

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO POR LASER NA CONFECÇÃO DE  
DISPOSITIVOS MÉDICOS ENDOLUMINAIS**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ISAIAS MASIERO FILHO**

**Florianópolis, agosto de 2002**



*a meus pais*  
*à memória de meu irmão Daniel*

## Agradecimentos

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, coordenador do Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, pela sua orientação e apoio já desde os tempos da graduação, pelo incentivo nos momentos certos e pelo exemplo profissional.

À empresa Nano Endoluminal S.A. pela sugestão do tema de pesquisa, pelo apoio técnico, financeiro e pelo incomparável ambiente de trabalho que facilitou a conclusão do texto desta dissertação.

Ao Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Wiesner, diretor do Instituto de Fabricação (Institut für Fertigung - IFF) da Universidade Técnica de Ilmenau, Alemanha, pela valiosa oportunidade oferecida e por seu dedicado apoio para as atividades realizadas em seu instituto.

Ao Laboratório de Materiais – LabMat, por possibilitar a realização dos experimentos de soldagem e furação.

Ao Prof. Dr. Rer. Nat. Alexandre Lago por sua contribuição técnica e apoio nos experimentos realizados no LabMat.

À Capes pela bolsa de estudos.

A meus pais, Isaias e Lourdes Masiero, pelo suporte e por terem guiado meu caminho até aqui, pelo exemplo de vida, pelo apoio incondicional, pelos bons momentos que sempre passamos juntos e pela contribuição a este trabalho.

A Juliana S. G. Silva, sempre presente, por seu amor, pela paciência e compreensão, por seu apoio e carinho, mesmo nos momentos de dificuldade.

Ao grande amigo Charles Cristian de Souza, sua contribuição foi preciosa tanto no papel de amigo, quanto no papel de colega pesquisador da mesma área.

Ao Eng. Ricardo Machado Peres, M. Eng. Mec., pelo apoio irrestrito, pela amizade e pela preciosa contribuição para o texto desta dissertação.

Aos professores do POSMEC.

Aos estagiários do curso de graduação em Eng. de Materiais Arthur W. Taylor, Luana B. Pértile e André Prette pela admirável dedicação com que colaboraram para este trabalho em sua parte experimental.

Aos estagiários do curso de graduação em Eng. Mecânica João Marcelo Monteiro e Charles Gallotti por seu auxílio.

Aos irmãos de fé e amigos, que sempre me acompanharam e incentivaram nesta caminhada.

A todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho se realizasse.

---

## Sumário

<i>Lista de figuras</i> .....	<i>ix</i>
<i>Lista de tabelas</i> .....	<i>xii</i>
<i>Simbologia</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Resumo</i> .....	<i>xv</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>xvi</i>
<b>1 Introdução e objetivos</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Histórico</b> .....	<b>11</b>
<b>3 O que é um laser e como funciona</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 Dois conceitos básicos</b> .....	<b>16</b>
3.1.1 Emissão espontânea e emissão estimulada .....	16
3.1.2 Inversão de população .....	18
<b>3.2 Principais componentes de uma fonte</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Meio ativo.....	20
3.2.2 Cavidade de ressonância.....	21
3.2.3 Fonte de energia.....	23
<b>3.3 Características e propriedades do feixe</b> .....	<b>23</b>
3.3.1 Comprimento de onda .....	23
3.3.2 Raio do feixe.....	24
3.3.3 Foco .....	24
3.3.4 Divergência.....	25
3.3.5 Distância de Rayleigh .....	26
3.3.6 Qualidade do feixe (Número característico e Produto dos parâmetros do feixe).....	27
3.3.7 Número de Fresnel.....	28
3.3.8 Modo de distribuição de energia.....	29
3.3.9 Regime de trabalho .....	32
3.3.10 Polarização.....	35
<b>4 O Equipamento</b> .....	<b>37</b>

---

<b>4.1</b>	<b>Fonte.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistema de condução do feixe.....</b>	<b>37</b>
4.2.1	Scanner .....	37
4.2.2	Fibra ótica.....	38
4.2.3	Condução por espelhos.....	39
<b>4.3</b>	<b>Gases .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4</b>	<b>Principais tipos de laser.....</b>	<b>41</b>
4.4.1	Nd:YAG .....	42
4.4.2	CO2 .....	44
<b>5</b>	<b><i>Processos de fabricação.....</i></b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>O Corte .....</b>	<b>46</b>
5.1.1	Corte por queima .....	50
5.1.2	Corte por fusão .....	51
5.1.3	Corte por sublimação.....	52
5.1.4	Fratura controlada.....	52
5.1.5	Controle e precisão do processo .....	53
<b>5.2</b>	<b>A Soldagem.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3</b>	<b>A Furação .....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b><i>Interação do laser com os materiais a serem trabalhados .....</i></b>	<b>59</b>
<b>6.1</b>	<b>Reflexibilidade.....</b>	<b>59</b>
<b>6.2</b>	<b>Absortividade .....</b>	<b>61</b>
<b>6.3</b>	<b>Condução de calor .....</b>	<b>61</b>
6.3.1	Fusão da superfície .....	61
6.3.2	Vaporização.....	62
6.3.3	Zona termicamente afetada (HAZ).....	63
<b>7</b>	<b><i>Segurança no manuseio do laser .....</i></b>	<b>64</b>
<b>7.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>64</b>
<b>7.2</b>	<b>Precauções típicas para lasers da classe 4 de acordo com Steen /2/.....</b>	<b>66</b>
<b>7.3</b>	<b>Danos aos olhos .....</b>	<b>66</b>
<b>7.4</b>	<b>Danos à pele.....</b>	<b>69</b>
<b>7.5</b>	<b>Riscos com a eletricidade .....</b>	<b>70</b>
<b>7.6</b>	<b>Riscos com os fumos .....</b>	<b>70</b>

---

7.7	Fogo.....	71
8	<b> Materiais</b> .....	72
8.1	<b> Liga de níquel e titânio (NiTi)</b> .....	72
8.1.1	O material, propriedades e características .....	72
8.1.2	Algumas aplicações .....	74
8.2	<b> Aço inoxidável AISI 316L</b> .....	74
8.3	<b> PTFE</b> .....	77
9	<b> Experimentos</b> .....	79
9.1	<b> Corte de lâminas de aço inoxidável</b> .....	80
9.1.1	Pré-ensaio .....	81
9.1.2	Ensaio de corte usando o equipamento Lasag .....	82
9.1.3	Ensaio com o equipamento Haas .....	85
9.2	<b> Furação de filme de ptfe</b> .....	90
9.2.1	Objetivo deste experimento .....	90
9.2.2	Equipamento utilizado .....	91
9.2.3	Procedimento experimental e discussão dos resultados.....	91
9.3	<b> União de arames de NiTi por solda a laser</b> .....	98
9.3.1	Objetivo deste experimento .....	98
9.3.2	Equipamento utilizado .....	100
9.3.3	Procedimento experimental e discussão dos resultados.....	100
10	<b> Conclusões e sugestões</b> .....	110
10.1	<b> Conclusões</b> .....	110
10.2	<b> Sugestões para novos trabalhos</b> .....	112
11	<b> Referências bibliográficas</b> .....	113



## Lista de figuras

<i>Figura 1.1 - Cirurgia clássica para correção de Aneurisma Aórtico Abdominal. Da esquerda para a direita: A aorta abdominal /50/, o aneurisma/51/ e a sua correção cirúrgica /52/.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 1.2 – Procedimento endoluminal. À esquerda e à direita o controle radioscópico antes e depois do implante, respectivamente. Ao centro uma foto do procedimento em andamento. /47/ .....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.3 – Um esquema do implante da endoprótese no tratamento de um aneurisma de aorta abdominal. /47/ .....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.4 – Tratamento da estenose por angioplastia /51/, à esquerda, e stent a ser implantado posteriormente /53/, à direita. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.5 – Exemplos de endopróteses (stent-graft) auto-expansível para o tratamento do aneurisma de aorta. Da esquerda para a direita: Cônica, reta e bifurcada. /47/ .....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.6 – Stents usinados a partir de tubos metálicos. ....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.1 – Maimann e seu laser de rubi ./5/ .....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.1 – Espectro das radiações eletromagnéticas. /5/.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.2 - Emissão espontânea e emissão estimulada. /20/.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.3 – Comparação entre as características que diferenciam a luz de um laser da luz comum. /6/.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.4 - Inversão de população. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.5 – Esquema de uma fonte laser.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.6 - Formas construtivas básicas de cavidades: A) Cavidade estável; B) Cavidade instável; C) Cavidade estável com janela aerodinâmica. /2/ .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.7 – Exemplos de formas construtivas de cavidades de ressonância (típicas de lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência). /19/.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.8 – Grandezas do feixe. Raio no foco <math>r_0</math>, divergência <math>\theta</math>, distância de Rayleigh <math>Z_R</math>. /20/ .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.9 – Resultado do corte ou furação em função da posição do foco. /20/.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.10 – A onda difratada no espelho S1 não será mais totalmente refletida pelo espelho S2. /4/ .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.11 – Modo eletromagnético transversal. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.12 – Exemplo dos modos TEM<sub>00</sub> acima à esquerda, TEM<sub>01</sub> acima à direita e TEM<sub>10</sub> abaixo, gravados em plexiglass. /6/ .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.13 – Grandezas do regime pulsado. /25/.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.14 – Exemplo de peças cortadas por Rzani /25/ em seus estudos sobre a influência do regime de trabalho no resultado do corte. Acima o modelo utilizado para peças com espessuras variando entre 6 e 8 mm e abaixo modelo utilizado para peças com até 4 mm de espessura. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.15 – Comparação entre o resultado do corte em regime pulsado – acima – e contínuo – abaixo, para uma peça de aço doce com 8 mm de espessura. /25/.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.16 – Influência da frequência de pulso no corte de peças com 1,5 mm de espessura para um mesmo valor de potência. Acima os resultados ruins - à esquerda 20 Hz e à direita 1000 Hz. Abaixo o corte de boa qualidade – 83,3 Hz. /25/ .....</i>	<i>34</i>

<i>Figura 3.17 – Exemplo de peças com geometrias complexas e alta qualidade geométrica, cortadas em chapas de aço doce com 4 mm de espessura e em regime pulsado. /25/.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.18 – Representação esquemática de três tipos de polarização das ondas eletromagnéticas. /6/.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.19 – Desvio no corte provocado por polarização não circular.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.1 – Formas construtivas de scanners. (a) Raster, (b) e (c) polígonos rotativos. /2/.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.2 – Laser conduzido por fibra ótica até o cabeçote montado sobre um robô. /20/.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.3 – Formas de condução do feixe por espelhos: a) Movimentação da peça. b) Movimentação da fonte. c) Movimentação dos espelhos (flying optics). /6/.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.4 – Representação esquemática dos componentes de uma fonte Nd:YAG segundo Guggolz /20/. .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.5 - Representação esquemática dos componentes de uma fonte CO<sub>2</sub> segundo Rzany /6/. 1 – Unidade de fornecimento de gás. 2 – Bomba de vácuo. 3 – Bomba para circulação do meio ativo. 4, 5 – Trocadores de calor. 6 – Sensor para a medição da potência do laser. 7 – Obturador. 8 – Elemento óptico do ressonador – Espelho de retorno. 9,10 - Elemento óptico do ressonador – Espelho traseiro e janela de saída. 11 – Tubo de descarga. 12 – Tubo de trabalho. 13, 14, 15 – Distribuidores de gás.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.1 – Esquema de um cabeçote para o corte com laser. /24/.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.2 – Solda por condução, à esquerda, e solda profunda (keyhole), à direita. /29/.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.3 – Furação a laser. Processamento usando um só pulso, diversos pulsos e trepanação movimentando o cabeçote para furos de diâmetros grandes. /20/.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6.1 – Reflexibilidade de alguns metais como função do comprimento de onda do laser. /2/.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.2 - Reflexibilidade de alguns metais como função da sua temperatura. /2/.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.3 – Comparação da zona termicamente afetada em diferentes processos de corte. /29/.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 7.1 - Exemplo de cartaz de alerta a ser usado em áreas de trabalho com laseres.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 7.2 – Espectro de transmissividade do fluido ocular. a) Esquema de um olho humano, b) transmissividade (<math>T_A</math>) e a parte do feixe absorvida pela retina (<math>TA \cdot \alpha N</math>) /2, 4/.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 7.3 – Limites de exposição da retina à radiação. /2/.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 7.4 – Limites de exposição da córnea à radiação. /2/.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 7.5 – Acidente com laser sofrido pelo autor Powel /23/. O feixe incidiu sobre a parte inferior do seu dedo, foto da direita, atravessou-o e saiu pela unha, foto da esquerda. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 8.1 – Fórmula do P<sub>tf</sub>.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 9.1 – Configuração dos cortes.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 9.2 – Três cortes feitos neste ensaio. À esquerda uma HAZ muito grande, ao centro um corte considerado bom e à direita um corte catastrófico causado pelo avanço excessivo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 9.3 – Corte feito com o laser Lasag. Da esquerda para a direita: Início do corte, região central e final do corte. Ampliação de 50,4 X. ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 9.4 – Efeito principal das variáveis frequência de pulso (A) e energia (B). Os valores estão em mm.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 9.5 – Interação entre as duas variáveis, frequência de pulso (A) e energia (B). Os valores estão em mm. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 9.6 - Efeito linear das duas variáveis e sua interação.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 9.7 – Efeito principal das variáveis tensão (A), duração de pulso (B), frequência de pulso (C), avanço (D) e pressão do gás de corte (E). Os valores são dados em mm. ....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 9.8 – Correlação entre as variáveis. Os valores são dados em mm. ....</i>	<i>89</i>

<i>Figura 9.9 - Efeito linear das variáveis tensão (A), duração de pulso (B), frequência de pulso (C), avanço (D) e pressão do gás de corte (E) e suas combinações sobre a largura de corte. Valores em mm. ....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 9.10 - Esquema e protótipo de uma endoprótese apresentando a inclusão de um colar de furos em seu projeto. /47/.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 9.11 - Laser de CO<sub>2</sub> do Laboratório de Materiais (LabMat) da UFSC. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 9.12 - Furos obtidos com vários valores de potência(P) e duração de pulso(t). A ponta metálica que aparece nas fotos é a extremidade de um clipe para papel, fotografado ao lado do furo para servir como uma referência. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 9.13 – Furo obtido com potência de 40% e 4 ms de duração de pulso. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 9.14 - Dimensões das tiras de filme de ptfe usadas como corpos de prova para o ensaio de resistência à tração. A região sombreada corresponde à área da malha de furos. ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 9.15 - Corpos de provas de filme de ptfe para o ensaio de resistência à tração. Antes, à esquerda, e depois do ensaio, à direita. De cima para baixo: O filme sem furos, a malha com 1 mm e com 1,4 mm de distância entre centros. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 9.16 - Colar de furos confeccionado sobre filmes tubulares de ptfe. À esquerda a malha com 1,0 mm e à direita com 1,4 mm de distância entre os furos.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 9.17 - Fotos dos corpos de prova antes (esquerda) e depois (direita) do ensaio de resistência à tração. De cima para baixo: Prótese sem furos, colar de furos com espaçamento 1,0 mm e colar de furos com espaçamento 1,4 mm, respectivamente.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 9.18 – Endopróteses para o tratamento de aneurisma da aorta torácica. Completa na parte superior e somente sua estrutura na parte inferior. ....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 9.19 – Detalhe mostrando a união por crimping. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 9.20 - Dispositivo para a fixação dos arames e criação de uma atmosfera inerte no laser de CO<sub>2</sub>. ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 9.21 - Dispositivo para a fixação do arame no laser de Nd:YAG. ....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 9.22 – Combinação de parâmetros utilizada no ensaio com o laser de CO<sub>2</sub>. ....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 9.23 - Tentativas de soldar os arames de NiTi, diâmetro 0,35mm. Experimento foi feito sem o argônio (Ar). As fotos da parte inferior mostram forte oxidação da região soldada. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 9.24 - Solda obtida com o laser de CO<sub>2</sub>. Potência = 45W e tempo = 2750ms. Vista inferior à esquerda e superior à direita.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 9.25 – Combinação de parâmetros utilizada no ensaio com o laser de Nd:YAG.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 9.26 - Resultado do ensaio de soldagem. As ordenadas mostram a força e não a tensão porque é o mais relevante para o produto. A área da solda e do crimping são diferentes da seção do arame. ....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 9.27 - Idem à figura anterior, contudo nesta figura suprimiu-se a curva do arame recozido para facilitar a visualização. ....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 9.28 - Ruptura da solda por esforço lateral. ....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 9.29 - Ruptura da solda por esforço de tração.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 9.30 - Vista de topo da ruptura da solda por esforço de tração.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 9.31 - Ruptura do material não soldado. Repare que houve escoamento. No detalhe o par taça-cone..</i>	<i>109</i>

---

## Lista de tabelas

<i>Tabela 1.1 - Comparação entre o laser e outras fontes de energia térmica. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2.1 – Cronologia dos principais acontecimentos na história do laser. ....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 4.1 – Principais tipos de laser, suas características e exemplos de aplicações segundo o ILT. /22/.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 5.1 - Valores típicos de espessuras e velocidades para o corte a laser./1/ .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 7.1 - Classificação dos lasers. Sumário das normas BSI 4803 1983 e IEC 825 1984, segundo Steen /2/ .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 8.1 – Composição química do aço inoxidável AISI 316L. /56/.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 8.2 – Propriedades de lâminas recozidas de aço inoxidável AISI 316L. /56/ .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 8.3- Comparação entre as propriedades do NiTi e do aço inoxidável 316L. /46/.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 8.4 - Propriedades do Ptfе. /55/ .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 9.1 – Grandezas do experimento. ....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 9.2 – Plano do experimento. ....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 9.3 –Grandezas do experimento. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 9.4 Plano do experimento.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 9.5 – Resumo do resultado do ensaio de tração para as tiras de filmes de ptfe. A unidade N/mm foi usada por se tratar de filmes finos, onde a largura é muitas vezes maior do que a espessura. Assim considera-se a força por unidade de medida de largura do filme. ....</i>	<i>96</i>

## Simbologia

$A_0$	Amplitude mínima [%]
$A_i$	Amplitude máxima [%]
$c$	calor específico do material da peça no estado sólido [J/kg.K]
$C$	Energia necessária para vaporizar uma unidade de volume do material da peça [J/m <sup>3</sup> ]
CC	Corrente contínua
$dx/dt$	Taxa de recuo da superfície da peça [m/s]
$E$	Nível mais baixo de energia
$E_+$	Nível mais alto de energia
$F$	Número de Fresnel
$F_0$	Fluxo constante de calor [J/s.m <sup>2</sup> ]
$f_p$	Frequência de pulso [Hz]
$h$	Constante de Planck = $6,623 \cdot 10^{-34}$ J.s
HAZ	Zona Termicamente Afetada (do inglês Heat Affected Zone)
IR	Infravermelho
$K$	Número característico do feixe (qualidade do feixe)
$k$	Coefficiente de condutividade térmica do material da peça [W/m.K]
$L$	Comprimento da cavidade de ressonância
$M^2$	1/K
$P_L$	Potência máxima [W]
$P_p$	Potência média [W]
$Q$	Energia contida em um fóton
$q$	Produto dos parâmetros do feixe
$r$	Raio em uma posição qualquer do feixe
$r'$	Raio da abertura de saída da cavidade de ressonância
$r_0$	Raio do feixe medido no plano focal
$r_Z$	Raio do feixe no ponto que delimita a distância de Rayleigh
$T$	Temperatura absoluta da peça na posição $x$ , no tempo $t$ [K] Na superfície da peça $x = 0$
$t_0$	Duração da pausa [Hz]

---

$TEM_{00}$	Modo Gaussiano, também chamado Modo Fundamental
$TEM_{pl}$	Modo Eletromagnético Transversal
$t_i$	Duração do pulso [Hz]
UV	Ultravioleta
x	Posição em relação à superfície da peça
$Z_R$	Distância de Rayleigh
$\lambda$	Comprimento de onda
$\nu$	Frequência da radiação emitida = $c/\lambda$ = (velocidade da luz = $2,998 \cdot 10^8$ m/s)/(comprimento de onda do laser em m)
$\theta$	Ângulo de divergência teórico do feixe
$\theta^{real}$	Valor medido do ângulo de divergência do feixe
$\kappa$	Difusividade [ $m^2/s$ ]
$\pi$	Número Pi = 3,1416
$\rho$	Densidade do material da peça [ $kg/m^3$ ]

## Resumo

O presente trabalho é resultado do encontro do desafio apresentado pelo estudo de processos de fabricação novos e ainda não tão vastamente difundidos, como é o caso do laser, com a necessidade da empresa Nano Endoluminal S.A. de avaliar as novas possibilidades que surgiriam com o uso desta fonte de energia na fabricação de precisão, visando a confecção de dispositivos médicos endoluminais.

Assim sendo estabeleceu-se como objetivos para este trabalho de mestrado um estudo teórico dos conceitos básicos da Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação (LASER), envolvendo o fenômeno, o equipamento, suas principais aplicações e processos industriais, e um estudo prático do uso desta ferramenta na confecção de próteses, catéteres e dispositivos específicos, de acordo com as necessidades expostas pela empresa conveniada.

O estudo prático começou pelo corte de chapas finas de aço inoxidável, visando a obtenção de subsídios para a avaliação das possibilidades e dificuldades envolvidas na confecção de *stents*. Na continuidade estuda-se a furação de filmes de ptfе. Esta necessidade surgiu de uma inovação em um projeto de endoprótese vascular cujas características desejadas seriam difíceis de serem obtidas por processos mecânicos, apontando o laser como uma possível ferramenta alternativa. E por fim, a terceira aplicação, objeto de experimentação, foi a soldagem, motivada pelo problema da união de arames de NiTi, um antigo e recorrente problema entre os fabricantes de endopróteses vasculares.

Os resultados obtidos satisfizeram à proposta do estudo, trazendo uma nova ferramenta, que já apresenta influência em decisões de projeto e processo, trouxe um novo campo de atuação e modificou consideravelmente a visão e atitude frente às possibilidades dos processos de fabricação vigentes.

Este trabalho contou com o apoio da empresa, e uma parceria com o Instituto de Fabricação (Institut für Fertigung – IFF) da Universidade Técnica de Ilmenau (TU-Ilmenau), na Alemanha, onde foram realizados os experimentos envolvendo o corte a laser e a revisão bibliográfica.

## Abstract

This dissertation results from the challenge of assessing a new technology, still not absolutely explored, as the laser, meeting the necessity of the company Nano Endoluminal S.A. to evaluate the new possibilities which will arise from the use of this tool in the precision machining, aiming the fabrication of endoluminal medical devices.

That being, the targets set to this research are a theoretical approach to the basic concepts involved in the Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (LASER), considering phenomena, equipment, its main applications and industrial processes, and also an experimental investigation of this tool in the fabrication of prostheses, catheters or other specific devices, according to the needs pointed by the partner company.

The experiments were started by the laser cutting of thin stainless steel strips, trying to achieve support to estimate the possibilities and difficulties involved in the machining of stents. The following experimented technology was the hole drilling in ptfе films. This topic came from a modification in a project of a vascular endoprotheses that should present features hard to be obtained from the mechanical processes, pointing the laser as a possible alternate tool. Finally, the third experiment involved the welding and was motivated by the problem of joining NiTi wires, an old and recurring issue among the vascular endoprotheses manufacturers.

The results were as expected, consolidating the laser as a new tool, triggering influences in project and process decisions, presenting a new field of actuation and considerably changing the view and attitude regarding the possibilities of the current machining processes.

This work had the support of the partner company and a cooperation with the *Institut für Fertigung – IFF* from the *Technische Universität Ilmenau (TU-Ilmenau)*, in Germany, where the cutting experiments and a literature review were performed.



# 1 Introdução e objetivos

## 1.1 Introdução

Este trabalho de mestrado conjuga interesses da engenharia e da medicina, atuando em uma fascinante área do conhecimento humano, a bioengenharia<sup>1</sup>. Alcança aplicação prática imediata dos resultados obtidos, sejam eles embasamento científico para a tomada de decisões ou soluções técnicas para problemas correntes da indústria médica, mais especificamente, a indústria de dispositivos endoluminais<sup>2</sup>.

Estes dispositivos são empregados no tratamento de enfermidades vasculares e, para que se possa avaliar a relevância de um estudo visando a sua melhoria, é importante que estas doenças sejam caracterizadas. Afinal, atualmente as doenças vasculares estão entre as principais *causa mortis* nos países ocidentais. Dados do Ministério da Saúde mostram que, no Brasil, de cada 100.000 habitantes, 156 morrem de doenças do sistema circulatório. /47, 48/

Nos Estados Unidos, anualmente, cerca de 40.000 pacientes são acometidos de Aneurisma de Aorta Abdominal, uma das variações desta enfermidade. Além disto, cerca de 15.000 são levados a óbito devido à ruptura do aneurisma. A Aorta, maior artéria do corpo humano, pode ser atingida por um aneurisma tanto em sua região torácica, quanto na abdominal. De acordo com a definição do *Subcommittee on Reporting Standards for Arterial Aneurysms* (SRSAA) aneurisma é uma dilatação focal e permanente de 50 % ou mais no diâmetro normal esperado do vaso sanguíneo comprometido. O aneurisma resulta de um processo ativo e complexo de

---

<sup>1</sup> Segundo o dicionário da língua portuguesa Aurélio Século XXI:

[De bi(o)- + engenharia.] S. f.

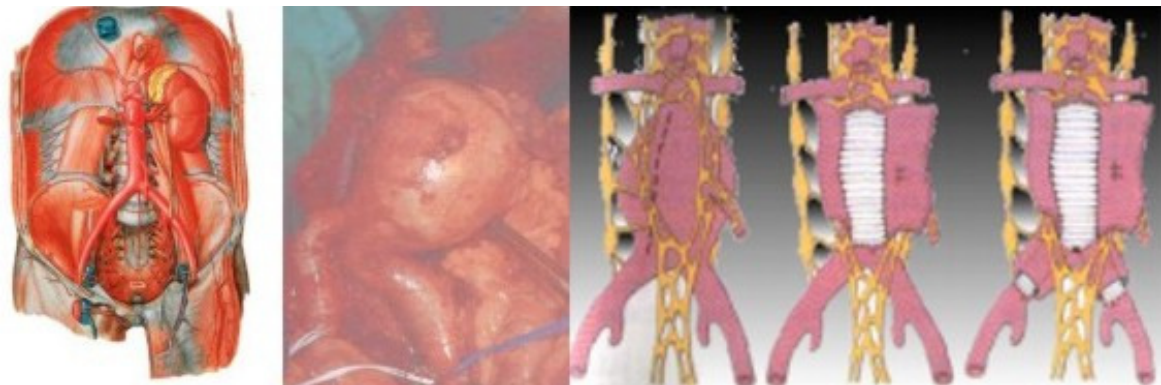
1. Genét. Designação genérica de técnicas que visam a realçar certos traços genéticos de seres vivos com o objetivo de desenvolver espécies mais úteis para certas finalidades (cultivo agrícola, p. ex.) ou mais resistentes aos ataques de pragas ou à hostilidade do meio.

2. Aplicação da engenharia à adaptação de equipamentos às necessidades dos organismos vivos (em geral, humanos), e que visa, p. ex., a criar sistemas de proteção à vida para missões submarinas e espaciais, aparelhagem para substituir ou complementar, temporária ou permanentemente, a função de um órgão, instrumental para monitorizar funções biológicas várias, como circulação e respiração, etc.

<sup>2</sup> De *endo* + *lúmen*. Dispositivos instalados na parte interna (lúmen) dos vasos.

remodelação da parede da artéria envolvendo síntese e degradação de proteínas na matriz. /47, 48, 49/

Para seu tratamento, hoje, são duas as principais técnicas utilizadas. A primeira delas, a técnica de correção cirúrgica do aneurisma da aorta, consiste na inclusão de uma prótese sintética, geralmente de poliéster, dentro do segmento dilatado. O procedimento cirúrgico envolve a laparotomia ou toracotomia (cirurgia aberta), sob anestesia geral e com um longo período de recuperação pós-operatório. /47, 48/ A Figura 1.1 ilustra um aneurisma de aorta abdominal e o implante da prótese.



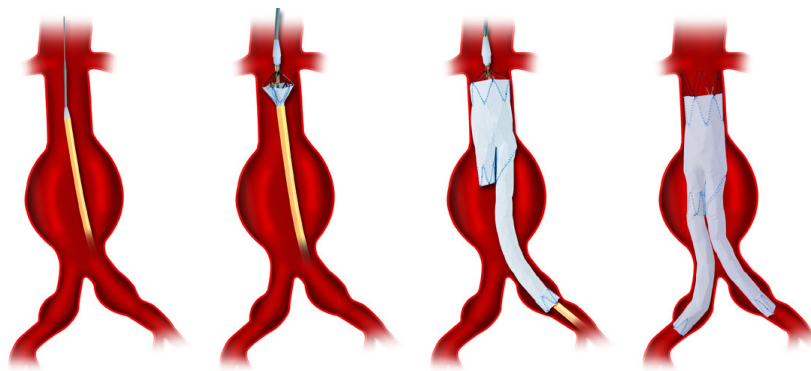
*Figura 1.1 - Cirurgia clássica para correção de Aneurisma Aórtico Abdominal. Da esquerda para a direita: A aorta abdominal /50/, o aneurisma/51/ e a sua correção cirúrgica /52/.*

A segunda técnica, o tratamento endoluminal, faz uso de catéteres coaxiais e *stents* recobertos (veja descrição na página 5), também conhecidos por sua designação em inglês *stent-graft*, introduzidos à distância. Este procedimento, mais recente, surgiu no início da década de 90. A primeira exclusão endoluminal de aneurisma aórtico em um modelo animal foi realizada por Balko *et al.* em 1987. Desde então, vários investigadores tem reproduzido experiências bem sucedidas com uma variedade de próteses endovasculares. Parodi, com um modelo experimental em cães, aplicou com sucesso enxertos compostos de Dacron<sup>®</sup> e *stents* de Palmaz<sup>®</sup> em 1990; e em 1991 foi o primeiro a aplicar o procedimento em um ser humano. Esta técnica se baseia no mesmo princípio da operação clássica, ou seja, a inclusão de uma prótese dentro do aneurisma. A diferença é que, ao invés de alcançar o interior da aorta através do abdome, a prótese é introduzida por uma das artérias femorais ou ilíacas, orientada por radioscopia (Raios X), como ilustrado na Figura 1.2 e Figura 1.3. Com a evolução das próteses foram feitos estudos clínicos para a colocação destas, inicialmente aplicados a pacientes de alto risco para a cirurgia convencional (Moore, 1994 e Veith, 1994 apud Peres

/48/) e em seguida as indicações foram ampliadas, tornando-se as mesmas dos pacientes cirúrgicos. /47, 48/



*Figura 1.2 – Procedimento endoluminal. À esquerda e à direita o controle radioscópico antes e depois do implante, respectivamente. Ao centro uma foto do procedimento em andamento. /47/*



*Figura 1.3 – Um esquema do implante da endoprótese no tratamento de um aneurisma de aorta abdominal. /47/*

Além do aneurisma, o tema deste trabalho relaciona-se com um outro tipo de enfermidade vascular. A arteriosclerose é o termo genérico utilizado para a condição patológica em que a parede arterial se torna espessa e perde a elasticidade. Representa uma das principais causas de morte no mundo, sendo responsável por 95% das coronariopatias, 85% das insuficiências vasculares periféricas e 75% dos acidentes vasculares cerebrais. /48/

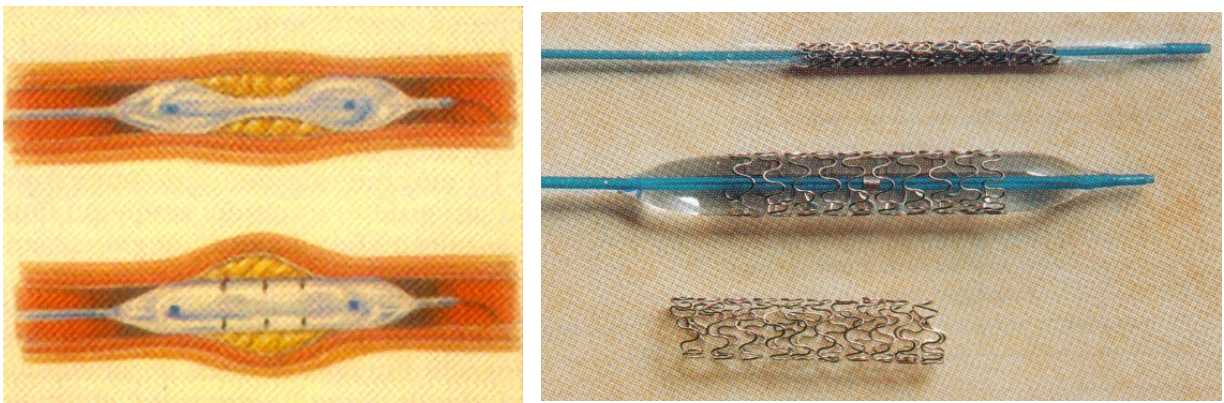
Grandes progressos foram feitos nos últimos anos no tratamento da doença cardiovascular arteriosclerótica com a introdução das modernas técnicas de by-pass (como a ponte safena). Embora estas técnicas apresentem grande sucesso com baixa morbidade<sup>3</sup> e mortalidade, a pressão contínua para o desenvolvimento de procedimentos menos invasivos e com menores

<sup>3</sup> Relação entre o número de pessoas sãs e o de doentes, ou de doenças, num dado tempo e quanto a determinada doença.

custos tem motivado o crescimento do emprego dos procedimentos endovasculares. Desde a introdução da técnica dos primeiros acessos vasculares por via percutânea em 1953 por Seldinger e posteriormente o desenvolvimento da angioplastia percutânea por Dotter e Judkins, importantes avanços e aprimoramentos na revascularização endovascular têm sido feitos com a introdução de *stents*. /48/

Apesar do balão de angioplastia ser um método bem estabelecido no tratamento das estenoses vasculares, lado esquerdo da Figura 1.4, permanece associado ao incômodo da reestenose. O *stent* surgiu como uma nova alternativa no tratamento desta, lado direito da Figura 1.4. Estudos atuais demonstram taxas relativamente baixas de reestenose clínica e arteriográfica com a utilização de *stent*, sendo o tratamento de escolha conforme as características das lesões vasculares e após angioplastia com resultados arteriográficos inadequados. /48/

A expansão do uso dos *stents* está associada ao desenvolvimento de novas estratégias, ampliando sua utilização não só para o tratamento da estenose vascular como também na terapêutica de fístulas e traumas arteriais (*stents* revestidos). /48/



**Figura 1.4** – Tratamento da estenose por angioplastia /51/, à esquerda, e *stent* a ser implantado posteriormente /53/, à direita.

Empregadas no tratamento das doenças descritas acima, as próteses endoluminais, também chamadas endopróteses ou próteses endovasculares, recebem esta designação por serem guiadas e posicionadas com um introdutor através do lúmen, interior da artéria. De acordo com as suas propriedades e características específicas, estas próteses podem ser empregadas para uma variedade de lesões arteriais, entre elas as supracitadas. Como o processo de introdução se dá através de artérias de baixo calibre, um dos grandes desafios desta área é o

desenvolvimento de tecnologias para baixar o perfil dos componentes e facilitar deslocamento endoluminal dos introdutores e próteses. /47, 48/

Estas próteses têm, em geral, sua estrutura feita de material metálico, o stent, com configurações variadas, de acordo com o tipo e aplicação. Podem ser confeccionadas com o uso de arames, que são conformados para constituir a estrutura, ou usinados a partir de tubos. O primeiro caso é empregado em próteses de maior calibre, como as de aorta, enquanto o segundo é a escolha para as prótese de pequenas dimensões, difíceis de se conformar usando arames, como no caso das coronárias.

Estes dispositivos são chamados *stents* ou, quando inseridos em um filme tubular ou recobertos por uma película, *stents* revestidos ou *stent-graft*. Em função da expansão, são classificados também em expandidos por balão e auto-expansíveis.

Como já dito, no tratamento do aneurisma de aorta, a endoprótese utilizada é o chamado *stent-graft*, constituído por um *stent* de grande calibre (seu diâmetro pode passar dos 30 mm), conformado em arames, revestido por um filme tubular, comumente de PTFE ou Dacron®.



*Figura 1.5 – Exemplos de endopróteses (stent-graft) auto-expansível para o tratamento do aneurisma de aorta. Da esquerda para a direita: Cônica, reta e bifurcada. /47*

Esta técnica é bastante jovem e encontra-se ainda em uma fase de evolução e refinamento, o que torna de grande interesse o seu estudo em busca de um dispositivo ideal ao tratamento de longa duração. Para isso os problemas de fundamental relevância aos dispositivos que se encontram no mercado atualmente devem ser resolvidos. Estes são devidos, em parte, às variações morfológicas apresentadas pela artéria aneurismática ao longo do tempo e ao comportamento dinâmico (pulsante) do sistema. /47/

Nos últimos anos várias empresas, centros de pesquisa e universidades, em diversos países, têm dispendido esforços no intuito de se desenvolver um dispositivo ideal ao tratamento dos



aneurismas de aorta, no entanto existem ainda três questões principais a serem respondidas de forma convincente: a migração das próteses, o selamento e sua resistência estrutural. /47/ Dois dos experimentos deste trabalho de mestrado participam do estudo destas questões e estão descrito nos capítulos 9.2 e 9.3.

Para o tratamento das estenoses, o *stent* utilizado é de pequenas dimensões (comumente abaixo de 5 mm de diâmetro) e por isso frequentemente usinado a partir de um tubo metálico, que na maior parte dos casos é de aço inoxidável 316L ou de NiTi (veja os materiais no capítulo 8). Alguns exemplos destes stents podem ser vistos no lado direito da Figura 1.4 e na Figura 1.6.

Como o processo de fabricação é delicado, dado as pequenas dimensões do material a ser usinado e ao risco de se deformar o perfil do *stent*, são preferidas as técnicas que não envolvem o contato mecânico, como o corte a laser e a usinagem eletroquímica. Veja o capítulo 9.1.

O laser é estudado por se mostrar, na fabricação deste tipo de dispositivo, uma ferramenta com potencial uso não só para o corte, mas também para a soldagem e a furação.



*Figura 1.6 – Stents usinados a partir de tubos metálicos.*

Acrônimo de **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação), o laser é uma fonte de radiação intensa, monocromática e altamente coerente. /1, 2, 3, 4, 5, 17 - 24, 42/

---

Para o escopo deste trabalho o laser poderia ser tratado simplesmente como uma fonte luminosa de altíssima potência, ferramenta para o processamento de materiais. Contudo, por se tratar de um primeiro trabalho sobre este tema no Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP – do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, há a necessidade também da inclusão neste texto de uma revisão das informações básicas sobre o conceito e os princípios do laser.

Desde a construção do primeiro laser por Maimann, em 1960, este vem encontrando novas aplicações nas mais diversas áreas, passando pelas comunicações, entretenimento, indústria bélica, medicina, processos de fabricação e, mais recentemente, até em sistemas de propulsão.

Um dos principais personagens da história da invenção do laser, Charles H. Townes apud Hecht /5/, profetizou:

*“O laser estará presente em um grande número de áreas. Ele fará praticamente tudo. Mas isto custa. Esta é a única limitação.”*

Considerando apenas as técnicas de fabricação, os diferentes processos da tecnologia laser podem ser, a grosso modo, divididos em três grupos, de acordo com o mecanismo envolvido:

- Processos de remoção de material: corte, gravação, furação, usinagem.
- Processos de união e adição de material: soldagem, solda fria (*soldering*), revestimento (*cladding*), adição de elementos de liga.
- Processos de modificação do material: endurecimento, marcação, conformação. /8/

Dentre estas, as principais aplicações industriais do laser são a gravação, o corte e a solda /8, 9/, e nas publicações consultadas, o corte foi o processo que mais se destacou. De acordo com Steen /2/, no início da década de noventa, cerca de 80% dos lasers industriais do Japão eram utilizados no corte. Gabdzyl /10/ coloca o corte como sendo a maior aplicação para os lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência, representando cerca de 75% de todas as aplicações.

Tabata /11/ Classifica a aplicação do laser de acordo com a sua potência, sugerindo para o corte lasers com potência a partir de 1 kW, para a soldagem aqueles que excedem 3 kW e para o tratamento de superfícies fontes com mais de 5 kW.

Steen /2/ mostra a densidade de energia presente na soldagem a laser comparando-a a outras fontes de energia térmica empregadas nos processos de soldagem. Veja a Tabela 1.1.

*Tabela 1.1 - Comparação entre o laser e outras fontes de energia térmica.*

Solda a arco voltaico	$5 \times 10^6$ a $10^8$ W/m <sup>2</sup>
Plasma	$5 \times 10^6$ a $10^{10}$ W/m <sup>2</sup>
Laser e feixe de elétrons	$10^{10}$ a $10^{12}$ W/m <sup>2</sup>

Hoje em dia a tecnologia do laser cobre uma vasta faixa de aplicações e formas em áreas importantes da tecnologia de manufatura moderna. A história do processamento por laser iniciou há poucas dezenas de anos, ao passo que as técnicas concorrentes mais jovens contam com cinquenta ou mais anos de desenvolvimento. O processamento de materiais por laser pode se mostrar uma atrativa alternativa aos processos convencionais de manufatura, uma vez que em muitos casos combina uma boa relação custo/benefício com alta qualidade. Os diferentes processos estão em vários estágios de desenvolvimento e exploração industrial. Algumas aplicações foram propostas, mas não encontraram exploração significativa porque não oferecem vantagens suficientes sobre as tecnologias concorrentes, ou porque não estão ainda totalmente desenvolvidos e validados para o uso industrial. Sua aplicação na indústria também é ditada por novos desenvolvimentos de fontes laser melhoradas ou com melhor relação custo/benefício. Por exemplo, lasers de Nd:YAG de alta potência com fibras óticas permitem uma fácil integração à sistemas de manufatura. /8/

O presente trabalho é resultado do encontro do desafio apresentado pelo estudo de processos de fabricação novos e ainda não tão vastamente difundidos, como é o caso do laser, com a necessidade da empresa Nano Endoluminal S.A. de avaliar as novas possibilidades que surgiriam com o uso desta fonte de energia na fabricação de precisão, visando a confecção de dispositivos médicos endoluminais.



---

Assim, a Universidade Federal de Santa Catarina, representada pelo Laboratório de Mecânica de Precisão, encontrou nesta empresa, representante da indústria de dispositivos médicos endoluminais, uma parceira no estudo desta fascinante ferramenta feita de luz.

Além do apoio da empresa, completou este trabalho uma cooperação com o Instituto de Fabricação (Institut für Fertigung – IFF) da Universidade Técnica de Ilmenau – TU-Ilmenau – que proporcionou ao mestrando a oportunidade de realizar os experimentos envolvendo o corte a laser e uma revisão bibliográfica.

## ***1.2 Objetivos***

Com base no que foi exposto acima estabeleceu-se como objetivo para este trabalho de mestrado: **Um estudo teórico do laser como ferramenta de fabricação e uma avaliação prática de seu emprego na confecção de próteses endoluminais.**

O estudo teórico envolve os conceitos básicos, o fenômeno, o equipamento, suas principais aplicações e processos industriais, enquanto o estudo prático avalia o uso desta ferramenta na confecção das próteses, de acordo com as necessidades expostas pela empresa conveniada.

O estudo prático começou pelo corte de chapas finas de aço inoxidável, buscando subsídios para a avaliação das possibilidades e dificuldades envolvidas na usinagem de *stents* de pequenas dimensões, o que de fato suscitou as primeiras discussões que deram origem ao tema do presente trabalho. A escolha das chapas se deu pela impossibilidade da manipulação de tubos de pequenas dimensões com os equipamentos que seriam utilizados. Acreditava-se que o estudo do corte no plano seria suficiente para criar uma boa base de conhecimento sobre o tema, facilitando a tomada de decisão no projeto a ser desenvolvido futuramente.

Além do corte, uma avaliação dos projetos de dispositivos endoluminais e processos correntes na empresa sugeriu a possibilidade de se empregar o laser em duas outras frentes, a união de arames por solda e a furação de filmes de ptfе.

A união de arames de NiTi é um problema antigo e recorrente entre os fabricantes de endopróteses vasculares, tendo dado origem a diversas possíveis soluções. Diversas delas já foram estudadas e inclusive aplicadas em produtos do mercado, sem contudo resolver de forma satisfatória o problema e apresentar uma convergência entre os fabricantes. Isto motivou a verificação das possibilidades também do processo de soldagem.

A necessidade da furação surgiu de uma inovação em um projeto de endoprótese vascular que implica na confecção de furos em filmes de ptfе. As características desejadas seriam difíceis de obter por processos mecânicos e por isso o laser surgiu como uma ferramenta de remoção térmica alternativa a eles, apresentando bons resultados, como pode ser visto no capítulo 9.2.

---

## 2 Histórico

Na origem do desenvolvimento do laser estão os estudos desenvolvidos por Albert Einstein no início do século XX sobre o comportamento dos elétrons. Mais precisamente em um artigo publicado em 1916 predizendo a existência do fenômeno da emissão estimulada. Apesar deste fenômeno ter sido comprovado experimentalmente em 1928 por Rudolf Ladenburg, foi somente no início da década de 50 que se começou a pensar seriamente em utilizá-lo de modo prático. /5, 17/

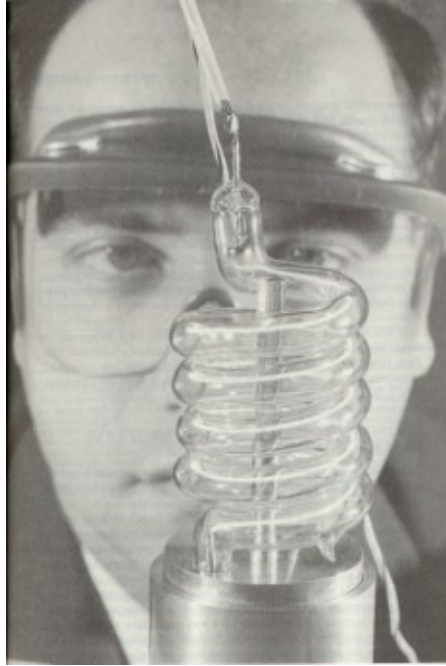
Alguns anos depois, em 1960, em meio ao furor causado no meio científico pelos estudos sobre os masers (MASER – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), é que foi construído o primeiro laser (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

A história da invenção do laser é bastante controversa e junto com o seu desenvolvimento surgiu uma grande disputa judicial pelas patentes referentes ao seu invento. Uma disputa que se estendeu por cerca de três décadas envolvendo alguns dos principais personagens da história do laser. /5, 43/

Dentre as pessoas que contribuíram para esta invenção, sete deles merecem destaque por terem sido os principais personagens desta história. Três deles, os russos Nikolai G. Basov e Aleksander M. Prokhorov, além do americano Charles H. Townes, dividiram o prêmio Nobel de física em 1964./5/

Arthur L. Schavlow também deu grande contribuição ao desenvolvimento do laser. Seu trabalho em parceria com Townes teve amplo reconhecimento e a dupla “Schavlow & Townes” conquistou lugar de destaque na história deste invento. Em 1958 publicaram juntos o conceito de inversão de população, dando um passo decisivo em direção à invenção do laser. Em seguida Schavlow dividiu com Townes a primeira patente americana sobre os fundamentos do laser e, em 1981, foi um dos ganhadores do prêmio Nobel de física por seu estudo da natureza dos átomos e moléculas usando laser./5/

O primeiro a efetivamente construir um laser, contudo, foi Theodore H. Maimann, que na quinta-feira, 7 de julho de 1960, apresentou ao mundo seu laser de rubi. /5, 43/



*Figura 2.1 – Maimann e seu laser de rubi .15/*

Além desses cinco cientistas, não se pode esquecer o controverso Gordon Gould que criou a palavra laser. Seus estudos em espectroscopia ótica combinados com espectroscopia por microondas lhe proporcionaram a base necessária ao desenvolvimento de suas idéias originais sobre a tecnologia laser.

Ele disse que suas primeiras idéias sobre o laser surgiram em um *flash*, em uma noite de 1957. Elas foram registradas em um caderno de notas, sob o título “*Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, tornando-o assim o primeiro a usar o acrônimo hoje familiar a todos nós. Contudo, por um equívoco seu, só fez o pedido de patente em 1959, depois que outros pesquisadores da área já o haviam feito. Fato este que o colocou como um dos protagonistas da disputa judicial pelas patentes do laser que durou décadas. Gould e seu cessionário, Patlex Corporation, hoje, detêm as patentes básicas sobre os amplificadores laser bombeados por meio ótico ou por descarga elétrica. Estes são utilizados em 80% das aplicações industriais, comerciais e médicas atuais dos lasers, como por exemplo os de CO<sub>2</sub> e Nd:YAG. Gould detêm também patentes em aplicações do laser em comunicações por fibra ótica. /5, 12/

E como sétimo personagem, quase que obviamente, dando origem a tudo isso, está o incomparável Albert Einstein, cujos estudos sobre o comportamento dos elétrons publicados no início do século XX foram o primeiro passo no desenvolvimento do laser.

A tabela a seguir resume alguns dos principais acontecimentos que levaram à criação e disseminação do uso do laser.

*Tabela 2.1 – Cronologia dos principais acontecimentos na história do laser.*

1916	Teoria da emissão estimulada de Albert Einstein;
1928	Experimentos de Rudolf Ladenburg confirmam a teoria de Einstein;
final de 1957	Gordon Gould escreveu suas idéias sobre o laser – incluindo uma definição do laser <i>como "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"</i> . Seu trabalho não foi reconhecido e até hoje existem controvérsias sobre sua contribuição;
1958	Shawlov & Townes foram os primeiros a publicar oficialmente uma proposta detalhada para a construção de um laser /1/;
16/05/1960	Primeiro Laser a funcionar. Um laser de Rubi. T. H. Maimann. Hughes Laboratories, USA;
A partir de 1963	Início da utilização do laser do estado sólido, em regime pulsado, para se trabalhar materiais;
1968	Primeiro laser CO <sub>2</sub> a trabalhar continuamente (corte, solda, tratamento de superfícies, revestimento, remoção);
1969	Primeiro laser CO <sub>2</sub> comandado numericamente;
Década de 70	disseminação da utilização de fontes do tipo Nd:YAG.

---

No início o laser era considerado “uma solução procurando por um problema”, mas esta situação não durou muito tempo. Logo surgiram os primeiros estudos (voltados à telecomunicação) e em pouco tempo inúmeras aplicações para o laser foram surgindo. A aplicação do laser na área odontológica, por exemplo, já começou a ser pesquisada nos primeiros anos da década de sessenta /13/ e nas décadas seguintes o emprego do laser cresceu ininterruptamente, ganhando mais espaço a cada ano.

Um outro exemplo é a indústria de matrizaria, onde o laser é um grande passo em relação aos métodos tradicionais e está sendo rapidamente aceito pelos fabricantes de moldes e matrizes porque pode cortar, soldar, furar, marcar, escrever, tratar termicamente e gravar precisa e rapidamente; e isso com uma versatilidade não alcançada antes. /14/

Outras aplicações são: Na indústria, microsolda, solda de materiais diferentes, endurecimento de superfícies, *cladding* (com diodos de alta potência), limpeza de superfícies pintadas, simulações para treinamentos. Na metrologia, espectometria, monitoramento de gases em um alto-forno, análise multielementos de solos contaminados com metais pesados, detecção de defeitos de superfície em lâminas trabalhadas a quente. /22/ Na medicina, cirurgias (oftalmológicas), tratamentos de pele (remoção de manchas e tatuagens).

De acordo com Hecht /5/, em 1980 o mercado de laser e relacionados atingiu US\$ 1 bilhão pela primeira vez. No entanto, apesar desta cifra impressionar, isto ainda é muito pouco considerando-se o seu potencial.

O Brasil, no que diz respeito à utilização do laser, pode-se dizer que ainda está dando seus primeiros passos. Não foram encontrados dados precisos, mas segundo Tanio /15/, estimativas sugerem que, considerando somente o corte com lasers de CO<sub>2</sub>, o mercado potencial alcançou a casa dos US\$ 300 milhões em 2000. Isso pressupõe um mercado considerável, posto que temos ainda outros tipos de fonte e aplicações como a soldagem, gravação e aplicações médicas, entre outras.

Estima-se que a indústria brasileira, no final do ano 2000, dispunha de cerca de 230 máquinas de corte a laser instaladas, sendo a maior parte lasers de CO<sub>2</sub>. /15/ Apesar da ausência de dados, sabe-se que a indústria automobilística é usuária da solda a laser e, cada vez mais,

---

observa-se a utilização de equipamentos laser na área médica (oftalmologia, dermatologia, cirurgias).

Já na área acadêmica existem poucos grupos de pesquisa estudando o laser como ferramenta para a indústria, mais comuns são as pesquisas sobre suas aplicações na área médica. Além disso, sabe-se que alguns grupos de pesquisa, há mais de duas décadas dedicam-se à pesquisas sobre a construção de amplificadores laser, tendo desenvolvido tecnologia para a construção de lasers nacionais. Contudo estes estudos surgiram com fins militares e isto fez com que os processos industriais assistidos por laser somente há pouco tempo começassem a ser objeto de estudo. /16/ E assim sendo, temos neste um grande campo de pesquisa, um imenso potencial a ser explorado e um longo caminho a ser percorrido em nosso país.

### 3 O que é um *laser* e como funciona

Antes de entrar propriamente nos conceitos e fenômenos relacionados ao laser é interessante situá-lo frente a outros tipos de radiação, afinal convivemos com elas em nosso dia-a-dia e a comparação certamente facilitará sua compreensão.

Com este intento, a Figura 3.1 mostra o espectro das radiações eletromagnéticas, situando nele a região de laser. Da esquerda para a direita a área destacada é ampliada, mostrando em detalhe a região de laser e, em seguida, a região visível do espectro.

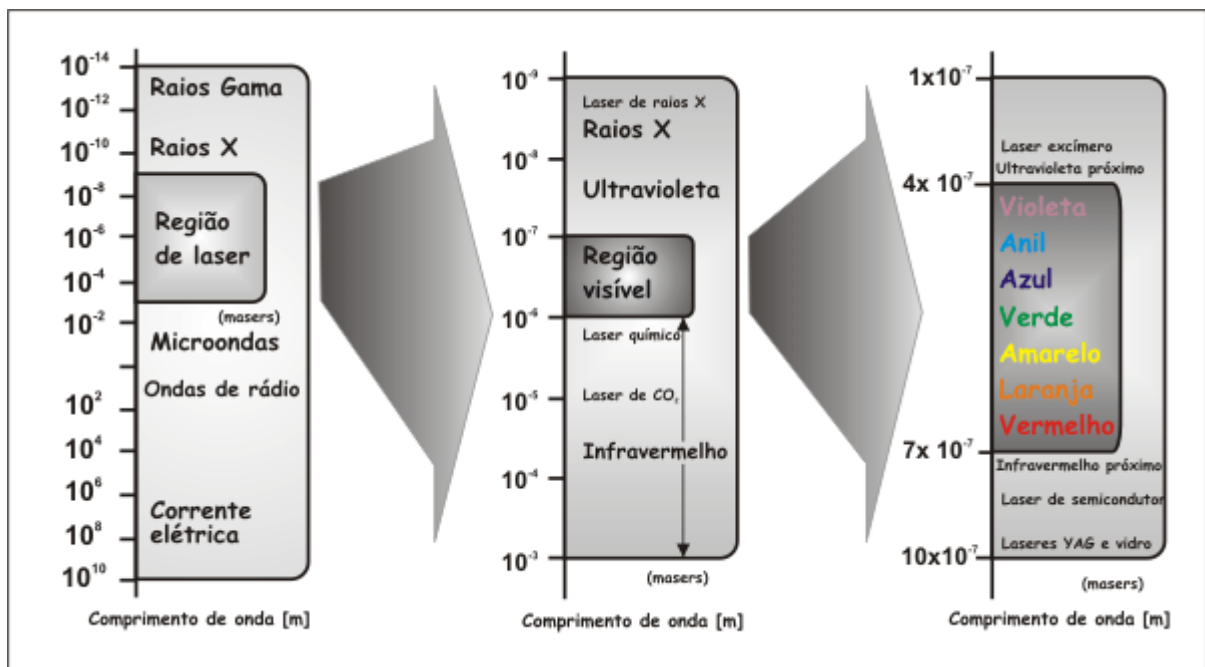


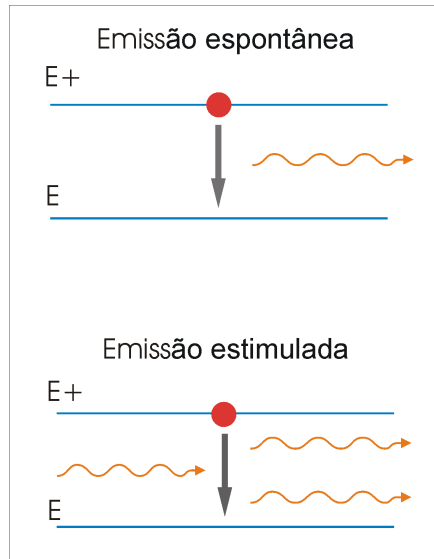
Figura 3.1 – Espectro das radiações eletromagnéticas. /5/

#### 3.1 Dois conceitos básicos

##### 3.1.1 Emissão espontânea e emissão estimulada

Como já dito, o princípio de funcionamento do laser remonta os estudos feitos por Albert Einstein, no início do século XX, sobre o comportamento dos elétrons e é baseado no conceito de emissão estimulada. /17/ Assim, o estudo do laser implica em se conhecer este princípio, que por sua vez é explicado a partir da emissão espontânea.





**Figura 3.2 - Emissão espontânea e emissão estimulada. /20/**

A emissão espontânea é o que acontece quando, em um átomo, um elétron decai de um nível de maior energia (órbita) para outro de menor energia. Este elétron emite um fóton e a energia contida nele corresponde à diferença entre os dois níveis. Esta diferença é definida por  $Q = h\nu = E_+ - E$ . /1, 18/ Veja na parte superior da Figura 3.2.

Onde:

$h$  = Constante de Planck =  $6,623 \cdot 10^{-34}$  J.s

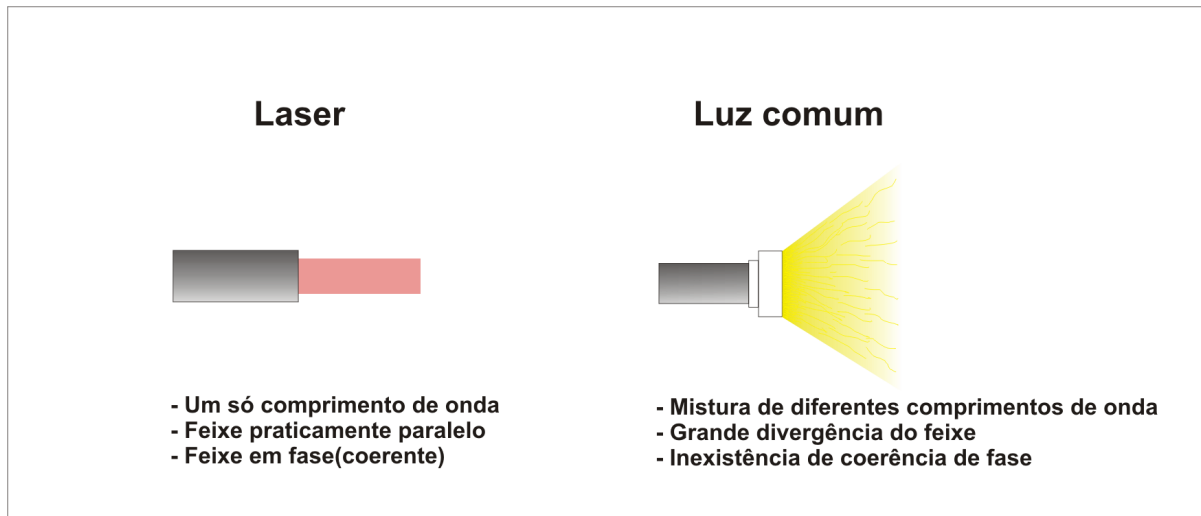
$\nu$  = frequência da radiação emitida =  $c/\lambda$  = (velocidade da luz =  $2,998 \cdot 10^8$  m/s)/(comprimento de onda do laser em m)

$E_+$  = nível mais alto de energia

$E$  = nível mais baixo de energia

Passemos agora à emissão estimulada. Com o auxílio de um fóton, a transição do nível de energia  $E_+$  para o nível  $E$ , pode também ser provocada, como mostrado na parte inferior da Figura 3.2. O fóton incidente estimula a mudança de nível, o que implica na emissão de um novo fóton. Os dois fótons resultantes deste evento têm, cada um, energia  $h\nu$ , propagam-se em fase e sua frequência e comprimento de onda são iguais.

Deste modo, diz-se que as principais características que diferenciam a luz de um laser da luz comum são o monocromatismo (comprimento de onda e frequência iguais), coerência (mesma fase), pequena divergência e alta intensidade do feixe de luz. /1, 5, 6, 18, 19/ Veja a Figura 3.3



*Figura 3.3 – Comparação entre as características que diferenciam a luz de um laser da luz comum. /6/*

De fato a luz de um laser real não é perfeitamente monocromática, tampouco perfeitamente coerente. Porém os desvios são suficientemente pequenos para serem negligenciados. /18/

### **3.1.2 Inversão de população**

O fenômeno da emissão estimulada por si só não é suficiente para que haja a emissão de luz em uma fonte laser. O pressuposto para que ela ocorra é que uma forte luz, descarga elétrica, choques mecânicos ou reação química, estimulem as partículas (átomos ou moléculas) de um meio ativo apropriado. Com isso, cresce o conteúdo de energia do material, o que é chamado de estado excitado (mais alto nível energético). Enquanto, contudo, houver menor número de partículas neste estado do que no estado fundamental, ocorrerá neste meio a absorção da energia (vide parte superior da Figura 3.4), seja ela de uma fonte luminosa, elétrica ou química. Já quando o número de partículas excitadas se tornar maior do que o número de partículas não excitadas (nível energético inferior), como na parte inferior da Figura 3.4, ocorrerá a emissão estimulada. Este é o fenômeno que permite a emissão de luz em um laser e é chamado Inversão de População. /20/

Em outras palavras, enquanto o número de partículas no estado excitado é menor do que o número de partículas no nível de energia inferior ocorre absorção da luz. E a partir do

momento em que o número de partículas excitadas suplanta o daquelas que se encontram no nível de energia inferior (inversão de população), ocorre a emissão estimulada. /1/

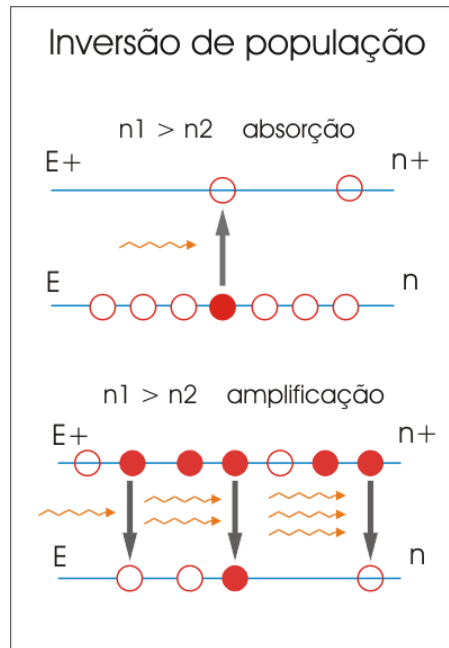


Figura 3.4 - Inversão de população.

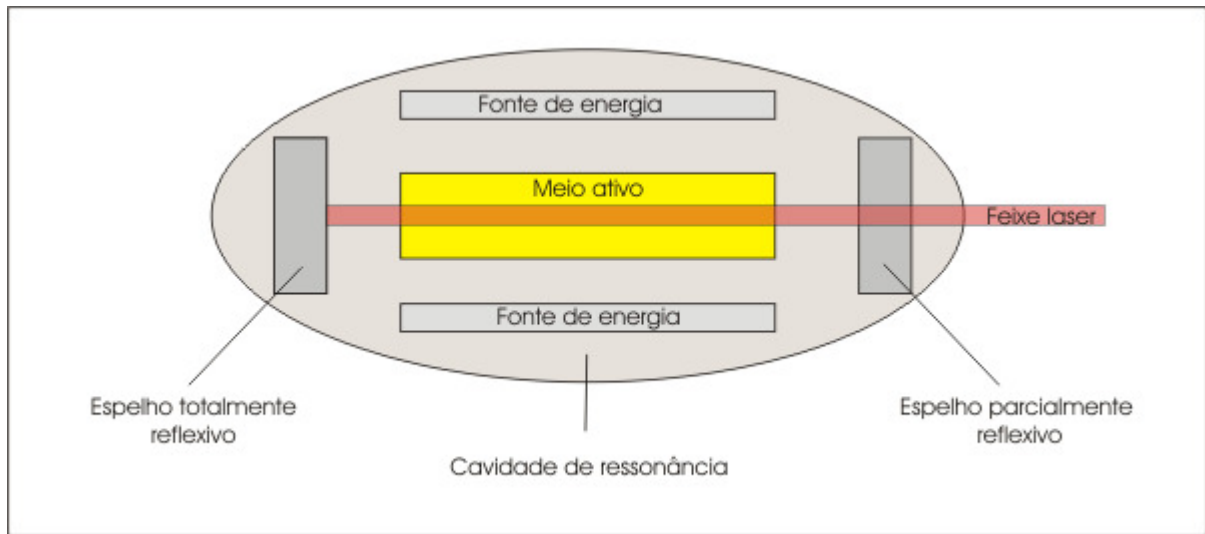
### 3.2 Principais componentes de uma fonte

Uma fonte de laser, como pode ser visto esquematicamente na Figura 3.5, tem três componentes principais: a sua fonte de energia (excitação), o meio ativo (meio amplificador) e o ressonador (ou cavidade de ressonância). /2, 6, 18, 23, 24/ Os outros componentes da fonte variam de acordo com a forma construtiva, regime de operação (contínuo ou pulsado) e características desejadas para o feixe. /6, 21/

A primeira definição publicada pela dupla Schawlow & Townes, em 1958, apud McGeough /1/, para uma fonte laser é a seguinte:

*“Este instrumento é composto de dois espelhos semi-prateados, posicionados com alto grau de paralelismo, entre os quais um feixe de luz monocromático é submetido a diversas reflexões. A cavidade entre os dois espelhos deveria ser preenchida com um meio amplificador, moléculas gasosas excitadas a um alto nível de energia.”*

Esta seção explica o funcionamento dos três componentes principais de uma fonte e pretende dar ao leitor o conceito do processo de geração de um feixe de luz laser.



*Figura 3.5 – Esquema de uma fonte laser.*

### 3.2.1 Meio ativo

Também chamado de meio amplificador, é onde ocorre a inversão de população que permite a emissão e a amplificação do feixe de luz. Nele é determinado o comprimento de onda do laser e, por consequência, o menor diâmetro do feixe emergente (que é proporcional ao comprimento de onda). /2, 6, 23/

Podendo ser sólidos, líquidos ou gases, alguns exemplos de materiais utilizados como meio ativo em fontes laser são:

- Gases: CO<sub>2</sub>, argônio, hélio-neônio, excímeros – KrF, XeCl, HF, CO; /10/
- Líquidos: corantes orgânicos diluídos em solventes líquidos como a Rodamina 6G e a Cumarina 2; /13/
- Sólidos: isolantes dopados, como o rubi (Cr<sup>3+</sup>) e os cristais de Nd:YAG, Ho:YAG e Nd:Vidro, ou ainda semicondutores, como os lasers de diodo /1, 4, 13, 22/

### 3.2.2 *Cavidade de ressonância*

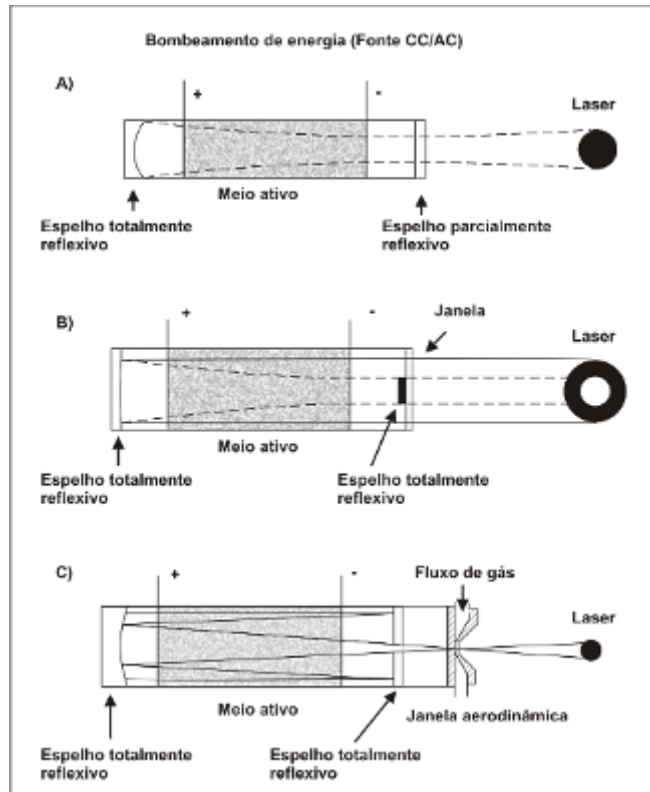
A cavidade de ressonância, ou ressonador, é responsável pela amplificação da luz no laser. Em sua forma construtiva básica, veja a Figura 3.5, a luz é refletida entre dois espelhos de alta reflexão posicionados frente-a-frente, nas extremidades do meio ativo, de maneira tal que a luz entre eles refletida percorre um longo caminho dentro do meio ativo. É importante ressaltar que este caminho, o comprimento da cavidade de ressonância, é uma característica importante e é igual a um múltiplo inteiro da metade do comprimento de onda do laser. /1, 4, 19/

Um dos espelhos reflete 100% da luz que nele incide, enquanto o outro permite a passagem de parte do feixe de luz, refletindo, geralmente, de 20 a 98% da luz para dentro da cavidade novamente. /18/ Vide Figura 3.5. E é esta parte que “escapa” da cavidade de ressonância que é o feixe de laser a ser utilizado. Estes espelhos podem ser tanto planos como côncavos. Contudo, o uso de espelhos planos requer maior precisão de posicionamento em sua montagem, pois estes devem estar precisamente alinhados para evitar que o feixe de luz se disperse. Já a forma construtiva dos espelhos côncavos facilita o seu posicionamento devido ao fato de que eles focalizam o feixe de luz, admitindo pequenos desalinhamentos. /2, 19, 20/

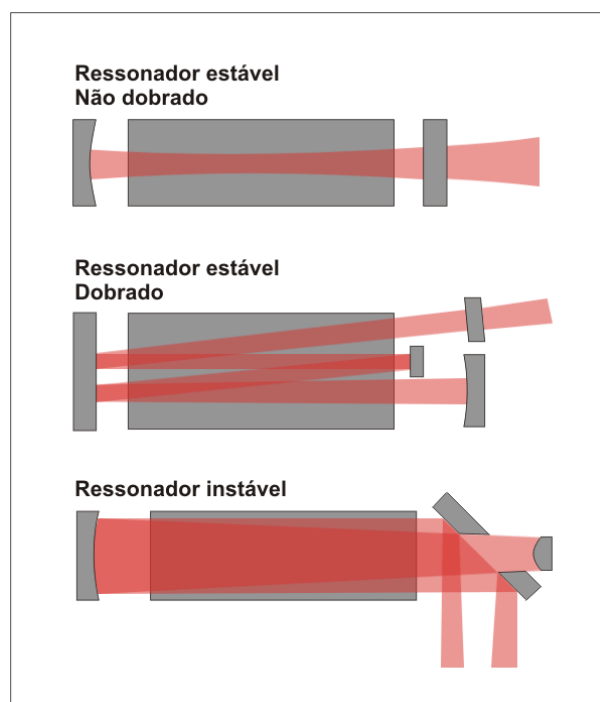
A Figura 3.7 e a transcrição abaixo ilustram o modo como as formas construtivas de cavidades de ressonância são classificadas no texto de König /19/:

*“Diferenciam-se a princípio dois tipos de ressonador. No ressonador estável, os espelhos provocam uma contração do feixe em direção ao eixo de simetria, enquanto no ressonador instável uma divergência ocorre. O caso-limite é ilustrado pelo Ressonador-Fabry-Perot, no qual em um caso ideal forma-se um feixe de raios paralelos. No caso de não existir perda os raios permanecem dentro do ressonador estável, enquanto no ressonador instável sua saída é permitida.”*

*“Em razão disso a saída do feixe de luz utilizável ocorre de maneiras distintas. No caso do ressonador estável se faz necessário um espelho semi-transparente, que permite a saída da luz do sistema ressonante em uma quantidade que não prejudique a continuidade do processo de obtenção da luz do laser. O ressonador instável é reconhecido por sua construção que divide o feixe, permitindo a saída de parte dele, que pode então ser conduzido ao local de utilização.”*



**Figura 3.6** - Formas construtivas básicas de cavidades: A) Cavidade estável; B) Cavidade instável; C) Cavidade estável com janela aerodinâmica. /2/



**Figura 3.7** – Exemplos de formas construtivas de cavidades de ressonância (típicas de lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência). /19/

### **3.2.3 Fonte de energia**

Também chamada de bombeamento de energia, é ela que conduz energia ao meio ativo, provocando a inversão de população e permitindo assim a emissão do feixe de luz. Dependendo do tipo de meio ativo utilizado são empregados como fonte de energia principalmente os meios ótico (lâmpada de flash ou arco e diodo laser) e elétrico (descarga elétrica). /1, 2, 19, 22/

A forma do bombeamento de energia no meio ativo é definida pelo seu estado. Muitos meios ativos gasosos, como no caso do laser de CO<sub>2</sub>, são excitados com o auxílio de uma descarga elétrica - de forma semelhante ao que ocorre em uma lâmpada fluorescente. Com isso, energia é transferida aos elétrons livres, fazendo com que sua própria energia seja liberada através de colisões com átomos (ou moléculas). Laseres de estado sólido ou líquido podem ser excitados somente por meio óptico. A luz de uma lâmpada (é comum o uso de lâmpadas de flash de xenônio e de alta pressão de mercúrio /1/) ou um outro laser (frequentemente de diodo) é absorvida no meio ativo e a energia emitida novamente em um comprimento de onda mais longo. /22/

## **3.3 Características e propriedades do feixe**

### **3.3.1 Comprimento de onda**

Sendo a principal característica do laser, o comprimento de onda,  $\lambda$ , é determinado pelo meio ativo na fonte do laser. Cada tipo de laser tem seu comprimento de onda, sendo que alguns emitem em dois ou mais valores, como por exemplo o laser de vapor de cobre, que emite luz verde e amarela. Os laseres mais usados na indústria, o de Nd:YAG e o de CO<sub>2</sub> emitem sua radiação com comprimento de onda na região do infra-vermelho, fora do espectro visível (por isso a necessidade de cuidados intensos no seu manuseio).

O comprimento de onda tem forte influência no comportamento da interação entre o laser e a peça a ser trabalhada. Em geral os maiores comprimentos de onda têm maior dificuldade em ser absorvido pelo material onde incidem, veja mais comentários no capítulo 6.

### 3.3.2 Raio do feixe

Neste texto denominaremos  $r_0$  o raio do feixe medido no plano focal, cintura do feixe. Veja a Figura 3.8. É importante notar que quando se fala em raio do feixe pode-se estar referindo tanto àquele que sai da fonte como ao que atinge a peça depois de ter passado pela lente do cabeçote (de corte, de solda, ...). Encontraremos um plano focal antes e outro depois dela. O  $r_0$  na região de trabalho, depois do cabeçote, é dependente do raio do feixe antes do cabeçote, da divergência e da distância focal do elemento óptico no cabeçote. /19/

Em uma posição qualquer do feixe, seu raio será representado simplesmente por  $r$  e no ponto que delimita a distância de Rayleigh, veja o item 3.3.5, será chamado de  $r_z$ . Alguns autores, como Steen /2/ e Bauer /4/ utilizam a letra  $w$  ao invés do  $r$ .

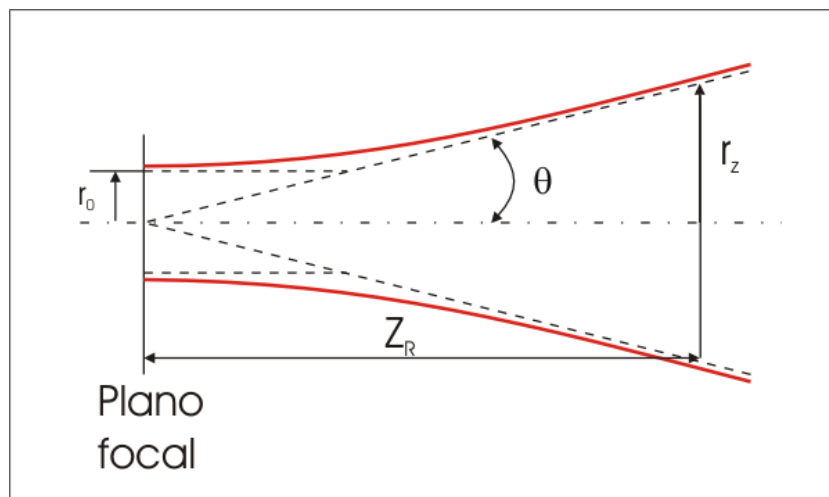


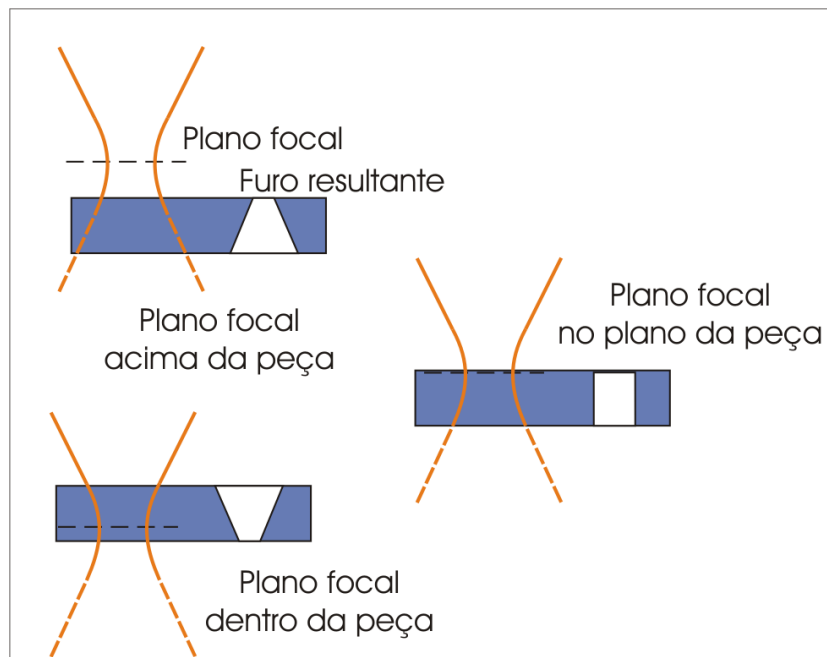
Figura 3.8 – Grandezas do feixe. Raio no foco  $r_0$ , divergência  $\theta$ , distância de Rayleigh  $Z_R$ . /20/

### 3.3.3 Foco

O foco (ponto focal) é o ponto do feixe de laser de menor raio e conseqüentemente maior concentração de energia. Sua posição em relação à peça é de extrema importância para o processamento de materiais com laser, pois esta define o tamanho da área onde a energia do feixe será distribuída, ou seja, a densidade de energia. Além de definir a forma como esta energia incide sobre a peça.



Seu posicionamento varia de acordo com o processo e a espessura a ser trabalhada. No caso do corte, em chapas finas o foco é geralmente posicionado sobre a superfície da peça, enquanto que para chapas de maior espessura este é posicionado um pouco abaixo da superfície. /20/ A Figura 3.9 ilustra o furo (vale o mesmo para o corte) resultante como função da posição do foco em relação a superfície da peça.



**Figura 3.9** – Resultado do corte ou furação em função da posição do foco. /20/

### 3.3.4 Divergência

A divergência é o aumento que ocorre no diâmetro do feixe de laser à medida que este se afasta da fonte. No caso do laser, por ser esta uma luz bastante colimada, os valores de divergência são muito pequenos.

Segundo Guggolz /20/, o ângulo de divergência  $\theta$  é definido como sendo a metade do ângulo do cone formado pelo feixe de luz, tendo em geral valores em torno de 1-5 mrad (0,06°-0,30°).

A divergência teórica de um laser pode ser calculada pela seguinte equação: /4, 1/

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot r_0}$$

(Eq. 3.1)

onde:

$r_0$  = Raio do feixe (modo gaussiano)

$\lambda$  = Comprimento de onda

Esta equação vale para um feixe de modo Gaussiano, vide item 3.3.8, enquanto que para feixes multimodo os valores de divergência são sempre maiores. /4/

### 3.3.5 *Distância de Rayleigh*

A distância de Rayleigh,  $Z_R$ , referenciada por alguns como profundidade de foco, representa uma medida para a variação do diâmetro do feixe na região vizinha ao foco. /4/

Ela representa o ponto do feixe de luz onde seu diâmetro dobra de tamanho em relação à posição focal e, respectivamente, a densidade de energia cai pela metade do seu valor no foco. /4/ Veja a Figura 3.8.

O valor da distância de Rayleigh é definido pela (Eq. 3.2 abaixo:

$$Z_R = \frac{\pi \cdot r_0^2}{\lambda} = \frac{r_0}{\theta}$$

(Eq. 3.2)

onde:

$r_0$  = raio do feixe medido no foco

$\lambda$  = comprimento de onda do laser

$\theta$  = divergência do feixe (modo gaussiano)

### 3.3.6 Qualidade do feixe (Número característico e Produto dos parâmetros do feixe)

Estes parâmetros indicam a qualidade de foco que pode ser obtida de um laser real em comparação com o modo gaussiano (TEM<sub>00</sub>). Valores típicos de K (número característico) encontram-se entre 0,01 e 1, sendo que os maiores valores representam mais alta qualidade do feixe. O valor 1 é relativo a um modo gaussiano. /4, 20, 24/

Os autores americanos, como Steen /2/ e Powel /23/, e os japoneses, como Tabata /11/, costumam se referir à qualidade do feixe como M<sup>2</sup>. Sendo este igual ao inverso de K, como mostrado na (Eq. 3.6). Assim, quanto menor for o valor de M<sup>2</sup>, maior a ordem do modo do feixe e menor a sua qualidade.

$$K = \frac{\lambda}{\pi \cdot q} \text{ (Número característico)}$$

(Eq. 3.3)

Sendo que:

$$q = r_0 \cdot \theta^{\text{real}} \text{ (Produto dos parâmetros o feixe)}$$

(Eq. 3.4)

onde:

$\theta^{\text{real}}$  = valor medido da divergência do feixe

$$M^2 = \frac{\theta^{\text{real}}}{\theta^{\text{Gaussiano}}} \text{ (veja (Eq. 3.1))}$$

(Eq. 3.5)

$$M^2 = \frac{1}{K}$$

(Eq. 3.6)

### 3.3.7 *Número de Fresnel*

O número de Fresnel de um ressonador laser é um grupo adimensional que relaciona o raio da abertura de saída com seu comprimento e o comprimento de onda da radiação laser, veja (Eq. 3.7). /2, 22/

$$F = \frac{r'^2}{\lambda \cdot L}$$

(Eq. 3.7)

onde:

$r'$  = Raio da abertura de saída;

$L$  = comprimento da cavidade;

$\lambda$  = comprimento de onda.

Steen /2/ diz que ele é igual ao número de franjas que poderiam ser vistas na abertura de saída do ressonador se o espelho da parte posterior fosse uniformemente iluminado.

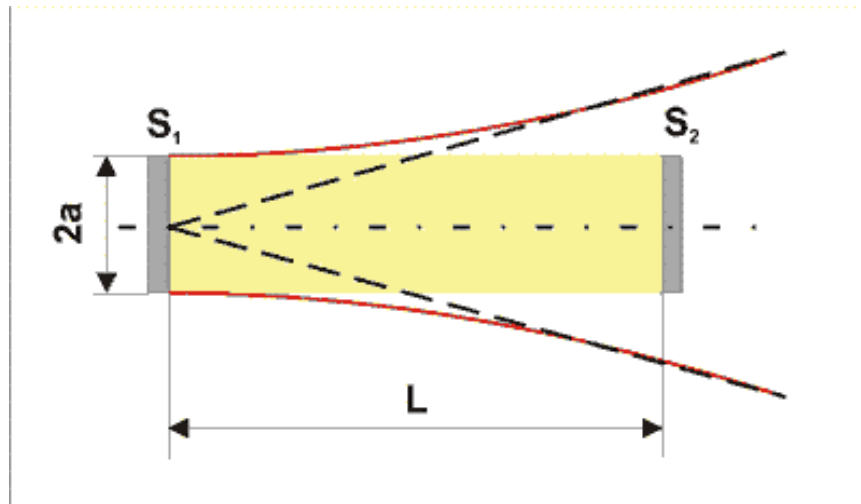
Assim, um pequeno número de Fresnel resulta em um modo (veja a seção 3.3.8) de baixa ordem e números grandes resultam em modos de mais alta ordem, ou seja, de menor qualidade. O modo fundamental é obtido com valor do número de Fresnel próximo a um. Apesar disso, uma cavidade com um número de Fresnel maior pode ser adequada à obtenção de feixes com modos de menores ordens através de variações no design do espelho. /2, 22/

Bauer /4/ explica o número de Fresnel com o parágrafo abaixo, ilustrado na Figura 3.10:

*“Uma onda refletida no espelho S1 de raio  $r$  será difratada como se passasse por um diafragma. Assim, o espelho S2 não alcançará mais toda a onda refletida. Como medida para a perda por difração utiliza-se o número de Fresnel. Ele mostra o número de ordens de difração que atingem o espelho S2. Quanto maior o número de Fresnel, menor a perda por difração.”*

A forma construtiva da cavidade também pode influenciar o número de Fresnel. Em uma cavidade confocal por exemplo, o raio de curvatura do espelho influencia a difração das ondas refletidas. Assim, se a compararmos com uma cavidade Fabry-Perot teremos valores diferentes de perda por difração. Segundo /Bauer/ vale a regra da semelhança que diz que

ressonadores do mesmo tipo, com o mesmo número de Fresnel, apresentarão a mesma perda por difração.



**Figura 3.10** – A onda difratada no espelho S1 não será mais totalmente refletida pelo espelho S2. /4/

### 3.3.8 Modo de distribuição de energia

Sendo o laser um oscilador ótico, quando está oscilando as ondas eletromagnéticas geram, através de interferências desenvolvidas entre os espelhos da cavidade de ressonância, frequências naturais definidas, cuja distribuição de amplitudes e fases formam ondas estacionárias. A forma destas ondas estacionárias depende da geometria da cavidade e o padrão formado por elas é chamado de modo eletromagnético. /2, 19, 22/

A este estudo interessa o Modo Eletromagnético Transversal, representado por  $TEM_{p1}$ , do inglês *Transverse Electromagnetic Mode*. Sendo que o subscrito  $p$  representa o número de campos nulos radiais e o subscrito  $1$  representa o número de campos nulos angulares. Veja a Figura 3.11. Quanto menor o valor do modo, mais ele se aproximará da distribuição normal.  $TEM_{00}$  representa o modo fundamental (modo gaussiano) cuja distribuição de energia tem uma forma normal gaussiana. É ele que permite o menor diâmetro de foco, e conseqüentemente a maior concentração de energia neste ponto. /1, 2, 4, 22/

O modo fundamental, porém, é observado apenas em lasers com valores moderados de potência nominal (até cerca de 500 W), enquanto que lasers de grande potência apresentam

---

de acordo com a configuração do ressonador uma superposição de diferentes modos, o chamado multimodo. /19/

Neste ponto, por vezes, surge um pouco de confusão devido à forma como os autores apresentam esta informação. O modo pode ser descrito de forma aproximada em coordenadas cartesianas pela função de Gauss-Hermite ou em coordenadas cilíndricas pela função de Gauss-Laguerre. Assim, os subscritos, que são os índices que enumeram a quantidade de campos nulos na seção transversal à direção de propagação do feixe, podem estar fazendo referência tanto às direções X e Y das coordenadas cartesianas, como às direções radial e angular das coordenadas cilíndricas. Para um feixe de seção transversal circular, como na maioria dos casos, a descrição por coordenadas cilíndricas parece mais interessante para representar a ordem do modo deste feixe.

Posto isso, pode-se concordar com Xiao /24/, que diz que o modo é a grandeza que representa a distribuição da energia (variação de sua intensidade) na seção transversal do raio laser.

Lasers com modo de maior ordem têm maiores diâmetros no foco e, conseqüentemente, menor densidade de energia.

Com relação aos processos, pode-se dizer que, para o corte e a furação, melhores resultados são obtidos com o modo próximo ao fundamental, enquanto que para processos como a soldagem ou o tratamento de superfícies, que não necessitam tão alta densidade de energia, lasers com valores de modo de maior ordem podem ser utilizados.

No corte, o modo Gaussiano (TEM00) é adequado ao corte de chapas finas (< 3mm), enquanto um feixe multimodo de baixa ordem (TEM01) é necessário para o corte de chapas mais grossas. O feixe de modo Gaussiano é focalizado no menor *spot* circular, o que o torna efetivo para a estreita largura da fenda do corte de chapas finas. Por outro lado, o multimodo de baixa ordem não focaliza um *spot* tão pequeno quanto o feixe de modo Gaussiano, mas é focalizado em um *spot* circular de bordas afiadas. Isto é adequado para o corte preciso de chapas grossas porque uma fenda de corte um pouco mais larga é necessária para que o gás de corte flua através dela. /11/

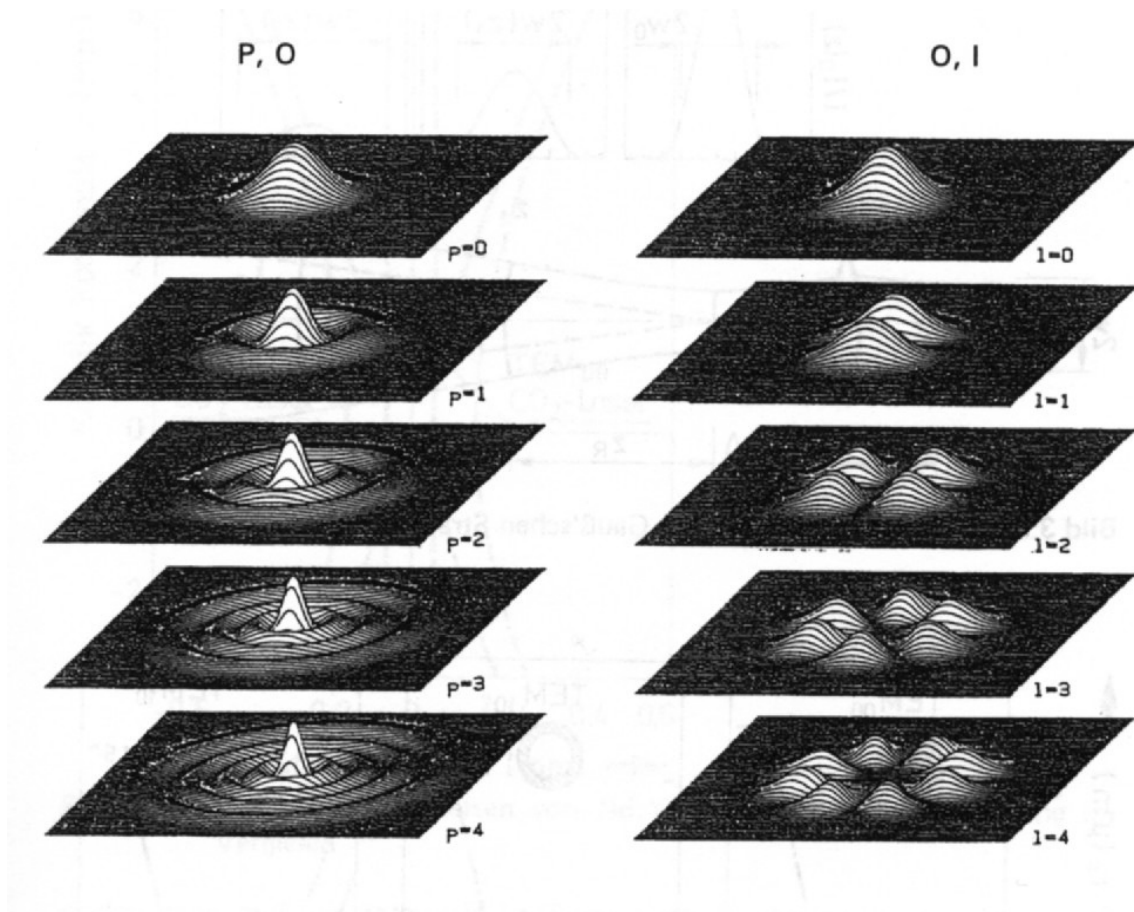


Figura 3.11 – Modo eletromagnético transversal.

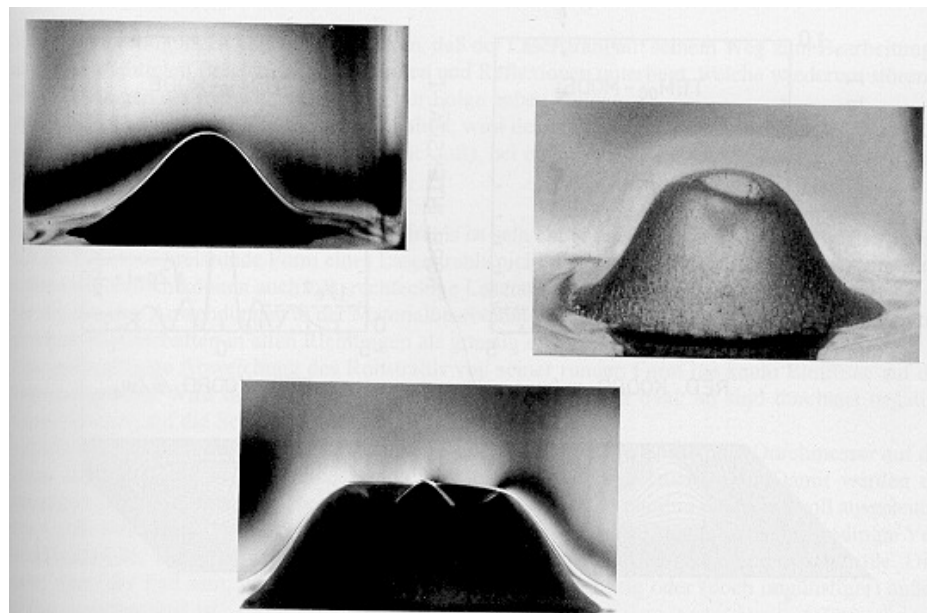


Figura 3.12 – Exemplo dos modos  $TEM_{00}$  acima à esquerda,  $TEM_{01}$  acima à direita e  $TEM_{10}$  abaixo, gravados em plexiglass. /6/

### 3.3.9 Regime de trabalho

No trabalho com laser o regime utilizado pode ser tanto o contínuo como o pulsado. /25/ No primeiro, o feixe incide sobre a peça sem interrupção durante o processo (o que acarreta uma grande carga térmica) e a potência de trabalho é geralmente controlada como um percentual da potência nominal. Já no segundo caso a incidência do feixe sobre a peça é interrompida de forma cíclica e modula-se a intensidade (amplitude) de energia e a duração do pulso. Neste caso a frequência máxima é limitada pela capacidade da fonte laser. A Figura 3.13 ilustra as grandezas que definem a forma e as características dos pulsos. /6, 25/

Assim sendo, o regime pulsado permite o trabalho com valores mais baixos de potência média incidindo sobre a peça, mesmo em casos onde a potência de pico no pulso é muito alta, diminuindo assim a exigência térmica sobre a peça, veja Figura 3.13. Isto faz com que este regime de trabalho se preste às situações onde se quer minimizar as chances de ocorrência de queima, modificações estruturais e acúmulo de tensões resultantes da carga térmica sobre a peça.

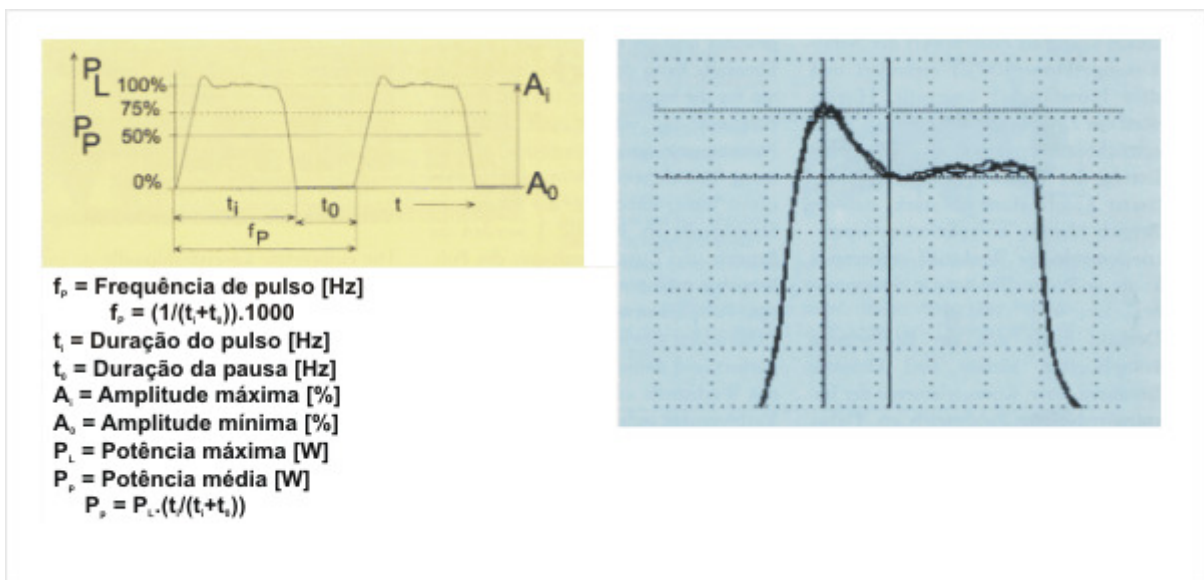
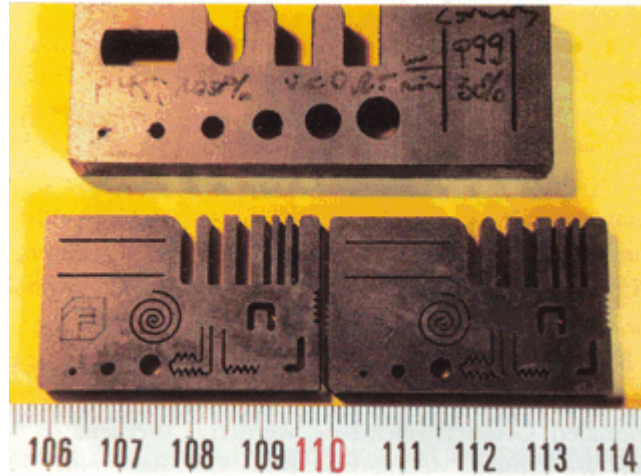


Figura 3.13 – Grandezas do regime pulsado. /25/

Nas figuras seguintes pode-se ver alguns exemplos de peças cortadas com o uso dos regimes pulsado e contínuo. Estas fotos fazem parte de um trabalho publicado por Rzani /25/ em 1999



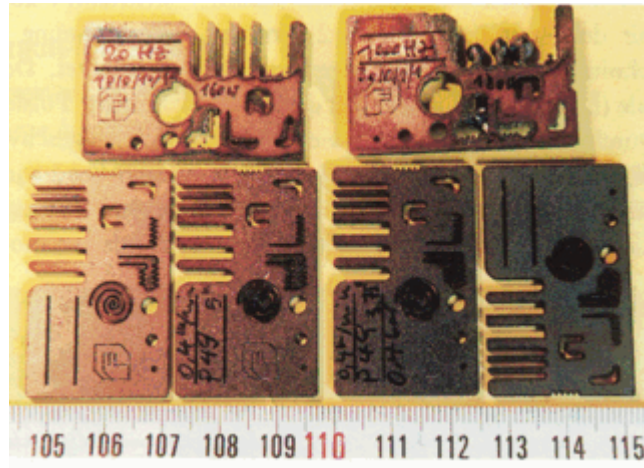
que defende o uso do corte pulsado quando se busca a obtenção de geometrias complexas e alta qualidade dimensional.



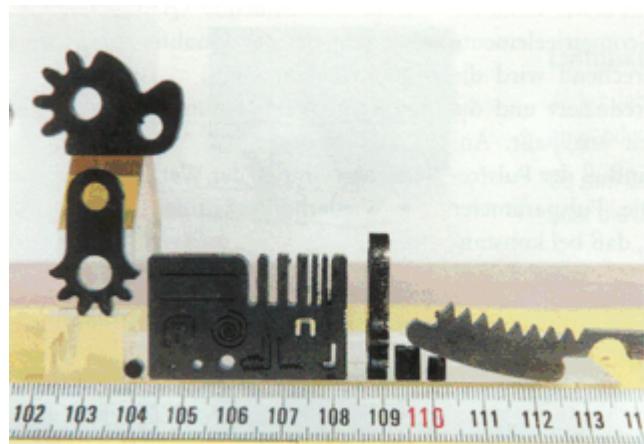
**Figura 3.14** – Exemplo de peças cortadas por Rzani /25/ em seus estudos sobre a influência do regime de trabalho no resultado do corte. Acima o modelo utilizado para peças com espessuras variando entre 6 e 8 mm e abaixo modelo utilizado para peças com até 4 mm de espessura.



**Figura 3.15** – Comparação entre o resultado do corte em regime pulsado – acima – e contínuo – abaixo, para uma peça de aço doce com 8 mm de espessura. /25/



**Figura 3.16** – Influência da frequência de pulso no corte de peças com 1,5 mm de espessura para um mesmo valor de potência. Acima os resultados ruins - à esquerda 20 Hz e à direita 1000 Hz. Abaixo o corte de boa qualidade – 83,3 Hz. /25/



**Figura 3.17** – Exemplo de peças com geometrias complexas e alta qualidade geométrica, cortadas em chapas de aço doce com 4 mm de espessura e em regime pulsado. /25/

O mesmo autor, em outra publicação, faz a seguinte afirmação:

*“A velocidade e a potência média no regime pulsado são menores do que no regime contínuo, assim o resultado do corte no regime pulsado é claramente mais preciso.”/6/*

Assim sendo, conclui-se que a escolha do regime de trabalho representa um compromisso entre produtividade e qualidade. Em cortes menos precisos, pouco complexos e onde uma leve camada de óxido sobre a região de corte não representa um problema, como nos casos em que o laser substitui o corte oxi-acetilênico ou a estampagem, o regime contínuo é a escolha por sua alta produtividade. Vale aqui ressaltar que mesmo não sendo tão preciso quanto o regime pulsado, este processo de corte a laser é mais preciso do que os processos concorrentes.

Usando o mesmo critério, nos casos onde os requisitos determinantes são a alta qualidade dimensional e da superfície de corte ao invés da alta produtividade e também para a produção de peças miniaturizadas, o regime pulsado é a escolha mais adequada.

### 3.3.10 Polarização

O laser, assim como a luz natural, é uma onda eletromagnética. Assim, os vetores das ondas elétrica e magnética oscilam na direção de propagação formando um ângulo reto entre si.<sup>6/</sup> E é a relação entre estes dois vetores que determina a direção de polarização, sendo esta caracterizada pela diferença de fase entre as duas ondas e suas amplitudes. Veja Figura 3.18.

A polarização do feixe de luz influencia a qualidade do corte. Um erro que pode surgir é a variação da largura da fenda de corte quando se percorre um trajeto curvo. Veja a Figura 3.19. Esse erro pode ser evitado modificando-se a polarização do feixe de luz ou com o emprego de estratégias adequadas de processo, por exemplo rotacionando-se a peça durante o processo de modo que a direção de polarização tenha sempre a mesma inclinação em relação à direção de corte.

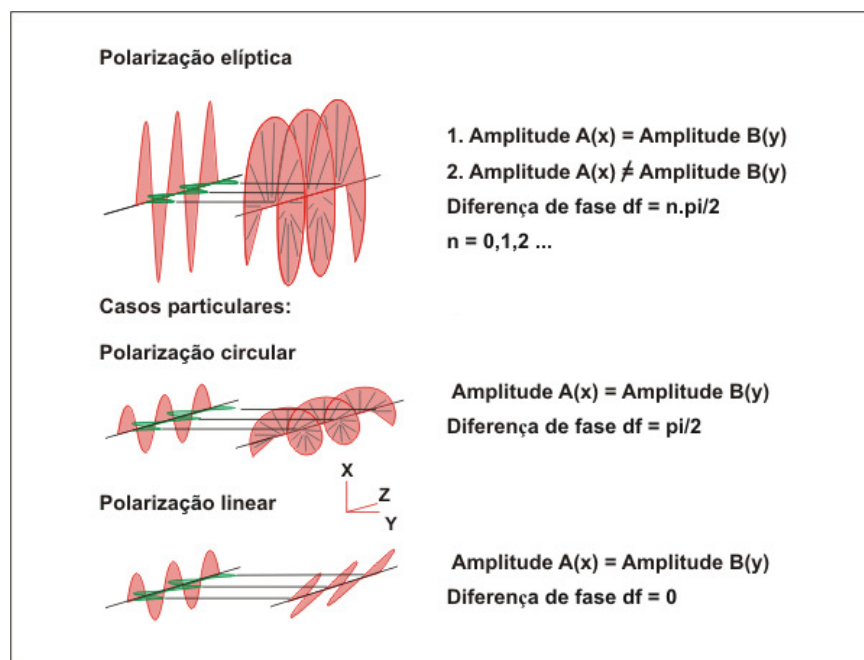
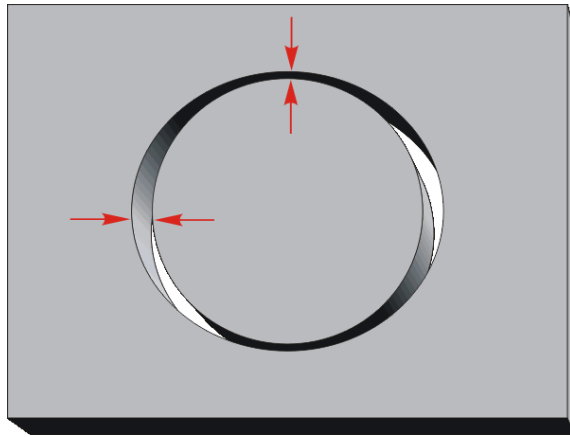


Figura 3.18 – Representação esquemática de três tipos de polarização das ondas eletromagnéticas. <sup>6/</sup>



*Figura 3.19 – Desvio no corte provocado por polarização não circular.*

É fácil perceber que a polarização circular (amplitudes iguais e ângulo de fase  $\pi/2$ ) é a mais adequada para os processos de corte e furação, pois devido a sua simetria não provoca variações na largura da fenda de corte, como o observado na Figura 3.19, tampouco furos não cilíndricos.

---

## 4 O Equipamento

### *4.1 Fonte*

A fonte é a principal parte de um equipamento laser. Qualquer que seja a aplicação, é na fonte que é gerado o feixe de luz. Seus principais componentes já foram descritos anteriormente na seção 3.2, contudo uma fonte real contém alguns elementos adicionais que proporcionam a imensa gama de variações que encontramos nas características e aplicações dos equipamentos laser.

Pode-se hoje encontrar no mercado diversos tipos e dimensões de fonte, desde minúsculos diodos que emitem alguns microwatts, até sistemas que ocupam pavilhões inteiros e emitem feixes da ordem de terawatts /42, 43/, como o laser Nova pertencente ao Lawrence Livermore National Laboratory, na Califórnia, EUA.

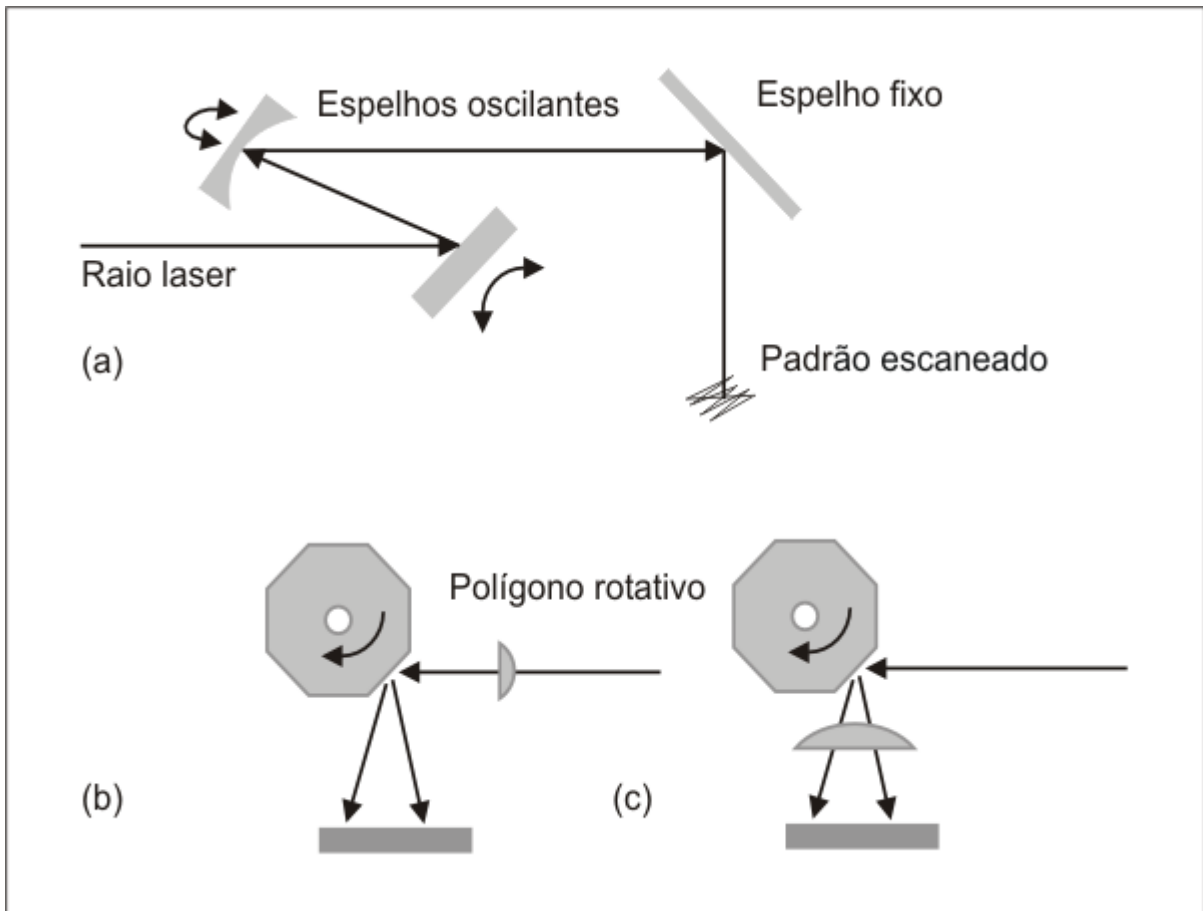
### *4.2 Sistema de condução do feixe*

Para a condução do feixe emergente da fonte até a região da peça a ser trabalhada foram desenvolvidas diversas soluções, de acordo com as características do laser (principalmente comprimento de onda) e tipo de trabalho a ser realizado (corte, solda, furação, marcação, ...). Entre elas encontra-se o uso de um scanner, a condução do laser por meio de fibra ótica e a condução por meio de espelhos, sendo que esta última pode assumir diferentes configurações, a saber: movimentação da fonte sobre a peça, movimentação dos espelhos sobre a peça e a movimentação da peça sob o feixe de luz mantido em uma posição fixa. Há ainda a possibilidade de um modo combinado, colocando parte do movimento no sistema de condução do feixe e parte na peça. /6, 19/

#### *4.2.1 Scanner*

Um scanner pode ser construído com espelhos acionados por servomotores, veja a parte superior da Figura 4.1, ou com prismas rotativos, parte inferior da mesma figura./2/ Como neste caso o movimento é gerado a uma certa distância da peça, o feixe de luz laser incide

inclinado sobre as regiões periféricas da área de trabalho, o que o torna mais adequado a processos superficiais, como a marcação, onde é largamente aplicado.



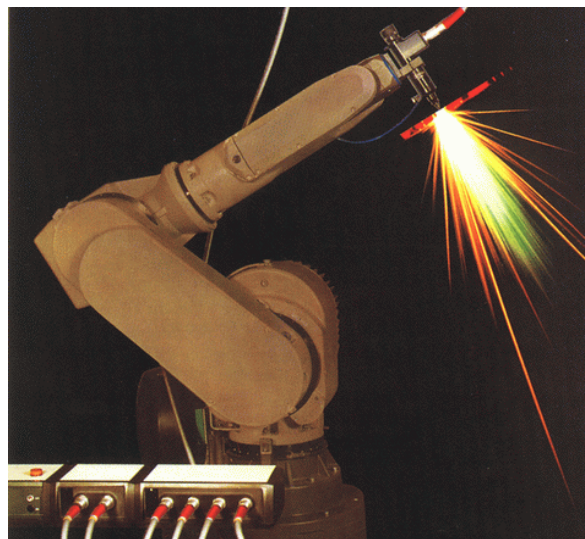
*Figura 4.1 – Formas construtivas de scanners. (a) Raster, (b) e (c) polígonos rotativos. /2/*

#### **4.2.2 Fibra ótica**

O uso da fibra ótica para condução do feixe é possível para lasers cujo comprimento de onda situa-se abaixo da região do ultravioleta próximo, como o Nd:YAG. Veja a representação do espectro eletromagnético na Figura 3.1. Lasers com comprimento de onda maior, como o CO<sub>2</sub>, não podem ser conduzidos pelas fibras óticas disponíveis hoje. Sua condução é feita com o uso de espelhos. /24/

Xiao /24/ lista algumas características do uso da fibra ótica como meio condutor do laser, comparando-a a outros meios. Segue uma reprodução desta lista, complementada com conteúdo publicado por Steen /2/:

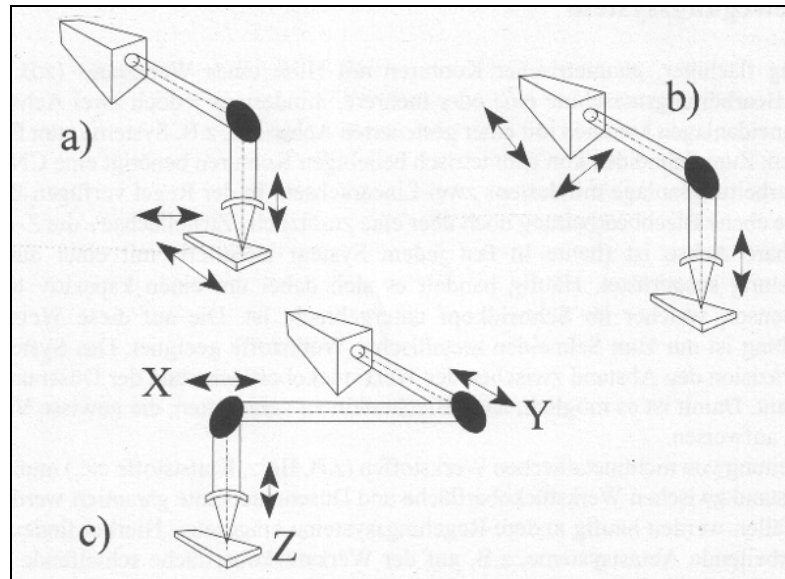
- A principal vantagem do uso de fibra ótica em relação ao uso de espelhos é a flexibilidade. O feixe pode facilmente ser levado aonde ela puder chegar, o que representa uma gama de possibilidades muito maior, posto que não há a necessidade de se seguir um caminho em linha reta entre cada par de espelhos, veja a Figura 4.2. O esforço para a construção e ajuste é menor /24/;
- Para uma boa combinação de ressonador, lente de acoplamento (na entrada da fibra) e distância entre estes dois elementos, a qualidade do feixe na saída da fibra dependerá mais do diâmetro da fibra e do ângulos de saída do que dos parâmetros do laser, minimizando assim o efeito de variações desses parâmetros sobre o processo /24/;
- A fibra ótica tem capacidade de carga limitada e provoca uma certa perda de qualidade no laser. Por isso, no trabalho com alta potência ou quando é fator crítico a alta qualidade do feixe, não se deve fazer uso de fibra ótica na condução do laser. /24, 2/



*Figura 4.2 – Laser conduzido por fibra ótica até o cabeçote montado sobre um robô. /20/*

### **4.2.3 Condução por espelhos**

Como comentado acima, é comum o uso de espelhos na condução de lasers de CO<sub>2</sub>. A configuração do sistema de espelhos depende principalmente das dimensões da área de trabalho, da fonte e do sistema de controle, mas também de outros fatores de menor relevância.



**Figura 4.3** – Formas de condução do feixe por espelhos: a) Movimentação da peça. b) Movimentação da fonte. c) Movimentação dos espelhos (flying optics). /6/

A Figura 4.3 ilustra esquematicamente os arranjos utilizados para gerar o movimento relativo entre a peça e o laser:

- a) movimento da peça – interessante em equipamentos para se trabalhar peças pequenas, facilmente manipuláveis;
- b) movimento da fonte – adequado a equipamentos que utilizam fontes de pequenas dimensões, como no caso dos modernos lasers de diodo de alta potência, ou então em casos como o dos robôs<sup>4</sup> empregados na soldagem de carrocerias de automóveis que precisam de ampla movimentação;
- c) movimento dos espelhos - também conhecido por “flying optics”, nesta solução a peça e a fonte permanecem estáticas, enquanto o movimento é feito pelos espelhos que navegam sobre a área de trabalho, conduzindo o laser. Segundo Rzani /6/, este sistema apresenta vantagens em relação a sistemas que movimentam a peça a ser trabalhada, como a flexibilidade e a construção compacta do equipamento.

<sup>4</sup> Estes robôs podem usar tanto o sistema de condução por fibras óticas, quando o comprimento de onda permite, como o sistema da fonte móvel, se esta for de dimensões adequadas.



---

Uma outra solução possível é a combinação de movimentos da fonte em uma direção e da peça em outra.

### ***4.3 Gases***

Os gases têm papel importante no uso dos lasers e são um dos maiores consumíveis das aplicações industriais deste tipo de radiação. Usados em duas áreas principais do processamento laser, atuam como meio ativo, para gerar a luz laser, e como gás de processo, soprado na região de interação com o material. É grande sua relevância no processamento de materiais com laser, pois têm impacto significativo em aspectos como qualidade e produtividade. /10/

Aspectos particulares de sua influência no processamento de materiais serão comentados nas respectivas seções.

### ***4.4 Principais tipos de laser***

Atualmente são muitos os tipos de laser existentes e foge ao escopo deste trabalho estudá-los e descrevê-los todos. Assim, as seções que seguem ocupam-se dos dois tipos de laser de maior relevância na indústria de processamento de materiais, o de CO<sub>2</sub> e o de Nd:YAG. /11/ Considerando entretanto interessante ilustrar os principais tipos de laser, reproduziu-se a Tabela 4.1. Uma seleção publicada pelo instituto FHG - ILT (Fraunhofer Institut für Lasertechnik, de Aachen) em seu website. /22/

*Tabela 4.1 – Principais tipos de laser, suas características e exemplos de aplicações segundo o ILT. /22/*

	Comprimento de onda	Potência	Regime de trabalho	Aplicação
<b>Lasers de diodo</b>				
Diodo simples	Infravermelho até região visível	1mW a 100mW	Contínuo e pulsado	Optoeletrônica
Diodo de alta potência	Infravermelho até região visível	até 100W	Contínuo e pulsado	Bombeamento de lasers de estado sólido
<b>Lasers de cristal</b>				
Nd:YAG	1,06µm	1W a 3KW	Contínuo e pulsado	Processamento de materiais, metrologia e medicina
Rubi	vermelho	Alguns mW	Pulsado	Metrologia e holografia
<b>Lasers de gás</b>				
CO <sub>2</sub>	10,6µm	1W a 40KW (100MW em regime pulsado)	Contínuo e pulsado	Processamento de materiais, medicina e separação isotópica
Excimer	193 nm, 248 nm, 308 nm, 351 nm (e outros)	1KW a 100MW	Pulsado, duração de pulso entre 10ns e 100ns	Microusinagem, medicina, processamento químico
HeNe	632.8 nm (mais usado)	1mW a 1W	Contínuo	Metrologia e holografia
Argônio	515nm a 458 nm (vários)	1mW a 150W		Impressão, medicina e bombeamento de laser de corante
<b>Lasers de líquido</b>				
Corante	Variação contínua do infravermelho ao ultravioleta (diversos corantes)	1mW a 1W	Contínuo e pulsado	Metrologia, espectroscopia e medicina

#### **4.4.1 Nd:YAG**

Sendo um dos tipos de laser de uso mais amplamente difundido na indústria, o laser de Nd:YAG é um exemplo típico de um laser do estado sólido. Um esquema de uma fonte deste tipo de laser pode ser encontrado na Figura 4.4.

Neste tipo de laser, os átomos ativos estão embutidos em um sólido que geralmente é um bastão de cristal ou vidro com as extremidades planas, paralelas retificadas e polidas com qualidade ótica. O bastão pode ter suas extremidades recobertas para formar a cavidade de ressonância ou, opcionalmente, podem ser utilizados espelhos externos. /1/

---

Em geral, as fontes de Nd:YAG são bombeadas por lâmpadas de flash ou outro laser. Com o atual aumento do número de fontes utilizando a segunda opção, em geral um laser de diodo, para o bombeamento de energia, este tipo de laser vem tendo sua qualidade melhorada e as fontes vêm, pouco a pouco, sendo construídas com maiores potências.

À medida que a potência das fontes de laser Nd:YAG vêm aumentando, este tem ganho espaço, substituindo gradualmente uso do laser de CO<sub>2</sub>. Esse laser é mais efetivo no processamento de cobre, latão, alumínio e suas ligas, pois, devido a seu menor comprimento de onda, é menos reflexivo a estes materiais. /11/

O comprimento de onda 1,06 μm faz com que ele seja mais fácil de ser utilizado na indústria porque o feixe pode ser transmitido por fibra ótica sem grande perda de potência e degradação da capacidade de focalização (focusability) do feixe. /11, 8/

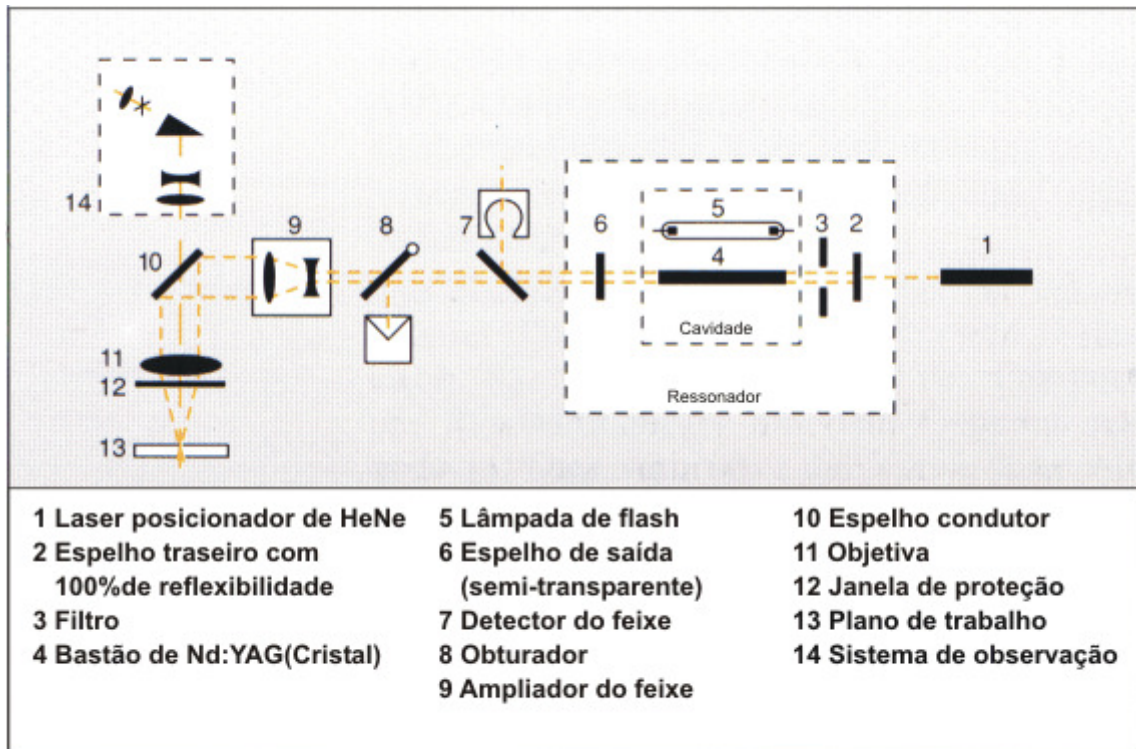
Entre seus pontos fracos, o que mais se sobressai é sua pobre capacidade de focalização para feixes gerados por fontes alta potência (acima de 100W), contudo isto vem gradualmente sendo superado com novas técnicas. O laser de Nd:YAG apresenta um potencial para gerar um feixe de alta qualidade com boa capacidade de focalização a qualquer nível de potência de saída. /11/

Tabata /11/ resume os pontos fortes e fracos do laser de Nd:YAG em comparação como o CO<sub>2</sub> na seguinte lista:

- Pontos fortes:
  - Oscilador rígido e compacto;
  - Condução do feixe por fibra ótica;
  - Baixa reflexibilidade do Cu, Al e suas ligas.
- Pontos fracos:
  - Menor potência de saída;
  - Pobre capacidade de focalização em fontes de alta potência;
  - Alto consumo de energia. /Tabata/

Além disso, um problema que diminui a qualidade do feixe de lasers de Nd:YAG é a dilatação não uniforme do cristal que funciona como meio ativo. Tabata /11/ defende que este problema vem sendo minimizado com o emprego das seguintes técnicas:

- Uma excitação uniforme do bastão de YAG pela irradiação uniforme com a lâmpada;
- Dissipação uniforme do calor através de um resfriamento uniforme;



*Figura 4.4 – Representação esquemática dos componentes de uma fonte Nd:YAG segundo Guggolz /20/.*

#### 4.4.2 CO<sub>2</sub>

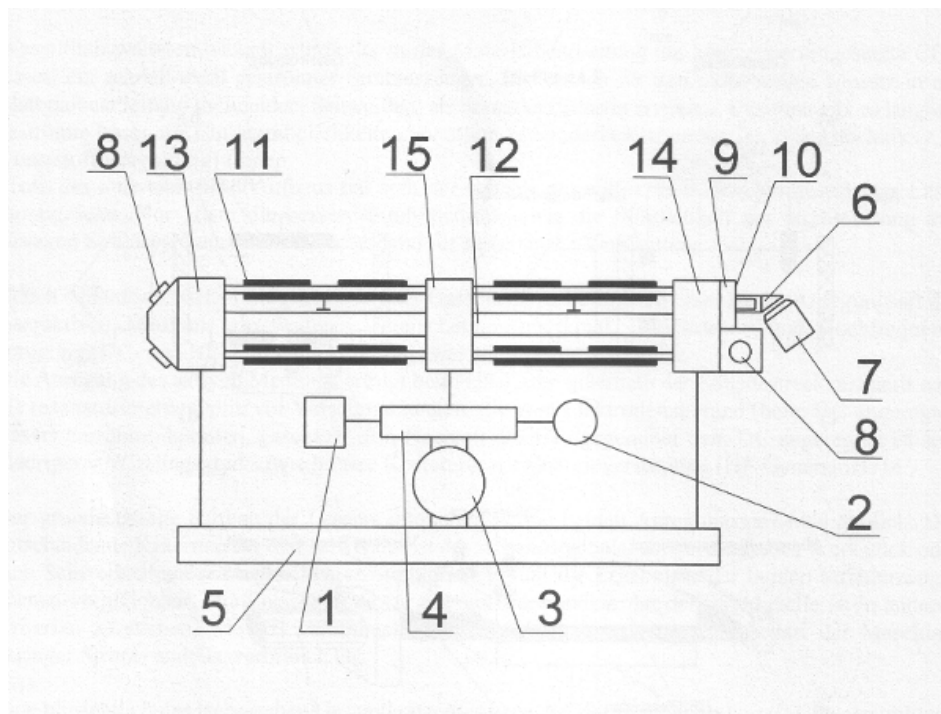
Este tipo de laser é hoje o mais utilizado na indústria. As fontes disponíveis no mercado podem ter desde alguns miliwatts até vários megawatts de potência /1/, sendo que experimentalmente já foram atingidas potências da ordem de terawatts. Uma representação esquemática de uma fonte de laser de CO<sub>2</sub> pode ser vista na Figura 4.5.

Podendo ser empregado tanto no corte em regime contínuo, como em regime pulsado, o laser de CO<sub>2</sub> encontra hoje uso no corte de chapas de aço nas indústrias automotiva, elétrica e eletrônica, na manufatura de equipamento de escritório, aparelhos de uso doméstico,

máquinas industriais, equipamento para construção e materiais de construção /11/, além de aplicações de soldagem, gravação, marcação e inúmeras outras.

Segundo Tabata /11/, seu maior mercado está no corte fino de chapas de aço e um laser cw- $\text{CO}_2$  para este fim deve ter as seguintes funções básicas:

- Pulso de saída com formato de onda retangular;
- potência de saída estável - é importante para um corte confiável e de qualidade. Uma menor oscilação da potência de saída permite uma fenda de corte mais uniforme e uma superfície de corte mais lisa;
- modo do feixe estável e seleção do modo adequado do feixe - um modo consistente melhora a qualidade do corte. Isso porque a mudança do modo muda o diâmetro do feixe no foco, diminuindo a habilidade do feixe gerar o corte.



**Figura 4.5** - Representação esquemática dos componentes de uma fonte  $\text{CO}_2$  segundo Rzany /6/. 1 – Unidade de fornecimento de gás. 2 – Bomba de vácuo. 3 – Bomba para circulação do meio ativo. 4, 5 – Trocadores de calor. 6 – Sensor para a medição da potência do laser. 7 – Obturador. 8 – Elemento óptico do ressonador – Espelho de retorno. 9,10 - Elemento óptico do ressonador – Espelho traseiro e janela de saída. 11 – Tubo de descarga. 12 – Tubo de trabalho. 13, 14, 15 – Distribuidores de gás.

## 5 Processos de fabricação

### 5.10 Corte

O corte a laser é um processo de corte térmico no qual o feixe laser, focalizado, fornece a energia, que é então, na peça, transformada em calor. O corte pode também ser assistido por um jato adicional de gás. /6, 7, 24, 26, /

Algumas normas definem o processo de corte a laser. A DIN 2310 /7/, intitulada "Termisches Schneiden", Corte Térmico em português, define conceitos do processo, enquanto as normas DIN 8580 e DIN 8590 classificam o laser como um processo integrante do grupo dos processos de fabricação por remoção térmica. /26/

De acordo com Belforte apud Leidinger /8/ e concordando com o que foi dito anteriormente, o corte é dominante entre as aplicações industriais do laser, respondendo atualmente por cerca de um terço das aplicações mundiais.

Alguns exemplos das diversas aplicações industriais são: a prototipagem rápida na indústria automobilística, o corte de madeira na indústria moveleira, o corte de perfis complexos, o corte de micropeças, a confecção de próteses. Nestas aplicações do corte com laser são utilizados em maior escala os lasers de CO<sub>2</sub>, Nd:YAG e Excimer. O laser do tipo Excimer, devido às suas limitadas taxas de remoção, é utilizado para se trabalhar micropeças poliméricas e, mais recentemente, também para se trabalhar materiais cerâmicos. Já os lasers de CO<sub>2</sub> e Nd:YAG têm um vasto campo de utilização no corte térmico devido aos seus maiores valores de potência média./19/

De fato os primeiros equipamentos piloto de corte a laser em duas dimensões surgiram em meados da década de 70 e atualmente o processo já está bastante desenvolvido, permitindo também o trabalho em três dimensões. /19/ Contudo, a principal aplicação ainda é o corte em duas dimensões, sendo a gama de materiais que podem ser trabalhados muito ampla, incluindo metais, polímeros, vidros, cerâmicas, madeira e outros. /8/

No que diz respeito ao regime de trabalho, Rzani /25/ defende, em um artigo publicado no ano de 1999, que há uma tendência do mercado em se buscar velocidades de corte sempre

---

maiores, deixando em segundo plano uma área do corte com laser, o corte em regime pulsado. Este regime torna possível, mesmo com equipamentos laser de grande porte, a produção de contornos e peças delgadas e/ou com detalhes filigranas a partir de chapas de aço.

Ele mostra também que a vastamente empregada técnica de se reduzir a potência do laser a um percentual da potência nominal para o corte de geometrias complexas no regime contínuo limita as possibilidades da produção. Isso ocorre porque mesmo emitida em uma potência reduzida, a incidência contínua da radiação provoca uma carga térmica muito alta sobre a peça, podendo levar à queima regiões ou mesmo peças inteiras de pequenas dimensões. /25/ Alguns exemplos podem ser encontrados nas Figura 3.14 e Figura 3.17.

Para a obtenção do corte, desde a fonte até atingir a peça, o laser segue um caminho que passa por diversos elementos. A grosso modo, o processo pode ser descrito da seguinte forma: No trajeto seguido pela radiação antes de atingir a peça, o feixe produzido pela fonte passa por um elemento óptico (lente, espelho) que o focaliza em um pequeno diâmetro, geralmente entre 0,1 e 0,3 mm. Assim a densidade de energia no foco passa a ser bastante alta, atingindo ordens de grandeza de  $10^6$  até  $10^7$  W/cm<sup>2</sup>, o que provoca um aquecimento local muito forte na peça levando o material desta região ao estado líquido, de vapor, ou mesmo provocando sua queima. Neste estado, o material é soprado para fora da região de corte pelo jato de gás e, do movimento relativo entre a peça e o cabeçote da máquina, surge a fenda de corte./6, 24/ Um esquema com um cabeçote de corte e o princípio do processo pode ser visto na Figura 5.1.

No processo, o jato coaxial de gás é uma parte fundamental. Contudo, é comum por parte dos usuários a pouca atenção dispensada ao gás e seu impacto no resultado do corte, tomando-o, nas palavras de Gabdzyl /10/, como pouco mais do que uma "commodity". O mesmo autor expõe que resultados experimentais, suportados por testes industriais, mostraram que o tipo e a pureza do gás têm um efeito significativo na produtividade e mesmo na qualidade do corte.

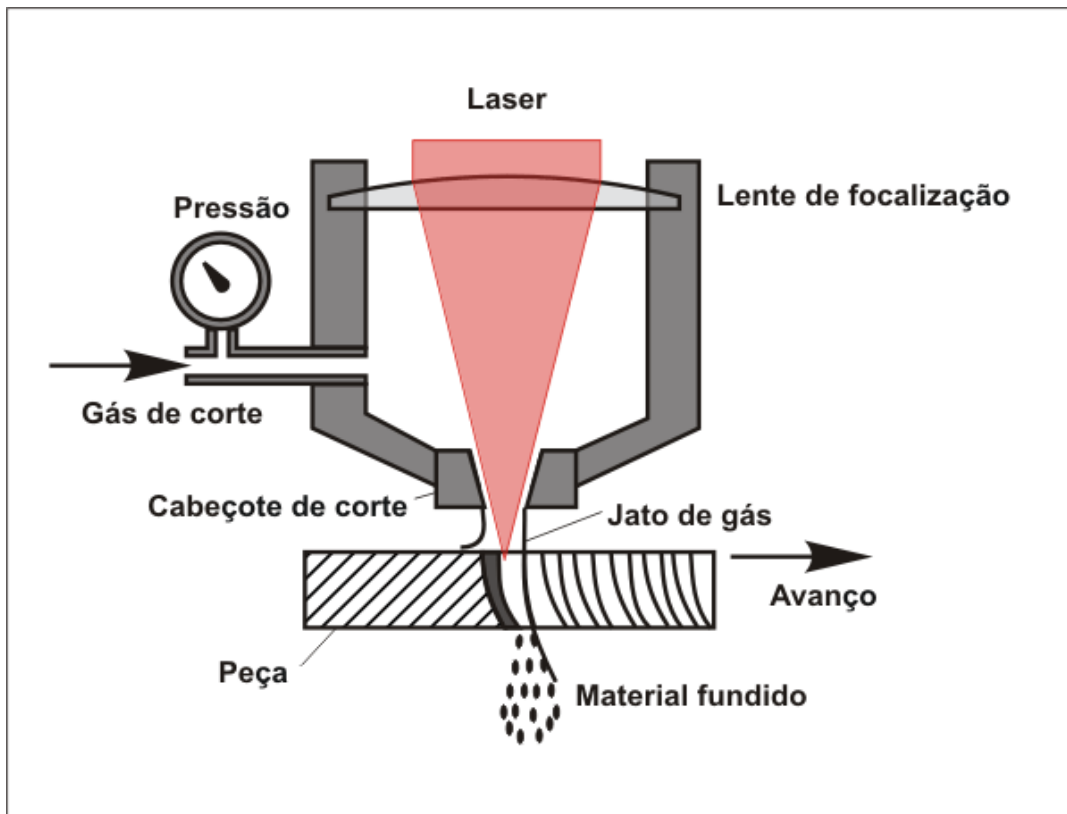


Figura 5.1 – Esquema de um cabeçote para o corte com laser. /24/

Uma vez que são inúmeras as possíveis configurações de equipamentos laser e proporcionalmente vastas as possibilidades de variações no processo, com novidades surgindo muito frequentemente, é difícil a definição de referências e limites para o processo. Mesmo assim alguns autores, baseados em sua experiência prática, arriscam sugerir valores. McGeough /1/ recomenda para o corte de aço potências na faixa que varia de 200 a 1000 W, além de sugerir na Tabela 5.1 valores típicos de espessuras e velocidades e corte. König /19/ cita Rzani (Sonderschau Laser) para definir valores de máxima espessura que pode ser cortada com o uso de lasers de CO<sub>2</sub>, sugerindo o valor de 52 mm para o corte de chapas de aço de construção não ligados e 25 mm para aços ligados.

Seguindo um outro caminho, Yu /9/ mostrou que é possível a simulação numérica do processo de corte a laser com boa aproximação, usando o software para análise de elementos finitos ANSYS5.0/ED em um PC.



*Tabela 5.1 - Valores típicos de espessuras e velocidades para o corte a laser./1/*

<b>Material</b>	<b>Espessura [mm]</b>	<b>Velocidade de corte [cm/min]</b>
Quartzo	2	100
Fiberglass	3	300
Placa de borracha (alta densidade)	3	500
Compensado de madeira	18	30
Papel	Folha de jornal	>60 000
Fórmica	1,5	550
Placa de acrílico	1,5	1 500
Plástico (ABS)	2,5	850
Ptfe	6	100
Titânio	1	750
Aço inoxidável	1	450
Aço ferramenta endurecido	3	170
Aço doce	1,5	450
Couro	5	250

Algumas vantagens do corte a laser quando comparado a outros processos:

- Alta densidade de fluxo de energia e a alta velocidade de corte daí resultantes /19, 24/;
- qualidade do corte (pouca ou nenhuma rebarba, baixa rugosidade, precisão geométrica, estabilidade das dimensões, etc.) /24/;
- possibilidade de se trabalhar um grande número de distintos materiais (praticamente qualquer material) e as mais diversas geometrias /24/;
- ausência de esforços de corte e desgaste de ferramentas /6, 24/;
- continuidade do processo /19/;
- fenda de corte de dimensões reduzidas /19/;
- pequena zona termicamente afetada /19/.

Existem três variantes do processo de corte a laser. Cada uma delas tem suas particularidades e a sua utilização depende do material a ser cortado, do gás utilizado para auxiliar o processo e da intensidade do laser. /6, 19/ A classificação dos processos de corte, segundo a norma DIN 2310 /7/, é a seguinte:

- Corte a laser por queima;
- Corte a laser por fusão;
- Corte a laser por sublimação.

Estas três variantes do corte a laser serão descritas nas seções seguintes.

### ***5.1.1 Corte por queima***

Nessa variante utiliza-se como gás de corte o oxigênio puro ( $O_2$ ) ou outro gás que o contenha /6, 7, 10, 24/. A peça é aquecida localmente pelo laser até sua temperatura de ignição, o que, na presença do oxigênio, provoca a combustão, queimando em grande parte o material da peça a ser removido. /1, 6, 7, 19, 24/ A mistura dos produtos da combustão, o fundido e os produtos da oxidação /7, 24/, é expulsa da região de corte pelo jato de gás. /7, 19, 24/ Este fato, combinado ao movimento relativo entre a peça e o feixe de luz, gera a fenda de corte. /6, 7/

Sendo a reação fortemente exotérmica (gera até 70% da energia de corte /10/), o consumo de energia aqui é mais baixo do que nas outras modalidades de corte, pois a temperatura à qual deve ser levada a peça situa-se apenas pouco acima da temperatura de ignição e a energia (calor) liberada pela reação exotérmica auxilia o processo, acelerando-o. /2, 3, 6, 19, 24/ Isto resulta diretamente em velocidades de corte maiores e na habilidade de cortar seções mais espessas. /10/

É importante ressaltar que o gás de corte tem influência significativa sobre a velocidade de corte. Gabdzyl /10/ afirma que o aumento da pureza de 99,7% para 99,9% resultou em um aumento da velocidade de corte de mais de 10%, tanto em experimentos com aço não ligado como em aço inoxidável.

---

Entre as variantes do corte com laser, o corte por queima permite a maior velocidade (segundo König /19/, de 5 a 10 vezes a velocidade do corte por fusão) e as maiores profundidades de corte. Contudo, uma desvantagem observada é a oxidação da região de corte /19/, o que pode em determinadas aplicações exigir um posterior processo de acabamento.

Além disso, um outro problema recorrente em casos onde se deve cortar chapas de aço espessas, como as que são empregadas em construção de navios por exemplo, é a queima descontrolada, que tem como consequência a erosão nos flancos da região de corte. /27/

Na prática este é o processo de corte mais utilizado e encontra aplicação em materiais de grande relevância técnica, como o aço, alumínio, titânio e inúmeras outras ligas./10, 24/

### **5.1.2 Corte por fusão**

No corte por fusão, o material da região de corte é fundido pela energia da radiação laser e, com ajuda de um jato de gás inerte, removido da fenda de corte. /7/ Como gás de corte emprega-se normalmente o argônio, hélio ou nitrogênio, sendo as pressões pela regra altas (10 a 20 bar e, segundo Gabdzyl /10/, algumas vezes até 30 bar). Com este processo são obtidas superfícies limpas e livres de óxidos. /10, 24/

Uma característica deste processo é que devido ao escoamento do fundido, a superfície de corte apresenta-se levemente estriada.

Como no corte por fusão não ocorre a reação exotérmica, toda a energia necessária ao processo é fornecida pelo laser e, conseqüentemente, para uma mesma pressão de gás, a máxima velocidade de corte que pode ser alcançada é bem menor do que no corte por queima.

Além da menor velocidade de corte, um dos principais problemas desta modalidade de corte, associado ao uso de gás inerte, é a formação de uma rebarba de material ressolidificado na parte inferior da fenda de corte. Condições de corte sem rebarbas podem, contudo, ser obtidas pela otimização cuidadosa dos parâmetros de corte principais, como o diâmetro do cabeçote, a posição do foco e a pressão do gás. /10/ E além disso, uma outra estratégia para se evitar este problema é o uso de um segundo jato de gás apontado para a parte inferior da fenda de corte. Este jato remove o material fundido antes que possa ressolidificar formando a rebarba.

### 5.1.3 Corte por sublimação

No corte por sublimação o material da peça é submetido a uma carga térmica localizada muito intensa e com isso passa diretamente do estado sólido para vapor. O vapor gerado se expande e é então removido da região de corte através da própria expansão e da ação do jato de gás. O gás utilizado deve ser inerte e suprido na pressão adequada, pois precisa expulsar o material sublimado da região de corte e evitar que eventuais respingos do material atinjam os elementos óticos. Esse processo é empregado em geral no corte de madeira, papel, cerâmica e plásticos. Para os metais, contudo, ele raramente se mostra economicamente viável. /7, 20, 24/ Para se obter uma velocidade de corte aceitável, seria necessário um laser com potência muito alta e grande qualidade do feixe. /24/ Comparado ao corte por fusão, o corte por sublimação utiliza dez vezes mais energia. /2/

Além disso, para o corte de metais, esta variante do processo só é possível quando a espessura do material a ser cortado tem no máximo a mesma dimensão do diâmetro do feixe de luz (laser), caso contrário o vapor metálico condensa dentro da fenda de corte e o material líquido a fecha novamente. /20/

### 5.1.4 Fratura controlada

Além dos três tipos de corte a laser descritos pela norma DIN 2310, encontra-se em desenvolvimento um novo método: a fratura controlada.

McGeough /1/ o descreve da seguinte forma:

*“A energia do laser pode ser usada para fraturar ou quebrar de um modo controlado itens delicados, como circuitos ou componentes eletrônicos. O feixe é focalizado em uma pequena área da superfície. Sua absorção cria gradientes térmicos que em consequência levam à formação de tensões mecânicas. Estas são suficientes para causar o cisalhamento do material em uma região tão pequena que a fratura não se propaga de modo descontrolado.”*

Esta técnica permite velocidades de corte muito altas, contudo, apesar do nome, é de difícil controle e ainda não está madura o suficiente para o uso corriqueiro na indústria.

### **5.1.5 Controle e precisão do processo**

O processo de corte a laser mais difundido na indústria e melhor documentado é o corte bidimensional (o corte de chapas é o maior mercado de corte a laser). Apesar disso, diferente do que acontece com alguns processos mais clássicos de usinagem, no caso de problemas, os ajustes são geralmente manuais e feitos pelo operador, que deve ter boa experiência prática e afinidade com a complexidade dos parâmetros de corte a laser. /8/

As principais variáveis consideradas no processo de corte a laser são em geral as propriedades do feixe (diâmetro do foco, modo, potência, regime, polarização, comprimento de onda) /2/, propriedades de transporte (velocidade e posição focal), propriedades do gás (tipo, pressão, pureza, velocidade do jato, posição do cabeçote, forma, alinhamento e composição do gás), propriedades do material (ópticas e térmicas)

Segundo Rzani /25/ no trabalho em regime pulsado o campo de variação aceito para os parâmetros do processo é bem mais restrito do que no regime contínuo. Sob esta ótica, a frequência de pulso tem papel decisivo no resultado do corte, podendo ser variada em uma faixa estreita.

Um corte fino e de alta qualidade pressupõe uma fenda de corte estreita e uniforme, com suas superfícies limpas e lisas, apresentando baixa rugosidade e uma pequena zona termicamente afetada (HAZ). As estrias típicas do corte a laser não devem ser proeminentes e a parte inferior da fenda de corte não deve apresentar rebarbas formadas pela adesão de gotas de material fundido. Além disso deve-se verificar em um processo de corte de qualidade a ausência de queima no contorno da peça e a repetibilidade do resultado. /8, 9, 11, 25/

Yu /9/ defende que a seleção apropriada dos parâmetros deve ser estudada no estágio inicial do projeto para evitar custosos reprojeto e operações de acabamento.

## **5.2A Soldagem**

A soldagem é uma das mais importantes aplicações industriais do laser, logo atrás do corte e da marcação. Apesar disso, devido aos altos investimentos e à falta de operadores

---

experientes/hábeis, o processo de soldagem está sendo absorvido pela indústria em um ritmo mais lento do que o previsto. Atualmente a solda a laser é empregada na produção em massa principalmente em soldas com menos do que 3 mm de profundidade. Se os investimento para fontes de alta potência caírem, pode-se esperar um crescimento no uso para materiais mais espessos. /8/

Como fonte, pode empregar tanto lasers de estado sólido como gasoso, operando em regime contínuo ou pulsado. Por causa da alta densidade de energia do laser durante a soldagem, a massa de metal fundido é pequena, as dimensões do metal afetado pelo calor (HAZ) são insignificantes, a taxa de aquecimento é alta e a taxa de resfriamento próxima à solda é baixa. O resultado é uma solda precisa, limpa e com uma distorção muito pequena. /3/

A classificação mais comum descreve duas técnicas distintas, a soldagem por condução e a solda profunda (keyhole welding). Na primeira, a energia fornecida pelo laser incidente funde o metal, gerando uma poça, e o movimento relativo entre a peça e o feixe de laser produz o cordão. Na solda profunda o laser provoca um furo na região da solda e, à medida que avança, gera correntes de convecção que empurram o material fundido para trás do feixe. A solidificação do material atrás do feixe de laser gera o cordão de solda. /2, 3, 28/ Veja um esquema na Figura 5.2.

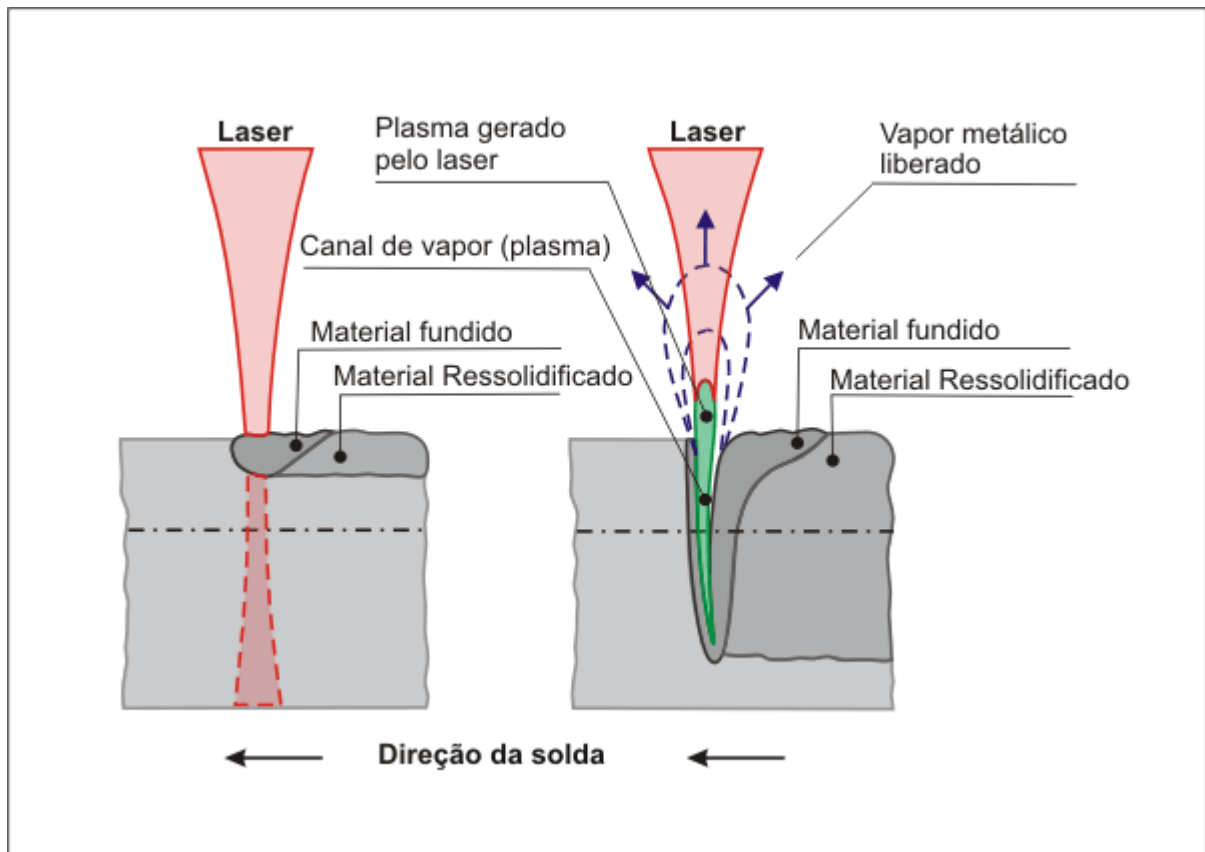


Figura 5.2 – Solda por condução, à esquerda, e solda profunda (keyhole), à direita. /29/

Na solda profunda a quantidade de energia entregue pelo laser à peça é alta, vaporizando o material na região da solda e gerando um furo (keyhole) na poça fundida. /2/ Veja o esquema no lado direito da Figura 5.2. Para este tipo de solda as fontes laser empregadas são de alta potência.

Já na solda por condução a densidade de energia é insuficiente para vaporizar o material na velocidade de avanço empregada. /2/ Assim, a solda ocorre em um região limitada da superfície da peça. Veja o esquema no lado esquerdo da Figura 5.2.

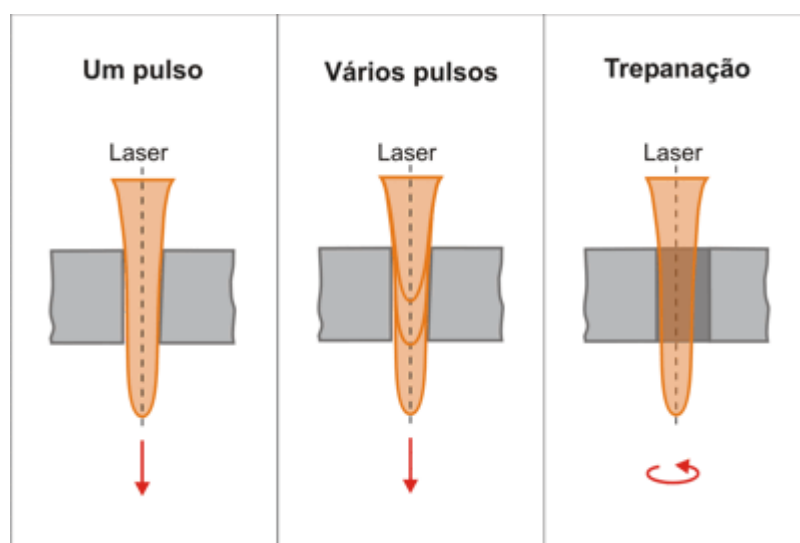
Algo que merece também atenção neste processo é o gás utilizado para assistí-lo. Lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência (keyhole) sofrem de problemas causados pela formação de plasma, o que ocorre pela ionização do gás de proteção e o vapor de metal saindo da solda. Isto reduz a penetração e deforma a solda, efeito que não é desejável. Assim, para a solda com este tipo de fonte, devido a seu alto potencial de ionização e seu alto poder calorífico, o hélio é o gás de proteção preferido. Na solda com laser de Nd:YAG por sua vez, este problema não é tão evidente e, devido ao comprimento de onda diferente, a absorção é reduzida no plasma. Em

algumas aplicações uma mistura de gases contendo um componente ativo pode ser benéfica.  
/10/

Grigoryants /3/ faz alguns comentários sobre a soldagem do titânio e suas ligas (objeto de experimentos neste trabalho), alertando para o fato de que o material fundido reage fortemente com o oxigênio e o hidrogênio e que isto diminui a qualidade da solda. A sugestão que coloca é o uso de gás de proteção em ambos os lados (superior e inferior) da solda. Para tanto os gases inertes de alta pureza, como o hélio e argônio, são indicados.

### 5.3A Furação

Neste processo, basicamente, vale o que foi dito para o corte com laser. A principal diferença entre estes dois processos é que na furação não há o movimento relativo entre a peça e o laser, o que resulta no furo e não no corte. A Figura 5.3 ilustra as estratégias empregadas na furação por laser. Para furos pequenos, com diâmetros próximos ao diâmetro laser no foco, pode-se usar tanto uma série de pulsos curtos como também um pulso apenas, desde que este mantenha as características do regime pulsado e com isto minimize os efeitos negativos do vapor emanado pelo processo. Na confecção de furos com diâmetros maiores costuma-se empregar a trepanação girando-se o cabeçote do laser ou a peça sob o feixe.



**Figura 5.3** – Furação a laser. Processamento usando um só pulso, diversos pulsos e trepanação movimentando o cabeçote para furos de diâmetros grandes. /20/



---

Apesar da semelhança com os fenômenos e características já descritos no texto sobre o corte a laser, algumas particularidades, devidas principalmente ao fato de não acontecer o movimento relativo entre a peça e o laser, existem neste processo e serão comentadas nos próximos parágrafos.

A não existência de movimento relativo entre a peça e o feixe de luz, permite que ocorra um efeito negativo na produção de furos por laser, que é o surgimento de uma bolha de vapor do material da peça dentro da cavidade. Esta absorve a energia do laser incidente, dificultando sua chegada à superfície da peça e, por consequência, tornando o furo mais raso. Para se contornar este problema o furo deve ser produzido com um ou diversos pulsos curtos (regime pulsado) ao invés de apenas um longo (regime contínuo). /1/

O exposto acima foi comprovado experimentalmente por Souza /28/. Segundo seu relato, a exposição de uma chapa de Ti com 2 mm de espessura à radiação de um laser de CO<sub>2</sub> por 2 s em regime contínuo não foi o suficiente para a obtenção de um furo, contrariando sua expectativa. O feixe com 0,4 mm de diâmetro gerou na superfície da chapa apenas uma cratera rasa com aproximadamente 10 mm de diâmetro. Assim, deve-se preferir o regime pulsado para a confecção de furos.

Quando se pretende furações com profundidades maiores, frequentemente ocorre um fenômeno chamado “optical piping” que interfere no perfil do furo. Ele é resultado de reflexões internas da radiação laser que surgem à medida que o furo vai se tornando mais profundo durante o processo. O laser geralmente é focalizado na superfície da peça e enquanto penetra no furo, diverge, sendo refletido pelas suas paredes. A máxima profundidade obtível sofre restrição provocada pela perda de energia por reflexão nas paredes do furo e também pela diminuição na sua abertura (o furo assume uma forma cônica). /1/

McGeough /1/ descreve também uma tentativa de se refocalizar o laser a cada pulso buscando-se evitar este efeito. Esta estratégia, contudo, não obteve sucesso.

Como este trabalho se preocupa com a furação de filmes de PTFE cabe aqui um comentário sobre Haba /30/ que propõe uma técnica alternativa para a furação de filmes de teflon, neste caso reforçados com SiO<sub>2</sub>. Seu procedimento utiliza um laser de baixa potência, na ordem de

dezenas a centenas de miliwatts, operando no espectro visível. O processo consiste em três passos: deposição de uma fina camada de um material que absorva a radiação do laser (no seu experimento usou uma camada de 300 ângstrons de ouro), furação a laser e, por fim, a limpeza ultra-sônica em água.

---

## 6 Interação do laser com os materiais a serem trabalhados

No trabalho com laser, as propriedades de maior relevância não são as mesmas geralmente consideradas nos processos tradicionais de fabricação. Devido à natureza do laser, as principais propriedades que influenciam este processo estão relacionadas à característica de superfície e às propriedades óticas e térmicas do material a ser trabalhado, não tendo influência direta as suas propriedades mecânicas /8, 44/ como acontece na maioria dos processos convencionais.

Da interação entre o material da peça a ser trabalhada com o feixe de laser surgem diversos efeitos, como por exemplo a absorção, a condução e a reflexão da luz. Na sequência vemos citadas algumas propriedades dos materiais que exercem efeito sobre esta interação.

### ***6.1 Reflexibilidade***

É um índice que indica a parcela do feixe de luz incidente que é refletida pelo material da peça. Depende do comprimento de onda da radiação laser e das condições e propriedades do material, tal como a qualidade de sua superfície, a quantidade de oxidação e sua temperatura. /1, 2, 3, 24/ A alta reflexibilidade apresentada por vários materiais ao comprimento de onda de certos lasers comerciais dificulta seu processamento a laser /1, 24/, inviabilizando-o em alguns casos. Fazendo uma generalização, pode-se dizer que quanto maior for o comprimento de onda do laser, maior será a reflexibilidade dos metais. /1, 2/ Veja a Figura 6.1.

Uma estratégia utilizada para se minimizar os efeitos da alta reflexibilidade dos metais é a modificação da condição da superfície da peça, seja pelo acabamento, oxidação, tratamento ou revestimento. Isto facilita a absorção da energia do laser, facilitando o processamento do material. /1, 3/

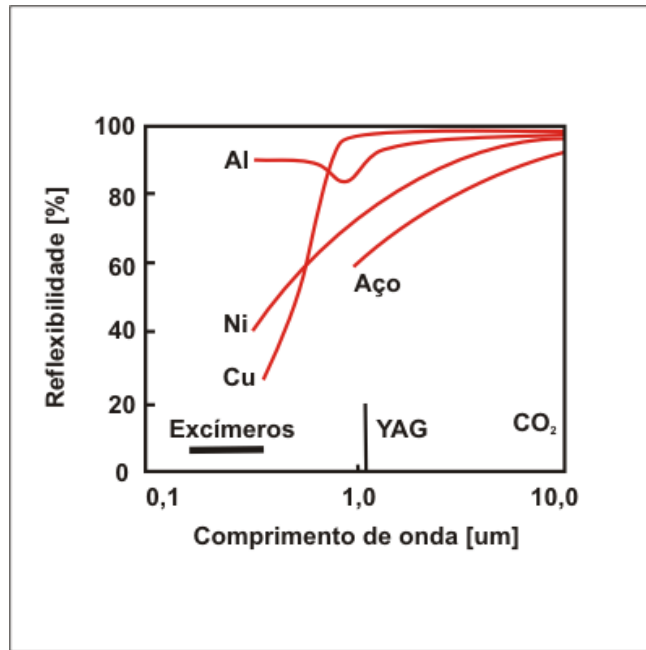


Figura 6.1 – Reflexibilidade de alguns metais como função do comprimento de onda do laser. /2/

Outro fenômeno interessante de se observar, ilustrado na Figura 6.2, é a influência da temperatura na reflexibilidade do material, ou seja, é fato que a quantidade de energia entregue pelo laser à peça varia durante o processamento. /2, 24/

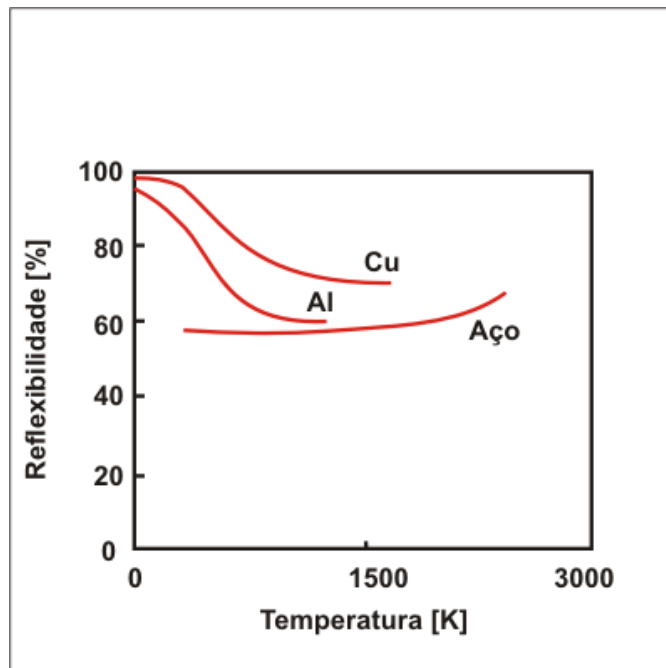


Figura 6.2 - Reflexibilidade de alguns metais como função da sua temperatura. /2/

## **6.2 Absortividade**

Como este trabalho preocupa-se com metais que não transmitem a radiação laser (opacos), a energia incidente é parte absorvida e parte refletida pelo material da peça. /1, 2, 3/ Assim, valem para a absortividade as observações feitas acima sobre a reflexibilidade e a soma dos seus valores será igual a 100%, ou o total da energia incidente.

$$\text{reflexibilidade} + \text{absortividade} = 100\% \text{ ou } \text{reflexibilidade} + \text{absortividade} = 1$$

(Eq. 6.1)

## **6.3 Condução de calor**

A condução de calor do laser para o (e pelo) material da peça a ser trabalhada influencia o modo como ocorre a sua fusão, a vaporização e as modificações observadas nas áreas adjacentes à região de trabalho (Zona Termicamente Afetada – HAZ). Além de importante, este é um efeito extremamente complexo. Isto fez com que, segundo McGeough /1/, nenhuma teoria adequada à condução de calor fosse até agora aplicada à usinagem por laser. Contudo, simplificações têm sido empregadas para o seu modelamento, permitindo a obtenção de importantes informações, ainda que aproximadas, relevantes aos processos de transformação de materiais por laser.

As propriedades do material da peça envolvidas com estes fenômenos, que têm relevância, são: o calor específico, a densidade, a condutividade térmica e o coeficiente de dilatação térmica.

### **6.3.1 Fusão da superfície**

Para se calcular o tempo necessário ao início da fusão da superfície de uma peça de um determinado material quando exposta a um fluxo de calor incidente, pode-se utilizar a equação (Eq. 6.2) proposta por Carslaw and Jaeger apud McGeough /1/. Esta equação considera o fluxo de calor em apenas uma direção e a peça como um meio semi-infinito composto de um material isotrópico, o que é uma aproximação razoável para o caso em questão e fornece informações relevantes.

$$T(x,t)|_{x=0} = [2F_0/k](\kappa \cdot t/\pi)^{1/2}$$

(Eq. 6.2)

onde a difusividade é dada por:

$$\kappa = k/\rho \cdot c$$

(Eq. 6.3)

e:

T = temperatura absoluta da peça na posição x, no tempo t [K]. Na superfície da peça x = 0.

F<sub>0</sub> = Fluxo constante de calor [J/s.m<sup>2</sup>]. É a fração absorvida pela peça da energia fornecida pelo feixe de luz.

k = coeficiente de condutividade térmica do material da peça [W/m.K].

ρ = densidade do material da peça [kg/m<sup>3</sup>].

c = calor específico do material da peça no estado sólido [J/kg.K].

Segundo McGeough /1/ esta equação é uma razoável representação do crescimento da temperatura na peça para fluxos de calor até cerca de 10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup> associados ao laser. Para fluxos de calor maiores do que 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup> e, quando o raio do feixe na superfície da peça for menor do que 0,1 cm, outras equações devem ser utilizadas, contudo estas serão de solução mais complexa.

### 6.3.2 Vaporização

Muito rapidamente, depois da fusão pelo laser, a vaporização da superfície da peça começa. A taxa de vaporização pode ser relacionada ao fluxo incidente do laser pela equação: /1/

$$F_0 = \left(\frac{dx}{dt}\right)C$$

(Eq. 6.4)

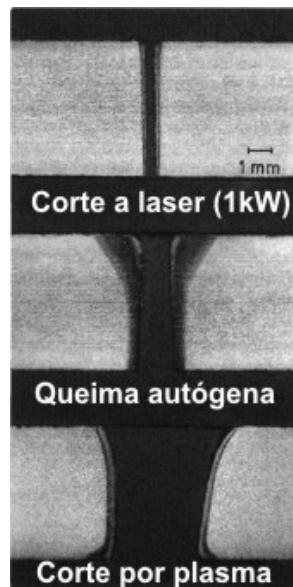
onde (dx/dt) é a taxa de recuo da superfície da peça e C é a energia necessária para vaporizar uma unidade de volume do material da peça. Valores típicos de C são da ordem de 10<sup>3</sup> J/cm<sup>3</sup>.

/1/

Esta equação é simplificada e não considera interferência do vapor com o laser quando este atinge a superfície da peça. Contudo, em análises mais detalhadas, a rapidez com que a vaporização ocorre requer que os efeitos da absorção de energia incidente pelo vapor seja considerada. /1/

### 6.3.3 Zona termicamente afetada (HAZ)

É a região, vizinha ao corte, furo ou cordão de solda, afetada pelo calor gerado pelo laser. Dada a precisão e a velocidade em que ocorre o processamento por laser, esta região é pequena quando comparada a área afetada que se observa em outros tipos de processamento térmico, como o corte por chama oxi-acetilênica ou os processos tradicionais de soldagem.



*Figura 6.3 – Comparação da zona termicamente afetada em diferentes processos de corte. /29/*

A dimensão desta zona pode influenciar negativamente as propriedades de fadiga do material. /1/

## 7 Segurança no manuseio do laser

### 7.1 Introdução

O emprego do laser, assim como de outras ferramentas usadas no processamento de materiais, incorre em riscos. A diferença é que o laser se apresenta sob a forma de radiação eletromagnética, muitas vezes em um comprimento de onda fora do espectro visível. Isso exige grande disciplina no cumprimento das normas de segurança.

Felizmente, o registro atual dos acidentes com laser é muito baixo. /2, 23/ Mas isso não significa que ele possa ser ignorado. Aconteceram e ainda acontecem acidentes, inclusive fatais. Os mais graves normalmente por displicência de usuários experientes. /23/

Em geral, como sugere Steen /2/, o risco é pequeno quando o perigo é observado. Já Powel /23/, que disserta sobre os lasers de CO<sub>2</sub>, diz que o maior risco à vida é o sistema de alta voltagem usado para gerar a descarga elétrica que bombeia o laser. Assim, são raros os acidentes com o equipamento em produção, sendo maior o risco durante as atividades de manutenção.

Rzani /6/ observa que normalmente sabemos a localização do raio laser, contudo tendemos a negligenciar o risco da exposição indireta. Ele afirma:

*„O contato direto do feixe de laser não é tão preocupante quanto o risco deste acontecer de modo indireto, provocado por desvios do feixe em superfícies reflexivas. USE SEMPRE ÓCULOS DE PROTEÇÃO.“*

Os principais riscos que se pode enumerar são os danos aos olhos ou à pele, acidentes com eletricidade, males causados pelos vapores (fumos) resultantes do processo e o fogo. /2, 4, 23/ E as principais fontes destes riscos segundo Rzani /6/ são o feixe de laser desprotegido, partes móveis da máquina e a alta tensão (20000 a 30000 V, lasers a CC).

Para se evitar estes riscos foram criadas várias normas que regulamentam a construção, instalação e uso de equipamentos laser. De acordo com Steen /2/, com relação à segurança, as normas básicas são:



- *Safety of laser products and equipment classification and user guides – general laser safety* (Classificação de segurança para produtos e equipamentos laser e guias ao usuário – segurança do laser em geral) - BSEN 60825-1 e IEC 825-1
  
- *Safety of machines using laser radiation to process materials – safety of laser material processing machines* (Segurança de máquinas que usam radiação laser para processar materiais – segurança de máquinas de processamento de materiais com laser) - ISO DIS 11553 e CENprEN 31553

Além da observação destas normas, as instalações de lasers da classe 4, veja Tabela 7.1, que representam quase todos os sistemas de processamento de materiais, devem ter um responsável pela segurança com o laser (em inglês Laser Safety Officer – LSO) que deve se responsabilizar pela verificação da aplicação das normas. /2/

*Tabela 7.1 - Classificação dos lasers. Sumário das normas BSI 4803 1983 e IEC 825 1984, segundo Steen /2/*

<b>Classe</b>	<b>Definição</b>
1	Intrinsicamente seguro < 0,2 $\mu\text{J}$ em pulso de 1 ns ou < 0,7 mJ em pulso de 1 s
2	Proteção pelo reflexo de piscar os olhos (0,25 s) < 1 mW CW
3A	Proteção pelo piscar dos olhos e tamanho do feixe < 5mW com 25 W/m <sup>2</sup>
3B	Pode-se ver reflexão difusa < 2,4 mJ em pulso de 1 ns ou < 0,5 W CW visível
4	Todos os lasers de alta potência Não pode ser visto diretamente ou por reflexão difusa Pode causar fogo As normas de segurança devem ser rigidamente seguidas

### ***7.2 Precauções típicas para lasers da classe 4 de acordo com Steen [2]***

- Todos os caminhos percorridos pelo feixe devem ser envoltos por material capaz de suportar o feixe não concentrado por vários minutos.
- Deve-se conter as reflexões.
- Todo o pessoal na “Área de Risco Nominal” (NHZ) deve usar óculos de segurança.
- Deve-se evitar que pessoal não envolvido entre na área de trabalho.
- Deve existir cartazes de alerta e luzes de segurança para evitar aproximação de pessoas sem o conhecimento dos riscos. Veja um modelo na Figura 7.1.
- Ao alinhar o feixe o cuidado deve ser redobrado.
- É necessário que uma pessoa seja responsável pela observação destas diretrizes.

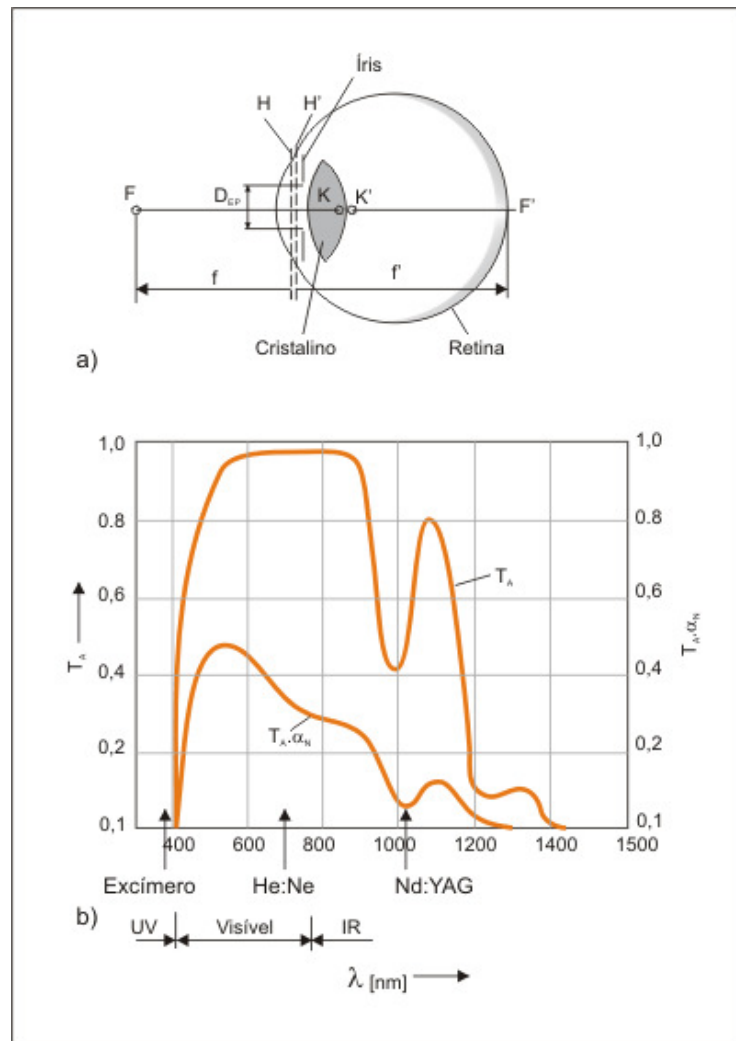


*Figura 7.1 - Exemplo de cartaz de alerta a ser usado em áreas de trabalho com lasers.*

### ***7.3 Danos aos olhos***

O fluido ocular tem seu espectro de transmissividade como na Figura 7.2. Ele mostra que existem dois tipos de possíveis problemas com radiação incidindo sobre os olhos. Há um risco de dano à retina, no fundo do olho, e risco de dano à córnea, na parte frontal do olho. A radiação que chega à retina é amplificada pela lente dos olhos em um fator de cerca de  $10^5$  a  $10^6$ , o que vaporiza o tecido atingido quase instantaneamente, em muito menos do que um

piscar de olhos. Assim, pode-se notar, observando a Figura 7.2, que os lasers com comprimento de onda na região visível do espectro, ou próximo a ela (Ar, He/Ne, Nd:YAG, Nd:Vidro), são muito mais perigosos do que aqueles cujo comprimento de onda encontra-se fora desta região (Excímeros, CO<sub>2</sub>). / 2, 4, 42/



**Figura 7.2** – Espectro de transmissividade do fluido ocular. a) Esquema de um olho humano, b) transmissividade ( $T_A$ ) e a parte do feixe absorvida pela retina ( $T_A \cdot \alpha_n$ ) / 2, 4/

A Figura 7.3 e a Figura 7.4 trazem dados experimentais publicados por Steen /2/ mostrando os níveis máximos permitidos de exposição (MPE – do inglês Maximum Permissible Exposure) da retina e da córnea à radiação. Acima destes limites de densidade de energia e de tempo pode ocorrer dano causado pela ebulição e, em níveis mais altos, pela evaporação explosiva. O limite de evaporação é a razão pela qual o olho pode suportar níveis de energia tão baixos.

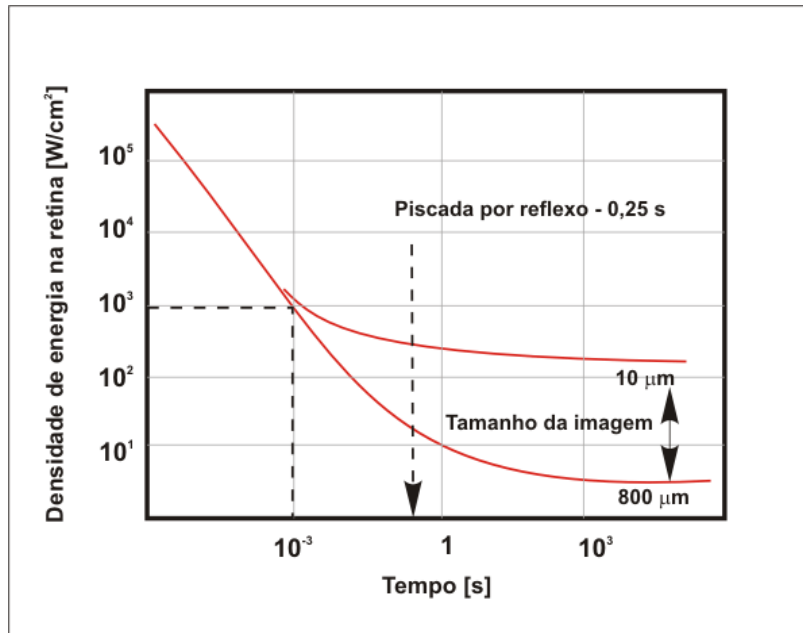


Figura 7.3 – Limites de exposição da retina à radiação. /2/

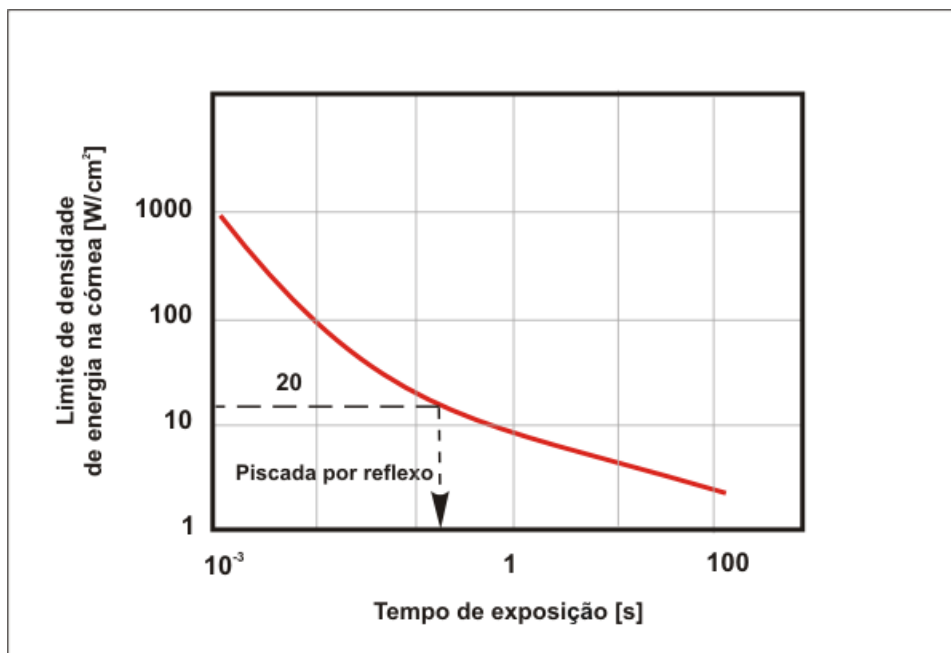


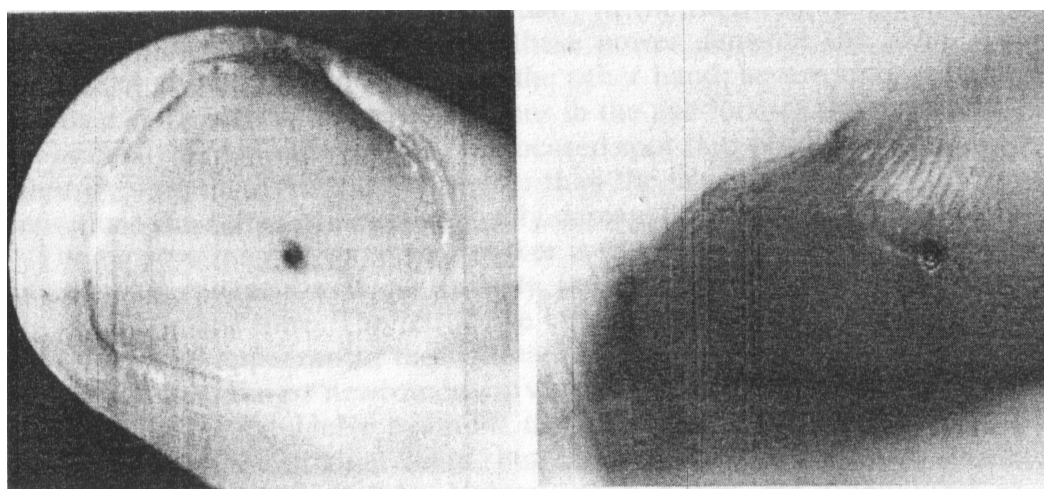
Figura 7.4 – Limites de exposição da córnea à radiação. /2/

A zona de risco em torno do laser é aquela onde a intensidade de radiação ultrapassa o nível máximo permitido de exposição e é denominada Zona de Risco Nominal (do inglês Nominal Hazard Zone - NHZ). /2/ Dentro dos limites desta região é mister que se use óculos de proteção e que se siga disciplinadamente todas as normas de segurança.

O texto do site Sam's Laser FAQ /42/ diz que: „Mesmo em se tratando de níveis de energia considerados relativamente seguros, não se deve de modo algum olhar diretamente para o feixe laser.“

Steen /2/ sugere a seguinte regra geral de segurança: „**Nunca olhe diretamente para o raio laser.**“

### ***7.4 Danos à pele***



*Figura 7.5 – Acidente com laser sofrido pelo autor Powel /23/. O feixe incidiu sobre a parte inferior do seu dedo, foto da direita, atravessou-o e saiu pela unha, foto da esquerda.*

Ainda segundo Steen /2/ há também para os danos à pele níveis máximos permitidos de exposição. Contudo estes são muito menos severos do que os valores relacionados aos danos que os olhos podem sofrer. Assim, em se garantindo a segurança dos olhos, os riscos com a pele tornam-se irrelevantes.

Obviamente, a disciplina nos cuidados para se evitar a exposição da pele à radiação é imprescindível e a displicência pode causar ferimentos desagradáveis, veja a Figura 7.5. Contudo, por serem provocados por um feixe de luz, são normalmente bolhas ou cortes limpos que em geral são curados. Já no caso de acidentes com os olhos, a cura não é tão provável.

---

Steen /2/ sugere a seguinte regra geral de segurança: „**Nunca coloque partes do seu corpo no caminho do raio laser**“.

### ***7.5 Riscos com a eletricidade***

*„Ao longo de toda a história dos lasers, em todas as suas formas, aconteceram muito poucos acidentes fatais. Estas fatalidades foram todas resultados de eletrocução, geralmente de pessoas muito experientes trabalhando desprotegidas na fonte de alta voltagem.“/23/*

A frase acima ilustra bem a questão – já citada – do risco que existe no excesso de confiança que geralmente surge em operadores com grande experiência no uso de um determinado equipamento.

Praticamente todos os acidente sérios ou fatais com lasers têm tido relação com a fonte de energia. A potência elétrica envolvida é muito alta e mesmo depois de desligado o equipamento, capacitores carregados mantêm o risco iminente. Assim, antes de se trabalhar com o sistema, é essencial um bom aterramento deste. Além disso, devem existir botões de emergência no equipamento e na saída principal da sala de laser./2, 23/

Steen /2/ sugere a seguinte regra geral de segurança: “**Não se aproxime da fonte de alta voltagem sem antes aterrar cuidadosamente o sistema.**”

### ***7.6 Riscos com os fumos***

Devido às altas temperaturas envolvidas no processamento de materiais por laser, os equipamentos usados para este fim, especialmente aqueles destinados ao corte, provocam a emissão de fumos. Estes compõe-se de vapores, gases, líquidos e/ou partículas que são potencialmente nocivos à saúde. Felizmente, os volumes produzidos por unidade de tempo são geralmente pequenos e só representam risco se o trabalho for intenso. Apesar disso, é imprescindível que a área de processamento de materiais por laser seja bem ventilada. /2, 23/

Apesar da quantidade de fumos gerados ser menor do que nos processos tradicionais, a sua remoção é necessária ao se cortar aços. Boa ventilação também é recomendada /2/, uma vez

---

que mesmo gases como o oxigênio e o nitrogênio podem ser potencialmente perigosos. Se a concentração de oxigênio no ambiente cair a menos do que 19%, há um risco significativo à vida humana, enquanto condições de aumento da concentração de oxigênio tornam muitos materiais mais suscetíveis à combustão. A depleção do oxigênio é possível se o processo de corte com alta pressão de nitrogênio acontecer em um ambiente fechado. /10/

Estudos de Gabzdyl /10/ mostram que a quantidade de fumos gerados pelo corte assistido por oxigênio é de aproximadamente 100 vezes a do que é produzido pelo corte assistido pelo nitrogênio. Sendo que no primeiro, as partículas encontram-se predominantemente na faixa de 6 micrometros e abaixo, o que é considerado o mais problemático. No corte com nitrogênio, por sua vez, o tamanho das partículas geradas é significativamente maior.

### **7.7 Fogo**

O laser agindo diretamente, refletido, ou ainda, as centelhas emitidas no processo, pode causar a ignição de materiais inflamáveis que se encontrem na área próxima ao equipamento. Assim sendo, na região próxima ao equipamento laser deve-se buscar manter em um mínimo necessário a presença de materias que possam dar origem a um incêndio, como papéis (folhas de trabalho, blocos de anotações, manuais, ...), plásticos, madeira, estopas de limpeza, etc. /23/

Extintores de todos os tipos devem estar disponíveis e o pessoal que trabalha nesta área deve estar treinado para agir corretamente em caso de incêndio. /23/

## 8 Materiais

### 8.1 Liga de níquel e titânio (NiTi)

#### 8.1.1 O material, propriedades e características

O NiTi, também chamado Nitinol, um acrônimo de Ni–Ti–Naval–Ordnance–Laboratory, quem primeiro o desenvolveu, é um material classificado entre os ditos materiais inteligentes (smart materials). Suas duas propriedades notáveis são a superelasticidade (ou pseudoelasticidade como querem alguns) e a memória de forma. O segundo efeito foi observado na liga de NiTi em 1962 por Buehler et al. e a partir de então iniciou-se realmente a pesquisa da metalurgia e usos práticos desse material. /31, 32/

Para aplicações médicas, são estas duas as principais propriedades que tornam interessante esta liga, classificada entre as SMAs, do inglês *Shape Memory Alloys* (ligas com memória de forma). Além do NiTi, também as outras ligas classificadas como SMA são atrativas para aplicações em engenharia e têm nas últimas décadas encontrado aplicações das mais diversas. /33/

Os materiais com memória de forma são ligas metálicas especiais que têm a capacidade de “lembrar” sua forma anterior. Diversas ligas conhecidas apresentam memória de forma, contudo somente as que podem recuperar uma quantidade substancial de deformação e gerar uma força significativa durante a mudança de forma têm interesse comercial. Atualmente estas são as ligas de NiTi e algumas ligas de cobre, como CuZnAl e CuAlNi. /31/

A segunda propriedade notável é a superelasticidade, que é a capacidade, característica do NiTi, de sofrer grandes deformações sem que haja deformação plástica permanente.

Segundo a definição de Duval /33/:

*“A capacidade do material suportar grande quantidade de deformações inelásticas, sem deformação plástica permanente, e recuperar esta deformação sob condições adequadas de retirada da carga, é conhecida como superelasticidade. Este fenômeno é acompanhado de mudanças reversíveis na microestrutura do material. A superelasticidade ocorre através de carga-descarga a uma temperatura acima de  $A_f$  (temperatura onde se completa a formação de austenita no NiTi). Caso a temperatura*



---

*esteja abaixo de  $A_f$ , ao final da retirada da carga aparecerá um pouco de deformação residual que será diretamente proporcional à temperatura.”*

A superelasticidade, que ocorre com a predominância da fase de alta temperatura na estrutura do material, está associada a grandes deformações (em alguns casos de até 18%) não-lineares recuperáveis sob retirada da tensão (carga). /34/

Além do já exposto, o nitinol apresenta boa radiopacidade, grande biocompatibilidade, resistência à corrosão, pequena força/tensão para que haja deformação, força constante sob larga faixa de deformação, alta resistência e boa ductilidade. /45/

Segundo McKelvey /32/, entre os materiais hoje comumente utilizados em implantes, o nitinol é o que apresenta a menor resistência ao crescimento de trincas provocadas por fadiga.

Com relação à corrosão, devido a um filme passivo que se forma naturalmente, o nitinol tem normalmente um excelente comportamento. Ao ser removido da superfície do material, este filme de óxido pode novamente formar-se, ao ar, em cerca de  $10^{-9}$  s e geralmente tem uma espessura variando dentro de uma faixa de 5 a 10 nm. Contudo, em condições onde este filme pode ser atacado e impedido de se formar novamente, o material torna-se suscetível a corrosão por pitting e em frestas (crevice), particularmente em ambiente com cloretos (água salgada). /36/

O NiTi tem se mostrado um material bastante atrativo para substituir o aço inoxidável em implantes devido às suas propriedades de resistência a corrosão, comportamento mecânico não linear e termoelasticidade. /32/ Algumas dificuldades, contudo, ainda precisam ser superadas no desenvolvimento do NiTi. Principalmente a necessidade de melhora da base de dados de conhecimento de engenharia e caracterização do material para evitar custosas e desencorajadoras repetições de ensaios. E a restrita faixa de uso das ligas binárias de NiTi – transição martensita-austenita abaixo de 100 C. /35/

Algumas de suas principais propriedades estão listadas na Tabela 8.3, que as compara às do aço inoxidável AISI 316L.

### 8.1.2 Algumas aplicações

- Indústria médica (*stents* /36/, guias, pinos, filtros) /34, 45/
- Ortodontia /36/ Primeira aplicação médica do nitinol, durante os anos 70. /45/
- Sistema de correção de escoliose /36/
- Tecido poroso superelástico /36/ (para reconstituição de ligamentos)
- Fixadores para ossos fraturados /36/
- Equipamentos/ferramentas médicas /36/
- Estruturas inteligentes – resistentes a terremotos /33/
- Robôs /34/
- Atuadores (aplicações em elétrica /34/) e microatuadores /34/
- Sensores /34/
- Indústria automobilística /34/
- Uniões de tubulações críticas /34/
- Soutiens (arame de suporte)
- Armações de óculos
- Antenas para telefones celulares /34/
- Mecanismo de separação para aplicações espaciais – diam. 1,5 cm =  $3 \times 10^5 \text{N}$  /35/
- Brinquedos – Modelo de borboleta que movimenta as asas /34/
- Válvulas anti-escaldantes para chuveiros /34/
- Válvula para compensar a variação de viscosidade com a temperatura em transmissões automotivas da Daimler-Benz. /34/
- Ejetor de disquetes /34/
- Dispositivos Braille e táteis /34/
- Microdevices /34/ (microatuadores para espelhos de scanners, microposicionadores, microrobôs)

### 8.2 Aço inoxidável AISI 316L

O aço inoxidável, diferente do NiTi, é um material já bem conhecido e de uso corriqueiro na indústria. Na confecção de próteses endoluminais, por suas propriedades mecânicas, de biocompatibilidade e de resistência à corrosão, o aço inoxidável de uso mais comum é o AISI 316L, cuja composição média está descrita na Tabela 8.1. Essa foi a principal razão pela qual

o estudo do corte empregou lâminas deste aço com espessura de 0,2 mm. A espessura foi escolhida, pela disponibilidade, o mais próximo possível do que se deveria usar na fabricação dos *stents*.

*Tabela 8.1 – Composição química do aço inoxidável AISI 316L. /56/*

<b>Componente</b>	<b>Massa %</b>
C	0.03
Cr	17
Fe	65
Mn	2
Mo	2.5
Ni	12
P	0.045
S	0.03
Si	1

Entre suas principais características está a alta resistência à corrosão, inclusive à corrosão intergranular que segue processo de soldagem ou alívio de tensões. Resistência à corrosão também frente à maioria das substâncias químicas, sais, ácidos. A presença de molibdênio melhora a resistência aos ambientes marinhos. O baixo carbono reduz a possibilidade de corrosão *in vivo*<sup>5</sup> em implantes médicos.

As aplicações mais comuns são: Implantes médicos, processamento químico, processamento de alimento, indústrias fotográfica e farmacêutica, acabamentos em têxteis e outros. /56/

Suas propriedades encontram-se resumidas na Tabela 8.2, abaixo.

---

<sup>5</sup> Em organismo vivo.

Tabela 8.2 – Propriedades de lâminas recozidas de aço inoxidável AISI 316L /56/

<b>Propriedades físicas</b>	
Densidade	8,03 g/cm <sup>3</sup>
<b>Propriedades mecânicas</b>	
Dureza	79 Rockwell B
Tensão de ruptura	560 MPa
Tensão limite de escoamento	290 MPa
Alongamento na ruptura	50 % in 50 mm
Módulo de elasticidade	193 GPa em tração
Impacto - Charpy	103 J Entalhe em V, 30 C
<b>Propriedades Elétricas</b>	
Resistividade Elétrica	0,000072 ohm.cm
<b>Propriedades Térmicas</b>	
Capacidade térmica	0,5 J/g C de 0 a 100 C
Ponto de fusão	1375 a 1400 C
Solidus	1375 C
Liquidus	1400 C
Temperatura máxima de serviço	Ao ar. 870 C - Serviço intermitente
Temperatura máxima de serviço	Ao ar 925 C - Serviço contínuo

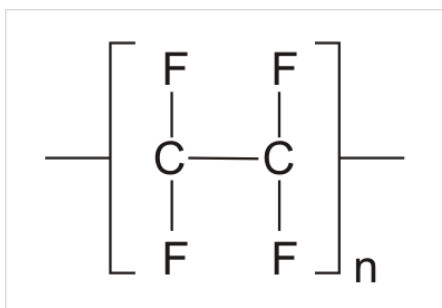
A Tabela 8.3 compara algumas propriedades dos dois materiais mais utilizados na fabricação de endopróteses, o NiTi e o aço inoxidável 316L.

*Tabela 8.3- Comparação entre as propriedades do NiTi e do aço inoxidável 316L. /46/*

Propriedade	NiTi	Aço Inoxidável
Alongamento recuperado	8 %	0,8 %
Biocompatibilidade	Excelente	Moderada
Módulo de Elasticidade	Aprox. 48 GPa	193 GPa
Torque	Excelente	Pobre
Densidade	6,45 g/cm <sup>3</sup>	8,03 g/cm <sup>3</sup>
Magnético	Não	Sim
Tensão de ruptura	Aprox. 1240 MPa	Aprox. 560 MPa
Coefficiente de expansão térmica	6,6 a 11,0 cm/cm/C	17,3 x 10 <sup>-6</sup> cm/cm/C
Resistividade	80 a 100 μΩ.cm	72 μΩ.cm

### 8.3PTFE

O politetrafluoretileno – Ptfé – é um material sintético conhecido no meio comercial pelo nome de Teflon<sup>®6</sup>. É uma das substâncias menos reativas biologicamente que se conhece. A unidade química que se repete na cadeia deste polímero consiste de dois átomos de carbono ligados a quatro átomos de flúor (F<sub>2</sub>C-CF<sub>2</sub>), conforme Figura 8.1. /54, **Error! Reference source not found./**



*Figura 8.1 – Fórmula do Ptfé.*

<sup>6</sup> Esta é a denominação mais utilizada, criada pela Du Pont, quem primeiro produziu este material. Outros fabricantes usam também os nomes Fluon, Polyflon, Halon e Hostafilon. /55/

Sua estabilidade se deve aos átomos de flúor, altamente eletronegativos. /54/ É inerte a praticamente todos os produtos químicos nas condições de temperatura onde é estável. Não sofre ação de nenhum solvente. Pode ser mergulhado em líquidos em ebulição, como os ácidos nítrico e sulfúrico, sem sofrer ataque. Não transmite odor aos corpos com os quais entra em contato. Não sofre envelhecimento, seja ao ar, seja com outro produto qualquer. Tem um dos mais baixos coeficientes de atrito que se conhece. /55/ A Tabela 8.4 traz algumas das suas principais propriedades.

É empregado em áreas variadas, como a biologia, microbiologia, medicina, farmácia, indústria de alimentos, automotiva, entre outras. /55/ Este trabalho aborda uma aplicação na área médica, o revestimento de endopróteses para o tratamento de aneurismas de aorta. O Ptfé para este uso tem a forma de um filme tubular, no caso estudado, com 0,1 mm de espessura de parede e envolve a estrutura metálica assumindo a função da parede do vaso doente na região do aneurisma.

*Tabela 8.4 - Propriedades do Ptfé. /55/*

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade	2,2 g/cm <sup>3</sup>
Cristalinidade	90%
Absorção de água – 24 h	< 0,01 %
Resistência à tração	22 MPa
Alongamento	350 %
Módulo de flexão	680 MPa
Dureza	55 D
Transição vítrea	127 C
Ponto de gel	327 C
Temperatura de degradação	> 400 C
Temperatura máxima de serviço	260 C

## 9 Experimentos

Este capítulo se ocupa do emprego da tecnologia de fabricação com o auxílio do laser na confecção de endopróteses vasculares. São três os temas abordados: o corte de lâminas de aço inoxidável 316L, a furação de filmes de Ptfé e a soldagem de arames de NiTi.

Apesar de aparentemente bastante distintos, estes três tópicos se relacionam por representarem problemas importantes na fabricação dessas próteses. O estudo do corte busca entender, através da observação das variáveis do processo, as possibilidades e dificuldades associadas ao seu uso para a fabricação de *stents* de pequenas dimensões, como os mostrados na Figura 1.4 e na Figura 1.6. Dadas suas dimensões, são confeccionados a partir de pequenos tubos de aço inoxidável ou NiTi e, como já dito, são componentes delicados e em geral dependem de processos que evitem os esforços mecânicos sobre sua estrutura.

Como não se dispunha de equipamentos adequados ao manuseio de pequenos tubos e ao corte em três dimensões necessário, considerou-se satisfatório para o objetivo estabelecido o trabalho no plano, pois permitiria a obtenção de subsídios para que, em uma possível continuação do trabalho, se pudesse inferir sobre a confecção do *stent* com esta ferramenta.

A furação, por sua vez, se mostrou interessante por vislumbrar uma ferramenta para se trabalhar os filmes de Ptfé que revestem as endopróteses utilizadas no tratamento de aneurismas de aorta, com um resultado de maior qualidade quando comparado aos processos mecânicos alternativos. Este fato se confirmou com os experimentos e viabilizou a implementação de uma modificação no projeto desta endoprótese que, mediante um estudo médico a ser realizado em breve, poderá se confirmar como uma resposta ao problema de selamento e migração tardia da prótese e, possivelmente, alcançar o mercado, dando maior confiabilidade ao tratamento.

Finalmente, a soldagem de arames de NiTi se ocupou das uniões existentes no *stent* (e também em peças do cateter introdutor) então confeccionadas com o uso de um material diferente, o que não é desejável e é tido como um problema em diversas das próteses encontradas no mercado, inclusive a Apolo<sup>®</sup>, tomada aqui como modelo.

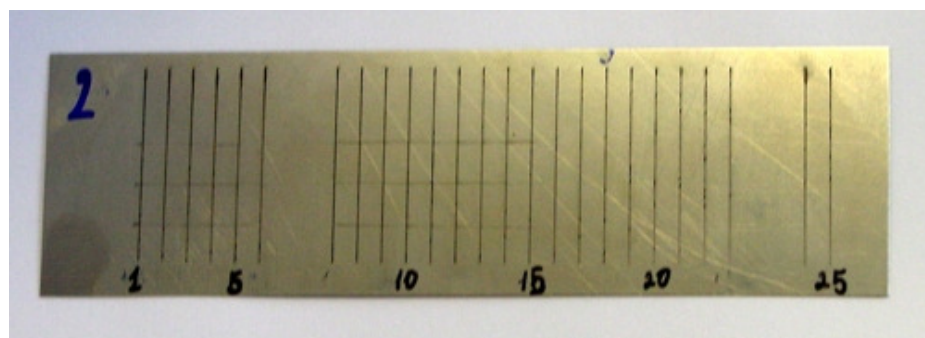
### ***9.1 Corte de lâminas de aço inoxidável***

O estudo sobre o corte de lâminas de aço inoxidável compreende três baterias de ensaios realizadas em dois equipamentos diferentes. De início, um pré-ensaio empregando o laser de Nd:YAG Lasag FLS 542-502 pertencente ao “Institut für Fertigungstechnik” (IFF) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Técnica de Ilmenau (TU-Ilmenau), o qual balizou o primeiro ensaio, feito com o mesmo equipamento, que pretendia verificar o comportamento do processo frente a duas de suas variáveis: a energia e a frequência de pulso.

Buscando mais informação, com novos experimentos, vislumbrou-se a possibilidade de uma avaliação mais ampla, desta feita com outros parâmetros incluídos na análise. Para isso, frente a limitação do equipamento utilizado nos primeiros ensaios, contou-se com a cortesia do “Institut für Präzisionstechnik und Automation”, localizado na cidade de Suhl, Alemanha, que cedeu algumas horas de trabalho de seu laser Nd:YAG Haas (LAY 50).

Como buscava-se compreender o processo de corte a laser e a influência dos parâmetros sobre o processo, o plano de experimento escolhido foi, nos dois casos, o fatorial completo.

O corte foi feito com 25 mm de comprimento em tiras com 30 mm de largura, conforme Figura 9.1. A espessura das lâminas era de 0,2 mm e todos os cortes foram assistidos por um jato de gás argônio concêntrico com o feixe de luz e soprado com uma pressão de 4 bar, exceto no experimento com o laser Haas, onde se variou a pressão do gás.



*Figura 9.1 – Configuração dos cortes.*



### 9.1.1 Pré-ensaio

Neste primeiro ensaio buscou-se determinar as fronteiras dentro das quais seria possível variar os parâmetros do processo de corte com laser, utilizando o equipamento disponível no IFF, o laser LASAG.

Variou-se, usando o método da tentativa, a frequência de pulso (300 a 500 Hz), a velocidade (1 a 4 m/min) e a energia (0,1 a 0,8 Ws). Observou-se que quando a energia, a frequência ou ambas tinham valores altos, a área próxima ao corte apresentava-se alterada por uma grande região afetada termicamente (HAZ), como mostrado no lado esquerdo da Figura 9.2. Quando o avanço era muito grande ocorriam pequenas explosões e o resultado do corte era catastrófico, o que está ilustrado na mesma figura, à direita. E ao centro da figura a característica da fenda de corte que se considerou adequada

Para o ensaio seguinte foi escolhida a faixa de parâmetros que resultava em uma fenda semelhante à mostrada na figura. Assim, os valores escolhidos para os níveis baixo e alto das variáveis foram 350 e 450 Hz, para a frequência de pulso, e 0,2 e 0,3 Ws, para a energia.

Como foi observado que a variação da velocidade de avanço não podia ser controlada de forma precisa, devido às características da montagem do acionador que movimenta a peça durante o corte, optou-se por realizar o ensaio seguinte com um valor fixo. E o valor escolhido foi 1 m/min.



**Figura 9.2** – Três cortes feitos neste ensaio. À esquerda uma HAZ muito grande, ao centro um corte considerado bom e à direita um corte catastrófico causado pelo avanço excessivo.

Desta forma, considerou-se alcançado com sucesso o objetivo do pré-ensaio, pois permitiu verificar as limitações deste equipamento e a faixa de parâmetros que resulta em uma fenda de corte aceitável, definindo os valores a serem usados no ensaio seguinte.

### 9.1.2 Ensaio de corte usando o equipamento Lasag

Neste ensaio buscou-se observar a influência da variação dos parâmetros frequência de pulso e energia no corte de chapas com o equipamento LASAG FLS 542-502, quantificando-a.

Devido a sua simplicidade e facilidade de interpretação, foi escolhido para este ensaio um planejamento de experimento fatorial completo com duas variáveis em dois níveis ( $2^2$ ), o que resultou em quatro possíveis combinações de parâmetros. E, visando garantir a confiabilidade dos resultados, foram feitas quatro repetições para cada combinação de parâmetros.

Baseado no pré-ensaio, os níveis baixo e alto escolhidos para as variáveis, como já mostrado, foram os seguintes:

*Tabela 9.1 – Grandezas do experimento.*

Variável	Designação	Nível baixo (-1)	Nível alto (1)	Unidade
Frequência	A	350	450	Hz
Energia	B	0,2	0,3	Ws

E o plano do experimento determinado de acordo com a Tabela 9.2 abaixo.

*Tabela 9.2 – Plano do experimento.*

Observação	Nível da frequência (A)	Nível da energia (B)
1	-1	-1
a	1	-1
b	-1	1
ab	1	1

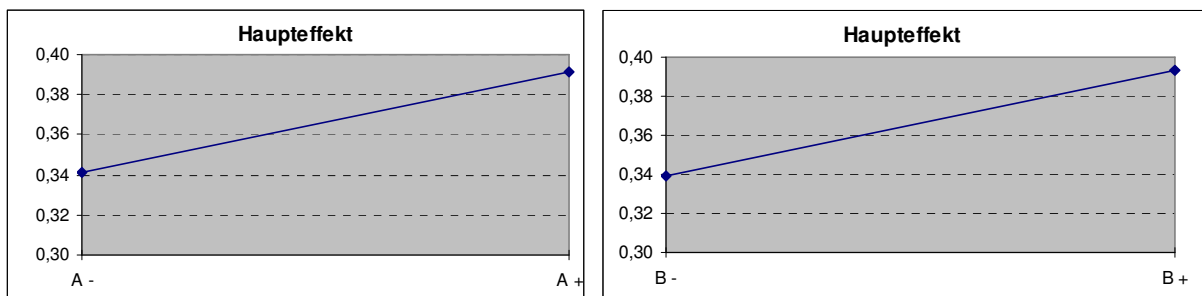
Como variável de saída avaliou-se a largura da fenda de corte, que foi medida com o auxílio de um microscópio de metalografia da marca Zeiss e uma escala padrão. Para processamento destes dados fez-se uso de uma análise de variância, conforme descrito em Montgomery /37/ e Petersen /38/, tomando como critério de significância para o teste F o valor de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Os resultados obtidos estão descritos nos gráficos abaixo.

A observação ao microscópio mostrou que na região inicial, o corte era sempre de má qualidade, apresentando irregularidades. Figura 9.3 à esquerda. Isto se deve as características de aceleração e montagem do acionamento responsável pelo movimento da peça sob o feixe. Desta forma, para as medições considerou-se sempre a região central do corte, onde este já não apresentava tão evidentemente esta influência.

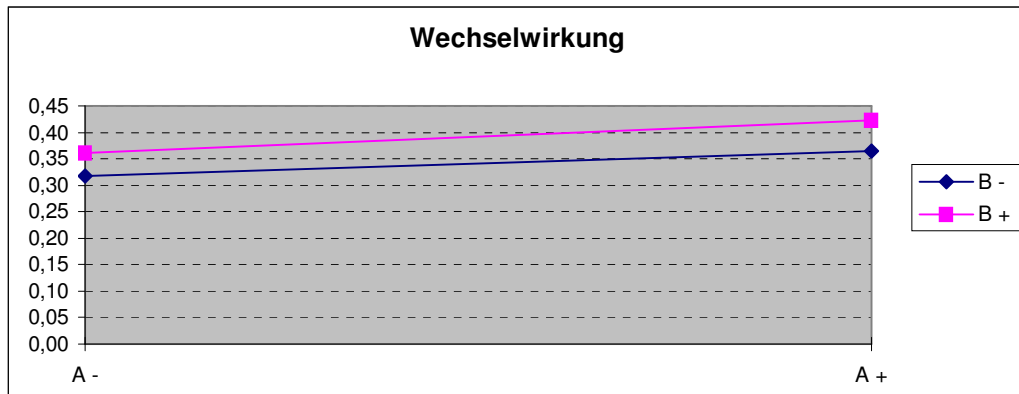


*Figura 9.3 – Corte feito com o laser Lasag. Da esquerda para a direita: Início do corte, região central e final do corte. Ampliação de 50,4 X.*

O efeito na largura do corte da variação de cada um dos parâmetros está mostrado na Figura 9.4, onde se observa comportamento bastante semelhante para as duas variáveis. Já a Figura 9.5 mostra a combinação entre os parâmetros. Uma vez que as linhas estão paralelas, conclui-se que não existe correlação entre os parâmetros observados, ou seja, a variação de um deles não altera a influência do outro no resultado do processo.

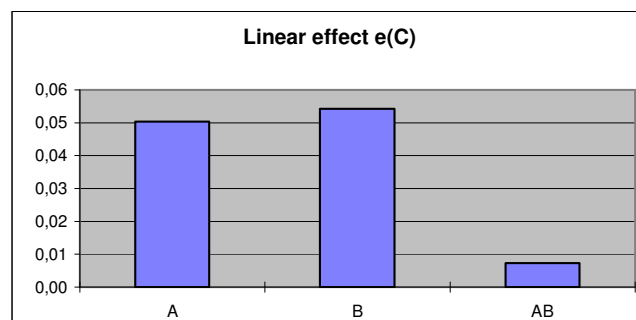


*Figura 9.4 – Efeito principal das variáveis frequência de pulso (A) e energia (B). Os valores estão em mm.*



**Figura 9.5** – Interação entre as duas variáveis, frequência de pulso (A) e energia (B). Os valores estão em mm.

A Figura 9.6 mostra, de forma mais evidente o fenômeno observado nos gráficos anteriores, ou seja, mostra que a variação provocada no resultado pela variável B (energia) é pouco maior do que a que provoca a variável A (frequência de pulso) e mostra também que ambas têm um efeito independente muito maior do que o efeito de sua combinação.



**Figura 9.6** - Efeito linear das duas variáveis e sua interação.

A razão para isso parece óbvia. Aumentando a energia, aumenta o aporte de calor para a peça e, conseqüentemente, mais material é fundido e soprado para fora da fenda de corte. Com resultado semelhante, o aumento da frequência de pulso diminui o efeito do resfriamento no momento da pausa entre um pulso e outro (que se torna menor), permitindo também que uma quantidade maior de material se funda. Isto explica também a ausência de correlação entre as variáveis, pois são fenômenos independentes, não interferindo um no outro.

### 9.1.3 Ensaio com o equipamento Haas

Com este ensaio buscou-se ampliar o estudo da influência dos principais parâmetros no corte de lâminas, observando desta vez o comportamento de cinco deles em um equipamento diferente do utilizado anteriormente. O ensaio fez uso de um equipamento Haas (LAY 50), do “Institut für Präzisionstechnik und Automation” da TU-Ilmenau, localizado na cidade de Suhl.

Novamente empregou-se um experimento fatorial de dois níveis. Os parâmetros avaliados neste ensaio foram: Energia (controlada pela tensão de entrada), duração do pulso, frequência de pulso, velocidade de avanço e pressão do gás de corte. Neste ensaio, como no anterior, a variável de saída avaliada foi a largura do corte.

É importante esclarecer que devido a restrições do instituto com relação ao uso do equipamento, a faixa permitida para variação dos parâmetros, acreditava-se, era muito estreita (o que se confirmou posteriormente na análise dos resultados). Contudo optou-se por proceder a investigação, pois não seria possível um pré-ensaio e o equipamento era diferente daquele utilizado no primeiro ensaio, podendo potencialmente trazer novas informações ao estudo.

Assim, de acordo com a recomendação, definiu-se os níveis das variáveis conforme a Tabela 9.3 e o plano do experimento, seguindo Montgomery /37/ e Petersen /38/, foi estabelecido conforme mostrado na Tabela 9.4. Da mesma forma que no experimento anterior, foram realizadas quatro repetições para cada observação.

*Tabela 9.3 –Grandezas do experimento.*

Variável	Designação	Nível baixo	Nível alto	Unidade
Tensão (energia)	A	480	490	V
Duração do pulso	B	0,18	0,20	ms
Frequência de pulso	C	150	200	Hz
Velocidade de avanço	D	0,2	0,3	M/min
Pressão do gás	E	5	6	bar

Tabela 9.4 Plano do experimento.

Observação	Tensão (A)	Duração (B)	Frequência (C)	Avanço (D)	Pressão (E)
1	-1	-1	-1	-1	-1
A	1	-1	-1	-1	-1
B	-1	1	-1	-1	-1
Ab	1	1	-1	-1	-1
C	-1	-1	1	-1	-1
ac	1	-1	1	-1	-1
bc	-1	1	1	-1	-1
abc	1	1	1	-1	-1
d	-1	-1	-1	1	-1
ad	1	-1	-1	1	-1
bd	-1	1	-1	1	-1
abd	1	1	-1	1	-1
cd	-1	-1	1	1	-1
acd	1	-1	1	1	-1
bcd	-1	1	1	1	-1
abcd	1	1	1	1	-1
e	-1	-1	-1	-1	1
ae	1	-1	-1	-1	1
be	-1	1	-1	-1	1
abe	1	1	-1	-1	1
ce	-1	-1	1	-1	1
ace	1	-1	1	-1	1
bce	-1	1	1	-1	1
abce	1	1	1	-1	1
de	-1	-1	-1	1	1

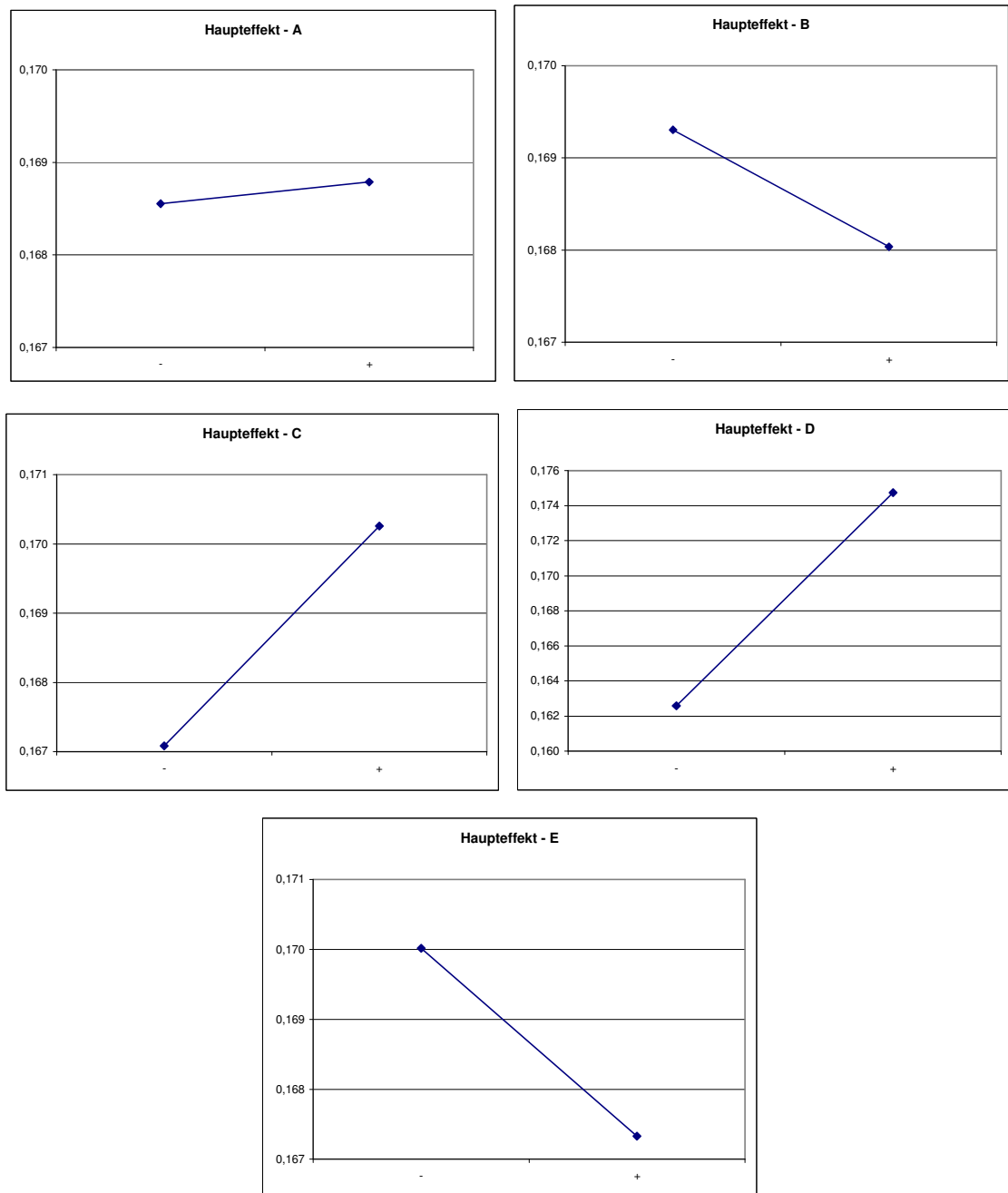
ade	1	-1	-1	1	1
bde	-1	1	-1	1	1
abde	1	1	-1	1	1
cde	-1	-1	1	1	1
acde	1	-1	1	1	1
bcde	-1	1	1	1	1
abcde	1	1	1	1	1

Concordando com o procedimento seguido no ensaio anterior, o processamento dos resultados foi feito com auxílio de uma análise de variância, tomando como critério de significância para o teste F o valor de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). E esta não indicou diferenças significativas entre os resultados obtidos com a variação dos níveis dos parâmetros do processo. Frente a isso podem ser levantadas três hipóteses:

- houve incongruência na análise estatística (cálculo, interpretação, ...);
- a medição da largura de corte não foi feita com resolução suficiente para caracterizar as diferenças, ou seja, a incerteza de medição do equipamento empregado não permitiu uma avaliação adequada dos resultados;
- a faixa dentro da qual os parâmetros foram variados é muito estreita, não permitindo que se observem variações significativas nos resultados.

Os gráficos de efeito principal, Figura 9.7, mostram a oscilação na largura de corte provocada pela variação dos parâmetros do processo. Os valores medidos para esta variação foram muito pequenos, ficando entre 1 e 2 % da largura da fenda. Somente o Avanço (D) apresentou variação próxima a 5 %, sem contudo ser apontada como significativa pela análise de variância.

Coerente com isso, os gráficos de correlação entre as variáveis agrupadas duas a duas não demonstram dependência entre estas, assim não serão inseridos neste trabalho todos os dez gráficos de correlação, mas apenas exemplos destes com o intuito de ilustrar sua característica. Veja Figura 9.8. O mesmo vale para as correlações entre três ou mais parâmetros, que foram suprimidas desta discussão.



**Figura 9.7** – Efeito principal das variáveis tensão (A), duração de pulso (B), frequência de pulso (C), avanço (D) e pressão do gás de corte (E). Os valores são dados em mm.



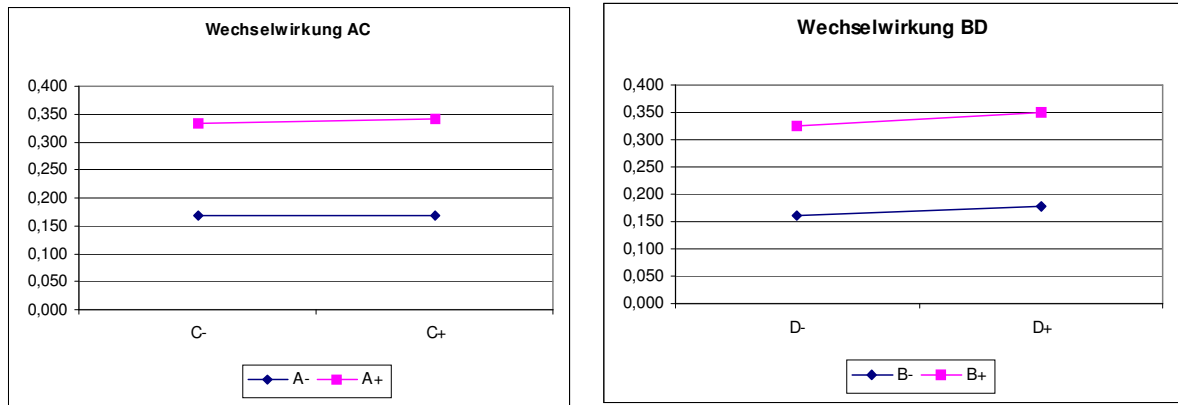


Figura 9.8 – Correlação entre as variáveis. Os valores são dados em mm.

A Figura 9.9 mostra o efeito linear das variáveis observadas e de suas interações. Apesar do gráfico apresentar alguns valores sobressaindo-se sobre os outros, o teste F da análise de variância não considerou nenhum resultado significativo.

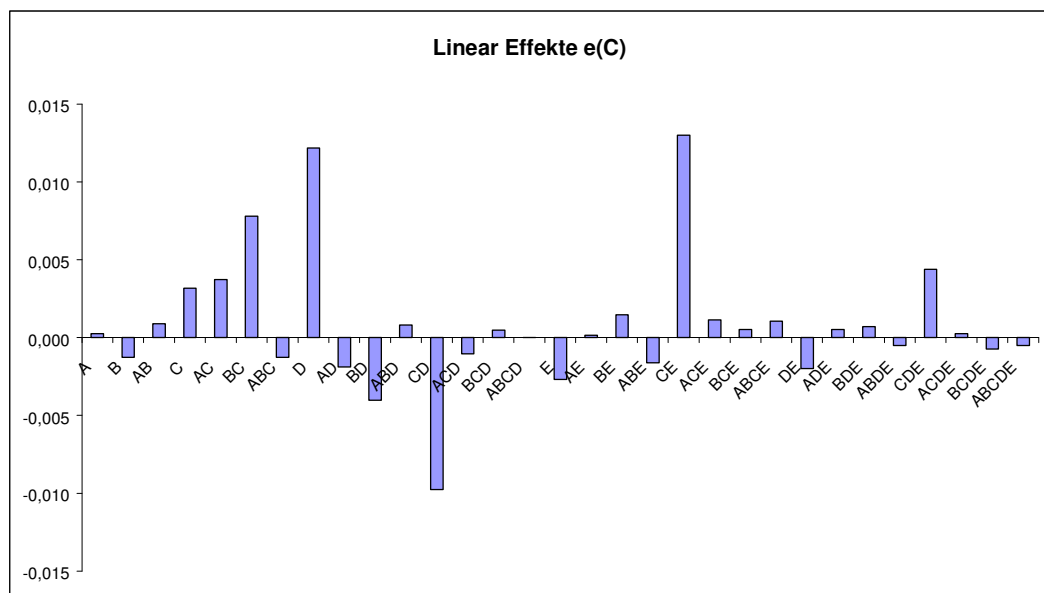


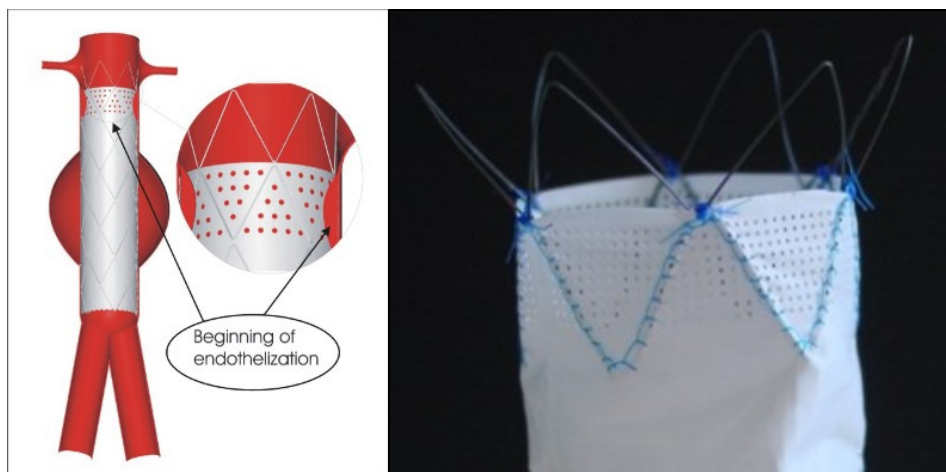
Figura 9.9 - Efeito linear das variáveis tensão (A), duração de pulso (B), frequência de pulso (C), avanço (D) e pressão do gás de corte (E) e suas combinações sobre a largura de corte. Valores em mm.

Consideradas as três hipóteses levantadas anteriormente sobre o resultado desta observação, repetiu-se a medição da fenda de corte e a análise de variância. O resultado obtido foi o mesmo. Assim, resta crer que a faixa em que se variou os parâmetros é muito estreita e não permitiu variações no resultado do corte grandes o suficiente para serem avaliadas com os recursos disponíveis.

## 9.2 Furação de filme de ptfe

### 9.2.1 Objetivo deste experimento

O estudo foi motivado pela construção de um protótipo de uma prótese endovascular para que se pudesse avaliar a evolução da endotelização subsequente ao implante, visando atacar os problemas de selamento e migração das endopróteses. Esse protótipo deve ter um colar de furos, distribuídos em forma de malha, na região proximal (superior) de seu revestimento de ptfe, conforme ilustrado na Figura 9.10. Esses furos no entanto devem ser de pequenas dimensões. Estimou-se aqui cerca de 0,4 mm de diâmetro como um valor de referência. E além disso, devem ser de boa qualidade, sem fiapos ou irregularidades que possam provocar o rompimento do tecido.



**Figura 9.10** - Esquema e protótipo de uma endoprótese apresentando a inclusão de um colar de furos em seu projeto. /47/

Assim sendo, estabeleceu-se como objetivo gerar um colar de furos de 0,4 mm de diâmetro, com 8,0 mm de comprimento (direção axial), ao longo do perímetro do filme tubular de ptfe, e com dois valores para a distância entre os centros dos furos, medida tanto na direção axial, quanto na radial: 1,0 e 1,4 mm. O filme tem 0,1 mm de espessura.

### 9.2.2 Equipamento utilizado

- Fonte laser de CO<sub>2</sub> Synrad 48 Series, com um scanner acoplado à saída do feixe. – Labmat – UFSC;

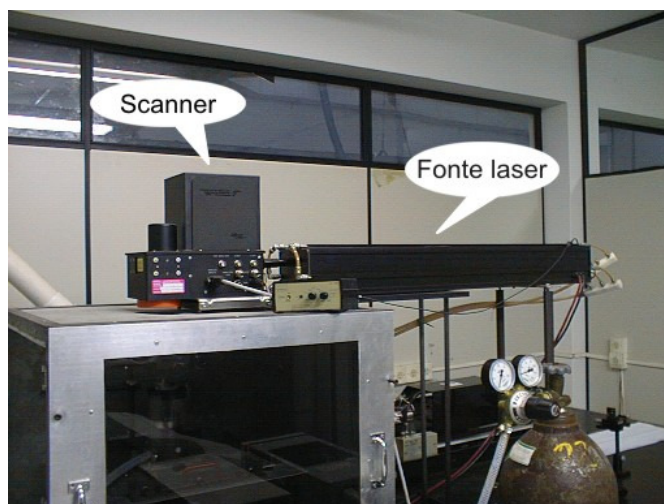


Figura 9.11 - Laser de CO<sub>2</sub> do Laboratório de Materiais (LabMat) da UFSC.

- Estereoscópio – Labmat – UFSC;
- Microscópio ótico de ferramentaria Carl Zeiss - Nano Endoluminal S.A;
- Equipamento para o teste de tração: Emic DI 2000, com uma célula de carga Z-500, de 500 N. O software de aquisição de dados é o Tesc, versão 1.10 - Laboratório de Materiais Poliméricos – POLIMAT – Departamento de Química – UFSC.

### 9.2.3 Procedimento experimental e discussão dos resultados

Assim que surgiu a idéia na empresa, foi feito um pré-teste para conhecer o comportamento do ptfе mediante a ação da radiação laser e estimar a viabilidade de se obter o furo desejado com o uso desta técnica. Para tanto se fez uma primeira tentativa, expondo o filme de ptfе ao laser em uma posição aleatória com relação ao plano focal. Do resultado, verificou-se que era possível obter um furo no filme de ptfе, ao ar, ou seja, sem necessidade de atmosfera de gás inerte, e minimizando a região queimada à medida em que se aproximava do foco.

Sabendo as características do furo que se desejava obter, ausência de irregularidades, queima ou fiapos, foram estipulados os critérios de avaliação. Foi Estabelecido que a avaliação seria

---

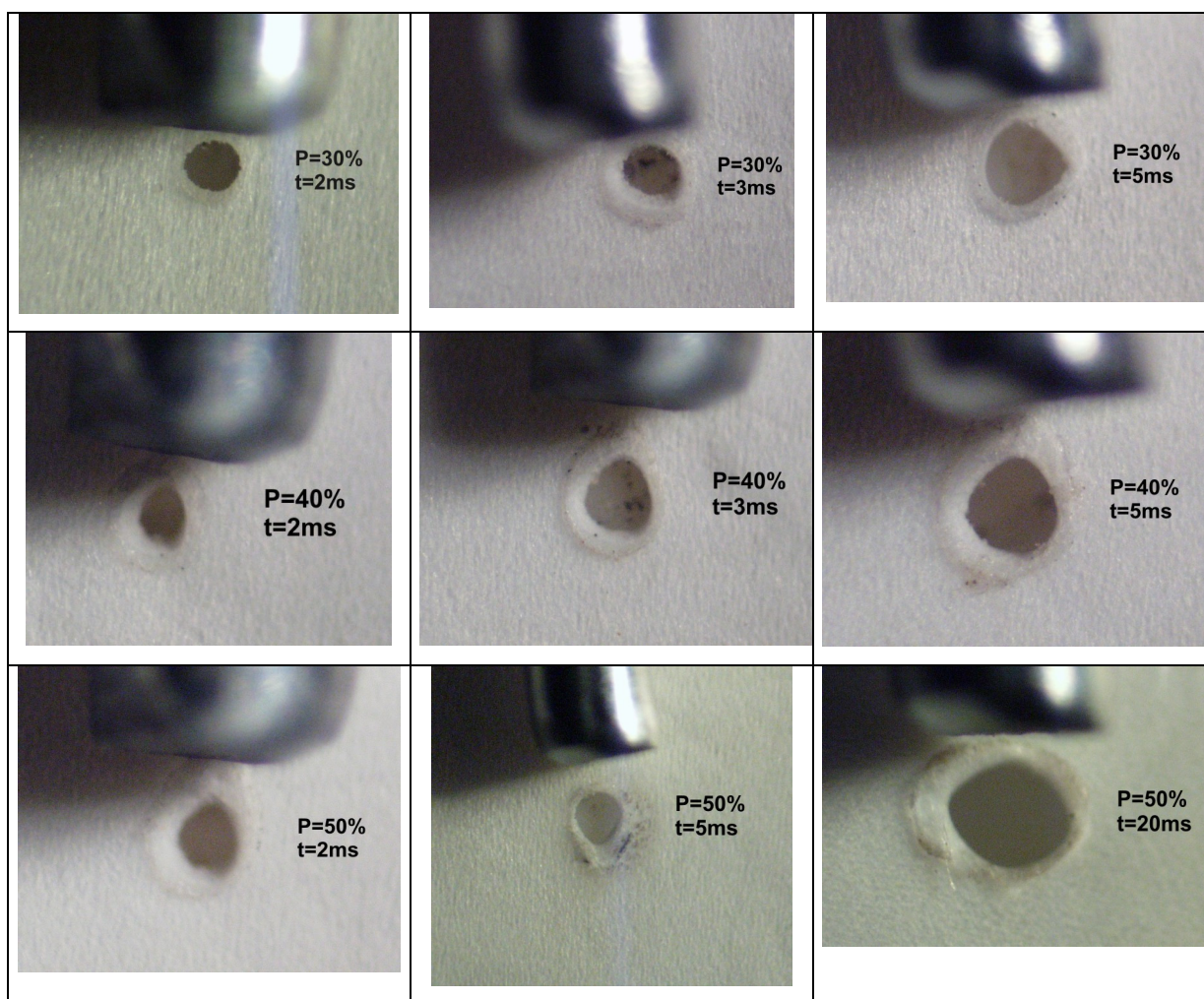
feita através de exame visual da superfície trabalhada e da medição do diâmetro do furo. Depois de encontrada a condição para se satisfazer estes parâmetros, seguiria a furação da malha em tiras de filme de ptfе e em filmes tubulares para a construção de protótipos da endoprótese. Ambos seriam submetidos a testes de resistência à tração, sendo os resultados comparados ao resultado de um ensaio realizado com o material não furado.

Definida a estratégia, o passo seguinte foi o estudo dos valores de potência e duração do pulso adequados à obtenção da qualidade desejada nos furos, veja seção 9.2.1. Para isso foi feita uma sequência de furos, variando os valores desses dois parâmetros, um a cada vez e dentro de uma faixa determinada.

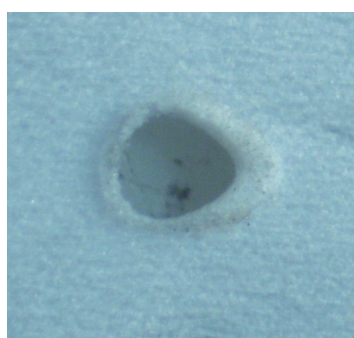
Para a execução dessa sequência de furos, não houve necessidade de se construir dispositivos de fixação especiais, bastou que o filme de ptfе fosse posicionado na região de trabalho sob o cabeçote do laser. Os valores de potência e duração do pulso foram ajustados com o uso do software que comanda o laser e a cada novo furo o filme era deslocado manualmente.

A subsequente medição do diâmetro aproximado dos furos - aproximado porque seu perímetro não é perfeitamente circular, veja Figura 9.12 - fez uso de um microscópio de ferramentaria Zeiss, disponível na empresa. Alternativamente, uma nova medição foi feita com o auxílio da análise de suas fotos em um software editor gráfico.

Os furos que mais se aproximaram do que foi definido como objetivo foram obtidos com duração de pulso entre 2 e 5ms e potência entre 40 e 60% do total de 50W. A duração de pulso igual ou menor do que 1 ms geralmente não furava o filme e quando maior do que 5 ms provocava a queima do material. A potência, por sua vez, se muito elevada, causava marcas sobre o filme. Assim sendo, a combinação de parâmetros escolhida para a confecção da malha de furos foi e 4 ms de duração de pulso e potência de 40% do valor nominal de 50 W. O resultado pode ser visto na Figura 9.13.

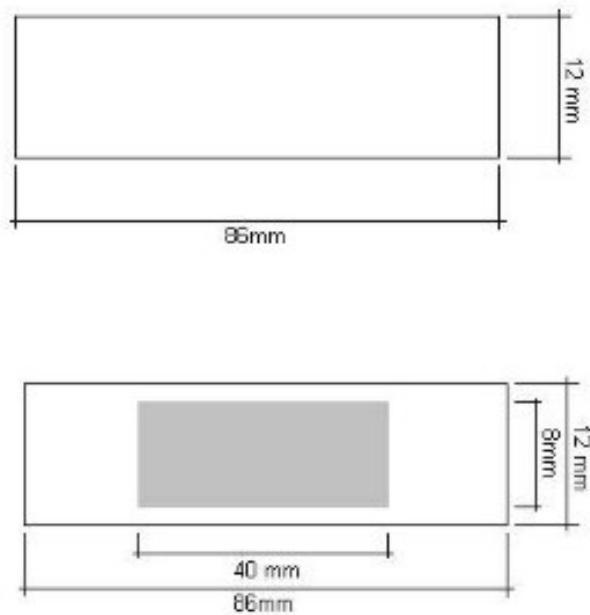


*Figura 9.12 - Furos obtidos com vários valores de potência(P) e duração de pulso(t). A ponta metálica que aparece nas fotos é a extremidade de um clipe para papel, fotografado ao lado do furo para servir como uma referência.*



*Figura 9.13 – Furo obtido com potência de 40% e 4 ms de duração de pulso.*

Determinados os valores adequados à obtenção do furo, restava a definição da estratégia para a obtenção da malha de furos sobre o perímetro do filme tubular de ptfé.



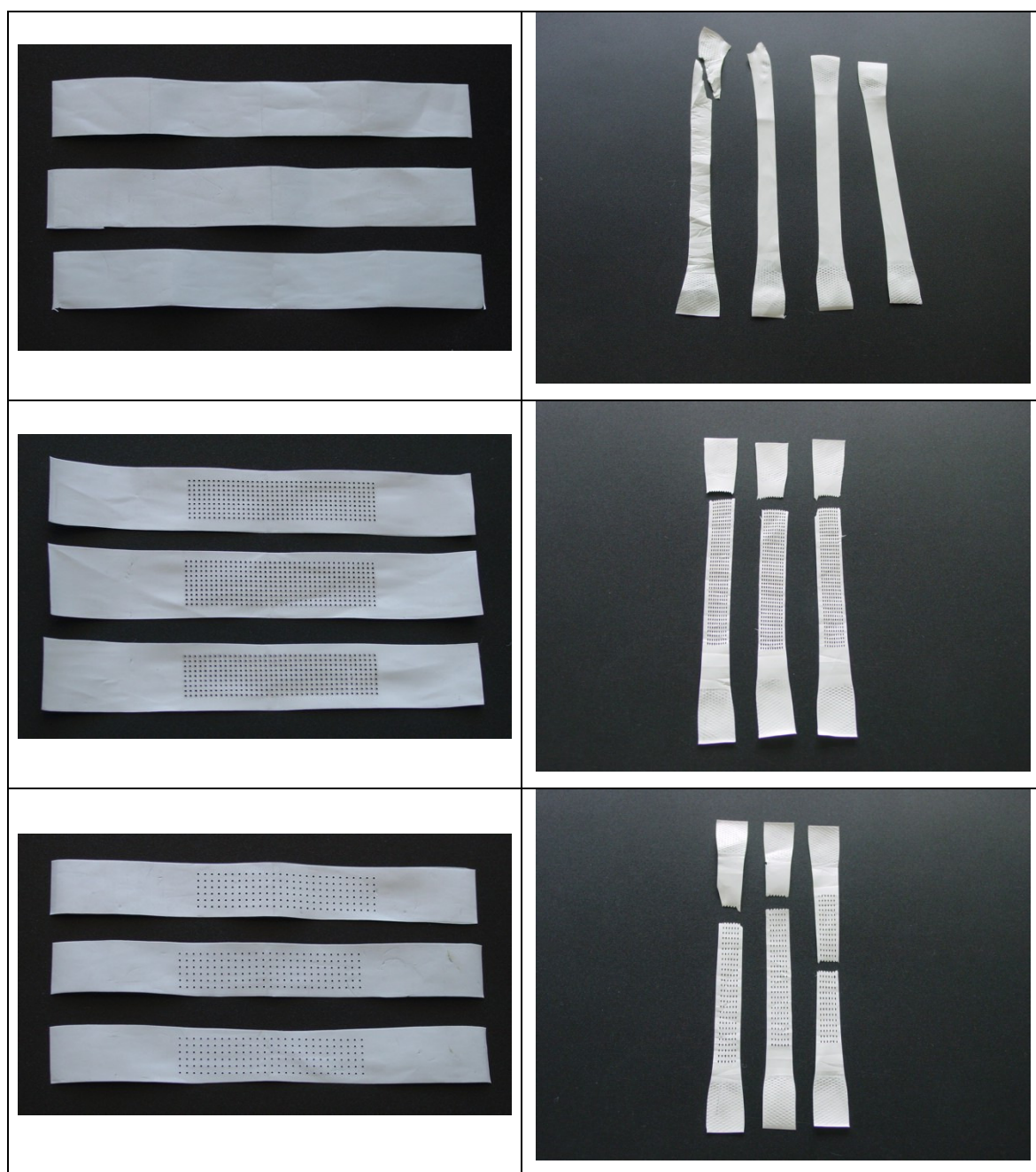
**Figura 9.14** - Dimensões das tiras de filme de ptfe usadas como corpos de prova para o ensaio de resistência à tração. A região sombreada corresponde à área da malha de furos.

Resolvida a estratégia de furação da malha, foram preparados corpos de prova para o ensaio de resistência à tração, de duas formas: Primeiro a malha de furos foi confeccionada sobre tiras do filme de ptfe, visando simplesmente observar o efeito dos furos sobre a sua resistência mecânica, vide Figura 9.14 e Figura 9.15.

Para se avaliar a qualidade do resultado foi feito um teste de resistência à tração utilizando o equipamento do Departamento de Química. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9.5 e na Figura 9.15, o lado esquerdo mostra os corpos de prova antes e o lado direito depois do ensaio.

No ensaio com as tiras sem furos não houve o rompimento conforme esperado. Por ter um coeficiente de atrito dos mais baixos que se conhece, a tira de ptfe escorregou na garra da máquina de testes e esta detectou a movimentação como ruptura. Assim, o valor da Tabela 9.5 é na verdade o ponto onde houve o escorregamento. As tiras furadas romperam como se esperava.





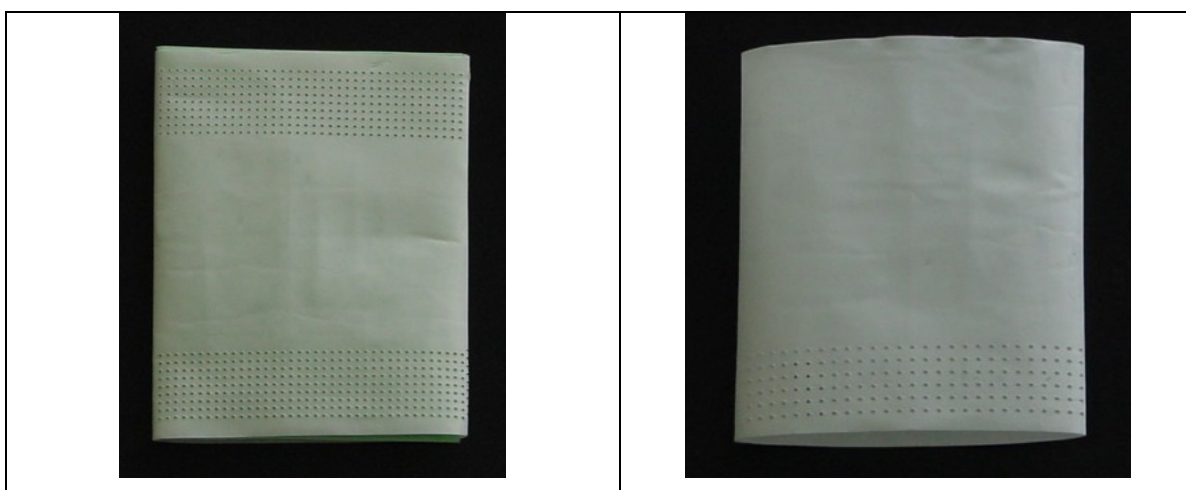
*Figura 9.15 - Corpos de provas de filme de pte para o ensaio de resistência à tração. Antes, à esquerda, e depois do ensaio, à direita. De cima para baixo: O filme sem furos, a malha com 1 mm e com 1,4 mm de distância entre centros.*

Desta forma não se pode afirmar muito com relação ao filme sem furos, a não ser que sua resistência não é menor do que a dos filmes furados. O que é óbvio. Já os valores obtidos para os filmes furados podem ser comparados e sugerem que o filme com maior espaçamento entre os furos, ou seja, com menos furos, é cerca de 16% mais resistente do que o filme com furos menos espaçados entre si.

**Tabela 9.5** – Resumo do resultado do ensaio de tração para as tiras de filmes de ptfе. A unidade N/mm foi usada por se tratar de filmes finos, onde a largura é muitas vezes maior do que a espessura. Assim considera-se a força por unidade de medida de largura do filme.

Condição do filme	Média do valor máximo registrado no ensaio de tração [N/mm]	Desvio padrão da média [N/mm]
Sem furos	3,24	0,25
Com furos – dist. 1,0 mm	3,36	0,02
Com furos – dist. 1,4 mm	2,83	0,12

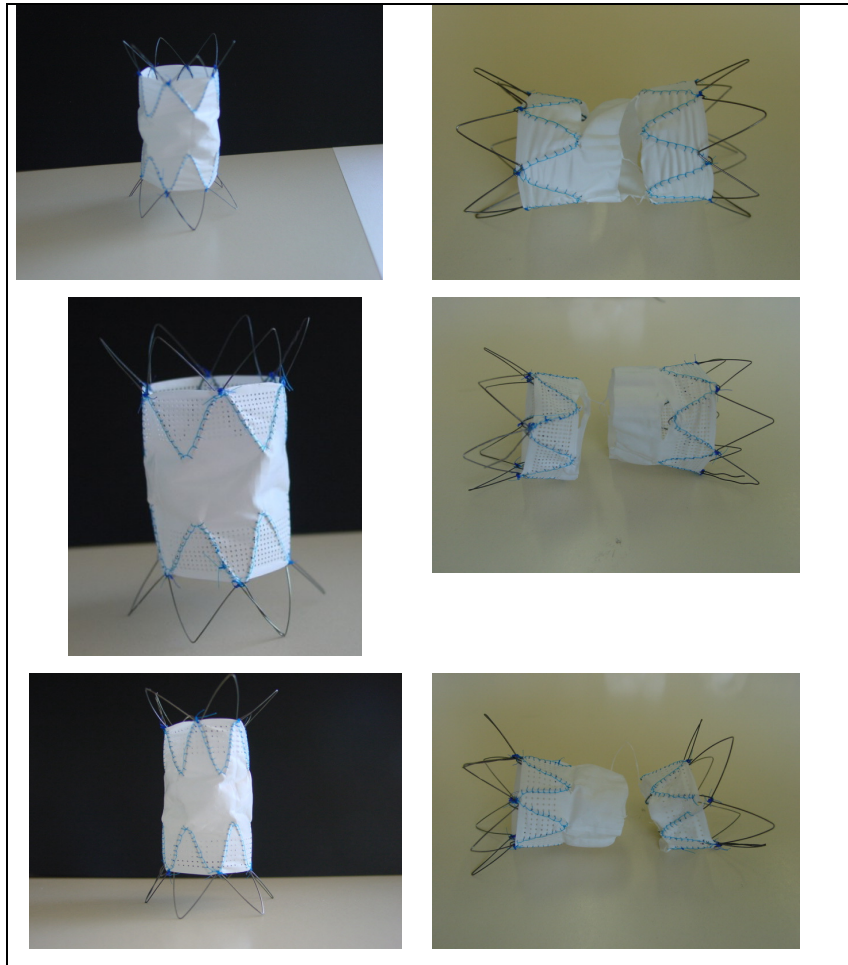
Em seguida, as mesmas malhas de furos foram confeccionadas sobre filmes de formato tubular, formando um colar na região proximal. Figura 9.16. Os filmes foram montados sobre estruturas metálicas, constituindo protótipos das endopróteses. Veja a Figura 9.10 e a Figura 9.17. Assim, o resultado do ensaio permitiria entender o efeito do colar de furos sobre o comportamento da prótese como um todo.



**Figura 9.16** - Colar de furos confeccionado sobre filmes tubulares de ptfе. À esquerda a malha com 1,0 mm e à direita com 1,4 mm de distância entre os furos

No ensaio de resistência à tração a região do colar de furos mostrou não estar envolvida com a ruptura do material devido ao suporte dado pela estrutura. Veja a Figura 9.17. Isto permite concluir que a confecção do colar de furos não terá influência sobre esta característica da prótese. Além disso, a boa qualidade dos furos obtidos os torna aceitáveis para a continuação deste estudo com a confecção de novos protótipos com esta modificação e o estudo de seu comportamento em modelos animais, o que implica em um trabalho conjunto com pesquisadores da medicina.



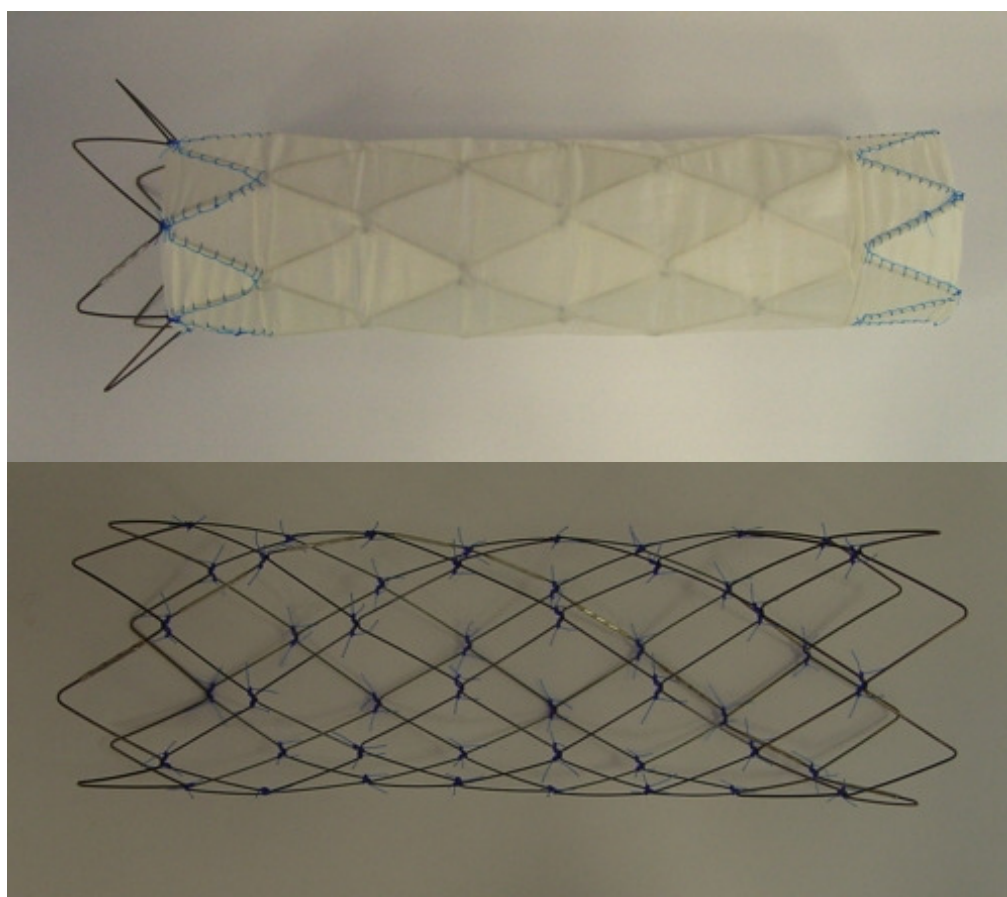


**Figura 9.17** - Fotos dos corpos de prova antes (esquerda) e depois (direita) do ensaio de resistência à tração. De cima para baixo: Prótese sem furos, colar de furos com espaçamento 1,0 mm e colar de furos com espaçamento 1,4 mm, respectivamente.

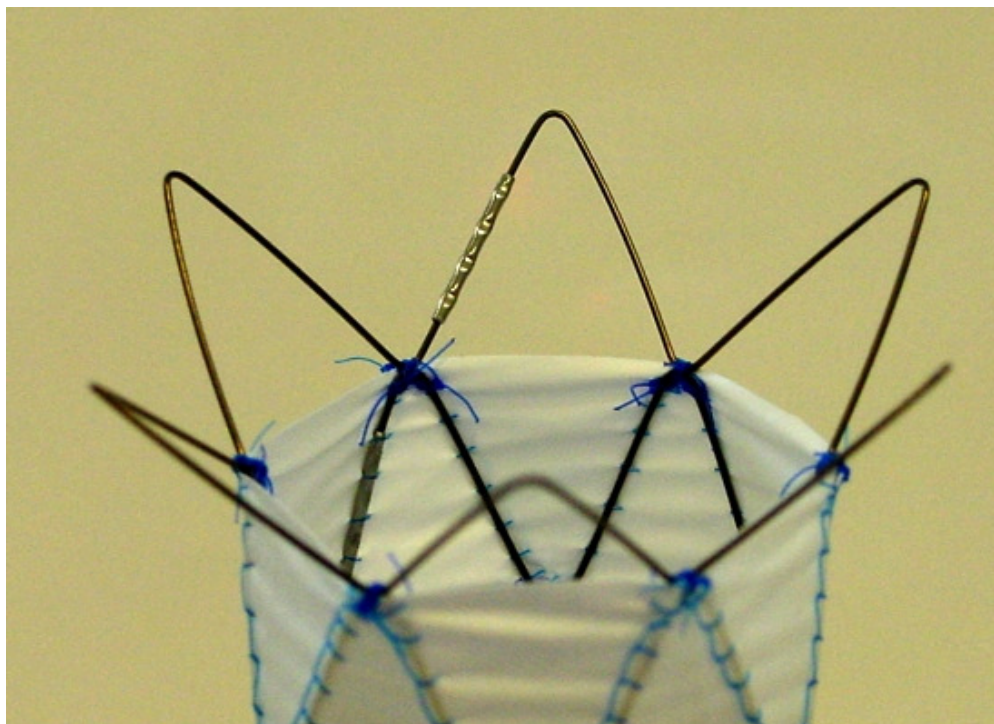
### 9.3 União de arames de NiTi por solda a laser

#### 9.3.1 Objetivo deste experimento

Este estudo envolve a questão da resistência da estrutura da prótese, apontada no capítulo 1 como um dos principais problemas das próteses atuais. A endoprótese Apollo<sup>®</sup> é hoje constituída por uma estrutura metálica envolta por um filme de polímero, Figura 9.18. Nos interessa aqui a estrutura metálica, mostrada na parte inferior da foto, construída a partir de anéis de arames de NiTi unidos em suas extremidades por um *crimping*, feito com um tubo de aço inoxidável, e amarrados uns aos outros com fios de polipropileno. Foi a união por *crimping*, mostrada em detalhe na Figura 9.19, que motivou este estudo.



**Figura 9.18** – Endopróteses para o tratamento de aneurisma da aorta torácica. Completa na parte superior e somente sua estrutura na parte inferior.



*Figura 9.19 – Detalhe mostrando a união por crimping.*

A união usando materiais diferentes pode levar a problemas de corrosão galvânica, além da forma construtiva não garantir o não surgimento de corrosão em fresta. /39/ Assim, entre as possíveis soluções, vislumbrou-se três possibilidades aparentemente interessantes: a união por interferência com o uso de um tubo do mesmo material, a amarração com o mesmo arame utilizado na estrutura e a soldagem de precisão a laser. Os estudos teóricos, incluindo um modelo da união por interferência de acordo com Norton /40/, e experimentos, cuja discussão foge ao objetivo deste trabalho, descartaram as duas primeiras possibilidades. /41/. Deste modo a continuação do estudo abordou a soldagem a laser e é discutida no texto que segue.

Como primeiro passo no estudo da obtenção desta união por soldagem a laser, estabeleceu-se como objetivo a confecção de uma solda sobreposta (veja posição da solda na Figura 9.23 e na Figura 9.24) de arames de NiTi com diâmetros de 0,3 e 0,4 mm. A qualidade seria avaliada em um primeiro momento por inspeção visual e flexão manual, e, posteriormente, por testes de resistência à tração, fadiga e análise metalográfica.

### 9.3.2 Equipamento utilizado

- Fonte laser de Nd:YAG Lasag FLS 542-502 – “Institut für Fertigungstechnik” (IFF), Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Técnica de Ilmenau (TU-Ilmenau);
- Fonte laser de Nd:YAG Quanta Ray GCR-11 – Labmat – UFSC;
- Fonte laser de CO<sub>2</sub> Synrad 48 Series, com um scanner acoplado à saída do feixe. – Labmat – UFSC;
- Máquina para ensaios de resistência à tração Instron 4444 com uma célula de carga de 2kN – Departamento de Odontologia – UFSC;
- Estereoscópio – Labmat – UFSC;
- Microscópio ótico de ferramentaria Carl Zeiss - Nano Endoluminal S.A.

### 9.3.3 Procedimento experimental e discussão dos resultados

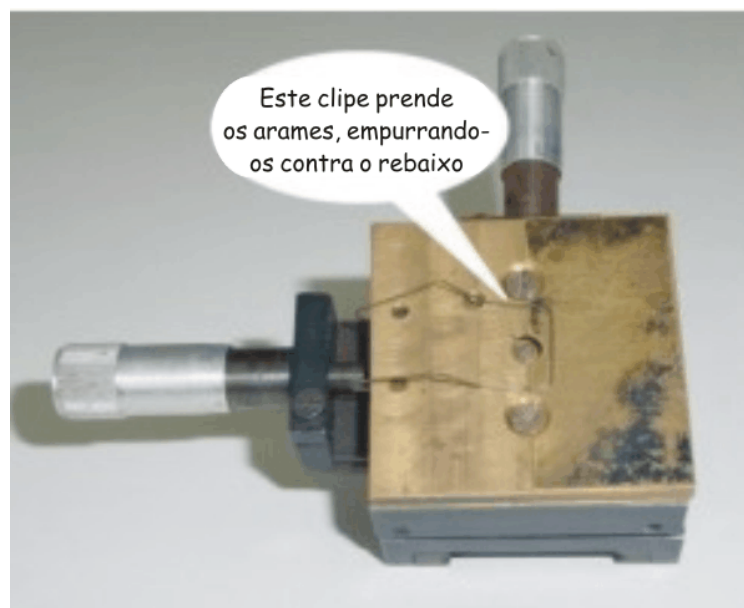
Considerando que o tipo de material a ser trabalhado exige o uso de gás no processo (argônio, hélio) e a geometria exige um posicionamento preciso do feixe sobre o local da solda, e além disso, que os equipamentos do Labmat não dispõem de cabeçote industrial de soldagem e mesa para a movimentação da peça, houve a necessidade de se confeccionar um dispositivo para os ensaios usando a fonte de CO<sub>2</sub> e outro para os ensaios usando a fonte de Nd:YAG. Figura 9.20 e Figura 9.21, respectivamente.



Figura 9.20 - Dispositivo para a fixação dos arames e criação de uma atmosfera inerte no laser de CO<sub>2</sub>.

No dispositivo construído para uso com o laser de CO<sub>2</sub> os arames a serem soldados atravessam um furo na lateral do flange de alumínio e são fixados por parafusos. Veja a posição na Figura 9.20. Na foto da esquerda os pontos pretos na superfície metálica são os parafusos que prendem os arames.

O flange de alumínio e a redoma são montados sobre a base de nylon. O argônio é soprado por baixo, veja a mangueira, e o laser incide de cima passando por uma janela de ZnSe que é montada em um alojamento na tampa e presa pelo anel branco visto na foto.



*Figura 9.21 - Dispositivo para a fixação do arame no laser de Nd:YAG.*

Já o dispositivo de fixação usado no trabalho com o laser de Nd:YAG, mais simples, não possui uma câmara para a geração de atmosfera inerte. Consiste em uma base com um rebaixo, onde os arames são apoiados, e um clipe, que fixa os arames empurrando-os contra o rebaixo. O conjunto é montado sobre guias com fusos micrométricos para facilitar o seu posicionamento sob o laser.

Na posição onde incide o laser há um furo, com um cone no fundo, que tem por função dissipar e absorver a radiação, evitando que o laser seja refletido sobre os elementos ópticos.

O procedimento para a soldagem foi sempre o mesmo. Os arames a serem soldados eram presos lado a lado pelo dispositivo de fixação e posicionados sob o laser. Em seguida acionava-se o gás e depois o laser, que incidia sobre a região de contato entre os arames,



---

gerando a solda. No caso do Nd:YAG, o gás era soprado por uma mangueira diretamente sobre a região da solda. O controle dos parâmetros do laser foi feito pelos softwares de cada um dos equipamentos laser.

***a) Pré-ensaio de soldagem realizado na TU-Ilmenau***

Neste ensaio, realizado entre os ensaios de corte de lâminas nas dependências da TU-Ilmenau, que pretendia ser o primeiro contato com esta tecnologia, buscou-se verificar a possibilidade de soldar arames finos de Nitinol com o uso do laser.

Usando o laser de Nd:YAG da Lasag, foram soldados arames de 0,45 mm de diâmetro, posicionados de topo. Os parâmetros utilizados foram 2,0 ms de duração de pulso, 1,0 Ws de energia e 4 bar de pressão de gás argônio. A solda resultou, a olho nu, aparentemente boa. Contudo, ao ser observada no microscópio, apresentou muitas trincas, o que sugere parâmetros de soldagem não otimizados. A existência destas trincas levou à fratura o material no local da solda quando submetido a grande esforço de flexão. Apesar disso, o objetivo desta primeira tentativa foi alcançado. Ou seja, verificou-se que esta solda é factível sem a necessidade de equipamentos extras ou adaptações do equipamento laser. Exigindo contudo maior conhecimento da metalurgia da liga NiTi e um estudo detalhado do comportamento do processo frente aos parâmetros variáveis.

***b) Ensaios com o laser de CO<sub>2</sub> (Labmat)***

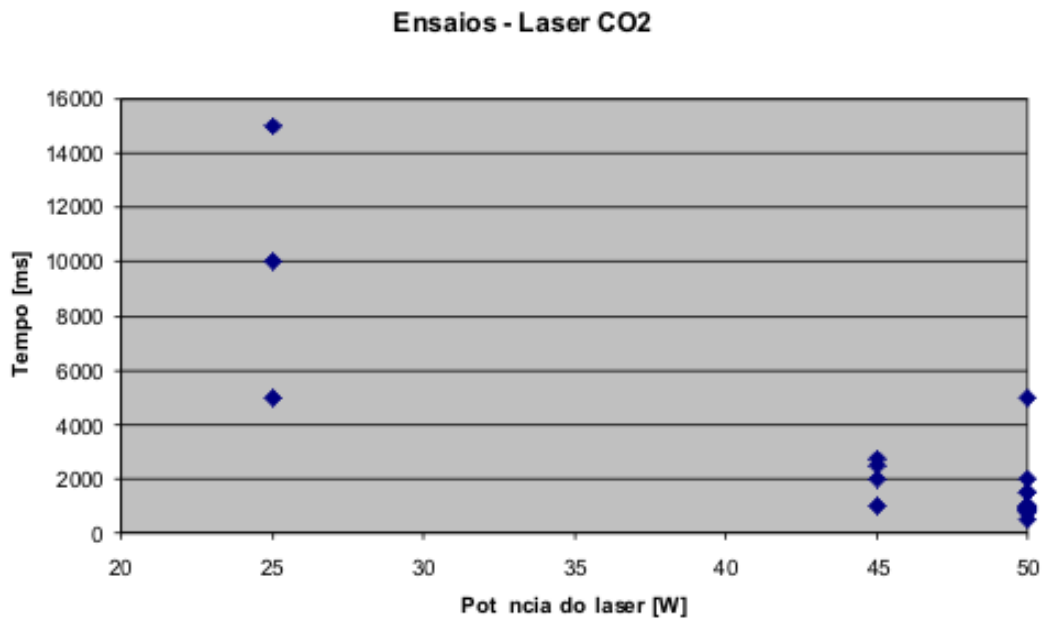
Neste, assim como no ensaio descrito na seção seguinte, foram empregados o dispositivo e o procedimento descritos acima.

Os valores de parâmetros sugeridos pela bibliografia eram incompatíveis com as características do equipamento. Assim, optou-se por variar os valores de potência e tempo de exposição (pulso), dentro da faixa permitida pelo equipamento, buscando verificar se nessas condições seria possível obter a solda, e, em caso positivo, qual seria a qualidade obtível.

A potência foi variada entre 50 a 100% da potência nominal do equipamento, ou seja, de 25 a 50 W, e a duração da exposição entre 500 e 15000 ms (0,5 e 15 s). Dentro da faixa de

potência os valores ensaiados foram 25, 45 e 50 W, enquanto os valores de tempo de exposição foram 500, 750, 800, 900, 910, 920, 930, 950, 1000, 1500, 2000, 2500, 2750, 5000, 10000 e 15000 ms.

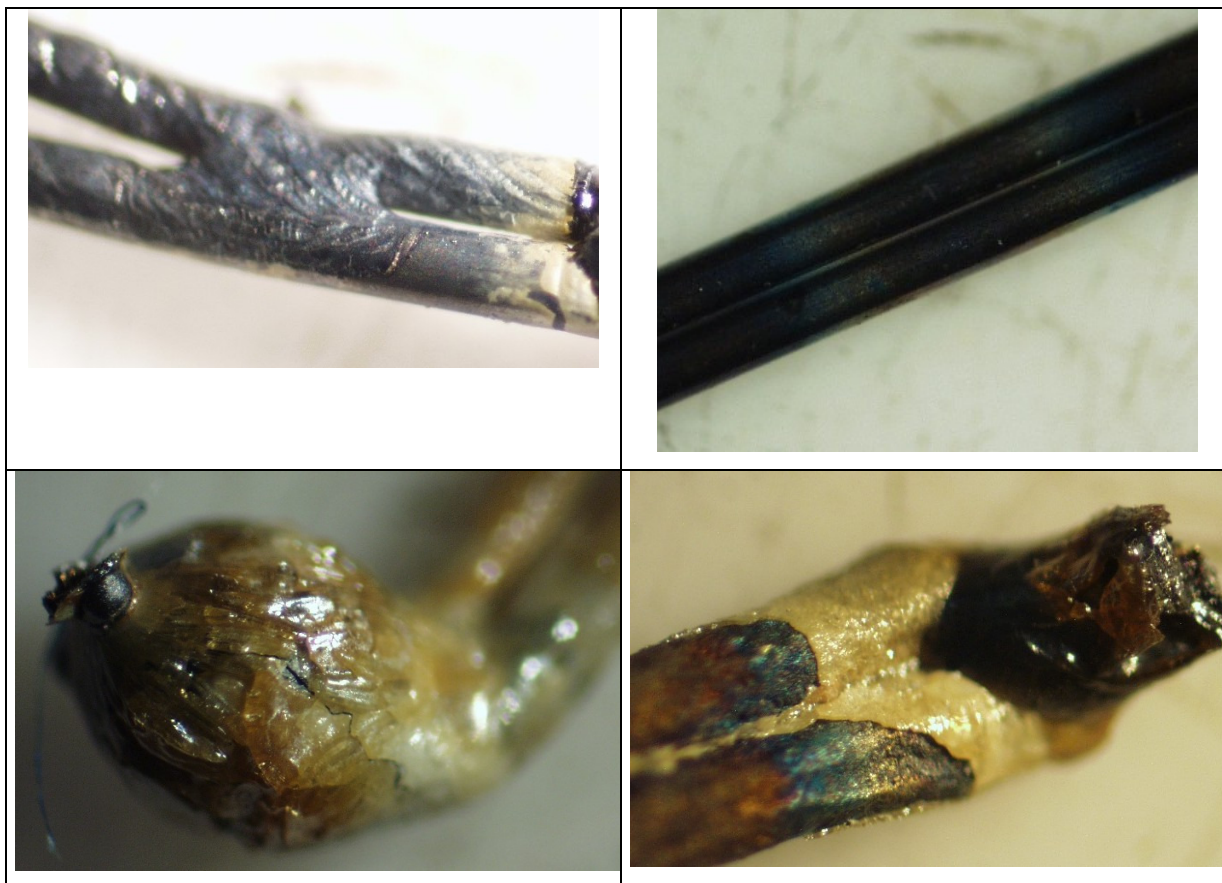
Os pontos observados podem ser vistos na Figura 9.22 abaixo.



*Figura 9.22 – Combinação de parâmetros utilizada no ensaio com o laser de CO<sub>2</sub>.*

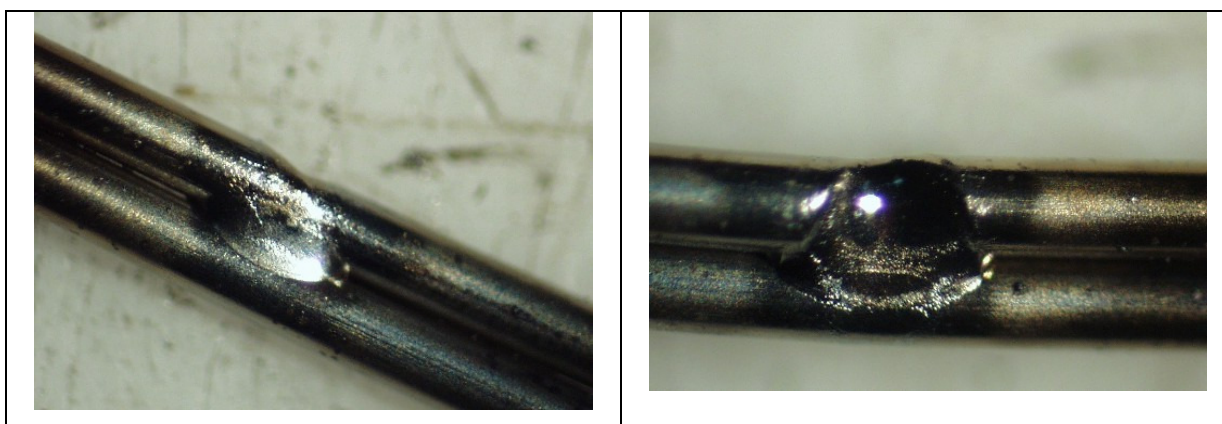
Os resultados oscilaram entre o imperceptível e o catastrófico, passando por uma região onde se pôde obter a solda. Veja a Figura 9.23 e a Figura 9.24.

A Figura 9.23 ilustra algumas das tentativas mal sucedidas de se fazer a soldagem dos arames de NiTi usando o laser de CO<sub>2</sub>. Este experimento foi feito ao ar, sem o uso do argônio como atmosfera protetora.



**Figura 9.23** - Tentativas de soldar os arames de NiTi, diâmetro 0,35mm. Experimento foi feito sem o argônio (Ar). As fotos da parte inferior mostram forte oxidação da região soldada.

A Figura 9.24 mostra uma solda obtida com potência de 90% (45 W) e tempo de 2750 ms. O resultado foi de baixa qualidade. É possível observar que houve perda de material e uma grande região afetada termicamente, o que não deve acontecer no trabalho com laser.



**Figura 9.24** - Solda obtida com o laser de CO<sub>2</sub>. Potência = 45W e tempo = 2750ms. Vista inferior à esquerda e superior à direita.



---

Por causa da baixa potência do laser, o tempo de exposição do material ao laser nesta solda foi muito grande. E é essa a razão do surgimento da grande região afetada termicamente, pois o maior tempo de exposição permite maior dissipação do calor para dentro do corpo do arame.

Uma condição para que esta solda seja feita com qualidade é que o aporte de calor seja feito em um tempo suficientemente pequeno para evitar sua dissipação pela região adjacente, porém com um aporte de energia suficiente à fusão do material no ponto onde se deseja fazer a solda.

Os ensaios permitiram verificar que esta fonte de laser CO<sub>2</sub> não se prestava a este processo nas condições desejadas. Assim se buscou reiniciar os experimentos usando outra fonte laser. A seção seguinte descreve o experimento feito usando uma fonte laser de Nd:YAG.

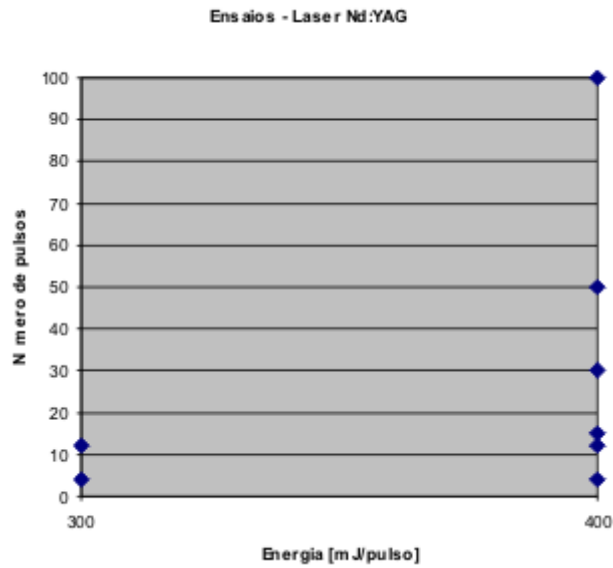
### *c) Ensaios Labmat - Nd:Yag*

Este experimento também seguiu o procedimento e utilizou o dispositivo de fixação descritos acima.

Da mesma forma que na tentativa descrita no item anterior, os valores de parâmetros sugeridos pela bibliografia eram incompatíveis com as características do equipamento. Portanto buscou-se também neste experimento verificar as possibilidades deste equipamento.

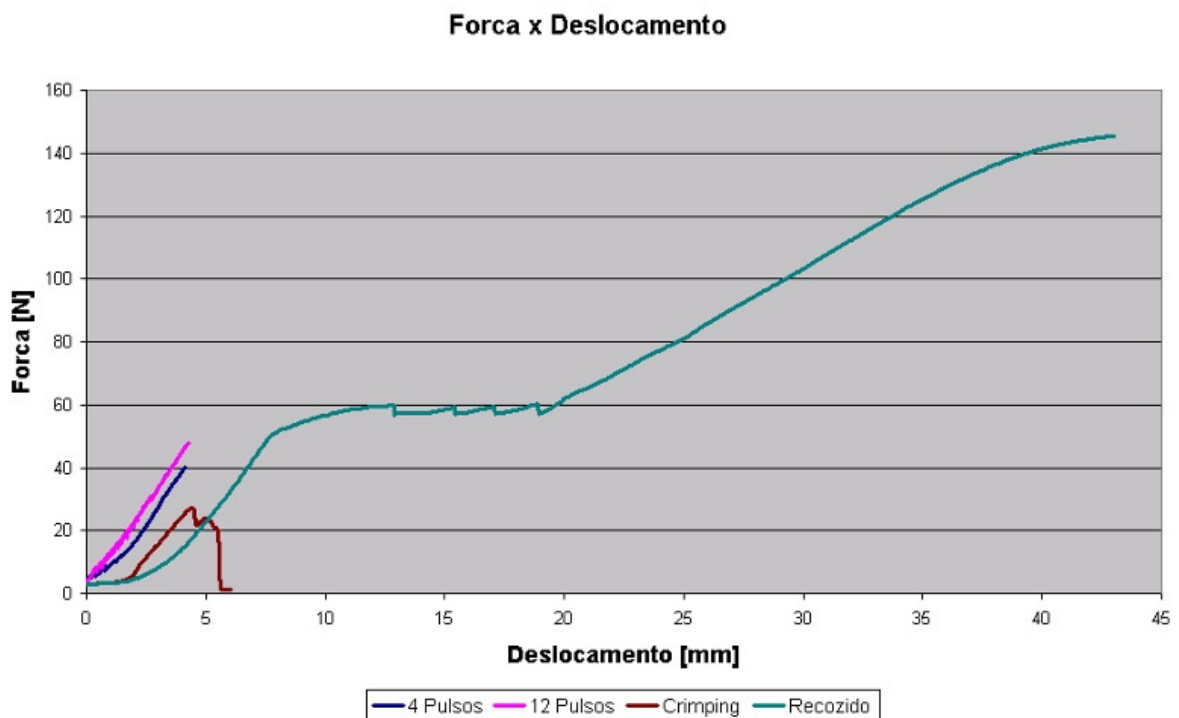
Foi variada a energia de cada pulso e também o número de pulsos sobre o ponto de solda. Os valores de energia por pulso foram de 300 ou 400 mJ e o número de pulsos foi de 4, 12, 15, 30, 50, ou 100.

Os pontos observados podem ser vistos na Figura 9.25 abaixo:



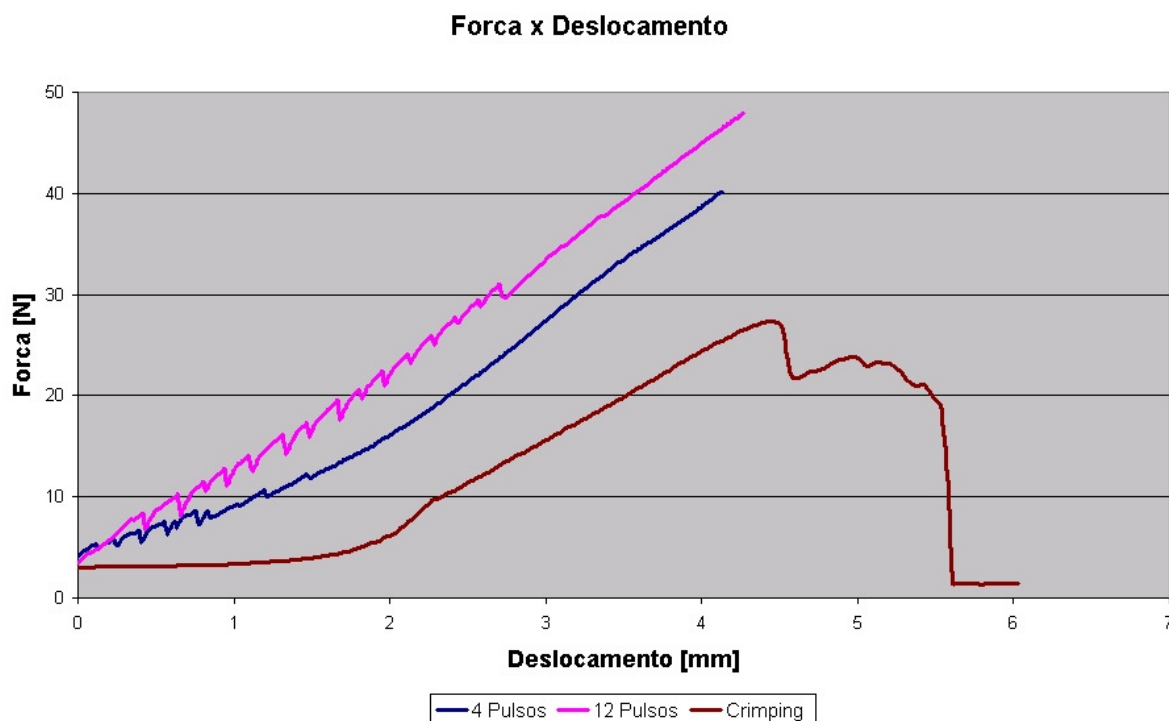
*Figura 9.25 – Combinação de parâmetros utilizada no ensaio com o laser de Nd:YAG.*

A Figura 9.26 mostra o resultado do ensaio de tração feito com arames soldados com 4 pulsos e 400mJ, 12 pulsos e 400 mJ, unidos por crimping e somente o arame, sem união. A resistência da solda é muito baixa quando comparada à resistência do arame, contudo, com relação ao crimping a solda se mostra melhor em termos de resistência à tração axial.



*Figura 9.26 - Resultado do ensaio de soldagem. As ordenadas mostram a força e não a tensão porque é o mais relevante para o produto. A área da solda e do crimping são diferentes da seção do arame.*

A ampliação vista na Figura 9.27 deixa este fato mais claro, mostrando os valores máximos de resistência da solda cerca de 30 % maiores do que o valor do crimping.



*Figura 9.27 - Idem à figura anterior, contudo nesta figura suprimiu-se a curva do arame recozido para facilitar a visualização.*

As fotos seguintes mostram rupturas dos arames soldados com o laser de Nd:Yag sob diferentes aspectos. A Figura 9.28 mostra a ruptura provocada por esforço lateral (buscando afastar os eixos que passam pelo centro dos arames). Esta ruptura não pôde ser ensaiada de forma controlada, sendo obtida por um puxão com as mãos. A região onde estava a solda apresenta aspecto de fratura frágil e o esforço para a ruptura foi mínimo.

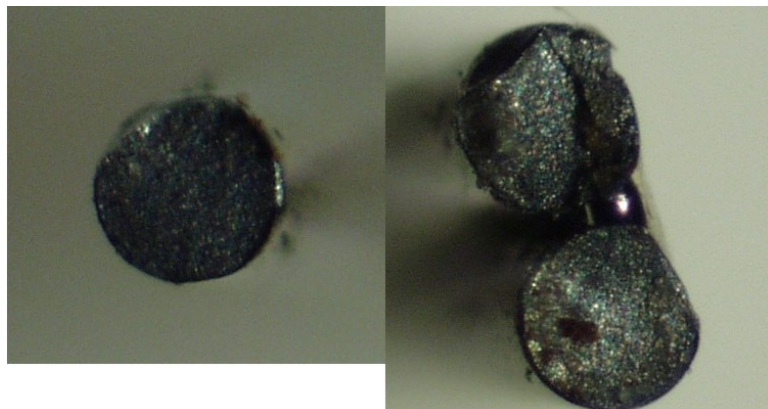


*Figura 9.28 - Ruptura da solda por esforço lateral.*

Na Figura 9.29 e Figura 9.30 vê-se de frente e de topo a ruptura provocada pelo ensaio de tração. Aqui também identifica-se a ruptura frágil sem escoamento. Uma das hipóteses para este comportamento é a contaminação do NiTi por oxigênio durante a soldagem, dada a falta de controle sobre a atmosfera de proteção.



*Figura 9.29 - Ruptura da solda por esforço de tração.*



*Figura 9.30 - Vista de topo da ruptura da solda por esforço de tração.*

Na sequência, a Figura 9.31 ilustra o comportamento do arame não submetido ao laser. É evidente o comportamento dútil, verificando-se o escoamento. No detalhe o clássico par taça-cone.



*Figura 9.31 - Ruptura do material não soldado. Repare que houve escoamento. No detalhe o par taça-cone.*

Os resultados deste ensaio, apesar de aparentemente melhores do que o anterior, também indicaram que o equipamento não é adequado à confecção das soldas desejadas. O estudo continua em aberto na empresa e o passo seguinte é a busca de um parceiro de pesquisa que disponha de um equipamento adequado à confecção desta solda. Equipamentos para ensaios de fadiga e técnicas para o estudo metalográfico do NiTi também estão em fase avançada de desenvolvimento e possibilitarão nas etapas seguintes um estudo mais detalhado do material soldado.

---

## 10 Conclusões e sugestões

### 10.1 *Conclusões*

A revisão da literatura e os experimentos práticos mostraram que devido à miríade de equipamentos, com as mais diversas configurações, existentes no mercado e ao grande número de parâmetros envolvidos, ainda não existe um consenso sobre as técnicas de processamento de materiais com o uso do laser. Embora a maioria dos autores traga sugestões e oriente as escolhas a serem feitas, o comportamento dos parâmetros ainda não é dominado a ponto de se seguir uma regra comum, como acontece na maioria dos processos concorrentes. Cada peça a ser fabricada requer um estudo de seu processamento. Isto vale para os três processos abordados neste trabalho.

Os estudos preliminares do processo de corte a laser e suas dificuldades, associados a pesquisas de mercado realizadas pelo departamento comercial da empresa Nano Endoluminal permitiram perceber que não é economicamente interessante se estudar/desenvolver esta técnica para a confecção deste tipo de *stent* dentro da empresa neste momento. Este projeto foi colocado em espera e os estudos envolvendo o laser direcionados para a furação e a soldagem.

Com relação ao estudo do corte a laser pode-se dizer também que as informações obtidas nos experimentos são poucas e não concludentes. Para uma observação mais acurada deste processo se faz necessário um novo teste em uma faixa de parâmetros mais adequada e avaliando outros parâmetros além da largura da fenda de corte, como por exemplo a rugosidade da superfície cortada e a possível existência de rebarbas de material ressolidificado, o que requer equipamento adequado.

A furação a laser dos filmes de ptfé, para a aplicação estudada, se mostrou um processo simples e apresentou bons resultados mesmo frente ao controle pouco rígido das condições do ambiente onde foi realizada, diferente da solda e do corte que exigiram o uso de atmosfera protetora de gás.

Os experimentos envolvendo a soldagem permitiram perceber que as fontes disponíveis no Laboratório de Materiais – LabMat – do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC não

---

se prestam à soldagem de arames de NiTi, deixando em aberto este estudo e sugerindo a busca de parceiros para a sua continuidade.

Este trabalho mostrou o laser como uma versátil ferramenta na indústria de dispositivos médicos. A sua capacidade de realizar trabalhos precisos e limpos em uma enorme gama de materiais (teoricamente qualquer material) o torna um atrativo auxiliar na confecção destes dispositivos muitas vezes bastante pequenos e que, por seu uso, devem ser de alta qualidade não só no que diz respeito a suas propriedades mecânicas, mas também com relação à aparência e limpeza das regiões trabalhadas.

O estudo do laser e dos três processos nele baseados trouxe ao mestrando um novo campo de atuação e modificou consideravelmente sua visão e atitude frente às possibilidades dos processos de fabricação vigentes, influenciando sua atuação como membro de um grupo de pesquisa e desenvolvimento de dispositivos médicos endoluminais.

---

## ***10.2 Sugestões para novos trabalhos***

- O corte de perfis de *stent* em tubos pequenos pode se mostrar um interessante desafio no que diz respeito ao estudo de estratégias de usinagem. As dimensões reduzidas e o perfil intrincado dos *stents* fabricados por esta técnica, associados à sua sensibilidade frente à carga térmica resultante da ação do laser fazem desta aplicação um excelente tema de estudo.
- Aprofundar o estudo da soldagem a laser, buscando condições em que o aporte de calor ocorra no tempo adequado e, possivelmente, associando um posterior tratamento térmico aos arames visando minimizar a fragilização. Verificar também os efeitos sobre a estrutura do NiTi da solda e da solda seguida de tratamento térmico.
- No estudo do efeito da furação sobre o comportamento da endotelização, variar geometrias e dimensões dos furos, buscando uma condição ótima para a endotelização. O estudo deve ser feito com implantes em animais e deve ser feito por pesquisadores da medicina.
- A variação das propriedades óticas da superfície na interação com o laser em várias intensidades energéticas, velocidades de trabalho e perfis de pulso é também outro possível tema de estudo, que implica contudo em se viabilizar a observação destas variações. Seria interessante poder avaliar o comportamento da absorção da energia incidente no decorrer do processo.



---

## 11 Referências bibliográficas

- 1 McGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining*. Cap. 5. Chapman and Hall. USA, 1988 ISBN 0412319705.
- 2 STEEN, W. M. *Laser Material Processing*. Springer-Verlag London 1991 ISBN 3540196706.
- 3 GRIGORYANTS, A. G. *Basics of laser material processing*. Mir Publishers. Moscou, 1994. ISBN 0-8493-7534-7.
- 4 BAUER, H. *Lasertechnik - Grundlage und Anwendung*. Vogel Buchverlage Würzburg Alemanha, 1991.
- 5 HECHT, J. ; TERESI, D. *Laser, light of a million uses*. Dover Publications, Inc. USA, 1998. ISBN 0-486-40193-6.
- 6 RZANY, B. *Laserstrahlschneiden*. Deutsch Verlag für Schweißtechnik (DVS). – Düsseldorf, 1995. ISBN 3-87155-533-9.
- 7 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. *DIN 2310: Termisches Schneiden*. Deutschland, 1990.
- 8 LEIDINGER, D.; PENZ, A.; SCHUÖCKER, D. *Improved manufacturing processes with high power lasers*. Infrared Phys. Technol.. vol. 36, No. 1, pp. 251-266. Great Britain, 1995.
- 9 YU, L. M. *Three-dimensional finite element modeling of laser cutting*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 63, pp. 637-639. 1997.
- 10 GABZD J. T., J.; SULLIVAN, D. **Gases and lasers**. Presented to Lumonics User Group, Minneapolis USA, May 1996. BOC Gases – The BOC Group. Disponível em: <http://www.boc.com> Acesso em: Abril de 2000.
- 11 TABATA, N.; YAGI, S.; HISHII, M. *Present and future of lasers for fine cutting of metal plate*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 62, p. 309-314, 1996.
- 12 NATIONAL INVENTORS HALL OF FAME. *Inventor Profile – Gordon Gould*. Disponível em: [http://www.invent.org/hall\\_of\\_fame/69.html](http://www.invent.org/hall_of_fame/69.html) Acesso em: Maio de 2000.
- 13 PÉCORA, J.D.; GUERISOLI, D. M. Z.; SPANÓ, J. C. *Laser na odontologia*. Esta página foi elaborada com apoio do Programa Incentivo à Produção de Material Didático do SIAE

- 
- Pró - Reitorias de Graduação e Pós-Graduação da Universidade de São Paulo. Atualização 01 de Setembro de 1999. Disponível em: <http://www.forp.usp.br/restauradora/laser/laser01.htm> Acesso em: Abril de 2000.
- 14 FRUSCIONE, E. *Lasers cut a leading edge into die board making*. Converting Magazine; Newton; Nov 1998; Ela Fruscione; Volume: 16 Issue: 11 pp.52-54 ISSN: 07467141.
- 15 TANIO, F. *Procura por máquinas de corte a laser cresce no país*. Metal Mecânica, Ago/Set 2000.
- 16 LAGO, A. *Discussões Técnicas*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- 17 BERTOLOTTI, M. *Masers and Lasers*. Adam Hilger. Grã-Bretanha, 1983. ISBN 0-85274-536-2.
- 18 WEB SCIENCE RESOURCES. *A laser tutorial*. Tutorial sobre laser publicado na internet em 1997. Disponível em: <http://members.aol.com/WSRnet/tut/ut1.htm> Acesso em: Março de 2000.
- 19 KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren – Band 3*. VDI-Verlag. Düsseldorf, Alemanha, 1990. p.133-180.
- 20 GUGGOLZ, E.. *Gepulste Nd:YAG-Laser in der Feinwerktechnik: Materialbearbeitung mit licht*. Verlag moderne Industrie (Die Bibliothek der Technik; 167) Alemanha, 1998.
- 21 TISSUE, B. M. *Science Hypermedia Home Page – Lasers*. Disponível em: <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/optics/sources/lasers.htm> Acesso em: Maio de 2000.
- 22 FRAUNHOFER - INSTITUT FÜR LASER TECHNIK (ILT). *Laser-Tutorial*. Disponível em: <http://www.ilt.fhg.de/ger/lasertutorial.html> Acesso em: Junho de 2000.
- 23 POWEL, J. *CO<sub>2</sub> laser cutting*. Springer-Verlag Germany 1998. ISBN 1852330473.
- 24 XIAO, M. *Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern*. Teubner Stuttgart 1996.
- 25 RZANY, B; ULRICH, J. *Flexiber Schnitt ermöglicht durch Technologiepaket*. Laser: Entwicklung und industrielle Anwendung. (Laser 5/99) b-Quadrat Verlags GmbH. Nr.5. Outubro 1999. pp.6-12.
- 26 SCHMITZ, H.-J. (Ed.). *Abtragen, Bohren und Trennen mit Festkörperlaser*. VDI-Technologiezentrum Deutschland.

- 
- 27 HEINDENREICH, B. *Untersuchungen zum Auskolken beim Laserstrahlbrennschneiden von Schiffbaublechen*. Schweissen & Schneiden, 48, heft 12. Bremen, 1996. pp. 944-953.
- 28 De SOUZA, C. C. *Discussões técnicas*. Florianópolis, abril de 2002.
- 29 ENGEMANN, B. K. *Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahl*. Expert Alemanha 1993.
- 30 HABA, B.; MORISHIGE, Y.; KISHIDA, S. *Novel technique of through-hole laser drilling in Teflon*. Materials Science and Engineering. B41, pp.383-385. 1996.
- 31 HODGSON, D. E.; WU, M. H.; BIERMAN, R. J. *Shape Memory Alloys*. Disponível em: <http://www.sma-inc.com/SMAPaper.html> Acesso em: Fevereiro de 2000.
- 32 McKELVEY, A. L.; RITCHIE, R. O. *Fatigue-crack growth in the superelastic endovascular stent material nitinol*. Department of Materials Science and Mineral Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA. Proceedings of the MRS Fall Meeting '98, Boston, MA, November 30 – December 4, 1998. Disponível em: <http://www.lbl.gov/Ritchie/Programs/NITI/MRSf98/> Acesso em: Março de 2000.
- 33 DUVAL, L.; SAADAT S.; NOORI, M. N.; DAVOODI, H.; HOU, Z. *A comprehensive characteristic study of NiTi behavior: Quasi-static thermomechanical loading*. Center for Loss Prevention and Structural Integrity (CLPSI), Mechanical Engineering Department, Worcester Polytechnic Institute, MA, USA. Disponível em: <http://me.wpi.edu/~clpsi/papers/p0020/paper.htm> Acesso em: Fevereiro de 2000.
- 34 WAYMAN, C. M.; OTSUKA, K. *Shape memory materials*. Cambridge University Press, UK, 1998. ISBN 0 521 44487 X hardback.
- 35 JOHNSON, A. D.; KRÄMER, J. *State-of-the-art of shape memory actuators*. 22/03/1998. Supplied by Bricad MTM as a service to EUROflex G. Rau customers. Disponível em: <http://www.sma-mems.com/act98.htm> Acesso em: Março de 2000.
- 36 ZHANG, N.; CAO, X. W. Z.; MAO, Z. *A statistical evaluation of pitting corrosion on TiNi shape memory alloys*. Lab. Of Metallic Biomaterials, Dept. Of MSE, Zhejiang University, Hangzhou, P. R. China. Disponível em: <http://www.lbl.gov/Ritchie/Programs/NITI/> Acesso em: Março de 2000.
- 37 MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 1997. ISBN 0-471-15746-5.

- 
- 38 PETERSEN, H. *Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung*. ISBN 3-609-65330-2 Volume 1: "Grundlagen der deskriptiven und mathematischen Statistik"; Volume 2: "Grundlagen des statistischen Versuchsplanung".
- 39 JONES, D. A. *Principles and prevention of corrosion*. 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice Hall, USA, 1996. ISBN 0-13-359993-0.
- 40 NORTON, R. L.; *Machine Design - An integrated approach*. Prentice Hall. USA, 1996. ISBN 0-13-55575-6 (hard cover).
- 41 MASIERO FILHO, I. *Estudo sobre a união de arames de NiTi*. Relatório Interno, Nano Endoluminal, 2001.
- 42 GOLDWASSER, S. M. *Sam's Laser Faq* Disponível em: <http://www.eio.com/repairfaq/sam/laserfaq.htm> Acesso em: Abril de 2000.
- 43 TALBOT, J.; VARSHNI, Y. P. *Laser Stars - Laser History*. Disponível em: <http://home.achilles.net/~jtalbot/history/index.html> Acesso em: Abril de 2000.
- 44 SOBOL, E. N. *Phase transformation and ablation in laser-treated solids*. Wiley-Interscience. USA, 1995.
- 45 DUERIG, T. W.; MELTON, K. N.; STÖCKEL, D.; WAYMAN, C. M. *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Butterworth-Heinemann Ltd, UK, 1990. ISBN 0-750-610009-3.
- 46 SHAPE MEMORY APPLICATIONS Inc. *NiTi Smart Sheet #9 – Comparison of Properties of NiTi and Stainless Steel* Disponível em: <http://www.sma-inc.com/nitivsteel.html> Acesso em: Maio de 2000.
- 47 MASIERO FILHO, I.; PERES, R. M.; SILVEIRA, P. G.; PÉRTILE L.; HAMMES, G. *Project issues in an aortic aneurysm repair system*. In: 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. 23.-26. September 2002, Technische Universität Ilmenau. Ilmenau, Alemanha. Anais... Set/2002. A ser publicado.
- 48 PERES, R. M. *Projeto, desenvolvimento e fabricação de endopróteses e introdutores para o tratamento de patologias aneurismáticas e oclusivas, através de procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos*. Documento interno. Nano Endoluminal S.A. Florianópolis, 1998.
- 49 MASIERO FILHO, I. *Projeto de dissertação para o curso de mestrado*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Dez/1999.
- 50 NETTER, F. H. *Atlas de anatomia*. Ed. Artes Médicas Sul, Porto Alegre, 1998.
- 51 SOLANO, J. M. E. *Arteriopatías Periféricas*. Ed. Uriach, Espanha. [199?].
- 52 BONAMIGO, I.; von RISTOW, A. (Org.) *Aneurismas*. GBEA, Brasil, 1999.

- 
- 53 SERRUYS, P. W.; KUTRYK, M. J. (Ed.) *Handbook of coronary stents. 2<sup>nd</sup> ed.* Martin Dunitz, UK, 1997. ISBN 1-85317-543-9.
- 54 HARLOFF, J. *Are biomaterials a limiting factor in the progress of arterial prostheses?* Disponível em: <http://staff.ub.tu-berlin.de/~harloff/resint/biomat/artgra.pdf>  
Acesso em: Dezembro de 2001.
- 55 BRAGA, C. R. C. *Considerações gerais sobre o Ptfе.* Documento interno. Nano Endoluminal S. A. Florianópolis, junho de 2001.
- 56 MatWeb. *Online Material Data Sheet* Disponível em: <http://www.matweb.com>  
Acesso em: Maio de 2002.
- 57 ERHARDT, K. M.; HEINE, A.; PROMMERSBERGER, H. *Laser in der Materialbearbeitung.* Vogel Fachbuch, Würzburg, 1993.