

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

RAFAEL DALLEGRAVE CONRADO

**EFEITOS DO CORTE POR LASER SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE
UM AÇO MÉDIO CARBONO**

CAXIAS DO SUL

2014

RAFAEL DALLEGRAVE CONRADO

**EFEITOS DO CORTE POR LASER SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE
UM AÇO MÉDIO CARBONO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica pela Universidade de
Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

CAXIAS DO SUL

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

C754e Conrado, Rafael Dallegrave
Efeitos do corte por laser sobre a integridade superficial de um aço
médio carbono / Rafael Dallegrave Conrado. - 2014.
106 f.: il.; 30 cm

Apresenta bibliografia.
Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

1. Laser – Indústria. 2. Carbono. 3. Engenharia Mecânica. I Título.

CDU 2.ed.:681.7.069.24

Índice para o catálogo sistemático:

1. Laser – Indústria	681.7.069.24
2. Carbono	549.21
3. Engenharia Mecânica	621

Catálogo na fonte elaborada pela bibliotecária
Carolina Machado Quadros – CRB 10/2236.

"Efeito do corte por Laser sobre a integridade superficial de um aço médio carbono"

Rafael Dallegrave Conrado

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 29 de agosto de 2014.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann (orientador)
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha
Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente e incondicionalmente a minha esposa Janinha Ficagna Conrado e a minha filha Lara Ficagna Conrado por estarem sempre ao meu lado, sendo meu porto seguro, dando-me carinho, amor e confiança.

Ao orientador Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann pela oportunidade e contribuição para o meu crescimento profissional, e por ter me dado à chance de compartilhar de seu conhecimento científico ao realizar este trabalho.

Ao professor Dr. Alexandre Fassini Michels, pelo auxílio prestado durante o andamento do trabalho.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul pela viabilização do uso de equipamentos necessários para a realização dos ensaios e análises.

Ao Gerson Luiz Nicola e ao José Adair de Oliveira Giubel pela amizade e por me receberem abertamente durante o mestrado nos laboratórios, ajudando e ensinando-me a fazer os ensaios necessários ao meu trabalho.

Aos bolsistas e membros do GUS - Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul pela colaboração e apoio durante o trabalho.

A Tecnolaser Indústria e Comercio Ltda em especial ao diretor Sr. Wolmar Rizzon e o supervisor de produção Rafael Betto pela disponibilização do material e do equipamento para a obtenção dos corpos-de-prova.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho.

“A vida é como andar
de bicicleta: para
ter equilíbrio você
tem que se manter
em movimento...”

Albert Einstein



RESUMO

Uma condição do processo de manufatura é a necessidade de se obter peças processadas, caracterizadas pela boa qualidade de acabamento superficial, baixa rugosidade e a conservação de suas propriedades metalúrgicas. Essas condições motivaram o desenvolvimento deste estudo, no qual selecionou-se o processamento de materiais a laser para o corte do aço ABNT 1045, unindo uma tecnologia a um metal muito utilizado na indústria. Além disso, a versatilidade e as vantagens, como também a tendência global do setor industrial, tornaram-se fatores preponderantes na utilização do laser como processo de corte. No presente trabalho foram investigados os efeitos da variação da potência de corte, da velocidade de corte e da pressão do gás de assistência na usinagem por laser contínuo de CO₂ sobre a qualidade do corte, onde foram realizadas diversas análises utilizando-se a estatística do planejamento experimental. Após a obtenção das amostras foram analisadas a formação de rebarbas, a rugosidade, o perpendicularismo, a zona termicamente afetada, a microestrutura do material e por fim a microdureza da região obtida pelo corte a laser. Com base nestes dados construíram-se arranjos fatoriais, por meio da metodologia de planejamento experimental, a fim de avaliar o grau de influência dos parâmetros e suas possíveis interações e assim averiguar sua significância estatística. Apesar da complexidade dos efeitos e das interações dos parâmetros envolvidos, os resultados corroboram para que a melhoria do processo de corte a laser do aço ABNT 1045 possa ser factível.

Palavra chave: Corte laser. Parâmetros de corte. Qualidade superficial. Planejamento e análise de experimentos.

ABSTRACT

A condition of the manufacturing process is the need to get processed parts, characterized by good quality surface finish, low roughness and the conservation of its metallurgical properties. These conditions have motivated the design of this study, in which we selected the materials processing laser for cutting steel ABNT 1045, joining a technology to a metal widely used in industry. Moreover, the versatility and advantages, as well as the overall trend of the industry have become important factors in the use of laser as the cutting process. In the present study investigated the effects of varying the cutting power, cutting speed and pressure of assist gas in machining by continuous CO₂ laser on the quality of the cut, where several analyzes were performed using the statistical planning experimental. After obtaining the samples are burrs, roughness, the perpendicularity, the heat affected zone, the microstructure of the material and finally the hardness of the region obtained by laser cutting were analyzed. Based on these data were constructed factorial arrangements, using the methodology of experimental design in order to assess the degree of influence of the parameters and their possible interactions and thus determine their statistical significance. Despite the complexity of the effects and interactions of the parameters involved, the results corroborate that the improvement of laser cut steel ABNT 1045 process may be feasible.

Keyword: laser cutting. Cutting parameters. Surface quality. Planning and analysis of experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laser é luz.....	21
Figura 2 - Esquema simples de um laser	23
Figura 3 - Esquema simples de um laser de CO ₂	25
Figura 4 - Laser de Nd:YAG excitado por díodos.....	26
Figura 5 - Laser de disco de Yb:YAG	27
Figura 6 - Esquema de uma fibra.....	29
Figura 7 - Modos representados de forma retangular.....	31
Figura 8 - Modos representados de forma cilíndrica.....	31
Figura 9 - Apresentação dos modos e suas intensidades	32
Figura 10 - A absorção relativa de energia.....	33
Figura 11 - Uma comparação do corte a laser contínuo e do corte a laser pulsado	34
Figura 12 - Efeito da pulsação em uma curva fechada.....	35
Figura 13 - Ótica de focalização.....	35
Figura 14 - Distâncias focais	36
Figura 15 - Posição do ponto focal.....	36
Figura 16 - Centragem do feixe do laser no bocal.....	37
Figura 17 - Características do bocal	39
Figura 18 - Zonas de Integridade Superficial	40
Figura 19 - Rebarbar do corte laser	42
Figura 20 - Largura do corte.....	43
Figura 21 - Representação das inclusões	44
Figura 22 - Determinação da rugosidade.....	45
Figura 23 - Definição das estrias	46
Figura 24 - Perpendicularidade do corte.....	46
Figura 25 - Os principais efeitos durante o corte a laser	47
Figura 26 - Esquema de funcionamento de um rugosímetro.....	48
Figura 27 - Rugosidade média Ra	49
Figura 28 - Rugosidade máxima R _{máx}	49
Figura 29 - Rugosidade parcial (R _z)	50
Figura 30 - Detalhamento do microscópio ótico	51
Figura 31 - Medição da dureza vickers	52
Figura 32 - Planejamento 2 ³	54

Figura 33 - Gráfico de pareto	56
Figura 34 - Máquina Trumpf Trulaser 5030 Classic	58
Figura 35 - Corpo de prova.....	59
Figura 36 - Arranjo das amostras	60
Figura 37 - Detalhe do corte da peça.....	60
Figura 38 - Cortes realizados para o embutimento.....	62
Figura 39 - Leiaute do embutimento dos cortes	62
Figura 40 - Software ScopePhoto.....	64
Figura 41 - Gráfico da rugosidade da região central da amostra 6.....	64
Figura 42 - Alturas das medidas da rugosidade.....	65
Figura 43 - Metodologia de medição.....	65
Figura 44 - Medição da rugosidade	66
Figura 45 - Metodologia de medição do perpendicularismo do corte.....	67
Figura 46 - Metodologia de medição do tamanho da camada termicamente afetada.....	67
Figura 47 - Metodologia de avaliação da microestrutura	68
Figura 48 - Metodologia de avaliação da dureza.....	69
Figura 49 - Software estatístico Action	69
Figura 50 - Aderência da rebarba na borda de corte.....	71
Figura 51 - Detalhes da amostra 3 - (a) Textura superficial (b) Metalografia.....	72
Figura 52 - Gráficos dos efeitos principais e as suas interações na formação das rebarbas	73
Figura 53- Diagrama de pareto para a formação da rebarba	75
Figura 54 - Gráficos dos efeitos para a rugosidade a 1/3 da borda superior	76
Figura 55 - Diagrama pareto para a rugosidade a 1/3 da borda superior.....	78
Figura 56 - Gráficos dos efeitos para a rugosidade na linha central.....	79
Figura 57 - Diagrama pareto para a rugosidade na linha central.....	80
Figura 58 - Gráficos dos efeitos para a rugosidade a 1/3 da borda inferior	82
Figura 59 - Diagrama pareto para a rugosidade a 1/3 da borda inferior.....	83
Figura 60 - Resumo estatístico de alguns efeitos	84
Figura 61 - Diagrama pareto para os ângulos.....	86
Figura 62 - Efeitos representativos para a perpendicularidade.....	87
Figura 63 - Zona termicamente afetada	88
Figura 64 - Gráficos dos efeitos para a ZTA na face superior	89
Figura 65 - Diagrama pareto para a ZTA na face superior.....	90
Figura 66 - Gráficos dos efeitos para a ZTA na face inferior.....	91

Figura 67 - Diagrama pareto para a ZTA na face inferior.....	93
Figura 68 - Micrografia da região transversal	94
Figura 69 - Gráficos dos efeitos para a microdureza.....	95
Figura 70 - Diagrama pareto para a dureza	97
Figura 71 - Gráfico da dureza em função da profundidade.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Material x espessura x largura do corte.....	43
Tabela 2 - Rugosidade x Tipo de material x Espessura.....	45
Tabela 3 - Sinais algébricos para o cálculo dos efeitos	54
Tabela 4 - Tabela de análise de variância para experimentos fatoriais do tipo 2^3	55
Tabela 5 - Composição química do aço ABNT 1045.....	57
Tabela 6 - Parâmetros de corte utilizado	59
Tabela 7 - Planejamento fatorial 2^3	61
Tabela 8 - Valores das medidas das rebarbas em milímetros.....	71
Tabela 9 - Análise de variância para a formação da rebarba.....	74
Tabela 10 - Valores das medidas das rugosidades a 1/3 da borda superior em μm	76
Tabela 11 - Análise de variância para a rugosidade a 1/3 da borda superior	77
Tabela 12 - Valores das medidas das rugosidades médias na linha central em μm	78
Tabela 13 - Análise de variância para a rugosidade na linha central	80
Tabela 14 - Valores das medidas das rugosidades médias a 1/3 da borda inferior em μm	81
Tabela 15 - Análise de variância para a rugosidade a 1/3 da borda inferior	83
Tabela 16 - Valores das medidas dos ângulos em graus	85
Tabela 17 - Análise de variância para o ângulo superior	85
Tabela 18 - Análise de variância para o ângulo inferior.....	86
Tabela 19 - Valores das medidas da ZTA na face superior em μm	88
Tabela 20 - Análise de variância da ZTA na face superior	90
Tabela 21 - Valores das medidas da ZTA na face inferior em μm	91
Tabela 22 - Análise de variância da ZTA na face inferior.	92
Tabela 23 - Valores da dureza a 0,05mm da borda em HV	95
Tabela 24 - Análise de variância para a dureza	97

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOVA	Análise de variância
ArF	Fluoreto de argônio
c	Direção de corte
C	Carbono
CAM	Manufatura assistida por computador
CO ₂	Dióxido de carbono
Fe ₃ C	Cementita - Carboneto de ferro
FMEA	Análise de modo e efeito de falha
He	Hélio
KrF	Fluoreto de criptônio
Mn	Manganês
N ₂	Nitrogênio
NBR	Norma brasileira
Nd ³⁺	Neodímio
NM	Norma Mercosul
p	Polarização
P	Fósforo
Ra	Rugosidade aritmética ou média
Ry	Rugosidade máxima
Rz	Rugosidade parcial
S	Enxofre
Si	Silício
TEM	Modo transversal eletromagnético
XeCl	Cloreto de xenônio
XeF	Fluoreto de xenônio
ψ	Ângulo
YAG	Granada de alumínio de ítrio
Yb	Itérbio
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

Bar	Unidade de pressão
Hz	Hertz
Kw	Quilowatts
m	Metro
m/min	Metros por minuto
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
mm	Milímetro
mm ²	Milímetros ao quadrado
µm	Micrômetros
W	Watts
W/mm ²	Watts por milímetro quadrado

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	18
1.1 - Objetivo geral	19
1.2 - Objetivos específicos.....	19
1.3 - Estrutura do trabalho	19
2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 - Introdução ao processo de corte por <i>laser</i>	20
2.2 - Conceito de <i>laser</i> e suas características.....	20
2.2.1 - <i>Laser</i>	20
2.2.2 - Fundamentos do <i>laser</i>	21
2.2.3 - Tipo de <i>laser</i>	23
2.2.3.1 - <i>Laser</i> a gás de CO ₂	24
2.2.3.2 - <i>Laser</i> a gás de excímeros	25
2.2.3.3 - <i>Laser</i> de estado sólido de Nd:YAG	26
2.2.3.4 - <i>Laser</i> de estado sólido de Yb:YAG	27
2.2.3.5 - <i>Laser</i> de fibras.....	28
2.2.3.6 - <i>Laser</i> de díodos	29
2.3 - Parâmetros de corte	30
2.3.1 - Parâmetros do feixe	30
2.3.1.1 - Potência.....	30
2.3.1.2 - Modo de qualidade do feixe.....	31
2.3.1.3 - Comprimento de onda	32
2.3.1.4 - Polarização do feixe	33
2.3.2 - Parâmetros do processo	34
2.3.2.1 - Tipo de corte	34
2.3.2.2 - Ótica de focalização e posição do ponto focal.....	35
2.3.2.3 - Velocidade de corte.....	37
2.3.2.4 - Tipo de gás de assistência e sua pressão.....	37
2.3.2.5 - Bico de corte e distância entre o bico e a peça.....	38
2.4 - Integridade superficial	40
2.5 - Integridade superficial do corte a <i>laser</i>	41

2.5.1 - Formação de rebarbas	42
2.5.2 - Largura do corte.....	43
2.5.3 - Inclusão de material.....	43
2.5.4 - Rugosidade do corte.....	44
2.5.5 - Inclinação da linha de corte	45
2.5.6 - Perpendicularismo e tolerância do corte <i>laser</i>	46
2.5.7 - Zona termicamente afetada (ZTA)	47
2.6 - Técnicas de caracterização	47
2.6.1 - Rugosidade	47
2.6.1.1 - Rugosidade média (Ra).....	48
2.6.1.2 - Rugosidade máxima (Ry).....	49
2.6.1.3 - Rugosidade parcial (R _z)	49
2.6.2 - Análise metalográfica e microscopia ótica	50
2.6.3 - Microdureza	51
2.7 - Planejamento e análise de experimentos	53
2.7.1 - Planejamento Fatorial	53
2.7.1.1 - Planejamento Fatorial 2 ³	53
2.7.1.2 - Análise da variância	55
2.7.2 - Diagrama de pareto.....	56
3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL	57
3.1 - Material.....	57
3.2 - Equipamento <i>laser</i> utilizado.....	57
3.3 - Parâmetros de corte	58
3.4 - Corpos de prova.....	59
3.5 - Planejamento fatorial e análise estatística	61
3.6 - Metalografia	61
3.6.1 - Preparação das amostras	62
3.7 - Análise da qualidade superficial do corte.....	63
3.7.1 - Avaliação da rebarba	63
3.7.2 - Avaliação da rugosidade.....	64
3.7.3 - Avaliação do perpendicularismo do corte	66
3.7.4 - Avaliação da dimensão da zona termicamente afetada	67
3.7.5 - Avaliação da microestrutura	68
3.7.6 - Avaliação da dureza.....	68

3.8 - Software estatístico.....	69
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1 - Rebarbas	70
4.2 - Rugosidade	75
4.2.1 - Rugosidade média (Ra) a 1/3 da borda superior.....	75
4.2.2 - Rugosidade média (Ra) na linha central	78
4.2.3 - Rugosidade média (Ra) a 1/3 da borda inferior.....	81
4.2.4 - Avaliação geral da rugosidade.....	83
4.3 - Perpendicularismo do corte	85
4.4 - Zona termicamente afetada.....	87
4.4.1 - Avaliação da zona termicamente afetada na face superior	88
4.4.2 - Avaliação da zona termicamente afetada na face inferior	90
4.5 - Microestrutura	93
4.6 - Dureza.....	94
4.6.1 - Análise da dureza em um ponto isolado	94
4.6.1 - Análise da dureza em função da profundidade.....	98
5 - CONCLUSÃO	99
6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
BIBLIOGRAFIA	101
APÊNDICE A - RESULTADO DAS MEDIÇÕES DA DUREZA VICKERS	107

1 - INTRODUÇÃO

Devido ao avanço da tecnologia e ao aumento da competitividade no mercado globalizado, muitas empresas buscam melhores equipamentos e materiais para aumentar sua qualidade e produtividade e, é nesta busca que a tecnologia atual oferece máquinas de corte *laser* para diversos tipos de processos e materiais. Estes equipamentos estão se tornando, cada vez mais, uma ferramenta de grande importância na produção industrial. Sua capacidade de realização de “*designs*” inovadores é inigualável, bem como sua flexibilidade, velocidade e qualidade final.

Como consequência, os setores científico e industrial inseridos neste mercado competitivo, o qual é influenciado pelos efeitos da globalização e da preocupação com o desenvolvimento sustentável, devem se adequar através da inclusão de novas tendências e tecnologias. Em resposta a esta tendência, o pensamento empreendedor é essencial para ambos os setores. Isso implica em estimular o desenvolvimento ampliando as bases tecnológicas, coordenar o gerenciamento de recursos escassos, fixar alvos e objetivos factíveis, assim como procurar inovar.

Dentro desse contexto mercadológico está imerso o universo em que os profissionais, pluralistas em conhecimentos e habilidades, procuram selecionar o tipo de material, o processamento mais apropriado, suas vantagens/desvantagens e as diferentes implicações no resultado final do produto para satisfazer os requisitos do mercado atual.

Em diversos segmentos do setor industrial, o processamento de materiais a *laser* tornou-se uma alternativa interessante e competitiva em relação aos métodos convencionais de manufatura. Atualmente, sua aplicação é diversificada, principalmente devido aos seus benefícios e a sua versatilidade, abarcando mercados como o da indústria automotiva, aeroespacial e médica. Esta tecnologia exerce grande interesse, pois consegue agregar inúmeras vantagens. As mais importantes são: processo sem contato e sem desgaste de ferramenta, possibilidade de uso de atmosfera controlada, alta densidade e controle de energia, flexibilidade no caminho do feixe, simplicidade de fixação, facilidade no processo de automação, pequena zona termicamente afetada, alta velocidade de processo, excelente qualidade da borda, baixa emissão de poluição, entre outras.

Desse modo, a necessidade da compreensão do processo de corte *laser*, caracterização, avaliação dos efeitos e compreensão da extensão dos danos causados por este processo sob a integridade superficial de peças cortadas é de grande valia para melhoria dos processos e do produto.

1.1 - Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar a integridade superficial do processo de corte a laser, tendo como variáveis a potência, a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência, aplicado ao corte de chapas de aço ABNT 1045 com espessura de 3,75mm.

1.2 - Objetivos específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) estudar e compreender os métodos usuais de caracterização da integridade superficial;
- b) compreender como a variação da potência de corte, da velocidade de corte e a pressão do gás de assistência afetam a integridade superficial;
- c) avaliar a formação das rebarbas e o perpendicularismo do corte;
- d) quantificar a rugosidade da superfície cortada;
- e) mensurar a região termicamente afetada analisando a microestrutura e determinando a dureza e a camada utilizando métodos usuais de caracterização.

1.3 - Estrutura do trabalho

Além deste primeiro capítulo, introdutório ao tema da dissertação, o presente trabalho tem sua estrutura dividida em outras quatro seções principais. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema de usinagem não convencional por corte a laser. No capítulo 3 é relatada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho e como serão tratados os dados coletados. O capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia proposta e a análise dos resultados obtidos. Por fim, a quinta seção apresenta as conclusões principais do trabalho.

2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 - Introdução ao processo de corte por *laser*

Desde o início da década de 70, com o desenvolvimento dos *lasers* de potência, a utilização destes no corte não tem parado de crescer. O corte por *laser* tornou-se o processo de corte preferencial para muitas empresas, com base nas altas velocidades de corte e na exatidão do processo. Os equipamentos destinados a este fim permitem obter peças de geometria complexa, acabamento de superfícies praticamente livre de rebarbas na região de corte e rapidez na execução de peças (BAGNATO, 2001).

Os primeiros trabalhos de investigação que conduziram à invenção do feixe laser foram realizados por Albert Einstein em 1917. Tratava-se então do estudo dos fenômenos físicos de emissão espontânea e estimulada subjacentes ao princípio do funcionamento do *laser*. Os trabalhos de Bohr e Planck permitiram formular a teoria da mecânica quântica, componente essencial a compreensão do modo de funcionamento do *laser*. O primeiro *laser* foi construído em Julho de 1960, por Theodore Maiman, que trabalhava nos laboratórios de investigação de Hughes. Tratava-se de um *laser* de estado sólido de rubi, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal (VASCONCELLOS, 2013).

Poucos meses depois, em dezembro de 1960, surgiu o primeiro laser de estado gasoso. Tratava-se de um *laser* He-Ne desenvolvido por Javan, Benett e Harriot. Só alguns anos mais tarde surgiram o *laser* de CO₂ desenvolvido por Patel. A era do *laser* tinha chegado e desde então, os equipamentos e a tecnologia não têm parado de se desenvolver. As primeiras aplicações industriais dos *lasers* surgem no início da década de 70 com os *lasers* de gás. Atualmente existem inúmeros tipos de fontes de *lasers*: estado sólido, gasoso e líquido, cada qual com as suas características que justificam a sua aplicação para determinado fim (SANTOS et al., 1991 e VASCONCELLOS, 2013).

2.2 - Conceito de *laser* e suas características

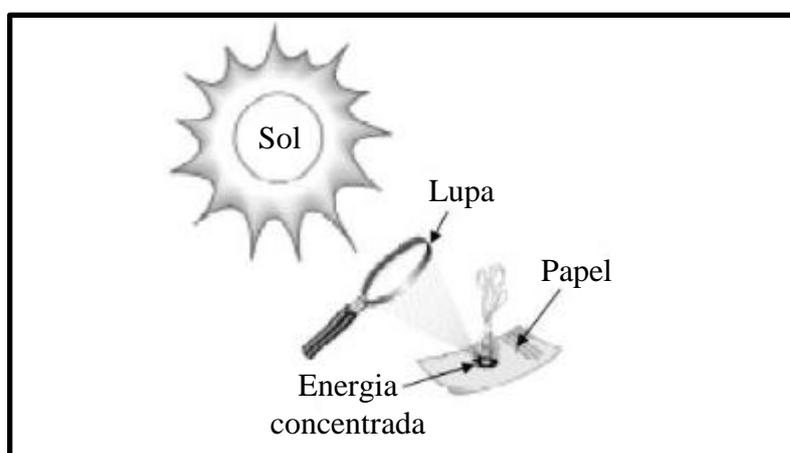
2.2.1 - *Laser*

Laser, acrônimo de “*Light amplification by simulated emission of radiation*” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), é hoje em dia sinônimo de máxima eficiência e máxima qualidade de processamento de materiais. É um dispositivo que emite

radiação luminosa através do bombeamento efetuado por uma fonte de energia apropriada a um meio ativo. Este meio é escolhido de modo a ocorrer uma emissão estimulada (BERRETA, 1995 e VASCONCELLOS, 2013).

O uso do *laser* pode ser entendido mais facilmente se for imaginado o que acontece quando se focaliza raios solares através de uma lente de aumento, para produzir uma fonte concentrada de energia, na forma de calor, sobre uma folha de papel como é possível observar na figura 1. Embora desse método resultem apenas buracos queimados no papel, ele nos mostra que a luz é realmente uma fonte de energia com potenciais condições de ser processada e explorada do ponto de vista industrial (VASCONCELLOS, 2013 e FARO, 2006).

Figura 1 - Laser é luz



Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2013)

Em suma, o *laser* é um sistema que produz um feixe de luz concentrado, obtido por excitação dos elétrons de determinados átomos, utilizando um meio ativo que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Este feixe de luz produz intensa energia na forma de calor. Para a obtenção do *laser* é necessário acrescentar ao meio ativo um sistema ótico adequado, a cavidade ressonante, constituída por dois espelhos posicionados nas extremidades do meio ativo e coaxial a ele, perpendicularmente à direção em que o feixe é emitido (VASCONCELLOS, 2013 e STEEN, 2003).

2.2.2 - Fundamentos do *laser*

A emissão estimulada é o princípio físico que permitiu a invenção dos *lasers*. Albert Einstein, por meio do estudo iniciado por Planck sobre a distribuição espectral da radiação do corpo negro e da concepção do efeito fotoelétrico, afirmou que a quantização da energia dos osciladores harmônicos poderia também ser estabelecida como se a luz consistisse de quanta

de energia. Desta maneira, a luz abordada como fenômeno ondulatório passou a ser descrita como constituída de pequenas partículas de energia eletromagnética - fótons (SANTOS et al., 1993).

Novamente, Einstein estudou a interação dos átomos com a luz e introduziu o conceito de emissão estimulada, além do já existente, absorção (estimulada) e decaimento espontâneo (KOECHNER, 2006).

Para simplificar o entendimento da produção de luz no *laser*, suponha que um átomo possua somente dois estados simples de energia E_1 e E_2 , em que $E_2 > E_1$. Se um conjunto Z_1 desses átomos com elétrons de valência que se encontram no estado fundamental de energia E_1 interage com o campo de radiação de densidade $\rho(\nu)$, ocorrendo o fenômeno que segundo Einstein um número igual a $Z_1\rho(\nu)P$, onde P é a constante de probabilidade de interação que passará ao estado de energia E_2 . Os Z_2 átomos, cujos elétrons estão no estado de energia E_2 , podem emitir radiação pelo processo de emissão espontânea ou estimulada (TRÄGER, 2007).

Para obter a ação laser é necessário manter uma taxa de emissão estimulada maior que as taxas de absorção e emissão espontânea, ou seja, o número de fótons deve ser grande, como também, garantir um maior número de átomos no estado excitado ($Z_2 > Z_1$). O elétron no nível 2 (excitado) apresenta uma forte tendência a retornar para o nível 1 (fundamental) e quando exposto a um agente (fóton) externo produzirá outro fóton (luz) idêntico com mesma energia e em fase (TRÄGER, 2007).

Portanto, a luz que é propiciada pela emissão, em virtude dos elétrons excitados decaírem dos seus maiores níveis energéticos de forma estimulada, será um feixe laser ao amplificar este fenômeno, por meio do uso de espelhos para realimentar os fótons neste meio e provocar a interação com os átomos (SANTOS et al., 1993).

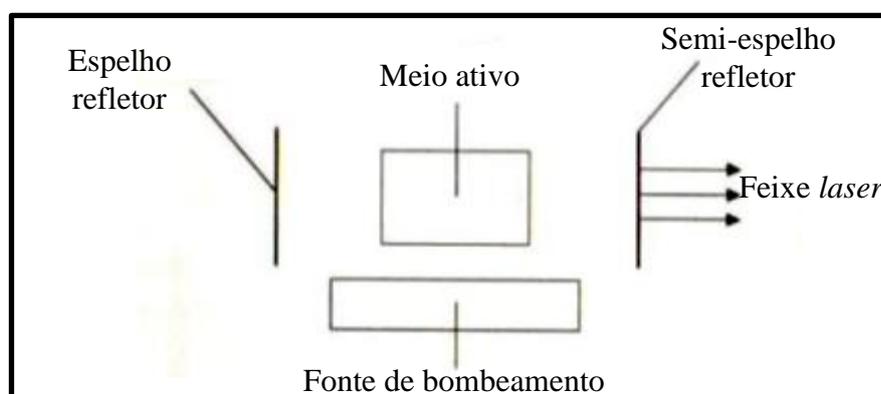
Basicamente, a geração do laser necessita de um meio ativo, um sistema de bombeamento e um ressonador óptico conforme demonstrado na figura 2 (SANTOS et al., 1993).

O meio ativo ou meio de ganho é a parte principal do laser, onde ocorre a amplificação da luz através da emissão estimulada. Pode se apresentar nos estados: sólido, líquido ou gasoso, contendo um conjunto de átomos, moléculas ou íons, onde se dará a emissão espontânea e a estimulada (TRÄGER, 2007).

No bombeamento o conjunto de átomos (ou ainda íons, ou moléculas) do meio ativo, em equilíbrio termodinâmico, necessita do fornecimento de energia de uma fonte externa para passar para o estado excitado; ou seja, o bombeamento proporciona uma maior população no nível superior de energia, fato conhecido como: inversão de população. A fonte de

bombeamento pode ser uma descarga elétrica, uma lâmpada ou outro laser (TRÄGER, 2007).

Figura 2 - Esquema simples de um laser



Fonte: Adaptado de Santos e Quintino (1993)

O ressonador é constituído por dois espelhos posicionados paralelamente entre si, no qual um dos espelhos tem refletividade de 100% e outro parcial, permitindo que parte da radiação circulante no ressonador seja transmitida (TRÄGER, 2007).

Sua principal função é agir como um elemento de realimentação altamente seletivo, armazenando luz que circula entre os espelhos e permitindo que parte do sinal óptico emitido pelo meio ativo retorne para ser amplificado. Esta amplificação ocorre de modo coerente e colimado, resultando em um estreito feixe de luz direcionado perpendicularmente às superfícies dos espelhos. Além disso, o ressonador também é responsável pela distribuição espacial de intensidade do feixe laser, e também exerce influência nas propriedades espectrais e de potência da radiação emitida (KOECHNER, 2006).

Para que a energia armazenada pelo meio ativo seja transformada em oscilação “*laser*”, a densidade de inversão de população do meio ativo deve assegurar um ganho, não saturado, que iguale as perdas no ressonador. Ao limitar o nível e a natureza destas perdas é possível controlar os vários parâmetros da emissão laser, como a potência de saída, a distribuição do espectro de frequências, a estabilidade da radiação emitida e a qualidade espacial e temporal do feixe (TRÄGER, 2007 e STEEN, 2003).

2.2.3 - Tipo de *laser*

Desde o surgimento do primeiro *laser* até os nossos dias, várias centenas de tipos de *lasers*, funcionando em diversos comprimentos de onda e utilizando praticamente todos os meios ativos disponíveis, demonstraram sua viabilidade nos laboratórios. Além disso, prosseguem os estudos sobre desenvolvimento de novos *lasers*, como o de elétrons livres e de raios-X. Entretanto, apenas algumas dezenas deles chegaram e continuaram a ser fabricados

industrialmente (KINCADE; ANDERSON, 2007). Embora todos esses *lasers* possuam em comum um meio ativo, um sistema de bombeamento e uma cavidade ressonante, suas características de funcionamento diferem radicalmente em numerosos aspectos, tais como as propriedades do feixe e as limitações de operação. Evidentemente, diferem também pelo preço (BELFORTE, 2006).

Naturalmente não é possível expor com detalhes essa evolução tecnológica. Assim, serão descritos somente alguns *lasers* que são objetos de aplicações de natureza científica ou industrial.

2.2.3.1 - *Laser a gás de CO₂*

O corte de chapas por *laser* tem a vantagem de produzir superfícies de corte com enorme precisão e muito menor distorção em relação a outros processos como o oxicorte e o arco em plasma por exemplo. Além de constituir um processo muito mais rápido, o *laser* tem ainda a vantagem de produzir uma reduzida zona termicamente afetada (ZTA) (RAJARAM et al., 2003).

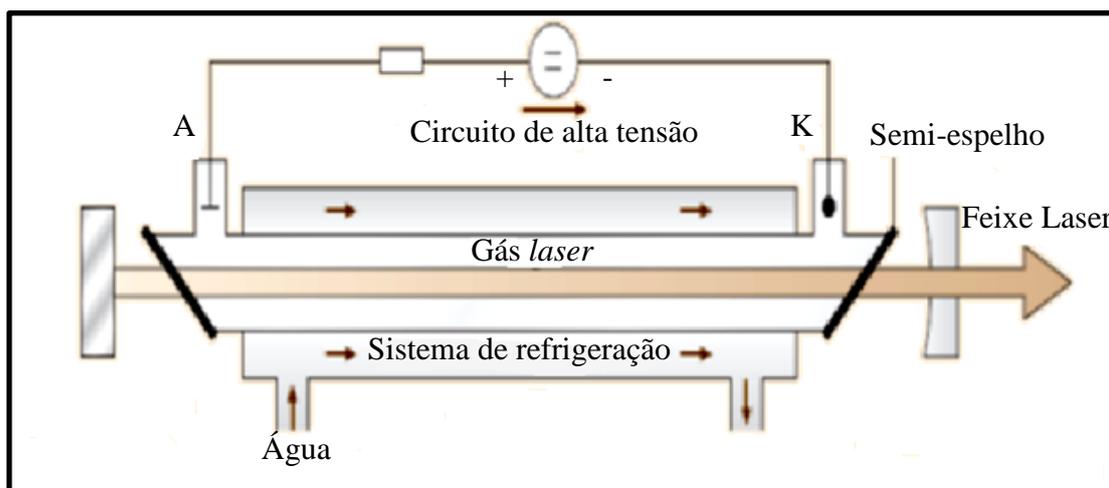
O *laser* de CO₂ é o tipo de *laser* mais comum e adequado para o processamento de materiais, sobretudo nas aplicações que exijam elevada densidade de potência, isto é feixes com elevada qualidade (TEM₀₀) (WIRTH. 2004).

Este tipo de *laser* utiliza como meio ativo uma mistura de dióxido de carbono, hélio e nitrogênio em concentrações de aproximadamente 6, 10 e 84% respectivamente (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008). O CO₂ é o responsável pela emissão de radiação, o N₂ ajuda a excitar as moléculas de CO₂ e o He é responsável simultaneamente pelo arrefecimento e pela manutenção da inversão de população (WIRTH. 2004).

Os equipamentos funcionam com lentes que focam o feixe, possibilitando um feixe de potência superior em relação a outros tipos de *laser*, atingindo potências até 50 kW. Os *lasers* de CO₂ emitem radiações com comprimentos de onda de 10,6 µm e produz potências de 10 W/mm² (SANTOS et al., 1993).

O feixe gerado é uma luz infravermelha (comprimento de onda de 9,2 a 11 µm), não visível a olho humano, sendo frequente a troca para um feixe de baixa potência visível ao olho humano durante o seu alinhamento (WIRTH. 2004).

Os raios *laser* de CO₂ são transmitidos à peça por espelhos e lentes. Os sistemas de *laser* de CO₂ necessitam de cuidados de manutenção como a limpeza e o realinhamento das lentes (SANTOS et al., 1993). A figura 3 apresenta o esquema de geração do corte *laser*.

Figura 3 - Esquema simples de um laser de CO₂

Fonte: Adaptado de Träger (2007)

2.2.3.2 - Laser a gás de excímeros

Estes *lasers* surgiram na década de 80. O termo “excímero” provém do inglês “*excited dimer*”, isto é, dímeros excitados que são moléculas diatómicas que só existem no estado excitado, ou seja, o estado fundamental corresponde ao estado de dissociação das moléculas. O meio ativo é uma mistura gasosa que consiste em gases raros (argônio, criptônio, xenônio), um gás halogeneto e hélio (SANTOS et al., 1993).

Os gases nobres não podem formar compostos com outros elementos em condições normais. Quando se excitam os gases nobres na cavidade, por descarga elétrica, feixe de elétrons ou ambos, os seus átomos ionizam-se. Os íons em conjunto com moléculas neutras, tais como flúor ou cloro, formam as moléculas ionizadas, isto é, os dímeros excitados. Dímeros típicos são o fluoreto de criptônio (KrF), o fluoreto de xenônio (XeF), o fluoreto de argônio (ArF) e o cloreto de xenônio (XeCl). A ligação é muito forte e dura apenas alguns nano-segundos (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

Estes compostos existem temporariamente enquanto o gás nobre estiver no estado de excitação eletrônica. Quando os átomos do gás nobre já não se encontram em excitação, a dissociação da molécula nos seus componentes elementares liberta energia na forma de fótons. Quanto maior for esta energia, menor é o comprimento de onda. Em condições apropriadas, este mecanismo é usado para a geração de *laser* de excímeros (TRÄGER, 2007).

O *laser* de excímero gera radiação *laser* ultravioleta, com comprimento de onda compreendido entre 0,193 μm e 0,351 μm conforme o meio ativo, e caracterizam-se por serem capazes de produzirem pulsos muito curtos e de elevada potência (SANTOS; et al., 1993). Dado estes curtos comprimentos de onda, os fótons têm energia muito elevada. Os *lasers* de excímeros são capazes de remoção de material por processo ablativo. Este processo

de dissociação química tem efeitos térmicos mínimos quando comparado com o processo físico de mudança de fase. Por este motivo, designa-se por vezes corte *laser* frio (TRÄGER, 2007).

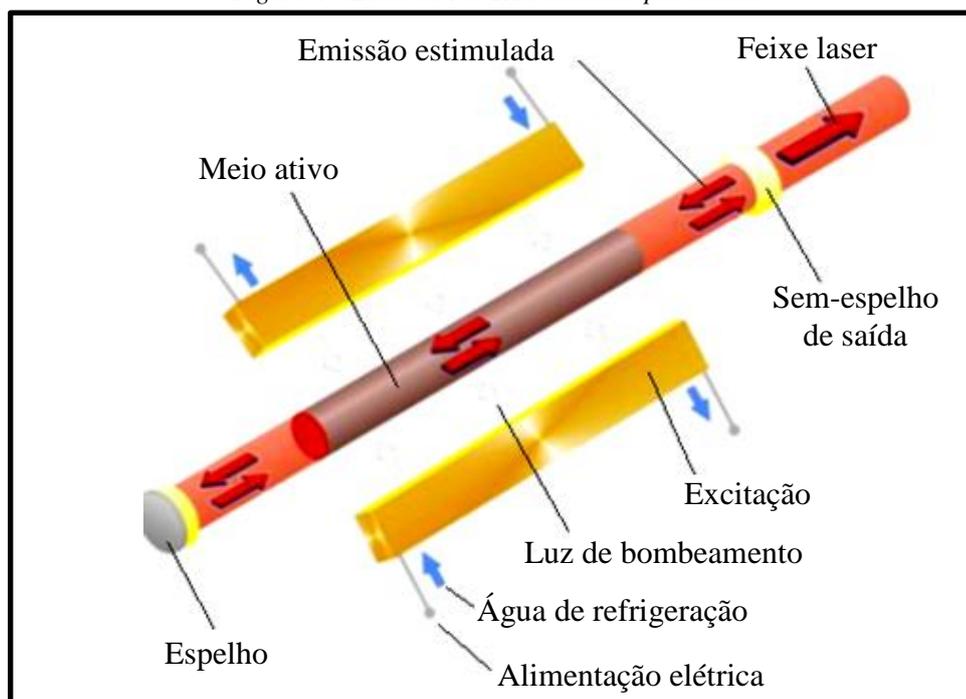
Os *lasers* de excímeros não são suficientemente potentes para quebrar ligações metálicas diretamente, mas devido ao curto comprimento de onda, é possível focar um feixe num ponto focal de muito pequenas dimensões (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008). A combinação de radiação ultravioleta, pulsos curtos e de elevada potência faz com que estes *lasers* sejam adequados para aplicações de remoção de matéria, embora neste domínio o seu campo de utilização seja essencialmente em micro furação de elevada precisão (TRÄGER, 2007).

São usados para micro litografia, micro usinagem, marcação de materiais termicamente sensíveis, tratamentos de superfície e em aplicações médicas (WIRTH. 2004). O processamento com este tipo de *laser* permite a obtenção de resultados de alta qualidade, precisão e com zona afetada termicamente mínima (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

2.2.3.3 - Laser de estado sólido de Nd:YAG

Os *lasers* de Nd:YAG são constituídos por um varão sólido de YAG (*Yttrium Aluminum Garnet*) dopado com íons Nd^{3+} (*Neodymium*) que constitui o elemento ativo. O varão é montado numa cavidade ótica conforme figura 4 (WIRTH. 2004).

Figura 4 - Laser de Nd:YAG excitado por díodos



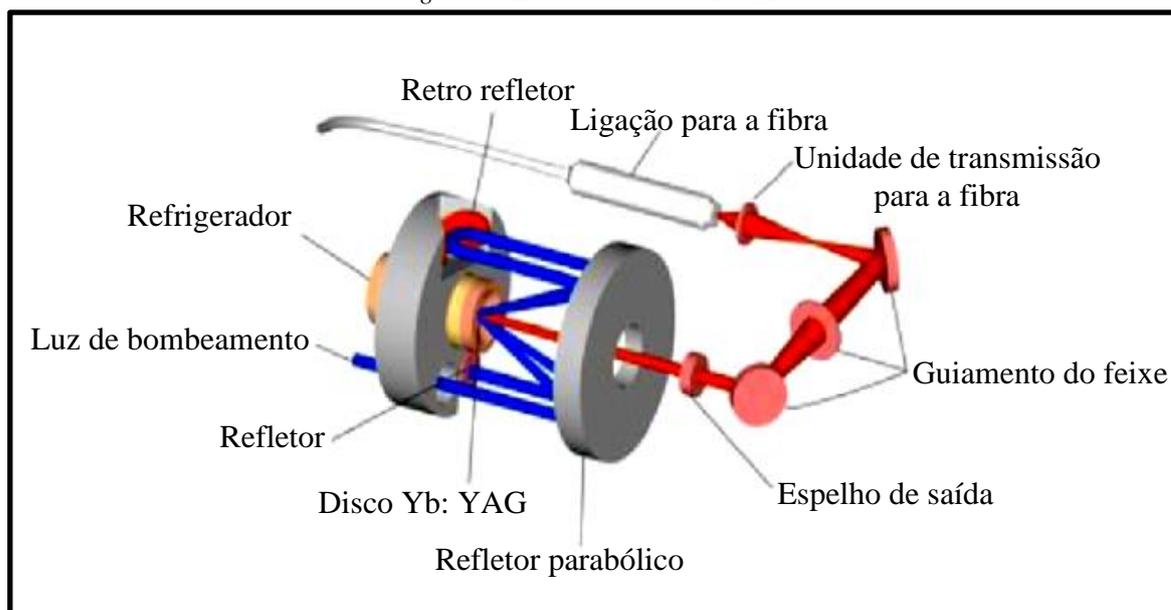
Fonte: Adaptado de Wirth (2004)

O bombeamento do meio ativo pode ser feito através de lâmpadas de flash (*Krypton* ou *Xenon*) ou mais recentemente através de *lasers* de díodos. O bombeamento por *lasers* de díodos é muito mais eficiente. A razão prende-se com a banda de emissão de cada solução. As lâmpadas emitem numa banda muito larga, grande parte da qual não pode ser usada para bombeamento e como consequência há um desperdício de energia. No caso dos díodos, a banda é muito pequena, sendo que o desperdício é muito menor. O varão tem tipicamente 2 a 8 mm de diâmetro e um comprimento de 20 a 200 mm (TRÄGER, 2007).

2.2.3.4 - Laser de estado sólido de Yb:YAG

Os *lasers* de disco representam atualmente uma solução inovadora para os problemas típicos dos *lasers* do tipo varão, tais como a qualidade do feixe e a dissipação do calor. A geometria particular dos *lasers* de disco permite um arrefecimento muito mais eficaz e como tal uma melhor qualidade do feixe (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

Figura 5 - Laser de disco de Yb:YAG



Fonte: Adaptado de Wirth (2004)

O varão de YAG é arrefecido por água apenas na sua superfície exterior, resultando num aquecimento acentuado no seu interior. O gradiente térmico do interior para o exterior provoca distorções térmicas, limitando assim a qualidade do feixe. Nos *lasers* de disco, dado que este é muito fino, a capacidade dissipativa é muito superior, o arrefecimento é muito mais eficiente e o gradiente térmico é desprezável (TRÄGER, 2007).

Nos *lasers* de disco, o *neodymium* é substituído por *ytterbium*. Uma das vantagens do *ytterbium* face ao *neodymium*, é que os seus íons são muito mais adequados para ocuparem os interstícios da malha de YAG, permitindo níveis de dopagem francamente superiores

(TRÄGER, 2007). Pelo mesmo motivo é possível substituir o varão de YAG por um disco de dimensões menores. Cada disco é capaz de gerar 750 W. Na Figura 5, está esquematizado o princípio de funcionamento do *laser* de disco (WIRTH, 2004).

A vantagem de ter uma melhor qualidade do feixe é particularmente importante no contexto da capacidade de focagem e densidade de potência na peça a processar. No entanto, antes de chegar à peça, o feixe tem de ser focado para o interior da fibra ótica e a qualidade do feixe é o fator mais importante para a determinação do diâmetro do núcleo da fibra que ele pode atravessar (WIRTH, 2004). Quanto menor for o diâmetro do núcleo da fibra menor é o ponto focal. Atualmente, um *laser* do tipo varão bombeado por lâmpadas pode ser transmitido por uma fibra com núcleo de 600 μm , enquanto que um *laser* de disco pode ser transmitido por uma fibra com núcleo de 200 μm . Isto se traduz de imediato em uma maior densidade de potência e como tal na possibilidade de processamento maior (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

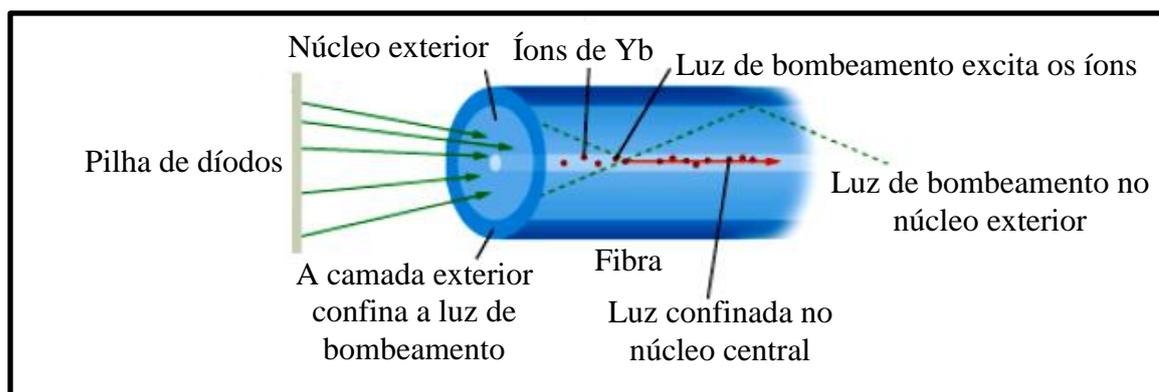
2.2.3.5 - Laser de fibras

Estes *lasers* caracterizam-se pelo seu tamanho compacto, alta eficiência e excelentes parâmetros do feixe. Estes geradores são fabricados à base de fibras óticas de dupla camada (SCINTILLA; TRICARICO, 2013).

Estas fibras são constituídas por sílica, sendo dopadas no seu interior com o objetivo de amplificar o sinal emitido (CASTAÑEDA et al., 2011). Consistem numa região central dopada com íons de *erbium*, *ytterbium*, *neodymium* ou *thallium*, seguida de uma segunda camada concêntrica, não dopada, a qual permite a propagação da luz bombeada até que esta seja totalmente absorvida pela camada central interior. Esta região central atua como cavidade ressonante, na qual a luz absorvida provoca a inversão dos átomos de dopagem. Dois filtros inseridos na fibra provocam uma restrição dos comprimentos de onda, atuando como espelhos de uma cavidade ressonante normal, permitindo estabilizar o comprimento de onda da energia fornecida, reduzir flutuações na intensidade do feixe *laser* e eliminar modos espectrais aberrantes (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

A luz incidente, nas camadas externas da fibra, penetra, sendo aprisionada no núcleo onde se encontram as espécies ativas responsáveis por um índice de refração elevado. As camadas externas são em vidro ou material polimérico, tendo índices de refração reduzidos de forma a impedir a atenuação do sinal conforme a figura 6. Estes *lasers* têm uma ótima qualidade de feixe, pois o mesmo é completamente circular. (COSTA et al., 2005 e TRÄGER, 2007).

Figura 6 - Esquema de uma fibra



Fonte: Adaptado de Costa, Quintino e Miranda (2005)

Alguns *lasers* de fibra estão já disponíveis comercialmente, com potências de algumas centenas de watts, e têm já sido empregados em processamento de materiais. A tecnologia de *laser* de fibra oferece alguns benefícios tais como: menor utilização de espaço físico em relação aos demais modelos de *laser*, não precisa de arrefecedor, custo menor de manutenção ao longo do tempo e baixo custo operacional (KOECHNER, 2006).

2.2.3.6 - Laser de díodos

Os *lasers* de díodos são conhecidos pela sua aplicação na indústria das comunicações, computadores e eletrônica, mas recentemente esta tecnologia tem sido empregada no processamento de materiais (SUN, 2012). O interesse no desenvolvimento deste tipo de geradores é grande pelas seguintes razões: são compactos, podem ser fabricados em massa, são integrados facilmente, as suas propriedades estão em rápida melhoria, a potência e eficiência têm melhorado e são largamente empregados como fontes de bombeamento em *lasers* de estado sólido (ZAPPE, 2004).

O princípio de funcionamento de um *laser* semiconductor é muito diferente dos princípios dos *lasers* apresentados anteriormente. O *laser* de díodo é baseado no princípio de radiação de recombinação. Os materiais semicondutores têm uma banda de valência e uma banda de condução. No estado inicial, a banda de valência está completamente preenchida e a banda de condução está completamente vazia, correspondendo a um estado de energia. A excitação da banda de valência provoca o deslocamento de alguns elétrons para a banda de condução. Entretanto, os elétrons dos níveis superiores da banda de valência vão ocupar os espaços vazios de menor energia originados pela movimentação dos elétrons para a banda de condução (ZAPPE, 2004).

Os *lasers* de díodos já estão disponíveis comercialmente e podem alcançar potências

de 3000 watts. A radiação *laser* proveniente do *laser* de díodos, pode ser focada em um ponto com alguns mm² de área. A dimensão deste ponto é uma das principais limitações para o uso no processamento de materiais, pelo menos nas aplicações que exijam elevadas densidades de energia, como é o caso do corte de chapa metálica (SUN, 2012).

2.3 - Parâmetros de corte

A qualidade do processamento a *laser* de um determinado material está diretamente relacionada a um grande número de fatores. O corte a *laser* possui diversos parâmetros que são divididos em duas famílias denominadas de parâmetros do feixe e parâmetros do processo. Os parâmetros listados a seguir assumem um papel fundamental no nível de acabamento e devem ser ajustados com precisão para aperfeiçoar o corte a *laser*.

2.3.1 - Parâmetros do feixe

2.3.1.1 - Potência

Lasers são geralmente descritos em termos de potência (RAJARAM et al., 2003). A potência do *laser* é a energia total emitida sob a forma de luz *laser* por segundo (WANDERA, 2006). A intensidade de um feixe de *laser* é igual a sua potência dividida pela área sobre a qual a energia é concentrada (1) (LASER... 2014). Sem energia suficiente, o corte não pode ser iniciado (XIAO, 2007).

$$Intensidade = \frac{potência}{área} \left(\frac{watts}{mm^2} \right) \quad (1)$$

A alta intensidade faz com que o material aqueça rapidamente fazendo com que o calor tenha pouco tempo disponível para se dissipar na região do corte (BERKMANN; FAERBER, 2008). Isso produz: altas taxas de corte, pequena largura da fenda de corte, excelente qualidade superficial e principalmente uma zona termicamente afetada de pequenas dimensões (WANDERA, 2006).

A intensidade do *laser* também determina a espessura do material que pode ser cortado (RAJARAM et al., 2003). Quanto mais espesso for o material a ser cortado, maior é a intensidade necessária. Intensidades mais elevadas podem ser alcançadas através do aumento da potência do *laser*, ou através da utilização de uma lente de focagem com um comprimento focal mais curto (XIAO, 2007). No entanto, a focagem do feixe para um ponto menor reduz a

profundidade de foco e é, portanto, inadequado para o corte de materiais com espessuras mais grossas (ESAB, 2014).

A alta intensidade pode ser conseguida tanto em feixes pulsados ou contínuos (XIAO, 2007). Assim, tanto a potência de pico do pulso no corte pulsado ou a potência média em corte contínuo determinam a penetração (CONTROL, 2014).

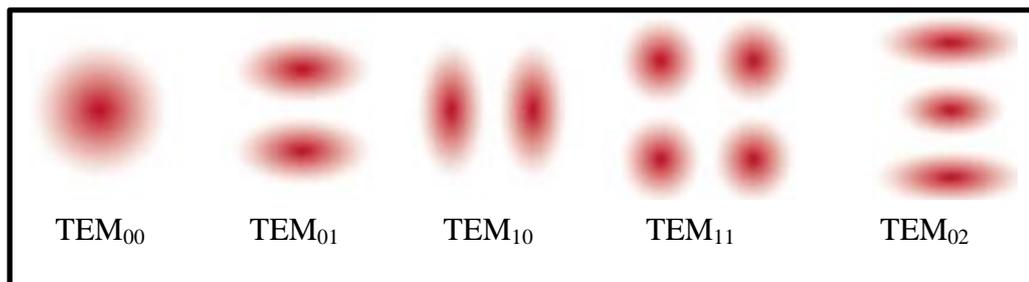
2.3.1.2 - Modo de qualidade do feixe

A qualidade do feixe do *laser* é caracterizada pelo seu modo, que é definido pela distribuição de energia através da sua seção transversal (BERKMANN; FAERBER, 2008). É essencial que o feixe tenha uma distribuição uniforme de energia para o corte a *laser*, sendo assim possível ser focado em um ponto muito pequeno proporcionando uma intensidade elevada, a qual conduz a elevadas velocidades de corte e baixa rugosidade (WANDERA, 2006).

Quando o corte a *laser* apresentar uma zona de elevada densidade de energia fora do feixe principal isto pode provocar o aquecimento do material fora da região do corte, resultando em uma baixa qualidade do mesmo (XIAO, 2007).

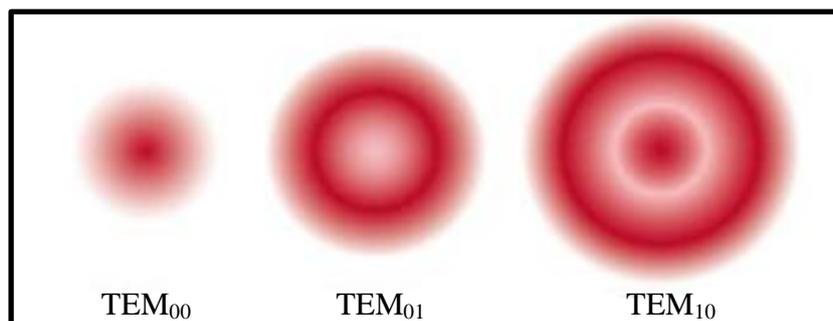
Os modos de qualidade do feixe são descritos como TEM_{nm} onde os subscritos n e m estão relacionados com as direções x e y respectivamente. Os modos podem ser descritos de forma retangular (figura 7) ou forma cilíndrica (figura 8).

Figura 7 - Modos representados de forma retangular



Fonte: Adaptado de Scitec Instruments (2014)

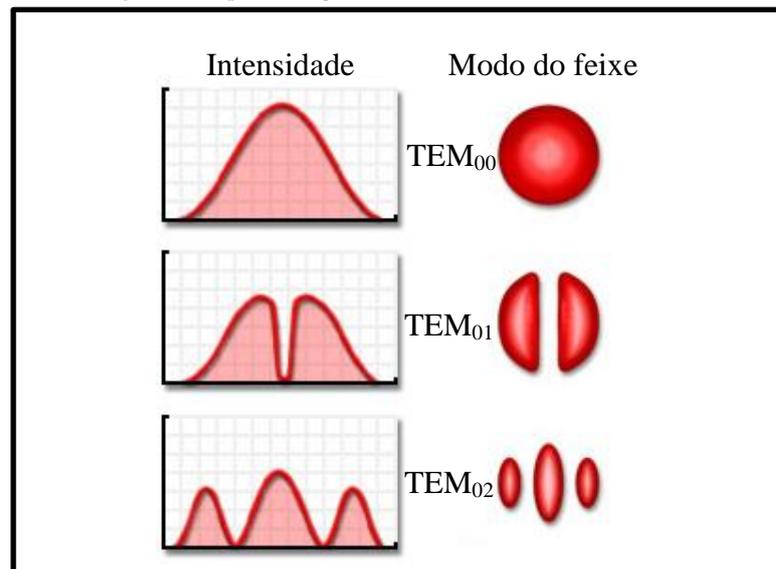
Figura 8 - Modos representados de forma cilíndrica



Fonte: Adaptado de Scitec Instruments (2014)

Teoricamente, o modo de ordem mais baixa, TEM_{00} , refere-se a uma distribuição de intensidade gaussiana sobre um pico central conforme apresentado na figura 9 (WANDERA, 2006). O modo TEM_{00} é caracterizado por um ponto focal pequeno e com uma intensidade muito elevada, em comparação com os modos de feixe de ordem superior (XIAO, 2007). O modo TEM_{00} também tem a maior profundidade de foco e, portanto, apresenta o melhor desempenho no corte de materiais mais grossos (BERKMANNNS; FAERBER, 2008).

Figura 9 - Apresentação dos modos e suas intensidades



Fonte: Adaptado de Primavera, Fellers e Davidson (2014)

2.3.1.3 - Comprimento de onda

Cada material possui uma estrutura atômica particular e conseqüentemente sua refletividade é diferente para cada comprimento de onda (NESTEROV; NIZIEV, 2000).

A taxa de absorção aumenta notavelmente como a temperatura dos materiais (WANDERA, 2006). Como exemplo o vidro não pode ser cortado com luz *laser* de infravermelho visível uma vez que a onda é transmitida através do mesmo sem qualquer tipo de absorção de energia (BERKMANNNS; FAERBER, 2008).

Alguns materiais altamente reflexivos como o alumínio e o cobre podem absorver alguns comprimentos de onda diferentemente de outros materiais (aços) (WANDERA, 2006). Além das características específicas do comprimento de onda, o corte destes materiais depende de outros parâmetros como a potência, duração de pulso e o foco (BERKMANNNS; FAERBER, 2008).

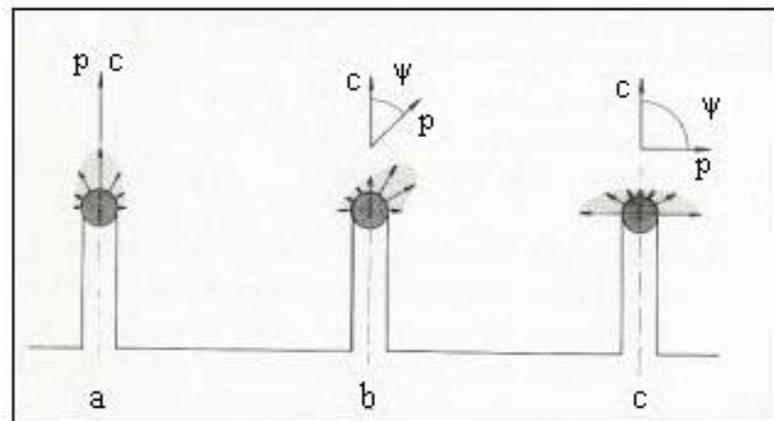
Portanto, para um cada tipo de material tem-se um comprimento de onda específico, que pode garantir o máximo de absorção de energia com uma menor reflexão (XIAO, 2007).

2.3.1.4 - Polarização do feixe

No corte a *laser*, a luz *laser* é projetada no interior do material na parte dianteira do corte onde a absorção de luz ocorre em uma camada fina da superfície fundida (XIAO, 2007). A refletividade da luz sobre a superfície do material fundido é dependente do ângulo da incidência, do plano de polarização e das propriedades óticas do material fundido (WANDERA, 2006).

A polarização da luz do feixe *laser* pode ser configurada em diferentes formatos geométricos conforme a sua aplicação. Como exemplo de formas de polarização pode ser citado a polarização linear paralela ou a perpendicular a direção de corte (WANDERA, 2006). Nas duas opções a luz é absorvida de maneiras distintas e em diferentes direções durante o processo de corte (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

Figura 10 - A absorção relativa de energia



Fonte: Adaptado de Wandera (2006)

A influência da polarização do feixe durante o corte está relacionada diretamente com a inclinação do mesmo. A influência da polarização torna-se maior à medida que a espessura do material aumenta e é mais significativo em corte de materiais com uma alta refletividade. A absorção de energia no corte depende do ângulo “ ψ ” entre o plano de polarização “p” e da direção de corte “c” como mostrado na figura 10 (WANDERA, 2006).

Quando o ângulo “ ψ ” é de 0° a parte frontal do corte absorve mais energia do que os lados, mas quando o ângulo “ ψ ” é de 90° a parte frontal do corte absorve menos energia do que os lados. Portanto, quando a direção de corte e o plano de polarização possuem a mesmo sentido consegue-se aumentar a velocidade e diminuir a fenda do corte (WANDERA, 2006).

Para as aplicações industriais, a maior parte das peças a serem cortadas possuem geometrias complexas, daí a necessidade de usar um feixe polarizado circular que permite ter as mesmas características de absorção em todas as direções de corte (DAHOTRE;

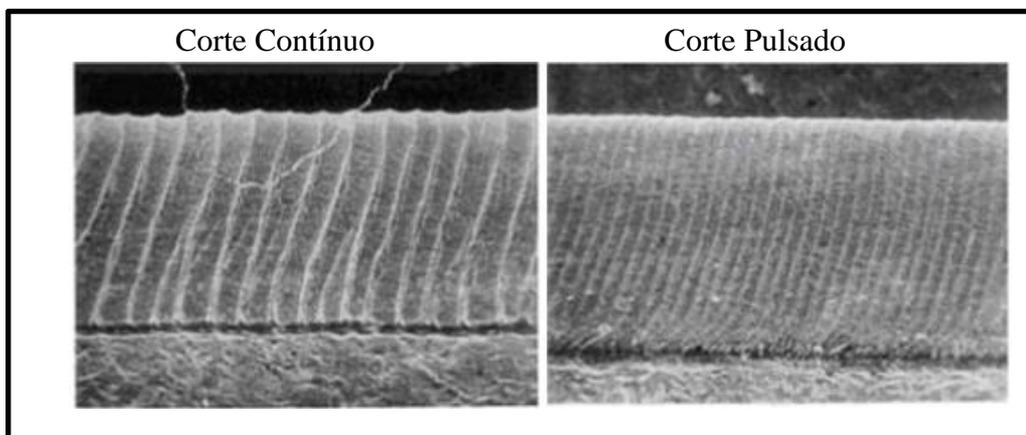
HARIMKAR, 2008 e XIAO, 2007).

2.3.2 - Parâmetros do processo

2.3.2.1 - Tipo de corte

O corte pode ser executado em modo contínuo ou em modo pulsado, o modo é selecionado em função do material a cortar ou processo que se deseje executar (SHANJIN; YANG, 2006). A potência de pico do pulso no corte pulsado ou a potência média do corte contínuo determinam a penetração e a velocidade de corte é superior no modo contínuo (WANDERA, 2006).

Figura 11 - Uma comparação do corte a laser contínuo e do corte a laser pulsado



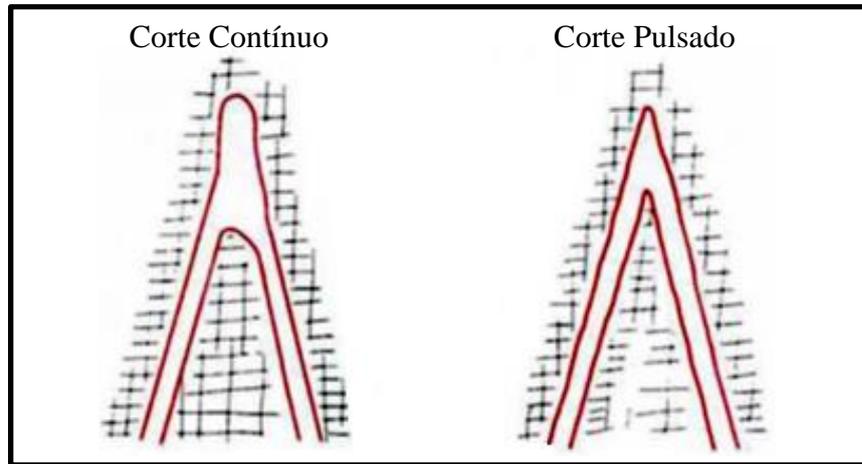
Fonte: Adaptado de Powell (1993)

Em aplicações industriais de corte, o modo contínuo é o mais utilizado, por conseguir cortar com muita eficiência diversos tipos de materiais em uma ampla faixa de espessura (WANDERA, 2006). O modo pulsado possui aplicações mais específicas, tais como realizar perfurações em chapas mais espessas de materiais refletivos e realizar cortes com qualidade superior (SHANJIN; YANG, 2006 e ESAB, 2014).

As estrias formadas durante o corte pulsado são mais finas do que as formadas durante o corte contínuo conforme a figura 11 (WANDERA, 2006).

No corte contínuo a altas velocidades, a potência do *laser* é usada quase inteiramente para derreter o material na parte frontal cortada e há relativamente pouca condução de calor para dentro do material de base. No entanto, uma parte do calor é conduzida para o metal de base quando a direção do corte é invertida ou quando se tem um corte de um canto agudo. Isso reduz a taxa de alimentação e faz com que a peça aqueça diminuindo a qualidade do corte como ilustrado na figura 12 (BERKMANN; FAERBER, 2008).

Figura 12 - Efeito da pulsação em uma curva fechada

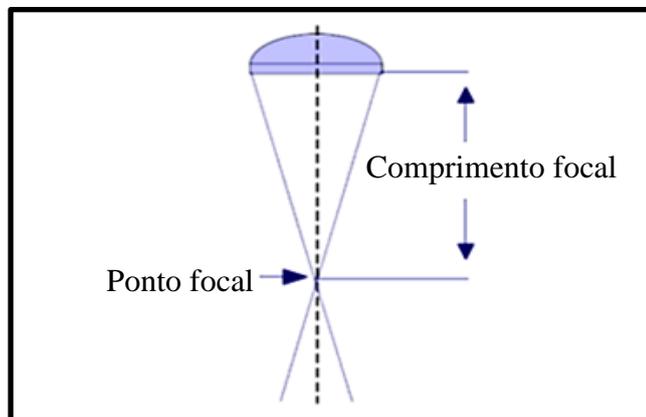


Fonte: Adaptado de Berkmanns e Faerber (2008)

2.3.2.2 - Ótica de focalização e posição do ponto focal

Habitualmente utilizam-se lentes convergentes para focalizar o feixe numa mancha de pequenas dimensões. A distância focal da lente é um parâmetro importante do componente ótico, uma vez que quanto menor for a distância focal menor é o diâmetro do feixe no ponto focal e menor a largura de corte obtido conforme a figura 13 (SANTOS et al., 1993).

Figura 13 - Ótica de focalização

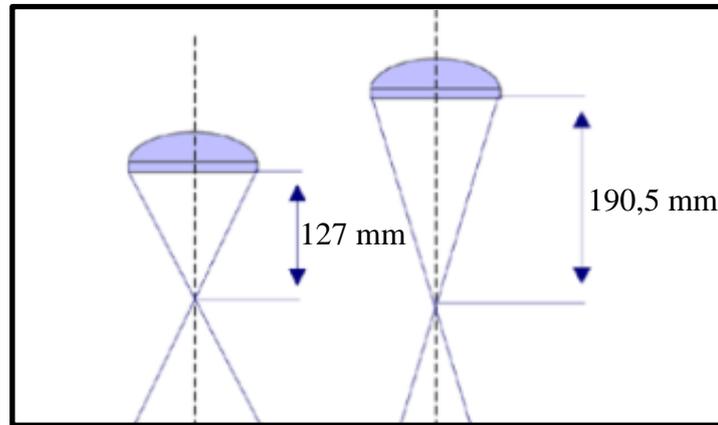


Fonte: Adaptado de Esab (2014)

Sistemas óticos com 5'' e 7,5'' de distâncias focais são normalmente utilizados para o corte conforme figura 14. Distâncias focais de 5'' são adequados para materiais finos. Para materiais mais espessos as distâncias focais de 7,5'' são usadas (BERKMANNNS; FAERBER, 2008). Com distâncias focais de 5'' o corte é mais estreito em comparação com as distâncias focais de 7,5''. As possíveis velocidades de corte para as distâncias focais de 5'' são maiores para a mesma espessura do material e potência do *laser*. Os materiais com espessuras menores são cortados com distâncias focais de 5'' por razões de economia. As distâncias focais de 7,5'' proporcionam maiores profundidades de focais e possibilitam o corte de materiais com

espessura maiores (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014).

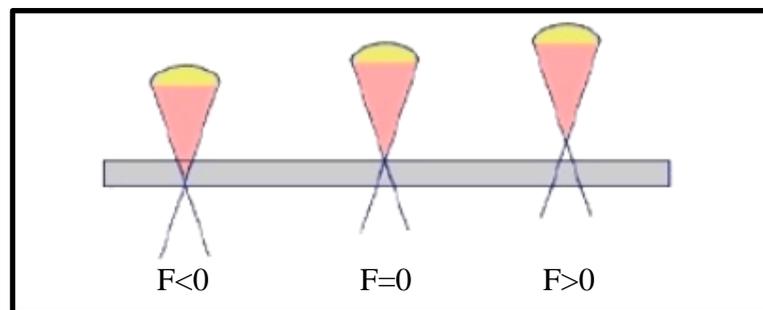
Figura 14 - Distâncias focais



Fonte: Adaptado de Esab (2014)

O ponto focal varia conforme a espessura do material a ser cortado (SANTOS; et al., 1993). O ponto focal deve ser regulado conforme a espessura da chapa podendo o mesmo ficar posicionado na superfície da chapa ou abaixo dela conforme figura 15 (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014).

Figura 15 - Posição do ponto focal

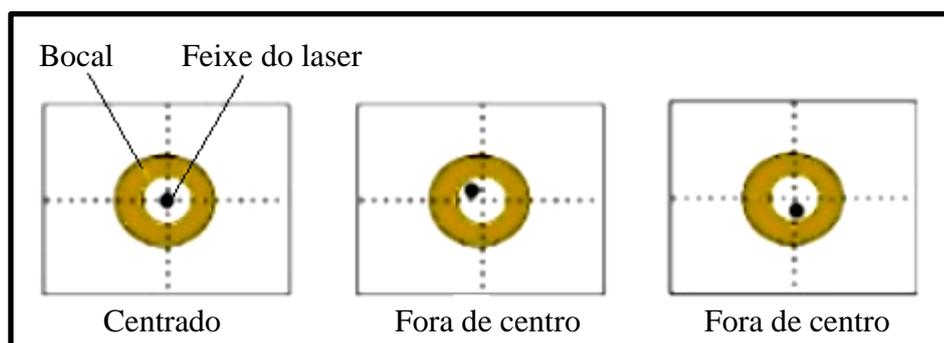


Fonte: Adaptado de Esab (2014)

O posicionamento exato do ponto focal é um requisito importante para se obter bons resultados de corte. Para espessuras até 3 mm a posição focal deve ser na superfície da chapa (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014). Para espessuras maiores, como regra geral, o foco deve ficar posicionado a uma medida de 1/3 da espessura da chapa abaixo da superfície (SANTOS; et al., 1993 e WANDERA, 2006).

A lente de focagem deve ser ajustada de tal modo que o feixe do *laser* focado deva ficar no centro do furo do bocal conforme figura 16. Quando o feixe do *laser* não estiver centrado a qualidade do corte diminui consideravelmente podendo até não realizar o corte da chapa. Isto acontece devido ao gás de assistência não conseguir proteger a região do corte da mesma maneira em todos os seus lados (WANDERA, 2006).

Figura 16 - Centragem do feixe do laser no bocal



Fonte: Adaptado de Esab (2014)

2.3.2.3 - Velocidade de corte

A velocidade de corte deve ser equilibrada com a potência e com a taxa de fluxo de gás. Quanto maior a velocidade de corte maior é a rugosidade da borda e possíveis rebarbas podem surgir. Velocidades muito elevadas podem causar um corte incompleto do material (WANDERA, 2006). Quando a velocidade de corte é muito baixa ocorre à queima excessiva da borda o que degrada a qualidade da aresta e aumenta a largura da zona termicamente afetada (XIAO, 2007). Em geral a velocidade de corte de um material é inversamente proporcional à sua espessura (LASER... 2014).

2.3.2.4 - Tipo de gás de assistência e sua pressão

O gás de assistência serve para remover o material fundido do canal de corte e ajuda a resfriar por convecção forçada a zona aquecida pelo *laser* assim diminuindo a largura da zona termicamente afetada (GHANY; NEWISHY, 2005 e XIAO, 2007). O tipo de material e os requisitos dos resultados de corte determinam o gás a ser utilizado (CHEN, 1999).

O gás exerce funções importantes durante o corte a *laser*. A escolha do gás tem um efeito significativo sobre a produtividade e a qualidade do processo de corte. Os gases utilizados são o oxigênio e nitrogênio onde cada um tem suas próprias vantagens e desvantagens (WANDERA, 2006).

Um gás inerte, tal como o nitrogênio, expelle o material fundido sem permitir que as gotas se solidifiquem no lado de baixo gerando rebarbas, enquanto que um gás ativo, como o oxigênio, participa numa reação exotérmica com o material (WANDERA, 2006). O gás também atua para suprimir a formação de plasma durante o corte de espessuras mais grossas e protege os espelhos contra respingos pelo fluxo de gás (LASER... 2014).

Um material combustível como a madeira não devem ser cortado com oxigênio, pois irá entrar em combustão. O oxigênio deve ser usado apenas para peças metálicas. No processo de corte com o oxigênio, a presença do mesmo contribui para ocorrer à reação exotérmica,

que efetivamente aumenta a energia do *laser*. O oxigênio forma uma fina camada de óxido durante a combustão exotérmica. Cerca de 50% da energia total para o processo de corte é fornecida por meio da reação de oxidação. Assim, resulta em altas velocidades de corte e a capacidade de cortar materiais com espessuras maiores. Ao cortar materiais mais grossos, a pressão do gás deve diminuir a fim de evitar o efeito do aquecimento, enquanto que o diâmetro do bico é aumentado (XIAO, 2007).

A qualidade do oxigênio aplicado é particularmente importante para os resultados de corte, onde a pureza do oxigênio recomendado é de 99,95%. Com o uso de oxigênio com uma pureza de 99,5% a velocidade de corte é reduzida em aproximadamente 10% (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014). A pressão no bico do gás de oxigênio encontra-se geralmente na gama de 0,5 a 5 bar (WANDERA, 2006).

A qualidade do nitrogênio também é muito importante para o corte de alta pressão de aço inoxidável (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014). O nitrogênio é o gás preferido para o corte de aço inoxidável, alumínio e ligas de níquel e que requer pressões do gás mais elevadas para remover o material fundido a partir do corte (XIAO, 2007). O principal problema associado com o corte gerado pelo nitrogênio é a formação de rebarbas no lado inferior do corte. A pressão do nitrogênio encontra-se na faixa de 10 a 20 bar e a mesma aumenta com o aumento da espessura do material (WANDERA, 2006).

A espessura do material deve ser combinada com a pressão do gás. A pressão do gás deve ser definida com muito cuidado, porque a qualidade do corte é afetada por pequenas mudanças na pressão (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014). Se a pressão for demasiadamente baixa, a escória fluida permanece aderida ao material da base, formando uma rebarba permanente ou irá gerar um corte incompleto. Se a pressão for demasiado elevada, as bordas inferiores do corte são queimadas e muitas vezes torna o corte inutilizável (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014).

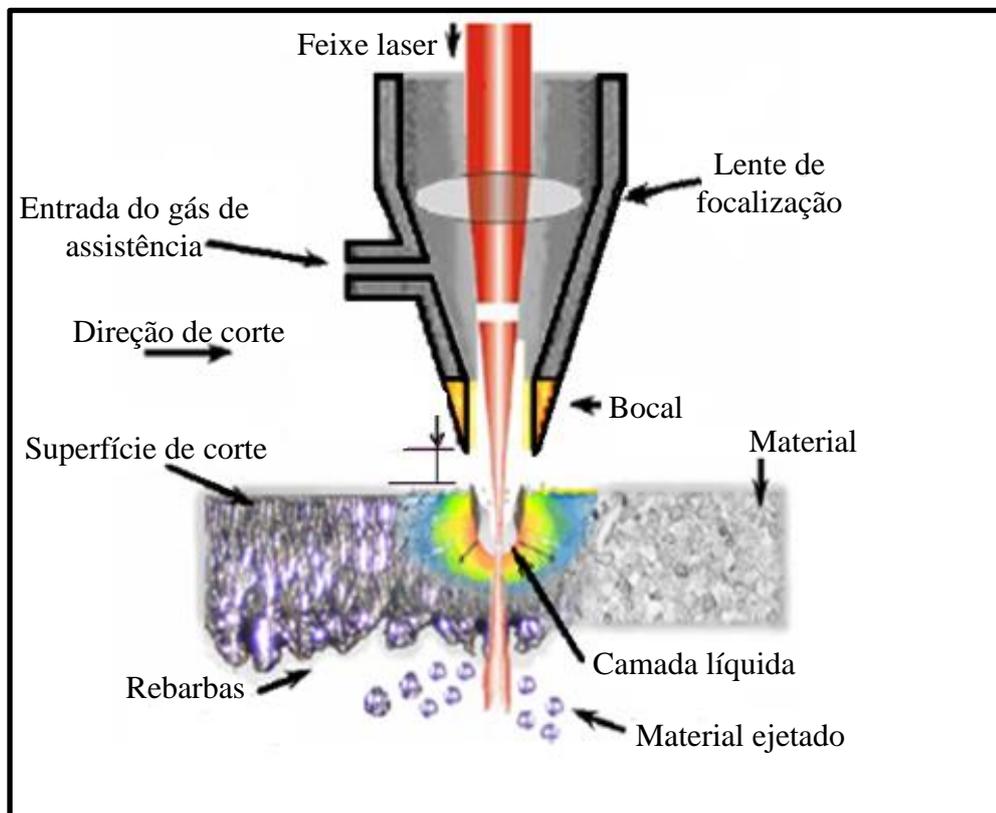
2.3.2.5 - Bico de corte e distância entre o bico e a peça

A seleção correta do bico para o processo é muito importante. O bico de corte deve ter uma geometria para que o gás de assistência flua através do orifício conforme a figura 17 (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008). A concepção do bocal, em particular o desenho do orifício determina a forma do jato do gás de assistência e, portanto, a qualidade do corte (WANDERA, 2006). Defeitos geométricos do bocal de saída do *laser* e o acabamento inadequado da parte interna do bico afetam a qualidade do corte (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014).

Quanto ao diâmetro do bocal, se o mesmo for grande o consumo de gás de corte aumenta e o mesmo vai proporcionar um fluxo de gás insuficiente para expulsar o material fundido (XIAO, 2007). Quando o diâmetro do bocal for pequeno o corte terá sua qualidade reduzida originando rebarbas na parte inferior e podendo o mesmo às vezes não ser completado (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014).

O diâmetro do bocal pode variar entre 0,8 mm e 3 mm e o mesmo é selecionado de acordo com o material e a espessura da chapa. O tamanho do feixe do *laser* é bem menor que o diâmetro do bocal, pois é necessário que o gás de assistência preencha coaxialmente os espaços entre a circunferência do bocal e a do feixe de *laser* (WANDERA, 2006).

Figura 17 - Características do bocal



Fonte: Adaptado de Xiao (2007)

O controle de altura entre o bocal e a peça é realizado por um sensor capacitivo. Esta altura tem um grande efeito sobre a qualidade do corte (CONTROL, 2014 e ESAB, 2014). A distância entre o bocal e a peça influencia os padrões de fluxo do gás, que têm uma relação direta com o desempenho e a qualidade do corte. Grandes variações na pressão podem ocorrer se a distância for maior do que 1 mm. Uma distância menor do que o diâmetro do bico é recomendado, pois elimina a turbulência e minimiza a variação da pressão do gás de assistência na região do corte (WANDERA, 2006). Distâncias pequenas combinadas com a baixa pressão do gás de assistência podem danificar a ótica de focalização, pois o material

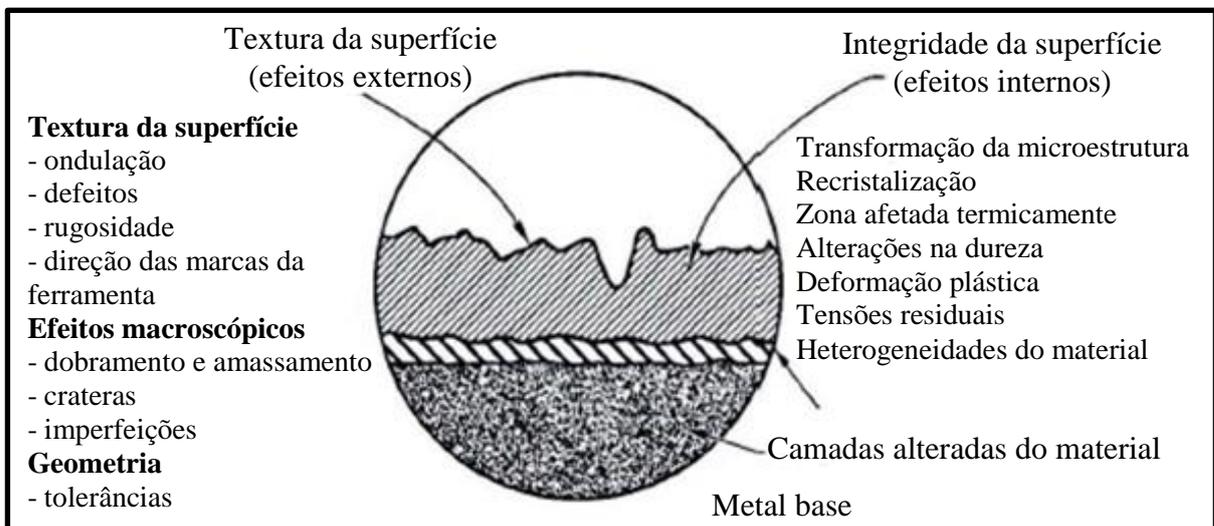
fundido pode entrar pelo orifício do bocal atingindo a lente e afetando a mesma (XIAO, 2007).

2.4 - Integridade superficial

Normalmente os processos de usinagem removem material dos componentes manufaturados, cada processo de remoção de metal produz uma alteração superficial característica. Esta alteração superficial modifica as propriedades das camadas superficiais sem modificar as propriedades do interior do material, podendo ser extensa e profunda ou superficial e rasa (DAVIM; GRÁCIO, 1999).

A integridade superficial pode ser definida como sendo a soma de todos os elementos que determinam as condições que existem em uma superfície de uma peça acabada, ou seja, é a característica através da qual podem ser relacionadas ou identificadas algumas exigências ou alterações metalúrgicas, nas quais poderão desenvolver-se devido ao processo de fabricação, tais como: transformação de fases através do encruamento e/ou temperatura, distribuição e tamanho de grão, recristalização, inclusões no material e tensões residuais conforme a figura 18 (DAVIM; GRÁCIO, 1999 e FIELD; et al. 1989).

Figura 18 - Zonas de Integridade Superficial



Fonte: Adaptado de Machinability Data Center (1980)

Estas exigências e/ou alterações metalúrgicas estão associadas diretamente à natureza da camada superficial, e tem em muitos casos, uma forte influência nas propriedades mecânicas do produto final, isto se acentua em alguns materiais e sob determinadas operações referentes à usinagem (DAVIM; GRÁCIO, 1999).

Com o estudo da integridade superficial, pode-se descrever e controlar as possíveis alterações produzidas na camada superficial durante a fabricação, tendo assim, o controle de

seus efeitos sobre as propriedades do material e o comportamento da superfície em serviço. Estes controles podem ser feitos por meio da seleção dos processos de usinagem e seu controle, estimando as variações nas propriedades dos materiais (DAVIM; GRÁCIO, 1999).

Tanto a superfície metalúrgica e a usinada, quanto à rugosidade, são fatores influenciáveis mecanicamente na qualidade da superfície e sub-superfície, sendo extremamente significativos na fabricação de componentes estruturais, os quais sofrerão tensões estáticas e/ou dinâmicas. Desde o ponto de vista topográfico, como no metalúrgico, é importante definir o design na fabricação de componentes críticos, reduzindo assim, falhas por fadiga, onde quase sempre se originam na sub-superfície de um componente, como também seu ambiente de trabalho onde, por exemplo, pode-se ter corrosão gerada através de tensões pontuais, sendo este um fenômeno superficial (GRIFFITHS, 2001 e FIELD et al. 1989).

Para o corte *laser* o estudo da integridade superficial também pode ser dividido da seguinte maneira:

– Efeitos externos: externamente os efeitos são idênticos aos processos de usinagem convencional. Entre as principais ponderações realizadas sobre a superfície destaca-se a avaliação da rugosidade; ondulações, inclinações das estrias e o perpendicularismo do corte (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008). Outra característica importante do corte laser é a formação da camada de óxido sobre a superfície da peça que conforme a sua aplicação pode ser inconveniente (SHENG; JOSHI, 1995).

– Efeitos internos: o corte laser cria abaixo da superfície uma zona termicamente afetada gerando grandes mudanças estruturais associadas às características do material a ser cortado. Junto às mudanças da microestrutura ocorre a variação da microdureza originadas pelas altas taxas de aquecimento e resfriamento da região (JOHN, 2005).

No corte a *laser* os efeitos térmicos na superfície do corte resultam na modificação da microestrutura e nas propriedades mecânicas. Esta região é definida como zona termicamente afetada (ZTA) e pode ser revelada por meio de polimento adequado e técnicas de gravura. A ZTA é frequentemente associada a efeitos indesejáveis, tais como distorção, fendas superficiais, fragilização, diminuição da soldabilidade e a resistência à fadiga (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

2.5 - Integridade superficial do corte a *laser*

A empresa alemã TRUMPF (2007) fabricante de máquinas de corte *laser* usa os

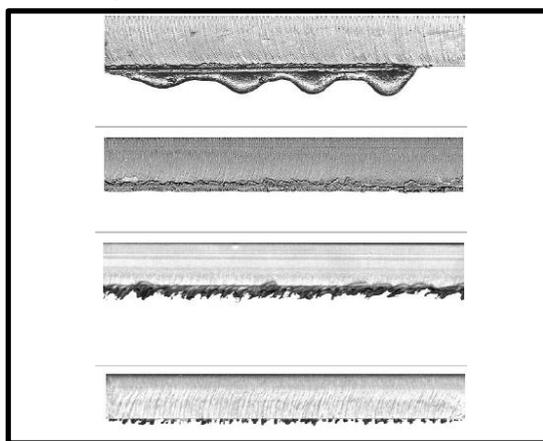
seguintes critérios para avaliar os resultados de corte:

- formação da rebarba;
- largura do corte;
- inclusão de material;
- rugosidade média (R_{z5});
- inclinação da linha de corte;
- perpendicularidade e tolerância do corte e
- zona termicamente afetada (ZTA).

2.5.1 - Formação de rebarbas

A formação de rebarbas (figura 19) pode ser visualmente avaliada e descrita. A eliminação da rebarba depende principalmente da regulagem do foco e do gás de assistência (RIVEIRO, et al., 2010). Outros parâmetros de regulagem da máquina também podem ser alterados para a sua eliminação completa (TRUMPF, 2007).

Figura 19 - Rebarbar do corte laser



Fonte: Adaptado de Trumpf (2007)

A rebarba é altamente aderente (material solidificado) que se forma no lado inferior do corte. Materiais fundidos com elevados valores de tensão superficial e viscosidade baixa são mais difíceis de remover no lado inferior (JOHN, 2005). A rebarba pode ser removida durante o processo pelo uso do gás de assistência dirigido a partir do lado de baixo da peça de trabalho em casos especiais. Alternativamente, ele pode ser removido mecanicamente após o corte (STEEN, 2003).

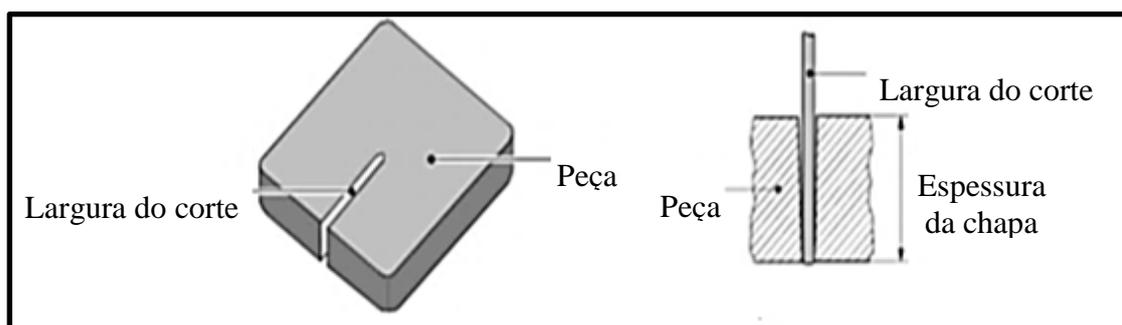
2.5.2 - Largura do corte

Durante o corte a *laser*, a largura do corte na borda superior da chapa é mais larga do que na borda inferior da chapa conforme mostra a figura 20 (HASÇALIK; AY, 2013).

A largura da fenda representa a quantidade de material removido durante o processo de corte (JOHN, 2005). Fendas de pequenas larguras são desejáveis, especialmente quando pequenos detalhes devem ser cortados (RAJENDRAN, 1990).

A largura do corte corresponde ao tamanho da cintura do feixe circular, que é determinada principalmente pela qualidade do feixe de *laser* e da focagem ótica (YILBAS, 1997 e IVARSON, 1993). A energia no ponto focado, a velocidade e pressão do gás de assistência também têm influência sobre o tamanho da fenda de corte (RAJARAM; et al, 2003).

Figura 20 - Largura do corte



Fonte: Adaptado de Trumpf (2007)

A largura do corte varia conforme o material a ser cortado e a espessura da chapa como mostra a tabela 1 (TRUMPF, 2007).

Tabela 1 - Material x espessura x largura do corte

Material	Espessura (mm)	Largura do corte (mm)
Aço médio carbono	1 – 3	0,15
	4 – 6	0,2 – 0,3
	6 – 15	0,35 – 0,4
	20 – 25	0,5
Aço inoxidável cortado com alta pressão de N ₂	1 – 3	0,15
	4 – 8	0,2
	10 – 12	0,5
Alumínio cortado com alta pressão de N ₂	1 – 3	0,15
	4 – 8	0,2 – 0,3

Fonte: Adaptado de Trumpf (2007)

2.5.3 - Inclusão de material

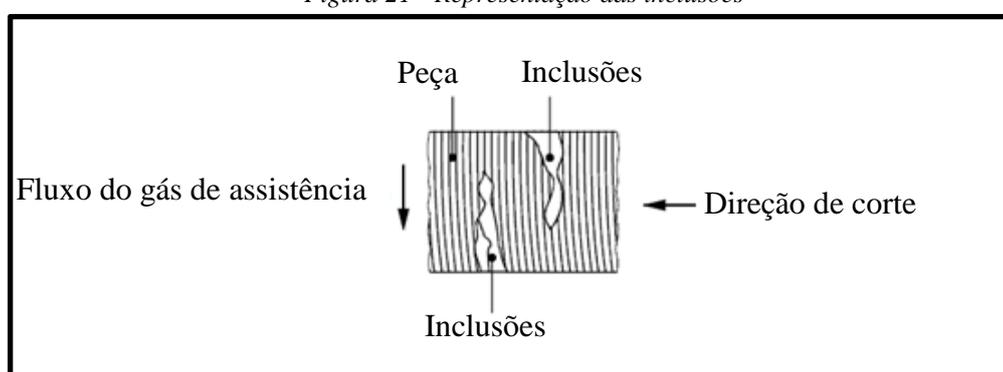
O mecanismo de formação de escórias no corte a *laser* não tem uma definição precisa.

Isto porque o efeito é incerto, pois depende muito de como ocorre o fluxo do gás de assistência para empurrar o metal fundido para fora da região do corte.

Outros fatores podem gerar inclusões de material na superfície cortada, tais como: a temperatura do metal fundido, o coeficiente de viscosidade e a tensão superficial do material e a geometria de corte (INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLICATIONS OF LASERS AND ELECTRO-OPTICS, 2004).

Estas inclusões de materiais não são uniformes e podem ser encontradas em regiões isoladas ao longo da região de corte (TRUMPF, 2007) conforme representados na figura 21.

Figura 21 - Representação das inclusões



Fonte: Adaptado de Trumpf (2007)

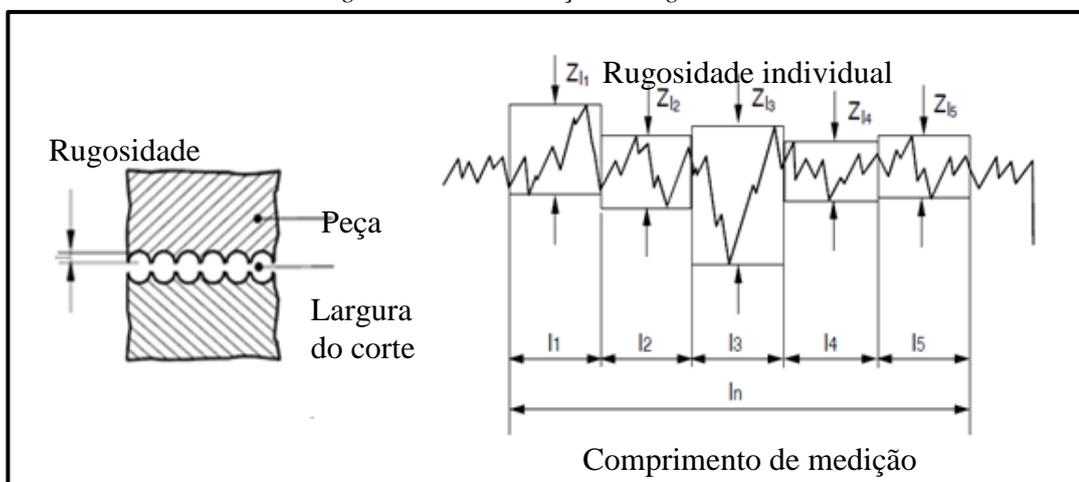
2.5.4 - Rugosidade do corte

Ao cortar os contornos usando o *laser* são formadas linhas de arrasto perpendiculares na superfícies de corte conforme figura 22a (TRUMPF, 2007). A sua profundidade determina a rugosidade que é medida em R_{z5} (o índice 5 em R_{z5} foi adicionado para distinguir a média aritmética e a altura máxima do perfil dos cinco elementos individuais) como mostra a figura 22b (GADELMAWLA et al., 2002) ou também pode ser medida em R_a (POWELL et al., 2011; CHEN et al., 2001).

No mesmo corte a rugosidade apresenta uma variação em relação a espessura medida. Alguns autores definem que a mesma deve ser medida a 2/3 da face em chapas finas e na linha central em chapas grossas (SANTOS et al., 1993 e HARNIČÁROVÁ et al., 2012). Outros autores defendem que devem ser realizadas três medidas ao longo da espessura do material (RIVEIRO et al., 2010). A distância entre estrias aumenta com o aumento da velocidade de corte. A regra geral é que quanto mais rápido o corte, menos penetração de calor e melhor a qualidade de corte (STEEN, 2003). A superfície de corte a *laser* mostram dois padrões de estrias diferentes, um deles com uma estrutura mais fina adjacente à superfície superior e uma com um padrão mais grosseiro adjacente à superfície inferior da

peça de trabalho (SCHUÖCKER, 1986).

Figura 22 - Determinação da rugosidade



Fonte: Adaptado de Trumpf (2007) e Santos e Quintino (1993)

Durante o corte a *laser* a rugosidade aumenta com a espessura do material conforme a tabela 2 (TRUMPF, 2007).

Tabela 2 - Rugosidade x Tipo de material x Espessura

Espessura do material (mm)	Aço de médio carbono. Medidas em R_z (μm)	Aço inoxidável. Medidas em R_z (μm)	Alumínio. Medidas em R_z (μm)
1	9	6	18
1,5	8	-	13
2	15	10	17
2,5	7	-	14
3	17	10	22
4	5	10	20
5	6	10	19
6	6	13	14
8	7	19	46
10	28	43	-
12	23	38	-
15	28	-	-
20	28	-	-

Fonte: Adaptado de Trumpf (2007)

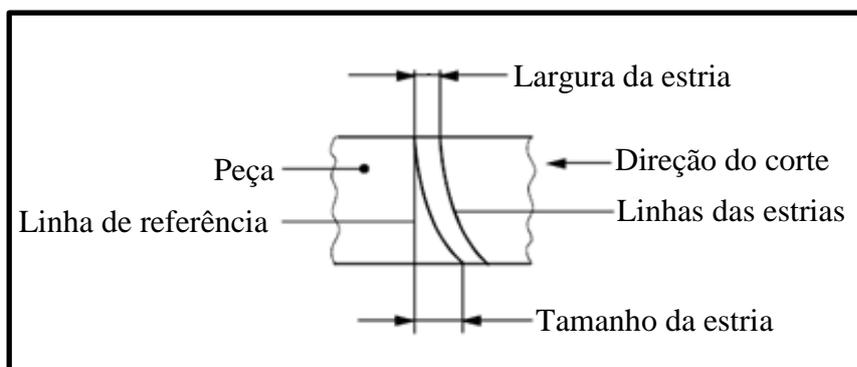
2.5.5 - Inclinação da linha de corte

Na borda do corte produzida pelo *laser* pode-se sempre observar a altura e o espaçamento das estrias. Em chapas finas de aço estas estrias podem ser bem definidas, seguindo um padrão regular conforme a figura 23 (RAJENDRAN, 1990).

No entanto, em chapas grossas essas estrias podem apresentar variações ao longo do corte não tendo um padrão definido (SPARKES et al., 2006). O efeito mais visível perceptível

sobre a borda do corte é a localização dos pontos de separação da camada limite, está que é determinada pela profundidade do ponto focal. O padrão de estrias abaixo deste local se parece muito caótico e é indicativo de condições adversas do fluxo do gás de assistência (HARNIČÁROVÁ et al., 2012).

Figura 23 - Definição das estrias

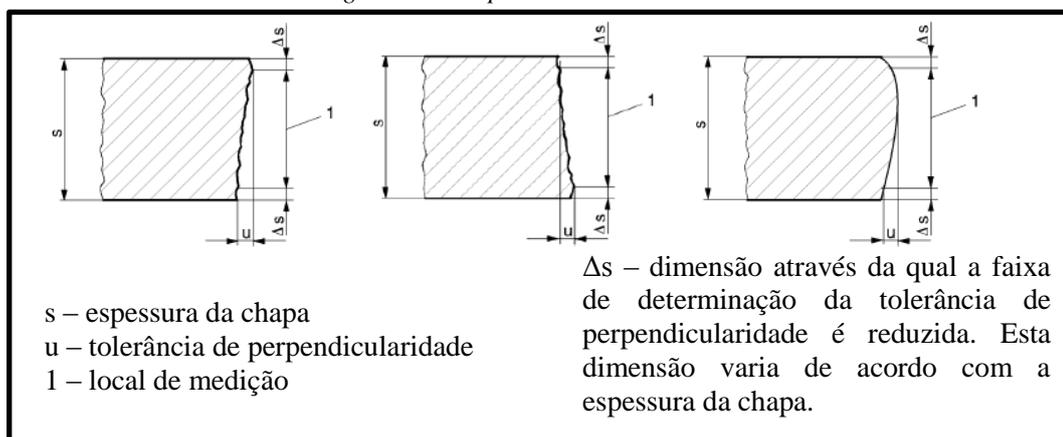


Fonte: Adaptado de Trumpf (2007)

2.5.6 - Perpendicularismo e tolerância do corte *laser*

A tolerância de perpendicularidade e inclinação é uma distância entre duas linhas paralelas no caso de cortes perpendiculares. A tolerância de perpendicularidade e inclinação engloba o desvio da retidão e do acabamento (SANTOS et al., 1993) conforme figura 24.

Figura 24 - Perpendicularidade do corte



Fonte: Adaptado de ISO (2002)

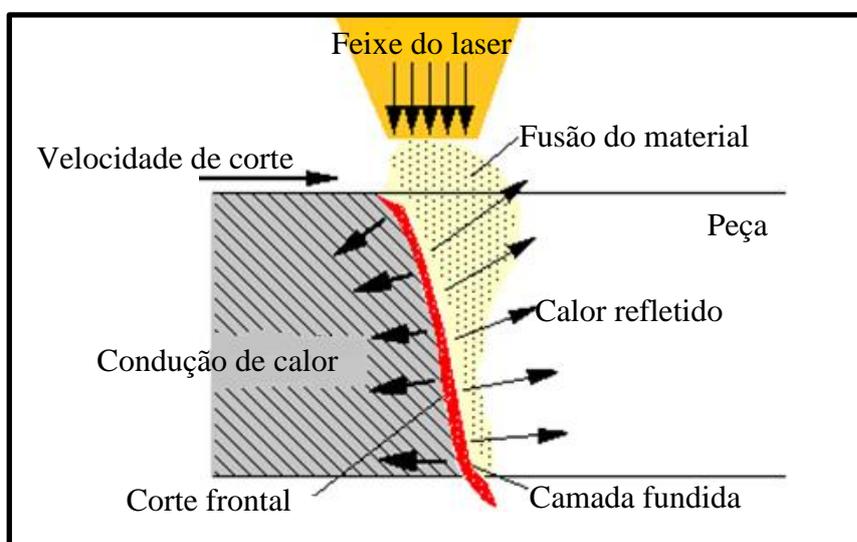
A perpendicularidade e a tolerância de inclinação é determinada pela maior distância perpendicular entre a superfície efetiva e a superfície pretendida, tal como ilustrado na figura 21 (ISO, 2002).

Ele é a soma do desvio angular e a concavidade ou convexidade da superfície. Classes de qualidade são definidos por técnicas de corte térmico em que a perpendicularidade e a angularidade são expressas em termos de espessura do material (JOHN, 2005).

2.5.7 - Zona termicamente afetada (ZTA)

O calor térmico de corte a *laser* produz uma zona termicamente afetada (ZTA) ao lado da borda do corte. A zona afetada pelo calor é a parte do material, cuja estrutura metalúrgica é afetada, mas não é derretida. Variação na microestrutura e na dureza da zona afetada pelo calor são características que determinam a qualidade do corte a *laser* (JOHN, 2005). A figura 25 mostra os vários mecanismos físicos, incluindo a condução, mudança de fase, a absorção da superfície e o fluxo fundido que afetam a eficiência de corte a *laser* (SHENG; JOSHI, 1995).

Figura 25 - Os principais efeitos durante o corte a *laser*



Fonte: Adaptado de Sheng e Joshi (1995)

2.6 - Técnicas de caracterização

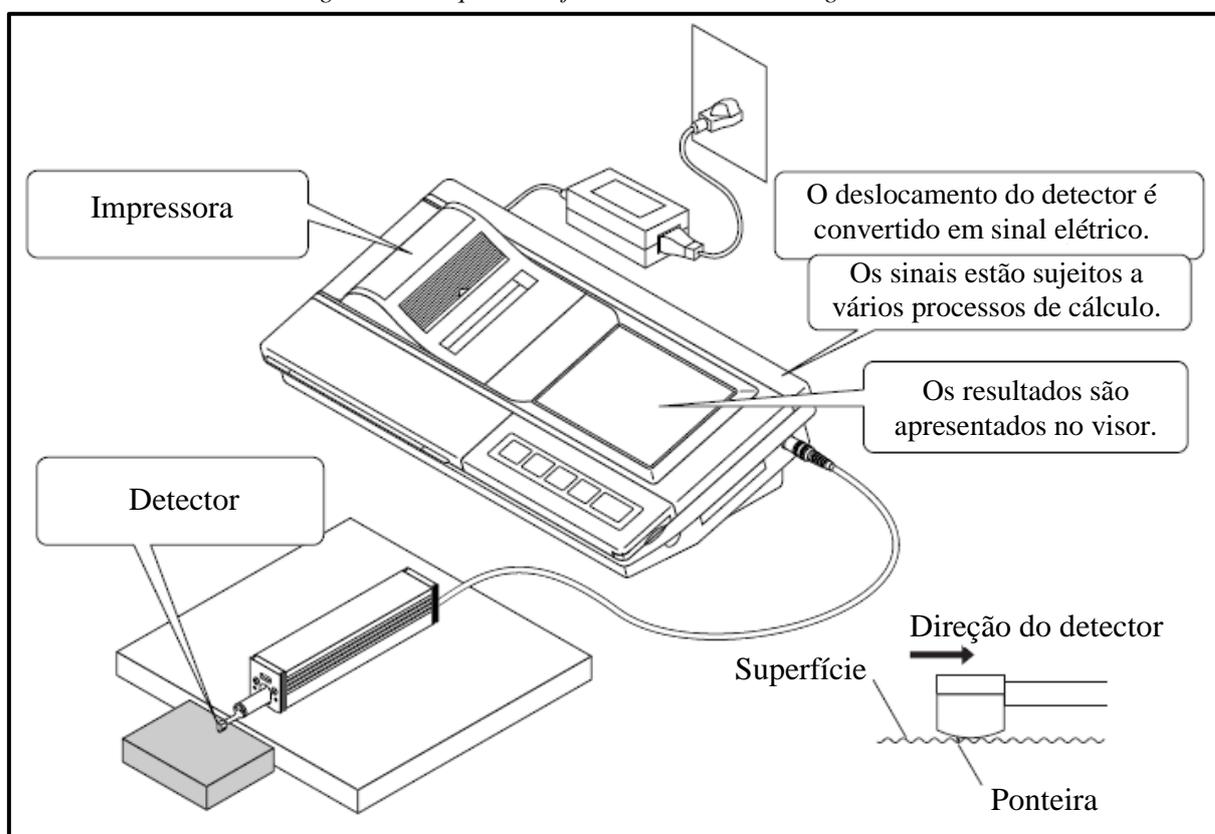
A superfície pode ser definida como o limite, ou a fronteira, de um elemento de espaço fechado, ou corpo técnico, sendo então descrita somente sob o aspecto geométrico e limitando a análise à fronteira entre o corpo do componente e o meio ambiente (MITUTOYO).

2.6.1 - Rugosidade

É o conjunto de irregularidades causadas pelo processo de fabricação, caracterizadas por pequenas saliências e reentrâncias na topografia da superfície. O rugosímetro é um aparelho eletrônico amplamente empregado na indústria para a verificação de superfície de peças e ferramentas (FERRARESI, 1970). Assegura um alto padrão de qualidade nas medições relacionadas à rugosidade das superfícies. Inicialmente, o rugosímetro destinava-se somente a avaliação da rugosidade ou textura primária. Com o tempo, apareceram os critérios para avaliação da textura secundária, ou seja, a ondulação, onde muitos aparelhos evoluíram

para essa nova tecnologia (WHITEHOUSE, 1994).

Figura 26 - Esquema de funcionamento de um rugosímetro



Fonte: Adaptado de Mitutoyo

O processo de determinação da rugosidade consiste, basicamente, em percorrer a rugosidade com um apalpador de formato normalizado, acompanhado de uma guia em relação ao qual ele se move verticalmente. Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, a guia acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrado no mostrador e no gráfico conforme a figura 26 (FUNDAÇÃO, 1996).

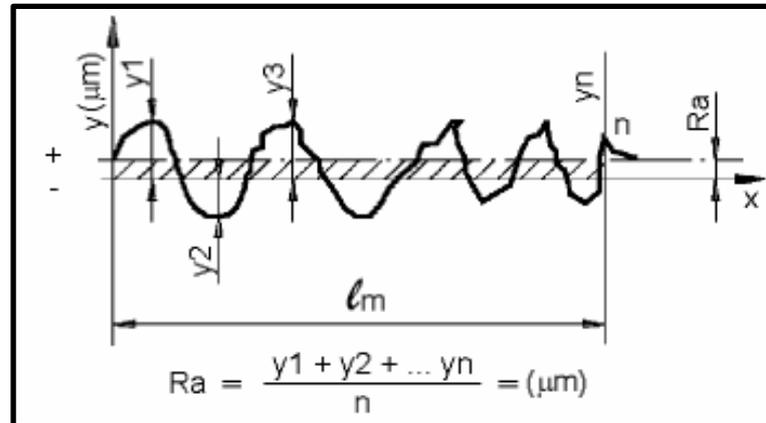
Existem diversos parâmetros de rugosidade utilizados para avaliar o acabamento superficial de um componente. A superfície das peças apresenta perfis bastante diferentes entre si. As saliências e reentrâncias são irregulares (FERRARESI, 1970). Para dar acabamento adequado às superfícies é necessário, portanto, determinar o nível em que elas devem ser trabalhadas, ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade (WHITEHOUSE, 1994).

2.6.1.1 - Rugosidade média (R_a)

O parâmetro R_a significa rugosidade média, sendo o parâmetro mais empregado na indústria. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m).

A Figura 27 ilustra o processo de medição do parâmetro R_a . O valor de R_a é geralmente expresso em μm no sistema métrico (AGOSTINHO et al., 1977).

Figura 27 - Rugosidade média R_a

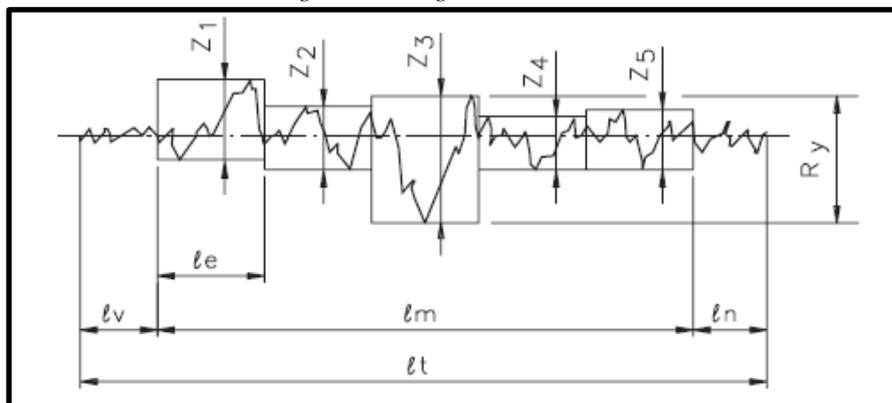


Fonte: Adaptado de DIN (2012)

2.6.1.2 - Rugosidade máxima (R_y)

Está definido como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m). Por exemplo: na Figura 28, o maior valor parcial é o Z_3 , que está localizado no 3º *cut off*, e que corresponde à rugosidade R_y (AGOSTINHO et al., 1977).

Figura 28 - Rugosidade máxima $R_{m\acute{a}x}$

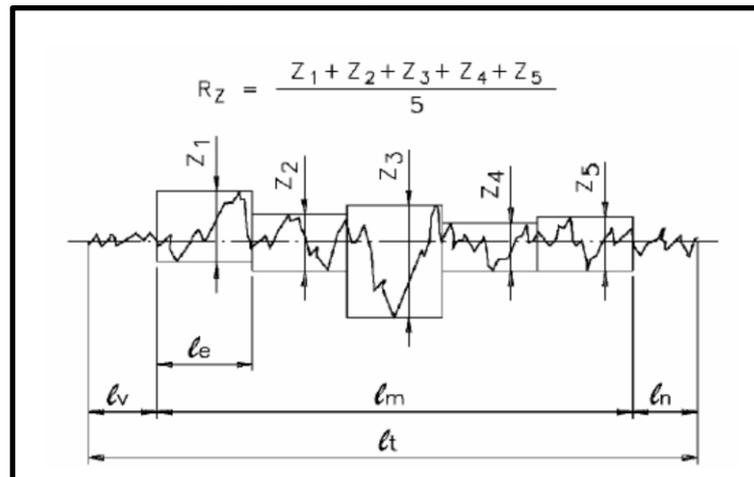


Fonte: Adaptado de DIN (2012)

2.6.1.3 - Rugosidade parcial (R_z)

A rugosidade parcial (R_z) corresponde à média aritmética dos cinco valores das rugosidades parciais. Rugosidade parcial (Z_i) e a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (l_m) conforme a figura 29 (AGOSTINHO et al., 1977).

Figura 29 - Rugosidade parcial (R_z)



Fonte: Adaptado de DIN (2012)

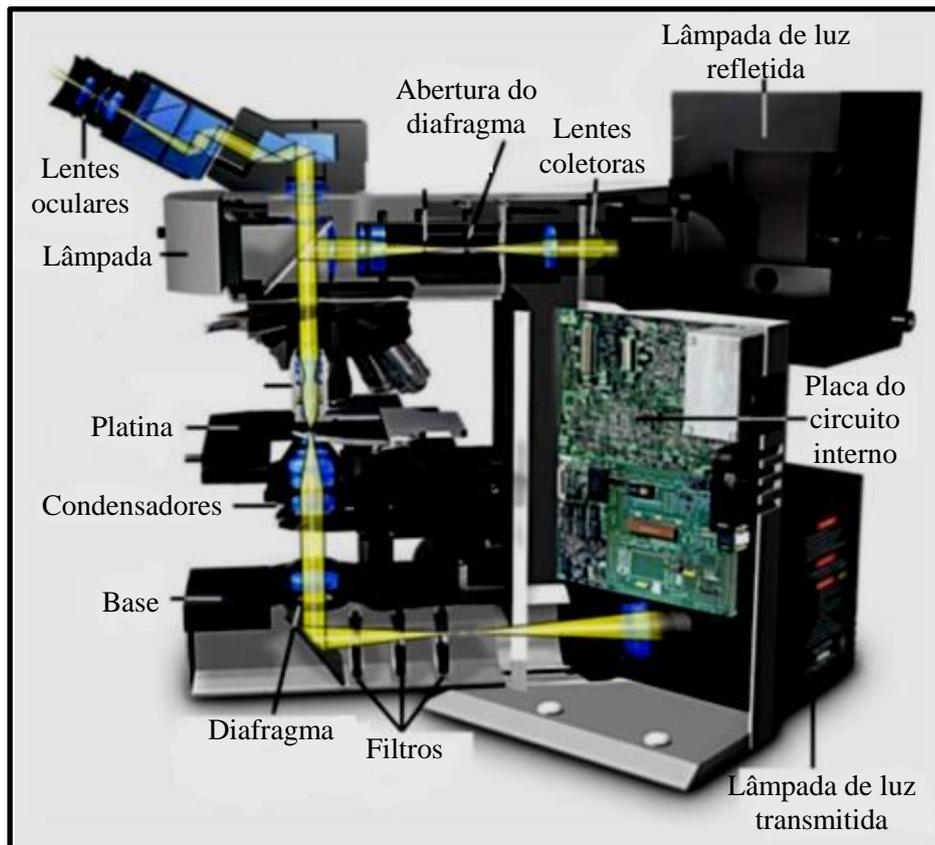
2.6.2 - Análise metalográfica e microscopia ótica

Em linhas gerais a técnica de análise metalográfica é utilizada para se fazer imagens da topografia ou das características microestruturais sobre uma superfície polida e atacada quimicamente com aumentos de 1 a 2000 vezes. É possível se analisar o grão, as fases estruturais e dimensões da amostra. Alguns exemplos de aplicações: determinação de como foi à fabricação e a história do tratamento térmico, determinação das características da integridade superficial, análises de falhas e caracterização dos efeitos de processamento sobre as propriedades da microestrutura (MERTZ, 2012).

As amostras podem ser metais, cerâmicas, compósitos ou materiais geológicos de dimensões que variam de 10^{-5} a 10^{-1} m. Já a preparação das amostras é feita com o material seccionado e embutido em baquelite, após as mesmas são lixadas e polidas a fim de se conseguir uma superfície plana e livre de riscos e depois atacada quimicamente para revelar as características da microestrutura de interesse (HAYNES, 1984).

Na microscopia ótica, o contraste da imagem é resultado da diferença de refletividade da luz nas diversas regiões da microestrutura, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes como demonstrado na figura 30. Para materiais que são opacos a luz visível, como é o caso dos metais, da maioria dos cerâmicos e polímeros, somente a superfície pode ser observada e a mesma precisa ser cuidadosamente preparada de maneira a revelar os detalhes da microestrutura (DAVIDSON; ABRAMOWITZ, 2000).

Figura 30 - Detalhamento do microscópio ótico



Fonte: Adaptado de Davidson e Abramowitz (2000)

Através do exame metalográfico é possível realizar as seguintes análises:

– Macrográfico: Consiste no exame do aspecto de uma superfície plana seccionada de uma peça ou amostra metálica, devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma ideia de conjunto referente a homogeneidade do material, a distribuição e natureza de falhas, impureza e ao processo de fabricação (MERTZ, 2012).

– Micrográfico: Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões. Estas observações são de grande utilidade prática (MERTZ, 2012).

2.6.3 - Microdureza

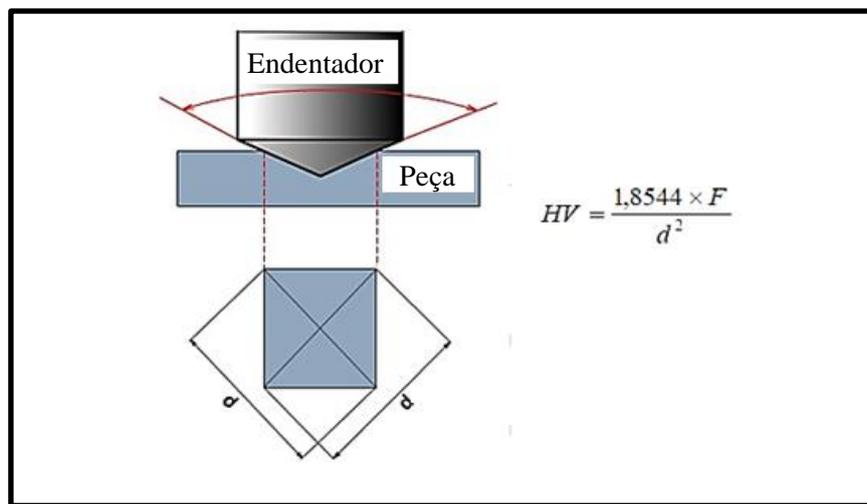
A dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, originando diversas interpretações. Num bom dicionário, dureza é qualidade ou estado de duro, rjeza. Duro, por sua vez, é definido como difícil de penetrar ou de riscar, consistente, sólido. Essas definições não caracterizam o que é dureza para todas as situações, pois ela assume um

significado diferente conforme o contexto em que é empregada (SOUZA, 1982).

É importante destacar que, apesar das diversas definições, um material com grande resistência à deformação plástica permanente também terá alta resistência ao desgaste, alta resistência ao corte e será difícil de ser riscado, ou seja, será duro em qualquer uma dessas situações (SOUZA, 1982).

Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência do que qualquer outro ensaio mecânico, pois são simples, mais baratos e não comprometem funcionalmente a peça ensaiada (CLAASSEN; CHYNOWETH, 1987).

Figura 31 - Medição da dureza vickers



Fonte: Adaptado de ABNT (2008) e Callister (2012)

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga (ABNT, 2008).

A máquina que faz o ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais “d1” e “d2” formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide. Conhecendo as medidas das diagonais e a sua média “d”, é possível calcular a dureza Vickers conforme demonstrado na figura 31 (CALLISTER, 2012).

O método de dureza vickers tem aplicação em toda a gama de durezas encontradas nos diversos materiais; além disso, devido à utilização de cargas relativamente baixas e do tipo de penetrador, o ensaio pode ser aplicado para qualquer espessura bem como para determinar durezas superficiais. Além disso, é possível utilizar a microdureza que permite a determinação de dureza individual de microestruturas, de superfícies cementadas e temperada, além da determinação de durezas em peças extremamente pequenas e finas (SOUZA, 1982).

O ensaio de dureza vickers é também bastante utilizado em peças que foram cortadas através de processos térmicos, particularmente para a detecção de heterogeneidades devido às transformações metalúrgicas associadas a ciclos térmicos. Assim, por meio de filiações, determinam-se durezas das diversas zonas de uma peça, desde o metal de base que não sofreu qualquer alteração metalúrgica, até o metal que fundiu, passando pela zona termicamente afetada (ZTA) pelo calor (SOUZA, 1982).

2.7 - Planejamento e análise de experimentos

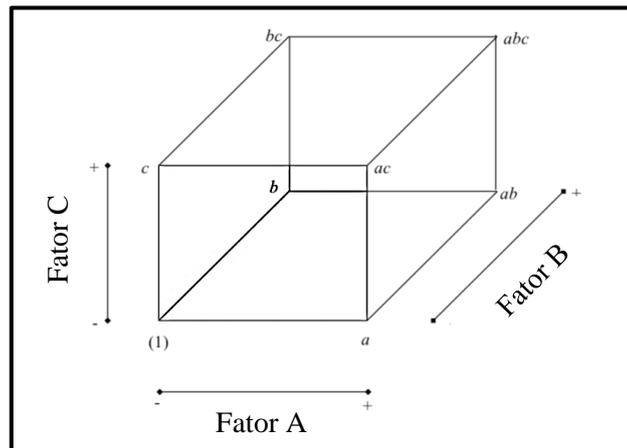
Em qualquer área de pesquisa, existe sempre o interesse em conhecer quais variáveis são importantes para o estudo que esteja sendo realizado, assim como os limites inferior e superior dos valores destas variáveis. A partir da análise inicial, técnicas estatísticas devem ser utilizadas de modo a se obter conclusões em relação à dependência das respostas de interesse em função das variáveis analisadas. O planejamento de experimentos é uma dessas técnicas e que permite a execução de experiências de maneira econômica e eficiente. Por outro lado, embora ajudem a economizar tempo e dinheiro, visto que conduzem à objetividade da análise dos resultados, os métodos de planejamento de experimentos não substituem a imaginação e o bom senso do executor [BOX, 1978].

2.7.1 - Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é uma técnica estatística que permite quantificar os efeitos ou influências de um ou mais fatores, além de ser a única maneira de se determinar interações entre os fatores. Os planejamentos fatoriais mais simples são aqueles em que todos os fatores são estudados em apenas dois níveis: para k fatores, é necessária a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios. Por isso, são chamados de planejamentos fatoriais 2^k (MONTGOMERY, 2003).

2.7.1.1 - Planejamento Fatorial 2^3

O planejamento fatorial 2^3 gera oito combinações de tratamento. Geometricamente, o planejamento é um cubo, conforme mostrado na figura 32, com oito combinações formando os vértices do cubo. Este planejamento permite que três efeitos principais (A, B e C) sejam estimados, juntamente com as interações de segunda ordem (AB, AC e BC) e de terceira ordem (ABC) (HINES, et al. 2003).

Figura 32 - Planejamento 2^3 

Fonte: Adaptado de Montgomery (2003)

Os sinais para os efeitos principais são determinados pela associação do sinal mais ao nível alto e do sinal menos ao nível baixo. Uma vez que os sinais para os efeitos principais tenham sido estabelecidos, os sinais para as colunas restantes podem ser obtidos pela multiplicação das colunas apropriadas precedentes, linha por linha. Por exemplo, os sinais na coluna AB são os produtos dos sinais das colunas A e B em cada linha (HINES, et al. 2003). Os contrastes para qualquer efeito podem ser facilmente obtidos a partir da tabela 3.

Tabela 3 - Sinais algébricos para o cálculo dos efeitos

Combinação dos tratamentos	Efeito Fatorial							
	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	+	-	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	
ac	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

Fonte: Adaptado de Montgomery (2003)

Os efeitos principais (A, B e C), as interações de segunda ordem (AB, AC e BC) e de terceira ordem (ABC) são calculadas conforme as fórmulas 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 (ESTATCAMP, 1997).

$$A = \frac{a + ab + ac + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n} \quad (2)$$

$$B = \frac{b + ab + bc + abc}{4n} - \frac{(1) + a + c + ac}{4n} \quad (3)$$

$$C = \frac{c + ac + bc + abc}{4n} - \frac{(1) + a + b + ab}{4n} \quad (4)$$

$$AB = \frac{(1) + c + ab + abc}{4n} - \frac{a + b + ac + bc}{4n} \quad (5)$$

$$AC = \frac{(1) + b + ac + abc}{4n} - \frac{a + c + ab + bc}{4n} \quad (6)$$

$$BC = \frac{(1) + a + bc + abc}{4n} - \frac{b + c + ab + ac}{4n} \quad (7)$$

$$ABC = \frac{a + b + c + abc}{4n} - \frac{(1) + ab + ac + bc}{4n} \quad (8)$$

Os efeitos devem ser classificados em ordem decrescente, onde o maior efeito é o dominante seguido pelos efeitos subsequentes.

2.7.1.2 - Análise da variância

A técnica da análise da variância consiste na análise da variação total dos valores das observações em relação à média calculada desses valores, e engloba a partição dessa variação total em componentes. A cada uma das componentes é atribuída uma causa identificável também chamada fonte de variação. A análise da variância, resumida na tabela 4, confirma a interpretação das estimativas dos efeitos (MAGALHÃES; LIMA, 2001).

Tabela 4 - Tabela de análise de variância para experimentos fatoriais do tipo 2^3

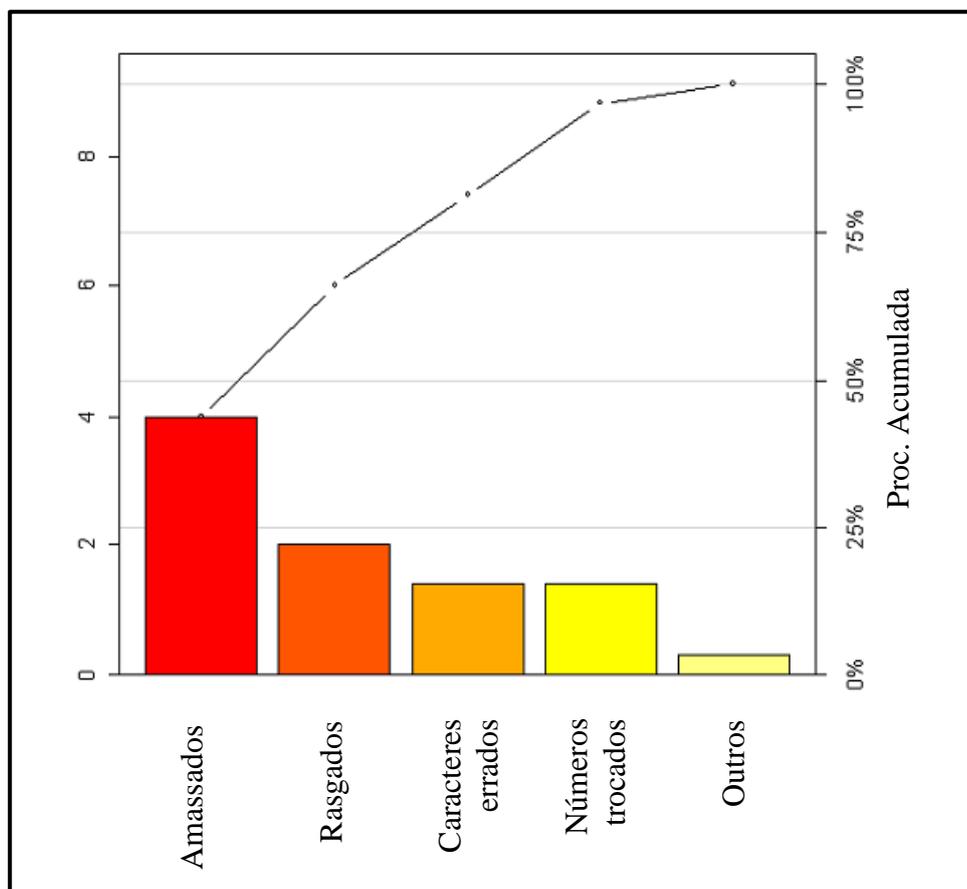
Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F
A	SQ_A	$a - 1$	$QM_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{QM_A}{QM_E}$
B	SQ_B	$b - 1$	$QM_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{QM_B}{QM_E}$
C	SQ_C	$c - 1$	$QM_C = \frac{SQ_C}{c - 1}$	$\frac{QM_C}{QM_E}$
AB	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{QM_{AB}}{QM_E}$
AC	SQ_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	$QM_{AC} = \frac{SQ_{AC}}{(a - 1)(c - 1)}$	$\frac{QM_{AC}}{QM_E}$
BC	SQ_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	$QM_{BC} = \frac{SQ_{BC}}{(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{QM_{BC}}{QM_E}$
ABC	SQ_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	$QM_{ABC} = \frac{SQ_{ABC}}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{QM_{ABC}}{QM_E}$
Erro	SQ_E	$abc(r - 1)$	$QM_E = \frac{SQ_E}{abc(r - 1)}$	
Total	SQ_T	$abc r - 1$		

Fonte: Adaptado de Estatcamp (1997)

2.7.2 - Diagrama de pareto

Diagrama de pareto é um gráfico de barras que ordena as frequências das ocorrências, da maior para a menor, permitindo a priorização dos problemas conforme demonstrado na figura 33. Mostra ainda a curva de percentagens acumuladas. Sua maior utilidade é a de permitir uma fácil visualização e identificação das causas ou problemas mais importantes, possibilitando a concentração de esforços sobre os mesmos. É utilizado para dados qualitativos (ESTATCAMP, 1997).

Figura 33 - Gráfico de pareto



Fonte: Adaptado de Estatcamp (1997)

3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL

3.1 - Material

O material escolhido para os experimentos foi o ABNT 1045 que é classificado como um aço de médio carbono. Este material tem um limite de resistência entre 440 a 590 N/mm² e é utilizado em aplicações que exija resistência mecânica superior ao dos aços de baixo carbono.

De acordo com a norma ABNT NBR NM 87/2000, que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, o aço ABNT 1045 deve apresentar a composição química descrita na tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do aço ABNT 1045

C	Mn	P máx.	S máx.	Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

Fonte: Adaptado de ABNT (2000)

O material utilizado para a obtenção dos corpos de prova estava no formato de chapa laminada a quente com espessura de 3,75 mm e dimensões de 1200 mm de largura e 3000 mm de comprimento.

3.2 - Equipamento *laser* utilizado

Para a avaliação das superfícies produzidas pelo processo de corte a *laser*, as amostras foram obtidas em uma máquina Trulaser 5030 Classic (figura 34) da fabricante alemã Trumpf capaz de gerar uma potência máxima de 5000 W (TRUMPF, 2014).

Este equipamento possui as seguintes características técnicas, conforme descritas pela Trumpf (2014):

- velocidade de avanço rápido: 300 m/min;
- aceleração máxima: 17 m/s²;
- modo de qualidade do feixe: TEM₀₀;
- gás de assistência: oxigênio ou nitrogênio;
- dimensão máxima de corte: 1500 mm x 3000 mm e
- comando: *sinumerik* 840D com *windows* NT.

Está máquina foi desenvolvida para processar chapas metálicas com comprimento máximo de 3 m, largura de até 1,50 m e espessura de até 25 mm em aço carbono, 20 mm e aço inox e alumínio e 10 mm em cobre e latão, com precisão de 0,001 mm (TRUMPF, 2014).

O equipamento utilizado pertence à empresa Tecnolaser Indústria e Comércio Ltda situada na cidade de Farroupilha no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 34 - Máquina Trumpf Trulaser 5030 Classic



Fonte: Adaptado de Trumpf (2014)

3.3 - Parâmetros de corte

Baseado nas informações definidas pela fabricante alemã Trumpf para o material ABNT 1045 que acompanha a máquina, selecionou-se um conjunto de parâmetros para a aplicação na pesquisa.

Dos diversos parâmetros necessários para o processo de corte *laser*, foi definido que a potência, a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência seriam trabalhadas em dois níveis e os demais parâmetros seriam trabalhados em um único nível.

Na tabela 6 são apresentados os parâmetros utilizados na pesquisa, onde o nível mais baixo dos parâmetros da potência, velocidade de corte e a pressão do gás de assistência e os valores dos demais parâmetros são os fornecidos pela tabela tecnológica da máquina a qual foi realizado o corte.

Para a definição do nível alto dos parâmetros da potência de corte, da velocidade de corte e da pressão do gás de assistência foram cortadas diversas amostras. O objetivo destes diversos cortes foi para verificar se estes parâmetros conseguiam realizar o corte completo do material, pois para a pesquisa foi necessário conseguir amostras que pudessem ser analisadas posteriormente.

Tabela 6 - Parâmetros de corte utilizado

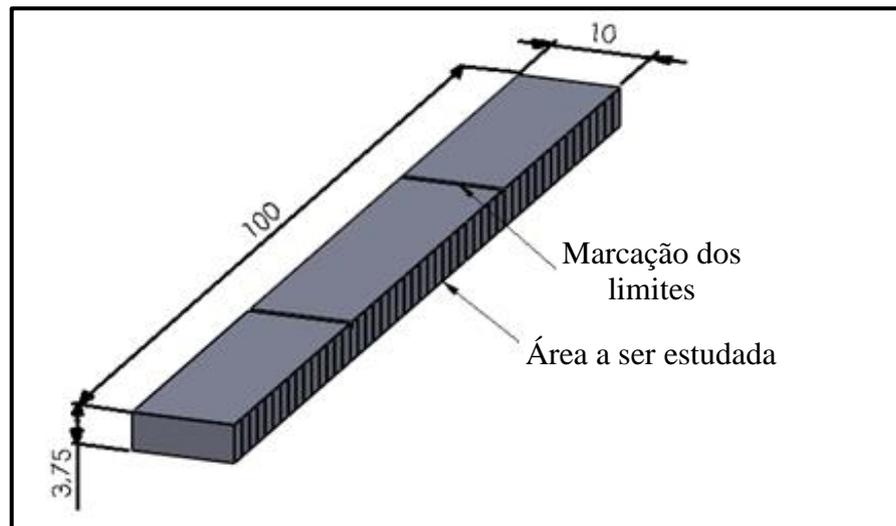
Parâmetros	Valores
Potência	3700 – 4400 W
Modo de qualidade do feixe	TEM ₀₀
Velocidade	3500 – 4200 mm/min
Tipo de corte	Contínuo
Gás de assistência	0,6 – 1,5 bar
Distância bico/peça	0,7 mm
Comprimento de onda	20000 µm
Diâmetro do bico	1 mm
Posição do foco	-1 mm

Fonte: O autor

3.4 - Corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados em uma chapa de aço ABNT 1045 laminada a quente com espessura de 3,75 mm e dimensões conforme a figura 35.

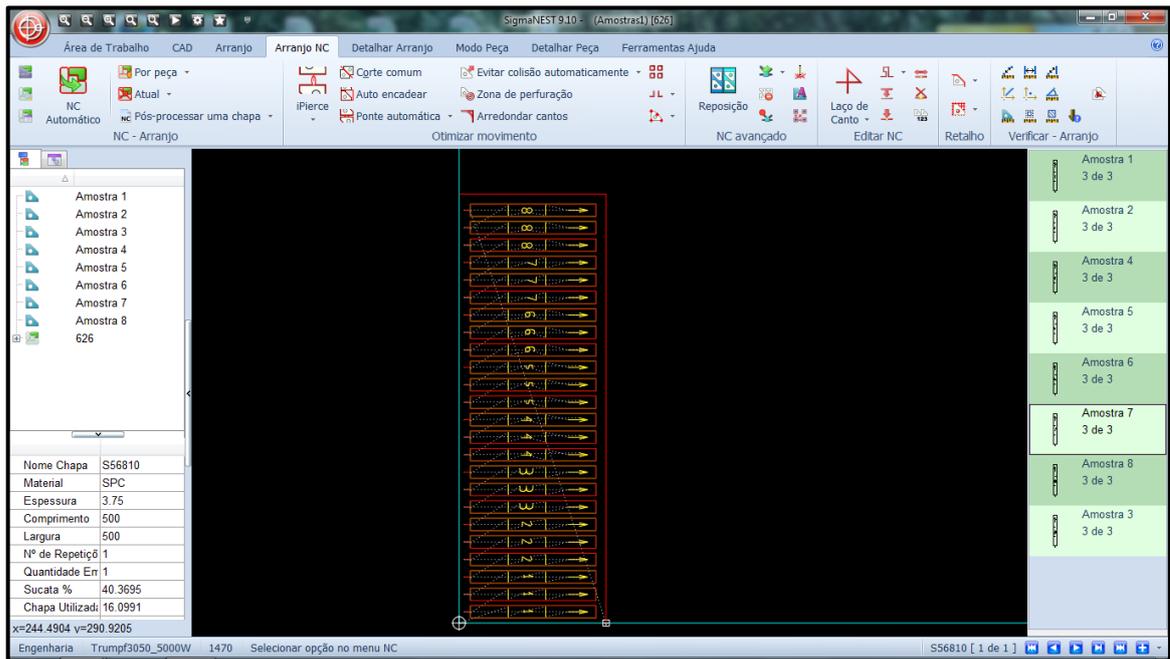
Figura 35 - Corpo de prova



Fonte: O autor

Todas as amostras foram distribuídas sobre a área útil da chapa metálica por um sistema de computação gráfica CAM (*Computer Aided Manufacturing*). O *software* CAM utilizado foi o Sigmanest, onde foi gerado o programa executável, composto pelos comandos e posicionamentos necessários para realizar o contorno dimensional das amostras. O exemplo do arranjo gráfico está apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Arranjo das amostras

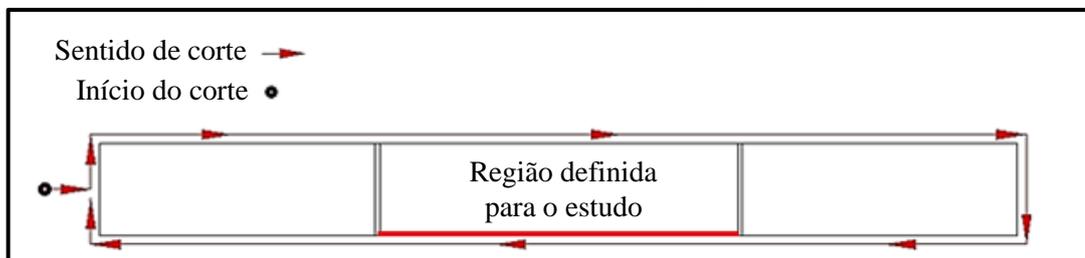


Fonte: O autor

No arranjo da figura 36 foi possível marcar a numeração dos corpos de provas e as linhas que demarcam a região a ser estudada no momento do corte. Estas linhas foram marcadas a 30 mm de cada face para evitar os efeitos de acelerações e desacelerações providos pela máquina que pudessem influenciar os resultados do estudo.

O percurso do corte também foi muito importante para a obtenção dos corpos de prova com demonstrado na figura 37. A perfuração do início do corte ocorre distante da peça a fim de evitar que esta operação não danificasse a geometria da mesma. O corte teve que ser iniciado na lateral da peça, pois como trabalhava com pressão do gás de assistência elevada, seria muito importante que na região a ser estudada, está pressão estivesse estabilizada.

Figura 37 - Detalhe do corte da peça



Fonte: O autor

Também ao final do corte foi deixada uma micro junta para evitar que as peças caíssem na esteira transportadora de cavacos e conseqüentemente evitando que material fundido de outros cortes aderissem na sua superfície gerando conseqüências ao estudo conforme mostrado na figura 37.

Todas as observações e medições foram realizadas na região destacada através da linha mais espessa conforme demonstrada na figura 37.

3.5 - Planejamento fatorial e análise estatística

Com o objetivo de investigar a influência dos parâmetros individualmente e suas interações estruturou-se um planejamento fatorial 2^k . Para o estudo apresentado foi trabalhado três variáveis (potência, velocidade, pressão), que através do planejamento fatorial originou oito combinações diferentes conforme demonstrado na tabela 7.

Tabela 7 - Planejamento fatorial 2^3

	A – Potência (W)	B – Velocidade (mm/min)	C – Pressão do Gás de Assistência (bar)
1	3700	3500	0,6
2	4400	3500	0,6
3	3700	4200	0,6
4	4400	4200	0,6
5	3700	3500	1,5
6	4400	3500	1,5
7	3700	4200	1,5
8	4400	4200	1,5

Fonte: O autor

Para poder aumentar a confiabilidade do experimento, para cada combinação foram cortadas três réplicas, totalizando desta maneira vinte e quatro corpos de prova.

Através destes corpos de prova foram coletadas diversas informações, onde foi possível analisar conceitualmente e estatisticamente as mesmas. Com estas avaliações concluiu-se qual dos parâmetros ou suas interações apresentavam maior influência sobre o processo de corte a *laser* através do cálculo de análise de variância onde se considerou um valor P menor que 0,03.

3.6 - Metalografia

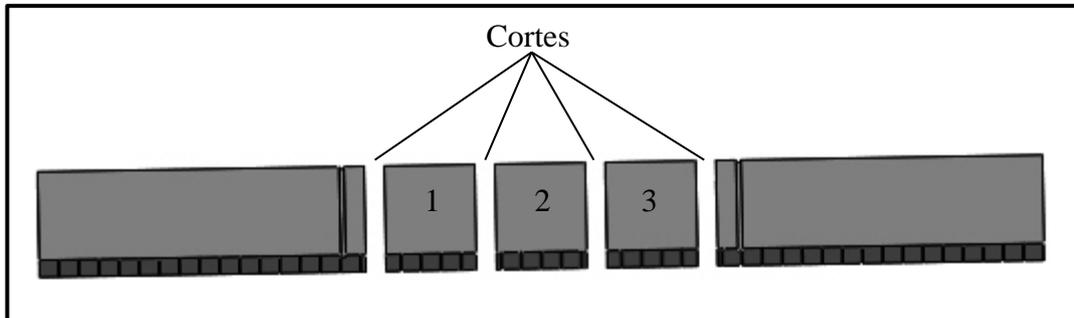
O exame metalográfico preparou as amostras para a realização de análises da microestrutura e análises dimensionais de algumas características específicas. Portanto, este ensaio foi importante e teve que ser cuidadosamente realizado.

Durante a preparação, as amostras metalográficas são suscetíveis à deformação mecânica e térmica. O superaquecimento das superfícies pelo corte, lixamento e polimento podem distorcer completamente os resultados.

3.6.1 - Preparação das amostras

As amostras foram cortadas na região demarcada para a realização da pesquisa. Desta região foram obtidos três secções para posterior embutimento conforme figura 38.

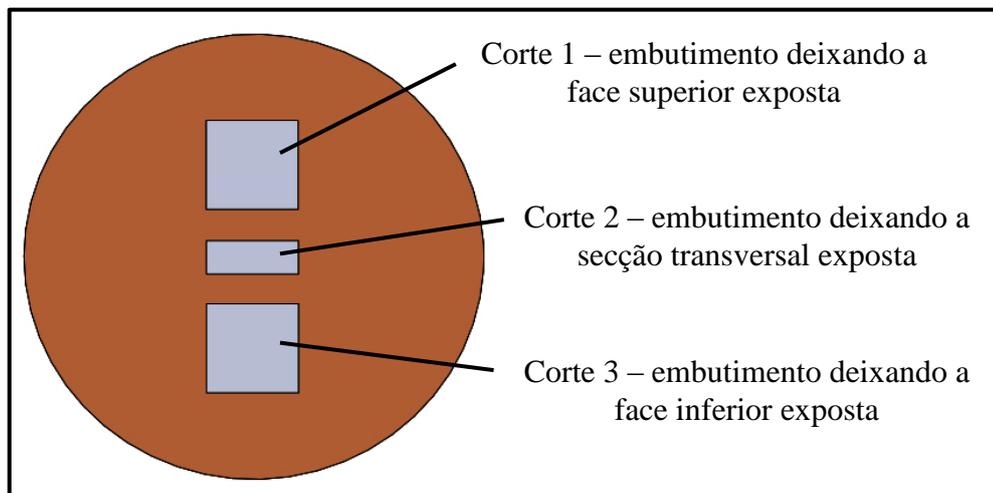
Figura 38 - Cortes realizados para o embutimento



Fonte: O autor

A etapa seguinte ao corte foi o embutimento em baquelite a quente, de forma que a superfície a ser analisada ficasse exposta no topo do cilindro prensado. Para cada corpo de prova cortado foi realizado o embutimento das três partes juntas.

Figura 39 - Leiaute do embutimento dos cortes



Fonte: O autor

O corte número um foi embutido deixando a base superior exposta, o corte número dois foi deixado a lateral exposta e por fim o corte número três foi deixado exposta a parte inferior conforme demonstrado na figura 39.

Para planificar a superfície e remover as irregularidades utilizaram-se lixas de várias granulometrias (250, 320, 400, 600 e 1200 mesh). A operação foi refrigerada com fluxo constante de água e na troca de granulação das lixas o embutimento era rotacionado a 90°. Em seguida os embutimentos foram polidos com pasta de diamante de 3 µm e limpos com

acetona.

Para visualização de algumas medidas e da microestrutura do corpo de prova foi realizado o ataque da superfície com Nital 2% (ácido nítrico + álcool). Após o ataque químico, para a visualização da textura e obtenção das fotografias, utilizou-se o microscópio metalográfico modelo Epiphot 200 com câmera CCD, fabricado pela empresa Nikon, com uma magnificação de 50 a 1000 vezes.

3.7 - Análise da qualidade superficial do corte

Para avaliar a qualidade superficial do corte foram escolhidos os seguintes itens:

- rebarba gerada;
- rugosidade superficial;
- inclinação do corte;
- região termicamente afetada;
- microestrutura;
- microdureza.

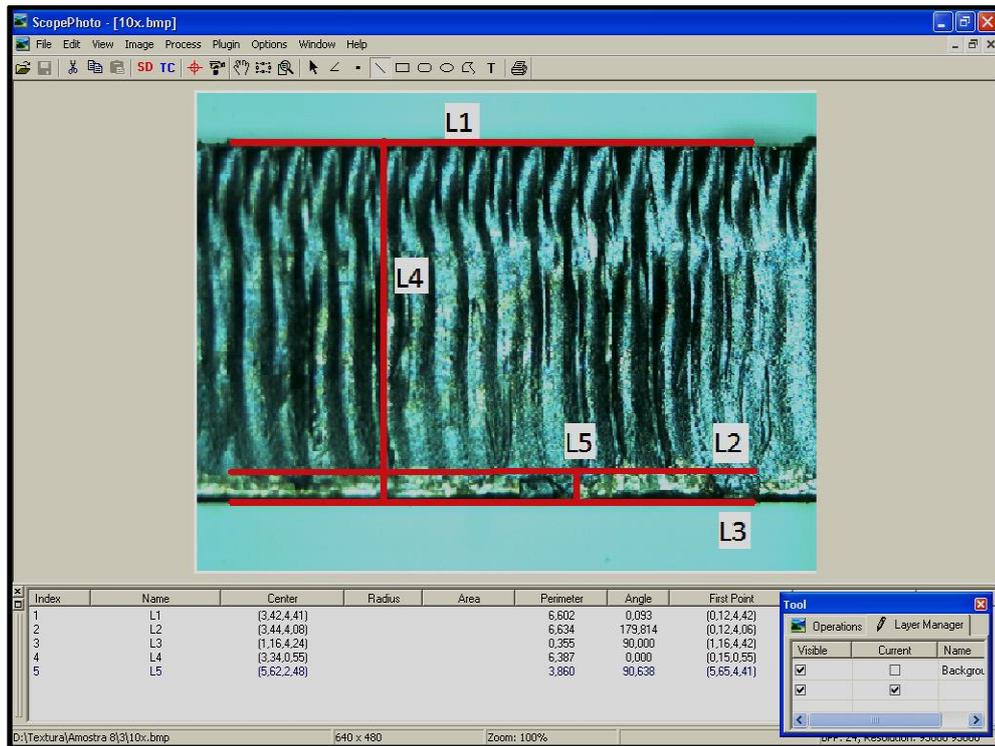
3.7.1 - Avaliação da rebarba

A quantidade de rebarbas foi obtida pela digitalização da imagem da superfície cortada. Cada imagem da superfície de corte foi capturada digitalmente e tratada graficamente e desta forma extraíram-se as áreas da formação de rebarbas. A Figura 40 ilustra o método gráfico utilizado para a determinação da dimensão das rebarbas.

As amostras foram fotografadas utilizando-se uma câmera fotográfica acoplada a um estereoscópio binocular de medição universal da marca Entex, modelo TNE-10B com uma ampliação de 10X. Com as imagens foi possível medir a dimensão das rebarbas com o auxílio do *software ScopePhoto* conforme figura 40.

Antes de serem realizadas as medições o software teve que ser configurado com a mesma ampliação das imagens capturas. Após foram traçadas as linhas horizontais “L1”, “L2” E “L3” onde delimitam o tamanho da peça e da rebarba. Ao final, as linhas “L4” e “L5” traçadas verticalmente mediam a espessura da peça e o tamanho da rebarba respectivamente.

Figura 40 - Software ScopePhoto



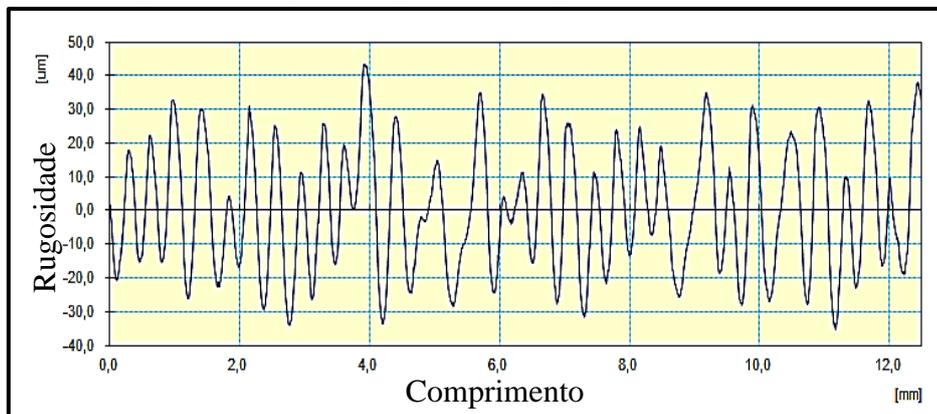
Fonte: O autor

Os valores do tamanho das rebarbas de cada amostra foram adicionados no modelo de análise experimental para gerar o gráfico dos efeitos de cada parâmetro e suas interações e após foi aplicado à técnica da ANOVA para verificar as suas influências.

3.7.2 - Avaliação da rugosidade

A análise da rugosidade foi realizada com um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-301 com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e raio da ponta do apalpador de diamante de $5 \mu\text{m}$ e conicidade de 90° .

Figura 41 - Gráfico da rugosidade da região central da amostra 6.

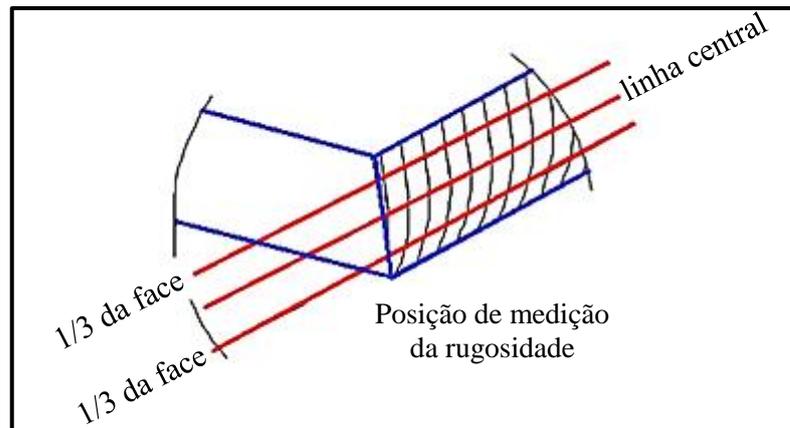


Fonte: O autor

Este equipamento foi ligado a um computador através de um cabo serial, onde desta maneira foi possível importar os dados medidos e plotar os gráficos de rugosidades conforme a figura 41. Para os gráficos de rugosidade aplicou-se o filtro “Gauss”, que atua na remoção da ondulação e do desvio de forma.

As rugosidades das superfícies foram mensuradas através do parâmetro de rugosidade média (Ra). Esta rugosidade foi medida a 1/3 de cada face e na linha média em relação à espessura do material e no sentido da direção do corte conforme figura 42.

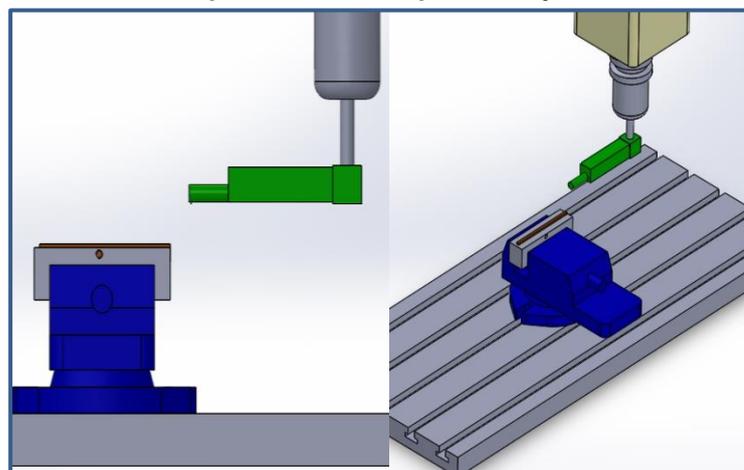
Figura 42 - Alturas das medidas da rugosidade



Fonte: O autor

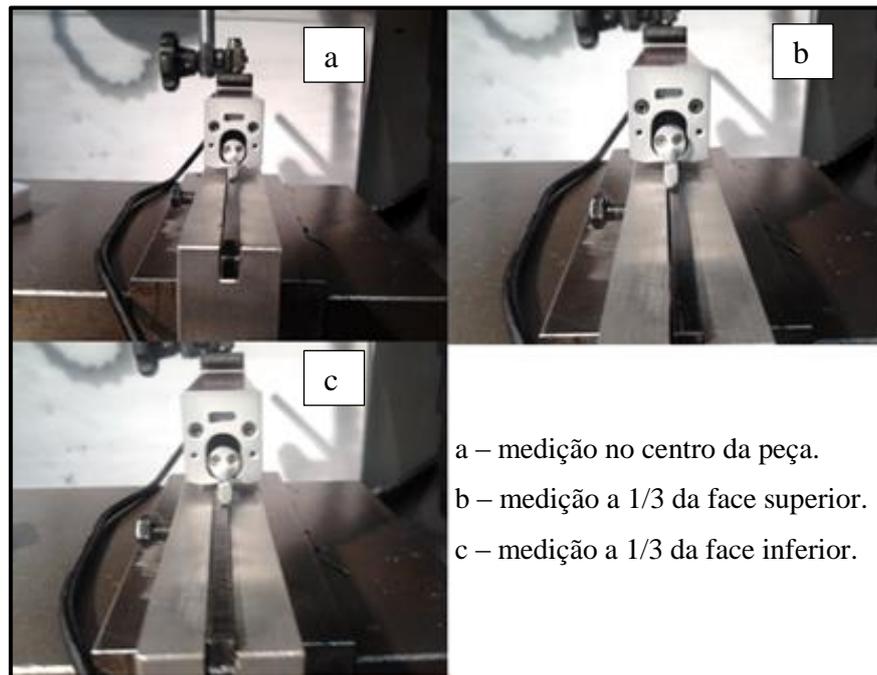
Para conseguir avaliar estas três posições, foi necessário criar um dispositivo para a fixação da peça a ser medida. Este dispositivo foi fixado em uma morsa que estava alinhada ao eixo “X” no centro de usinagem. O rugosímetro, para a realização da medição, foi fixado no eixo árvore da máquina e também teve que ser alinhado ao eixo “X” da máquina conforme figura 43. Com esta configuração foi possível mensurar a rugosidade de todas as peças na mesma posição conforme demonstrado na figura 44.

Figura 43 - Metodologia de medição



Fonte: O autor

Figura 44 - Medição da rugosidade



Fonte: O autor

Os valores das rugosidades de cada amostra foram adicionados no modelo de análise experimental para gerar o gráfico dos efeitos de cada parâmetro e suas interações e após foi aplicado à técnica da ANOVA para verificar as suas influências.

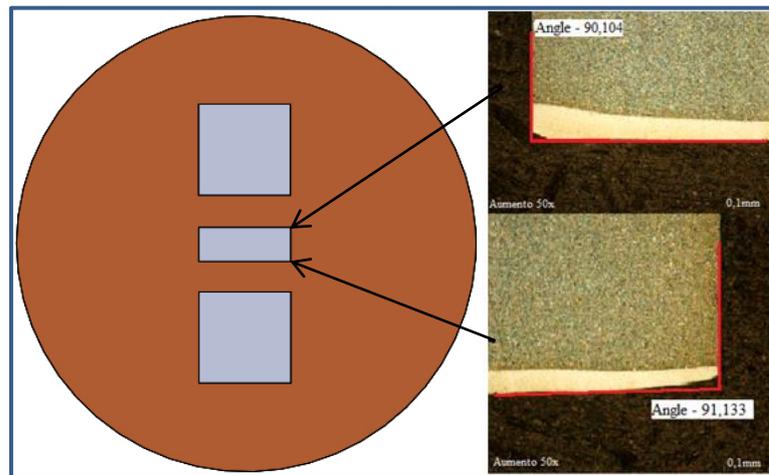
3.7.3 - Avaliação do perpendicularismo do corte

A avaliação do perpendicularismo do corte foi realizada através das amostras embutidas. Através do embutimento da secção transversal foi possível medir o perpendicularismo da entrada do corte *laser* e o perpendicularismo da saída do corte *laser*.

Com o auxílio do *software* Eclipse Net foram realizadas as medidas do perpendicularismo conforme mostrada na figura 45 utilizando-se as imagens com a ampliação de 50x. Para a medição do ângulo foram criadas duas linhas, uma linha paralela à superfície do material e outra linha paralela ao corte. Para a linha paralela ao corte *laser* foi ignorado o raio/chanfro da entrada do corte e da saída. Após, através do *software* foi medido o ângulo entre estas linhas.

Os valores do perpendicularismo de cada amostra foram adicionados no modelo de análise experimental para gerar o gráfico dos efeitos de cada parâmetro e suas interações e após foi aplicado à técnica da ANOVA para verificar as suas influências.

Figura 45 - Metodologia de medição do perpendicularismo do corte



Fonte: O autor

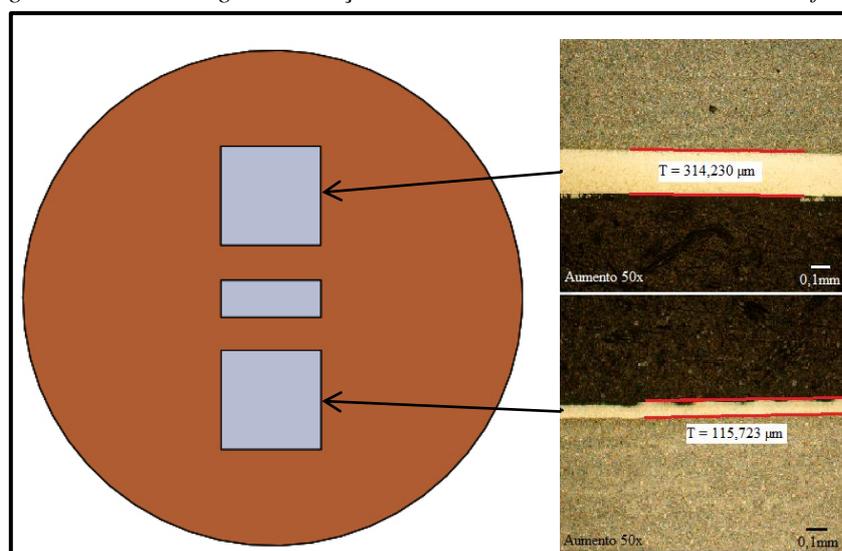
3.7.4 - Avaliação da dimensão da zona termicamente afetada

A avaliação do tamanho da região termicamente afetada foi realizada através das amostras embutidas, onde foram deixadas expostas a face superior e a face inferior, foram possíveis realizar as medições da camada ao longo de uma faixa em cada uma das superfícies.

O corte transversal não pode ser utilizado para realizar estas medições, pois devido à geometria da superfície embutida não se tinha certeza de estar medindo os pontos corretos.

Com o auxílio do *software Eclipse Net* foram realizadas as medidas da zona termicamente afetada, conforme mostrada na figura 46, utilizando-se as imagens com a ampliação de 50x. Esta medição foi realizada traçando-se duas linhas paralelas sobre a imagem. Após, através do *software* foi medido a distância entre estas linhas.

Figura 46 - Metodologia de medição do tamanho da camada termicamente afetada



Fonte: O autor

Após as dimensões da região termicamente afetada foram adicionadas no modelo de análise experimental para gerar o gráfico dos efeitos de cada parâmetro e suas interações e aplicado à técnica da ANOVA para verificar as suas influências.

3.7.5 - Avaliação da microestrutura

A avaliação da microestrutura foi realizada através das amostras embutidas. Através do embutimento da secção transversal foi possível verificar o material base e a zona termicamente afetada conforme a figura 47.

Figura 47 - Metodologia de avaliação da microestrutura



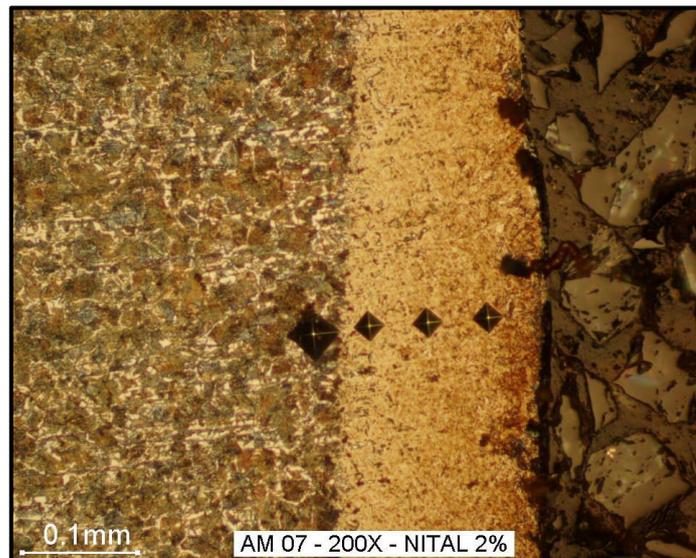
Fonte: O autor

3.7.6 - Avaliação da dureza

Nas seções transversais das amostras embutidas também foram feitas medidas de dureza para se verificar a variação desta em função da profundidade e investigar a influência dos parâmetros de corte. A dureza foi medida na linha central, ou seja, na metade da espessura da peça.

Para determinar a dureza Vickers das amostras foi utilizado um microdurômetro marca Shimadzu modelo HMV-2 com uma carga aplicada de 3N. O primeiro ponto medido foi a uma distância de 0,05mm da borda do corte e os demais pontos subsequentes foram incrementados a uma distância de 0,05mm até o momento em que se chegasse ao material base conforme demonstrado na figura 48.

Figura 48 - Metodologia de avaliação da dureza



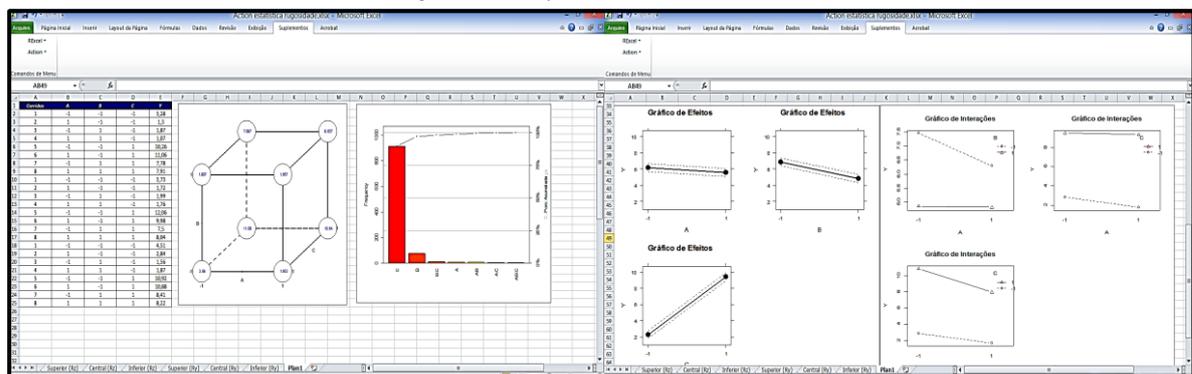
Fonte: O autor

Os resultados serão mostrados em forma de gráficos apresentando as curvas de dureza em função da profundidade. Para o primeiro ponto de dureza será usado o modelo de análise experimental para gerar o gráfico dos efeitos de cada parâmetro e suas interações e posteriormente foi aplicado à técnica da ANOVA para verificar as suas influências.

3.8 - Software estatístico

Como ferramenta estatística, empregou-se o *software* Action, versão 2.5, que opera como um suplemento do *software* Excel para auxiliar na estruturação dos gráficos e diagramas de influência das variáveis investigadas. A interpretação dos dados calculados e gerados graficamente permitiu confrontar o efeito de cada variável no corte a *laser* do aço ABNT 1045. A figura 49 mostra o *software* Action utilizado para o estudo estatístico.

Figura 49 - Software estatístico Action



Fonte: O autor

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme abordado em outros capítulos, o processamento a *laser* é basicamente um processo termomecânico, no qual um feixe de luz focalizado e pontual atua como fonte de aquecimento, ao mesmo tempo em que um fluxo de gás exerce forças mecânicas expelindo o material fundido para fora do canal de corte.

A definição anterior é uma forma simplista de abordar o tema, pois na realidade o resultado final do corte com *laser* está associado à ocorrência de inúmeros fenômenos físicos, que se alteram em virtude das diferentes combinações dos parâmetros de processamento.

Devido a essa complexidade, várias abordagens são pesquisadas e que implicam na geração de uma enorme soma de resultados. Para delimitar uma região menor, procurou-se direcionar as investigações para a avaliação da:

- rebarba gerada;
- rugosidade da superfície;
- inclinação do corte;
- zona termicamente afetada;
- microestrutura e
- microdureza.

Os resultados e as discussões dos diversos experimentos são apresentados neste capítulo onde é possível fazer uma avaliação de quais dos parâmetros estudados influenciam mais o processo de corte a *laser*.

4.1 - Rebarbas

Após as peças serem cortadas, seguindo-se o planejamento fatorial, foram realizadas diversas imagens, onde as mesmas puderam ser trabalhadas com o *software Scopephoto*. Através das imagens e do auxílio do software foi possível mensurar o tamanho das rebarbas aderidas na borda do corte. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 8.

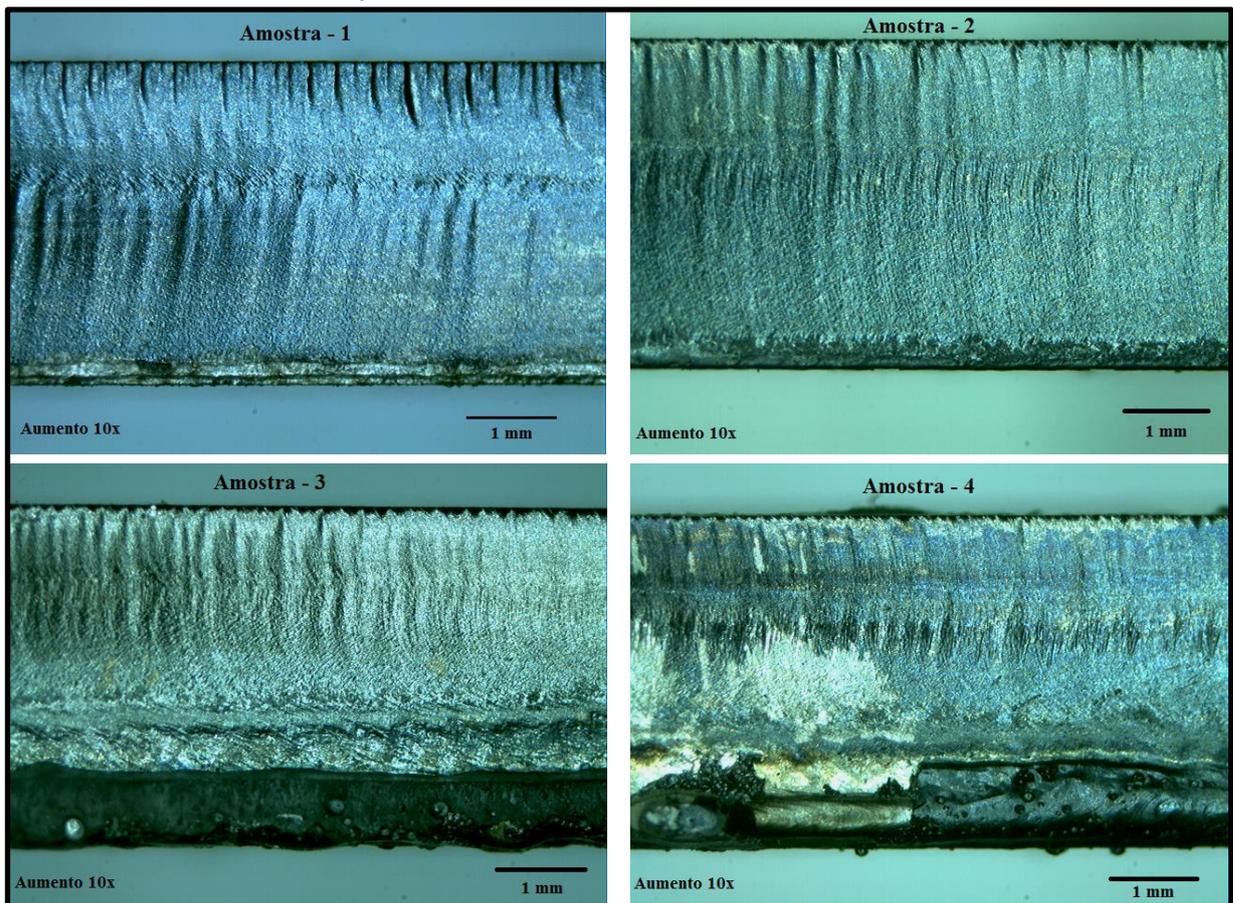
Através das medições realizadas, conforme demonstradas na tabela 8 foi possível verificar que as amostras de número três e quatro apresentavam as maiores rebarbas enquanto que as amostras de número cinco e seis apresentavam às rebarbas de menores dimensões. Por meio das imagens da figura 50 foi possível visualizar as diferentes rebarbas causadas pelo processo de corte a *laser* nas peças.

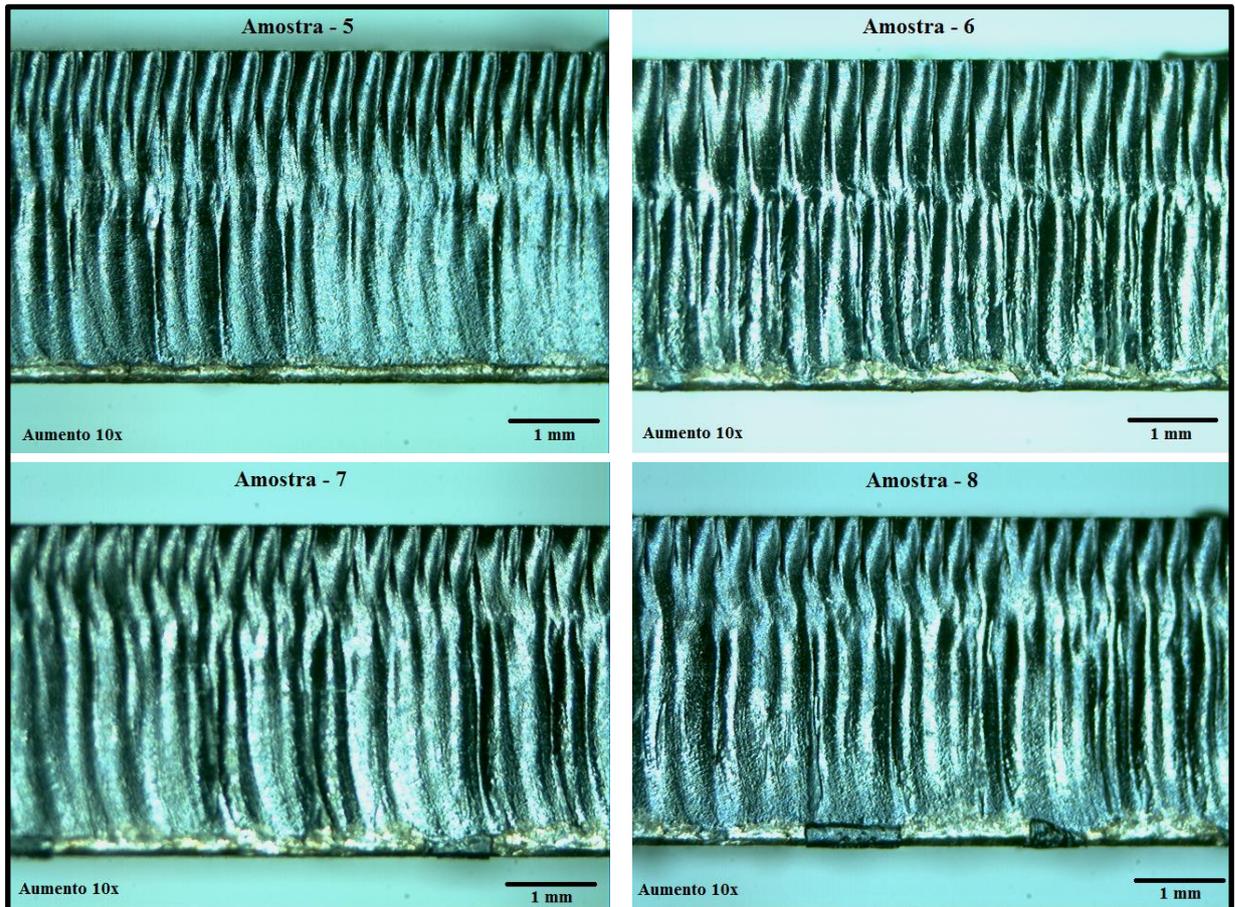
Tabela 8 - Valores das medidas das rebarbas em milímetros

Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	0,30	0,34	0,32
2	0,37	0,34	0,33
3	0,97	0,92	1,11
4	1,22	1,11	1,37
5	0,25	0,31	0,26
6	0,28	0,32	0,28
7	0,29	0,40	0,35
8	0,31	0,34	0,35

Fonte: O autor

Figura 50 - Aderência da rebarba na borda de corte

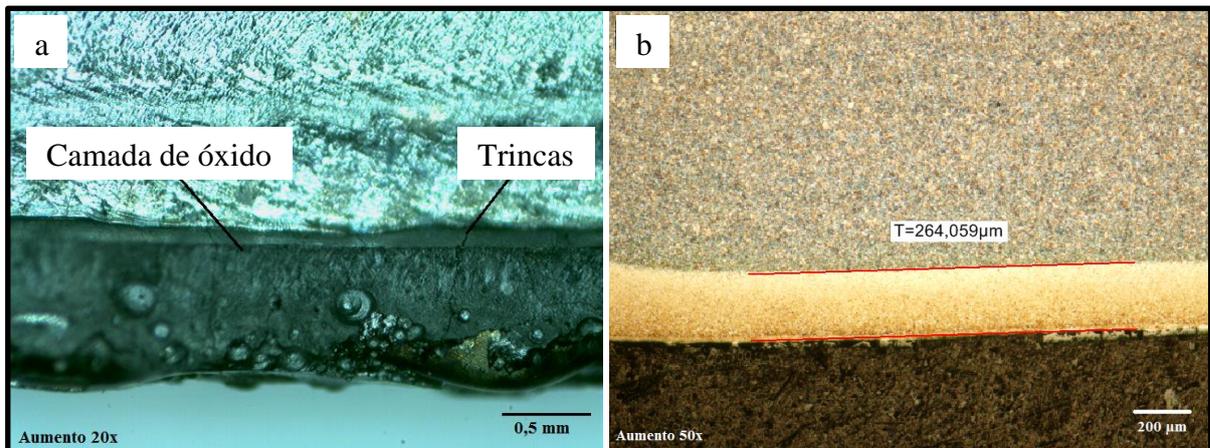




Fonte: O autor

Através da figura 51 foi possível verificar que as rebarbas ficavam aderidas ao longo da borda de corte inferior. A rebarba foi formada pelo material fundido que se solidificou ao final da região do corte.

Figura 51 - Detalhes da amostra 3 - (a) Textura superficial (b) Metalografia



Fonte: O autor

As rebarbas das amostras três e quatro apresentavam uma camada de óxido sobre material refundido. Na camada de óxido observa-se a formação de trincas originadas devido a

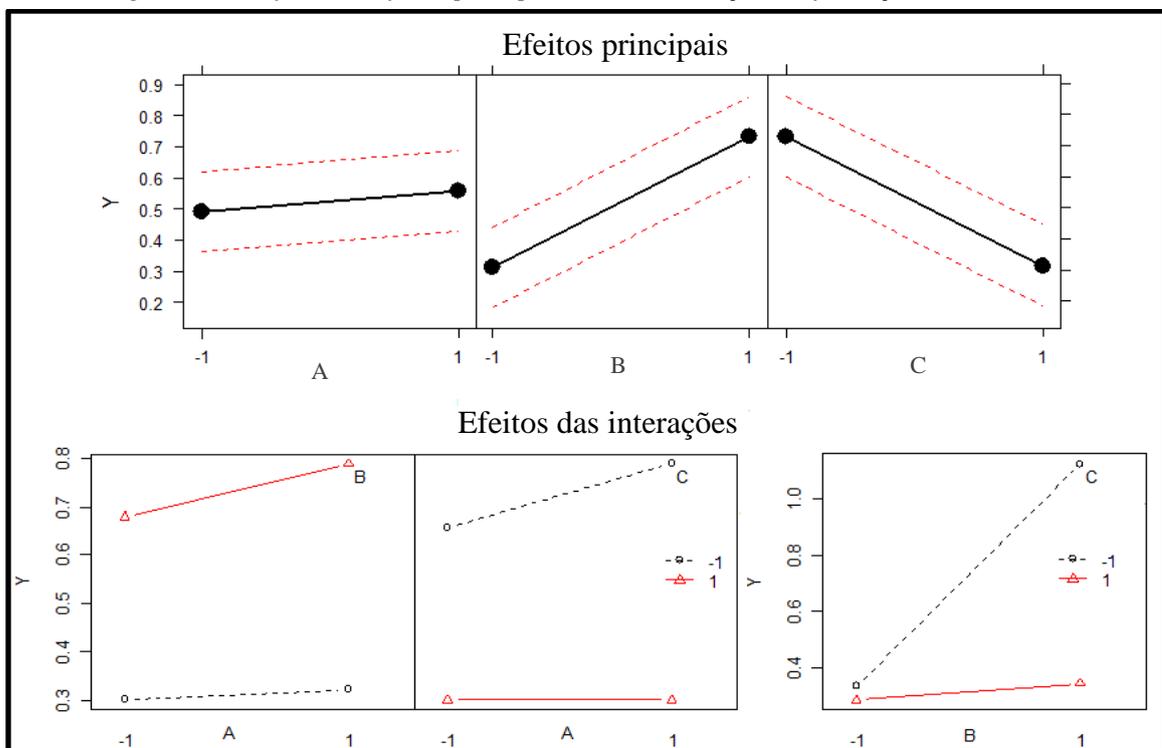
grande variação de temperatura na região do corte. Através da análise metalográfica foi possível observar que as trincas foram somente superficiais, isto é, somente na camada de óxido. Portanto, as mesmas não se propagavam para o interior do material conforme a demonstrado na figura 51.

É importante observar, que se estas peças cortadas a *laser* forem submetidas a solicitações dinâmicas estas trincas poderão se propagar devido ao processo de fadiga dos materiais.

Para identificar quais parâmetros foram os mais significantes para a formação da rebarba realizou-se o calculo dos efeitos principais e suas interações utilizando-se os valores apresentados na tabela 8. Na figura 52 os efeitos principais e as suas interações foram apresentados onde as letras representavam os seguintes parâmetros:

- A – Potência de corte;
- B – Velocidade de corte;
- C – Pressão do gás de assistência;
- Y – Variável resposta.

Figura 52 - Gráficos dos efeitos principais e as sua interações na formação das rebarbas



Fonte: O autor

A estruturação dos gráficos dos efeitos principais e suas interações, referentes aos parâmetros investigados em virtude da quantidade de rebarbas, permitiu avaliar a interferência relativa de cada um destes. Conforme se observa na figura 52, cada variável exerce um fator

de influência, onde quanto maior for a inclinação da reta maior será o efeito gerado sobre a característica em análise.

Os maiores ângulos formados com a linha horizontal significavam um maior efeito, isto é, quanto mais inclinada for a linha, mais significativo é o parâmetro para o processo de corte a *laser*.

Através da figura 52 foi possível verificar que os efeitos principais relacionados a velocidade de corte e a pressão de gás de assistência são os mais significativos para o processo.

Quanto à velocidade de corte foi possível dizer que para o nível baixo (-1) formaram-se rebarbas menores e para o nível alto (+1) o tamanho das rebarbas aumentavam contrariando a pesquisa de Almeida (2007) para o corte a *laser* de titânio. Relativo à pressão do gás de assistência foi possível afirmar que para o nível baixo (-1) as rebarbas possuíam tamanhos maiores do que em relação ao nível alto (+1) combinando com os resultados encontrados por Chen, Yao e Modi (2001).

Analisando a figura 52, observa-se que as interações entre a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência possuíam influência na formação da rebarba. A análise gráfica nos mostra que para a velocidade de corte com nível alto (+1) e a pressão do gás de assistência com o nível baixo (-1) foram geradas as maiores rebarbas, onde os tamanhos das mesmas ficavam maiores que 1 mm de comprimento.

Para definir qual dos efeitos apresentados na figura 52 foi o mais significativo na formação das rebarbas, realizou-se o cálculo de análise de variância, conforme a tabela 9, onde o seu resultado foi apresentado através do diagrama de pareto exibido na figura 53.

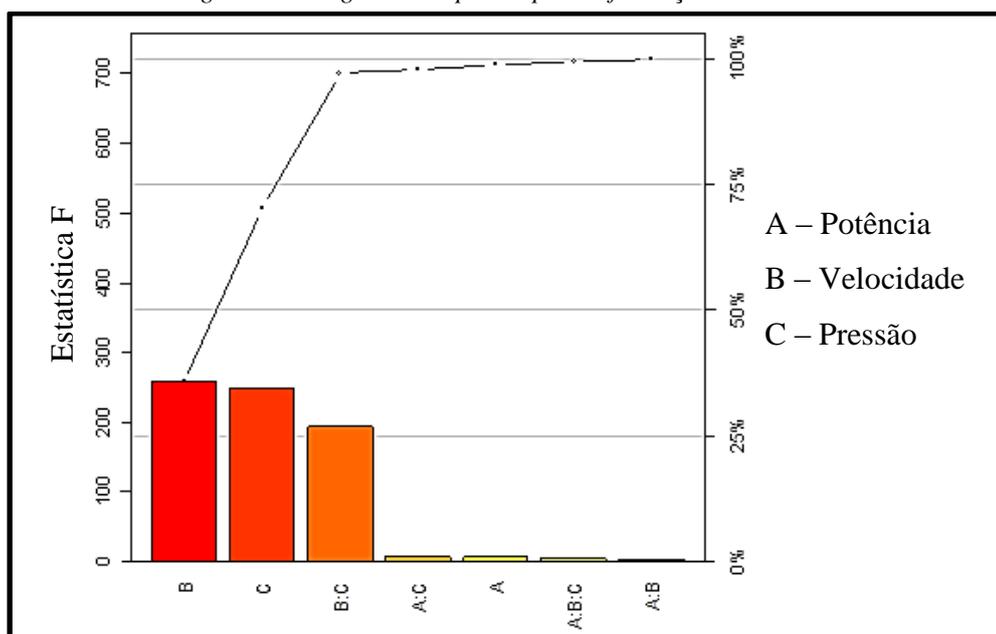
Tabela 9 - Análise de variância para a formação da rebarba

Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	0,025	0,025	6,187	0,024
B	1	1,068	1,068	258,160	0
C	1	1,030	1,030	249,065	0
A:B	1	0,011	0,011	2,785	0,114
A:C	1	0,025	0,025	6,187	0,024
B:C	1	0,797	0,797	192,777	0
A:B:C	1	0,020	0,020	4,961	0,040
Resíduos	16	0,066	0,004		

Fonte: O autor

Considerando que o valor P aceitável seja menor que 0,03 observamos que todos os efeitos principais e algumas interações influenciam a formação das rebarbas. Conforme a análise de variância (tabela 9) e o diagrama de pareto (figura 53), conclui-se que a velocidade de corte foi o parâmetro que mais influenciava a formação da rebarba seguida pela pressão do gás de assistência.

Figura 53- Diagrama de pareto para a formação da rebarba



Fonte: O autor

4.2 - Rugosidade

Fazendo-se uma avaliação das texturas da figura 50 foi possível afirmar que as amostras de número 5, 6, 7 e 8 apresentavam uma textura maior que as demais amostras. Também foi possível visualizar que as texturas se diferenciavam ao longo da seção transversal da peça, isto é, a textura próxima à borda superior é diferente da textura da região central e ambas são diferentes da textura próxima da borda inferior.

Com a intenção de identificar como a rugosidade se comporta com a variação dos parâmetros, foi realizada a medição da mesma em três pontos distintos em todas as amostras. As medições ocorreram a 1/3 da borda superior, na linha central e a 1/3 da borda inferior.

4.2.1 - Rugosidade média (Ra) a 1/3 da borda superior

Através do posicionamento do centro de usinagem e o auxílio do rugosímetro foi possível mensurar a rugosidade das amostras com exatidão. Os valores obtidos estão arranjados na tabela 10.

Através da tabela 10, verificasse que as medidas apresentavam uma constância entre as réplicas assim validando os corpos de prova. Através dos valores apresentados na mesma tabela foi plausível afirmar que as amostras 5 e 6 apresentavam as piores rugosidades, enquanto que as amostras 2 e 4 apresentavam as menores rugosidades.

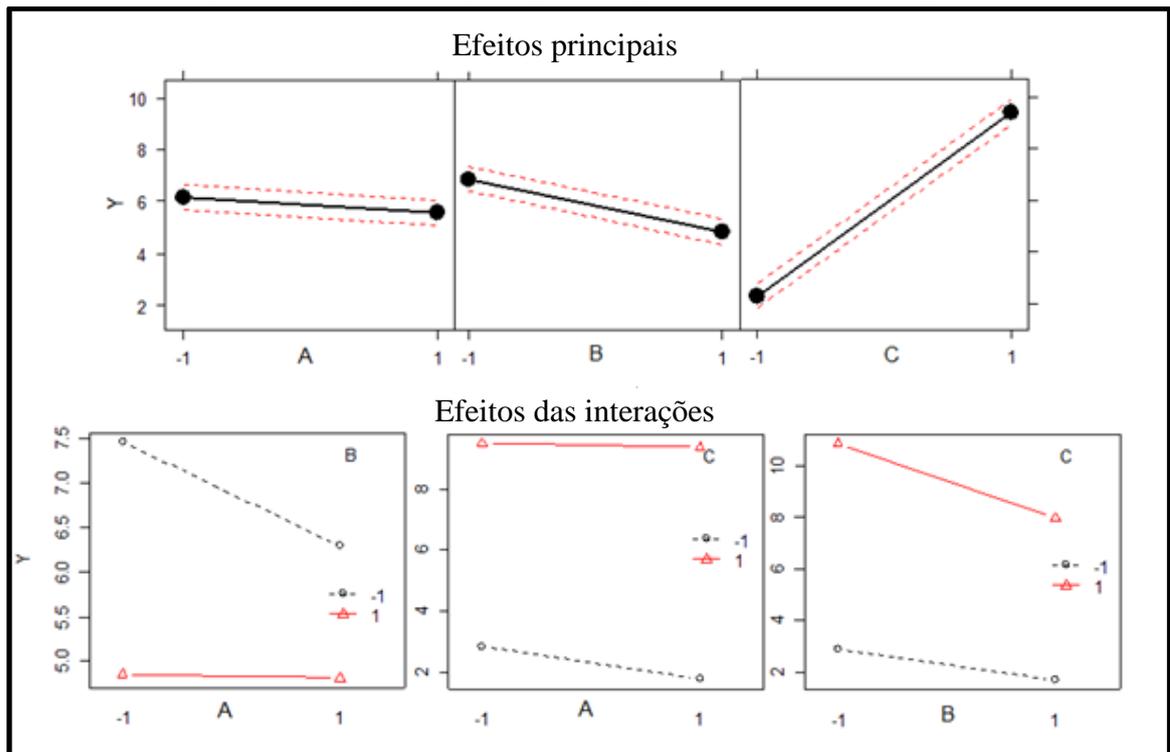
Tabela 10 - Valores das medidas das rugosidades a 1/3 da borda superior em μm .

Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	3,28	3,73	4,51
2	1,30	1,72	2,84
3	1,87	1,99	1,56
4	1,07	1,76	1,87
5	10,26	12,06	10,92
6	11,06	9,98	10,88
7	7,78	7,50	8,41
8	7,91	8,04	8,22

Fonte: O autor.

A seguir, na figura 54, foram apresentados os gráficos dos efeitos principais e suas interações calculadas através da tabela 10, onde foi possível verificar quais dos parâmetros interferiam mais na rugosidade da peça a 1/3 da borda superior.

Figura 54 - Gráficos dos efeitos para a rugosidade a 1/3 da borda superior



Fonte: O autor

Através da figura 54 foi possível verificar que os efeitos principais relacionados à velocidade de corte e principalmente a pressão de gás de assistência foram os mais significativos para o processo.

Como no trabalho realizado por Chen (1999) o efeito principal da pressão do gás de assistência quando elevado ao nível alto (+1) originava as piores rugosidades. Portanto, o inverso disto, quando a pressão do gás de assistência estivesse no nível baixo (-1) formavam-se as melhores rugosidades do processo. Conforme Almeida (2007), com pressões menores do gás de assistência diminui-se o consumo do mesmo, assim reduzindo o custo do processo de corte *laser*.

Analisando os efeitos das interações constata-se que houve um equilíbrio sobre as implicações geradas sobre o processo. O que foi possível afirmar é que quando trabalhada a potência de corte e a velocidade de corte no nível alto (+1) com a pressão do gás de assistência no nível baixo (-1) originam-se as melhores rugosidades do processo.

Para definir qual dos efeitos apresentados na figura 54 foi o mais importante para a rugosidade a 1/3 da borda superior, foi realizado o cálculo de análise de variância, conforme a tabela 11, onde o seu resultado foi apresentado através do diagrama de pareto exibido na figura 53.

Tabela 11 - Análise de variância para a rugosidade a 1/3 da borda superior

Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	2,172	2,172	6,523	0,021
B	1	25,133	25,133	75,481	0
C	1	304,736	304,73	915,204	0
A:B	1	1,892	1,892	5,684	0,029
A:C	1	1,278	1,278	3,840	0,067
B:C	1	4,200	4,200	12,613	0,002
A:B:C	1	0,410	0,410	1,233	0,283
Resíduos	16	5,327	0,332		

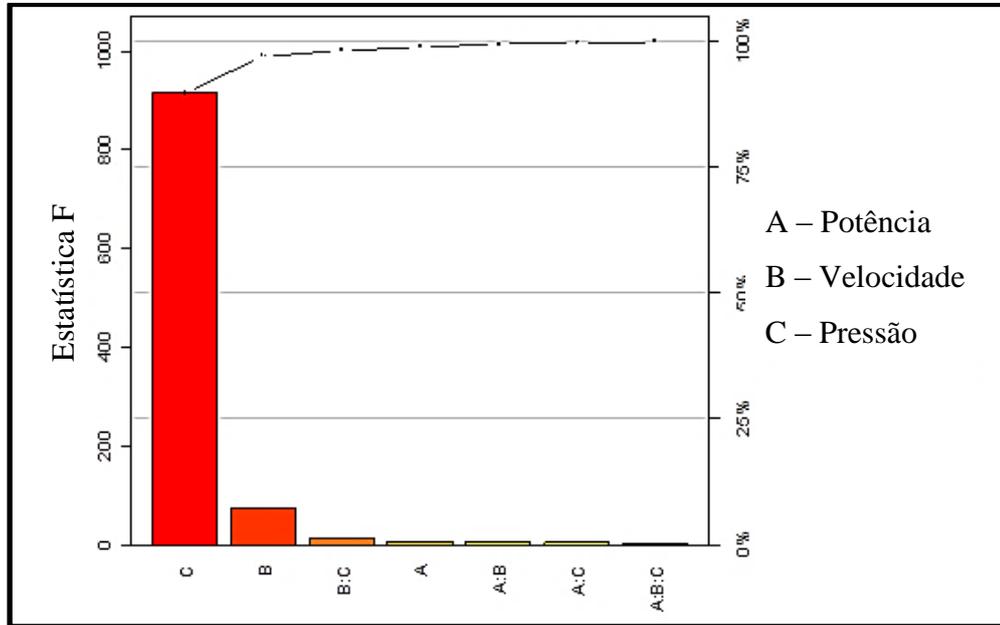
Fonte: O autor

Considerando que o valor P aceitável seja menor que 0,03 observamos que todos os efeitos principais e algumas interações influenciam a rugosidade. Segundo a análise de variância (tabela 11) e o diagrama de pareto (figura 55) averigua-se que a pressão do gás de assistência foi o principal fator que caracteriza a variação da rugosidade a 1/3 da face

superior.

A velocidade de corte foi o segundo parâmetro que mais influenciava a rugosidade, seguido da interação entre a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência.

Figura 55 - Diagrama pareto para a rugosidade a 1/3 da borda superior



Fonte: O autor

4.2.2 - Rugosidade média (Ra) na linha central

Para se obter os valores da rugosidade na linha central foram adotados os mesmos procedimentos que para a obtenção dos valores a 1/3 da borda superior. Na tabela 12 são apresentados os valores encontrados.

Tabela 12 - Valores das medidas das rugosidades médias na linha central em μm

Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	1,56	2,36	1,77
2	1,79	1,72	1,88
3	1,97	1,33	1,74
4	1,75	1,62	1,64
5	6,09	11,93	9,63
6	17,88	16,79	15,30
7	7,65	10,65	5,98
8	8,13	9,26	5,42

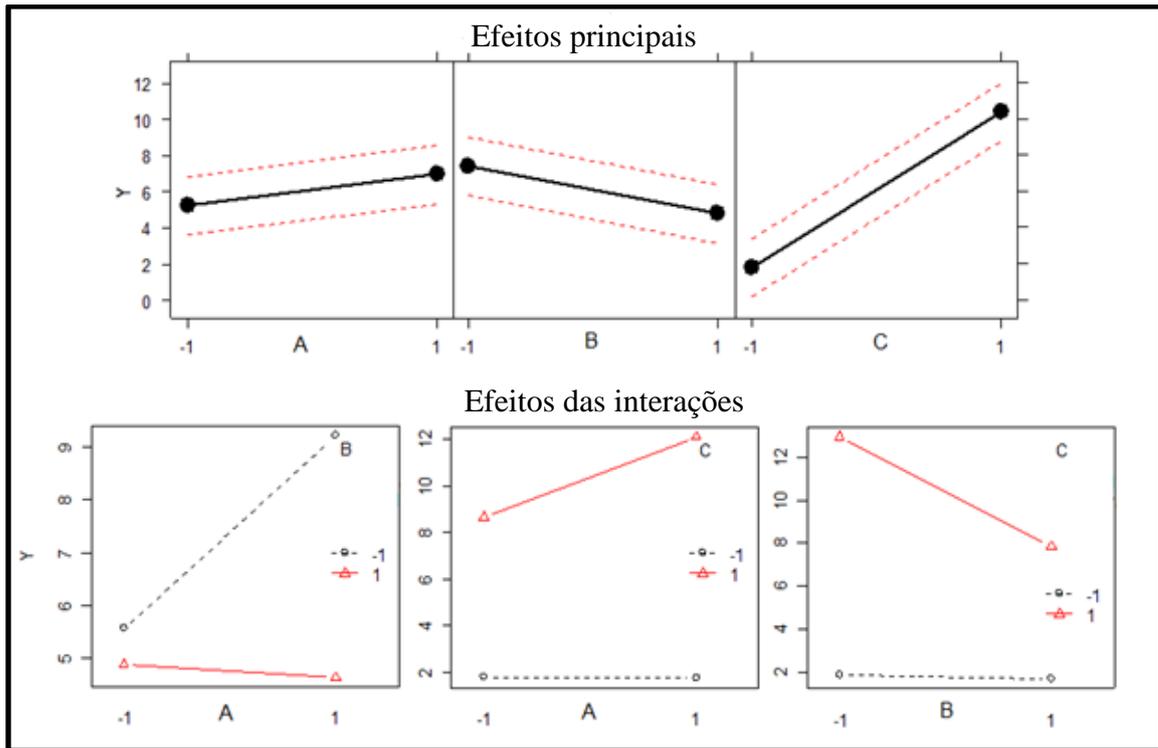
Fonte: O autor

Igualmente a rugosidade a 1/3 da borda superior, na linha central as amostras de

número 5 e 6 apresentavam as maiores rugosidades do processo. Para a posição central observa-se uma maior variação das rugosidades entre as réplicas.

A seguir, na figura 56, foram apresentados os gráficos dos efeitos principais e suas interações calculadas através das informações contidas na tabela 12, onde foi possível verificar quais dos parâmetros interferiam mais na rugosidade da peça na linha central.

Figura 56 - Gráficos dos efeitos para a rugosidade na linha central



Fonte: O autor

Para a linha central, a pressão do gás de assistência continuou sendo um dos principais fatores na formação das rugosidades elevadas. Como se observa na figura 56, a pressão do gás de assistência para o nível alto (+1) tem formado rugosidades maiores que todos os outros efeitos principais como também concluído por Chen (1999). Como segundo efeito principal, a velocidade de corte para o nível baixo (-1) ajudou na formação das rugosidades.

Verificando-se as interações da figura 56 observa-se que a pressão do gás de assistência para o nível alto (+1) e a velocidade de corte para o nível baixo (-1) apresentaram os maiores valores das rugosidades encontradas. Observa-se também que a interação da pressão do gás de assistência com a potência no nível alto (+1) reproduz rugosidades elevadas. Desta maneira foi possível dizer para este sistema que os três parâmetros estudados interagem entre si na linha central de medição da rugosidade.

Para definir qual dos efeitos apresentados na figura 56 foi o mais importante para a rugosidade na linha central, foi realizado o cálculo de análise de variância, conforme a tabela

13, onde o seu resultado foi apresentado através do diagrama de pareto exibido na figura 57.

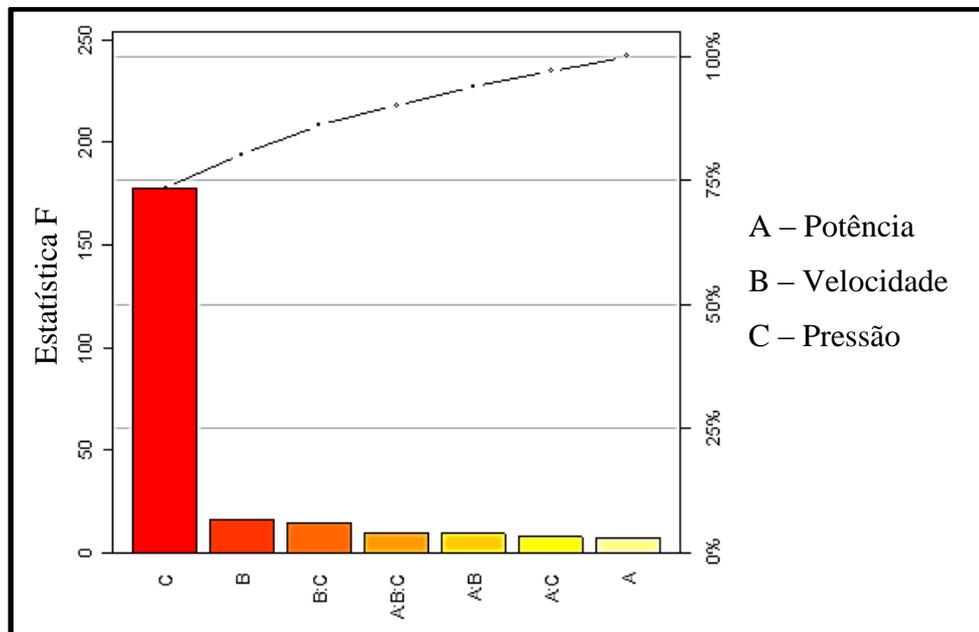
Tabela 13 - Análise de variância para a rugosidade na linha central

Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	17,544	17,544	6,977	0,017
B	1	41,501	41,501	16,506	0,001
C	1	447,034	447,034	177,795	0
A:B	1	23,049	23,049	9,167	0,008
A:C	1	18,691	18,691	7,433	0,014
B:C	1	36,260	36,260	14,421	0,001
A:B:C	1	24,120	24,120	9,593	0,006
Resíduos	16	40,229	2,514		

Fonte: O autor

Considerando que o valor P aceitável seja menor que 0,03 observamos que todos os efeitos influenciam a formação da rugosidade na linha central.

Figura 57 - Diagrama pareto para a rugosidade na linha central



Fonte: O autor

Através do diagrama de pareto, foi possível verificar que a pressão do gás de assistência continua sendo o fator predominante na formação da rugosidade, porém através da estatística foi possível perceber que este parâmetro perdeu intensidade em relação à medida realizada para a rugosidade a 1/3 da borda superior.

O fator velocidade de corte foi o segundo parâmetro que mais influenciava a

rugosidade seguida pela interação entre a pressão do gás de assistência e a própria velocidade de corte. Comparando-se as análises de variância da tabela 11 e da tabela 13 observa-se que as demais interações aumentaram a sua participação na formação da rugosidade na linha central. Devido a este fato, a interação de todos os parâmetros, ficou em quarto lugar conforme apresentado no diagrama de pareto na figura 57.

4.2.3 - Rugosidade média (Ra) a 1/3 da borda inferior

Na tabela 14 foram apresentados os valores obtidos através da medição das peças a 1/3 da borda inferior.

Tabela 14 - Valores das medidas das rugosidades médias a 1/3 da borda inferior em μm .

Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	2,81	1,80	2,04
2	2,00	1,70	2,07
3	1,98	2,98	2,98
4	13,16	6,84	12,66
5	3,85	11,46	7,74
6	11,66	8,94	10,40
7	14,06	14,06	10,50
8	6,44	6,44	4,86

Fonte: O autor

Diferentemente das rugosidades avaliadas anteriormente, onde as maiores rugosidades prevaleciam nas amostras 5 e 6, conforme a tabela 14, agora as amostras 4, 5, 6 e 7 apresentavam os maiores valores para as rugosidades medidas a 1/3 da borda inferior.

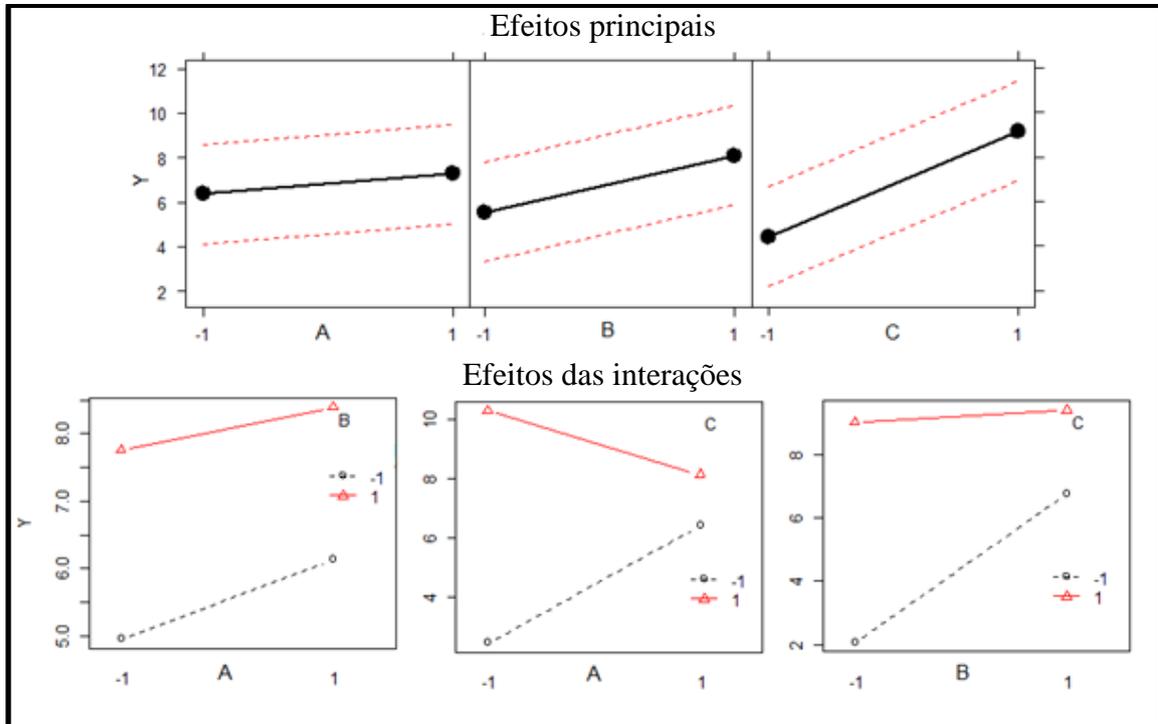
Esta região de medição da rugosidade estava localizada muito próxima à borda inferior onde se formavam as rebarbas oriundas do processo de corte a *laser*. Esta pode ser uma das razões que fez com que a rugosidade fosse maior nesta região na grande maioria das amostras.

As amostras 1 e 2 foram as que tiveram as menores rugosidades em todas as regiões mensuradas. Os parâmetros utilizados para o corte destas amostras foram os que mais se aproximavam da tabela tecnológica que o equipamento de corte *laser* carregava em sua memória para este tipo de material. Portanto, os dados fornecidos pelo fabricante parecem ser coerentes para as aplicações utilizadas na indústria.

A seguir, na figura 58, os gráficos dos efeitos principais e suas interações foram

calculados através da tabela 14, onde verifica-se quais parâmetros interferiam mais na rugosidade da peça a 1/3 da borda inferior.

Figura 58 - Gráficos dos efeitos para a rugosidade a 1/3 da borda inferior



Fonte: O autor

Analisando a figura 58, a pressão do gás de assistência continua sendo o parâmetro mais influente na formação da rugosidade, principalmente no seu nível alto (+1) como nas pesquisas realizadas por Chen (1999). Os demais parâmetros apareciam com uma maior intensidade neste local de medição.

Ponderando a figura 58, observa-se um comportamento bem diferente das regiões estudadas anteriormente quanto aos efeitos das interações. Devido a todos os gráficos das interações terem linhas com uma inclinação acentuada é possível dizer que a interação entre os parâmetros foi significativa para o processo.

Para as interações, a variável resposta, entre a potência de corte no nível baixo (-1) e a pressão do gás de assistência para o nível alto (+1) foi a mais significativa para o processo, chegando a um valor superior a 10 μm . A menor rugosidade ocorreu quando combinada a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência no nível baixo (-1).

Para definir qual dos efeitos apresentados na figura 58 foi o mais importante para a rugosidade a 1/3 da borda inferior, foi realizado o cálculo de análise de variância, conforme a tabela 15, onde o seu resultado foi apresentado através do diagrama de pareto exibido na figura 59.

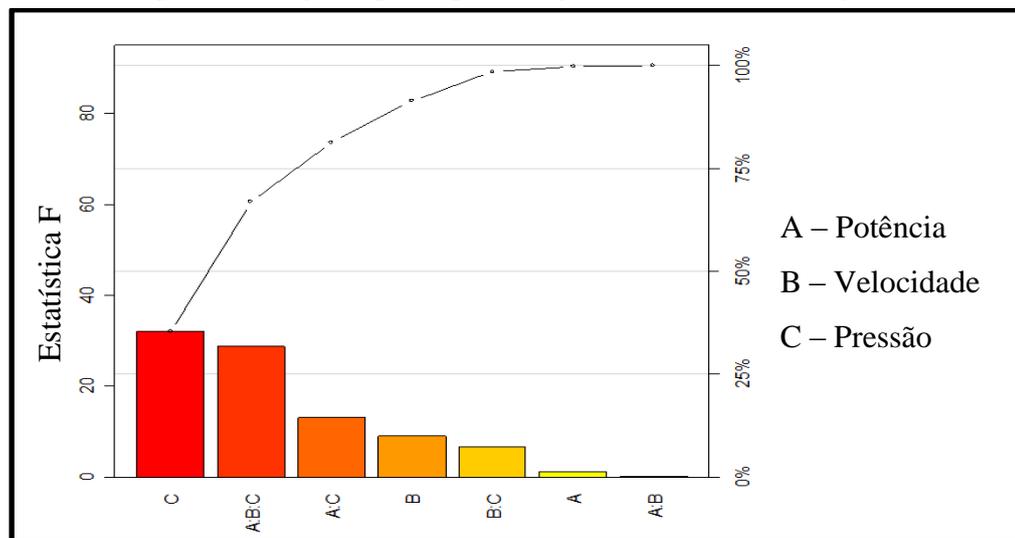
Tabela 15 - Análise de variância para a rugosidade a 1/3 da borda inferior

Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	4,959	4,959	1,153	0,298
B	1	38,735	38,735	9,012	0,008
C	1	137,233	137,233	31,929	0
A:B	1	0,434	0,434	0,101	0,754
A:C	1	56,334	56,334	13,107	0,002
B:C	1	27,885	27,885	6,488	0,021
A:B:C	1	123,442	123,442	28,720	0,001
Resíduos	16	68,769	4,298		

Fonte: O autor

Para um valor P aceitável menor que 0,03 observamos que a potência de corte e a interação entre a potência e a velocidade de corte não influenciam a rugosidade nesta região. Todos os demais efeitos atuam sobre o resultado da rugosidade a 1/3 da borda inferior.

Figura 59 - Diagrama pareto para a rugosidade a 1/3 da borda inferior



Fonte: O autor

O diagrama de pareto da figura 59 exhibe a pressão do gás de assistência como o principal parâmetro responsável pela formação da rugosidade na superfície das amostras. Para esta região estudada, observa-se também, que a interação entre os três parâmetros foi significativa para os resultados obtidos da rugosidade, ficando a mesma em segundo lugar.

4.2.4 - Avaliação geral da rugosidade

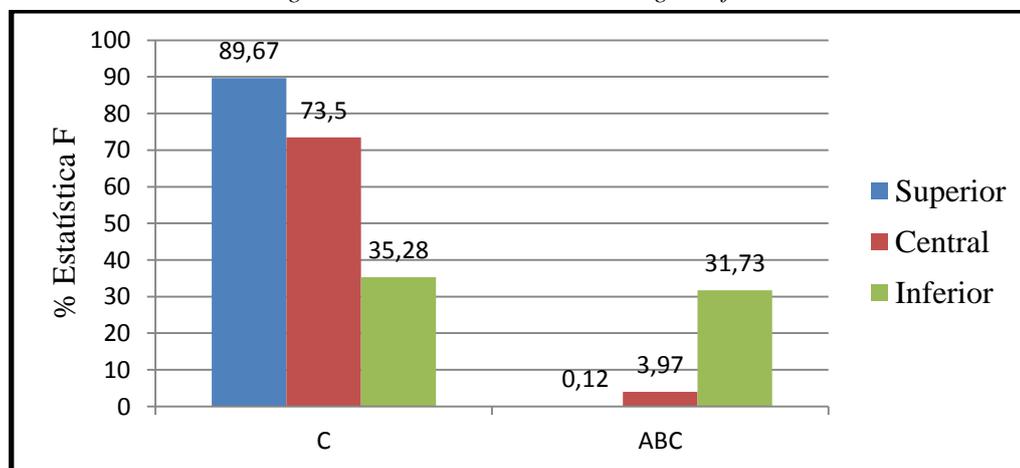
Em todas as avaliações realizadas, a pressão do gás de assistência foi o fator que mais

afetou a rugosidade superficial da borda cortada a *laser* equiparando-se aos resultados encontrados por Chen, Yao e Modi (2001). Como na conclusão de Chen, Yao e Modi (2001), a pressão do gás de assistência no nível alto (+1), tanto no efeito principal ou nas interações, foi o causador principal das rugosidades do sistema estudado. Nesta condição de pressão, além do aumento da rugosidade superficial, o consumo do gás de assistência é maior, assim aumentando o custo de fabricação nas indústrias.

Assim como Prajapati, Patel e Khatri (2013), com base na análise dos efeitos principais, foi verificado que a pressão do gás de assistência para o nível menor (-1) obtêm as menores rugosidades. A pressão do gás quando trabalhada neste nível juntamente com a velocidade de corte, como se verificou nas três posições, consegue-se qualidades superficiais ainda melhores do que quando trabalhado individualmente.

Através dos diagramas de pareto foi possível perceber que a pressão do gás de assistência, quanto mais distante da aresta superior, menor é o seu efeito sobre a qualidade superficial. Contrariamente a esta análise, a interação entre os três parâmetros ganha força, pois quanto mais próximo da aresta inferior, para se obter menores rugosidades será necessário fazer o ajuste destas três variáveis. A figura 60 apresenta graficamente esta análise.

Figura 60 - Resumo estatístico de alguns efeitos



Fonte: O autor

A explicação para este fato ocorrer, está baseada no fluxo do gás de assistência ao longo da profundidade de corte. Próximo à borda superior, o processo terá um fluxo do gás de assistência constante e uniforme, diferentemente da região próxima à borda inferior do corte. Isto ocorre devido à dificuldade do gás de assistência chegar a esta região. Como na região inferior o gás de assistência diminuiu a sua influência sobre a rugosidade, se faz necessário a regulagem dos outros parâmetros que formam a interação estudada.

4.3 - Perpendicularismo do corte

Nesta etapa foram mensurados os ângulos superiores e inferiores das amostras obtidas para a pesquisa conforme apresentados na tabela 16. É importante ressaltar que os arredondamentos das arestas foram ignorados durante a realização das medições.

Tabela 16 - Valores das medidas dos ângulos em graus

Amostras	Ângulos superiores			Ângulos inferiores		
	I	II	III	I	II	III
1	91,13	91,35	91,57	90,10	89,24	89,83
2	90,99	91,20	88,94	90,37	89,65	89,39
3	91,61	86,88	90,46	90,28	91,32	90,00
4	90,79	88,97	91,11	90,65	91,25	89,43
5	90,31	90,91	92,22	91,64	90,26	93,49
6	90,44	90,15	90,33	91,12	90,09	89,97
7	89,05	90,10	89,36	91,80	90,16	90,85
8	89,82	89,75	89,34	89,34	89,72	89,94

Fonte: O autor

Fazendo uma avaliação somente nos números absolutos da tabela 16 não foi possível fazer uma avaliação sobre qual amostra está próxima ao perpendicularismo desejado ou qual parâmetro tem maior influência sobre o perpendicularismo. A impossibilidade de chegar a esta conclusão foi devido às medidas serem muito semelhantes entre todas as amostras. Para a determinação de qual parâmetro foi o mais importante para o perpendicularismo fez-se necessário realizar o cálculo de análise de variância conforme demonstrado nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Análise de variância para o ângulo superior

Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	0,407	0,407	0,314	0,582
B	1	6,305	6,305	4,871	0,042
C	1	0,429	0,429	0,332	0,572
A:B	1	2,511	2,511	1,940	0,182
A:C	1	0,052	0,052	0,040	0,842
B:C	1	0,105	0,105	0,081	0,779
A:B:C	1	0,153	0,153	0,118	0,734
Resíduos	16	20,712	1,294		

Fonte: O autor

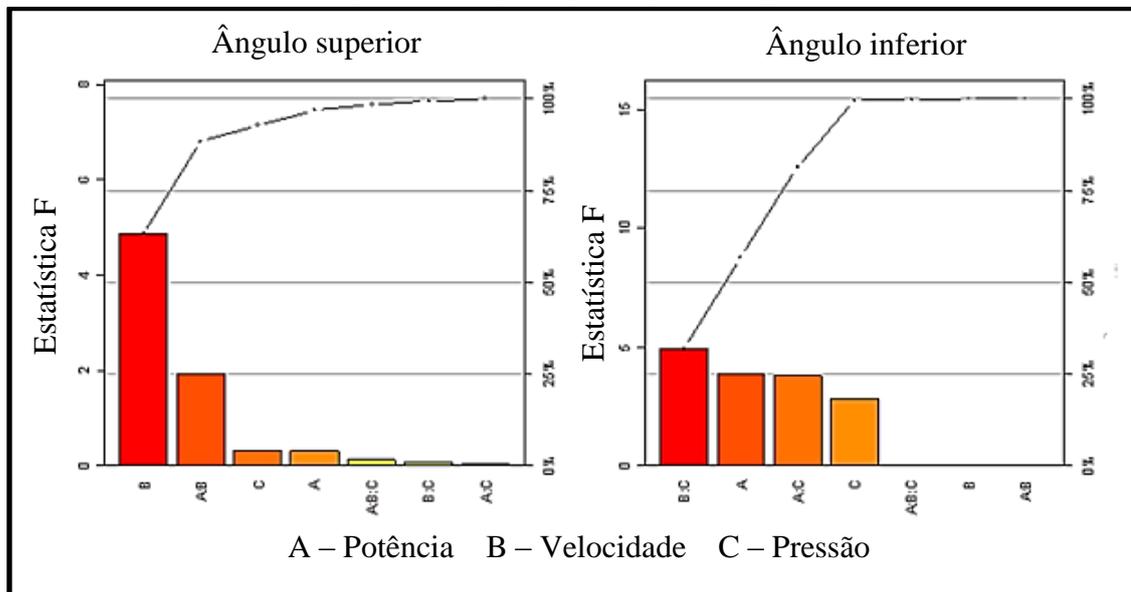
Tabela 18 - Análise de variância para o ângulo inferior

Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	2,702	2,702	3,869	0,066
B	1	0,006	0,006	0,009	0,924
C	1	1,963	1,963	2,812	0,11
A:B	1	0,001	0,001	0,001	0,984
A:C	1	2,659	2,659	3,808	0,068
B:C	1	3,445	3,445	4,933	0,041
A:B:C	1	0,033	0,033	0,047	0,830
Resíduos	16	11,173	0,698		

Fonte: O autor

Conforme a tabela 17 e 18 é possível observar que nenhum valor P ficou menor que 0,03 que é o indicador aceitável definido para esta pesquisa. Analisando os resultados apresentados por Wandera (2006), é possível observar que o resultado da análise de variância é similar ao apresentado pelo mesmo. Portanto, para o perpendicularismo será trabalhado com um valor P de 0,05. Desta maneira, seguindo a análise, na figura 61 são apresentados os diagramas de pareto referente aos valores calculados.

Figura 61 - Diagrama pareto para os ângulos



Fonte: O autor

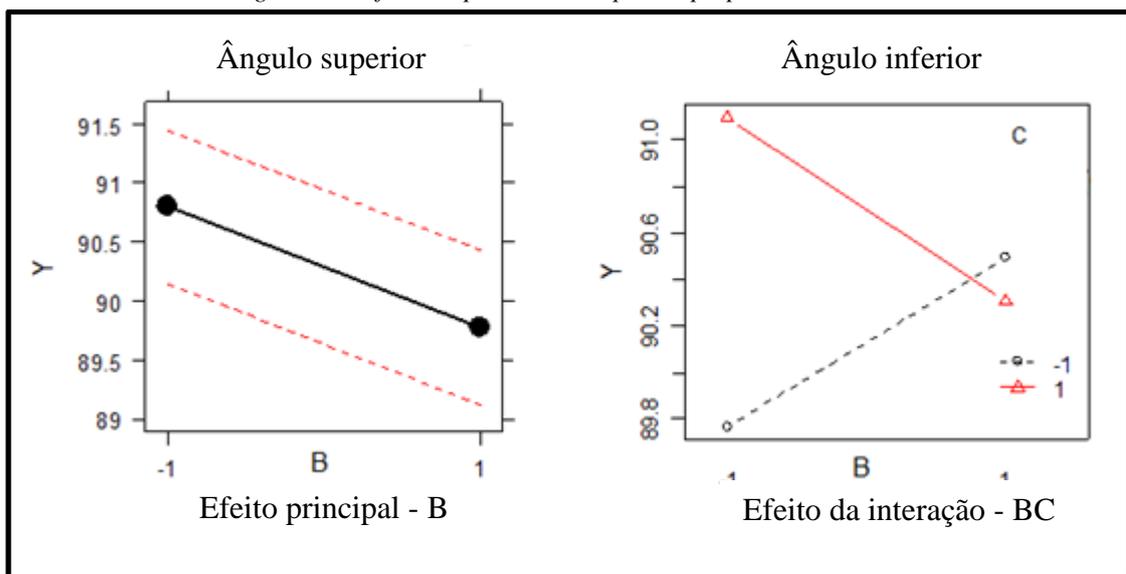
Conforme a figura 61, os efeitos principais e as interações que influenciavam o processo, não são os mesmos para as duas posições mensuradas. Diferentemente das avaliações da rugosidade e das rebarbas a pressão do gás de assistência não foi o principal

efeito que fez com que o perpendicularismo tivesse uma variação entre as amostras.

Como está se avaliando o perpendicularismo, isto é, o ângulo de 90° entre as faces da chapa e o corte gerado pelo *laser*, os níveis baixo (-1) e alto (+1) de cada parâmetro não indicaram qual deles trariam o melhor resultado da medida para o processo. Isto é possível ser observado na figura 62 para o ângulo superior, onde no nível baixo (-1) a variável resultante apresenta como resposta foi um ângulo maior que 90° e para o nível alto (+1) a variável resultante nos trás um ângulo menor que 90° . Isto quer dizer que o valor ideal para este parâmetro está entre os dois níveis.

Semelhante aos resultados apresentados por Wandera (2006), para o ângulo superior a velocidade de corte foi o parâmetro que gerou a maior variação do ângulo medido e para o ângulo inferior o mais representativo foi à interação entre a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência.

Figura 62 - Efeitos representativos para a perpendicularidade



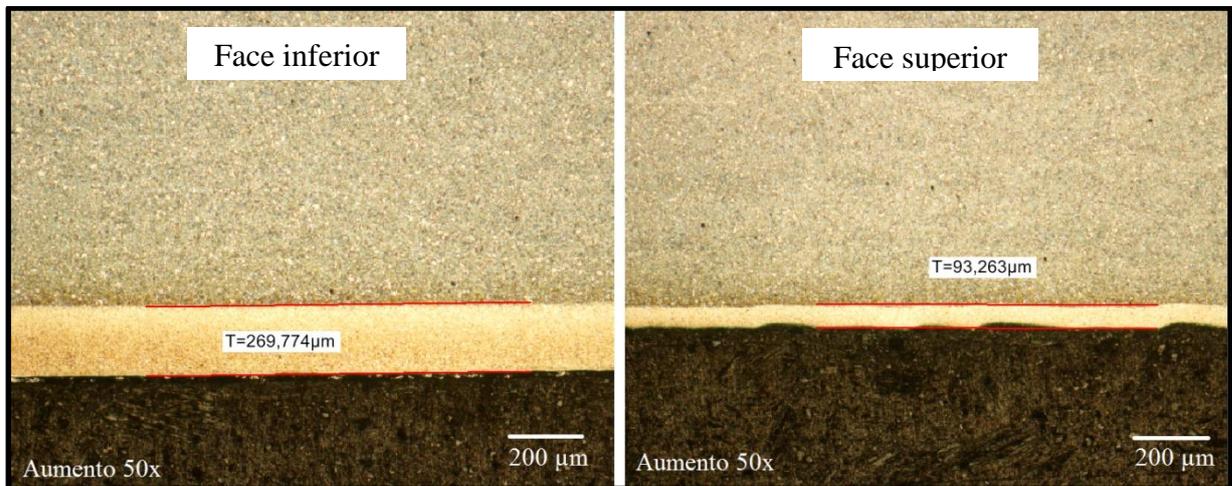
Fonte: O autor

4.4 - Zona termicamente afetada

A zona termicamente afetada aumenta ao longo da espessura do material, isto é, na face superior ela foi menor do que na face inferior conforme demonstrado na figura 63. Este fato ocorre porque o fluxo do gás de assistência encontra primeiramente a face superior e desta maneira ajuda a resfriar por convecção forçada a zona aquecida pelo *laser* assim diminuindo a largura da zona termicamente afetada (GHANY; NEWISHY, 2005 e XIAO, 2007). Na face inferior o gás de assistência não consegue chegar com a mesma eficiência, desta forma, gerando um aquecimento maior da região, fazendo com que a zona termicamente

afetada fique mais espessa.

Figura 63 - Zona termicamente afetada



Fonte: O autor

4.4.1 - Avaliação da zona termicamente afetada na face superior

Através dos corpos de provas embutidos e com o auxílio de um microscópio ótico juntamente com o *software Eclipse Net* foi possível mensurar a zona termicamente afetada das amostras com exatidão. Os valores obtidos na face superior estão arranjados na tabela 19.

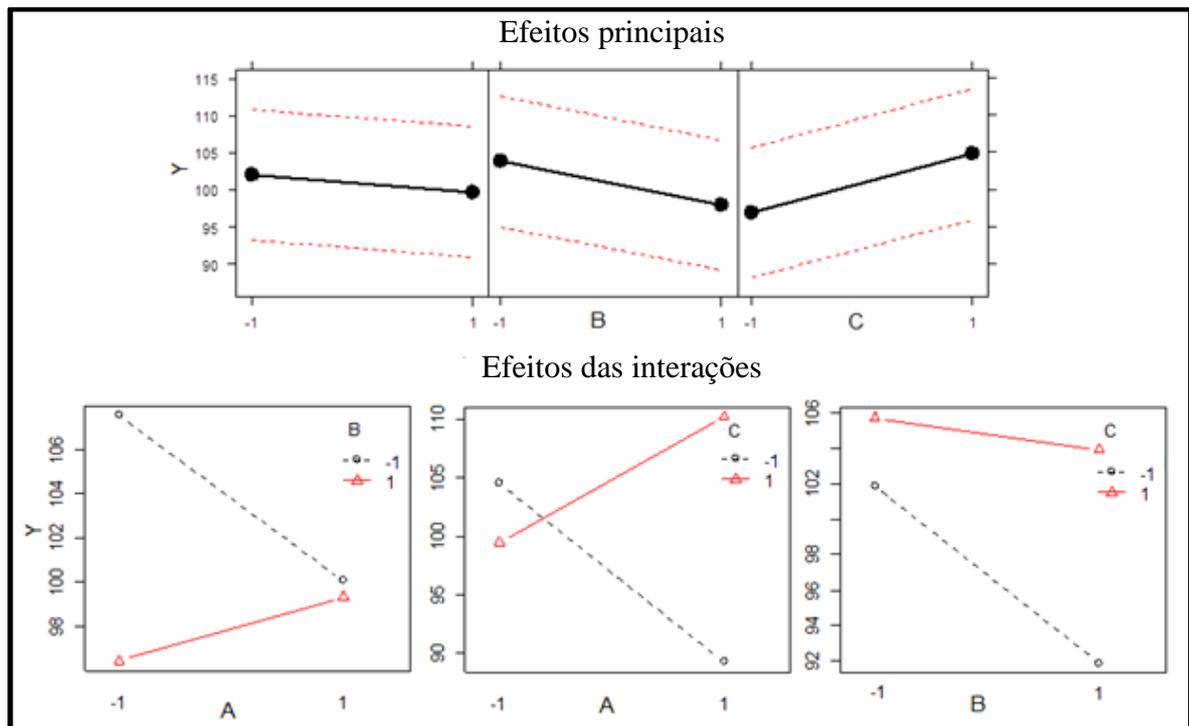
Tabela 19 - Valores das medidas da ZTA na face superior em μm

Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	115,72	116,73	112,09
2	93,26	91,60	81,87
3	82,31	104,74	95,58
4	86,59	97,05	84,78
5	86,35	94,41	119,88
6	97,25	131,25	105,23
7	94,55	123,15	78,31
8	115,55	110,49	101,49

Fonte: O autor

Os valores obtidos mostraram que existe uma variação da zona termicamente afetada entre as amostras, mas não foi possível chegar a uma conclusão somente através da observação dos números absolutos. Desta maneira, os valores da tabela 19 foram usados para a realização dos cálculos dos efeitos principais e suas interações (figura 64) que mostrou qual dos parâmetros tem maior influência sobre a zona termicamente afetada.

Figura 64 - Gráficos dos efeitos para a ZTA na face superior



Fonte: O autor

Analisando a figura 64, observa-se que foi nas interações onde se conseguiu tirar as melhores conclusões sobre o que ocorre no processo de corte a laser na face superior em relação à zona termicamente afetada. As maiores e as menores camadas ocorreram para interação entre a potência de corte e a pressão do gás de assistência. A maior zona termicamente afetada ocorreram quando a potência de corte e a pressão do gás de assistência estavam no nível mais alto (+1), porque foi nesta condição que o *laser* conseguiu ser mais intenso.

Logo, para uma zona termicamente afetada menor, é necessário ter a potência de corte no nível alto (+1) e a pressão do gás de assistência no nível baixo (-1). A alta intensidade fez com que o material aquecesse rapidamente, fazendo com que o calor tivesse pouco tempo disponível para se dissipar na região do corte, assim gerando uma zona termicamente afetada de pequenas dimensões. Os estudos realizados por Berkmanns e Faerber (2008) e Wandera (2006) chegaram à mesma conclusão.

Para definir qual dos efeitos apresentados na figura 64 foi o mais importante, o cálculo de análise de variância teve que ser realizado conforme a tabela 20, onde o seu resultado foi apresentado através do diagrama de pareto exibido na figura 65.

Tabela 20 - Análise de variância da ZTA na face superior

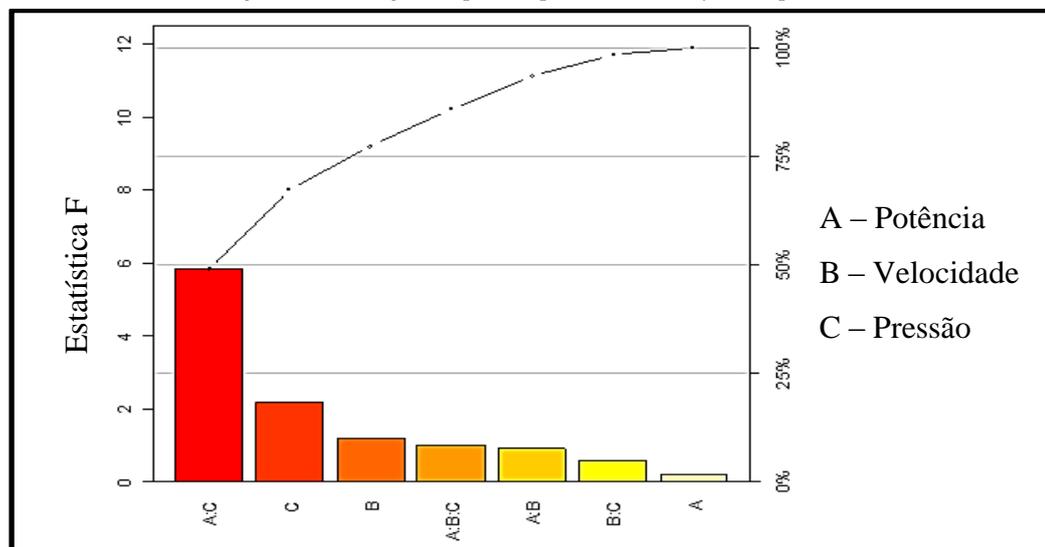
Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	31,277	31,277	0,178	0,678
B	1	210,290	210,290	1,198	0,289
C	1	380,742	380,742	2,170	0,160
A:B	1	160,280	160,280	0,913	0,353
A:C	1	1022,076	1022,076	5,826	0,028
B:C	1	101,615	101,615	0,579	0,457
A:B:C	1	176,974	176,974	1,008	0,330
Resíduos	16	2806,562	175,410		

Fonte: O autor

Conforme definido na metodologia, o valor P aceitável deverá ser menor que 0,03. Portanto, como observado na tabela 20 somente a interação entre a potência e a pressão do gás de assistência se enquadram nesta definição.

A respeito dos demais efeitos, devido ao valor P ficar elevado, não é possível concluir nada sobre os mesmos. Na figura 65 é apresentado o diagrama de pareto referente à análise de variância da tabela 20

Figura 65 - Diagrama pareto para a ZTA na face superior



Fonte: O autor

4.4.2 - Avaliação da zona termicamente afetada na face inferior

Para se obter os valores da zona termicamente afetada na face inferior foram adotados os mesmos procedimentos que para a obtenção dos valores na face superior. Na tabela 21 foram apresentados os valores encontrados.

Tabela 21 - Valores das medidas da ZTA na face inferior em μm .

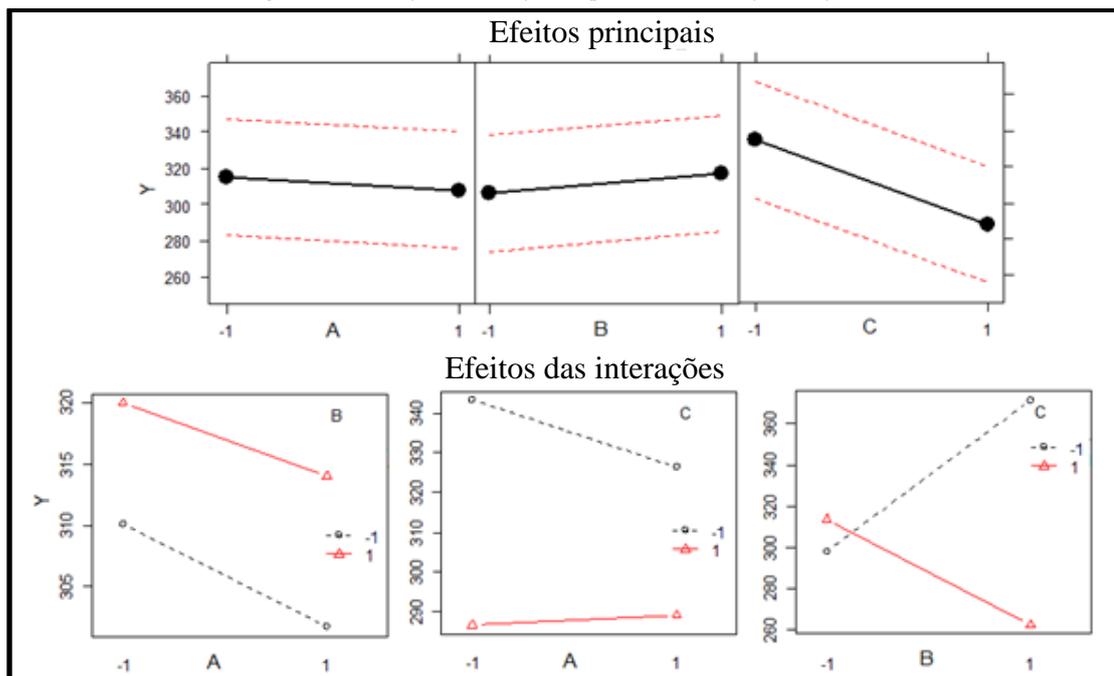
Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	314,23	315,49	308,30
2	269,77	300,81	280,64
3	449,66	264,05	407,97
4	421,46	288,26	396,96
5	311,05	284,34	327,08
6	300,30	320,87	337,58
7	270,89	270,26	257,29
8	238,80	288,47	249,90

Fonte: O autor

Através da análise das tabelas 19 e 21 observa-se que a zona termicamente afetada na face inferior foi maior que a da face superior. Na face inferior a zona termicamente afetada sofre um aquecimento maior devido ao gás de assistência não ter uma atuação tão efetiva quanto na face superior.

Os valores mensurados mostraram que houve uma mudança da zona termicamente afetada entre as amostras, mas não foi possível chegar a uma conclusão somente através da observação dos números absolutos. Desta maneira, os valores da tabela 21 foram usados para a realização dos cálculos dos efeitos principais e suas interações conforme a figura 66.

Figura 66 - Gráficos dos efeitos para a ZTA na face inferior



Fonte: O autor

Entre os efeitos principais, a pressão do gás de assistência foi a mais significativa para o processo. Observa-se que para o nível baixo (-1) a zona termicamente afetada teve as maiores dimensões mensuradas e quando avaliado o nível alto (+1) ela reduzia consideravelmente. Como comentado anteriormente, esta foi uma região aonde o gás de assistência não chegava com tanta eficiência, por isso ocorreu um aquecimento maior do material fazendo com que a camada termicamente afetada ficasse maior. Quando aumentada a pressão do gás, o processo de resfriamento da região melhora, fazendo com que ocorra uma diminuição da zona termicamente afetada.

Quanto às interações, a velocidade de corte juntamente com a pressão do gás de assistência foi a mais significativa. As menores camadas mensuradas foram geradas quando a velocidade de corte e o gás de assistência utilizavam o nível alto (+1). Isto foi possível porque quando cortado o material rapidamente consegue-se diminuir o aquecimento da região. Juntando o corte mais rápido com uma pressão maior do gás consegue-se melhorar o processo de resfriamento da peça obtendo-se as menores camadas afetadas para o sistema.

Contrariamente a situação avaliada antes, para a velocidade de corte no nível alto (+1) e para a pressão do gás de assistência para o nível mais baixo (-1) compreende-se as maiores zonas afetadas termicamente. Esta situação ocorre porque a pressão do gás de assistência para esta velocidade não foi o suficiente para expulsar o material fundido da fenda de corte, que se solidifica na aresta inferior gerando uma zona termicamente afetada maior.

Para definir qual dos efeitos apresentados na figura 66 foi mais significativo, fez-se necessário realizar o cálculo de análise de variância, conforme a tabela 22.

Tabela 22 - Análise de variância da ZTA na face inferior.

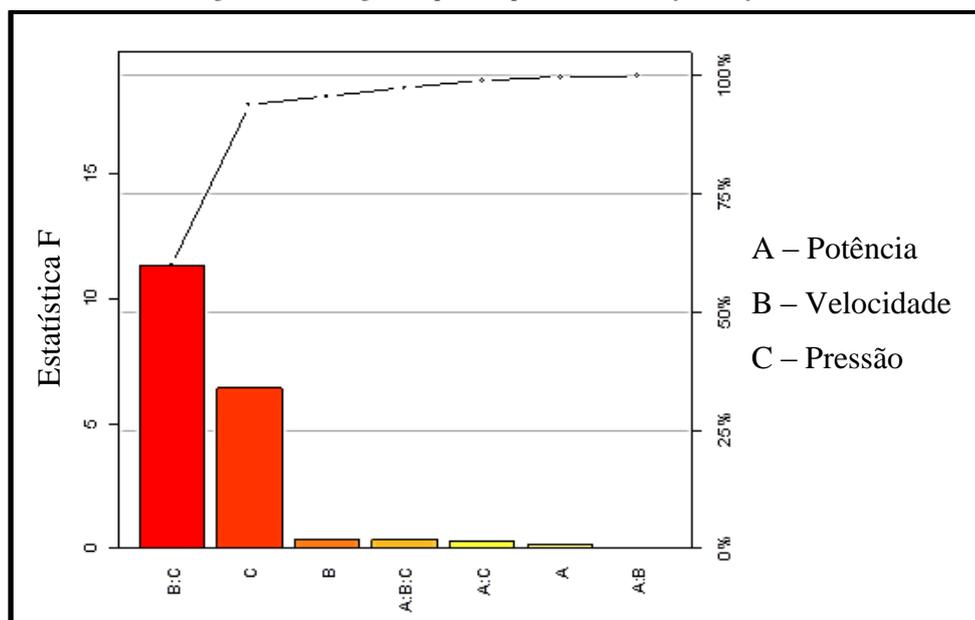
Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	313,724	313,724	0,153	0,700
B	1	743,038	743,038	0,364	0,554
C	1	13103,746	13103,746	6,420	0,022
A:B	1	8,444	8,444	0,004	0,949
A:C	1	568,446	568,446	0,278	0,604
B:C	1	23109,282	23109,282	11,323	0,003
A:B:C	1	697,013	697,013	0,341	0,567
Resíduos	16	32652,652	2040,790		

Fonte: O autor

Conforme definido na metodologia, o valor P aceitável deverá ser menor que 0,03. Portanto, como observado na tabela 22 somente a interação entre a velocidade de corte com a pressão do gás de assistência seguido do efeito principal do gás de assistência se enquadram nesta definição.

Para os demais efeitos, devido ao valor P ficar elevado, não é possível tirar conclusões sobre os mesmos. Na figura 67 é apresentado o diagrama de pareto referente à análise de variância da tabela 22.

Figura 67 - Diagrama pareto para a ZTA na face inferior



Fonte: O autor

4.5 - Microestrutura

Quando o aço foi cortado através pelo feixe *laser*, uma zona termicamente afetada formou-se ao longo do corte. Na figura 68 é apresentada uma micrografia típica da seção transversal da região submetida a este processo. Nota-se claramente na figura 68 a zona termicamente afetada e o material base.

Em conformidade com a pesquisa realizada por Berreta (1995) a zona termicamente afetada é uma região branca, uniforme, caracterizada pela presença de uma martensita extremamente fina, com dureza na faixa de 700 HV. A martensita formada nesta zona originou-se devido ao resfriamento rápido.

Berreta (1995) também encontrou resultados semelhantes sobre a região de transição da zona termicamente afetada e o material base que são caracterizadas pela presença de ferrita, perlita e martensita. Nesta região de transição, a dureza do material decresce gradualmente do valor de aproximadamente 700 HV para o valor da dureza do material de

250 HV. Ao final, encontra-se o material base cuja microestrutura se caracteriza basicamente pela presença da ferrita e perlita.

Figura 68 - Micrografia da região transversal



Fonte: O autor

De acordo com Berreta (1995) as transformações ocorridas na microestrutura do material cortado a *laser* ocorrem devido à distribuição da temperatura no espaço versus o tempo, que ocorre após a incidência do feixe. Analisando sobre este aspecto, o estudo experimental evidenciou que o gradiente de temperatura e as taxas de aquecimento e resfriamento do material são fortemente afetadas pelos parâmetros de corte.

Devido às elevadas taxas de aquecimento e resfriamento desta região do material, que provocaram notáveis transformações de fase com grandes mudanças da microestrutura, é possível que existam inúmeras discordâncias, devido às ondas de tensão associadas ao ciclo térmico.

4.6 - Dureza

4.6.1 - Análise da dureza em um ponto isolado

Nas seções transversais foram feitas medidas de dureza para se verificar a variação desta e investigar a influência dos parâmetros do laser. Na tabela 23 são apresentados os valores da dureza mensurados na linha média em relação à espessura da peça e a 0,05mm de distância da borda.

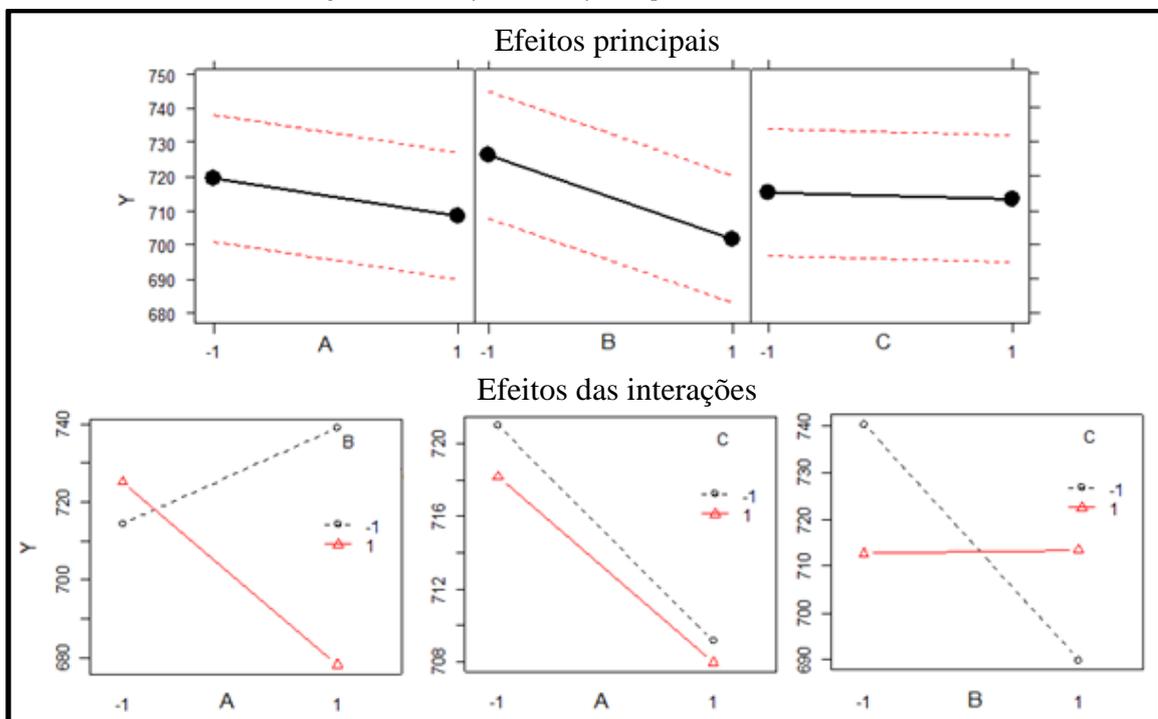
Tabela 23 - Valores da dureza a 0,05mm da borda em HV

Amostras	Réplicas		
	I	II	III
1	713	729	732
2	761	751	756
3	701	723	728
4	703	639	645
5	723	717	671
6	723	725	717
7	717	741	740
8	721	702	660

Fonte: O autor

Através da observação da tabela 23 verifica-se que a amostra número 2 e número 4 foram as que apresentaram as maiores e os menores valores da dureza mensurados, respectivamente. Para poder definir quais dos parâmetros foram os mais significativos para a avaliação da dureza, fez-se necessário calcular os efeitos principais e as suas interações que estão representadas na figura 69.

Figura 69 - Gráficos dos efeitos para a microdureza



Fonte: O autor

Avaliando os gráficos dos efeitos principais, observa-se que a velocidade de corte foi o principal parâmetro que influenciou a dureza da região estudada. A velocidade de corte quando programada com o nível alto (+1) gerava as menores durezas entre todos os efeitos principais. Isto ocorre porque quando o material é cortado com uma velocidade elevada absorve-se menos calor fazendo com que as durezas sejam menores.

Quanto às interações demonstradas na figura 69, devido as grandes inclinações das suas linhas, conclui-se que as mesmas foram muito importantes para o processo. As interações com maior oscilação da variável resposta “Y” foram entre a potência e a velocidade de corte e entre a velocidade de corte com a pressão do gás de assistência.

Analisando a interação entre potência e velocidade, observa-se que a dureza obteve a sua menor medida quando ambos os parâmetros estavam no nível maior (+1), isto é, com a maior potência e a maior velocidade do planejamento fatorial. Para estas mesmas interações também foram atingidas durezas elevadas, quando utilizadas a potência de corte no nível alto (+1) e a velocidade de corte no nível baixo (-1). Através destas análises, conclui-se que a potência quando no nível alto (+1) gerava mais calor na fenda de corte, mas os efeitos deste calor foram amenizados quando a velocidade de corte com que o material era cortado foi aumentada.

Para a interação entre velocidade e pressão foram obtidos resultados diferentes de dureza quando utilizada a pressão do gás de assistência no nível baixo (-1). Esta pressão quando combinada com a velocidade no nível baixo (-1) geravam durezas elevadas e quando associadas à velocidade no nível alto (+1) determinavam menores durezas. Isto foi possível porque na velocidade menor a região aquecida ficou mais tempo em contato com o gás de assistência fazendo com que a temperatura tivesse uma variação maior em um determinado tempo elevando a dureza da região. E para uma maior velocidade, a pressão do gás de assistência no nível menor (-1) teve sua atuação diminuída no resfriamento ocasionando menores durezas.

Para determinar qual dos efeitos principais e as suas interações foram os mais significativos para a dureza, foi realizado os cálculos da análise de variância conforme tabela 24.

Tabela 24 - Análise de variância para a dureza

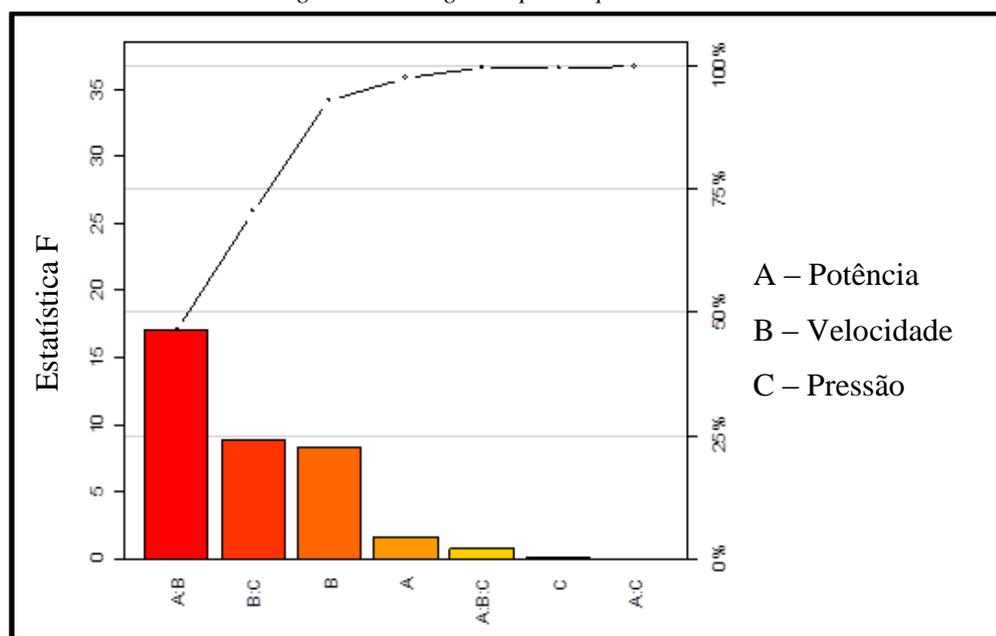
Efeitos	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	Valor P
A	1	726,000	726,000	1,626	0,220
B	1	3700,166	3700,166	8,290	0,010
C	1	24,000	24,000	0,053	0,819
A:B	1	7632,666	7632,666	17,102	0,001
A:C	1	4,166	4,166	0,009	0,924
B:C	1	3952,666	3952,666	8,856	0,008
A:B:C	1	337,500	337,500	0,756	0,397
Resíduos	16	7140,666	446,291		

Fonte: O autor

Segundo a análise de variância (tabela 24) três dos efeitos ficaram com o valor P abaixo de 0,03. O efeito que mais afetou a dureza foi a interação entre a potência de corte e a velocidade de corte, seguido pela interação entre a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência e o efeito principal da velocidade de corte.

Para os demais efeitos, devido ao valor P ficar elevado, não é possível tirar conclusões sobre os mesmos. Na figura 70 é apresentado o diagrama de pareto referente à análise de variância da tabela 24.

Figura 70 - Diagrama pareto para a dureza

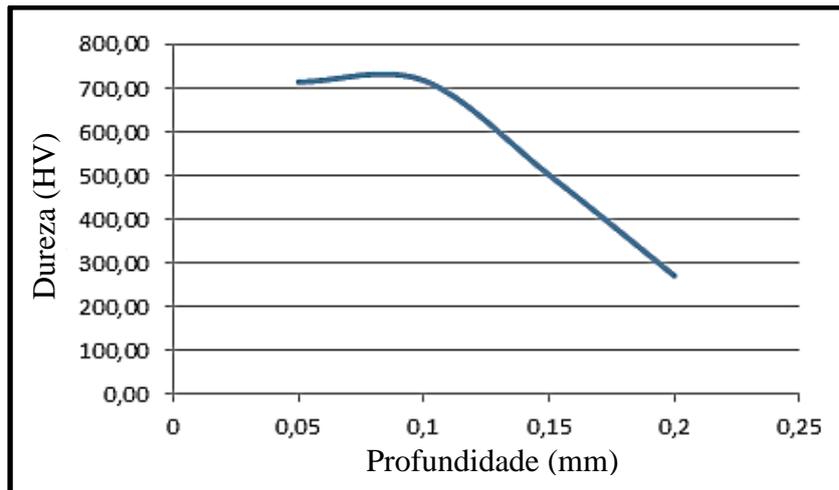


Fonte: O autor

4.6.1 - Análise da dureza em função da profundidade

A análise da dureza em função da profundidade foi realizada na linha média em relação à espessura da peça, onde os resultados encontrados foram similares aos encontrados por Berreta (1995). O apêndice “A” apresenta as medidas utilizadas para a geração do gráfico da figura 71.

Figura 71 - Gráfico da dureza em função da profundidade



Fonte: O autor

A dureza utilizada para a geração do gráfico da figura 71 foi uma média de todas as medidas realizadas dos valores mensurados para cada profundidade.

Através da figura 71, nota-se que o resultado da dureza obtido em função da profundidade atinge o valor médio de 714 HV nas proximidades da superfície até a profundidade de 0,1 mm. Após, os valores da dureza caem rapidamente em função da profundidade, onde a uma distância de 0,2 mm da face os valores da dureza encontrados já são os do material base.

Desta maneira, desde o início da face até a medida de 0,1 mm encontra-se uma região totalmente modificada pelo processo do corte a laser. Após, entre 0,1 mm e 0,2 mm localiza-se uma zona de transição. Em medidas superiores a 0,2mm não ocorreram modificações na dureza do material.

5 - CONCLUSÃO

A partir do estudo conduzido e dos resultados obtidos nesta dissertação, podem ser apontadas as conclusões apresentadas a seguir.

Para a diminuição da rebarba durante o processo de corte laser deve-se primeiramente ser otimizado o parâmetro de velocidade de corte e após a pressão do gás de assistência. Ambos os parâmetros foram significativos na formação da rebarba, conforme a análise de variância efetuada através dos dados coletados.

Na rugosidade, a pressão do gás de assistência é o parâmetro mais significativo e os demais parâmetros e as suas interações não são representativos. Para a menor pressão foram alcançadas as menores rugosidades do planejamento experimental. Também foi possível verificar que a rugosidade varia conforme a posição medida ao longo da altura do corte.

Para o perpendicularismo, no cálculo de análise de variância, nenhum parâmetro alcançou o valor P de 0,03. Alguns efeitos ficaram próximos a este valor comparando-se ao trabalho realizado por Wandera (2006). Como a intenção era de avaliar o perpendicularismo, isto é, o ângulo de 90° entre as faces da chapa e o corte gerado pelo *laser* os parâmetros não indicam qual deles traria o melhor resultado da medida para o processo.

A zona termicamente afetada foi influenciada pela interação da potência do corte laser com a pressão do gás de assistência próximo a borda superior e pela interação entre a velocidade de corte e a pressão do gás de assistência na borda inferior. A zona termicamente afetada também aumenta de tamanho ao longo da espessura da peça e a microestrutura desta região é caracterizada pela presença de uma martensita extremamente fina e de elevada dureza.

Para a dureza a interação entre a potência de corte e a velocidade de corte proporciona a menor e a maior dureza. A interação entre estes dois parâmetros influenciam a velocidade de aquecimento e a de resfriamento da região.

Portanto, a potência de corte influencia a microdureza e o tamanho da zona termicamente afetada; a velocidade de corte influencia a microdureza, a zona termicamente afetada e a formação da rebarba. Por fim, a pressão do gás de assistência influencia a zona termicamente afetada a formação de rebarbas e principalmente a rugosidade.

6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para novos trabalhos na área de pesquisa sobre corte a *laser* pode-se sugerir os seguintes tópicos:

- avaliar outros parâmetros de rugosidade, em especial Rz e Ry;
- empregar técnicas que permitam representar as superfícies e sua topografia em 3D, através de equipamentos de apalpamento e varredura óptica, que utilizam um feixe de luz;
- a fim de caracterizar melhor a integridade da superfície, avaliar as tensões residuais;
- elaborar um FMEA de processo.
- investigar este processo para outros materiais;

BIBLIOGRAFIA

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6507-1: Materiais metálicos: ensaio de dureza Vickers - parte 1: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 87: Aço carbono e ligados para construção mecânica; designação e composição química.** Rio de Janeiro, 2000.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões.** São Paulo: Blucher, 1977. 295 p.
- ALMEIDA, I. A. **Otimização do Processo de Usinagem de Titânio com Laser Pulsado de neodímio.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 167 f. São Paulo, 2007.
- ASM International. **Metals Handbook.** 10^a ed. Materials Park: ASM International, 1990.
- BAGNATO, V. S. **Os fundamentos da luz laser.** Física na escola, v.2 (2), 2001.
- BELFORTE, D. A. **Fiber lasers tip the scale.** Ano 2006. Disponível em: <<http://www.industrial-lasers.com / articles / print / volume-21 / issue-1 / features / fiber-lasers-tip-the-scale.html>>. Acesso em: 09 jan. 2014.
- BERKMANNNS, J.; FAERBER, M. **Laser cutting: Laserlina® Technical..** Guildford: Boc, 2008.
- BERRETA, J. R. **Investigação do processo de endurecimento de materiais via laser.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 108 f. São Paulo, 1995.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CASTAÑEDA, J. C. H.; SEZER, H. K.; LI, LIN. **The effect of moisture content in fiber laser cutting of pine wood.** Optics and Lasers in Engineering, Volume 49: p. 1139-1152, 2011.
- CHEN, K.; YAO, Y. L.; MODI, V. **Gas dynamic effects on laser cut quality.** Journal of Manufacturing Processes. Volume 3: p. 38-49, 2001.
- CHEN, S. **The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser**

- cutting**. Journal of Materials Processing Technology. Volume 88: p. 57-66, 1999.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ª ed. São Paulo: ABM, 1996.
- CLAASSEN, R. S.; CHYNOWETH, A. G. **Ciência e engenharia de materiais: sua evolução, prática e perspectivas**. 2ª ed. Editora da Universidade de São Carlos, São Carlos, SP/Brasil, 1987.
- CONTROL, I. **Laser cutting process secrets revealed**: Whatever you might not know about Laser Cutting and wish to be informed about! Disponível em: <<http://www.idacontrol.com/articles.php?nid=10>>. Acesso em: 01 fev. 2014.
- COSTA, A.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. **Lasers de fibras - estado da arte**. Tecnologia e Qualidade. Portugal. Volume 53: p.13-16, 2005.
- DAHOTRE, N. B.; HARIMKAR, S. **Laser fabrication and machining of materials**. New York: Springer, 2008.
- DAVIDSON, M. W.; ABRAMOWITZ, M. **Optical microscopy**. National High Magnetic Field Laboratory e Olympus America. Florida e New York, 2000.
- DAVIM, J. P.; GRÁCIO, J. J. **Tecnologia dos materiais metálicos**. Universidade Aberta, 1999.
- DIN; Deutsches Institut für Normung. **Form deviations: concepts, classification system : DIN 4760**. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012.
- ESAB. **Laser cutting process**. Disponível em: <<http://www.esab-cutting.com/products/laser-cutting-process.html>>. Acesso em: 01 fev. 2014.
- ESTATCAMP (São Carlos) (Org.). **Conteúdo Estatístico**. 1997. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2014
- FARO, T. M. C. C. B. **Estudo da otimização de corte por laser de alta velocidade em chapa metálica**. Dissertação de Mestrado. Porto 2006.
- FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970. 3 v.
- FIELD, M.; KAHLES, J. F.; KOSTER, W. P. **Surface finish and surface integrity**. ASM Handbook. Machining. Volume 16: p. 19-36, 1989.

FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM COMERCIAL; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM I. **Mecânica: metrologia**. Rio de Janeiro: Globo, c1996. 240 p. (Telecurso 2000. Profissionalizante) ISBN 8525016705.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSoud, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. **Roughness parameters**. Journal Of Materials Processing Technology. Volume 123: p. 133-145, 2002.

GHANY, KA.; NEWISHY, M. **Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser**. Journal of Materials Processing Technology. Volume 168: p. 438–447, 2005.

GRIFFITHS, B., **Manufacturing surface technology**. London: Penton Press, 2001.

HARNIČÁROVÁ, M.; VALÍČEK, J.; KUŠNEROVÁ, M.; GRZNÁRIK, R.; PETRŮ, J.; ČEPOVÁ, L. **A new method for the prediction of laser cut surface topography**. Measurement Science Review. n. 5: p. 195-204, 2012.

HASÇALIK, A.; AY, M. **CO₂ laser cut quality of inconel 718 nickel – based super alloy**. Optics & Laser Technology. Volume 48: p. 554-564, 2013.

HAYNES, R. **Optical microscopy of materials**. Glasgow: International Textbook Co, 1984.

HINES, W. W. et al. **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2003. Tradução Vera Regina Lima de Farias e Flores.

INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLICATIONS OF LASERS AND ELECTRO-OPTICS. **Mechanism of dross formation in the laser cutting**. Orlando: ICALEO, 2004. 2110 p.

ISO; International Organization for Standardization. **ISO 9013-2002: thermal cutting - classification of thermal cuts - geometrical product specification and quality tolerances**. Germany: European Committee for Standardization, 2002.

IVARSON, A. **On the physics and chemical thermodynamics of laser cutting**. 165 f. Tese (Doutorado). Luleå University of Technology. Sweden, 1993.

JOHN, C. I. **Laser processing of engineering materials principles, procedure and**

industrial application. Amsterdam: Boston, 2005.

KINCADE, K.; ANDERSON, S. G. **Laser marketplace 2007: laser industry navigates its way back to profitability.** Ano 2007. Disponível em: <<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-43/issue-1/features/laser-marketplace-2007-laser-industry-navigates-its-way-back-to-profitability.html>>. Acesso em: 09 jan. 2014.

KOECHNER, W. **Solid state laser engineering.** New York: Springer, 2006.

Laser cutting theory. Disponível em: <<http://www.ctechlaser.com.au/lctheory.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2014.

MACHINABILITY DATA CENTER. **Machining data handbook, machining data center.** Volume 2: p. 18-39, 1980.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística.** Editora USP: São Paulo, 2001.

MERTZ, J. **Introduction to optical microscopy.** Greenwood Village. Colo: Roberts, 2010.

MITUTOYO. **SJ-301 - Surface roughness tester - user's manual.**

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 463 p.

NESTEROV, A. V.; NIZIEV, V. G. **Laser beams with axially symmetric polarization.** Journal of Physics D: Applied Physics. Volume 33: p. 1817–1822, 2000.

POWELL, J. **CO₂ laser cutting.** London: Springer London, 1993.

POWELL, J.; AL-MASHIKHI, S.O.; KAPLAN, A.F.H.; VOISEY K.T. **Fiber laser cutting of thin section mild steel: an explanation of the “striation free” effect.** Optics and Lasers in Engineering. Volume 49: p. 1069-1075, 2011.

PRAJAPATI, B. D.; PATEL, R. J.; KHATRI, B. C. **Parametric Investigation of CO₂ Laser Cutting of Mild Steel and Hardox-400 Material.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Volume 3: p. 204-208, 2013.

PRIMAVERA, K. R.; FELLERS, T. J.; DAVIDSON, M. W. **Introduction to lasers.** Disponível em: <<http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/confocal/laserintro.html>>. Acesso em: 04 fev. 2014

- RAJENDRAN, N. **An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser cutting process.** 488 f. Tese (Ph. D.). Iowa State University, 1990.
- RAJARAM, N.; SHEIKH-AHMAD, J.; CHERAGHI, S.H. **CO₂ laser cut quality of 4130 steel.** International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 43: p. 351-358, 2003.
- RAO, B. T.; NATH, A. K. **Melt flow characteristics in gas assisted laser cutting.** Sadhana: Academy Proceedings in Engineering Sciences. Volume 27: p. 569-575, 2002.
- RIVEIRO, A.; QUINTERO, F.; LUSQUÍÑOS, F.; COMESAÑA, R.; POU J. **Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy.** Journal of Materials Processing Technology. Volume 210: p. 1138-1152, 2010.
- SANTOS, J. F. O.; QUINTINO, L.; MIRANDA. **Processamento de materiais por feixe de elétrons, laser e jato de água.** Instituto de Soldadura e Qualidade, 1991. 279 p.
- SANTOS, J. F. O.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. M.. **Corte por laser.** Lisboa: Instituto de Soldadura e Qualidade, 1993. 167 p.
- SCHUÖCKER, D. **Dynamic phenomena in laser cutting and cut quality.** Applied Physics B: Laser And Optics. Volume 40: p. 9-14, 1986 .
- SCINTILLA, L.D.; TRICARICO, L.. **Experimental investigation on fiber and CO₂ inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets.** Optics & Laser Technology. Volume 46: p. 42-52, 2013.
- SCITEC INSTRUMENTS (Org.). **Modos de laser.** Disponível em: <http://www.scitec.uk.com/lasers/laser_modes.php>. Acesso em: 04 fev. 2014.
- SHANJIN, L.; YANG, W. **An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet.** Optics and Lasers in Engineering. Volume 44: p. 1067–1077, 2006.
- SHENG, P.S; JOSHI; V.S. **Analysis of heat-affected zone formation for laser cutting of stainless steel.** Journal of Materials Processing Technology. Volume 53: p. 879-892, 1995.
- SOUZA, S. A. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos.** 5.ed. São Paulo: 1982. E. Blücher.

- SPARKES, M. R.; GROSS, M. S.; CELOTTO, S.; ZHANG, T.; O'NEILL, W. **Inert cutting of medium section stainless steel using a 2.2kW high brightness fiber laser**. International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics. Scottsdale, 2006.
- STEEN, W. M. **Laser material processing**, India: Springer, 2003.
- SUN, H. **Laser diode beam basics, manipulations and characterizations**. New York: Springer, 2012
- TRÄGER, F. **Springer handbook of lasers and optics**. New York: Springer, 2007.
- TRUMPF. **Technical information – laser processing CO₂ laser**. 2007. Disponível em <http://www.trumpf.com> acessado em novembro de 2012.
- TRUMPF (São Paulo). **TruLaser 5030 / 5040 / 5060**. Disponível em: <<http://www.br.trumpf.com/>>. Acesso em: 15/03/2014.
- VASCONCELLOS, E. E. **O laser e a pesquisa básica**. Série reportagens. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/fisica/fisica13.htm>>. Acesso em 02 Junho 2013.
- WANDERA, C. **Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam**. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Science In Technology, Lappeenranta University Of Technology, Lappeenranta, 2006.
- WHITEHOUSE, D. J., **Handbook of surface metrology**. Bristol: Institute of Physics Pub, 1994.
- WIRTH, P. **Introduction to industrial laser materials processing**. Hamburg: Rofin Sinar, 2004.
- XIAO, Z. **Fiber laser cutting of mild steel**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Science In Technology, Lappeenranta University Of Technology, Lappeenranta, 2007.
- YILBAS, B. S. **The analysis of CO₂ laser cutting**. Journal of. Engineering Manufacture. Volume 211: p. 223-232, 1997.
- ZAPPE, H. P. **Laser diode microsystems**. Berlin: Springer, 2004.

APÊNDICE A - RESULTADO DAS MEDIÇÕES DA DUREZA VICKERS

Amostra 1	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	713	709	624	242
		729	735	515	266
		732	746	539	249
Média	724,67	730,00	559,33	252,33	
Amostra 2	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	761	738	702	244
		751	740	709	262
		756	763	712	247
Média	756,00	747,00	707,67	251,00	
Amostra 3	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	701	693	561	230
		723	717	357	250
		728	714	471	257
Média	717,33	708,00	463,00	245,67	
Amostra 4	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	703	721	665	477
		639	716	672	422
		645	666	645	357
Média	662,33	701,00	660,67	418,67	
Amostra 5	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	723	710	278	242
		717	751	273	238
		671	703	568	241
Média	703,67	721,33	373,00	240,33	
Amostra 6	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	723	759	304	244
		725	710	424	241
		717	703	635	322
Média	721,67	724,00	454,33	269,00	
Amostra 7	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	717	727	698	246
		741	687	592	260
		740	723	271	245
Média	732,67	712,33	520,33	250,33	
Amostra 8	Profundidade (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2
	Dureza (HV)	721	735	45	243
		702	660	324	234
		660	692	456	252
Média	694,33	695,67	275,00	243,00	
		0,05	0,1	0,15	0,2
Média Geral		714,08	717,42	501,67	271,29