato da distribuição dos dados, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, *Lurking*.

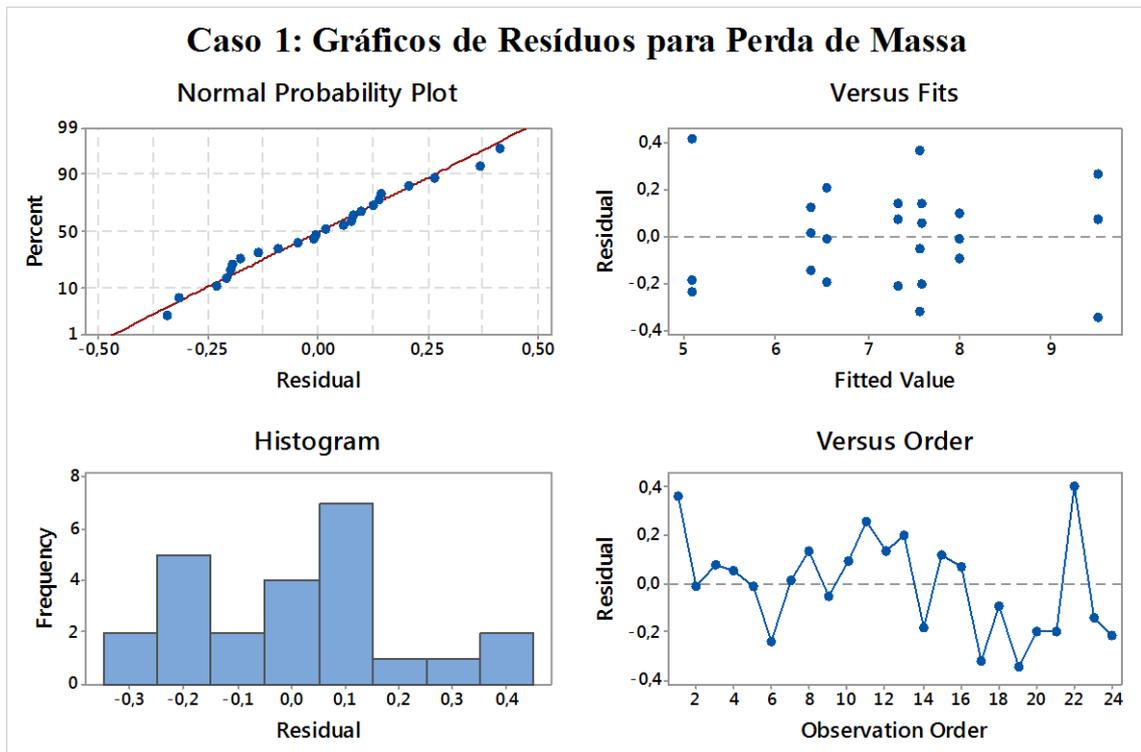


Figura 3.3: Caso 1 Gráficos de Resíduos para perda de massa

3.1.1.2 Formação de escórias do estudo de caso nº 1

A mesma análise da perda de massa foi aplicada a formação de escória.

A magnitude de cada fator da formação de escória é mostrada pelo valor de T-value na Tabela 3.4 que é inserida no gráfico de Pareto e comparado com a linha referencial (P_{Lenth}).

Tabela 3.4: Caso 1 Valores de P-value para escórias

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constante		5,4188	0,0512	105,89	0,000
Pressão	-0,3305	-0,1653	0,0512	-3,23	0,005
Corrente	0,3130	0,1565	0,0512	3,06	0,008
Velocidade	-1,5335	-0,7667	0,0512	-14,98	0,000
Distância	1,0780	0,5390	0,0512	10,53	0,000
Pressão*Corrente	-0,2632	-0,1316	0,0512	-2,57	0,021
Pressão*Velocidade	0,5063	0,2532	0,0512	4,95	0,000
Pressão*Distância	-0,2658	-0,1329	0,0512	-2,60	0,019

Na Figura 3.4, o Pareto mostra que todos os fatores ultrapassam o ponto de corte. Observa-se que o fator Velocidade é o mais significativo e finalizando com a interação de Pressão*Corrente.

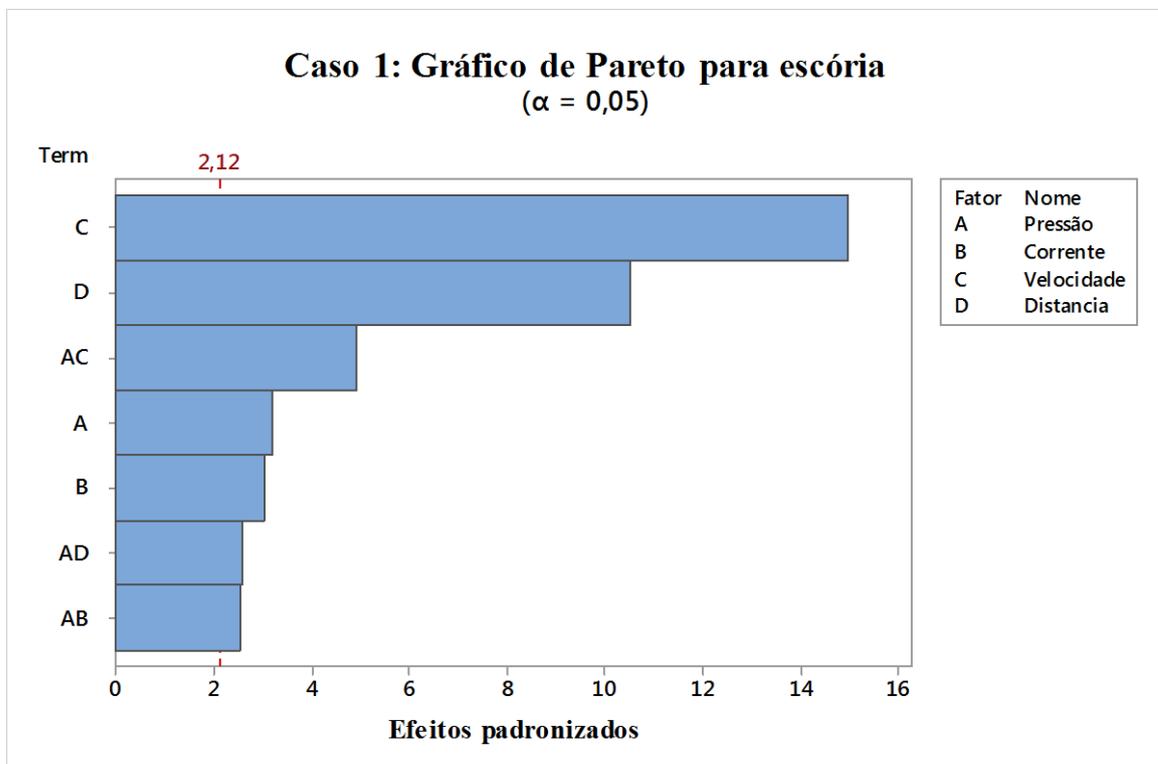


Figura 3.4: Caso 1 Gráfico de Pareto para escória

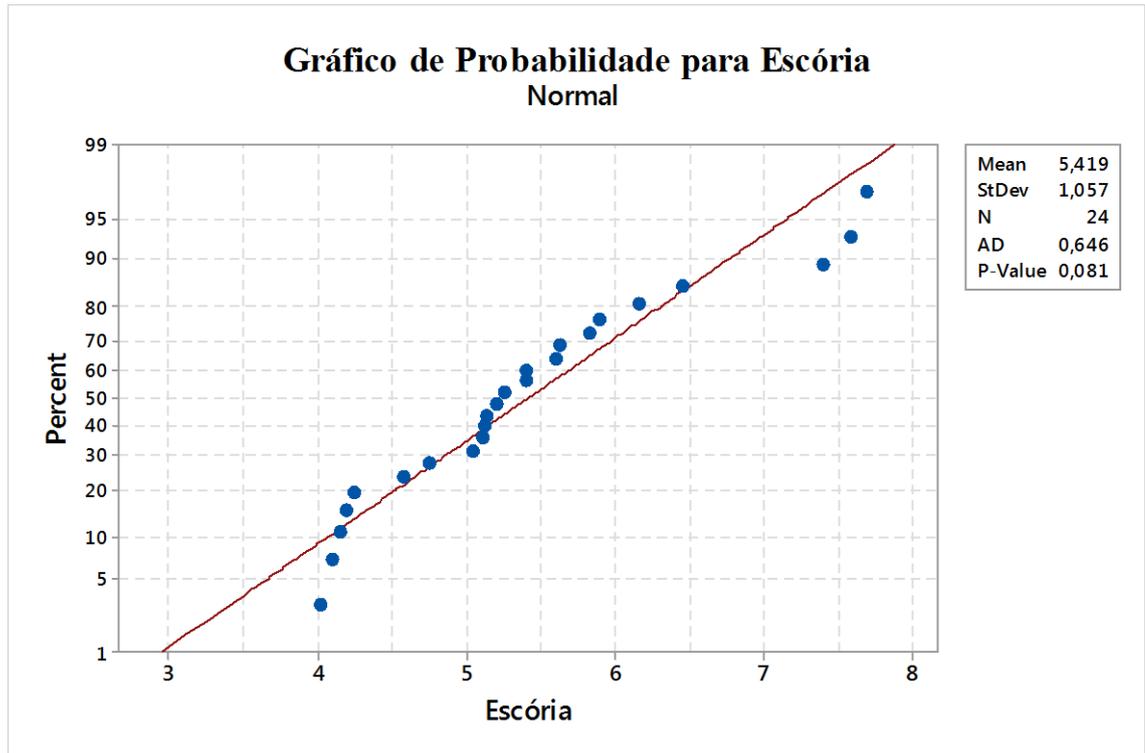


Figura 3.5: Caso 1 Gráfico Normal de Probabilidade para escória

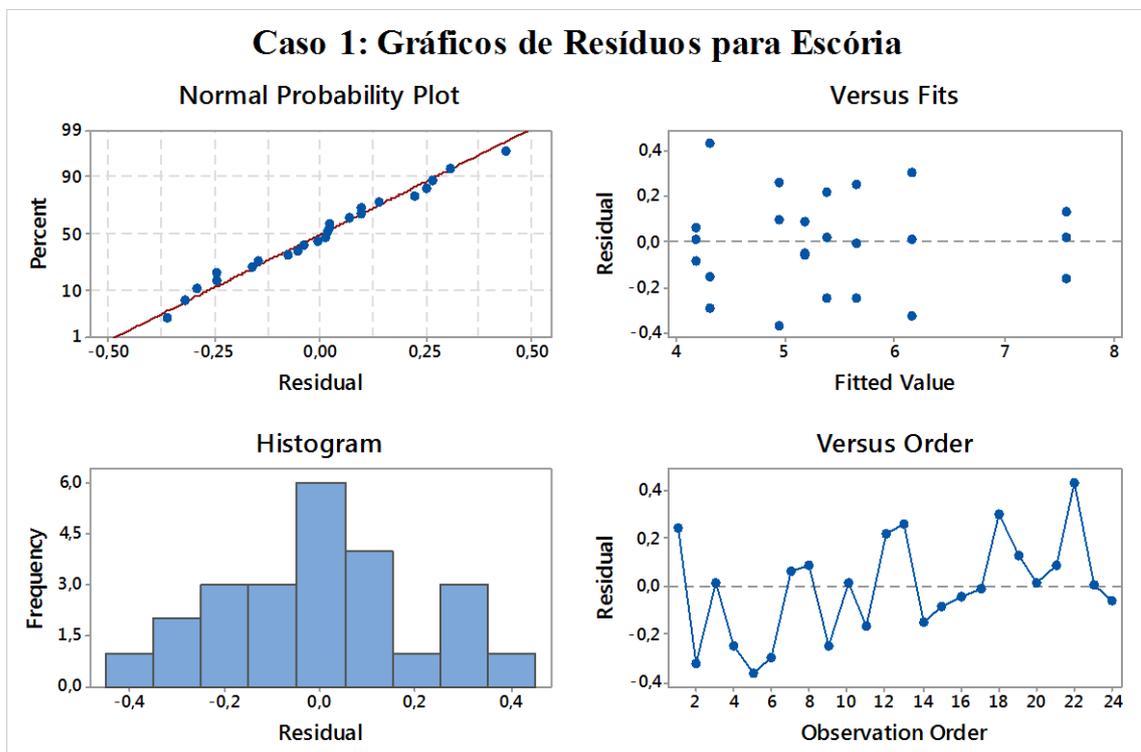


Figura 3.6: Caso 1 Gráficos de Resíduos para escória

Observe pela Figura 3.5 que o valor de P-value é de 0,081 acima dos 0,05, portanto, os dados tem distribuição Normal.

Pelo formato da distribuição dos dados mostrados pela Figura 3.6, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, *Lurking*.

3.1.1.3 Acabamento superficial

A magnitude de cada fator do acabamento superficial é mostrada pelo valor de T-value na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Caso 1 Valores de P-value para acabamento superficial

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constante		22,82	4,84	4,71	0,000
Pressão	-17,85	-8,92	4,84	-1,84	0,084
Corrente	10,97	5,49	4,84	1,13	0,274
Velocidade	-15,08	-7,54	4,84	-1,56	0,139
Distância	13,64	6,82	4,84	1,41	0,178
Pressão*Corrente	-14,65	-7,32	4,84	-1,51	0,150
Pressão*Velocidade	20,79	10,40	4,84	2,15	0,047
Pressão*Distância	-22,02	-11,01	4,84	-2,27	0,037

Na Figura 3.7, o gráfico de Pareto indica que as interações Pressão*Distância e Pressão*Velocidade são significativas.

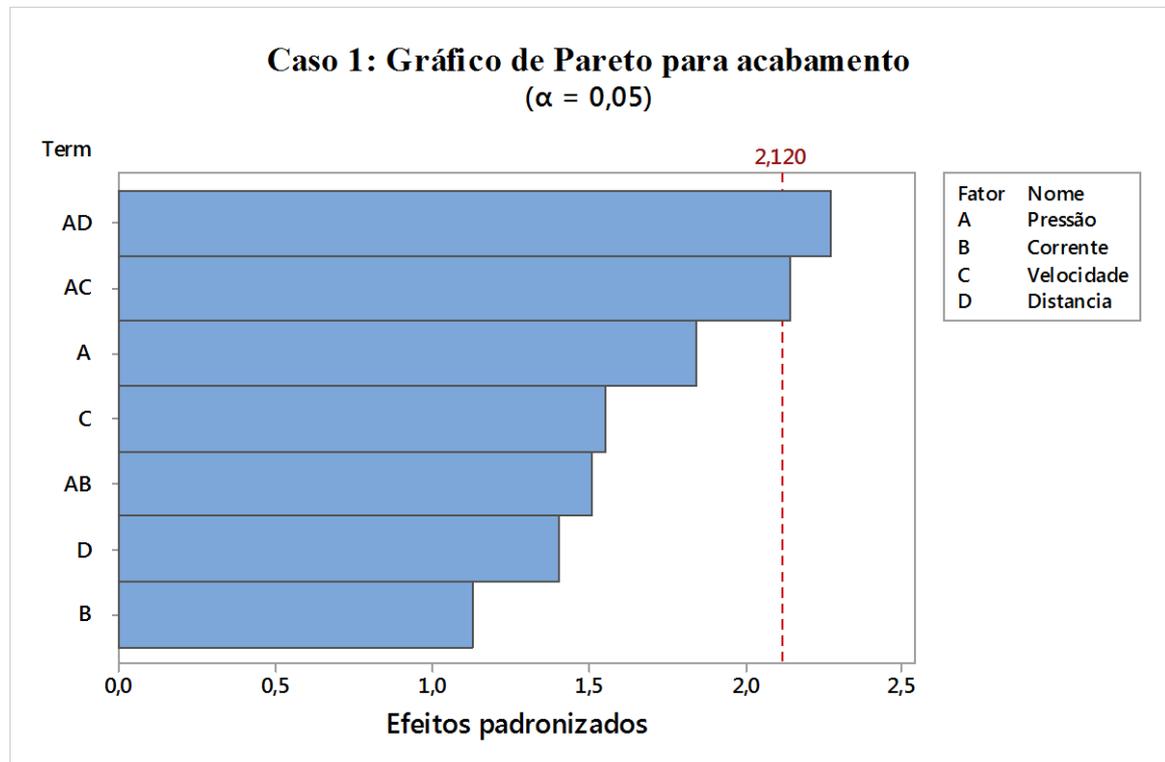


Figura 3.7: Caso 1 Gráfico de Pareto para acabamento

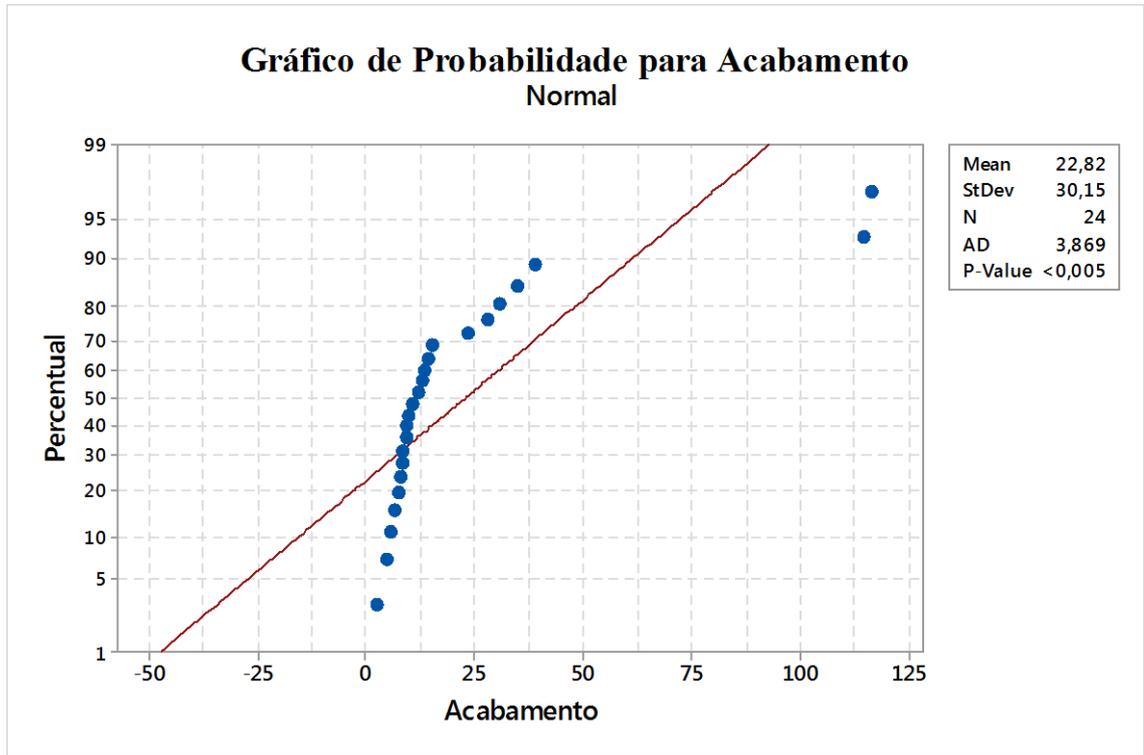


Figura 3.8: Caso 1 Gráfico Normal de Probabilidade para acabamentoo

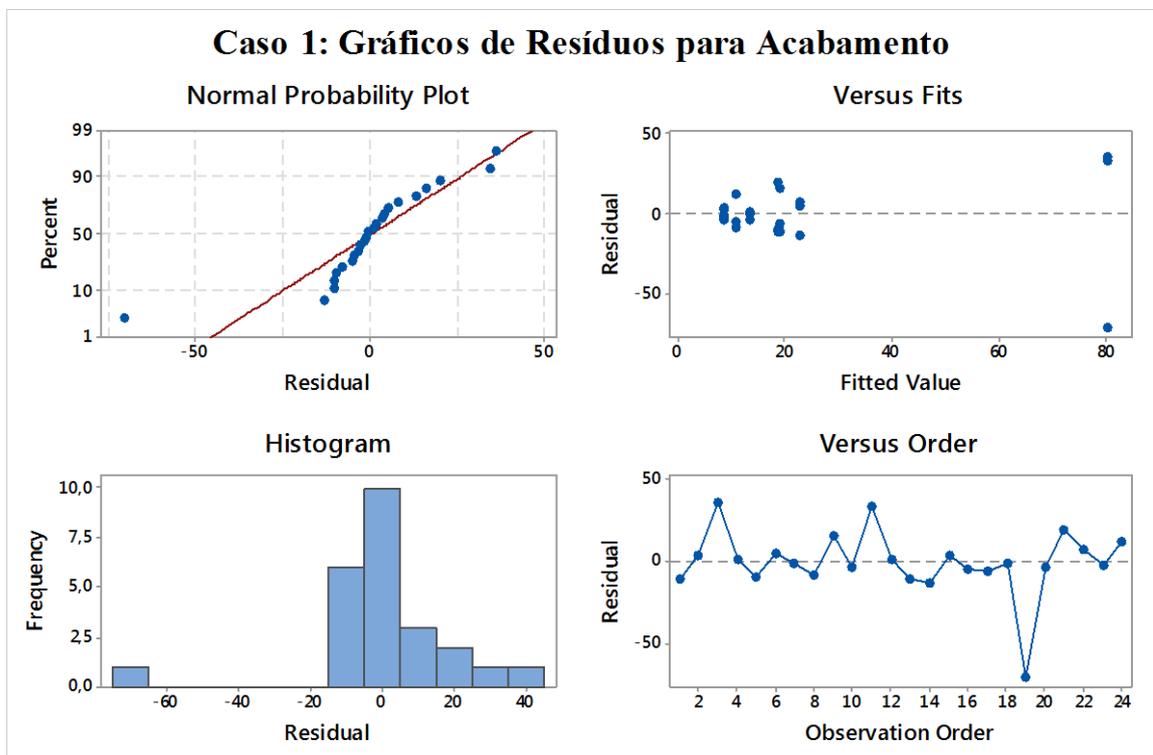


Figura 3.9: Caso 1 Gráficos de Resíduos para o acabamentoo

Avaliando o P-value do acabamento superficial mostrados pela Figura 3.8, este indica um valor inferior a 0,005 abaixo dos 0,05 estabelecidos. Os dados não estão representados por uma distribuição normal.

Conforme mostrado pela Figura 3.9, o formato da distribuição dos dados pode ter a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, *Lurking*. Além disso, existem dois pontos muito distantes do conjunto caracterizando um *outlier*

3.1.2 Modelagem matemática do estudo de caso nº 1

A partir dos dados experimentais apresentados pelas Tabela 3.6 e Tabela 3.7 é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. A estimação dos coeficientes foi feita utilizando o software estatístico MINITAB. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo trabalho em que são estudados os efeitos de quatro parâmetros pode-se formalizar a equação conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Caso 1 Coeficientes estimados

Termos	Coeficientes estimados					
	Perda de massa	P-value	Escória	P-value	Acabamento	P-value
Constante	7,2512	0,000	5,4188	0,000	22,820	0,000
Pressão	-0,2512	0,000	-0,1653	0,005	-8,920	0,084
Corrente	0,4517	0,000	0,1565	0,008	5,490	0,274
Velocidade	-0,9115	0,000	-0,7667	0,000	-7,540	0,139
Distância	0,5916	0,000	0,5390	0,000	6,820	0,178
Pressão*Corrente	0,0086	0,865	-0,1316	0,021	-7,320	0,150
Pressão*Velocidade	0,1192	0,029	0,2532	0,000	10,400	0,047
Pressão*Distância	0,0661	0,202	-0,1329	0,019	-11,010	0,037

Coeficientes em **negrito** são significativos

Tabela 3.7: Caso 1 ANOVA

Resposta	Graus de liberdade		Adj SS		Adj MS		F	P	S	R _A ²
	Regressão	Residual	Regressão	Residual	Regressão	Residual				
Perda de massa	7	16	35,19	0,94	5,02	0,05	84,82	0	0,243	96,23%
Escória	7	16	22,32	1,00	5,58	0,06	88,80	0	0,250	94,38%
Acabamento	7	16	11906,7	8999,3	1701	562,5	3,02	0,03	23,71	38,12%

A adequação dos modelos foi verificada utilizando a Análise de Variância (ANOVA) executada pelo software MINITAB.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados desta análise e mostra que todos os modelos desenvolvidos são adequados, pois apresentam P-values inferiores a 5% de significância. Os resultados da ANOVA indicam um R_A² para a perda de massa, escória e acabamento, respectivamente, 96,23%, 94,38% e 38,12%. Isto evidencia que a perda de massa e a escória

tiveram bons ajustes nos modelos desenvolvidos. Para o acabamento, o ajuste obtido foi de 38,12% devido à alguns fatores externos que podem não ter sido considerados como desgaste do diâmetro do bico.

3.2 Desejabilidade do estudo de caso nº 1

Como poder ser visto anteriormente, existem uma combinação de condições operacionais para cada resposta analisada conforme a faixa de operação. Quando há necessidade em saber apenas uma resposta, uma análise dos efeitos dos parâmetros principais e das interações entre parâmetros pode ser suficiente ou mais aprofundada. Entretanto, quando há o interesse em fazer uma análise multivariada, isto é, otimizar mais de uma resposta, a combinação dos parâmetros avaliados para uma resposta isolada não é suficiente para otimizar o processo, lembrando que a combinação mais indicada para uma resposta não foi a mesma para todas.

É nesta hora utilizou-se a função Desejabilidade para auxiliar no objetivo deste trabalho a encontrar condições operacionais adequadas para um conjunto de resposta buscando a melhor solução para atender todas as respostas analisadas simultaneamente.

Recapitulando o que foi descrito anteriormente, o índice global D pertence ao intervalo [0;1] e indica que se o valor ficar mais próxima de 1, mais próximas as repostas originais estarão de seus respectivos limites de especificação.

Para gerar uma combinação otimizada dos parâmetros avaliados, foi estabelecido uma faixa desejada para cada resposta, onde se aplica os critérios pré-estabelecidos conforme a necessidade. A função Desejabilidade indicou a melhor combinação de parâmetros que minimizou a perda de massa, a escória e o acabamento no processo de corte por plasma a ar comprimido.

Tabela 3.8: Caso 1 Faixas pré-estabelecidas para solução global

Resposta	Objetivo	Faixas utilizadas			Ordem de Importância
		Mínimo	Alvo	Máximo	
Perda de massa (%)	Minimizar	-	4,857	9,766	1
Escória (%)	Minimizar	-	4,018	7,701	1
Acabamento	Minimizar	-	2,550	116,290	1

A Tabela 3.8 mostra a faixa das respostas pré-ajustadas onde os pesos e a ordem de importância foram atribuídos iguais em todos os casos.

Por meio das respostas obtidas no experimento e das faixas desejadas encontrou-se uma combinação dos parâmetros que satisfaz, simultaneamente, a minimização das três respostas.

Tal combinação pode ser verificada na Tabela 3.9 onde a Solução Global representa os parâmetros que podem ser ajustados de acordo com a precisão dos equipamentos utilizados no experimento. Em função disso, a Tabela 3.10 apresenta o conjunto de respostas otimizado.

Tabela 3.9: Caso 1 Solução global praticável

Resultado	Desejabilidade	Pressão	Velocidade	Corrente	Distância
Solução Global	0,9688	6,1727	12,40	70,0	3,04
Solução Global Praticável	0,9616	6,2	12,5	70,0	3,1

Tabela 3.10: Caso 1 Respostas previstas para solução global praticável

Respostas	Acabamento	Escória	Perda de Massa
Resultado	3,6821	4,0076	5,3575
Desejabilidade	0,99005	1,000	0,89808

A forma gráfica das respostas previstas para solução global praticável encontra-se na Figura 3.10.

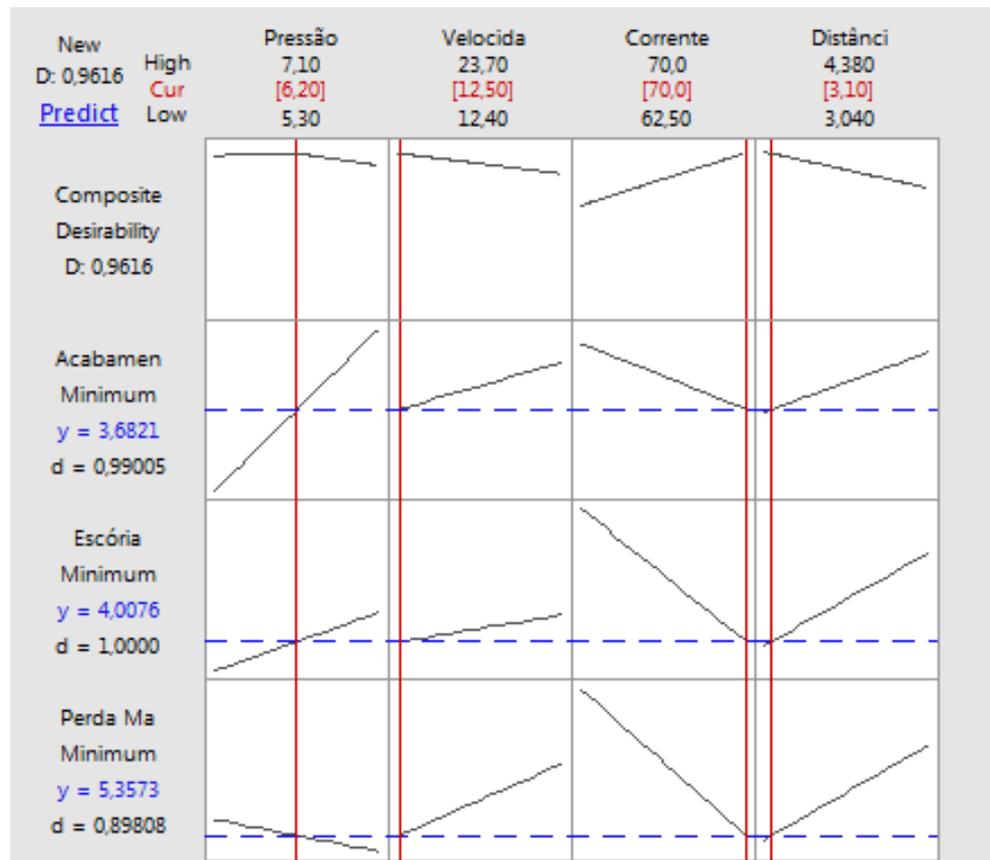


Figura 3.10: Caso 1 Gráfico para solução global praticável

4 ESTUDO DE CASO N° 2

O experimento do estudo de caso n° 2 foi desenvolvido e realizado por Pereira em sua primeira parte do trabalho de dissertação de mestrado concluído no ano 2000 nesta universidade.

O trabalho da época teve como objetivo verificar os efeitos geométricos da superfície cortada (ortogonalidade) do material metálico pelo processo de corte por plasma a ar comprimido.

O delineamento de experimentos utilizado foi o arranjo fatorial fracionado 2^{4-1}_{IV} com 2 réplicas totalizando 16 triagens (8 x 2). Foram selecionados 4 fatores a saber: Pressão, Corrente, Velocidade e Distância tocha-peça. Para cada fator foi estabelecido 2 níveis.

O material utilizado para este caso foi o aço carbono ABNT 1045 com 15,9 mm de espessura cuja composição química aproximada é mostrada pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição química aproximada ao aço ABNT 1045

Classificação	C	Si	Mn	S máx	P máx
ABNT 1045					
SAE 1045	0,43% a 0,50%	0,25%	0,60% a 0,90%	0,05%	0,03%
AISI 1045					

Tabela 4.2: Caso 2 Respostas

Sequência	Entradas				Saídas	
	Distância	Pressão	Corrente	Velocidade	Orto_e	Orto_d
1	3,0	5,3	62,50	12,4	6,5278	3,1667
2	4,5	5,3	62,50	23,1	8,2500	1,3055
3	3,0	7,1	62,50	23,1	8,0000	2,3334
4	4,5	7,1	62,50	12,4	5,2778	3,7222
5	3,0	5,3	70,00	23,1	7,2222	2,6667
6	4,5	5,3	70,00	12,4	7,6389	3,5833
7	3,0	7,1	70,00	12,4	7,1667	3,8333
8	4,5	7,1	70,00	23,1	8,4444	2,5555
9	3,0	5,3	62,50	12,4	6,1111	2,1667
10	4,5	5,3	62,50	23,1	8,8055	2,0556
11	3,0	7,1	62,50	23,1	7,8611	2,0555
12	4,5	7,1	62,50	12,4	5,0278	4,2500
13	3,0	5,3	70,00	23,1	6,9167	2,1945
14	4,5	5,3	70,00	12,4	7,0278	3,8055
15	3,0	7,1	70,00	12,4	6,7778	3,5000
16	4,5	7,1	70,00	23,1	8,1667	3,1945

Para execução do experimento foi utilizado o equipamento de corte por plasma a ar comprimido operado manualmente do modelo Plasmarc C-70 da marca White Martins.

Os detalhes do experimento do estudo de caso nº 2 encontram-se no Anexo IV.

4.1 Análise gráfica do estudo de caso nº 2

A análise foi realizada através do gráfico de Pareto dos efeitos para determinar a magnitude e a importância de um efeito. Este gráfico visualiza o valor absoluto dos efeitos e desenha uma linha referencial (P_{Lenth}) no mesmo. Qualquer efeito que ultrapasse a linha referencial é estatisticamente significativo.

Foram realizadas as análises na sequência de respostas: Ortogonalidade direita (Orto_d) e Ortogonalidade esquerda (Orto_e).

4.1.1 Ortogonalidade direita do estudo de caso nº 2

Inicialmente, os cálculos foram realizados através do uso do software MINITAB cujos resultados encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Caso 2 Valores de P-value para ortogonalidade direita

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constante		2,8990	0,110	26,36	0,000
Distância	0,319	0,1600	0,110	1,45	0,190
Pressão	0,563	0,2810	0,110	2,56	0,038
Corrente	0,535	0,2670	0,110	2,43	0,045
Velocidade	-1,208	-0,6040	0,110	-5,49	0,001
Distância*Pressão	0,181	0,0900	0,110	0,82	0,439
Distância*Corrente	-0,083	-0,0420	0,110	-0,38	0,716
Distância*Velocidade	-0,354	-0,1770	0,110	-1,61	0,151

Na Figura 4.1, o gráfico de Pareto indica os fatores mais significativos foram: Velocidade, Pressão e Corrente.

Avaliando pela Figura 4.2, este indica que é normal evidenciado com o P-value de 0,333. Os dados estão representados por uma distribuição normal.

Conforme mostrado pela Figura 4.3, o formato da distribuição dos dados, não evidenciou a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

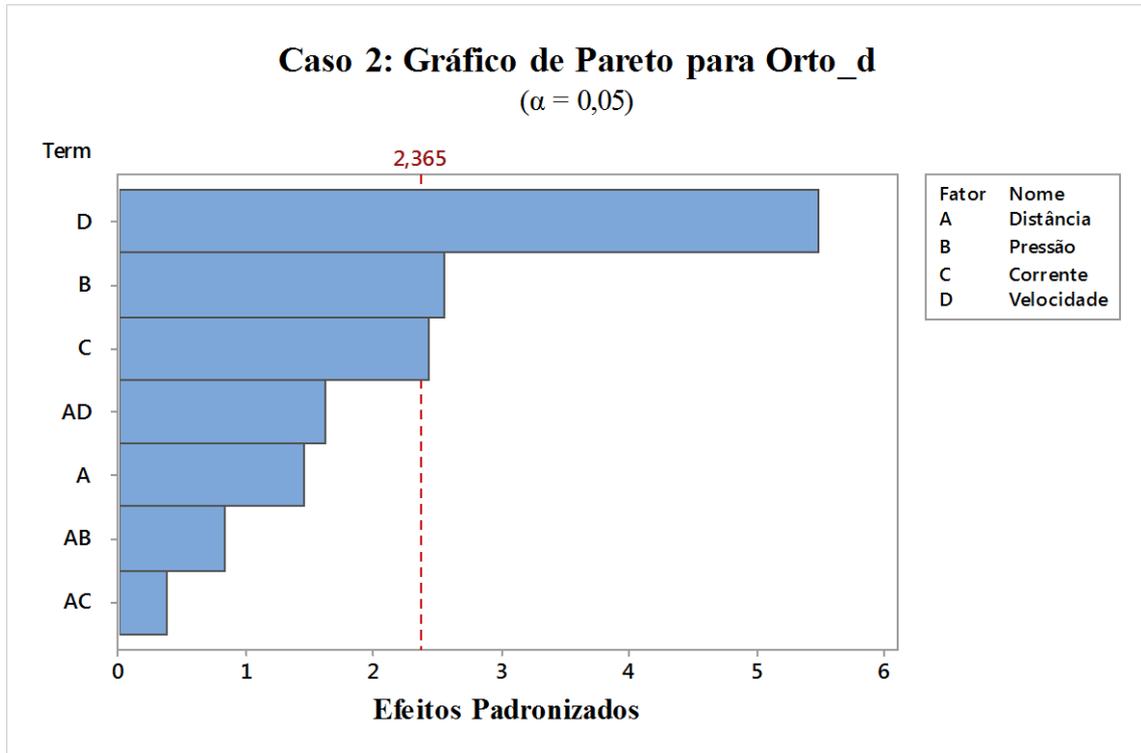


Figura 4.1: Caso 2 Gráfico de Pareto para Orto_d

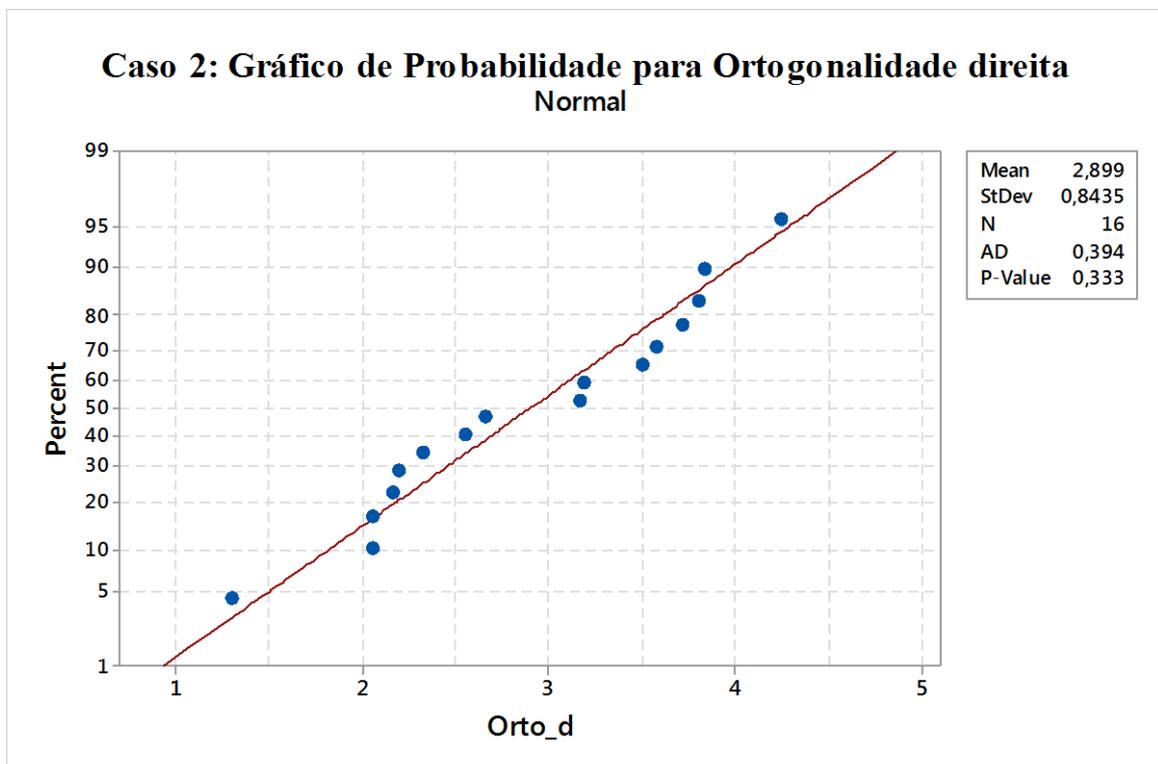


Figura 4.2: Caso 2 Gráfico Normal de Probabilidade para ortogonalidade direita

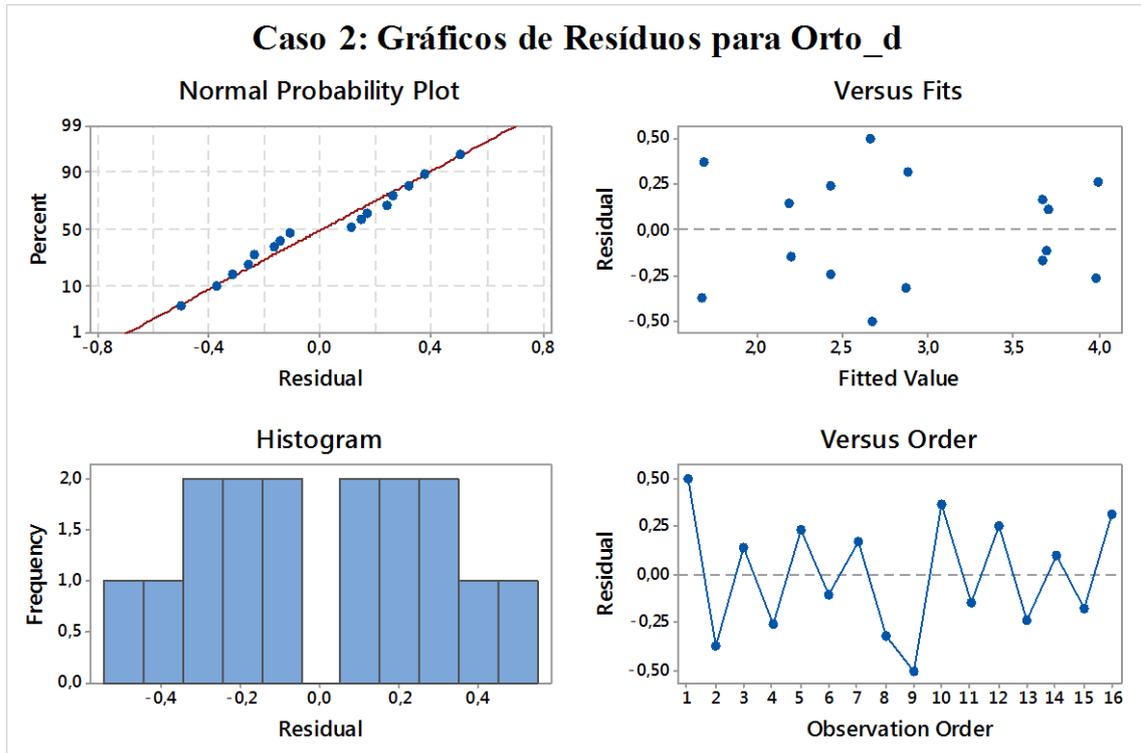


Figura 4.3: Caso 2 Gráficos de Resíduos para Orto_d

4.1.2 Ortogonalidade esquerda do estudo de caso n° 2

Inicialmente, os cálculos foram realizados através do uso o software MINITAB cujos resultados encontram-se na Tabela 4.4.

Na Figura 4.4, gráfico de Pareto indica que os fatores mais significativos são: velocidade, distância*pressão, distância*velocidade, distância*corrente e corrente.

Tabela 4.4: Caso 2 Valores de P-value para ortogonalidade esquerda

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constante		7,2014	0,0612	117,66	0,000
Distância	0,2569	0,1285	0,0612	2,10	0,074
Pressão	-0,2222	-0,1111	0,0612	-1,82	0,112
Corrente	0,4375	0,2188	0,0612	3,57	0,009
Velocidade	1,5139	0,7569	0,0612	12,37	0,000
Distância*Pressão	-0,9792	-0,4896	0,0612	-8,00	0,000
Distância*Corrente	0,5417	0,2708	0,0612	4,42	0,003
Distância*Velocidade	0,6597	0,3299	0,0612	5,39	0,001

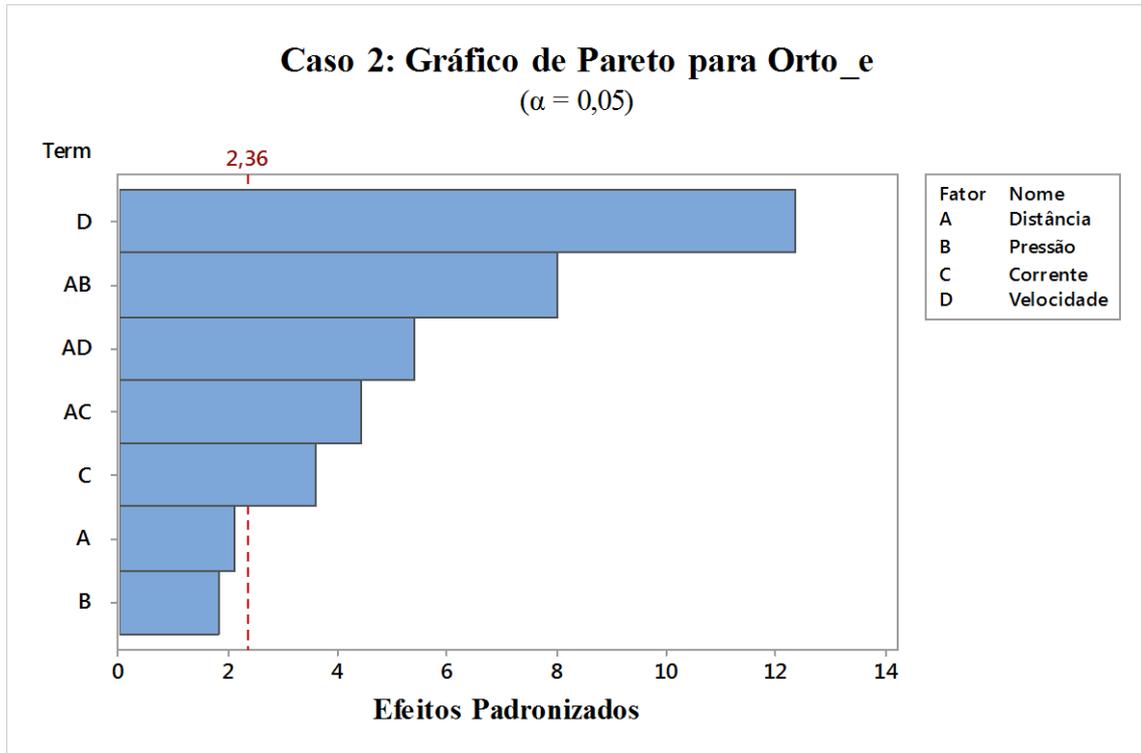


Figura 4.4: Caso 2 Gráfico de Pareto para Orto_e

Segundo a Figura 4.5, este indica que é normal evidenciado com o P-value de 0,631. Os dados estão representados por uma distribuição normal.

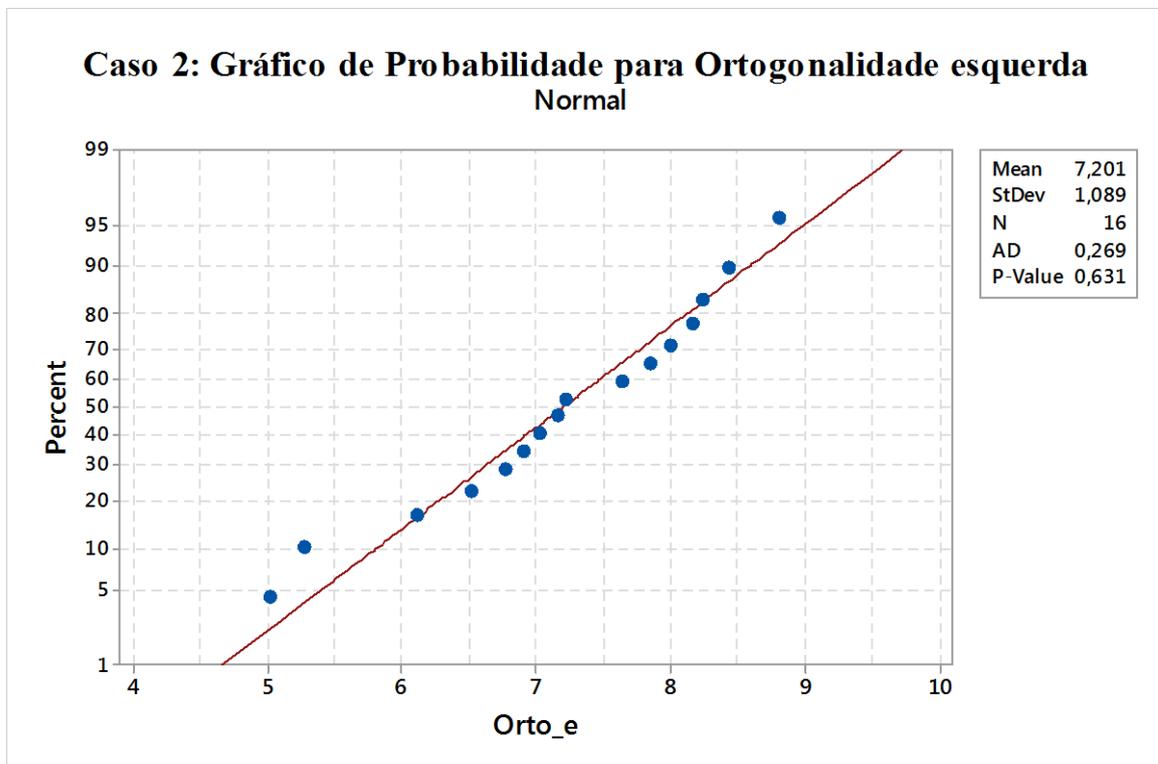


Figura 4.5: Caso 2 Gráfico Normal de Probabilidade para ortogonalidade esquerda

Pelo formato da distribuição dos dados mostrado pela Figura 4.6, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

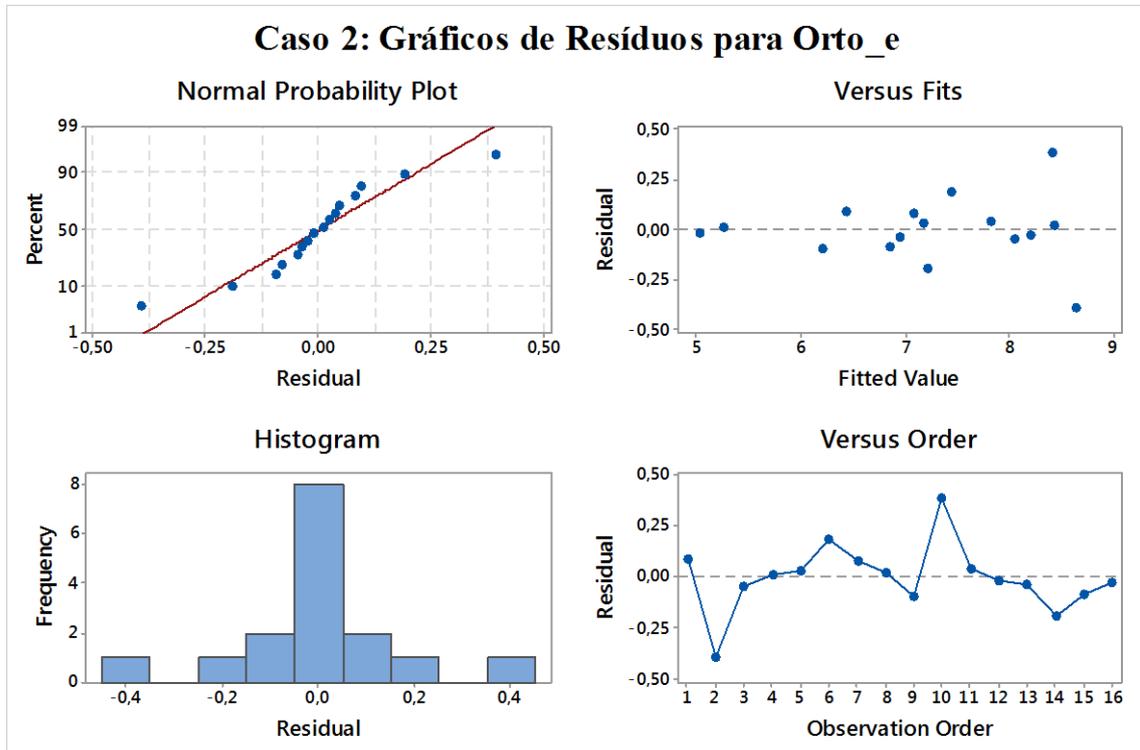


Figura 4.6: Caso 2 Gráficos de Resíduos para Orto_e

4.2 Modelagem matemática do estudo de caso nº 2

A partir dos dados experimentais apresentados pelas Tabela 4.5 e Tabela 4.6, é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. A estimação dos coeficientes foi feita utilizando o software estatístico MINITAB. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo trabalho em que são estudados os efeitos de quatro parâmetros pode-se formalizar a equação conforme a Tabela 4.5.

A adequação dos modelos foi verificada utilizando a Análise de Variância (ANOVA) executada pelo software MINITAB. A Tabela 4.6 apresenta os resultados desta análise e mostra que todos os modelos desenvolvidos são adequados, pois apresentam P-values inferiores a 5% de significância. Sabendo que a ortogonalidade esquerda fica acima do normalizado devido ao próprio processo de corte por plasma a ar comprimido, os resultados da ANOVA indicam que todos os modelos desenvolvidos apresentaram bons ajustes, evidenciados pelos valores de R_A^2 superiores a 75%.

Tabela 4.5: Caso 2 coeficientes estimados

Termos	Coeficientes estimados			
	Orto e	P-value	Orto d	P-value
Constante	7,2015	0,000	2,8990	0,000
Distância	0,1285	0,104	0,1600	0,159
Pressão	-0,1111	0,152	0,2810	0,026
Corrente	0,2188	0,014	0,2670	0,032
Velocidade	0,7569	0,000	-0,6040	0,000
Distância*Pressão	-0,4896	0,000	0,0900	0,406
Distância*Corrente	0,2707	0,005	-0,0420	0,696
Distância*Velocidade	0,3299	0,002	-0,1770	0,124

Coeficientes em **negrito** são significativos

Tabela 4.6: Caso 2 ANOVA

Resposta	Graus de liberdade		Adj SS		Adj MS		F	P	S	R-sq (adj)
	Regressão	Residual	Regressão	Residual	Regressão	Residual				
Orto e	7	8	17,1428	0,6296	2,44898	0,0787	31,12	0,000	0,280540	93,36%
Orto d	7	8	9,3144	0,16934	1,33062	0,16934	7,86	0,005	0,411507	76,19%

4.3 Desejabilidade do estudo de caso nº 2

Conforme realizado no estudo de caso anterior, aplicou-se a função Desejabilidade para auxiliar no objetivo deste trabalho a encontrar condições operacionais adequadas para um conjunto de resposta buscando a melhor solução para atender todas as respostas analisadas simultaneamente.

Para gerar uma combinação otimizada dos parâmetros avaliados, foi estabelecido uma faixa desejada para cada resposta, onde se aplica os critérios pré-estabelecidos conforme a necessidade. A função Desejabilidade indicou a melhor combinação de parâmetros que minimizou ortogonalidade direita e a ortogonalidade esquerda.

Tabela 4.7: Caso 2 faixas pré-estabelecidas para solução global

Resposta	Objetivo	Faixas utilizadas			Ordem de Importância
		Mínimo	Alvo	Máximo	
Ortogonalidade esquerda (°)	Minimizar	-	5,02777	8,80553	1
Ortogonalidade direita (°)	Minimizar	-	1,30553	4,25003	1

Conforme exposto Tabela 4.7, em termos da função desejabilidade, todas as respostas (ortogonalidade direita e ortogonalidade esquerda) foram ajustadas para serem minimizadas, isto é, terem os menores valores possíveis.

Por meio das respostas obtidas no experimento e das faixas desejadas encontrou-se uma combinação dos parâmetros que satisfaz, simultaneamente, a minimização das três respostas.

Tal combinação pode ser verificada na Tabela 4.8 onde a Solução Global representa os parâmetros que podem ser ajustados de acordo com a precisão dos equipamentos utilizados no experimento. Em função disso, Tabela 4.9 apresenta o conjunto de respostas otimizado.

Tabela 4.8: Caso 2 Solução global praticável

Resultado	Desejabilidade	Pressão	Velocidade	Corrente	Distância
Solução Global	0,6101	5,3	18,0541	62,5	3,0
Solução Global Praticável	0,6101	5,3	18,0	62,5	3,0

Tabela 4.9: Caso 2 Respostas previstas para solução global praticável

Respostas	Ortogonalidade direita	Ortogonalidade esquerda
Resultado	2,2196	6,7665
Desejabilidade	0,68956	0,53975

A forma gráfica das respostas previstas para solução global praticável encontra-se na Figura 4.7.

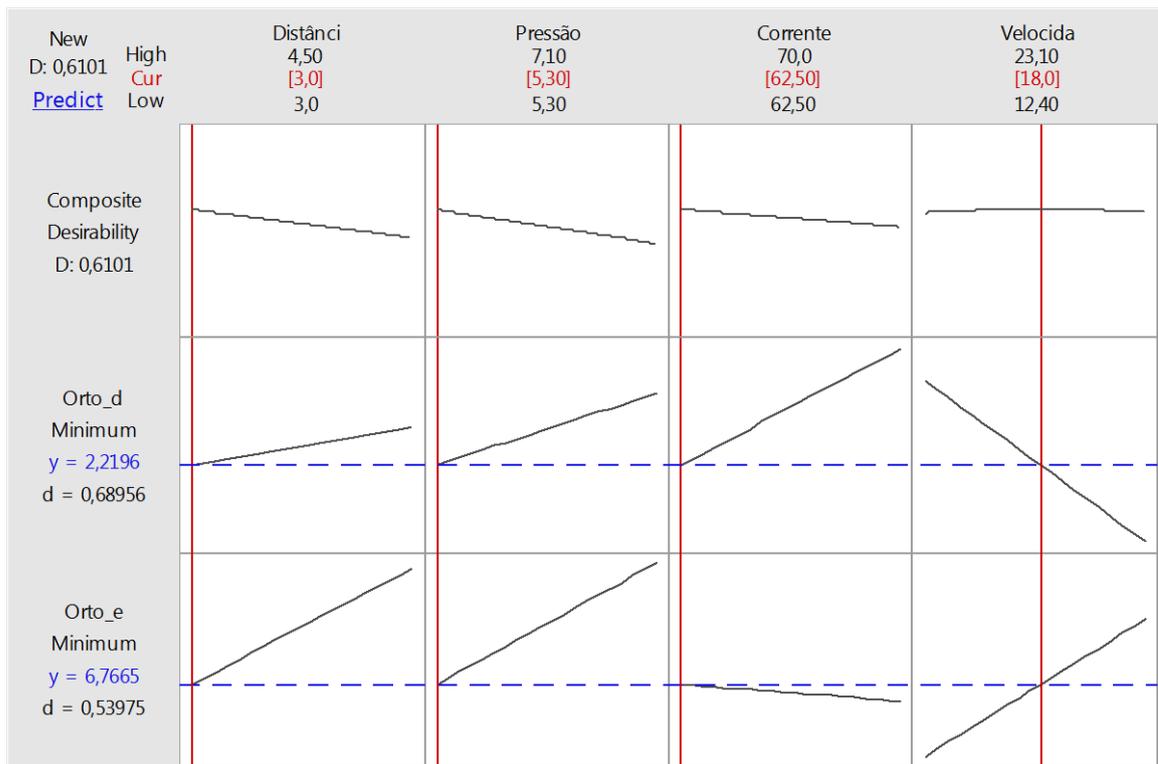


Figura 4.7: Caso 2 Função Desejabilidade

5 ESTUDO DE CASO Nº 3

O experimento do estudo de caso nº 3 foi desenvolvido e realizado por Pereira em sua segunda e última parte do trabalho de dissertação de mestrado concluído no ano 2000 nesta universidade.

O trabalho da época teve como objetivo verificar os efeitos metalúrgicos, especificamente, a extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e as variações dos níveis de dureza da mesma zona transformada do material metálico pelo processo de corte por plasma a ar comprimido.

O delineamento de experimentos utilizado foi o arranjo fatorial fracionado 2^{4-1}_{IV} com 2 réplicas totalizando 16 triagens (8 x 2). Foram selecionados 4 fatores a saber: Pressão, Corrente, Velocidade e Distância tocha-peça. Para cada fator foi estabelecido 2 níveis.

Os materiais utilizados para este caso foram os aços carbono ABNT 1045 e ABNT 1020 com 15,9 mm de espessura.

Os detalhes do experimento encontram-se no Anexo V.

5.1 Análises da ZTA

Para medição da ZTA (mm²) foram coletadas 16 medidas conforme mostra a Tabela 5.1

Tabela 5.1: Caso 3 Medição da ZTA para aço ABNT 1045

Sequência	Distância	Pressão	Corrente	Velocidade	ZTA ABNT 1045
1	3,0	5,3	62,5	12,4	23,23
2	4,5	5,3	62,5	23,1	25,12
3	3,0	7,1	62,5	23,1	25,83
4	4,5	7,1	62,5	12,4	25,33
5	3,0	5,3	70,0	23,1	27,88
6	4,5	5,3	70,0	12,4	24,54
7	3,0	7,1	70,0	12,4	26,93
8	4,5	7,1	70,0	23,1	21,09
9	3,0	5,3	62,5	12,4	23,38
10	4,5	5,3	62,5	23,1	26,12
11	3,0	7,1	62,5	23,1	25,79
12	4,5	7,1	62,5	12,4	23,84
13	3,0	5,3	70,0	23,1	28,59
14	4,5	5,3	70,0	12,4	24,24
15	3,0	7,1	70,0	12,4	26,59
16	4,5	7,1	70,0	23,1	23,04

A magnitude de cada fator da zona termicamente afetada (ZTA) é mostrada pelo valor de T-value na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Caso 3 Valores de P-value para ZTA no aço ABNT 1045

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constante		25,096	0,182	137,89	0,000
Distância	-1,863	-0,931	0,182	-5,12	0,001
Pressão	-0,583	-0,291	0,182	-1,60	0,154
Corrente	0,532	0,266	0,182	1,46	0,187
Velocidade	0,673	0,336	0,182	1,85	0,107
Distância*Pressão	-1,098	-0,549	0,182	-3,02	0,020
Distância*Corrente	-2,407	-1,204	0,182	-6,61	0,000
Distância*Velocidade	-1,318	-0,659	0,182	-3,62	0,009

Iniciou-se por meio de avaliação gráfica, a análise da extensão da zona termicamente afetada (ZTA) do aço ABNT 1045.

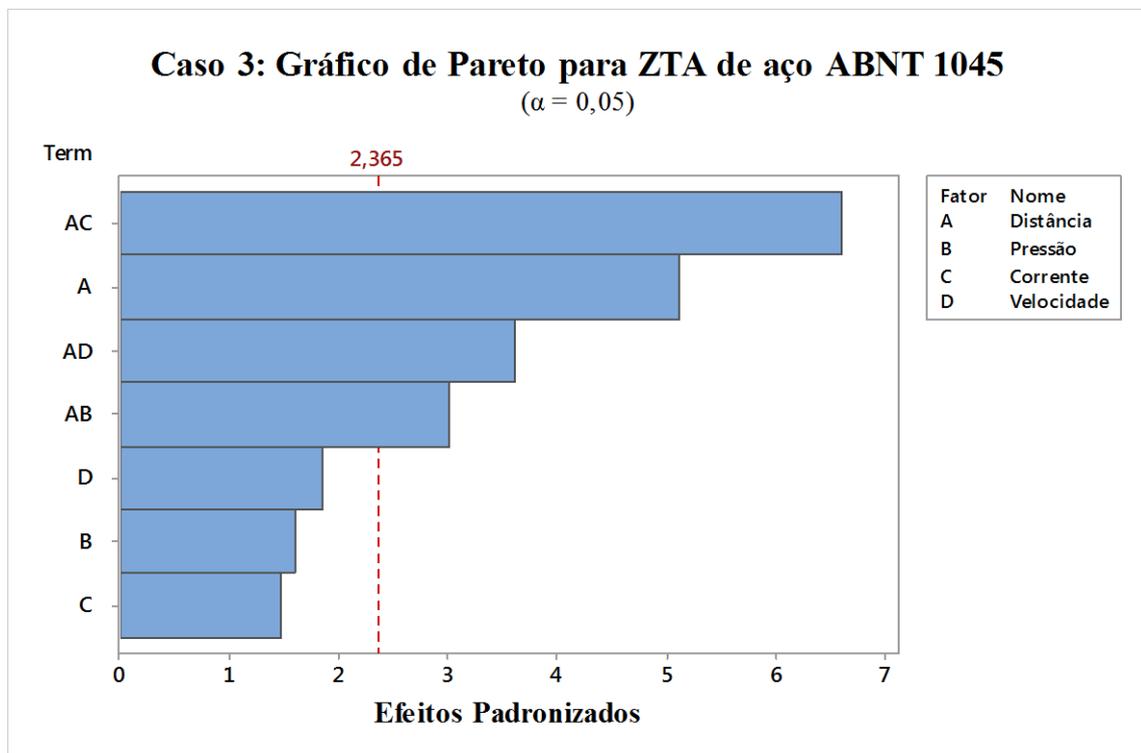


Figura 5.1: Caso 3 Gráfico de Pareto para ZTA com aço ABNT 1045

Observando o gráfico de Pareto da Figura 5.1, os fatores significativos foram ordenados como segue: Distância*Corrente, Distância, Distância*Velocidade e Distância*Pressão.

A Figura 5.2 indica os dados são normais evidenciados com o P-value de 0,987.

Avaliando os gráficos de resíduos para ZTA mostrada pela Figura 5.3, o formato da distribuição dos dados, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

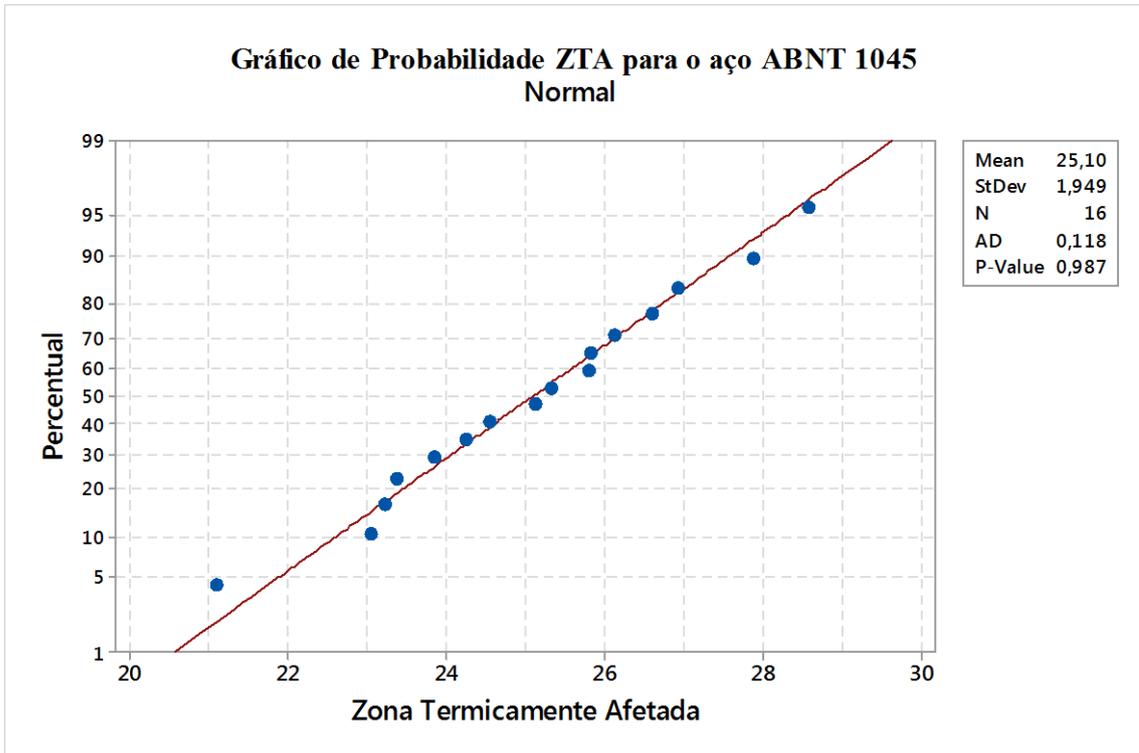


Figura 5.2: Caso 3 Gráfico Normal de Probabilidade para ZTA

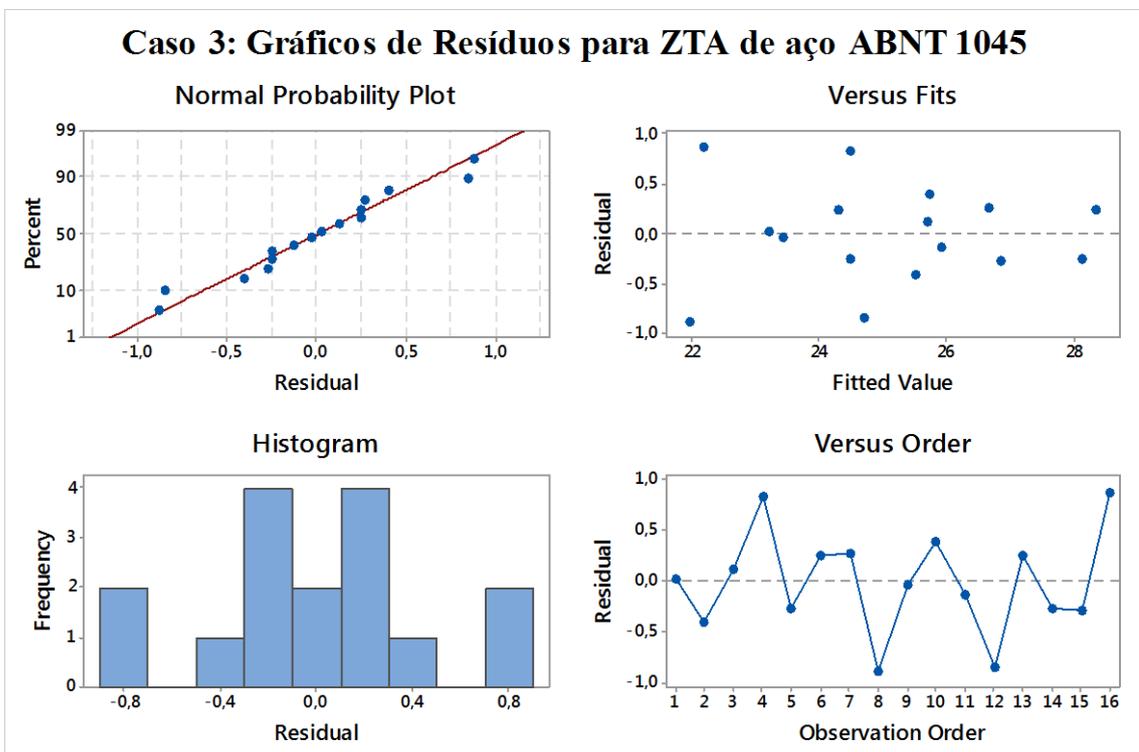


Figura 5.3: Caso 3 Gráficos de Resíduos para ZTA

5.2 Análises da dureza na ZTA

Foram analisados a dureza na ZTA dos aços carbono ABNT 1045 e o ABNT 1020.

Inicialmente, para o aço carbono ABNT 1045 foram medidas as durezas nos seguintes pontos:

- 0,25 mm;
- 0,50 mm;
- 1,00 mm;
- 1,50 mm;
- 2,00 mm.

As durezas medidas nos pontos acima encontram-se no Anexo V.

A Figura 5.4 plotada com os dados do Anexo V mostra a dureza nos pontos da zona termicamente afetada (ZTA) do aço ABNT 1045 dos corpos de prova (CP). Observa-se que a dureza é mais alta no ponto de corte e vai se reduzindo a medida que se aprofunda.

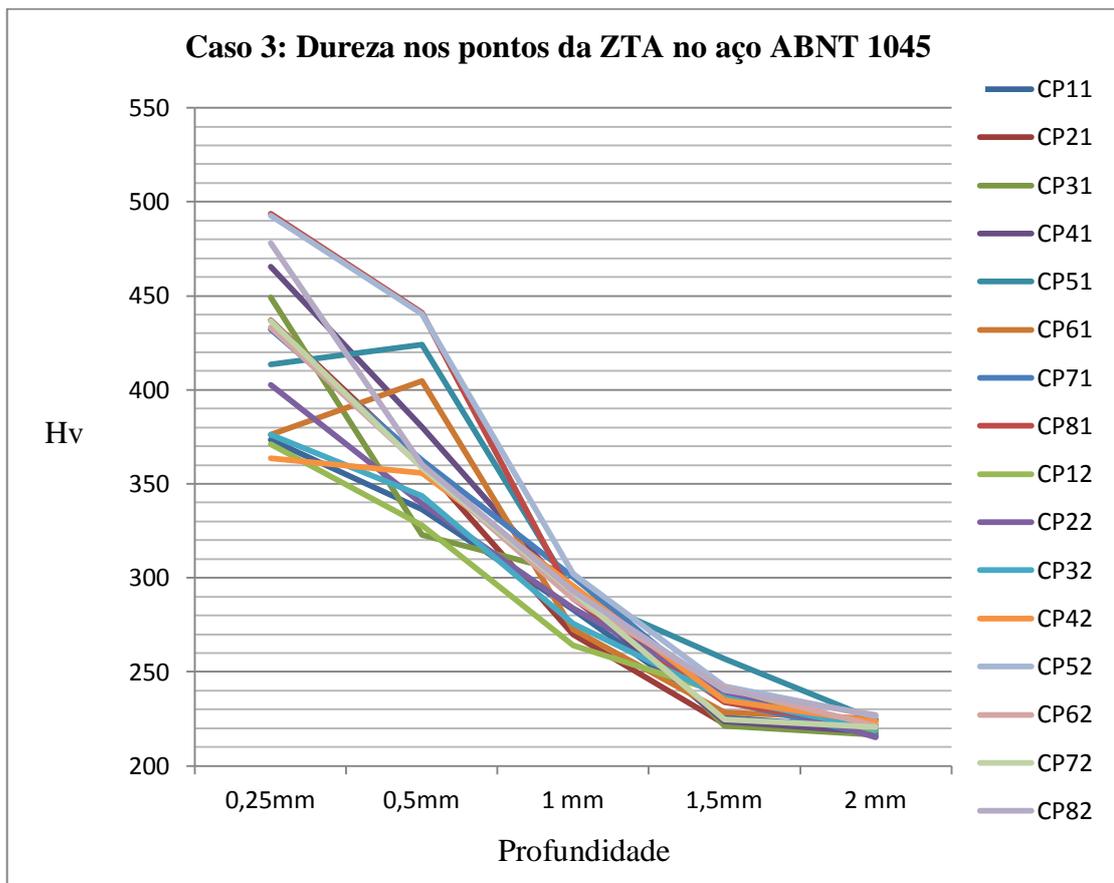


Figura 5.4: Caso 3 Dureza nos pontos da ZTA no aço ABNT 1045

Selecionou-se o valor médio da dureza dos pontos medidos mostrada pela Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Caso 3 Dureza média Hv do aço ABNT 1045 e ABNT 1020

Sequência	Distância	Pressão	Corrente	Velocidade	Dureza média Hv	
					ABNT 1045	ABNT 1020
1	3,0	5,3	62,5	12,4	287,85	133,67
2	4,5	5,3	62,5	23,1	302,34	133,33
3	3,0	7,1	62,5	23,1	302,45	136,67
4	4,5	7,1	62,5	12,4	315,36	132,33
5	3,0	5,3	70,0	23,1	322,23	134,67
6	4,5	5,3	70,0	12,4	301,34	131,67
7	3,0	7,1	70,0	12,4	309,05	132,67
8	4,5	7,1	70,0	23,1	335,42	135,67
9	3,0	5,3	62,5	12,4	284,01	131,67
10	4,5	5,3	62,5	23,1	295,98	131,00
11	3,0	7,1	62,5	23,1	290,16	130,33
12	4,5	7,1	62,5	12,4	294,71	132,00
13	3,0	5,3	70,0	23,1	340,77	133,67
14	4,5	5,3	70,0	12,4	308,62	132,00
15	3,0	7,1	70,0	12,4	306,45	132,67
16	4,5	7,1	70,0	23,1	319,68	134,33

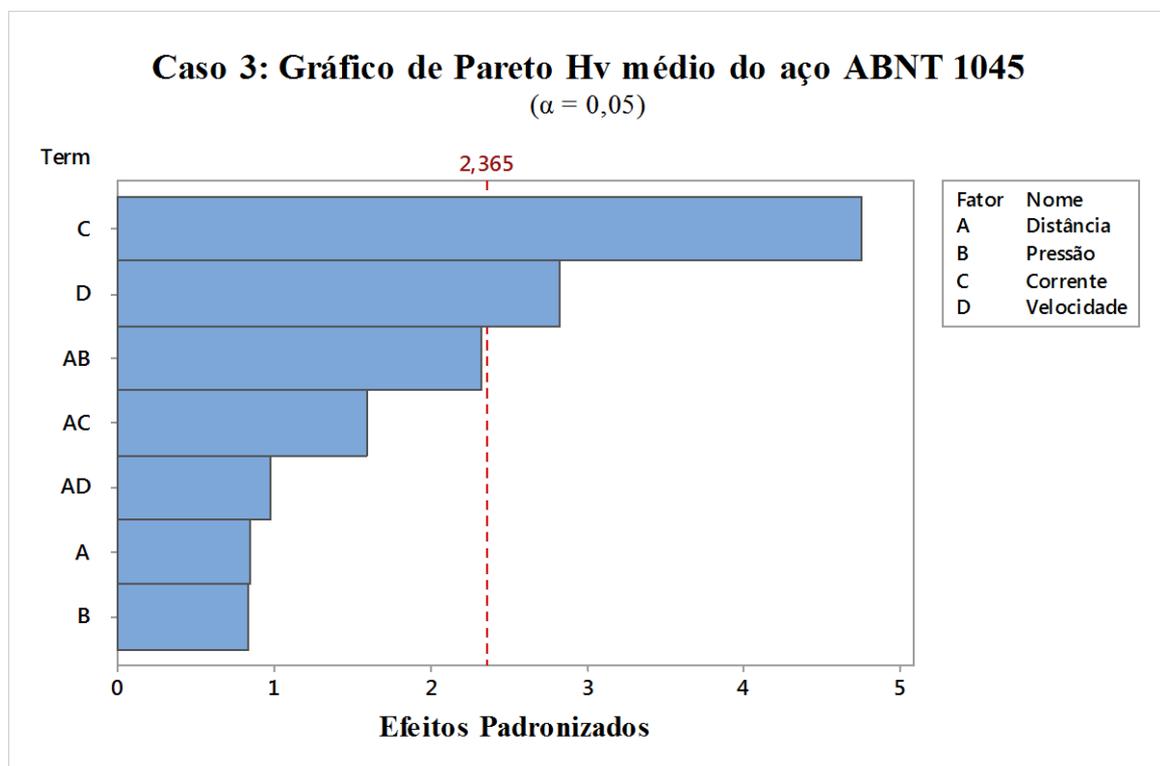


Figura 5.5: Caso 3 Gráfico de Pareto para Hv médio do aço ABNT 1045

No gráfico de Pareto para dureza do aço ABNT 1045 mostrada pela Figura 5.5 indicou que para a dureza média Hv os fatores mais significativos foram a corrente e a velocidade.

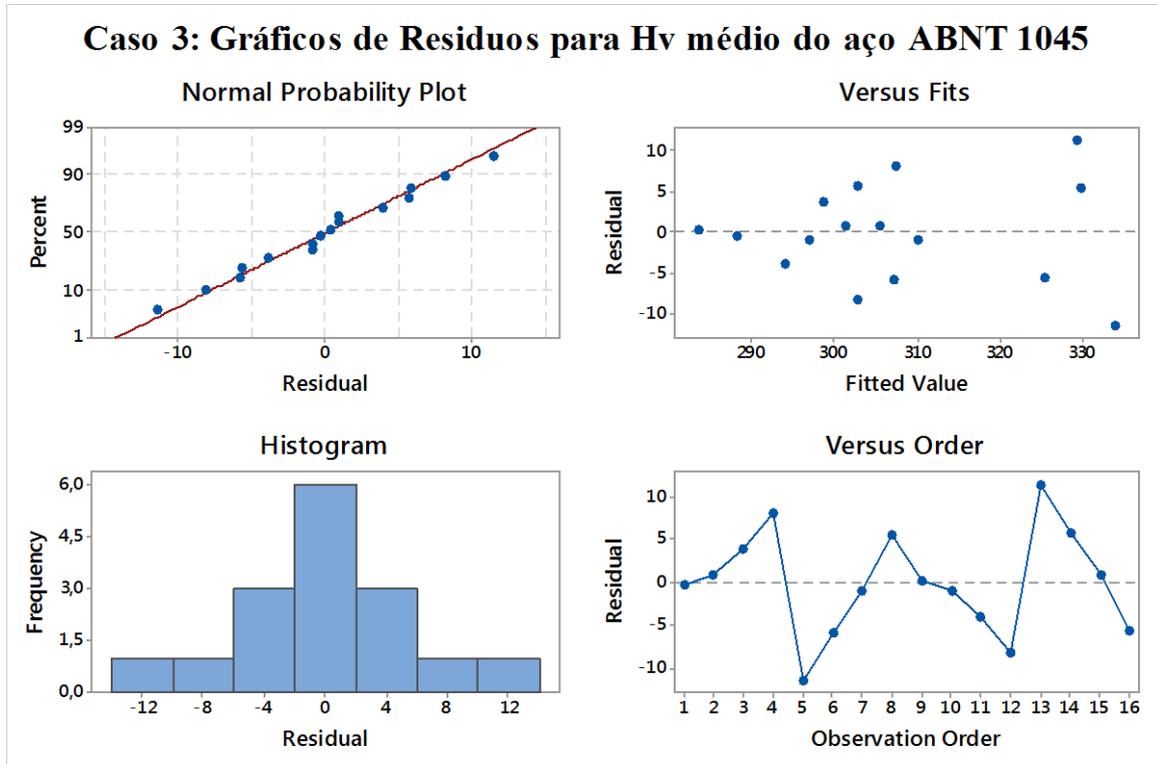


Figura 5.6: Caso 3 Gráficos de Resíduos para Hv médio do aço ABNT 1045

Avaliando os gráficos de resíduos para Hv médio do aço ABNT 1045 mostrada pela Figura 5.6, estes indicam que são normais evidenciados com o P-value de 0,599 acima dos 0,05 estabelecidos. Os dados estão representados por uma distribuição normal. A média amostral da dureza Hv indica 307,3 e desvio padrão de 16,21.

Pelo formato da distribuição dos dados, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

Para o aço carbono ABNT 1020 foram medidos as durezas nos seguintes pontos:

- 0,50 mm;
- 1,00 mm;
- 1,50 mm;

A Figura 5.7 plotada com os dados do Anexo V mostra a dureza nos pontos da zona termicamente afetada (ZTA) do aço ABNT 1020 dos corpos de prova (CP). Observa-se que a dureza é mais alta no ponto de corte e vai se reduzindo a medida que se aprofunda.

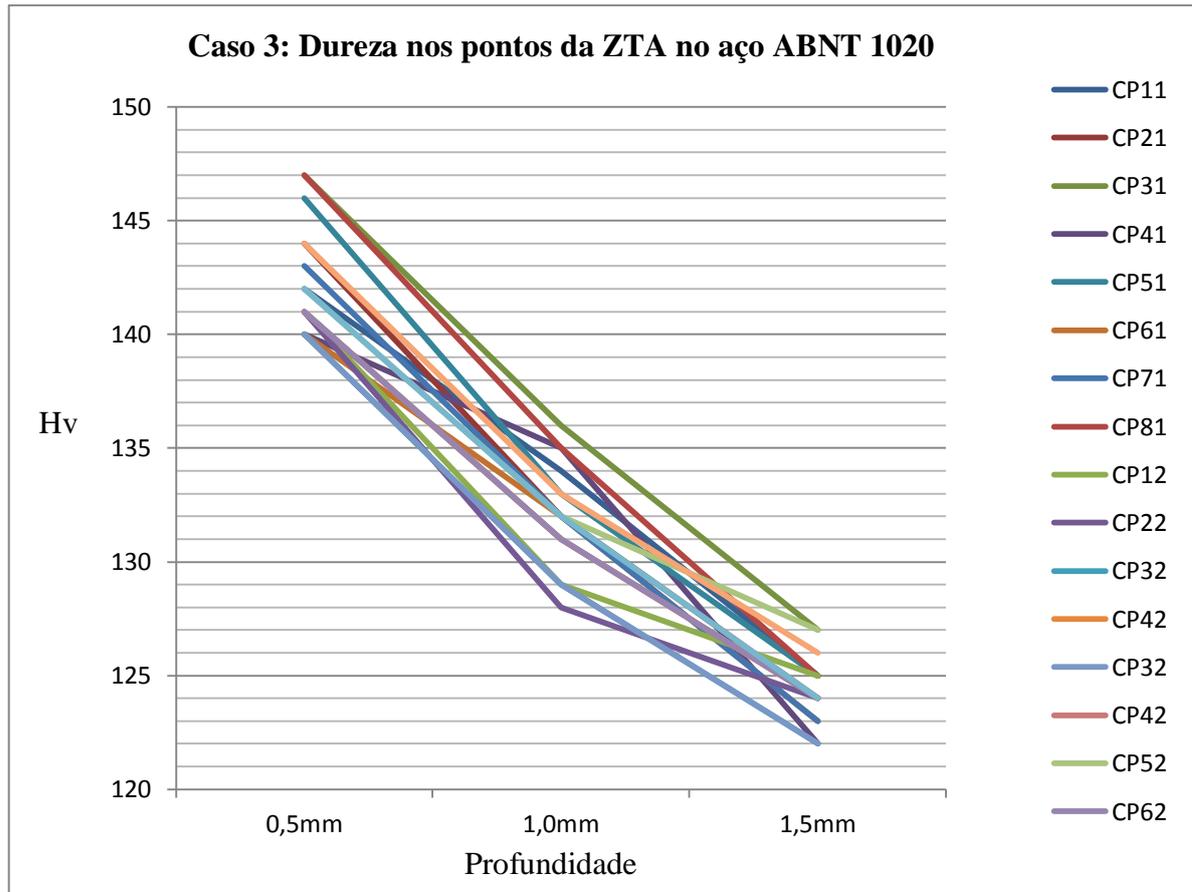


Figura 5.7: Caso 3 Dureza nos pontos da ZTA no aço ABNT 1020

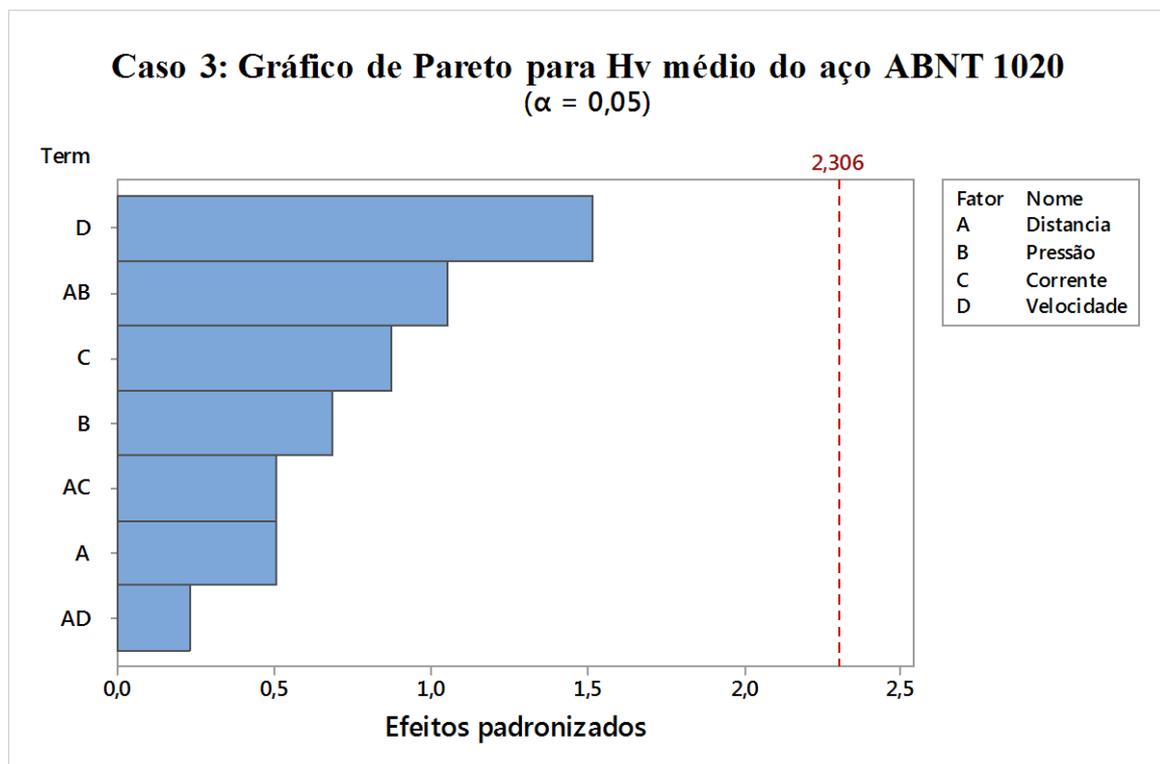


Figura 5.8: Caso 3 Gráfico de Pareto para Hv médio do aço ABNT 1020

Utilizando o aço ABNT 1020, pelo gráfico de Pareto mostrada pela Figura 5.8 indicou que para a dureza média Hv nenhum dos fatores foi significativo.

Avaliando os gráficos de resíduos para Hv médio do aço ABNT 1020 mostrada pela Figura 5.9, estes indicam que são normais evidenciados com o P-value de 0,690 acima dos 0,05 estabelecidos. Os dados estão representados por uma distribuição normal. A média amostral da dureza Hv indica 133,0 e desvio padrão de 1,702.

Pelo formato da distribuição dos dados, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

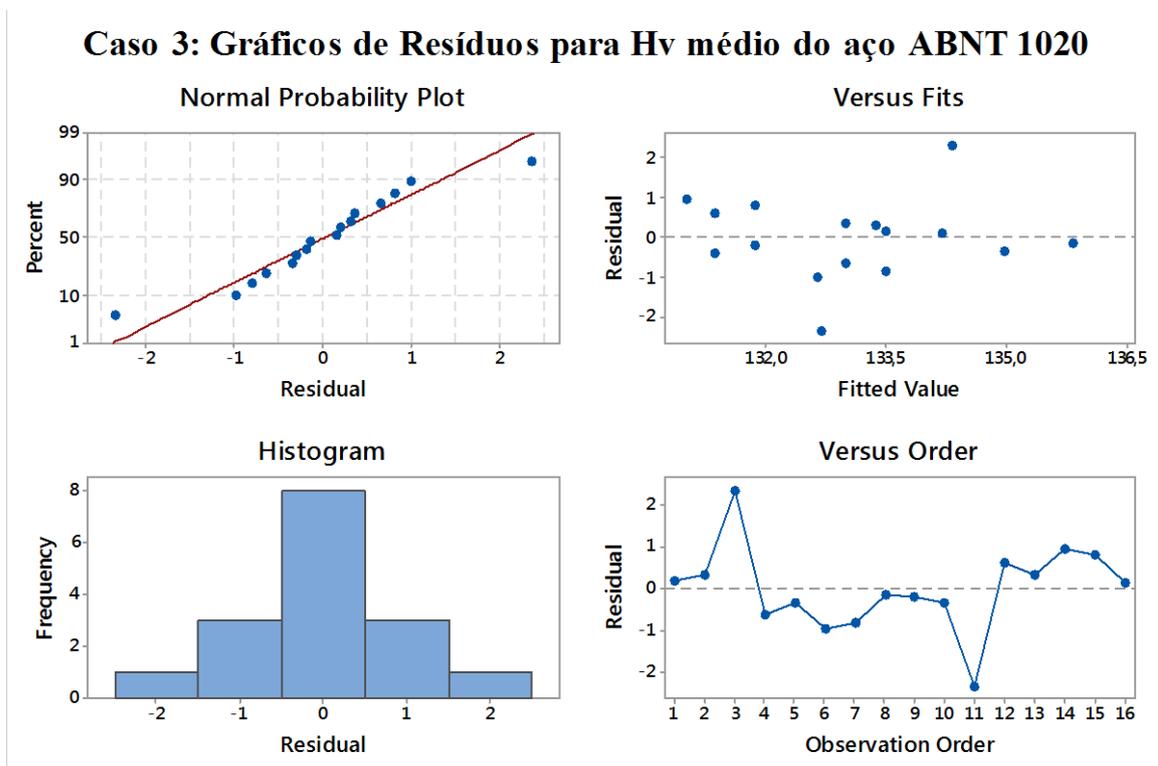


Figura 5.9: Caso 3 Gráficos de Resíduos para Hv médio do aço ABNT 1020

5.3 Análises da força na ZTA

Para o aço carbono ABNT 1045 foram medidos as forças nas seguintes profundidades da ZTA:

- 0,30 mm;
- 0,60 mm;
- 0,90 mm;

O valor utilizado foi a média das três forças das respectivas profundidades para análise.

A Tabela 5.4 mostra a força média calculada para o aço ABNT 1045 e ABNT 1020 para análise.

Tabela 5.4: Caso 3 Força média para aço ABNT 1045 e ABNT 1020

Sequência	Distância	Pressão	Corrente	Velocidade	Força média ABNT	Força média ABNT
					1045	1020
1	3,0	5,3	62,5	12,4	326,4	223,87
2	4,5	5,3	62,5	23,1	312,6	222,67
3	3,0	7,1	62,5	23,1	327,2	226,30
4	4,5	7,1	62,5	12,4	328,6	221,93
5	3,0	5,3	70,0	23,1	331,8	227,00
6	4,5	5,3	70,0	12,4	311,1	221,23
7	3,0	7,1	70,0	12,4	315,5	221,20
8	4,5	7,1	70,0	23,1	317,7	227,03
9	3,0	5,3	62,5	12,4	319,8	216,87
10	4,5	5,3	62,5	23,1	322,8	221,23
11	3,0	7,1	62,5	23,1	313,3	220,50
12	4,5	7,1	62,5	12,4	320,6	221,20
13	3,0	5,3	70,0	23,1	324,1	221,93
14	4,5	5,3	70,0	12,4	318,8	221,20
15	3,0	7,1	70,0	12,4	319,6	218,30
16	4,5	7,1	70,0	23,1	327,0	224,80

Para o cálculo de força média aplicada na ZTA do aço ABNT 1045, observada pela Figura 5.10, não houveram fatores significativos.

Conforme mostrada pela Figura 5.11, os resíduos da força média do aço ABNT 1045 indicam que são normais evidenciados com o P-value de 0,858 acima dos 0,05 estabelecidos.

Os dados estão representados por uma distribuição normal. A média amostral da força média indica 321,1 N e desvio padrão de 6,155.

Pelo formato da distribuição dos dados, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

Para o aço carbono ABNT 1020 foram medidos as forças nas seguintes profundidades da ZTA:

- 0,50 mm;
- 1,00 mm;
- 1,50 mm;

Para as forças aplicadas na ZTA do aço ABNT 1020, observadas pela Figura 5.12, houve apenas a significância do fator velocidade para força média. Para as demais situações não houve significância dos fatores.

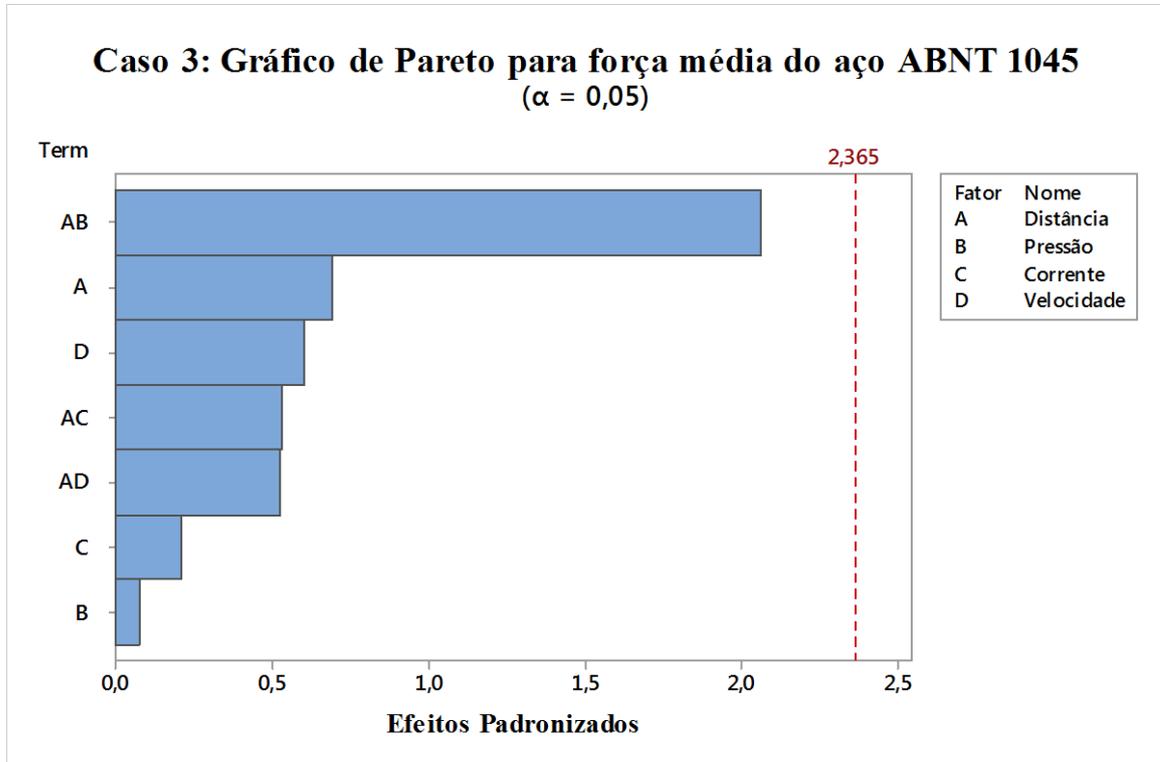


Figura 5.10: Caso 3 Gráfico de Pareto para força média do aço ABNT 1045

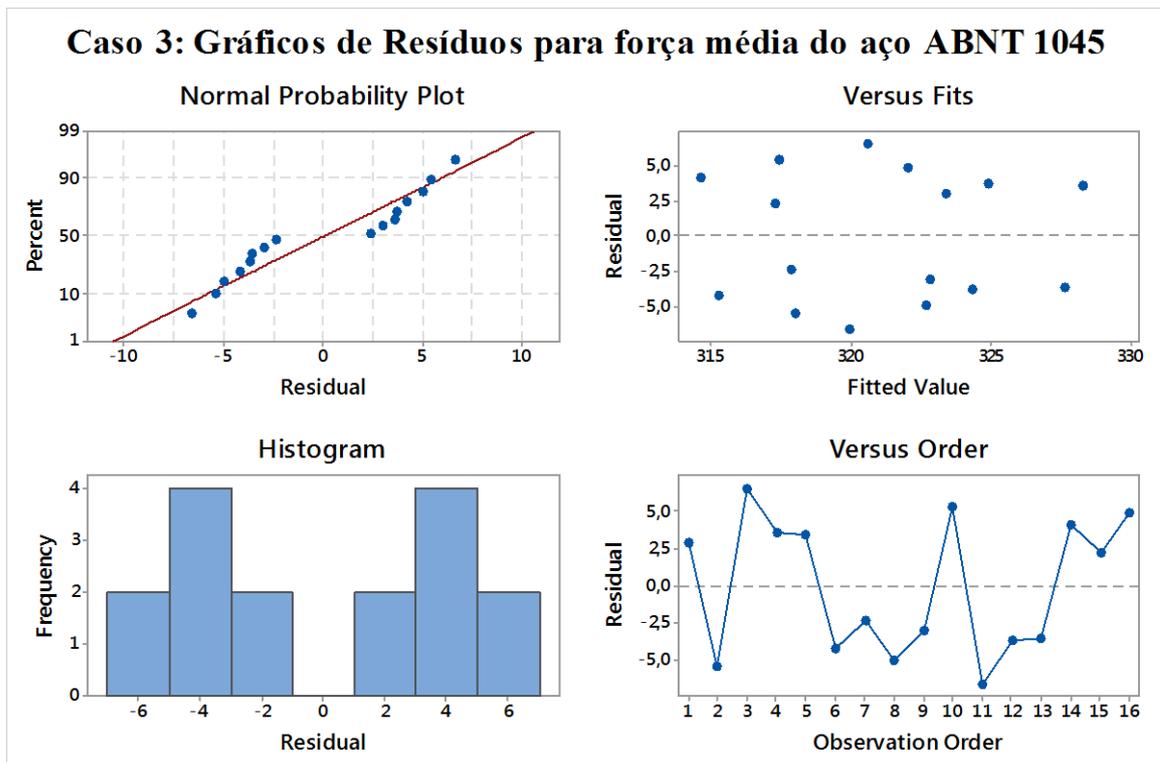


Figura 5.11: Caso 3 Gráficos de Resíduos para força média do aço ABNT 1045

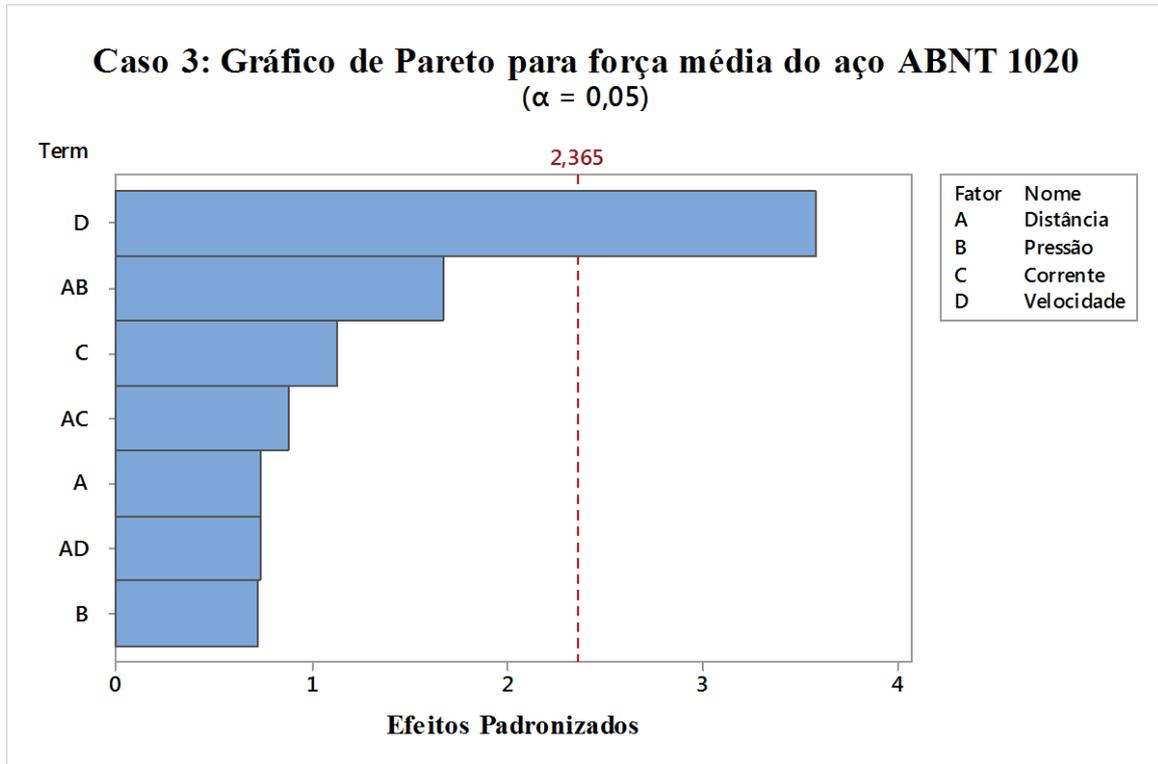


Figura 5.12: Caso 3 Gráfico de Pareto para força média do aço ABNT 1020

Conforme mostrada pela Figura 5.13, os resíduos da força média do aço ABNT 1020 indicam que são normais evidenciados com o P-value de 0,127 acima dos 0,05 estabelecidos.

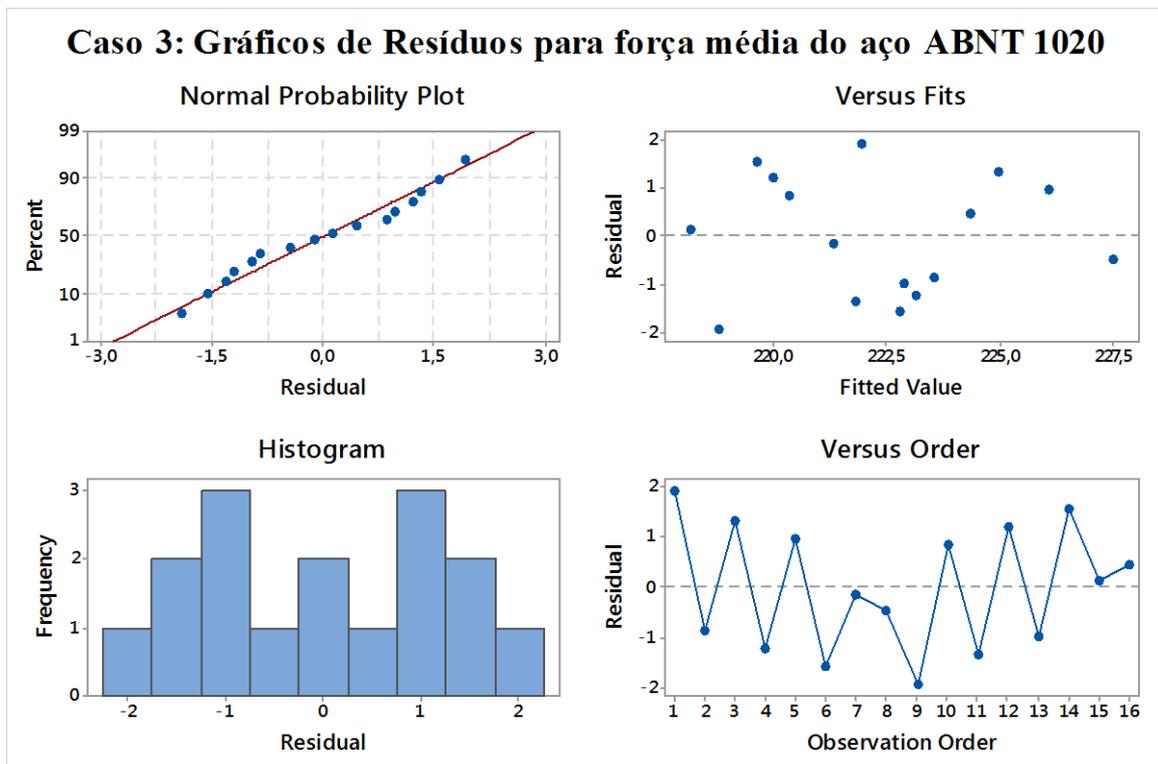


Figura 5.13: Caso 3 Gráficos de Resíduos para força média do aço ABNT 1020

Os dados estão representados por uma distribuição normal. A média amostral da força média indica 222,3 N e desvio padrão de 2,878.

Pelo formato da distribuição dos dados, não foi evidenciado a possibilidade da existência de variáveis ocultas que não foram consideradas no modelo, isto é, Lurking.

Avaliando sob aspecto da dureza, a diferença de percentual de Carbono entre os aços ABNT 1020 (0,18% a 0,23% C) e 1045 (0,43% a 0,50% C) aplicada ao corte térmico libera o carbono para superfície aumentando a dureza do material na ZTA em comparação à região que não houve o corte térmico.

5.4 Desejabilidade do estudo de caso nº 3

Conforme realizado no estudo de caso anterior, aplicou-se a função Desejabilidade para auxiliar no objetivo deste trabalho a encontrar condições operacionais adequadas para um conjunto de resposta buscando a melhor solução para atender todas as respostas analisadas simultaneamente.

Para gerar uma combinação otimizada dos parâmetros avaliados, foi estabelecido uma faixa desejada para cada resposta, onde se aplica os critérios pré-estabelecidos conforme a necessidade. A função Desejabilidade indicou a melhor combinação de parâmetros que minimizou a zona termicamente afetada, a dureza de sua área e a força correspondente de arraste.

A função Desejabilidade foi realizada para o aço carbono ABNT 1045 e ABNT 1020 separadamente por ser materiais diferentes.

Inicialmente, aplicou-se a função Desejabilidade para a zona termicamente afetada (ZTA), dureza média na ZTA e a força média na ZTA para o aço carbono ABNT 1045 e ABNT 1020 conforme a Tabela 5.5.

Em termos da função desejabilidade, todas as respostas (zona termicamente afetada (ZTA), dureza média na ZTA e a força média na ZTA) para os aços carbono ABNT 1045 e 1020 foram ajustadas para serem minimizadas, isto é, terem os menores valores possíveis.

Por meio das respostas obtidas no experimento e das faixas desejadas encontrou-se uma combinação dos parâmetros que satisfaz, simultaneamente, a minimização das três respostas.

Tal combinação pode ser verificada na Tabela 5.6 onde a Solução Global representa os parâmetros que podem ser ajustados de acordo com a precisão dos equipamentos utilizados no experimento.

Tabela 5.5: Caso 3 faixas pré-estabelecidas para solução global

Resposta Aço ABNT 1045	Objetivo	Faixas utilizadas			Ordem de Importância
		Mínimo	Alvo	Máximo	
Zona termicamente afetada (mm ²)	Minimizar	-	21,09	28,59	1
Dureza na ZTA (Hv)	Minimizar	-	284,01	340,77	1
Força de arraste (N)	Minimizar	-	311,10	331,80	1

Resposta Aço ABNT 1020	Objetivo	Faixas utilizadas			Ordem de Importância
		Mínimo	Alvo	Máximo	
Zona termicamente afetada (mm ²)	-	-	-	-	-
Dureza na ZTA (Hv)	Minimizar	-	130,333	136,667	1
Força de arraste (N)	Minimizar	-	216,867	227,033	1

Tabela 5.6: Caso 3 Solução global praticável para aço carbono

Resultado aço ABNT 1045	Desejabilidade	Pressão	Velocidade	Corrente	Distância
Solução Global	0,7780	7,10	12,40	62,50	3,0
Solução Global Praticável	0,7716	7,0	12,5	62,5	3,0

Resultado aço ABNT 1020	Desejabilidade	Pressão	Velocidade	Corrente	Distância
Solução Global	0,8488	5,30	12,40	62,50	4,5
Solução Global Praticável	0,8208	5,5	12,5	62,5	4,5

Em função disso, a Tabela 5.7 apresenta o conjunto de respostas otimizado para os aços carbono ABNT 1045 e 1020.

Tabela 5.7: Caso 3 Respostas previstas para solução global praticável

Respostas aço ABNT 1045	Zona termicamente afetada (mm ²)	Dureza na ZTA (Hv)	Força de arraste (N)
Resultado	23,81	279,7735	316,8783
Desejabilidade	0,63734	1,000	0,72085

Respostas aço ABNT 1020	Zona termicamente afetada (mm ²)	Dureza na ZTA (Hv)	Força de arraste (N)
Resultado	-	130,7741	219,6719
Desejabilidade	-	0,93041	0,72408

A forma gráfica das respostas previstas para solução global praticável encontra-se na Figura 5.14 para aço ABNT 1045 e na Figura 5.15 para o aço ABNT 1020.

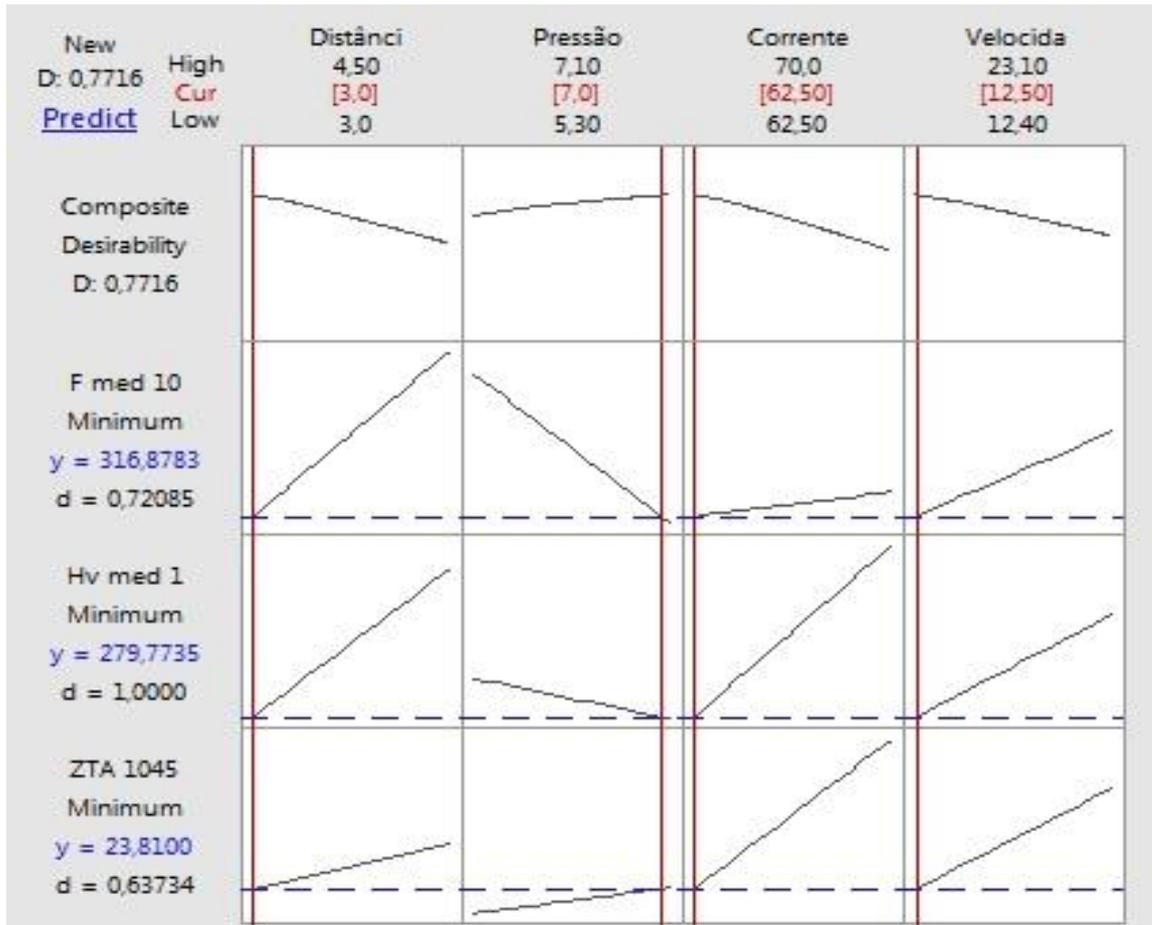


Figura 5.14: Caso 3 Função Desejabilidade na ZTA para o aço ABNT 1045

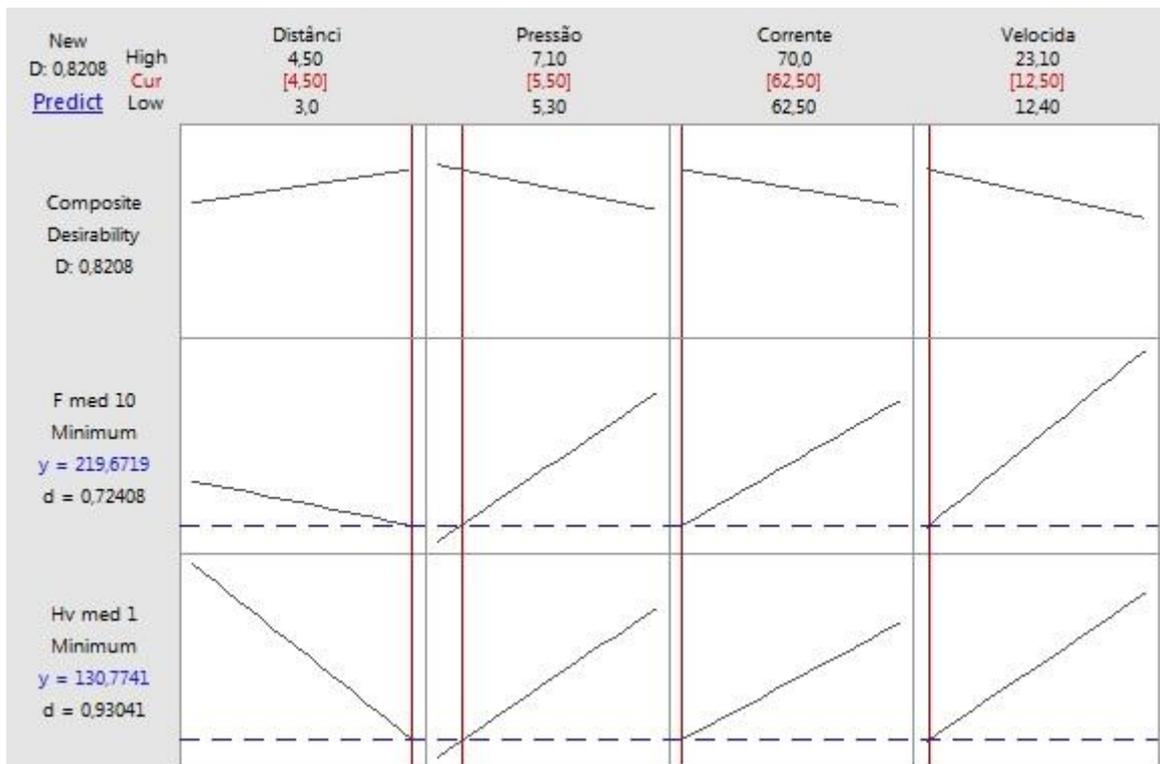


Figura 5.15: Caso 3 Função Desejabilidade na ZTA para o aço ABNT 1020

6 CONCLUSÃO

6.1 Conclusões gerais

Considerando que o objetivo traçado do presente trabalho que foi estudar os experimentos do processo de corte a ar comprimido nos aços carbono ABNT 1020 e ABNT 1045 desenvolvidos por Montalvão (1997) e Pereira (2000), aplicar a otimização simultânea de múltiplas características por meio da função Desejabilidade e avaliar os resultados obtidos.

Evidenciou-se que a análise das interações entre os parâmetros foi um elemento fundamental para o controle do processo, indicando que a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma desejada resposta pode conduzir a efeitos significativos. Com isso, a presente análise precisa ser levada em consideração.

A função desejabilidade (*desirability*) foi utilizada como ferramenta de otimização para as múltiplas respostas do processo estudado. Após a aplicação do mesmo, foi verificado o processo de corte por plasma a ar comprimido dos três estudos de caso as melhores respostas com o emprego das combinações de parâmetros.

Para o estudo de caso nº 1, as melhores respostas para o aço carbono ABNT 1020 resultam do emprego da seguinte combinação de parâmetros: Pressão: 6,2 Kgf / cm²; Velocidade: 12,5 cm / min; Corrente: 70 A; Distância: 3,1 mm. Nestas condições, espera-se obter as seguintes respostas:

- Acabamento: 3,68
- Escória: 4,00 %
- Perda de massa: 5,36 %

Para o estudo de caso nº 2, as melhores respostas para o aço carbono ABNT 1045 resultam do emprego da seguinte combinação de parâmetros: Pressão: 5,3 Kgf / cm²; Velocidade: 18,0 cm / min; Corrente: 62,5 A; Distância: 3,0 mm. Nestas condições, espera-se obter as seguintes respostas:

- Ortogonalidade direita: 2,22°
- Ortogonalidade esquerda: 6,77°

Finalmente para o estudo de caso nº 3, as melhores respostas para:

A) Aço carbono ABNT 1045 resultam do emprego da seguinte combinação de parâmetros: Pressão: 7,0 Kgf / cm²; Velocidade: 12,5 cm / min; Corrente: 62,5 A; Distância: 4,5 mm. Nestas condições, espera-se obter as seguintes respostas:

- Zona termicamente afetada (ZTA): 23,81 mm²
- Dureza na ZTA: 279,77 Hv
- Força de arraste na ZTA: 316,88 N

B) Aço carbono ABNT 1020 resultam do emprego da seguinte combinação de parâmetros: Pressão: 5,5 Kgf / cm²; Velocidade: 12,5 cm / min; Corrente: 62,5 A; Distância: 4,5 mm. Nestas condições, espera-se obter as seguintes respostas:

- Dureza na ZTA: 130,77 Hv
- Força de arraste na ZTA: 219,67 N

6.2 Contribuições para estudos futuros

As análises realizadas com recursos computacionais da presente data auxiliou na melhor precisão dos resultados com base de dados originado dos estudos de caso o que contribuiu na validação dos resultados obtidos originalmente. Trabalhos recentes publicados internacionalmente e comentados na introdução deste trabalho deram a garantia de que os experimentos dos estudos de caso avaliados foram satisfatórios.

As melhorias ocorridas foram na visualização e nas análises dos resultados utilizando a ferramenta de otimização para as múltiplas respostas do processo por meio da função desejabilidade.

A novidade é que com a utilização da função desejabilidade foi trazido os parâmetros otimizados para a resposta dada com a visualização de que esta se encontrava ou não no intervalo de confiança fornecendo uma região específica para aproveitar o melhor do equipamento. Sabendo a região otimizada pode-se refinar os intervalos dos parâmetros para descobrir o ponto mais ótimo.

Os aspectos geométricos para o corte por plasma a ar comprimido que devem ser levados em consideração são: lado direito do corte e isento de escórias. Quanto aos aspectos metalúrgicos o corte deve proporcionar pequena zona termicamente afetada e não elevar demasiadamente a dureza da ZTA da peça cortada.

Na prática, os fatores influentes indicam a maior divisão de influência para dada resposta. As interações entre parâmetros apresenta-se como um elemento importante para o controle do processo. Deve-se ajustar cuidadosamente os fatores principais e a interação entre os fatores para a obtenção da resposta desejada.

As respostas encontradas nos experimentos e os valores previstos pela desejabilidade encontram-se no intervalo de confiança (IC) o que mostra que o modelo analisado é satisfatório.

6.3 Sugestões para estudos futuros

Ficam as seguintes considerações com sugestões para estudos futuros:

- Avaliação da velocidade de corte nas características geométricas e metalúrgicas do corte utilizando controle numérico computacional (CNC), sendo que este parâmetro está influenciando diretamente na ortogonalidade do corte, formação de escória, perda de massa e força de arraste e por meio de interações para o acabamento, dureza e ZTA.
- Análise e medição do acabamento em função da zona termicamente afetada para verificar o nível de critério de aprovação da peça cortada.
- Aplicação de outros métodos de otimização com restrições e pesos diferentes aos parâmetros analisados.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, B.; CHIPMAN, H.; VIJAYAN, K. Some Risks in the Construction and Analysis of Supersaturated Designs. **TECHNOMETRICS**, may. 1999. 135-141.
- ASIABANPOUR, B. *et al.* Optimising the automated plasma cutting process by design of experiments. **International Journal of Rapid Manufacturing** **1**, 1, jan. 2009. 19-40.
- BALESTRASSI, P. P. *et al.* Design of experiments on neural network's training for nonlinear time series forecasting. **Neurocomputing**, 2009. 1160-1178.
- BARBETTA, P. A.; RIBEIRO, J. L. D.; SAMOHYL, R. W. Variance regression models in experiments with few replications. **Quality and Reliability Engineering International**, 2000. v. 16, p. 1-8.
- BERTRAND, J.W.V. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**. Vol. 22, Nº 2, 2002.241-264;.
- BHUVENESH, R.; NORIZAMAN, M. H.; ABDUL MANAN, M. S. Surface Roughness and MRR Effect on Manual Plasma Arc Cutting Machining. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, Malaysia, 6, 21 fev. 2012. 465-468.
- CHAMARTHI, S. *et al.* Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material, **International Conference on Design and Manufacturing - IConDM**, Procedia Engineering. 2013, Nº 64, 854-861.
- CHAN, K. K.; SPEDDING, T. A. On-line optimization of quality in a manufacturing system. **Int. J. Prod. Res.**, 2001. 1127-1145.
- CHEN, J. C.; YE, L.; COX, R. A. Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, 41, jun. 2009. 760-769.
- 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**, London, 87, 16 jan. 2016. 50-58.
- DAS, M. K. *et al.* Optimization of Process Parameters in Plasma Arc Cutting of EN31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics using Grey Relational. **Procedia Material Science**, 2014. 1550-1559.

- FERREIRA, P. *et al.* Plasma Cutting Optimization by using The Response Surface Methodology. The **Annals of "Duranea de Jos" University of Galati**, Fascicle V, Technologies in machine building. Newtech 2009, 213-218.
- FRETON, P. *et al.*, Numerical and experimental study of a plasma cutting torch, **Journal of Physics D: Applied Physics**, No. 35, pp. 115-131, 2002.
- GARIBOLDI, E.; PREVITALI, B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium, **Journal of Materials Processing Technology**, No. 160, pp. 77-89, 2004.
- GOMES, J. H. F. **Análise e Otimização da Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço ABNT 1020 com Utilização de Arame Tubular Inoxidável Austenítico**. UNIFEI. Itajubá, p. 120. 2010. (Dissertação de Mestrado).
- HARRINGTON, Jr. E. C., The Desirability Function, **Industrial Quality Control**, Volume 21, No. 10, pp. 494-498, 1965.
- ILII, S. M.; COTEATA, M. Plasma Arc Cutting Cost. **Technical University of Iasi**, Romania, 2008. 01-04.
- ILII, S. M.; COTEATA, M.; MUNTEANU, A. Experimental results concerning the variation of surface roughness parameter (Ra) at plasma arc cutting of a stainless steel workpiece. **International Journal of Modern Manufacturing**, II, n. N° 1, 2010. 31-36.
- INFOMET. Informações relevantes do mercado de siderurgia. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/artigos-tecnicos-categorias.php>. Acesso em: 05/03/2016.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9013**. ISO. [S.l.], p. 12. 2002.
- KRAJCARZ, D. Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. **24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**, Procedia Engineering, 2014, p. 838-843.
- LAYER, J. K.; KARWOWSKI, W.; FURR, A. The Effect of Cognitive Demands and Perceived Quality of Work Life on Human Performance in Manufacturing Environments. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 2009. 413-421.
- LIMA, E. G. Corte a plasma. **Revista da Soldagem**, v. II, n. 9, 2009.
- LIMA, V. S. **Otimização do desempenho de amplificadores de radiofrequência banda larga: uma abordagem experimental**. UNIFEI. Itajubá, p. 100. 2010. (Dissertação de Mestrado).
- LONG, P. N.; TANAKA, Y.; UESUGI, Y. Numerical Investigation of the Swirl Gas Angle and Arc Current Dependence on Evaporation of Hafnium Cathode in a Plasma Cutting Arc. **IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE**, February 2012. 497-504.

- MACHADO, A. **Avaliação da rugosidade em superfície complexas**. Sociedade Educacional de Santa Catarina Instituto Superior Tupy. Joinville. 2009. (Dissertação de Mestrado).
- MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia de Elaboração em Monografia e TCC em Engenharia de Produção**. p. 224, Ed. Atlas. 2014.
- MATOS, R. F. **Análise topográfica da superfície do cilindro de motores a combustão interna**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR. Curitiba, p. 65. 2009. (Dissertação de mestrado).
- MOARREFZADEH, A. Numerical Analysis of Thermal Profile in Plasma Arc Cutting. **INTERNATIONAL JOURNAL OF MULTIDISCIPLINARY SCIENCES AND ENGINEERING**, London, 2, n. 6, set. 2011. 22-25.
- MONT'ALVÃO, C. A. **Determinação dos fatores significativos do processo de corte por plasma a ar comprimido através da utilização do projeto e análise de experimento**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, p. 75. 1997. (Dissertação de Mestrado).
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology**. 3ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- 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**, 2006. 423-438.
- NILO JÚNIOR, L. P. **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 111. 2003. (Dissertação de Mestrado).
- ÖZEK, C.; CAYDAS, U.; UNAL, E. A Fuzzy Model for Predicting Surface Roughness in Plasma Arc Cutting of AISI 4140 Steel. **Materials and Manufacturing Processes**, London, 2012. 95-102.
- PEREIRA, W. X. **Estudo da Qualidade de Corte de Aço SAE 1045 através do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 75. 2000. (Dissertação de mestrado).
- PRASAD, K. S.; RAO, D. C. S.; RAO, D. D. N. Application of Design of Experiments to Plasma Arc Welding Process A Review. **Journal of The Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering**, São Paulo, XXXIV, n. Nº 1/75, January - March 2012. 7.
- RADOVANOVIC, M.; MADIC, M. Modeling the Plasma Arc Cutting Process using ANN. **Nonconventional Technologies Review**. Nº 4 / 2011.

- SALONITIS, K.; VATOUSIANOS, S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process. **45th CIRP Conference on Manufacturing System**. [S.l.]: Elsevier. 2012. p. 287-292.
- SEMBER, V. *et al.* Spectroscopic Characterization of a Steam Arc Cutting Torch. **Plasma Chem. Plasma Process**, 2011. 755-770.
- TWI World Centre for Materials Joining Technology, **Cutting processes - plasma arc cutting**. Disponível em <http://www.twi-global.com>. Acesso em 05.03.2016.
- WELLER, E. J.; HAAVISTO, M. **Nontraditional Machining Processes**. 2^a. ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1984.
- YAMAGUCHI, Y. *et al.* Experimental study of consumption of hafnium electrode in oxygen plasma arc cutting. **XII ARC WELDING PROCESSES AND PRODUCTION SYSTEMS**. [S.l.]: [s.n.]. 07 08 2012.
- YANG, L. J. Plasma surface hardening of ASSAB 760 steel specimens with Taguchi optimization of the processing parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, 2001. 521-526.
- YE, L. *et al.* Optimization of inductive angle sensor using response surface methodology and finite element method. **Measurement**, Vol 48, 2014. 252-262.
- ZIEDAS, S.; TATINI, I. **Soldagem**. São Paulo: Senai, 1997. 553 p.

ANEXOS

ANEXO I - Força de corte na operação de usinagem

Material extraído de Pereira (2000).

A força de usinagem é a força total que atua sobre a cunha cortante durante o processo de usinagem, que pode ser decomposta em: força de corte (F_c), como componente principal; força de avanço (F_a), força de apoio (F_P) e suas respectivas decomposições conforme ilustra o esquema mostrado na Figura A1. 1. Os componentes da força de usinagem, segundo Weingaertner (1990), são influenciados principalmente pelas características do material a ser usinado, condições de corte e geometria da ferramenta.

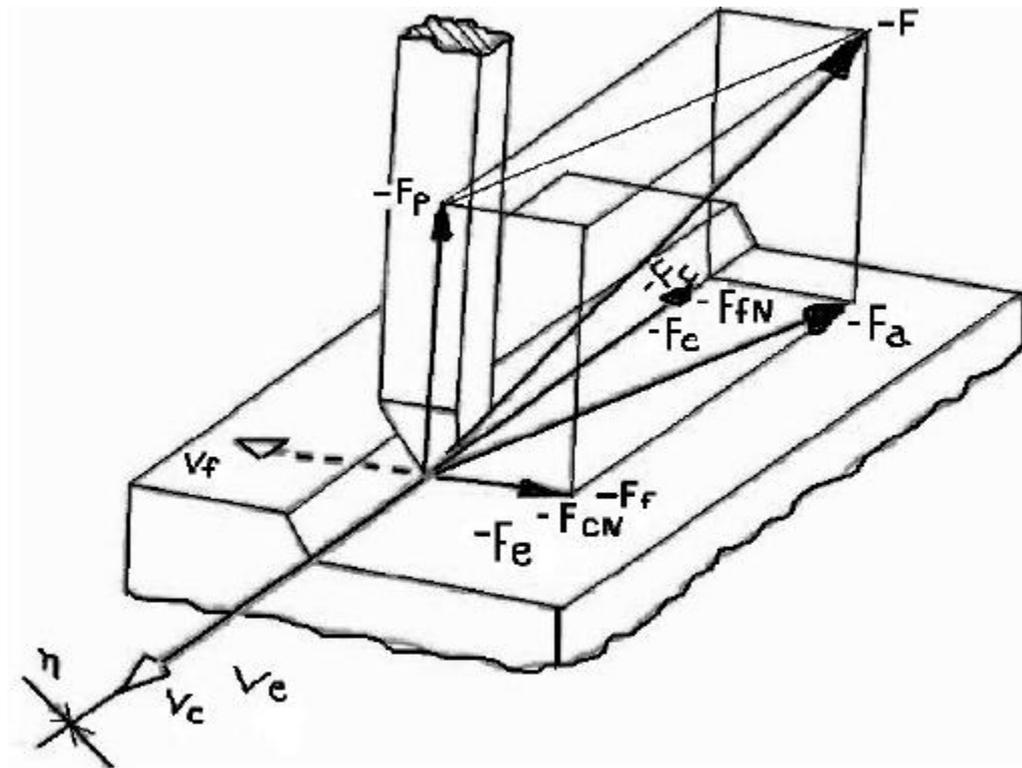


Figura A1.1: Forças de usinagem no aplainamento

O processo de avaliação das forças de corte se deu em operações de aplainamento, através de um dinamômetro acoplado a esta plaina. O fato de essa análise utilizar a operação de aplainamento é justificado pela forma geométrica dos corpos de prova, apresentado na Figura A1. 2. O dinamômetro utilizado para medir a força de corte nas amostras cortadas por plasma foi um desenvolvido por Mendes (1999), cujo esquema é mostrado na Figura A1. 3.

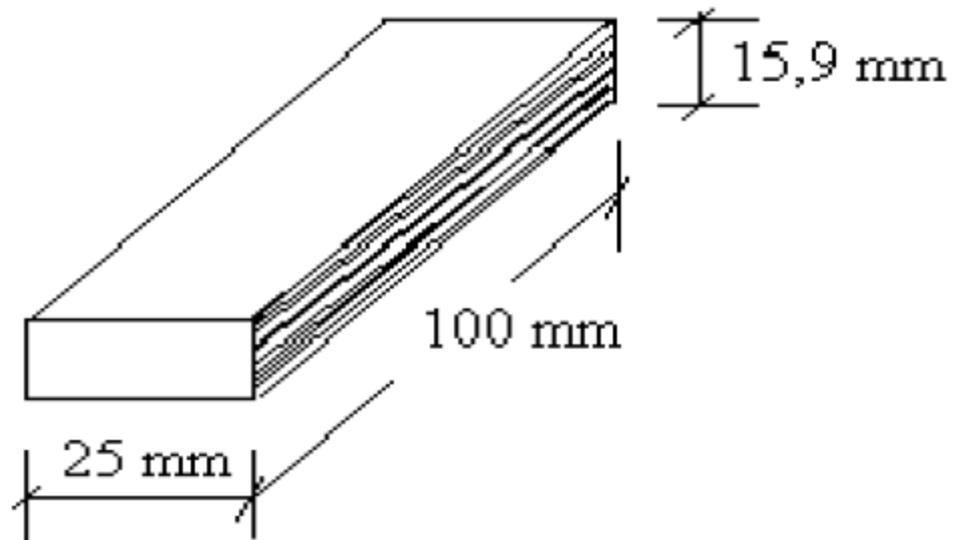


Figura A1.2: Representação do corpo de prova após o corte

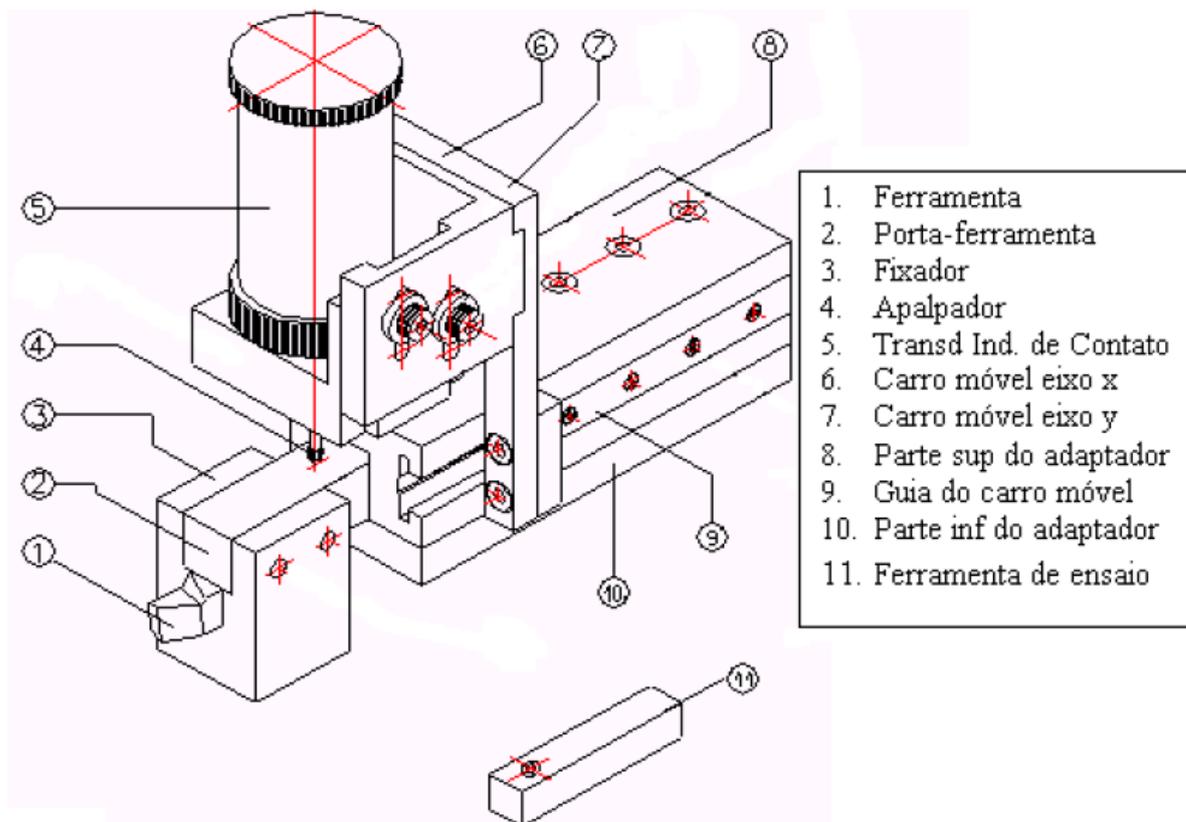


Figura A1.3: Dinamômetro utilizado para medir força de corte numa operação de aplainamento

O princípio de medida do dinamômetro se dá por deflexão da ferramenta de corte (aço rápido) engastada no corpo do dinamômetro, sobre o qual está fixado um transdutor indutivo,

cujo apalpador se encontra na direção da componente força de corte. O transdutor trabalha sobre a variação da indutância de duas bobinas e pela mudança de posição do núcleo de ferro no seu interior. As bobinas constituem a metade de uma ponte de “*Wheatstone*” e a outra metade da ponte de medição encontra-se num amplificador de medida. O desequilíbrio da ponte de medição é diretamente proporcional à variação por indução das bobinas e pode ser registrado em um voltímetro digital.

Para a confiabilidade das leituras de um dinamômetro, este deve satisfazer algumas condições específicas, tais como, frequência natural, sensibilidade, precisão e rigidez (SHAW, 1991). Tais condições foram avaliadas por Mendes (1999) e reavaliados nesse trabalho como uma análise paralela, sendo esta análise apresentada no anexo II.

O ensaio para medir a força de corte envolvida na operação de aplainamento para as amostras do aço 1045 iniciou-se com a usinagem dos cdp's de forma que toda em face de ser aplainada ficasse perpendicular à direção do corte. Após esse procedimento inicial, anexou-se o dinamômetro na plaina mecânica conectados aos equipamentos de leitura. Uma ferramenta de aço-rápido foi incorporada ao dinamômetro com um comprimento em balanço de 12,6 mm e cujos ângulos selecionados foram os seguintes:

- Ângulo de saída $\gamma = 10^\circ$;
- Ângulo de posição $\kappa = 45^\circ$;
- Ângulo de cunha $\beta_p = 85^\circ$;
- Ângulo de folga $\alpha = 6^\circ$.

Paralelamente a plaina foi ajustada com os seguintes parâmetros:

- Velocidade média de corte $V_c = 6,5$ m/min;
- Curso da ferramenta $C_r = 140$ mm;
- Avanço $f = 0,2$ mm;
- Profundidade de corte $AP = 0,3$ mm.

A velocidade média de corte foi medida por um cronômetro, ou seja, o comprimento da peça foi dividido pelo tempo que a ferramenta necessitou para percorrê-la. O curso da plaina foi obtido somando 40 mm ao comprimento do cdp. O avanço e a profundidade foram fixados nos valores citados com a finalidade de minimizar a vibração gerada na saída dos cavacos, que por sua vez, são valores bem menores que a frequência natural do dinamômetro. Além

disso, tais valores objetivaram reduzir o desgaste excessivo da ferramenta e, ainda, favorecer um número maior de pontos de leituras para análise de forças.

Com os preparativos de montagem já prontos aproximou-se a ferramenta da peça, com a máquina parada. Em seguida, com a ferramenta fora da peça aprofundou-se 0,3 mm. Ao ligar a máquina zeraram-se os dispositivos de leitura (módulo, gerador de função e multímetro).

Então, em cinco passos consecutivos, a partir do centro da peça para a esquerda da direção de corte, os dados foram coletados. A máquina foi desligada para que o multímetro fosse zerado novamente. Repetiram-se mais cinco passos consecutivos, colhendo os dados. O restante de material da primeira camada foi retirado posteriormente. O corte foi repetido mais duas vezes, em cada cdp, mantendo as mesmas condições. Para garantir uma melhor uniformidade nos testes, as ferramentas foram reafiadas a cada repetição. A Figura A1.4 ilustram os elementos envolvidos no ensaio.

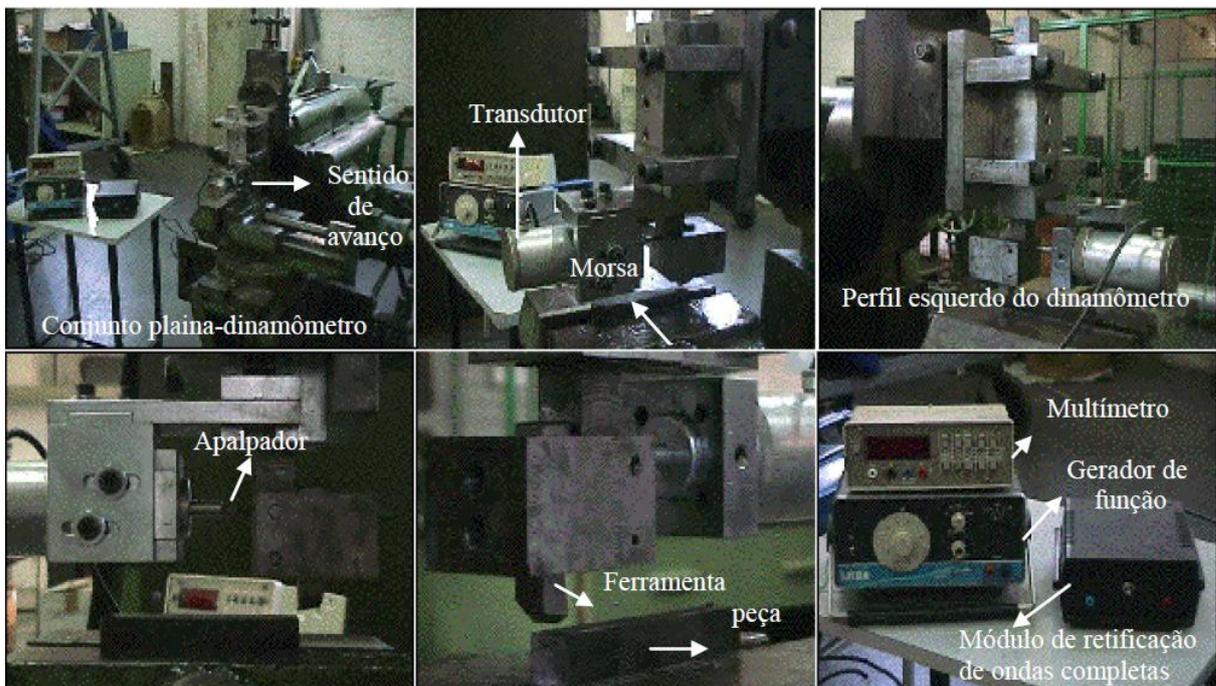


Figura A1.4: Elementos do ensaio de força de corte no aplainamento

Vale ressaltar que o valor da força de corte é obtido do produto da tensão apresentada no multímetro pelo fator de conversão ($k_m = 21,76\text{N/mV}$), que é demonstrado no anexo II.

Um segundo ensaio de medida de força sob as mesmas condições do primeiro, foi utilizado para o aço SAE 1020, sendo tal ensaio realizado com duas finalidades. A primeira foi a de investigar se o dinamômetro responde coerentemente a diferença de dureza entre os aços 1020 e 1045, e segundo, estabelecer uma comparação das forças de corte envolvidas nas

amostras dos dois tipos de aços, cortados com plasma a ar comprimido sob os mesmos tratamentos.

ANEXO II - Dinamômetro

II - Considerações sobre o Dinamômetro

Material extraído de Pereira (2000).

II.1 - Introdução

É importante divulgar as forças de corte numa operação de aplainamento, através de um dinamômetro, julgou-se oportuno examinar e colher informações sobre os requisitos de um bom dinamômetro e compará-los ao utilizado. Nesse sentido, os aspectos como frequência natural, sensibilidade, precisão e rigidez serão apresentados. Por fim uma comparação dos resultados das forças de cortes obtidas experimentalmente para as duas classes de aço SAE 1045 e 1020, com a esperada pela teoria de Kronenberg. Ambos os aços são cortados sob as mesmas condições do processo de corte por plasma a ar comprimido. Essa comparação visa verificar se o dinamômetro acompanha as mesmas tendências da teoria em relação aos diferentes níveis de durezas entre os aços estudados.

a - frequência natural

Durante um processo de usinagem, devido ao contato ferramenta-peça, ocorrem certos fenômenos, tais como, deformações cíclicas, vibrações, aquecimento e desgaste. Para avaliar a força de corte através de um dinamômetro, as oscilações provocadas pela interação ferramenta-peça não devem influenciar a grandeza a ser medida. Portanto, a menor frequência natural do dinamômetro deverá apresentar um valor suficiente para não interferir na leitura do equipamento.

A frequência natural do dinamômetro utilizado, calculada por Mendes (1999) foi de 3284Hz e a obtida experimentalmente de 3120Hz. Entretanto, como o dinamômetro permite comprimentos em balanço diferentes (aumentando ou diminuindo sua rigidez) resolveu-se calcular de forma simplificada a frequência natural para o comprimento selecionado para a presente investigação da força de corte. O cálculo da frequência natural do dinamômetro, no entanto, partiu da aproximação do mesmo a uma viga (livre e engastada na outra extremidade) para que se possa analisá-lo, segundo um sistema massa-mola, conforme mostra a figura A2.1.

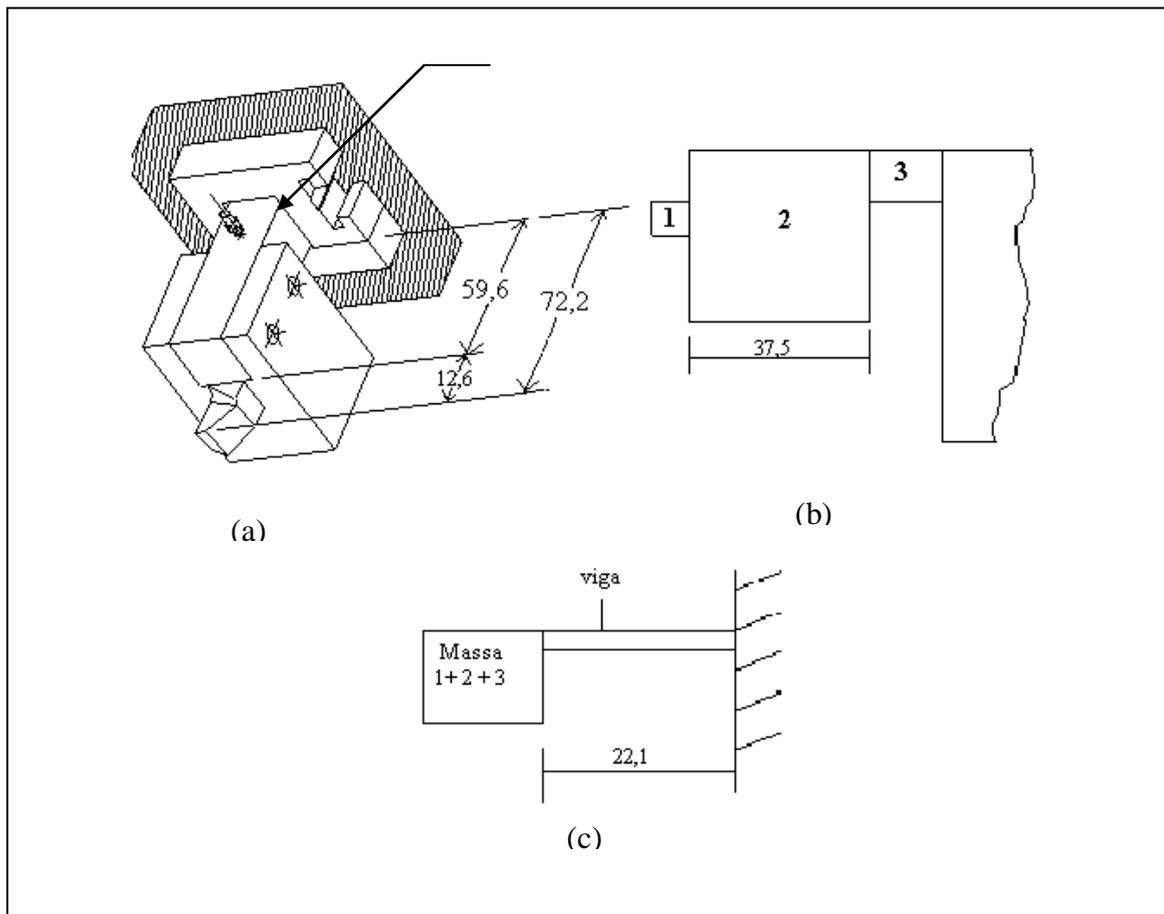


Figura A2.1: Etapas da transformação do dinamômetro num sistema massa-mola

A equação que satisfaz este modelo de viga, segundo Almeida (1987) é a da teoria da vibração forçada de um sistema com um grau de liberdade. A qual é apresentada através da equação A.1, descrita abaixo:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad (\text{A.1})$$

onde:

g = aceleração;

δ = deflexão de viga (ponta de ferramenta)

O cálculo do (δ) se dá pela equação (A.2) abaixo:

$$\delta = \frac{pL^3}{3EI} \quad (\text{A.2})$$

onde:

P = peso da viga [N];

L = comprimento da viga 0,022m;

E = modulo de elasticidade 2×10^{11} N/m;

I = momento de inércia $bh^3/12$ [m⁴];

$F = K_L X = 8,18 \times 10^8 \times 15 \times 10^{-6} = 1,23 \times 10^4$ N

Conclui-se que se tem um dinamômetro bastante rígido para as condições que serão submetidas, pois a magnitude das forças ensaiada, não excedeu a 600N e para o ensaio dinâmico de aferição, como será vista adiante, a força não excederá $2,5 \times 10^3$ N.

II.1.2 - Ensaio Estático do Dinamômetro

O dinamômetro foi calibrado por um ensaio estático, onde se utilizou um aplicador de forças (Figura A2.2), que tem como princípio de funcionamento a alavanca. O componente mecânico que exerce essa função é o braço, sendo este fixado via rolamento à coluna.

Os cabos que partem das extremidades sustentam pesos que promovem o equilíbrio estático deste braço com o todo; e à esquerda repousarão os discos, de massa aferidas, que tem por finalidade a calibração do aplicador de forças e a obtenção da curva tensão-força do dinamômetro.

Através dos ensaios realizados por Mendes (1999) chegou-se um fator multiplicativo de forças k' (9,90) que é a interação da medida do braço com perdas por atrito na articulação.

Por exemplo, se uma massa de 20 kg for colocada na extremidade direita essa corresponderá a uma massa de $20 \times 9,90 = 198$ kg na haste que está sobre o dinamômetro, que por sua vez acusará uma tensão no voltímetro correspondente a essa força.

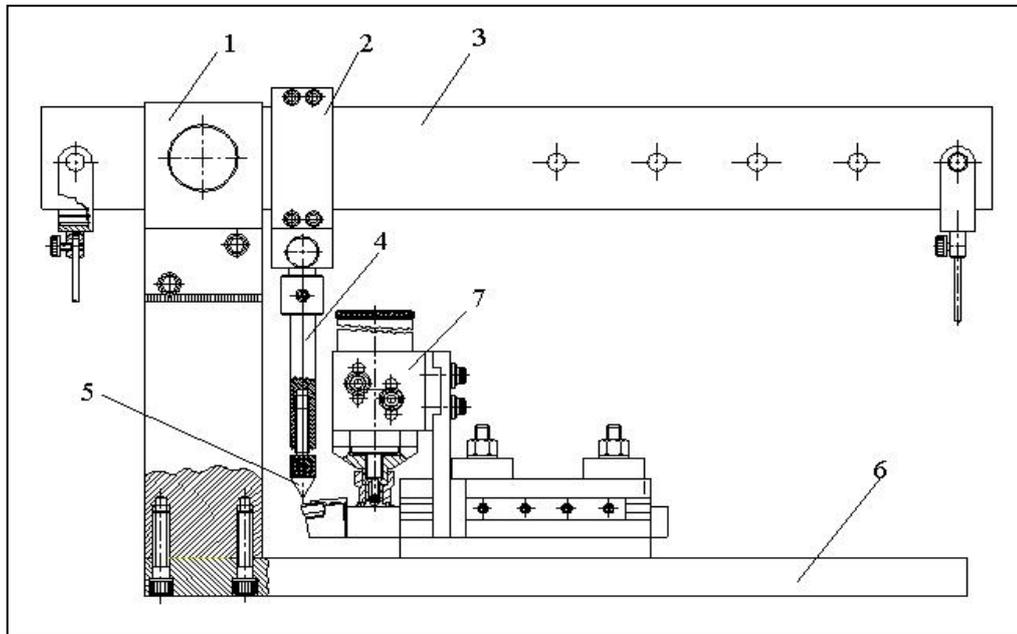


Figura A2.2: Esquema do ensaio estático: (1) coluna, (2) contraponto, (3) braço, (4) haste, (5) ponta da haste, (6) base e (7) sensor de deslocamento

O próximo passo foi obter a relação força-tensão para o dinamômetro de comprimentos em balanço diferentes, mas como a necessidade futura será apenas de um determinado comprimento em balanço, o qual foi utilizado para o cálculo da frequência natural apresentado na figura A2.1:

Os resultados obtidos para esta posição foram:

C	M_c	M_m (mV)
6,574	65,082	$26,5 \pm 0,72$
13,148	130,165	$55,0 \pm 0,81$
19,732	195,346	$86,5 \pm 0,76$
26,315	260,518	$118,5 \pm 0,84$
32,908	323,789	$153,0 \pm 0,8$

onde:

C - carga aplicada em kgf na extremidade direita do aplicador de força;

M_c - carga correspondente em kgf sobre o dinamômetro;

M_m - tensão média de quatro ensaios em milivolts (mV) com o respectivo desvio padrão.

Por meio destes resultados pode-se extrair um fator de conversão (K_m) para o conhecimento da força de corte, pela divisão da soma das cargas em Newtons pela soma das tensões.

Assim:

$$K_m = \frac{\sum M_c g}{\sum M_m} \quad (\text{A.5})$$

$$K_m = \frac{(65,082 + 130,165 + 195,346 + 260,518 + 323,789) \times 9,81}{26,5 + 55 + 86,5 + 118,5 + 153,0} \quad K_m = 21,76 \text{ N/mV}$$

II.1.3- Ensaio dinâmico do dinamômetro

A princípio, foram ensaiados corpos de prova sob condições diferentes, tanto para o dinamômetro, quanto para a plaina (MENDES, 1999). No dinamômetro variava-se o comprimento em balanço, aumentando e diminuindo a sua rigidez, já na plaina as alterações recaíam na velocidade e na profundidade de corte. Este ensaio tinha a finalidade de comprovar se o dinamômetro apresentava as mesmas tendências indicadas pela teoria de Kronenberg e Kienzele.

A tabela A2.1 apresenta uma fração dos resultados obtidos por Mendes (1999), onde o autor desse trabalho esteve presente na coleta dos dados.

Tabela A2.1: Ensaio dinâmico para cdp's do aço SAE 1020

Profundidade de corte	Tensão média (mV) e Força média (N)								
	Avanço = 0,2mm/ciclo			Avanço = 0,4mm/ciclo			Avanço = 0,6mm/ciclo		
	Tensão Média	Desvio Padrão	Força Média	Tensão Média	Desvio Padrão	Força Média	Tensão Média	Desvio Padrão	Força Média
0,3	8,9	0,6	201	16,6	1,0	361	21,0	1,3	487
0,6	16,8	0,7	364	28,3	1,1	602	44,0	1,0	961
0,9	25,4	1,0	542	43,9	1,6	924	63,3	0,9	1357
1,2	35,6	0,9	753	63,3	1,1	1324	87,6	1,5	1866
1,5	44,2	1,1	930	84,0	2,8	1752	116,7	1,3	2464

Observou-se dos resultados apresentados na Tabela A2.1, uma boa repetibilidade aliada a uma coerência nos valores das forças de corte em função das mudanças nas condições de corte.

Com os resultados obtidos nos ensaios de levantamento das forças de cortes envolvidas nas operações de aplainamento, para os aços SAE 1020 e 1045, aliados às informações dos níveis de dureza investigada para as duas classes de aços, julgou-se oportuno realizar uma

comparação entre o comportamento da força de corte obtida através dos experimentos, com a força teoricamente calculada. A teoria para o cálculo da força foi apresentada por Kronenberg, a qual traz como parâmetros, a profundidade de corte, o avanço, o ângulo de saída da ferramenta e a dureza das superfícies a serem cortadas, conforme apresenta as equações A.6 e A.7 descritas a seguir.

A força de corte F_c dada pela equação A.6 é:

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f \quad (\text{A.6})$$

onde:

k_c = pressão específica de corte em N/mm^2 ;

a_p = profundidade de corte em mm;

f = avanço em mm/rot.

Para Stemmer (1987), que apresentou a teoria de Kronenberg, a pressão específica de corte k_c , para o aço, pode ser utilizada para uma determinação aproximada da força de corte, conforme a equação A.7 apresentada abaixo:

$$K_c = 8,43 \cdot \sqrt[2,2]{3,5\text{HB}} \cdot \sqrt[1,5]{80 - \gamma_n} \quad (\text{A.7})$$

onde:

HB = dureza Brinell (3,5HB, representa a conversão da resistência à ruptura σ_r , em dureza);

γ_n = ângulo de saída normal;

Dessa forma, em posse dos resultados da investigação da força e da dureza, para cada grupo de amostras dos dois tipos de aços, poder-se-á confirmar se os resultados obtidos pelo dinamômetro seguem comportamentos similares aos obtidos pela teoria. As condições de corte selecionada para as medições foram às mesmas usadas no primeiro ensaio, aqui apresentado, mas com o avanço de 0,2mm / ciclo e profundidade de corte de 0,3mm. O valor médio da força de corte foi obtido dos resultados através da Tabela 4.12, cujo valor é de 222N para o aço 1020. Para o ensaio do aço SAE 1045 no qual se procurou reproduzir as mesmas condições envolvidas no primeiro ensaio com média aritmética foi de 313N. Dos resultados médios das forças envolvidas no corte de aço 1020 para o 1045, obtidos experimentalmente, um aumento percentual médio de 41% foi percebido.

Para atender as finalidades já mencionadas, segue-se o cálculo teórico da força de corte. Para tal é necessário se conhecer a dureza média para os dois grupos de aços. Assim, a dureza média para o aço 1020 foi calculada na qual ficou próxima de 135HV (135HB), e a do aço

1045, ficou próxima a 310 HV (305HB). Agora em posse dos valores médios de dureza, das condições de usinagem pode-se calcular aproximadamente a força média para cada aço em estudo, através das equações A.6 e A.7.

Então para o aço 1020 de dureza 135HB, e lembrando que para os ensaios o ângulo de saída foi de -10 graus, o avanço de 0,2mm/rot e a profundidade de 0,3mm. Tem-se:

$$K_c = -2771 \text{ N/mm}^2$$

Substituindo na equação A.7, obtém-se:

$$F_c = 166 \text{ N}$$

Para o aço 1045, obedecendo à mesma metodologia de cálculo encontrou-se:

$$F_c = 243 \text{ N}$$

Portanto, a expectativa teórica é que se tenha um acréscimo de força do aço ABNT 1020 para 1045 de aproximadamente 46,4%. Logo, os resultados obtidos pelo dinamômetro (41%) apresentaram-se coerente com o aumento percentual da força de corte teoricamente esperada. Vale lembrar que estes resultados são apenas para estabelecer uma comparação de tendência em relação aos diferentes níveis de dureza.

Para ilustrar a comparação entre o comportamento da força de corte experimental com a força de corte teórica em função da dureza, foram calculadas as forças teóricas para os cdp's 8.1 e 8.2 para duas classes de aços. O cálculo de força se deu através das equações de Kronenberg (A.6 e A.7). As forças de corte teórica e as forças experimentais para os respectivos níveis de dureza dos cdp's 8.1 e 8.2 dos aços ABNT 1020 e 1045, é apresentado na tabela A2.2.

Tabela A2.2: Comparação entre forças de corte teórica e experimental

Corpos de prova	Dureza (Hv)	Força de corte teórica (N)	Força de corte experimental (N)
8.1 ABNT 1020	147	173	252
	125	161	226
8.2 ABNT 1020	144	172	248
	133	166	221
8.1 ABNT 1045	493	300	370
	440	285	306
	288	235	278
8.2 ABNT 1045	478	296	367
	360	260	315
	288	235	295

Os dados da Tabela A2.2 foram plotados em dois gráficos, o primeiro representa as forças teóricas e experimentais para o aço ABNT 1020 em função dos níveis de dureza, e o segundo para o aço ABNT 1045, conforme apresentam as Figuras A2.3 e A2.4.

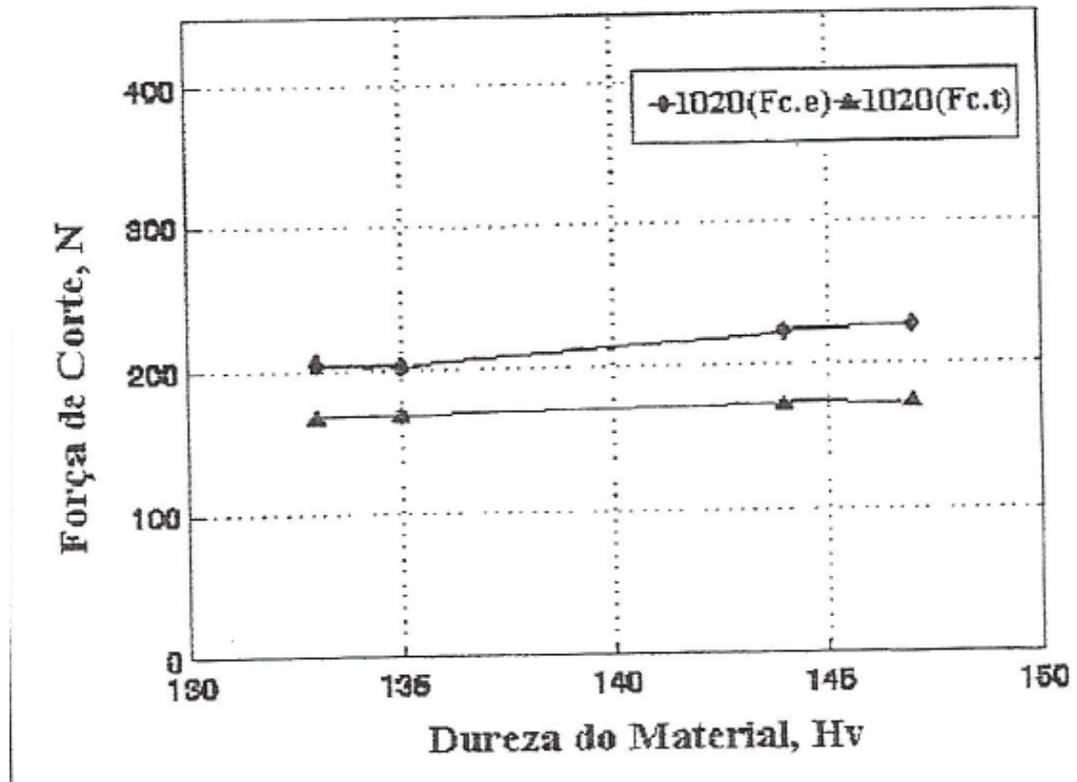


Figura A2.3: Perfil da força de corte teórica e experimental da ZTA para os cdp's 8.1 e 8.2 do aço ABNT 1020.

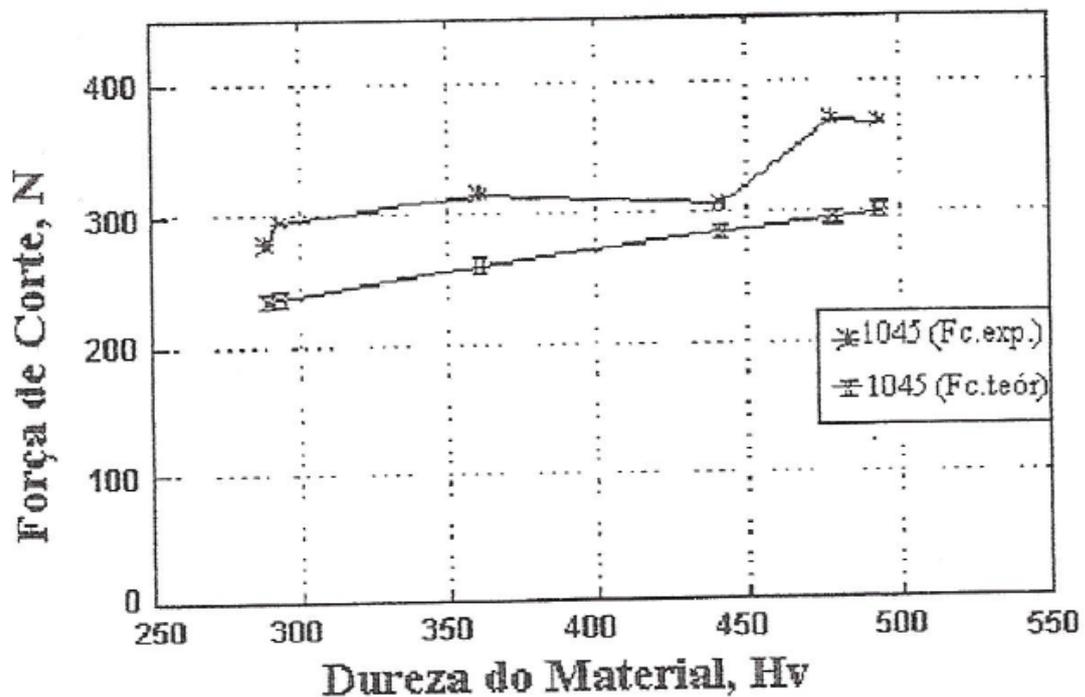


Figura A2.4: Perfil da força de corte teórica e experimental da ZTA para os cdp's 8.1 e 8,2 do aço ABNT 1045.

Observa-se das Figuras A2.3 e A2.4, que ambas as forças são sensíveis ao acréscimo de dureza, sendo que força experimental sempre apresenta um valor mais alto. Este fato não desmerece os dados obtidos experimentalmente, pois as condições de usinagem da teoria de Kronenberg, são próximas, mas não idênticas. Aliada ao fato se tratar de um ensaio que será realizado sob condições constantes, tanto da máquina como do dinamômetro, pode se considerar que este é uma ferramenta adequada para a investigação dos efeitos das variáveis do processo de corte por plasma a ar comprimido na qualidade de corte do aço ABNT 1045.

ANEXO III - Dados do estudo de caso N°1

Material extraído de Montalvão (1997).

A Tabela A3.1 mostra os fatores e os respectivos níveis utilizados para o caso n° 1.

Tabela A3.1: Fatores e respectivos níveis do caso n° 1

Fator	Nível inferior (-)	Nível superior (+)
Pressão	5,3 Kgf/cm ² (75 psi)	7,1 Kgf/cm ² (100 psi)
Velocidade	12,4 cm/min	23,7 cm/min
Corrente	62,5 A	70 A
Distância	3,04 mm	4,38 mm

Fonte: Montalvão (1997)

A escolha do projeto de experimento foi definida para ser o arranjo fatorial fracionado 2^{4-1}_{IV} com 3 réplicas.

A ordem de execução do experimento foi conforme a Tabela A3.2.

Tabela A3.2: Ordem de execução do caso n° 1

Ordem de execução				Pressão	Corrente	Velocidade	Distância
Tratamento				(A)	(B)	(C)	(D)
5	6	2	1	-	-	-	-
1	8	8	2	+	-	-	+
7	1	7	3	-	+	-	+
2	4	1	4	+	+	-	-
3	3	5	5	-	-	+	+
8	2	4	6	+	-	+	-
4	7	6	7	-	+	+	-
6	5	3	8	+	+	+	+

Fonte: Montalvão (1997)

As respostas após a execução de cada tratamento foram anotadas conforme abaixo:

A) Perda de massa: para o presente estudo foi calculado e levado em consideração a perda percentual, isto é, o corpo de prova foi pesada antes e depois de cada tratamento, foi calculada a diferença entre as massas e, em seguida, foi dividida pela massa inicial e multiplicada por 100 conforme equação abaixo:

$$m_p = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100 \quad \text{A3.1}$$

onde: m_i : massa inicial; m_f : massa final; m_p : perda percentual

B) Formação de escória: para o presente estudo foi levado em consideração o percentual de escória formada em relação a massa do corpo de prova antes do tratamento, isto é, as escórias aderidas ao corpo de prova foram cuidadosamente retiradas para um recipiente e medidas por balança digital. O cálculo foi realizada seguindo a equação abaixo:

$$m_e = \left(\frac{m_{ef}}{m_i} \right) * 100 \quad \text{A3.2}$$

onde: m_{ef} : massa escória formada; m_i : massa inicial; m_e : escória percentual

C) Acabamento superficial: para o presente estudo foi utilizado o perfilômetro para registra a ondulação da superfície. Escolhida o método de medição de superfície ampliada e com anamorfose, isto é, ampliação vertical maior que a ampliação horizontal. Neste estudo, a amplitude da onda foi aumentada em 200 vezes e o comprimento ampliado em 10 vezes na mesma posição para todos os corpos de prova. Recorda-se que somente o lado direito da superfície cortada foi medido devido à outra parte ser considerada de refugo.

A Figura A3.1 indica o modo de medição da ondulação da superfície após o corte por plasma.

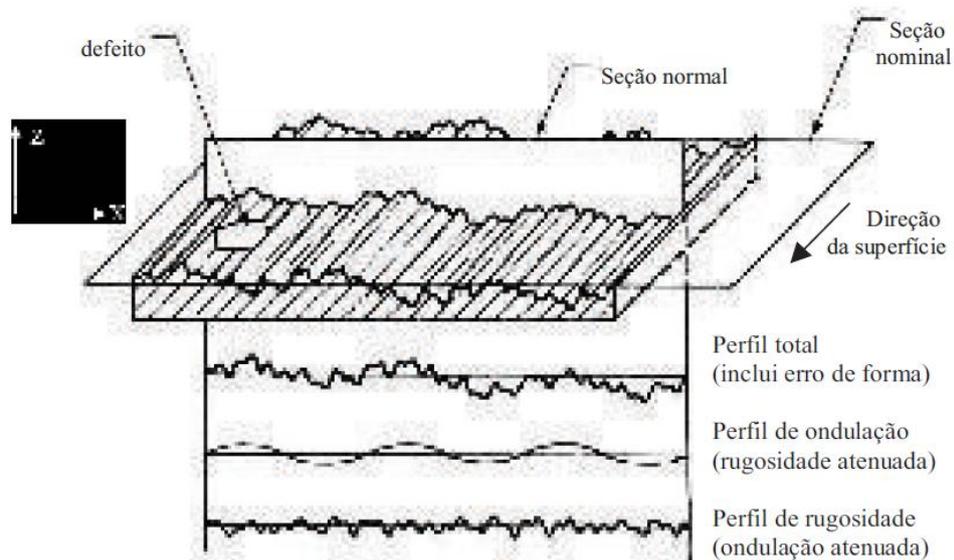


Figura A3.1: Modo de medição da ondulação

Fonte: Machado (2009)

Com o plano perpendicular em relação ao corte, visualiza-se a textura que é composta de rugosidade e a ondulação. A Figura A3.2 mostra a composição da textura vista pelo plano perpendicular.

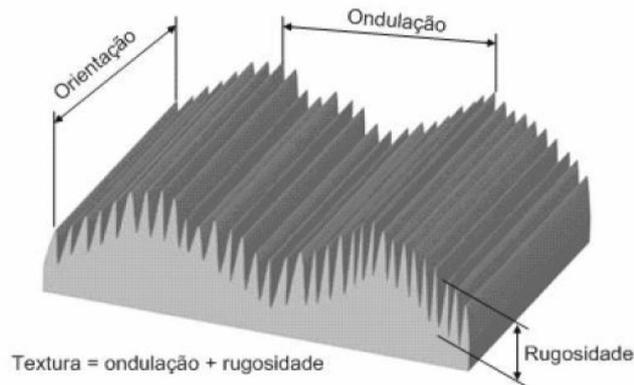


Figura A3.2: Textura da superfície
Fonte: Matos (2009)

Os resultados são mostrados pelas Tabela A3.2, Tabela A3.3, Tabela A3.4 e Tabela A3.5 divididos, respectivamente, em blocos 1, 2 e 3. o corpo de prova (CP) significa corpo de prova, o primeiro dígito representa a ordem de execução do ensaio e o segundo refere-se ao bloco.

Tabela A3.3: Resultados bloco 1 do estudo de caso nº 1

Corpo de prova	Massa inicial	Massa final	Perda de massa	Percentual de Perda de massa	Escória	Percentual de Escória	Acabamento Superficial
Bloco 1 sequência	Gramas	gramas	gramas	%	gramas	%	Adimensional
CP11	561,2	516,4	44,8	7,983	32,7	5,827	12,84
CP21	565,9	522,6	43,3	7,652	29,1	5,142	15,21
CP31	562,4	525,6	36,8	6,543	25,8	4,587	9,26
CP41	570	533,5	36,5	6,404	24,2	4,246	7,35
CP51	562,4	517,8	44,6	7,93	33,6	5,974	8,49
CP61	564,1	522	42,1	7,463	29,7	5,265	2,55
CP71	566,8	512,5	54,3	9,58	43	7,586	116,29
CP81	560	532,8	27,2	4,857	22,5	4,018	28,04

Fonte: Montalvão (1997)

Tabela A3.4: Resultados bloco 2 do estudo de caso n° 1

Corpo de prova	Massa inicial	Massa final	Perda de massa	Percentual de Perda de massa	Escória	Percentual de Escória	Acabamento Superficial
Bloco 2 sequência	gramas	gramas	gramas	%	gramas	%	Adimensional
CP12	559,1	504,5	54,6	9,766	41,4	7,405	114,64
CP22	560	532,5	27,5	4,911	23,3	4,161	9,57
CP32	562,2	524,4	37,8	6,724	29,3	5,212	8,28
CP42	563,5	519,9	43,6	7,737	31,6	5,608	14,44
CP52	559,6	518,2	41,4	7,398	28,7	5,129	5,95
CP62	562,9	520,6	42,3	7,515	30,4	5,401	35,05
CP72	560,4	523,9	36,5	6,513	23	4,104	12,25
CP82	561,3	515,9	45,4	8,088	34,6	6,164	5,02

Fonte: Montalvão (1997)

Tabela A3.5: Resultados bloco 3 do estudo de caso n° 1

Corpo de prova	Massa inicial	Massa final	Perda de massa	Percentual de Perda de massa	Escória	Percentual de Escória	Acabamento Superficial
Bloco 3 sequência	gramas	gramas	gramas	%	gramas	%	Adimensional
CP13	558,4	517,1	41,3	7,396	30,2	5,408	10,53
CP23	558,8	518,2	40,6	7,266	31,5	5,637	13,59
CP33	560,7	520,8	39,9	7,116	28,7	5,119	23,68
CP43	558,1	527,4	30,7	5,501	26,5	4,748	30,74
CP53	562,9	527,1	35,8	6,36	28,4	5,045	38,95
CP63	567,9	532,4	35,5	6,251	23,8	4,191	6,75
CP73	562,3	510,8	51,5	9,159	43,3	7,701	10,05
CP83	560,9	516,6	44,3	7,898	36,2	6,454	8,22

Fonte: Montalvão (1997)

ANEXO IV - Dados do estudo de caso N° 2

Material extraído de Pereira (2000).

O experimento foi realizado utilizando os valores mostrados pelas Tabela A4.1 e Tabela A4.2.

Tabela A4.1: Fatores e respectivos níveis do caso n° 2

Fator	Nível inferior (-)	Nível superior (+)
Pressão	5,3 Kgf/cm ² (75 psi)	7,1 Kgf/cm ² (100 psi)
Velocidade	12,4 cm/min	23,7 cm/min.
Corrente	62,5 A	70 A
Distância	3,0 mm	4,5 mm

Fonte: Pereira (2000)

A escolha do projeto de experimento foi definida para ser o arranjo fatorial fracionado 2^{4-1}_{IV} com 2 réplicas.

Tabela A4.2: Ordem de execução do caso n° 2

Ordem de execução	Tratamento	Distância (A)	Pressão (B)	Corrente (C)	Velocidade (D)	
3 (3.1)	6 (6.2)	1	3,0 (-)	5,3 (-)	62,5 (-)	12,4 (-)
7 (7.1)	8 (8.2)	2	4,5 (+)	5,3 (-)	62,5 (-)	23,1 (+)
8 (8.1)	7 (7.2)	3	3,0 (-)	7,1 (+)	62,5 (-)	23,1 (+)
1 (1.1)	3 (3.2)	4	4,5 (+)	7,1 (+)	62,5 (-)	12,4 (-)
2 (2.1)	4 (4.2)	5	3,0 (-)	5,3 (-)	70,0 (+)	23,1 (+)
4 (4.1)	2 (2.2)	6	4,5 (+)	5,3 (-)	70,0 (+)	12,4 (-)
5 (5.1)	1 (1.2)	7	3,0 (-)	7,1 (+)	70,0 (+)	12,4 (-)
6 (6.1)	5 (5.2)	8	4,5 (+)	7,1 (+)	70,0 (+)	23,1 (+)

Fonte: Pereira (2000)

IV.1 Efeitos geométricos

Para o presente estudo foi calculado o ângulo do chanfro de corte na superfície considerando a resposta ótima o ângulo de 0° (zero) em relação a aresta adjacente ao corte. Lembrando que o fenômeno do corte é, na maioria, de movimento helicoidal ao gás de plasma pela pistola ocasionando de um lado o melhor corte (lado direito) e outro o de corte inferior de maior inclinação (lado esquerdo). Foram medidas as ortogonalidades nos pontos a 10mm, 40mm e 70mm da extremidade conforme mostrada na Figura A4.1.

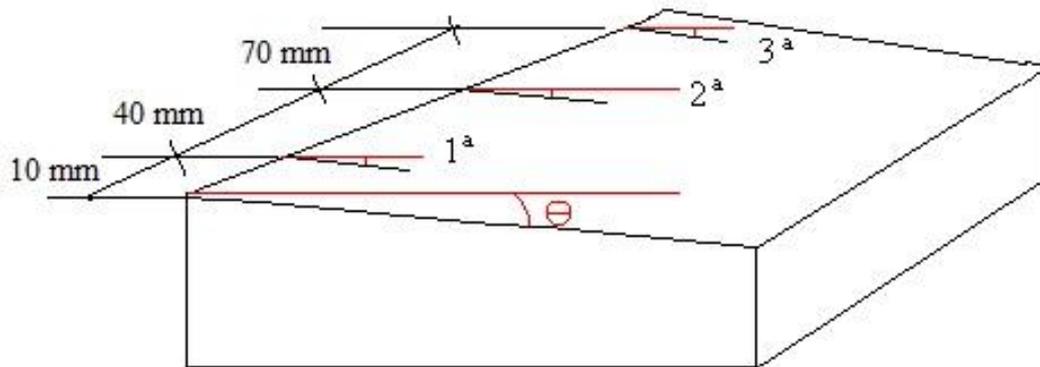


Figura A4.1: Pontos de medição da ortogonalidade
Fonte: Pereira (2000)

As Tabela A4.3 e Tabela A4.4 mostram os resultados da ortogonalidade dos blocos 1 e 2 dos experimentos.

Tabela A4.3: Resultados da ortogonalidade bloco 1 no caso nº 2

Corpo de prova	Ortogonalidade (graus)							
	Distância da extremidade (mm)							
	10		40		70		Média	Média
Sequência	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
Bloco 1								
CP11	6,750	3,750	6,500	3,750	6,333	2,000	6,528	3,167
CP21	7,500	1,000	8,583	1,333	8,667	1,583	8,250	1,306
CP31	8,833	2,167	7,333	2,167	7,833	2,667	8,000	2,333
CP41	4,000	3,667	5,833	3,500	6,000	4,000	5,278	3,722
CP51	6,500	2,000	7,500	2,833	7,667	3,167	7,222	2,667
CP61	7,500	3,500	7,750	3,500	7,667	3,750	7,639	3,583
CP71	6,833	3,667	7,250	3,833	7,417	4,000	7,167	3,833
CP81	8,000	2,000	8,500	2,583	8,833	3,083	8,444	2,556

Fonte: Pereira (2000)

Tabela A4.4: Resultados da ortogonalidade bloco 2 no caso n° 2

Corpo de prova	Ortogonalidade (graus)							
	Distância da extremidade (mm)							
	10		40		70		Média	Média
Sequência	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
Bloco 2								
CP12	5,833	2,000	6,167	2,250	6,333	2,250	6,111	2,167
CP22	8,833	2,083	8,750	1,917	8,833	2,167	8,806	2,056
CP32	8,083	1,833	7,833	2,083	7,667	2,250	7,861	2,056
CP42	4,667	3,917	5,083	4,167	5,333	4,667	5,028	4,250
CP52	7,167	1,750	6,917	1,917	6,667	2,917	6,917	2,194
CP62	6,917	3,750	7,083	3,833	7,083	3,833	7,028	3,806
CP72	6,833	3,500	6,667	3,333	6,833	3,667	6,778	3,500
CP82	7,833	3,667	8,167	2,667	8,500	3,250	8,167	3,194

Fonte: Pereira (2000)

ANEXO V - Dados do estudo de caso N° 3

Material extraído de Pereira (2000).

Para realizar este experimento, aplicou-se os mesmos ajustes dos fatores mostrados no caso n° 2 referente a Tabela A5.1.

A escolha do projeto de experimento foi definida para ser o arranjo fatorial fracionado 2^{4-1}_{IV} com 2 réplicas.

Tabela A5.1: Ordem de execução do caso n° 3

Tratamento		Distância (A)	Pressão (B)	Corrente (C)	Velocidade (D)
1.1	1.2	3,0 (-)	5,3 (-)	62,5 (-)	12,4 (-)
2.1	2.2	4,5 (+)	5,3 (-)	62,5 (-)	23,1 (+)
3.1	3.2	3,0 (-)	7,1 (+)	62,5 (-)	23,1 (+)
4.1	4.2	4,5 (+)	7,1 (+)	62,5 (-)	12,4 (-)
5.1	5.2	3,0 (-)	5,3 (-)	70,0 (+)	23,1 (+)
6.1	6.2	4,5 (+)	5,3 (-)	70,0 (+)	12,4 (-)
7.1	7.2	3,0 (-)	7,1 (+)	70,0 (+)	12,4 (-)
8.1	8.2	4,5 (+)	7,1 (+)	70,0 (+)	23,1 (+)

Fonte: Pereira (2000)

V.1 Zona termicamente afetada (ZTA)

É uma área delimitada pela alteração da coloração devido ao corte térmico. Para a resposta ótima, a área deveria ser mínima. Lembrando que o fenômeno do corte é, na maioria, de movimento helicoidal ao gás de plasma pela pistola ocasionando diferença nas áreas conforme mostra na Figura A5.1.

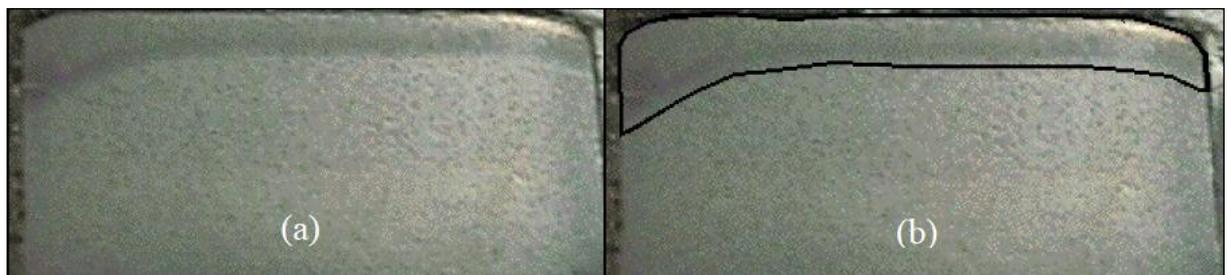


Figura A5.1:(a) ZTA alteração da coloração (b) Demarcação da ZTA

Fonte: Pereira (2000)

V.1.1 Extensão da ZTA

Para este caso foi utilizado o material aço carbono ABNT 1045 de 15,9 mm de espessura.

A Tabela A5.2 mostra a área de transformação dos corpos de prova.

Tabela A5.2: Área de transformação dos corpos de prova

Zona Termicamente Afetada			
Bloco 1	ZTA (mm ²)	Bloco 2	ZTA (mm ²)
CP11	23,23	CP12	23,38
CP21	25,12	CP22	26,12
CP31	25,83	CP32	25,79
CP41	25,33	CP42	23,84
CP51	27,88	CP52	28,59
CP61	24,54	CP62	24,24
CP71	26,93	CP72	26,59
CP81	21,09	CP82	23,04

Fonte: Pereira (2000)

V.1.2 Dureza na ZTA medida no aço ABNT 1045

A Figura A5.2 indicam os pontos de medição da dureza na ZTA.

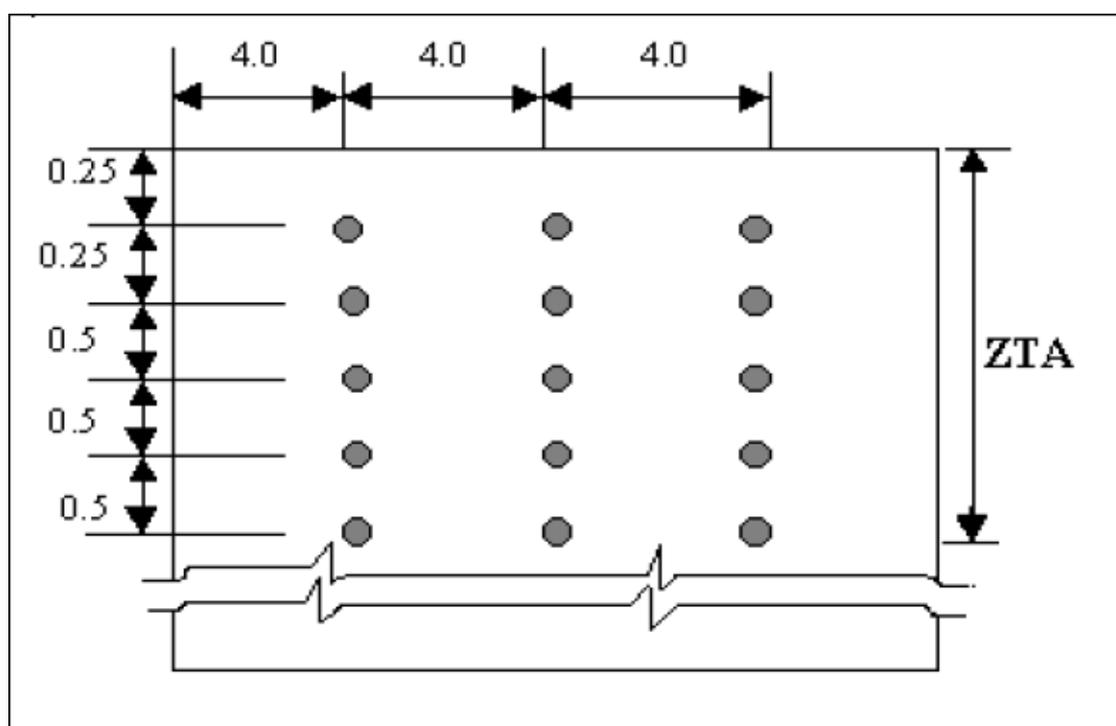


Figura A5.2: Pontos de medição de dureza na ZTA

Fonte: Pereira (2000)

A Tabela A5.3 mostram os valores de dureza nos pontos de extremidade da ZTA para o aço ABNT 1045.

Tabela A5.3: Dureza [Hv] nos pontos de extremidade do aço ABNT 1045

Corpo de prova		Pontos da extremidade [mm] dureza em [Hv]					
Aço ABNT 1045							
Sequência	0,25mm	0,5mm	1 mm	1,5mm	2 mm	MEDIA	DESV PAD
CP11	373,57	336,56	283,24	225,79	220,08	287,85	67,43
CP21	436,80	360,90	270,00	222,30	221,70	302,34	94,16
CP31	449,26	322,94	302,06	221,35	216,64	302,45	94,75
CP41	465,36	380,33	289,54	223,84	217,73	315,36	106,41
CP51	413,46	424,08	292,21	257,01	224,41	322,23	91,41
CP61	376,27	404,59	272,51	228,43	224,88	301,34	84,07
CP71	432,25	362,40	300,35	234,38	215,85	309,05	89,95
CP81	493,71	440,86	288,73	233,79	220,02	335,42	124,50
CP12	370,90	327,95	263,99	238,15	219,04	284,01	63,65
CP22	402,70	339,58	283,74	238,83	215,07	295,98	76,24
CP32	376,00	343,52	275,65	236,09	219,54	290,16	67,71
CP42	363,52	355,82	295,74	234,96	223,49	294,71	65,41
CP52	492,80	440,32	302,04	242,38	226,32	340,77	119,69
CP62	433,07	358,72	288,73	241,46	221,13	308,62	87,40
CP72	436,65	358,34	292,14	224,60	220,54	306,45	92,10
CP82	478,09	360,16	292,99	240,23	226,94	319,68	102,90
MEDIA	424,65	369,82	287,10	233,97	220,84	-	-

Fonte: Pereira (2000)

V.1.3 Dureza na ZTA medida no aço ABNT 1020

A Tabela A5.4 mostra a dureza nos pontos indicados da ZTA do aço ABNT 1020.

Tabela A5.4: Dureza [Hv] nos pontos de extremidade do aço ABNT 1020

Corpo de prova		Dureza HV nos pontos			
Aço ABNT 1020					
Sequência	0,5mm	1,0mm	1,5mm	MEDIA	DESV PAD
CP11	142	134	125	133,67	8,50
CP21	144	132	124	133,33	10,07
CP31	147	136	127	136,67	10,02
CP41	140	135	122	132,33	9,29
CP51	146	133	125	134,67	10,60
CP61	140	132	123	131,67	8,50
CP71	143	132	123	132,67	10,02
CP81	147	135	125	135,67	11,02
CP12	141	129	125	131,67	8,33

CP22	141	128	124	131,00	8,89
CP32	140	129	122	130,33	9,07
CP42	141	131	124	132,00	8,54
CP52	142	132	127	133,67	7,64
CP62	141	131	124	132,00	8,54
CP72	142	132	124	132,67	9,02
CP82	144	133	126	134,33	9,07
Média	142,56	132,13	124,38	-	-

Fonte: Pereira (2000)

V.1.4 Medida de força de corte utilizando aço ABNT 1045

O cálculo da força de corte envolvidas para o aço ABNT 1045, cortados pelo processo de corte por plasma a ar comprimido foi para ter uma noção de grandeza quando o material for utilizada para processo posteriores ao corte, por exemplo, usinagem. A tabela A5.5 mostra a medida de força de corte.

Tabela A5.5: Medida de força de corte de aço ABNT 1045

Corpo de prova Aço ABNT 1045				
Sequência	Força 1° [N]	Força 2° [N]	Força 3° [N]	Valor Médio
	0,3 mm	0,6 mm	0,9 mm	
CP11	361,2	324,2	293,8	326,4
CP21	350,3	302,5	285,0	312,6
CP31	374,3	309,0	298,4	327,2
CP41	363,4	324,2	298,1	328,6
CP51	361,2	335,1	299,2	331,8
CP61	356,8	298,1	278,5	311,1
CP71	346,0	311,2	289,4	315,5
CP81	367,7	306,8	278,5	317,7
CP12	350,3	332,9	276,3	319,8
CP22	354,6	317,7	296,0	322,8
CP32	341,6	306,8	291,6	313,3
CP42	359,0	332,9	269,8	320,6
CP52	359,0	313,3	300,0	324,1
CP62	363,4	302,3	290,7	318,8
CP72	352,5	309,0	297,2	319,6
CP82	370,0	315,5	295,5	327,0
Valor Médio	358,2	315,1	289,9	

Fonte: Pereira (2000)

V.1.5 Medida de força de corte utilizando aço ABNT 1020

O cálculo da força de corte envolvidas para o aço ABNT 1020, cortados pelo processo de corte por plasma a ar comprimido foi para ter uma noção de grandeza quando o material for utilizada para processo posteriores ao corte, por exemplo, usinagem. É análoga ao estudo de medida de força de corte utilizando aço ABNT 1045. A Tabela A5.6 mostra a medida de força de corte para o aço ABNT 1020.

Tabela A5.6: Medida de força de corte de aço ABNT 1020

Corpo de Prova Aço ABNT 1020				
Sequência	Força 1° [N]	Força 2° [N]	Força 3° [N]	Força Média [N]
CP11	250,20	224,10	197,30	223,87
CP21	248,00	228,50	191,50	222,67
CP31	254,60	221,90	202,40	226,30
CP41	243,70	228,50	193,60	221,93
CP51	256,70	226,30	198,00	227,00
CP61	243,70	219,80	200,20	221,23
CP71	239,40	230,60	193,60	221,20
CP81	252,40	226,30	202,40	227,03
CP12	245,90	215,40	189,30	216,87
CP22	239,40	224,10	200,20	221,23
CP32	237,20	219,80	204,50	220,50
CP42	248,00	217,60	198,00	221,20
CP52	243,70	224,10	198,00	221,93
CP62	250,20	219,80	193,60	221,20
CP72	241,50	215,40	198,00	218,30
CP82	248,00	221,90	204,50	224,80

Fonte: Pereira (2000)

ANEXO VI - Catálogo Plasmarc C-70 White Martins

PLASMARC C-70 - Máquina de corte por plasma a ar comprimido.

Faixa de trabalho da temperatura: 18000 °C a 24000 °C.

Faixa de variação da velocidade: 0 a 600 cm/min.

Faixa de espessura de corte: 0 a 19 mm.

-Tabela de corte por plasma com Ar comprimido

Espessura de Corte		Corrente	Bico de corte	Ar comprimido		Distância entre bico e Obra		Velocidade no corte mecanizado [cm/min]		
[mm]	[pol]			[kgf/cm ²] (psi)	[m ³ /h] (pcm)	[mm]	[pol]	Aço baixo carbono	Aço Inoxidável	Alumínio
0.79	1/32	30	0.97 (0.038)	5.3 (75)	8.2 (4.8)	3.17	1/8	635	305	635
1.59	1/16	(100% FT)						406	254	572
3.18	1/8							152	114	165
1.59	1/16	55	1.17 (0.046)	5.3 (75)	8.2 (4.8)	4.76	3/16	571	445	660
3.18	1/8	(100% FT)						241	178	254
6.35	1/4							102	76	114
9.52	3/8							51	38	51
6.35	1/4	70	1.32 (0.052)	5.3 (75)	8.2 (4.8)	4.76	3/16	140	127	165
12.70	1/2	(50% FT)						38	25	76
19.00	3/4							15	15	25

Parâmetros de corte Plasmarc C-70 (white-martins)