



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**SOLDA LASER EM MATERIAIS DISSIMILARES COM  
LASER DE Nd:YAG PULSADO**

**JOSÉ ROBERTO BERRETTA**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais.**

**Orientador:  
Dr. Wagner de Rossi**

**São Paulo  
2005**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

536

**SOLDA LASER EM MATERIAIS DISSIMILARES COM LASER DE  
Nd:YAG PULSADO**

**José Roberto Berretta**



**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau  
de Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear – Materiais.**

**Orientador:**

**Dr. Wagner de Rossi**

**SÃO PAULO**

**2005**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**SOLDA LASER EM MATERIAIS DISSIMILARES COM LASER DE  
Nd:YAG PULSADO**

**José Roberto Berretta**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau  
de Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear – Materiais.**

**Orientador:**

**Dr. Wagner de Rossi**

**SÃO PAULO**

**2005**

Dedico esta tese a minha esposa **Ana Cristina**, que está sempre presente com muito amor e carinho, não só nesta empreitada, mas durante todo o tempo que caminhamos juntos.

Aos meus filhos **José Lucas e Julia Helena**, que preenchem a minha vida de momentos de alegria e meus símbolos de futuro.

Aos meus pais **Angelo e Dalva**, cujo exemplo de vida me ajudaram a trilhar um caminho de honestidade, trabalho, coragem e perseverança.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador **Dr. Wagner de Rossi**, que mesclou, na dose certa, apoio e rigor. Obrigado pelo empenho, dedicação e amizade.

Ao **Dr. Nilson Dias Vieira Jr.**, por possibilitar a elaboração deste trabalho nos laboratórios do Centro de Laser e Aplicações – CLA.

Ao **Eng. Ivan Alves de Almeida**, pelo incentivo, colaboração indispensável e amizade.

Ao colega e amigo **MSc. Maurício D. M. Neves**, pelo conhecimento tão generosamente oferecido.

Ao **Dr. Milton S. F. Lima**, pela amizade, pela colaboração e o incentivo.

Ao **José Tort Vidal**, amigo de tantos anos, pela sempre pronta colaboração.

A **MSc. Vera Lucia** pelas medidas de fluorescência de raios X.

A **Lea Sarita** pelas análises no MEV

Ao **Paulo e Marco** pela fabricação de dispositivos para os experimentos.

Ao **José Carlos** pela colaboração na execução de experimentos.

A **Elsa**, pela simpatia permanente e pela presteza.

Ao **Dr. Amilton Sinatora**, por disponibilizar seu laboratório.

Ao **Dr. Spero P. Morato** e a **Lasertools** pela colaboração.

Agradeço a todos os **colegas do CLA e do CCTM** que direta ou indiretamente colaboraram com este trabalho.

Agradeço ao **CTM-SP** pela permissão para a realização do trabalho.

Agradeço ao **IPEN** pela infraestrutura.

Agradeço aos órgãos de fomento a pesquisa **FINEP, CNPq e FAPESP** que direta ou indiretamente colaboraram com este trabalho, através dos financiamentos a projetos de pesquisa do CLA.

# SOLDA LASER EM MATERIAIS DISSIMILARES COM LASER DE Nd:YAG PULSADO

José Roberto Berretta

## RESUMO

Este trabalho investigou o processo de solda laser autógena de materiais dissimilares envolvendo os aços inoxidáveis AISI 304, AISI 420 e a liga de níquel Inconel 600. Estes são materiais largamente utilizados pela indústria, cuja soldagem a laser é pouco abordada pela literatura. Assim, o objetivo foi o de estudar os aspectos da soldagem entre dois quaisquer destes materiais, quando se utiliza um laser de Nd:YAG pulsado. O parâmetro variado neste estudo foi o posicionamento do foco do feixe laser em relação à junta; os demais parâmetros, do laser e do sistema óptico foram escolhidos de maneira a se obter uma solda com penetração total e bom acabamento superficial. A não simetria controlada na distribuição de energia do feixe laser incidente em relação à junta teve como objetivo a obtenção de uma poça fundida mais homogênea através da compensação das diferenças nas propriedades físicas e metalúrgicas entre os materiais envolvidos. As medidas feitas por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) na zona de fusão mostraram uma distribuição homogênea dos principais elementos, o que levou a uma variação muito pequena tanto na microdureza como no valor do módulo de elasticidade da região da solda em comparação com os materiais de base. A microscopia óptica mostrou uma zona fundida típica de solda profunda tipo *key hole*, com penetração total e sem a presença de poros ou trincas, exceto na união entre o aço AISI 420 e a liga Inconel 600, onde poros e trincas foram observados. Diagramas de fase foram construídos para os materiais formados na solda; a microestrutura resultante mostrou-se coerente com os resultados obtidos de microdureza bem como com as análises metalográficas feitas através de microscopia eletrônica de varredura. Medidas de resistência à tração mostraram boa eficiência de solda, chegando ao valor de 100% para a solda entre os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 420. Quanto à apresentação, o capítulo de introdução mostra a importância e as possibilidades da técnica de soldagem a laser, bem como a necessidade e utilizações das uniões entre os tipos de materiais utilizados. No segundo capítulo são abordados os principais aspectos teóricos envolvidos no processo de soldagem a laser e o papel dos parâmetros envolvidos; uma comparação com outras técnicas de soldagem também é apresentada. O terceiro

capítulo é dedicado aos materiais estudados; nele são descritos aspectos das propriedades mecânicas e metalúrgicas destes materiais, suas principais aplicações e soldabilidade. O quarto capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados, tanto no procedimento de soldagem quanto no de análise dos resultados. Em seguida, o quinto capítulo apresenta uma série de análises das soldas obtidas; simultaneamente, uma análise destes resultados também é feita. Um resumo das principais conclusões é feito no sexto capítulo, e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros são apresentadas.

# LASER WELDING OF DISSIMILAR METALS WITH PULSED Nd:YAG LASER

**José Roberto Berretta**

## ABSTRACT

An autogenous laser welding of dissimilar materials involving AISI 304 and AISI 420 stainless steels and Inconel 600 nickel alloy was investigated in this research. These materials have been extensively used in industry and their welding with laser is fairly covered by literature. Hence, the aim of this investigation was to study the laser welding features between any two of these materials when using a Nd:YAG pulsed laser. The main parameter studied was the focus beam positioning; it was placed exactly on the joint and also dislocated to both directions. The laser and optical beam parameters were chosen to achieve a good weld with total penetration. The purpose in the use of an asymmetric focus displacement was to compensate for dissimilarity in the physical and metallurgical properties of the materials being joined. The x-ray spectrometry by energy dispersion (EDX) carried out in the melting zone showed a homogeneous distribution in the main elements that yielded a good compatibility between the microhardness and the value of the modulus of elasticity when compared to the parent materials. Optical microscopy pictures showed a typical keyhole weld with total penetration, free of pores and cracks; these defects were only observed in the joint between AISI 420 and Inconel 600 alloy. Phase diagrams were obtained to the formed materials in the melted pool; they showed a good agreement with microhardness and metalographic analysis. Tensile strength measurements confirmed the quality of the welds giving high values of efficiency which reached to 100% in the case of AISI 304 and AISI 420 welding. In the presentation of the work, the first chapter gives an introduction to laser welding technology emphasizing its importance and possibilities; it is also pointed out the main applications and demands in joining these materials. The main theoretical aspects involved in laser welding technique as well as a comparison with conventional welding methods are presented in chapter two. The third chapter is devoted to used materials and methods, in this section the main mechanical and metallurgical properties of the materials are presented along with their weldability and most common applications. The fourth chapter describes in detail the materials and methods for the tested process as well for the analysis of the obtained results. The obtained welds



## SUMÁRIO

<b>1. - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. - SOLDA LASER.....</b>	<b>8</b>
2.1. Técnicas de soldagem a laser.....	9
2.1.1. Solda laser por condução .....	10
2.1.2. Solda laser por penetração .....	13
2.2. Comparativo da solda laser com outras técnicas de soldagem .....	22
2.3. Parâmetros de processo da solda laser .....	27
2.4. Soldabilidade dos materiais no processo de solda laser .....	35
2.5. Tipos de juntas .....	43
<b>3. - MATERIAIS .....</b>	<b>45</b>
3.1. Aços Inoxidáveis.....	46
3.1.1. Aços inoxidáveis austeníticos.....	46
3.1.2. Aços inoxidáveis martensíticos .....	46
3.2. Ligas de Níquel .....	47
3.2.1. Inconel 600 .....	47
3.3. Soldabilidade .....	48
3.3.1. Aços Inoxidáveis .....	48
3.3.2. Inconel 600 .....	50
<b>4. - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>52</b>
4.1. Equipamento Laser .....	54
4.2. Os Ensaio de Soldagem.....	56
4.3. Análise das Soldas .....	56
4.3.1. Microscopia Óptica.....	57
4.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	57

4.3.3. Ensaio de Microdureza .....	58
4.3.4. Ensaio de Tração .....	59
<b>5. – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>63</b>
5.1. Soldagem entre os Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 420.....	63
5.1.1. Microscopia e distribuição em % peso dos principais elementos.....	63
5.1.2. Ensaio de Microdureza Vickers .....	70
5.1.3. Ensaio de Tração.....	72
5.2. Soldagem entre o Aço Inoxidável AISI 304 e a Liga de Níquel Inconel 600. ....	78
5.2.1. Microscopia e distribuição em % peso dos principais elementos.....	78
5.2.2. Ensaio de Microdureza Vickers .....	84
5.2.3. Ensaio de Tração.....	85
5.3. Soldagem entre o Aço Inoxidável AISI 420 e a Liga de Níquel Inconel 600. ....	90
5.3.1. Microscopia e distribuição em % peso dos principais elementos.....	90
5.3.2. Ensaio de Microdureza Vickers .....	102
5.3.3. Ensaio de Tração.....	104
5.4. Observação da ocorrência de poros. ....	108
<b>6. – CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>7. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo do propulsor de guiamento do satélite brasileiro e a localização das uniões feitas na parte externa.....	5
Figura 2 – Desenho esquemático das técnicas de soldagem a laser: (a) condução, (b) penetração. ....	9
Figura 3 – Esquema da superfície de um metal sendo aquecida por um feixe laser com distribuição gaussiana da intensidade.....	11
Figura 4 – Esquema do sistema de coordenadas de um feixe laser aquecendo a superfície de um material em movimento .....	13
Figura 5 – Esquema de solda por penetração profunda. ....	14
Figura 6 - Esquema da geometria da poça de fusão modificada pela convecção e pela tensão superficial, que causa auto-focalização do feixe incidente.....	17
Figura 7 – Gráfico da profundidade de soldagem em função da potência incidente <sup>25</sup> . ....	17
Figura 8 – Esquema do início da formação do “keyhole” .....	20
Figura 9 – Diagrama de parâmetros que afetam a qualidade da solda com laser pulsado...	28
Figura 10 – Diagrama esquemático da forma do pulso laser no tempo, mostrando a potência pico média, a potência média, a duração do pulso ( $t_p$ ) e o intervalo de tempo entre eles ( $t_f$ ). ....	30
Figura 11 – Diagrama esquemático de uma seqüência de pulsos laser e seu efeito na soldagem de selamento. ....	31
Figura 12 – Estratégias de soldagem com laser de Nd:YAG pulsado. ....	40
Figura 13 – Parâmetros do pulso e forma de pulso típica.....	42
Figura 14 – Tolerâncias típicas para juntas de topo (A) e sobreposta (B).....	43
Figura 15 – Geometria de juntas para solda laser em chapa fina .....	44
Figura 16 – Diagrama de Schaeffler mostrando a microestrutura que se forma no cordão de solda em cada região em função dos equivalentes de cromo e níquel.....	50
Figura 17 – Dispositivo de posicionamento e fixação para o experimento de solda laser. .	53
Figura 18 – Central de processamento de materiais a laser – CPML .....	54

Figura 19 - Comportamento temporal de um pulso laser da CPML.....	55
Figura 20 – Esquema da posição de corte das amostras para obtenção da seção transversal do cordão de solda. ....	57
Figura 21 – Foto de MEV com esquema de localização dos pontos onde foram medidas a %peso dos principais elementos e a microdureza Vickers. ....	58
Figura 22 – Gráfico da carga pela profundidade em uma indentação do ensaio de microdureza instrumentada.....	59
Figura 23 – Corpo de prova para ensaio de tração de chapa fina conforme o método MB-4 da ABNT (dimensões em mm). ....	60
Figura 24 – Dispositivo de posicionamento e fixação para o experimento de solda laser dos corpos de prova de tração (dimensões em mm).....	61
Figura 25 – Corpos de prova de tração, cortados a laser. ....	62
Figura 26 – Máquina de ensaio de tração .....	62
Figura 27 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/A02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	64
Figura 28 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/A01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	64
Figura 29 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/J. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	64
Figura 30 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/M01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	65
Figura 31 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/M02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	65
Figura 32 -- Detalhes de cordão de solda típico de processo laser, da união entre o AISI 304 e o AISI 420, mostrando a ZF e ZAC do AISI 304 (esquerda) e a zona de fusão (direita). ....	66
Figura 33 -- Distribuição do níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para união entre AISI 304 e AISI 420.....	67
Figura 34 – Diagrama de Schaeffler mostrando os pontos dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser, [●] previstos e [■] medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta. ....	70
Figura 35 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, na união entre AISI 304 e AISI 420. ....	71
Figura 36– Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta.....	72
Figura 37 – Corpo de prova de tração AMJ submetido ao ensaio. ....	73
Figura 38 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMA02 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304).....	75
Figura 39 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMA01 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304).....	76

Figura 40 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMJ (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado na junta) .....	76
Figura 41 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMM01 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420) .....	77
Figura 42 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMM02 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420) .....	77
Figura 43 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AIA02. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	78
Figura 44 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AIA01. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	79
Figura 45 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AIJ. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	79
Figura 46 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AII01. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	79
Figura 47 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AII02. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	80
Figura 48 – Detalhes do cordão de solda típicos de processo laser da união entre o AISI 304 e o Inconel 600, mostrando a ZF e ZAC (AISI 304 à esquerda e Inconel 600 à direita) .....	80
Figura 49– Distribuição dos elementos níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta da união entre AISI 304 e Inconel 600. ....	82
Figura 50 - Diagrama de fase da zona de fusão da união do AISI 304 com o Inconel 600, construído no Thermo-calc. ....	84
Figura 51 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para a união entre AISI 304 e Inconel 600. ....	85
Figura 52 – Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta na união do AISI 304 x Inconel 600. ....	86
Figura 53 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AIA02 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304) .....	88
Figura 54 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AIA01 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304) .....	88
Figura 55 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AIJ (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado na junta). ....	89
Figura 56 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AII01 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do Inconel 600). ....	89
Figura 57 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AII02 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do Inconel 600). ....	90

Figura 58 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MII02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	91
Figura 59 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MII01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].....	91
Figura 60 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MIJ. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	92
Figura 61 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MIM01. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	92
Figura 62 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MIM02. [(seta L) feixe laser, (J) junta]. .....	92
Figura 63 – Distribuição do níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para união entre Inconel 600 e AISI 420. ....	94
Figura 64 – Detalhes de cordão de solda típico de processo laser, da união entre o AISI 420 e o Inconel 600, mostrando a ZF e ZAC (AISI 420 à esquerda e Inconel 600 à direita) .....	96
Figura 65 - Detalhe das trincas na zona de fusão da solda laser da amostra MIJ.....	96
Figura 66 - Diagrama de fase construído no Thermo-calc para a união entre os materiais AISI 420 e Inconel 600.....	97
Figura 67 - Pontos onde foram feitas as medidas de EDX próximas à trinca na amostra MIJ.....	98
Figura 68 - Pontos onde foram feitas as mediadas de EDX distantes da trinca na amostra MIJ.....	99
Figura 69 - Posição da linha de pontos que passa pela trinca onde foram feitas as medidas de EDX na amostra MIJ. ....	101
Figura 70 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta para a união entre o AISI 420 e o Inconel 600. ....	102
Figura 71 – Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, na união AISI 420 x Inconel 600. ....	103
Figura 72 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MIM02 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420)..	105
Figura 73 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MIM01 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420)..	106
Figura 74 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MIJ (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado na junta) .....	106
Figura 75 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MII01 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do Inconel 600) .....	107
Figura 76 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MII02 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do Inconel 600) .....	107

Tabela 1 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 2 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 3 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 4 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 5 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 6 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 7 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 8 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 9 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 10 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 11 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 12 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 13 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 14 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 15 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 16 - Descrição da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

Tabela 17 - Características da amostra de aço carbono submetida ao teste de tração

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade de potência de diferentes processos de soldagem <sup>2</sup> .....	23
Tabela 2 – Eficiência de soldagem de alguns processos .....	24
Tabela 3 – Principais características da solda laser.....	24
Tabela 4 – Comparação de processos de soldagem.(V, vantagem; D, desvantagem).....	25
Tabela 5 - Soldabilidade dos metais com laser <sup>25</sup> .....	36
Tabela 6 - Soldabilidade com laser para combinação de dois metais (E=excelente, B=boa, M=média, R=ruim) <sup>2</sup> .....	38
Tabela 7 – Composição química dos materiais <sup>64</sup> .....	45
Tabela 8 - Propriedades físicas dos materiais <sup>64, 65</sup> .....	45
Tabela 9 – Composição química dos materiais analisados no IPEN.....	52
Tabela 10 – Amostras utilizadas no experimento de soldagem.....	53
Tabela 11 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos no cordão de solda laser dos aços AISI 304 x AISI 420 em função da posição do feixe em relação à junta .....	66
Tabela 12 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta .....	68
Tabela 13 – Valores de equivalentes de cromo (Creq) e de níquel (Nieq).....	69
Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração nas soldas entre AISI 304 e AISI 420.....	73
Tabela 15 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos do cordão de solda laser do AISI 304 x Inconel 600 em função da posição do feixe em relação à junta .....	81
Tabela 16 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta .....	83
Tabela 17 – Resultados do ensaio de tração nas soldas entre o AISI 304 e o Inconel 600. 87	

Tabela 18 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos do cordão de solda laser de AISI 420 x Inconel 600 em função da posição do feixe em relação à junta .....	93
Tabela 19 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta .....	95
Tabela 20 – Tabela dos valores da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, próximos à trinca na amostra MIJ. ....	99
Tabela 21 – Tabela dos valores da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, distantes da trinca na amostra MIJ. ....	100
Tabela 22 – Tabela dos valores médios da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, próximos e distantes da trinca na amostra MIJ.....	100
Tabela 23 - Tabela dos valores da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, para análise da trinca na união entre o Inconel 600 e o AISI 420. ....	101
Tabela 24 – Resultados do ensaio de tração nas soldas entre o AISI 420 e o Inconel 600	104

## 1. - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do laser foi um capítulo instigante na história da ciência e da engenharia, pois se tratava de uma tecnologia nova com potencial para aplicações em uma variedade extraordinária de áreas do conhecimento. A história do laser começa com Albert Einstein, em 1917. Ele desenvolveu o conceito teórico da emissão estimulada, que é o princípio utilizado no desenvolvimento de lasers.

Segundo Ready<sup>1</sup>, a emissão estimulada, definida por Einstein, não conduziu imediatamente ao desenvolvimento do laser. Muito trabalho preliminar foi necessário, como em espectroscopia óptica nos anos trinta. A maioria dos níveis de energia atômica e molecular envolvidos em laser foi estudada e investigada durante esta década.

Durante a Segunda Guerra Mundial, a atenção da comunidade técnico-científica foi desviada em grande parte para a região de microondas no espectro eletromagnético resultando em muitos avanços técnicos nesta área. Assim, esta dispersão fez o desenvolvimento do laser provavelmente acontecer de uma maneira indireta.

Em 1954, um equipamento chamado de maser, que é um amplificador de microonda por emissão estimulada de radiação, foi desenvolvido por Charles Townes e seus colaboradores. O maser, baseado no princípio de emissão estimulada, parece ser a primeira utilização prática deste fenômeno. Havia muito entusiasmo e dedicação aos masers nos anos cinquenta, porém, hoje a linha de aplicação de maser parece se resumir a receptores em rádio-astronomia.

Em 1958, Townes e Schawlow sugeriram que a emissão estimulada, que tinha sido utilizada no maser, poderia também ser usada nas regiões do infravermelho e visível do

espectro eletromagnético <sup>1</sup>. Esta sugestão resgatou o interesse da comunidade científica pela ótica, que esteve esquecida durante quase duas décadas.

Vários laboratórios começaram a trabalhar no desenvolvimento de laser depois da sugestão de Townes e Schalow. O primeiro laser a operar foi o laser de rubi em 1960 por Theodore Maiman <sup>1</sup>. Este primeiro laser emitiu um feixe colimado e pulsado de luz vermelha a um comprimento de onda de 694,3 nm. Este laser imediatamente chamou a atenção da comunidade científica e tecnológica, pois ele proporcionou uma fonte de luz com propriedades diferentes das fontes luminosas convencionais. O laser de rubi pulsado apresentou-se como uma fonte extremamente monocromática de radiação eletromagnética coerente na região visível do espectro e com uma potência pico muito alta. Um equipamento com estas características pode oferecer muitas possibilidades de aplicações.

De 1962 a 1968 foram desenvolvidos quase todos os tipos importantes de laser. Além disso, foram sugeridas quase todas as aplicações práticas. Com a verificação da capacidade do laser em fundir e vaporizar pequenas quantias de metais, deu-se início às investigações das aplicações do laser em solda, corte e furação. Foram reconhecidas também nesta época as capacidades de uso em comunicações, sensoriamento, espectroscopia, interferometria, holografia e todo o resto da gama de aplicações práticas que estão em uso hoje.

Os lasers disponíveis, neste período inicial, eram equipamentos frágeis, com baixa confiabilidade e durabilidade. Portanto, eles eram úteis para demonstrações em laboratório, mas não para uso em rotina industrial. Embora tivessem tido várias aplicações concebidas e demonstradas em laboratório, a maioria das aplicações não pôde ser executada satisfatoriamente em um ambiente industrial.

Na década de 70 esta situação começou a mudar e o desenvolvimento da engenharia de lasers melhorou substancialmente. Assim, engenheiros industriais começaram a comprar lasers mais confiáveis e usá-los em aplicações práticas. Desta maneira foi possível executar economicamente, em um ambiente industrial, algumas das aplicações que tinham sido demonstradas em laboratório.

Mas somente em meados dos anos 90 que os desenvolvimentos mais notáveis aconteceram. Nesta época o laser tornou-se uma ferramenta verdadeiramente prática em linhas de produção, largamente utilizada em corte, solda, furação, marcação e muitos outros tipos de aplicações. As telecomunicações também foram revolucionadas pelo uso de laser de semicondutor e das fibras ópticas. Nesta década, o laser passou a ser familiar ao

consumidor pelo uso em uma variedade de produtos, como em CDs, impressoras a laser e leitores de código de barras.

No campo da soldagem, as aplicações de laser tiveram seu início logo em seguida ao desenvolvimento do primeiro equipamento. Com o laser de rubi foi demonstrada a viabilidade da execução de solda laser, ainda na década de sessenta. A maioria dos estudos enfatizou a solda ponto, mas a solda costura pela sobreposição parcial de pulsos também foi demonstrada, embora a uma velocidade muito baixa. Em certos casos observou-se que o laser oferece algumas vantagens técnicas, como uma zona termicamente afetada muito pequena.

Com o desenvolvimento dos lasers de CO<sub>2</sub> e de Nd:YAG, operando tanto no modo contínuo como no modo pulsado, a solda costura pode ser feita a velocidades mais razoáveis. Em 1971, foi anunciada a soldagem por penetração profunda (soldagem por "keyhole") com um laser de CO<sub>2</sub><sup>2</sup>. O desenvolvimento continuado destes tipos de lasers fez com que a solda laser, nos anos noventa, passasse a ser economicamente competitiva com outros métodos de soldagem. Afinal, um processo não só é escolhido para produção porque oferece vantagens técnicas, mas, sobretudo, por sua viabilidade econômica. Assim, os lasers de CO<sub>2</sub> e de Nd:YAG se tornaram os principais concorrentes em aplicações de solda a laser, e eles permanecem até hoje como os tipos de lasers mais usados em soldagem.

Assim, segundo Steen<sup>2</sup>, hoje em dia o uso de um feixe laser como ferramenta está entre os métodos de processamento de materiais mais avançados e modernos, ocupando uma posição de destaque na indústria. Este destaque origina-se principalmente das aplicações em solda, corte, furação e tratamento térmico.

Obviamente, o laser concorre, em todos estes processos, com métodos tradicionais que também estão em constante evolução. Mas esta ferramenta tem apresentado, nos últimos anos, um crescimento superior. Este fato deve-se, em grande parte, à sua capacidade de oferecer soluções para projetos que requerem processos de difícil, ou mesmo, de impossível execução por métodos tradicionais<sup>3, 4</sup>.

Estas soluções estão baseadas, principalmente, nas vantagens de se usar um feixe de luz no processamento de materiais. Como, por exemplo, na soldagem, que tem como vantagens sobre outros métodos os seguintes pontos:

- a alta densidade de energia e controle preciso da incidência desta na peça;
- flexibilidade para determinar o caminho do feixe na peça;
- o feixe não é influenciado por campo magnético;
- o processo dispensa aterramento da peça;
- a zona termicamente afetada é muito pequena;
- as distorções da peça são mínimas;
- altas velocidades de soldagem;
- o cordão de solda tem excelente qualidade de acabamento;
- fácil automação.

A principal desvantagem é o alto custo de investimento inicial. Este custo pode ser compensado pela qualidade e pela automação do processo que reduz a intervenção do operador minimizando falhas.

A união entre materiais dissimilares em larga escala sempre foi muito utilizada nos setores de geração de energia, químico, petroquímico, nuclear, aeronáutico e aeroespacial. Em uma planta de geração de energia, por exemplo, pode existir acima de 10 mil juntas deste tipo. Atualmente é a indústria de bens de consumo que vem implementando em seus produtos, fabricados em alta escala, a combinação de materiais para melhorar o rendimento e reduzir custos. Este fato está gerando um grande aumento na demanda por esta técnica de soldagem de tal maneira a atender à produção industrial em escala<sup>5</sup>.

Estas uniões entre materiais dissimilares sempre foram, e ainda são em muitos casos, produzidas por processos de soldagem convencionais, tais como, soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SAER), soldagem a arco com eletrodo metálico e atmosfera gasosa (SAMG), soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e atmosfera gasosa (SATG) e soldagem por fricção. Mas o rápido desenvolvimento, nos últimos anos, da tecnologia de feixes de alta densidade de energia, isto é, do laser e do feixe de elétrons, tem feito as técnicas tradicionais perderem espaço no mercado em geral.<sup>6,7</sup>

Além destes fatos, outra motivação para este trabalho foi uma consulta feita pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, o INPE, ao Centro de Lasers e Aplicações do IPEN sobre a possibilidade de soldagem a laser de materiais dissimilares para montagem do propulsor de guiamento do satélite brasileiro. A Figura 1 mostra tal propulsor, com algumas das juntas de materiais dissimilares apontadas. Assim, a montagem destes propulsores seguiu em paralelo ao desenvolvimento da presente pesquisa. Até o momento, executamos com sucesso a soldagem a laser da montagem de 4 unidades de protótipos destes propulsores, que passaram por avaliações de projeto nos laboratórios do INPE. Com a aprovação dos protótipos, este Instituto está planejando para este ano de 2005, a segunda fase do projeto, ou seja, a montagem de unidades de engenharia.

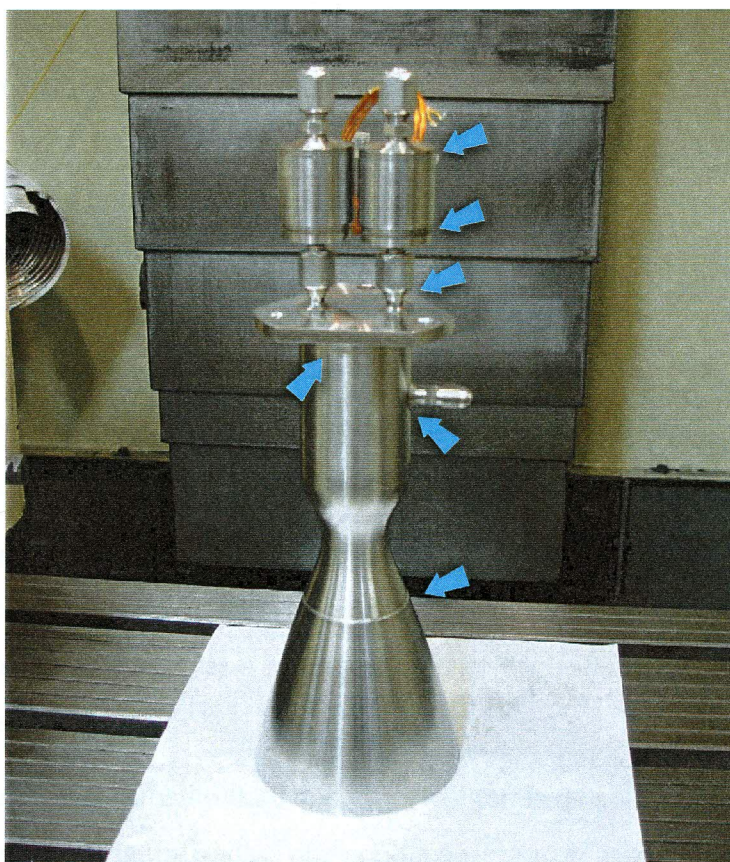


Figura 1 - Protótipo do propulsor de guiamento do satélite brasileiro e a localização das uniões feitas na parte externa

Este trabalho está inserido nas diretrizes do Centro de Lasers e Aplicações, pelo item OEG06 -31 – Pesquisa e Desenvolvimento em aplicações com laser, do Plano Diretor do IPEN (2004-2007).

Partindo-se deste Plano Diretor e também em concordância com os objetivos gerais do Centro de Lasers e Aplicações, que é o domínio de união de materiais dissimilares com laser de Nd:YAG, chega-se no objetivo deste trabalho que é investigar a união entre os seguintes materiais: os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 420 e a liga de níquel Inconel 600, soldando-os dois a dois, utilizando-se para isso um laser de Nd:YAG pulsado desenvolvido no IPEN. O foco do estudo é a influência do posicionamento do feixe laser incidente em relação à junta, em uma solda laser autógena, isto é, sem adição de material.

Esta investigação, nas condições em que foi realizada e com os materiais escolhidos para a junção, tem caráter inédito. Na literatura encontram-se estudos sobre união entre alumínio e aço carbono, investigados para uso na indústria automobilística, na indústria química e em aplicações criogênicas<sup>8</sup>. Outro estudo utiliza no experimento uma técnica híbrida que emprega adesivo e solda na junção de lâminas finas de aço e latão, utilizadas em radiadores de automóvel<sup>9</sup>. Mais recentemente, um trabalho apresentado na conferência Lasers em Manufatura, ocorrido em Munique em 2005, teve como objetivo a união entre titânio e alumínio por solda laser para aplicações aeronáuticas<sup>10</sup>. Estudos de caráter tecnológico são sempre fruto de necessidades e condições emergentes de sua época.

Os materiais escolhidos para esta investigação, os aços inoxidáveis e a liga de níquel, são materiais largamente utilizados na indústria em geral. A escolha também se deveu à oportunidade, concedida pelo INPE à equipe de pesquisadores do instituto do qual esta pesquisa faz parte, de desenvolver a soldagem a laser utilizada no protótipo do propulsor de guiamento de satélite.

O primeiro capítulo deste trabalho trata dos aspectos gerais da soldagem a laser. Nele serão detalhadas as duas técnicas utilizadas, por condução e por penetração. Será feito também um comparativo com outras técnicas e discutido os parâmetros envolvidos no processo. Algumas características de soldabilidade serão apresentadas e também os tipos de juntas mais usuais quando se emprega laser em uma união.

No capítulo que trata dos materiais serão detalhadas as características pertinentes dos aços utilizados nos experimentos tais como as propriedades físicas, sua composição química e

sua faixa de aplicação. Serão aprofundados, ainda, os aspectos de soldabilidade destes materiais especificamente.

No procedimento experimental são descritos os equipamentos que foram utilizados, a metodologia empregada bem como os métodos de análise adotados nesta pesquisa.

Os resultados e discussões são apresentados no capítulo seguinte. Na tentativa de facilitar a compreensão, as análises foram divididas em função de cada tipo de união. Nas uniões foram observadas a geometria do cordão formado, a qualidade deste cordão no que diz respeito a poros, trincas e se houve penetração total ou não. Em função do posicionamento do feixe estimou-se a composição química na zona de fusão que foi comparada aos resultados obtidos na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX). Nesta confrontação a estimativa foi validada.

Ainda em relação à composição química do cordão, foi possível estimar-se, através de diagramas de fase, a microestrutura formada na zona de fusão. Esta microestrutura mostrou-se coerente com os resultados da análise por micrografia, ótica e eletrônica, e pelas medidas de microdureza.

Neste capítulo também são mostrados os valores obtidos de microdureza e de resistência à tração das uniões. Estas medidas foram necessárias para se avaliar as propriedades mecânicas da solda e, desta forma, permitir uma avaliação mais precisa do potencial de aplicação desta técnica nestes materiais.

## 2. - SOLDA LASER

Solda laser é caracterizada por um delicado balanço entre aquecimento e resfriamento dentro de um volume, no qual uma poça líquida é formada e permanece estável até a solidificação. O objetivo da solda laser é criar a poça de fusão pela absorção da radiação laser incidente, possibilitar o seu crescimento até o tamanho desejado e então propagar esta poça através da interface sólida, eliminando a linha de junta original entre componentes a serem unidos.

As possibilidades para se obter uma solda laser com qualidade e precisão são enormes. Isto ocorre devido aos vários parâmetros do sistema poderem ser controlados de forma precisa, desde a geração do feixe até o efeito deste no material. Um objetivo primário das pesquisas em solda laser vem sendo identificar estes parâmetros que influenciam na estabilidade e reprodutibilidade da solda e desenvolver maneiras para controlá-los.<sup>11, 12, 13</sup>

A manutenção do balanço entre o calor que entra e o calor que sai depende da constante absorção da radiação laser e da uniforme dissipação de calor pela peça<sup>14</sup>. Manter estes fatores constantes não é tarefa fácil. Em relação ao feixe laser, o caminho em direção à peça é muitas vezes interrompido pela formação de vapor do material no ponto focal, alterando a absorção da radiação laser. Dentro de certas condições, este vapor pode se transformar em plasma que absorve e espalha o feixe, atenuando-o severamente.

No material, a dissipação de calor constante da poça de fusão para dentro da peça necessita de uma geometria estável entre a frente de fusão e o material em sua vizinhança. Quando se está soldando, geralmente, a peça ou o feixe está em movimento, o que faz a interface sólido-líquido estar constantemente sendo alterada. Isto introduz um fator de dependência geométrica na taxa de resfriamento da poça de fusão<sup>15</sup>.

Com todos estes obstáculos parece surpreendente que soldas de alta qualidade usando laser sejam possíveis. Entretanto, constantes térmicas e mecânicas agem para atenuar estes problemas com o balanço térmico na solda laser, suavizando flutuações para uma amplitude mínima e estabelecendo condições para uma soldagem estável.

## 2.1. Técnicas de soldagem a laser

A solda laser pode ser executada de duas maneiras fundamentais: solda por condução (Figura 2a) e solda por penetração ou “keyhole” (Figura 2b). A diferença básica entre as duas técnicas está na superfície da poça de solda, que permanece íntegra durante a solda por condução e é alterada na solda por penetração pelo feixe laser que penetra na região de fusão<sup>16</sup>.

A técnica de soldagem por condução oferece maior estabilidade ao processo de soldagem. Nela a radiação laser não penetra no material que está sendo soldado, resultando em soldas menos susceptíveis a defeitos, como o aprisionamento de gás (poros) durante o processo.

As técnicas de soldagem, por condução e penetração, são possíveis de serem executadas tanto com laser contínuo como pulsado. Elas podem ser empregadas também no processo de solda ponto.

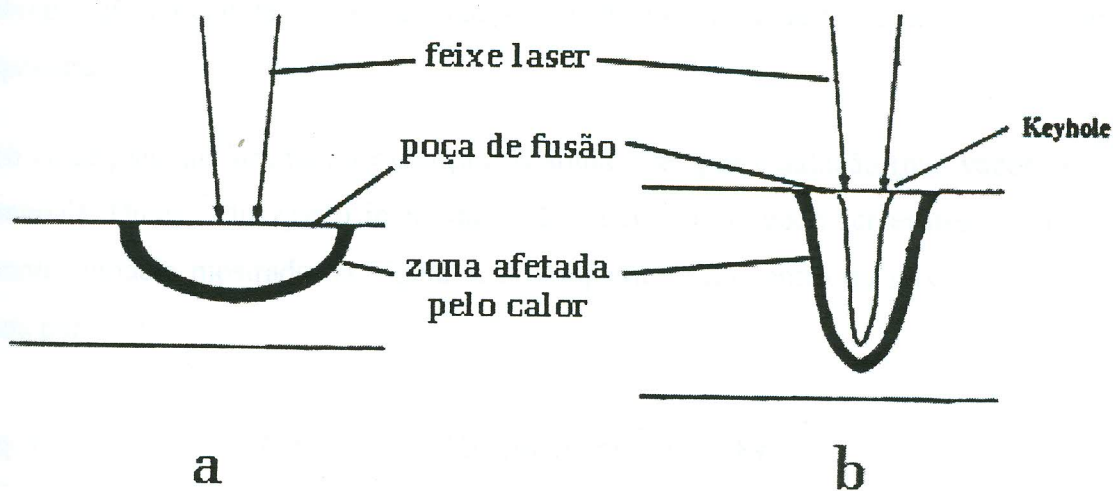


Figura 2 – Desenho esquemático das técnicas de soldagem a laser: (a) condução, (b) penetração.

No caso do laser pulsado, a duração do pulso laser e a intensidade do feixe laser aplicada na peça são os principais parâmetros que definem se a solda será por condução ou por penetração<sup>17</sup>. Existem alguns equipamentos de laser pulsado com ajuste do perfil de intensidade do pulso laser no tempo, que permitem a alternância de uma técnica de soldagem para outra, durante a interação do feixe com a peça<sup>18</sup>. Isto permite que uma união possa ser iniciada pela técnica de soldagem por condução e então convertida em soldagem por penetração.

É possível ainda controlar esta interação, como, por exemplo, uma vez tendo sido criado o “keyhole” pode-se retrair-lo antes do término do pulso de modo a minimizar o aprisionamento de gás. O perfil temporal da intensidade do pulso laser também pode ser ajustado para minimizar gradientes térmicos na poça de fusão que levem a trincas de solidificação.

### 2.1.1. Solda laser por condução

Na solda por condução, a potência do laser funde o material de base sem vaporizá-lo. A energia do feixe laser é absorvida pela superfície e penetra no material por condução térmica, independentemente do feixe ser contínuo ou pulsado. Quando um laser pulsado é usado, a taxa de repetição deve ser alta o suficiente para formar um cordão hermético, pela sobreposição parcial de pulsos. A solda por condução é limitada a chapas com até 2 mm de espessura.

Sob condições que limitam a execução da solda laser por condução (não vaporização do material), Duley<sup>19</sup> diz que o início da fusão na superfície pode ser estimada a partir do simples modelo mostrado na Figura 3. A temperatura no centro do feixe focado ( $r=0$ ) é dada por:

$$(eq. 1) \quad T(0,t) - T_0 = [AI.(0)w/K(2\pi)^{1/2}] \tan^{-1}(8kt/w^2)^{1/2}$$

Onde:

$K$  é a condutividade térmica,

$k$  é a difusividade térmica,  
 $w$  é o raio do feixe Gaussiano,  
 $T_0$  é a temperatura ambiente,  
 $t$  é o tempo.  
 $I$  é a intensidade do feixe laser  
 $A$  é a absorção.

Se  $T(0,t) = T_m$ , que é a temperatura de fusão, então a intensidade do feixe laser,  $I_m(0)$ , requerida para produzir a fusão no tempo  $t$  pode ser obtida com a (eq. 1).  $I_m(0)$  pode ser considerada independente do tempo quando  $t$  é muito maior que  $w^2/8k$  ou quando o comprimento de difusão térmica  $l \sim (kt)^{1/2}$  é muito maior que  $w$ . Para um dado tempo  $t$  tem-se como solução  $AI_m(0)$ . Com esta relação pode-se dizer que o valor de  $I_m(0)$  pode ser reduzido com o aumento na absorção  $A$ . Observa-se também na equação (eq. 1) que o raio do foco do feixe na superfície,  $w$ , tem um grande efeito em  $I_m(0)$  quando  $t$  é longo, mas não tem nenhum efeito sensível em pulsos curtos. Esta solução não leva em conta o calor latente de fusão e, assim, os resultados devem ser considerados como aproximados.

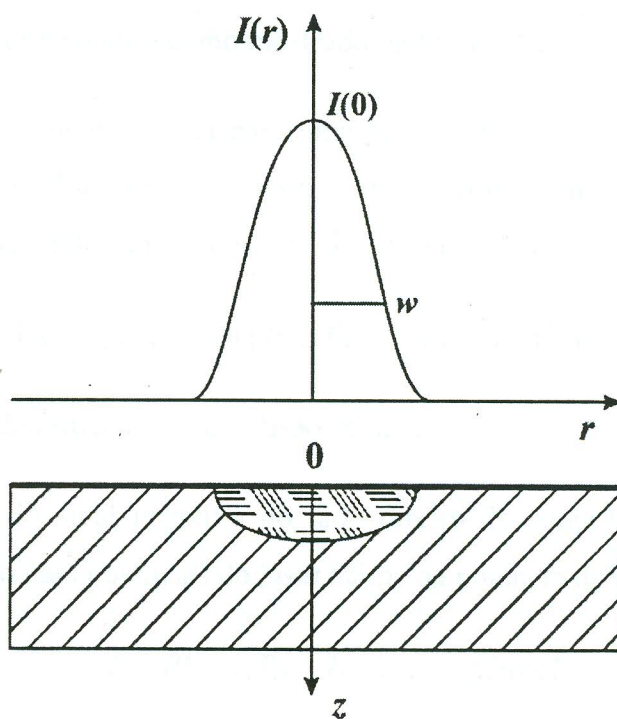


Figura 3 – Esquema da superfície de um metal sendo aquecida por um feixe laser com distribuição gaussiana da intensidade

Uma estimativa da profundidade de penetração  $z_m$ , da poça de solda pode ser obtida, dentro das condições de solda ponto na qual a fusão é incluída, isto é, se  $t_m$  for o tempo para que  $T(z=0) = T_m$ , então<sup>19</sup> :

$$(eq. 2) \quad z_m(t) \sim [0,16 AI/\rho L](t-t_m)$$

Onde:

$\rho$  é a densidade do material na temperatura de fusão,

$L$  é o calor latente de fusão.

A equação (eq. 2) só será válida quando  $t_m < 8k/w^2$ .

Quando a peça é movida a uma velocidade  $v$  em relação ao feixe de laser que entrega uma potência  $P$  que é absorvida pela superfície ( $AP$ ), o limiar para solda por condução pode ser obtido da solução aproximada da seguinte equação de calor:

$$(eq. 3) \quad T(r) - T_0 = [AP/2\pi Kr] \exp\{-[v(x+r)/2k]\}$$

Onde o sistema de coordenadas é como mostrado na Figura 4 e  $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ .

A equação (eq. 3) é a solução exata para uma fonte pontual de potência  $AP$  e tem uma singularidade em  $r = 0$ . Pode ser usada para estimar o limiar para soldagem por um feixe gaussiano de raio  $w$ , levando-se em conta que  $T = T_m$  em  $r = w(2)^{1/2}$  e  $x = 0$ , então,

$$(eq. 4) \quad V_m = - [2(2)^{1/2} k/w] \ln [(T_m - T_0) 2(2)^{1/2} \pi K w / AP]$$

Onde  $v_m$  é a velocidade crítica na qual a fusão se inicia.

Note que por causa do sinal negativo do lado direito da equação (eq. 4), as soluções permitidas para  $v_m$  são para potências do laser acima da potência de limiar  $P^*$ ,

$$(eq. 5) \quad P > P^* = [(T_m - T_0) 2(2)^{1/2} \pi K w / A]$$

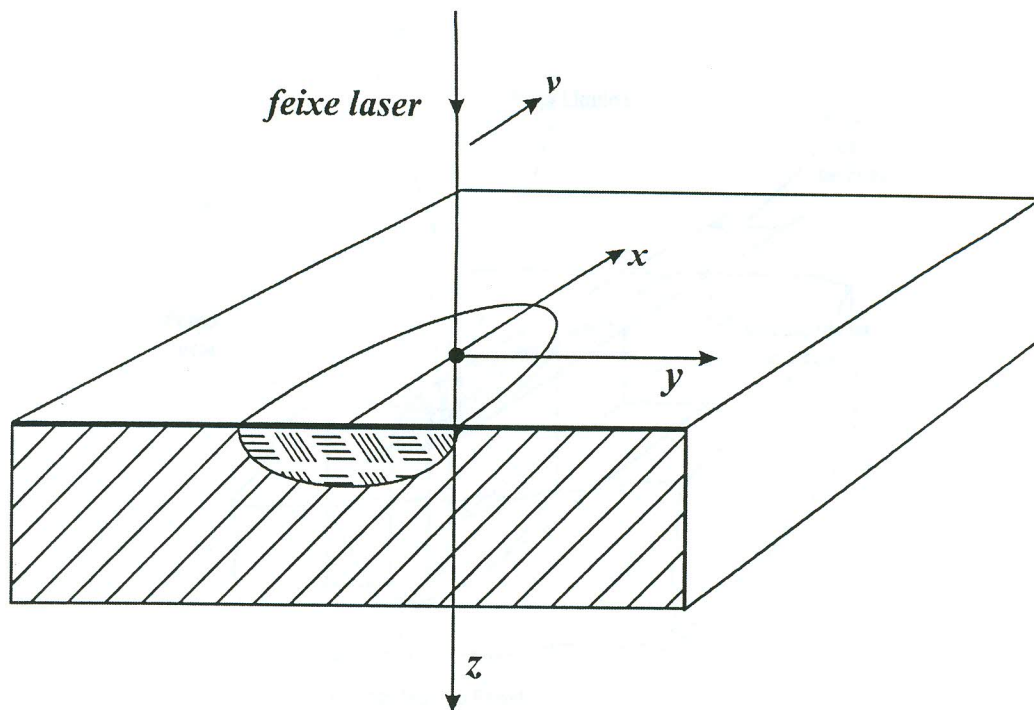


Figura 4 – Esquema do sistema de coordenadas de um feixe laser aquecendo a superfície de um material em movimento

### 2.1.2. Solda laser por penetração

As soldas com penetração profunda ocorrem quando um feixe laser de alta potência vaporiza o material ao longo de sua espessura. O orifício formado é chamado de “keyhole” e apresenta metal fundido ao seu redor. Uma coluna de vapor é produzida no orifício circundado por uma poça líquida, Figura 5.

Quando esta coluna é movimentada, o material à frente do orifício é fundido ao longo da profundidade. O metal líquido flui em torno das paredes do orifício e se solidifica na parte de trás. A coluna de vapor é estabilizada pelo balanço entre a densidade de energia do feixe laser e a velocidade de soldagem<sup>20</sup>. A razão de aspecto, que é a relação da profundidade pela largura do cordão de uma solda laser por penetração profunda, pode atingir valores iguais ou superiores a quatro.

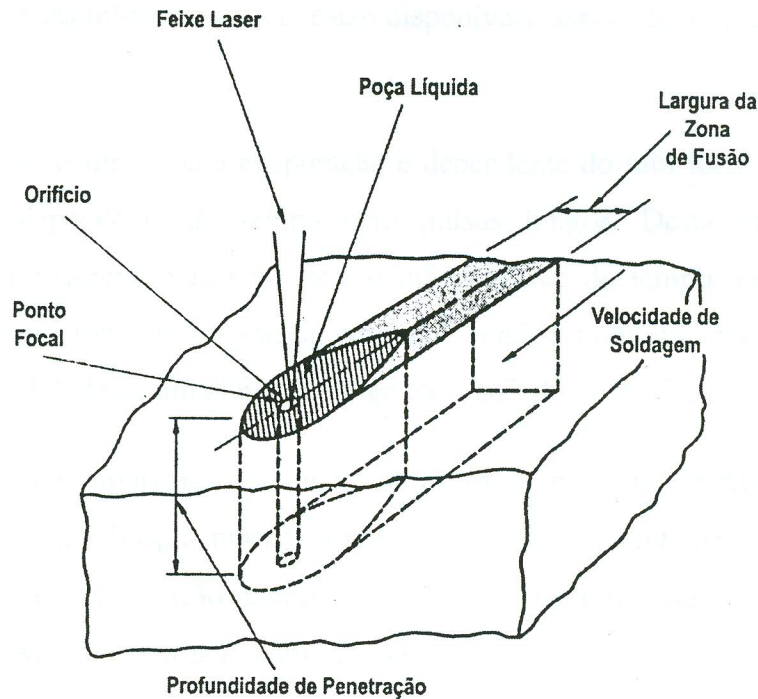


Figura 5 – Esquema de solda por penetração profunda.

Algumas ocorrências trazem preocupação em uma soldagem por penetração. Entre elas está o fechamento intermitente do “keyhole” que pode resultar em porosidade. Uma elevada densidade de energia ou uma baixa velocidade de soldagem resulta em uma instabilidade do orifício, que pode causar gotejamento do material fundido. No caso inverso, uma baixa densidade de energia ou uma alta velocidade de soldagem, leva a ocorrência de falta de energia ou tempo suficiente de interação para vaporizar o material e formar o “keyhole”.

A formação de um “keyhole” é de fundamental importância para solda laser por penetração. A maneira como isto ocorre ainda não é suficientemente bem entendida, mas comprovadamente inicia-se com a vaporização na superfície da poça de fusão<sup>21, 22, 23, 24</sup>. Para uma superfície plana e um feixe incidente com perfil de intensidade gaussiano, a solução é dada pela equação (eq. 1) com  $T(0,t) = T_v$  a temperatura de vaporização. Então:

$$(eq. 6) \quad T_v - T_0 = [A_v I(0)w / K_v (2\pi)^{1/2}] \tan^{-1}(8k_v t / w^2)^{1/2}$$

Onde os subscritos se referem aos valores na temperatura de vaporização ou próximos a ela.

Em muitos casos estas informações não estão disponíveis, assim, devem ser usados valores aproximados.

Como para a fusão, o limiar para evaporação é dependente do raio focal e da duração do pulso, mas é independente do tempo para pulsos longos. Desta maneira supõe-se novamente que a absorção pela superfície é independente do tempo. O rompimento da superfície quando a vaporização começa, em geral, conduz a um aumento no acoplamento térmico e a possibilidade de um efeito de “fuga térmica”, do ponto focal do feixe laser.

No estágio inicial de vaporização, a superfície do metal não sofre perturbação e o feixe laser incidente está na direção normal a ela. Dentro destas condições pode-se usar um simples modelo de vaporização unidimensional<sup>25</sup>. A taxa de massa evaporada,  $\beta$ , é relacionada à pressão de vapor  $p(T)$  como segue:

$$(eq. 7) \quad \beta(T) = p(T) [m^*/2\pi kT]^{1/2}$$

Onde:

$m^*$  é a massa média de um átomo evaporando,

$k$  é a constante de Boltzmann,

$T(K)$  é a temperatura na superfície.

A pressão de vapor é dada pela equação de Claussius-Clapeyron:

$$(eq. 8) \quad p(T) = p(T_B) \exp \left\{ \frac{m^* L_v}{\rho k} \left[ \frac{1}{T_B} - \frac{1}{T} \right] \right\}$$

Onde:

$T_B(K)$  é a temperatura de evaporação

$L_v$  é o calor latente de evaporação ( $J/m^3$ ).

A velocidade linear de vaporização é:

$$(eq. 9) \quad v_v = \beta(T)/\rho$$

Onde  $\rho$  é a densidade do metal.

Para uma vaporização otimizada, a velocidade de vaporização  $v_v$ , tem que ser igual àquela limitada pela conservação de energia. Então:

$$(eq. 10) \quad \beta(T)/\rho = AI/[L_f + L_v + C(T - T_0)]$$

Onde:

$C$  é o coeficiente de capacidade térmica ( $J/m^3 K$ ),

$T_0$  é a temperatura ambiente,

$L_f$  é o calor latente de fusão ( $J/m^3$ ).

A igualdade dada pela equação (eq. 10) define a temperatura  $T$  que é a temperatura na superfície. Segundo Duley<sup>19</sup>, esta temperatura equivale à temperatura de evaporação normal ( $T_B$ ), exceto para altas intensidades ( $I > 10^8 W/cm^2$ ). Para intensidades típicas de solda laser em metais, o estabelecimento do “keyhole” pode ocorrer muito rápido, particularmente quando o efeito geométrico leva ao aumento do acoplamento térmico do feixe incidente.

A tensão superficial e o fluxo convectivo na poça de solda laser próximo à temperatura de evaporação podem causar uma elevação do líquido na periferia da poça de solda, Figura 6. Esta mudança de geometria facilita uma autofocalização do feixe incidente no centro da poça de fusão. O aumento da intensidade neste ponto pode ser substancial, fazendo o limiar de formação de um “keyhole” ser ultrapassado rapidamente. Este fenômeno é acompanhado por um grande aumento na penetração da solda, como pode ser observado no gráfico de profundidade de penetração em função da potência incidente na soldagem de alumínio, apresentado na Figura 7.

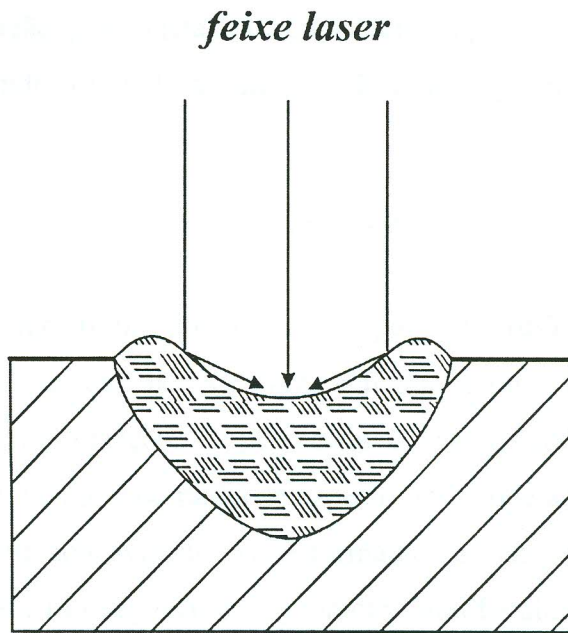


Figura 6 - Esquema da geometria da poça de fusão modificada pela convecção e pela tensão superficial, que causa auto-focalização do feixe incidente

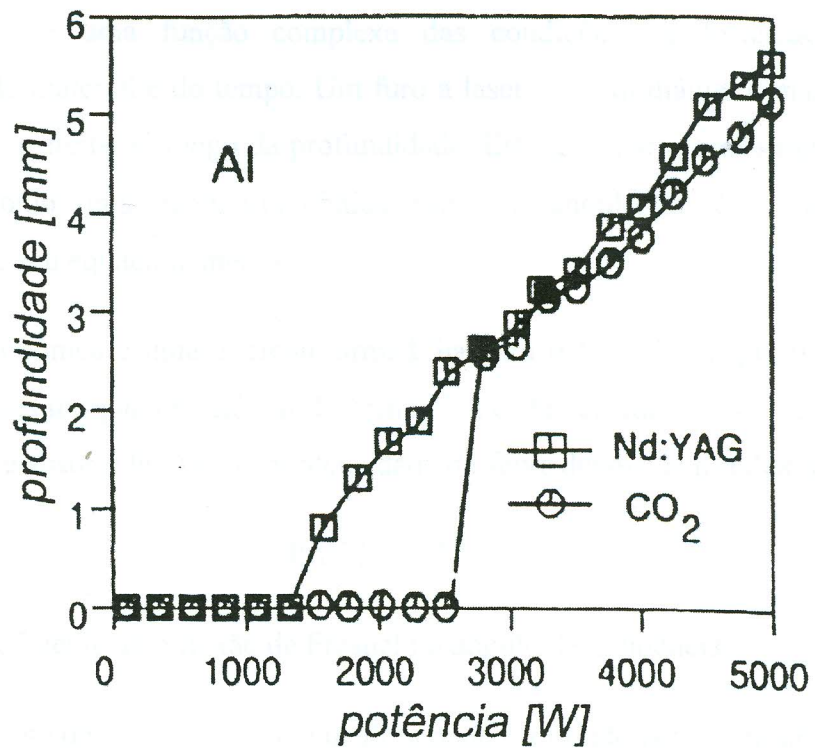


Figura 7 - Gráfico da profundidade de soldagem em função da potência incidente <sup>25</sup>.

No começo da vaporização, gás é ejetado da superfície da poça de fusão nas proximidades de seu centro, submetendo o líquido a uma pressão igual à pressão de vapor, conforme a equação abaixo:

$$(eq. 11) \quad p(T) = \beta(T) [2\pi kT / m^*]^{1/2}$$

Desta forma, este líquido fluirá do centro da poça de fusão para a sua periferia, aumentando a concavidade, que por sua vez, aumenta a intensidade do feixe laser no centro, promovendo a vaporização. A geometria côncava gerada deste modo penetra gradualmente e assume uma grande razão de aspecto. Isto pode acontecer em duas etapas. No primeiro estágio, uma concavidade rasa é formada com uma profundidade comparada ao raio da poça de fusão. Em seguida, esta geometria autofocaliza o feixe laser no centro da concavidade líquida, onde um furo cilíndrico, de alta razão de aspecto, é formado. Esta é a forma primária do “keyhole” que conduz a um acoplamento térmico eficiente do feixe laser com o material<sup>26</sup>. Assim, as condições de soldagem por penetração são atingidas satisfatoriamente.

O “keyhole” criado em uma situação estática tem uma geometria similar à furação a laser. Esta geometria é uma função complexa das condições de focalização do feixe, propriedades do material e do tempo. Um furo a laser tem um diâmetro maior, próximo à superfície, e se estreita ao longo da profundidade. Esta geometria será simplificada sendo considerada como uma geometria cônica com um ângulo de  $2\theta_w$ , para facilitar o entendimento e seu equacionamento.

Esta geometria cônica é uma eficiente armadilha para o feixe laser que fica aprisionado refletindo  $n$  vezes nas paredes até sair do orifício. A cada vez que o feixe incide uma fração de sua energia é absorvida. Assim, a intensidade do feixe depois de  $n$  reflexões é:

$$(eq. 12) \quad I(n)/I(0) = R^n$$

Onde  $R$  é o coeficiente de reflexão de Fresnel no ângulo de incidência.

O número máximo de reflexões em um orifício pode ser obtido pela seguinte equação:

$$(eq. 13) \quad n_m = \pi/4 \theta_w$$

Reflexões múltiplas rapidamente absorvem a intensidade do feixe laser, que resulta em contribuição extra de calor ao sistema pelas paredes do “keyhole”.

Se  $r_k$  é o raio do “keyhole” e  $d$  a sua profundidade, então  $n_m$  torna-se:

$$(eq. 14) \quad n_m = \pi/4 \tan^{-1}(r_k/d)$$

E a absorção é aproximadamente:

$$(eq. 15) \quad A = [ 1 - R^{n_m} ]$$

Este resultado não inclui o efeito da absorção do plasma dentro do “keyhole”. Se ocorre absorção e espalhamento do feixe laser incidente pelo gás sobre o “keyhole”, então a eficiência aproximada da deposição de energia no “keyhole”,  $\eta_k$ , pode ser definido como se segue:

$$(eq. 16) \quad \eta_k \sim (1 - A_p) (1 - R^{n_m})$$

Como valor típico tem-se  $\eta_k = 0,5$  quando  $1 - A_p = 0,9$ ,  $R = 0,9$ ,  $r_k = 0,1$  mm e  $d = 1$  mm.

Este resultado é baseado na óptica geométrica e é válido quando o diâmetro do “keyhole” é muito maior que  $\lambda$ . Quando o “keyhole” se afila para pequenos diâmetros a difração torna-se importante e o feixe se expande como resultado. O ângulo  $\theta$ , que um feixe paralelo expande quando passa através de uma abertura de diâmetro  $2r$  é:

$$(eq. 17) \quad \theta \sim \text{sen}^{-1}(\lambda/2r)$$

O diâmetro limite para o “keyhole”, então, corresponde a  $2r \sim \lambda$  onde  $\theta = \pi/2$ . A equação (eq. 17) pode também explicar porque o “keyhole” parece se iniciar com um raio muito menor que o raio do feixe próximo ao centro da poça de fusão (Figura 8). As reflexões do feixe da periferia para o centro induzem a um grande ângulo de incidência  $\theta$  em relação a normal da superfície da poça de soldagem. Quando  $\theta$  se aproxima de  $90^\circ$ , o acoplamento ocorre eficientemente dentro da abertura de raio  $r_k = \lambda/2$ , elevando a intensidade neste ponto e aumentando a vaporização.

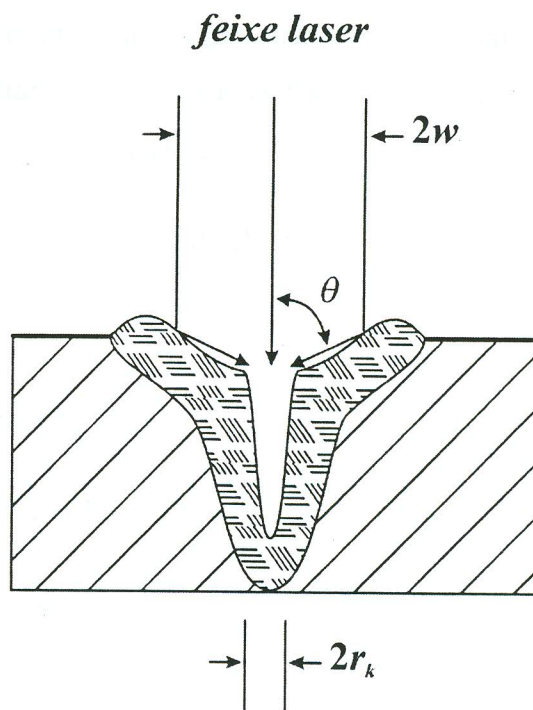


Figura 8 – Esquema do início da formação do “keyhole”

A propagação da radiação infravermelha em uma guia de onda metálica cilíndrica oca de raio  $r$  tem um fator de atenuação  $\alpha$ , como a seguir:

$$(eq. 18) \quad \alpha = \gamma \lambda^2 / r^3$$

Onde  $\gamma$  é um termo que depende do modo de propagação e das propriedades do material e é tipicamente  $\sim 10^{-2}$  para metais. Então, com  $r = \lambda$ , tem-se como resultado  $\alpha \sim 10^3 \text{ m}^{-1}$ . Isto indica que a potência laser incidente é atenuada em uma profundidade de  $\sim 1 \text{ mm}$  neste tipo de geometria. A formação de uma guia de onda cilíndrica com um raio  $\sim \lambda$  pode ser o passo inicial na criação do “keyhole” em solda por penetração em metais.

O “keyhole” é inicialmente formado por uma furação. Esta fase de furação ocorre em uma escala de tempo que é pequena se comparada ao tempo de condução de calor através das paredes do “keyhole” para o meio vizinho. Calculando a intensidade incidente (eq. 19), fica claro que ela é sempre maior no eixo de propagação do feixe.

$$(eq. 19) \quad I(r) = I(0) \exp [-(r^2/w^2)]$$

Além disto, como as paredes do “keyhole” assumem um ângulo  $\theta_w$ , a intensidade absorvida por elas será substancialmente menor que a absorvida no centro do feixe e

diminuirá com o tempo até atingir um valor limite, abaixo do limiar, para rápida vaporização. A velocidade de expansão da frente de fusão em uma direção lateral da parede do “keyhole” é aproximadamente:

$$(eq. 20) \quad v_m = [A(r)I(r)]/\Delta H_m$$

Onde:

$A(r)$  é a absorção na posição  $r$ ,

$I(r)$  é dado pela equação (eq. 19),

$\Delta H_m$  é o calor latente de fusão.

A velocidade de furação na direção de propagação do feixe é aproximadamente:

$$(eq. 21) \quad v_v = [A(0)I(0)]/\Delta H_v$$

Onde  $A(0)$  é a absorção no centro do feixe.

A relação entre a velocidade da frente de fusão e da formação do “keyhole” é uma medida aproximada da extensão da fusão lateral para a profundidade do orifício em tempos curtos,  $t$ , depois do início de sua formação.

$$(eq. 22) \quad [v_m/v_v] = [A(r)/A(0)][I(r)/I(0)][\Delta H_v/\Delta H_m]$$

$$[v_m/v_v] = [A(r)/A(0)][\Delta H_v/\Delta H_m] \exp[-(r^2/w^2)]$$

Para os metais  $\Delta H_v \sim \Delta H_m$ , mas é compensado pela pequena absorção na posição  $r$  devido ao alto ângulo de inclinação da parede do “keyhole”. Múltiplas reflexões no “keyhole” também tendem a aumentar  $I(0)$ . Para um resultado com maior precisão é necessário introduzir um tempo de retardo,  $\Delta t$ , entre a furação do “keyhole” e a formação de uma camada líquida espessa ao redor do “keyhole”. O tempo de retardo é aproximadamente  $\Delta t(r) = r/v_m$  ou o tempo que leva a frente de fusão para propagar uma distância comparável ao raio do “keyhole”. Depois do tempo  $\Delta t$ , o “keyhole” é circundado por uma camada

líquida de volume comparável ao do “keyhole”. Neste ponto, no tempo, instabilidades na interface líquida do “keyhole” passam a dominar a interação.

Estudos de solda ponto a laser, em aços inoxidáveis com laser de Nd:YAG pulsado, mostram uma transição complexa entre a formação do “keyhole” e a criação de uma poça de solda quando há variação na duração dos pulsos. Este processo ocorre em dois estágios distintos, com a furação precedendo a transferência de calor lateral. A formação do “keyhole” demora aproximadamente 2 ms. No segundo estágio, depois do “keyhole” criado, predomina a transferência de calor lateral para formar a fusão. Este líquido enche parcialmente o furo e assim esta área vazia é diminuída com durações de pulso mais longas.


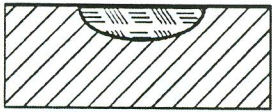

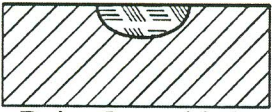



## 2.2. Comparativo da solda laser com outras técnicas de soldagem

Na comparação com outras técnicas de soldagem<sup>27</sup>, pode-se dizer que a soldagem laser não é uma panacéia, mas tem um grande número de vantagens em comparação com as técnicas de soldagem convencionais<sup>28, 29</sup>. A principal vantagem é a facilidade de focalização do feixe laser em uma pequena área, produzindo uma fonte de calor de alta intensidade, Tabela 1.

Neste aspecto a solda laser é comparável à solda por feixe de elétrons<sup>30</sup>, com a vantagem adicional de operar em pressão ambiente. O cordão de solda é caracterizado pela zona de fusão de lados aproximadamente paralelos e estreitos na largura, Tabela 1. Este cordão é estreito e profundo, assim, pode-se afirmar que a energia está sendo usada onde é preciso, fundindo o mínimo de material ao redor da junta.

Desta maneira, a solda laser apresenta-se como um processo eficiente de soldagem. Um termo para definir este conceito é conhecido como “eficiência de soldagem”. Ela é definida como  $[Vd/P]$ . Onde  $V$  é a velocidade de soldagem (mm/s),  $d$  é a espessura soldada e  $P$  é a potência incidente (kW). A Tabela 2 apresenta um comparativo entre valores típicos de eficiência de soldagem de vários processos.

Tabela 1 – Densidade de potência de diferentes processos de soldagem <sup>2</sup>

Processo de Soldagem	Intensidade [W/m <sup>2</sup> ]	Perfil da Zona de Fusão
Arco Elétrico Manual	$5 \times 10^6 - 10^8$	
TIG	$5 \times 10^6 - 10^8$	Baixa Intensidade 
		Alta Intensidade 
Plasma	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	Baixa Intensidade 
		Alta Intensidade 
Laser ou Feixe de Elétrons	$10^{10} - 10^{12}$	Desfocalizado 
		Focalizado 

Quanto mais alto o valor da eficiência de soldagem, menos energia está sendo gasta em aquecimento desnecessário. Além disto, a energia desperdiçada gera uma zona termicamente afetada e distorção no material. Nota-se na Tabela 2 que o laser e o feixe de elétrons estão novamente na mesma faixa de eficiência. O que vai determinar qual destes equipamentos utilizar é o conjunto das várias características necessárias em uma união. As principais características da solda laser estão listadas na Tabela 3.

Tabela 2 – Eficiência de soldagem de alguns processos

Processo de Soldagem	Eficiência de Soldagem [mm <sup>2</sup> /kJ]
Oxi-acetileno	0,2 – 0,5
Arco Elétrico Manual	2 – 3
TIG	0,8 – 2
Arco submerso	4 – 10
Resistência à alta frequência	65 – 100
Feixe de Elétrons	20 – 30
Laser	15 – 25

Tabela 3 – Principais características da solda laser.

Característica	Comentário
Alta densidade de energia – solda tipo “keyhole”	Baixa distorção
Alta velocidade de processo	
Início e término de ação rápida	Diferente do processo a arco
Solda a pressão atmosférica	Diferente do feixe de elétrons
Raios-X não são gerados	Diferente do feixe de elétrons
Solda autógena	Não requer limpeza de fluxo
Solda com zona fundida estreita	Baixa distorção
Zona afetada pelo calor pequena	Pode-se soldar nas proximidades de materiais sensíveis ao calor
Solda de alta precisão	Soldagem entre materiais com grandes diferenças de espessura
Cordão de solda com bom acabamento	Dispensa acabamento posterior
Campo magnético não perturba o feixe	Diferente do feixe de elétrons
Contaminação mínima ou nenhuma	Depende somente do gás de proteção
Baixa perda por evaporação de componentes voláteis	
Materiais de baixa soldabilidade às vezes podem ser soldados	
Fácil automação	Característica geral de processo laser
Laser pode ter o tempo compartilhado	Característica geral de processo laser

Na Tabela 4 se faz novas comparações apresentando uma relação de vantagens e desvantagens de alguns processos.

Tabela 4 – Comparação de processos de soldagem.(V, vantagem; D, desvantagem)

Fatores	Laser	Feixe Elétrons	TIG	Resistência	Ultra-som
Eficiência de soldagem	V	V	D	V	D
Baixo aporte térmico	V	V	D	V	V
ZAC estreita	V	V	D		V
Acabamento do cordão de solda	V	V	D		V
Fixação simples	V	D	D		
Equipamento confiável	V		V	V	
Profundidade de penetração	D	V		D	
Solda de materiais magnéticos	V	D	V	V	V
Solda de materiais refletivos	D	V	V	V	V
Solda de materiais sensíveis ao calor	V	V	D	D	V
Acesso à junta	V			D	D
Ambiente, barulho, fumaça	V	V	D	D	D
Custo do equipamento	D	D	V		

Costuma-se dizer em relação à solda laser que “se você pode ver, você pode soldar”. De fato ela pode ser feita em localizações remotas, através de janelas, ou dentro de componentes tridimensionais onde a introdução de eletrodos ou feixe de elétrons é impossível.

Para se obter selagem de uma junta sobreposta na solda laser, o feixe laser, similar ao feixe de elétrons, atua somente de um lado do material, diferentemente da solda ponto por resistência que requer acesso pelos dois lados. Esta flexibilidade abre novas possibilidades no projeto de juntas, particularmente para incorporação de componentes com superfícies inacessíveis.

Sistemas de solda laser são de alto custo em relação a equipamentos de soldagem convencional, mas a alta taxa de produção e a qualidade de solda que se atinge justifica seu valor e torna este tipo de sistema economicamente competitivo. Uma solda laser uniforme

e de alta qualidade, por exemplo, pode ser feita em velocidades acima de  $10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  em aço de 1 mm de espessura.

A estreita zona termicamente afetada na solda laser limita a distorção térmica e melhora as propriedades metalúrgicas em comparação com técnicas de solda a arco elétrico. Na solda laser, a estreita zona afetada pelo calor, junto com a profundidade de penetração, melhora as propriedades mecânicas, tais como resistência a fadiga e estampabilidade. Isto vem impulsionado os “tailor blanking” soldados a laser para uso na indústria automobilística<sup>31</sup>.

O processo de solda laser oferece novas oportunidades para materiais de difícil união, como ligas de alumínio e magnésio<sup>32</sup>. Ela também elimina o material de adição em muitos casos, eliminando assim a contaminação pelo material de adição. A evaporação de componentes de liga volátil, como o zinco, pode ser reduzida usando-se solda laser. Ligas de alumínio, como as da série 7000, que têm soldabilidade limitada com técnicas convencionais, são soldadas por laser produzindo uniões de alta resistência e excelente estampabilidade.

Uma das maiores vantagens da solda laser é a facilidade no controle do processo. A interação entre o feixe laser e o material é monitorada por sensores e softwares que atuam otimizando das propriedades da solda<sup>33</sup>.

Existem hoje sistemas com sensores de monitoramento por princípio óptico, de plasma ou acústico<sup>34, 35, 36, 37, 38, 39</sup>. Estes sensores realimentam o sistema, que atua variando a potência do laser para compensar as mudanças nas condições de soldagem. Todo este controle é executado em tempo real. Controladores deste tipo, chamados de laço fechado, estão tornando possível o melhor entendimento do que acontece no momento da soldagem, além de garantir uma soldagem otimizada dentro de condições industriais, sem a intervenção do operador.

Portanto, o processo de solda laser é particularmente amigável à automação e garante uma excelente repetibilidade de soldagem, o que se reflete nos custos do processo. O uso de um sistema CNC associado à velocidade da solda laser também resulta na diminuição dos custos de produção. Devido a estas características o refugo é drasticamente reduzido, podendo ser totalmente eliminado em diversos processos de união.

O uso de solda laser pode também reduzir o custo de produção em outras fases da fabricação de um componente. Na eliminação de tratamento térmico antes ou depois da soldagem<sup>40</sup>, por exemplo.

Existem também desvantagens, como o alto custo do laser e dos sistemas auxiliares para entrega e focalização do feixe. Os custos de operação também são altos, particularmente para aplicações que requerem altas vazões de gás de proteção, como o hélio.

O poder de focalização do feixe laser, que de um lado traz a vantagem de entregar a energia eficientemente para a peça e minimiza a zona afetada pelo calor, também traz problemas de alinhamento e preenchimento da junta. Pequenos desalinhamentos na junta podem causar grandes mudanças nas condições de soldagem. Juntas com folgas a partir de 0,1 mm podem resultar em uma falta de interação do feixe com o material e reduzir a eficiência de aquecimento.

### 2.3. Parâmetros de processo da solda laser

Apesar da solda laser ser de alta qualidade e fornecer novas possibilidades na união de metais, ela não é uma panacéia e só é obtida depois de muito trabalho, com a otimização dos parâmetros do processo<sup>41, 42, 43</sup>. Alguns desses parâmetros são apresentados na Figura 9.

O estudo destes parâmetros é o que proporciona as melhores condições de soldagem. Em muitos casos, esta investigação envolve o corte das soldas para análise da seção transversal, como a geometria do cordão e as propriedades metalúrgicas e microestruturais. Testes mecânicos também definem uma faixa aceitável de condições de soldagem.

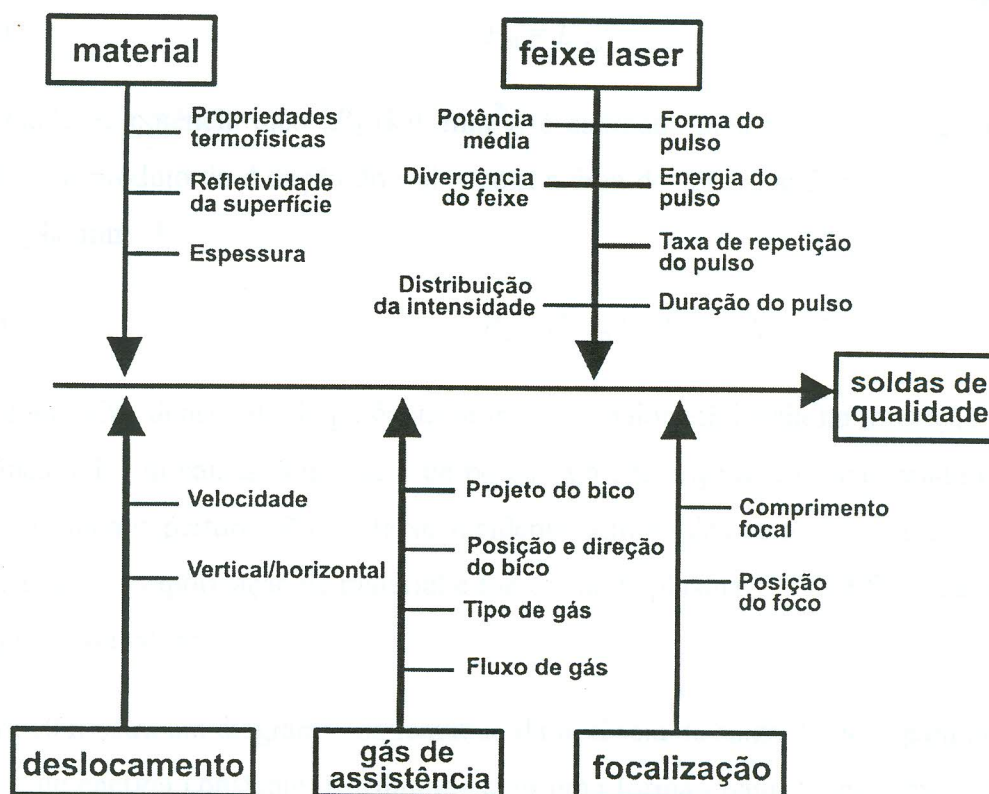


Figura 9 – Diagrama de parâmetros que afetam a qualidade da solda com laser pulsado

Em solda a laser, a geometria do cordão (largura e profundidade de penetração) e a zona afetada pelo calor dependem do modo como se dá a interação entre o feixe e o material de base. Interferem nesta interação as características da radiação laser, a focalização do feixe, as propriedades físicas do material e a composição da atmosfera de proteção<sup>44, 45, 46, 47, 48</sup>.

As propriedades do feixe laser que influenciam nas características da interação com o material são: a energia [ $E$  (J)] e a potência [ $P$  (W)] da radiação laser, o comprimento de onda, a densidade de potência, a duração do pulso e da exposição à fonte de calor, a distribuição temporal e espacial da intensidade do feixe e os parâmetros geométricos do feixe.

A potência pico [ $P_p$  (kW)] é a relação da energia com o tempo de duração do pulso [ $t_p$  (ms)] e permite estimar o volume de metal fundido durante o pulso do laser.

$$(eq. 23) \quad P_p = E \cdot t_p^{-1}$$

A potência média [ $P_m$  (W)] (para um laser pulsado) é calculada pelo produto da frequência [ $f$  (Hz)] (taxa de repetição dos pulsos) com a energia de pulso, que possibilita estimar a velocidade de execução da soldagem [ $v$  (mm/min)].

(eq. 24)

$$P_m = E \cdot f$$

A densidade de potência pico [ $P_d$  (kW/mm<sup>2</sup>)] é estimada pela relação: energia do feixe dividida pelo produto da duração do pulso com a área do feixe incidente na superfície do material [ $A_p$  (mm<sup>2</sup>)].

(eq. 25)

$$P_d = E \cdot t_p^{-1} \cdot A_p^{-1} = P_p \cdot A_p^{-1}$$

Soldas com baixa densidade de potência propiciam maior eficiência na interação do laser com o material. Em baixas densidades de potência a presença de plasma gerado é menor, acarretando menor perturbação no feixe incidente. Em soldas com elevada densidade de potência ocorre a vaporização de material e formação de plasma, o que dificulta a absorção de energia pelo material.

A Figura 10 mostra um diagrama esquemático da potência de saída do laser para uma série de pulsos de energia constante distribuídos com uma forma qualquer, no tempo. A forma da distribuição temporal do pulso influi na interação do feixe laser com o material e, portanto, nas características da solda.

Um pulso com uma distribuição temporal retangular garante uma densidade de energia praticamente constante durante todo o pulso laser. Quando esta distribuição é retangular com um pico de potência no seu início, a união de ligas de alumínio e cobre é facilitada. Esta forma temporal reduz a expulsão de metal líquido durante o pulso, o que diminui os defeitos do tipo cratera. Os formatos de pulso com rampa, ascendente ou descendente, são indicados para união de materiais suscetíveis a trincas de solidificação. Com estas formas de pulso pode-se influir na taxa de resfriamento exercendo um controle do tempo de solidificação da poça de fusão e, desta forma, reduzindo as trincas de solidificação.

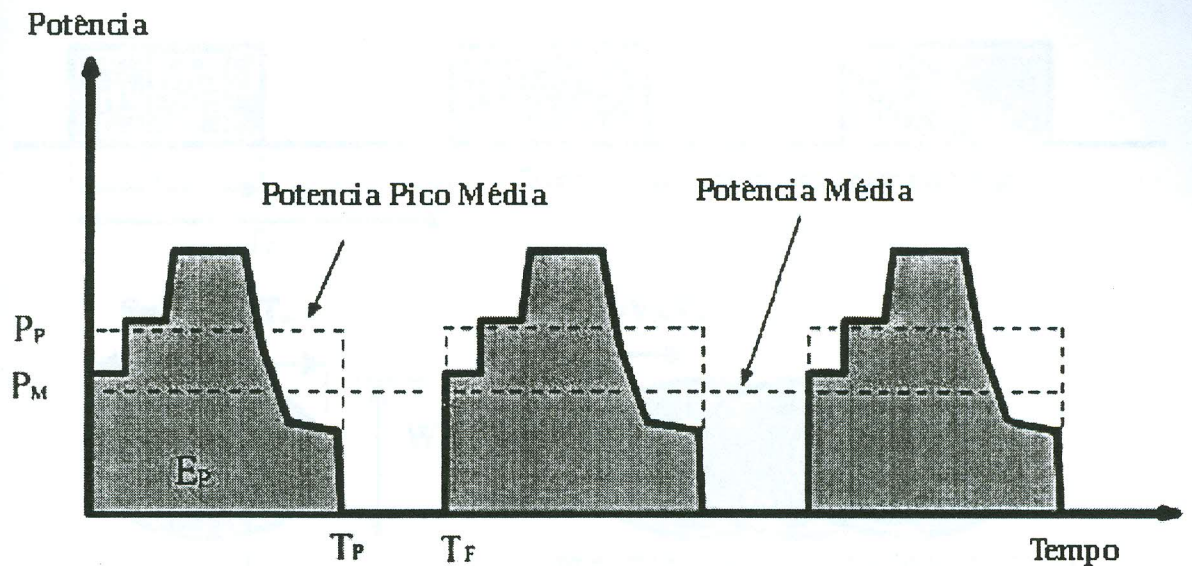


Figura 10 – Diagrama esquemático da forma do pulso laser no tempo, mostrando a potência pico média, a potência média, a duração do pulso ( $t_p$ ) e o intervalo de tempo entre eles ( $t_f$ ).

A relação entre a profundidade e a largura do cordão de solda é influenciada diretamente pela forma do ponto de incidência do feixe laser no material e pela forma da distribuição de energia na secção transversal do feixe.

Os parâmetros do sistema de focalização de maior relevância são: o comprimento focal da lente e o posicionamento do foco em relação à superfície. Uma lente de comprimento focal curto fornece maior penetração, mas dificulta a manutenção das dimensões do cordão de solda, tanto na largura como na profundidade. Este tipo de lente provoca uma focalização do feixe com cintura mínima, tornando crítica a tolerância do posicionamento do foco em relação à superfície da peça. Via de regra, quando se posiciona o foco do feixe laser levemente abaixo da superfície do material atinge-se a penetração máxima.

Na solda para selamento, vários parâmetros de processo podem influenciar na qualidade dos cordões. Nestes casos é necessário que a sobreposição parcial dos pulsos durante o deslocamento seja constante e que a quantidade de pulsos por unidade de comprimento fique dentro de uma faixa que gere um cordão de solda com penetração uniforme. Os esquemas da Figura 11 ajudam no entendimento das relações matemáticas e na formulação das equações de sobreposição parcial de pulsos.

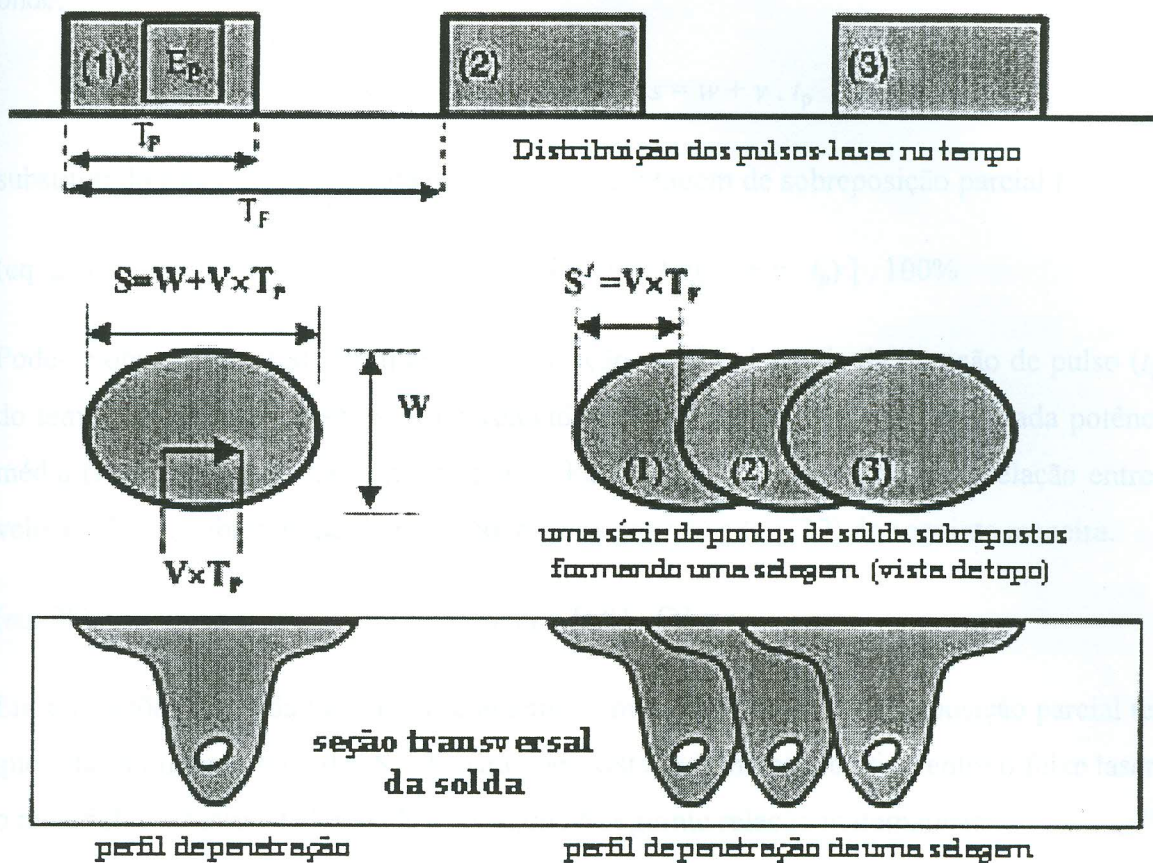


Figura 11 – Diagrama esquemático de uma seqüência de pulsos laser e seu efeito na soldagem de selamento.

Se:

$v$  é a velocidade de solda,

$w$  é o menor diâmetro do ponto de solda,

$s$  é o maior diâmetro do ponto de solda formado pelo menor diâmetro do ponto de solda mais o movimento que ocorre durante o pulso,

$s'$  é o comprimento da parte do ponto de solda não sobreposta pelo ponto sucessivo,

E supondo que a sobreposição parcial é unidimensional, a porcentagem de sobreposição parcial, %S, na direção do eixo  $x$  é:

$$(eq. 26) \quad \%S = [(s - s')/s] \cdot 100\% = [1 - (s'/s)] \cdot 100\%$$

onde,

$$s' = v \cdot t_f \quad \text{e} \quad s = w + v \cdot t_p$$

substituindo estas expressões na (eq. 26), a porcentagem de sobreposição parcial fica:

$$(eq. 27) \quad \%S = [1 - (v \cdot t_f) / (w + v \cdot t_p)] \cdot 100\%$$

Pode-se observar na (eq. 27) que a sobreposição parcial depende da duração de pulso ( $t_p$ ), do tempo de pulso a pulso ( $t_f$ ) e da velocidade de soldagem ( $v$ ), para uma dada potência média ( $P_m$ ) e um dado tamanho do ponto. Para facilitar a visualização da relação entre a velocidade e a sobreposição parcial, pode-se reescrever a (eq. 27) da seguinte maneira.

$$(eq. 28) \quad (w/v) = [t_f / (1 - S)] - t_p$$

Em aplicações de solda laser para selamento com laser pulsado, a sobreposição parcial tem que estar no intervalo de  $0 \leq S < 1$ , para que exista movimento relativo entre o feixe laser e o material. Portanto a velocidade está sujeita à seguinte relação matemática:

$$(eq. 29) \quad 0 < v \leq w / (t_f - t_p)$$

Na solda laser, para selamento com laser pulsado, existem mais parâmetros essenciais que requerem atenção, do que na soldagem com laser contínuo ou em solda ponto com laser pulsado. A seguir, alguns destes parâmetros serão comentados.

A densidade de potência pico na solda laser para selamento com laser pulsado pode ser relacionada diretamente com a densidade de potência média para soldagem com laser contínuo ou solda ponto:

$$(eq. 30) \quad P_m / A = P_d \cdot C_d = [E / (t_p \cdot A)] \cdot C_d$$

A (eq. 31) apresenta a relação entre o tempo de interação [ $t_{in}$ ] na solda laser para selamento com laser pulsado e o diâmetro do feixe focalizado [ $d_f$ ]:

$$(eq. 31) \quad t_{in} = (d_f / v) \cdot C_d = (d_f / v) \cdot (t_p / t_f)$$

Assim a energia média [ $E_{av}$ ] pode ser escrita da seguinte forma:

$$(eq. 32) \quad E_{av} = (P_p \cdot C_d) / (d_f \cdot v) = E / (d_f \cdot v \cdot t_f) = P_m / (d_f \cdot v) = (P_p \cdot T_{in}) / d_f^2 = (\pi/4) \cdot P_d \cdot t_{in}$$

E a percentagem de sobreposição parcial da solda [ $S_{er}$ ] é dada pela equação a seguir:

$$S_{er} = [1 - (v \cdot t_f)/(w + (v \cdot t_p))] = \{ 1 - 1/[(w \cdot d_f \cdot E_{av})/E + (t_p/t_f)] \}$$

(eq. 33)  $S_{er} = \{ 1 - 1/[(w \cdot d_f \cdot E_{av})/E + C_d] \} = \{ 1 - 1/[(w \cdot t_{in})/(d_f \cdot t_p) + C_d] \}$

As propriedades termofísicas do material influenciam na geometria do cordão e nas dimensões da zona termicamente afetada. Algumas destas propriedades do material são: a refletividade, o coeficiente de absorção, a densidade, a difusividade térmica, o calor específico, o calor latente, a condutividade térmica e as dimensões.

A refletância é uma propriedade que varia com a temperatura e com a rugosidade da superfície do material. Desta forma, pode-se afirmar que a interação do feixe laser com o material é influenciada pela temperatura e pelas condições de acabamento na superfície.

Na interação do feixe laser com o material, parte da energia do feixe é absorvida e o restante é refletido, de acordo com a relação:

(eq. 34)  $\eta = 1 - R$

A eficiência de acoplamento ( $\eta$ ) é a fração da energia incidente absorvida durante a irradiação com laser em incidência normal e ( $R$ ) é a refletividade do material.

A refletividade ( $R$ ) dos metais à radiação laser, tanto de laser de Nd:YAG como de CO<sub>2</sub>, é elevada à temperatura ambiente. Isto indica que, somente uma pequena quantidade de radiação é absorvida pelo metal. Entretanto, durante o período de tempo em que o pulso interage com o metal, a temperatura vai aumentando e a refletividade do metal diminui drasticamente.

Por exemplo, o aço AISI 304 tem refletividade próxima à unidade em temperatura ambiente (para o laser de CO<sub>2</sub>). Quando este é exposto à radiação laser, a refletividade diminui para o valor de aproximadamente 0,5 em algumas centenas de nanosegundos. Com o aumento da temperatura a refletividade diminui até valores próximos a zero quando se atinge a temperatura de fusão do material.

A seguir apresentam-se os valores de refletividade de um aço carbono, com diferentes acabamentos na superfície, submetido à radiação de um laser de CO<sub>2</sub> exemplificando a influência deste parâmetro na refletividade:

- Para o aço carbono com superfície polida, a refletividade é de aproximadamente 92%. Quando esta superfície é lixada a refletividade diminui para aproximadamente 75%; quando a superfície está oxidada ela diminui ainda mais, para aproximadamente 62%.

Portanto, em um processo de solda laser deve-se ter atenção com as condições de acabamento do material e com temperatura na superfície. Estes parâmetros modificam drasticamente a interação do feixe laser com o material.

É possível estimar o calor necessário na fusão da poça, supondo que toda a energia incidente é usada somente na fusão do cordão de solda, através da seguinte equação<sup>41</sup> :

$$(eq. 35) \quad E \cdot \eta = [d \cdot w \cdot (w + t_p \cdot v) / 4] \pi \cdot \rho \cdot (C_p \cdot \Delta T + L_m)$$

Onde:

$\eta$  é a eficiência de acoplamento;

$w$  [m] é a largura do cordão de solda;

$d$  [m] é a profundidade de penetração;

$v$  [m/s] é a velocidade de soldagem;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] é a densidade do material;

$C_p$  [J/kg.K] é o calor específico;

$\Delta T$  [K] é a variação de temperatura para se atingir a fusão;

$L_m$  [J/kg] é o calor latente de fusão

A interação do feixe laser incidente com o material também é influenciada pela atmosfera de proteção. A composição do gás de assistência, a sua vazão e o ângulo de incidência do

seu fluxo no material podem alterar o grau de oxidação e a taxa de formação do plasma. Conseqüentemente, a profundidade de penetração e a dimensão da zona termicamente afetada são modificadas<sup>49</sup>.

A partir da equação formulada por Bahun e Engquist<sup>50</sup> que define o fluxo de calor por condução para uma fonte pontual contínua em um corpo semi-infinito, Fuerschbach e Eisler<sup>51</sup> previram os valores da dimensão e profundidade da zona de fusão na solda laser por pontos, através da seguinte equação:

$$(eq. 36) \quad T(r,t) = [q/2\pi kr] \cdot \operatorname{erfc} [r/(4\alpha t)^{1/2}]$$

Onde:

$T$  é a temperatura em uma dada posição com raio  $r$  em relação à fonte pontual e tempo  $t$ ,

$q$  é a potência de entrada da fonte,

$k$  é a condutividade térmica e

$\alpha$  é a difusividade térmica.

Para determinar em que temperatura se encontra a zona de fusão, a qualquer instante após o término do pulso laser, supõe-se que a temperatura produzida no material é a soma combinada de duas fontes: uma que aquece durante o pulso de laser e outra que esfria depois do pulso<sup>51</sup>. Com isto, tem-se a seguinte equação:

$$(eq. 37) \quad T(r,t) = [q/2\pi kr] \cdot \{ \operatorname{erfc} [r/(4\alpha t)^{1/2}] - \operatorname{erfc} [r/[4\alpha(t - t_p)]^{1/2}] \}$$

Onde,  $t_p$  é o tempo de duração do pulso laser e é considerado que  $t > t_p$ .

#### 2.4. Soldabilidade dos materiais no processo de solda laser

Uma grande base de dados vem sendo gerada sobre o processo de solda laser e sobre a soldabilidade de metais com laser. Ela é formada principalmente por estudos pontuais, com ênfase na especificação e otimização dos parâmetros de soldagem<sup>9, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58</sup>. Apesar disto, até o momento, ainda não se obteve uma visão geral sobre o assunto que permita consolidar a teoria sobre ele. Contudo, a adoção da solda laser na união de metais

vem se tornando freqüente em uma variedade de processos particulares em condições industriais.

As restrições da soldabilidade em um processo de soldagem são justificadas, principalmente, pelas propriedades metalográficas, tais como: tendência a trincas, fragilidade e formação de poros. Algumas generalizações na soldabilidade de vários metais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Soldabilidade dos metais com laser <sup>25</sup>

Material	Comentário
Aço baixo carbono e aço baixa liga	Boa soldabilidade com lasers de Nd:YAG e CO <sub>2</sub> , alta conformabilidade (estampabilidade)
Aço médio e aço alto carbono	Aceitável, mas pode ser susceptível a trincas, frágil, baixa ductilidade.
Aço ligado (tubulação, construção, estrutural)	Pode ser soldado satisfatoriamente, mas em soldas de penetração parcial ocorre porosidade na raiz. Solda com alta dureza.
Aço galvanizado	Boa soldabilidade e alta velocidade. Cuidados especiais no projeto de juntas sobrepostas.
Aço inoxidável austenítico	Excelente soldabilidade, baixa porosidade, boa resistência à corrosão.
Aço inoxidável ferrítico	Aceitável, mas a soldagem reduz a tenacidade e a resistência à corrosão. Zona termicamente afetada pode ter alta dureza.
Aço inoxidável martensítico	Soldas duras e frágeis. É necessário o pré-aquecimento ou recozimento (revenimento) após a solda.
Liga resistente ao calor (inconel, hastelloy)	Avalia-se caso a caso. Fragilidade, segregação e trincas podem ser problemas. Material de adição pode ser útil.
Titânio e suas ligas	Boa soldabilidade em Ti-6Al-4V e Ti puro. Necessidade de proteção com gás inerte. Boas propriedades mecânicas.
Alumínio e suas ligas	Possibilidade de boas soldas com lasers de Nd:YAG e CO <sub>2</sub> . Perdas de elementos voláteis levam a porosidades. Trincas são problemas nas ligas da série 6000.
Magnésio	Boa soldabilidade com lasers de CO <sub>2</sub> em Mg Al 9 Zn
Cobre	Possibilidade de soldas aceitáveis em chapa fina com lasers de Nd:YAG.
Latão	Dificuldades devido à perda de Zn e a alta condutividade térmica.

A soldabilidade entre dois metais depende do tipo de liga e da composição destes materiais e também da técnica de soldagem e das condições em que esta é aplicada. Desta maneira,

uma soldabilidade aceitável dentro de condições de laboratório ou prototipagem, pode ser inaceitável em um processo de produção, por causa de algumas considerações de produção tais como a velocidade de soldagem, tolerâncias do perfil geométrico da junta ou pela necessidade de pré-aquecimento<sup>59, 60, 61</sup>.

Informações relativas à soldabilidade de várias combinações de metais são dadas na Tabela 6. Elas são baseadas principalmente nos diagramas de fase binária, mas também levam em conta experiências práticas. No caso de metais dissimilares, a boa solubilidade sólida é essencial para a integridade das propriedades da solda. Em uniões em que a temperatura de fusão de um material está próxima à temperatura de evaporação do outro material, a soldabilidade é pobre e às vezes ocorre a formação de fases intermetálicas, que são frágeis.

Cobre e Níquel, por exemplo, que têm diâmetros atômicos similares e a mesma estrutura cristalina (cfc), são ambos eletropositivos e possuem um elétron de valência cada um. Por isso formam uma solução sólida substitucional em toda faixa de composição. Portanto, esta consistente solução sólida pode ser produzida com boas propriedades metalúrgicas e mecânicas. Estes tipos de combinações são denotados na Tabela 6 pela classe E.

A união entre dois elementos que são completamente miscíveis no estado líquido, mas com miscibilidade limitada no estado sólido, produz uma solda aceitável. Isto é possível, tomando-se certas medidas como: posicionamento adequado do feixe e pré-aquecimento ou uso de material de adição. Estes tipos de combinações são denotados na Tabela 6 pela classe B e M.

Combinações de metais que são solúveis no estado líquido, mas completamente insolúveis no estado sólido formam um sistema eutético. Combinações entre prata-cobre, chumbo-estanho e alumínio-silício são típicas deste tipo de sistema e aparecem classificados como M (média soldabilidade) na Tabela 6. Eutéticos são mais duros e frágeis que as fases primárias e suas formações muitas vezes levam à redução na ductilidade. Eutéticos de baixo ponto de fusão são particularmente problemáticos, por causa de sua contribuição para o mecanismo de trincas de solidificação. A alta taxa de aquecimento da soldagem laser limita o tempo necessário para segregação, e a alta taxa de resfriamento leva à formação de uma microestrutura fina, na solidificação. Estes fatores reduzem a possibilidade de trincas a quente.

Tabela 6 - Soldabilidade com laser para combinação de dois metais (E=excelente, B=boa, M=média, R=ruim)<sup>2</sup>

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Ta	E																		
Mo	E	E																	
Cr	E	R	E																
Co	M	R	M	B															
Ti	M	E	E	B	M														
Be	R	R	R	R	M	R													
Fe	M	M	B	E	E	R	M												
Pt	B	M	B	B	E	M	R	B											
Ni	M	B	M	B	E	M	M	B	E										
Pd	M	B	B	B	E	M	M	B	E	E									
Cu	R	R	R	R	M	M	M	M	E	E	E								
Au	*	*	R	M	R	M	M	M	E	E	E	E							
Ag	R	R	R	R	R	M	R	R	M	R	E	M	E						
Mg	R	*	R	R	R	R	R	R	R	R	R	M	M	M					
Al	R	R	R	R	M	M	R	M	R	M	R	M	M	M	M				
Zn	R	*	R	R	M	R	R	M	R	M	M	B	M	B	R	M			
Cd	*	*	*	R	R	R	*	R	M	M	M	R	M	B	E	R	R		
Pb	R	*	R	R	R	R	*	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Sn	R	R	R	R	R	R	R	R	M	R	M	R	M	M	R	R	R	R	M

Fases intermediárias podem também existir na forma de um componente intermetálico. A estrutura cristalina da maioria destes componentes é complexa, e são, na maioria das vezes, duras e frágeis. Soldas que formam estas fases normalmente exibem baixa ductilidade e alta sensibilidade a trincas. A combinação de chumbo e magnésio é típica deste tipo de sistema, denotada na Tabela 6 pela classe R.

Portanto, as propriedades físicas e metalúrgicas dos materiais podem influenciar significativamente num processo de soldagem a laser.

Em relação às propriedades físicas dos materiais destacam-se a absorção e a condutibilidade térmica, que determinam o processo termodinâmico da soldagem. Baixa absorção ou alta condutibilidade térmica ou ainda propriedades físicas totalmente diferentes entre dois materiais a serem unidos, são condições ruins para o processo de

soldagem laser. Assim, a união por solda laser de materiais com estas características, faz o processo ser considerado especial, levando à necessidade de um grande controle dos parâmetros<sup>62</sup>.

As propriedades metalúrgicas determinam a solidificação e a formação das fases metalúrgicas na solda. Portanto elas influenciam no resultado das propriedades mecânicas e na funcionalidade da união. Propriedades metalúrgicas ruins, isto é, a não soldabilidade ou a soldabilidade parcial entre os materiais na zona de fusão, podem levar ao desenvolvimento de fases intermetálicas e outras propriedades problemáticas na solda. Estas propriedades também tornam o processo especial.

O desenvolvimento do controle de potência do pulso laser em tempo real, de novas capacidades de duração de pulso de até 100 ms, de energia de pulso de até 150 J e de estratégias de soldagem novas para lasers pulsados oferecem novas possibilidades para o controle na distribuição espacial e temporal da energia e intensidade da radiação na peça durante o processo de soldagem. Estes controles são essenciais para o gerir a quantidade de calor envolvida no processo, a fusão e o processo metalúrgico de soldagem.

Diferentes estratégias de soldagem com laser de Nd:YAG pulsado serão discutidos em combinação com exemplos de aplicações industriais. A Figura 12 dá uma visão geral sobre as diferentes estratégias de soldagem disponíveis com laser pulsado. Distinguiu-se entre solda ponto e solda de contorno.

Solda ponto, nesta definição, são pontos de solda laser feitos pela focalização de um feixe laser em uma peça, onde se aplica uma linha de pontos únicos sem contato e sem interações térmicas entre eles.

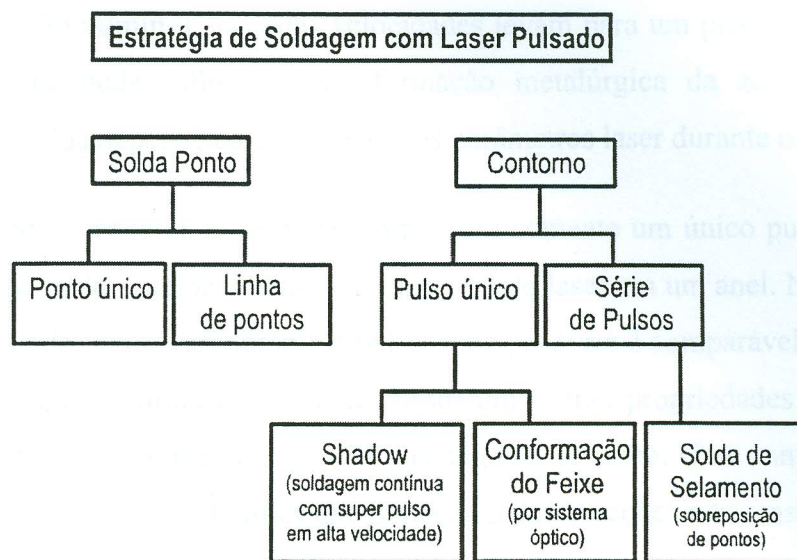


Figura 12 – Estratégias de soldagem com laser de Nd:YAG pulsado.

Solda de contorno, entende-se como qualquer linha de soldagem produzida pelo movimento do feixe laser, isto é por galvos, ou pelo movimento da peça por CNC, robô ou um eixo rotacional. Na Figura 12 encontram-se três diferentes maneiras de se fazer um contorno.

Geralmente uma linha de pontos sobrepostos é conhecida como soldagem de contorno pulsado. Seu nome é convencionalmente conhecido como soldagem de selamento pulsado<sup>62</sup>. Em comparação com a solda ponto, ocorrem interações térmicas e metalúrgicas entre os pontos feitos pelo laser pulsado. Isto acontece pela combinação entre a frequência de pulso, o ciclo de trabalho e o grau de sobreposição parcial.

Diferente da estratégia de solda de contorno de soldagem de selamento pulsado, existem soldas de contorno feitas com somente um único pulso laser.

O método de soldagem de contorno com pulso único em alta velocidade já é conhecido na literatura como processo SHADOW (soldagem contínua com super pulso em alta velocidade)<sup>63</sup>. Este processo combina as idéias das soldas com laser contínuo e com laser pulsado fazendo o feixe laser se movimentar concomitantemente à duração do pulso. Isto pode ser realizado com o uso de galvos rápidos ou altas velocidades de deslocamentos da peça. Durações de pulso típicas, de perfil retangular, são de  $t_p = 10 - 100$  ms, para comprimento de selamento de até alguns centímetros. A velocidade de soldagem está na

faixa de  $v = 10 - 50$  m/min. Estas altas velocidades levam para um processo térmico com alta dinâmica, que pode influenciar na formação metalúrgica da zona de fusão. A profundidade de solda depende da constância dos parâmetros laser durante o deslocamento.

O segundo método para uma solda de contorno com somente um único pulso produz um contorno pela óptica do sistema, que transforma o ponto laser em um anel. Neste caso, não existe movimento do feixe laser durante o pulso. Este processo é comparável à solda ponto, com a diferença que a forma da poça de fusão tem outras propriedades térmicas e de solidificação, paralelas e perpendiculares à linha da poça de fusão. Uma vantagem pode ser uma prevenção ou redução das tensões que induzem a deformações e trincas.

As propriedades dos materiais e da geometria da junta, dos parâmetros laser de distribuição de intensidade e do tamanho do ponto de focalização, influenciam no comportamento das fases de aquecimento, soldagem e solidificação na solda ponto. O comportamento destas fases também são influenciados pelos parâmetros do pulso. Os parâmetros do pulso são: a potência pico, a duração do pulso e a forma do pulso. A Figura 13 mostra um típico pulso de forma controlável que pode gerir as três fases: de aquecimento (1), de soldagem (2) e de solidificação (3). Esta forma de pulso é chamada de pulso térmico, porque é adaptada para o processo térmico da soldagem. O objetivo na fase (1) é produzir uma elevação controlada de temperatura do material no ponto de focalização e, ao mesmo tempo, atingir rapidamente o limiar de soldagem, sem aquecer demais. O controle desta fase depende fortemente da absorção da superfície, que não é somente dada pelo material, depende também da temperatura e das condições químicas e físicas desta superfície. Logo que a temperatura de fusão é alcançada, a temperatura na fase (2) deve ser mantida aproximadamente constante. Assim, a poça de fusão é expandida ao diâmetro e profundidade desejados sem aquecer demais ou esfriar rapidamente. Em muitos casos isto significa, que depois da fase (1) a potência tem que ser diminuída. Depois da fase (2) a poça de fusão não deve esfriar rapidamente. Isto pode resultar em alta tensão na solidificação, formação de trincas, poros e uma superfície áspera. Na fase (3) o esfriamento é controlado e suave, o que minimiza o risco de defeitos causados pelo esfriamento rápido.

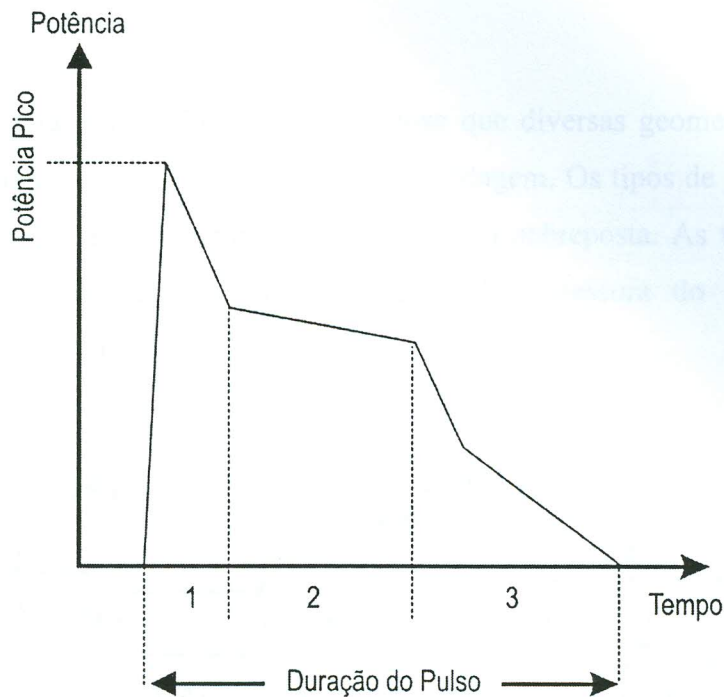


Figura 13 – Parâmetros do pulso e forma de pulso típica.

O pulso adaptado termicamente pode ser usado para combinações de materiais que tem boas propriedades metalúrgicas, isto é, solubilidade boa ou total. Esta combinação de materiais encontra-se especialmente na indústria eletrônica com combinações de várias ligas de cobre, níquel e latão. Elementos como cobre, níquel, zinco, ouro e prata têm boa solubilidade entre si, Tabela 6. Os problemas mais desafiadores se encontram nas grandes diferenças das propriedades físicas, isto é, na refletividade do laser e na condução de calor, e freqüentemente em peças de dimensões muito pequenas. Para aplicações de micro-soldagem, não só a adaptação da forma de pulso para as propriedades materiais é necessária, mas também uma alta estabilidade da energia de pulso para pulso. O controle de potência de pulso em tempo real permite estabelecer e reproduzir pulsos térmicos, como mostrados na Figura 13, com uma estabilidade de pulso para pulso dentro de 0,5%. Outros parâmetros de processo como o posicionamento do feixe pode também ajudar a otimizar a soldagem.

## 2.5. Tipos de juntas

Nos projetos de juntas para solda laser observa-se que diversas geometrias de junta são similares às usadas em processos tradicionais de soldagem. Os tipos de juntas geralmente empregados em solda laser são: junta de topo e junta sobreposta. As tolerâncias típicas destas juntas para soldagem a laser dependem da espessura do material e estão apresentadas na Figura 14.

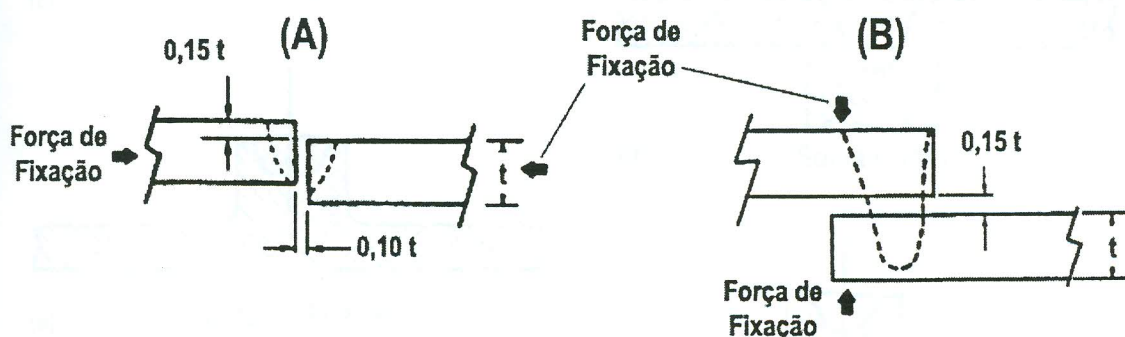


Figura 14 – Tolerâncias típicas para juntas de topo (A) e sobreposta (B)

As tolerâncias mostradas na Figura 14 são para ligas de ferro e níquel; para materiais bons condutores de calor, como as ligas de cobre e alumínio, é necessário que as tolerâncias sejam ainda mais apertadas.

Geralmente não se usa metal de adição em solda laser. Assim, a folga existente na junta de topo determina o grau de concavidade que é gerado na superfície do cordão de solda.

Na soldagem de junta sobreposta, Figura 14b, a tolerância máxima admissível de 15% é em relação ao material de menor espessura, e neste tipo de união é preferível que o feixe laser incida no material de menor espessura. Folgas excessivas em juntas sobrepostas causam danos na chapa superior antes que a solda atinja a chapa inferior.

Apesar das distorções durante o processo de soldagem serem mínimas, recomenda-se a utilização de alguns grampos para manter as peças na posição original.

Freqüentemente, o projeto de juntas é muito similar ao das juntas para solda com feixe de elétrons. A Figura 15 mostra as geometrias de junta para solda laser em chapa fina.

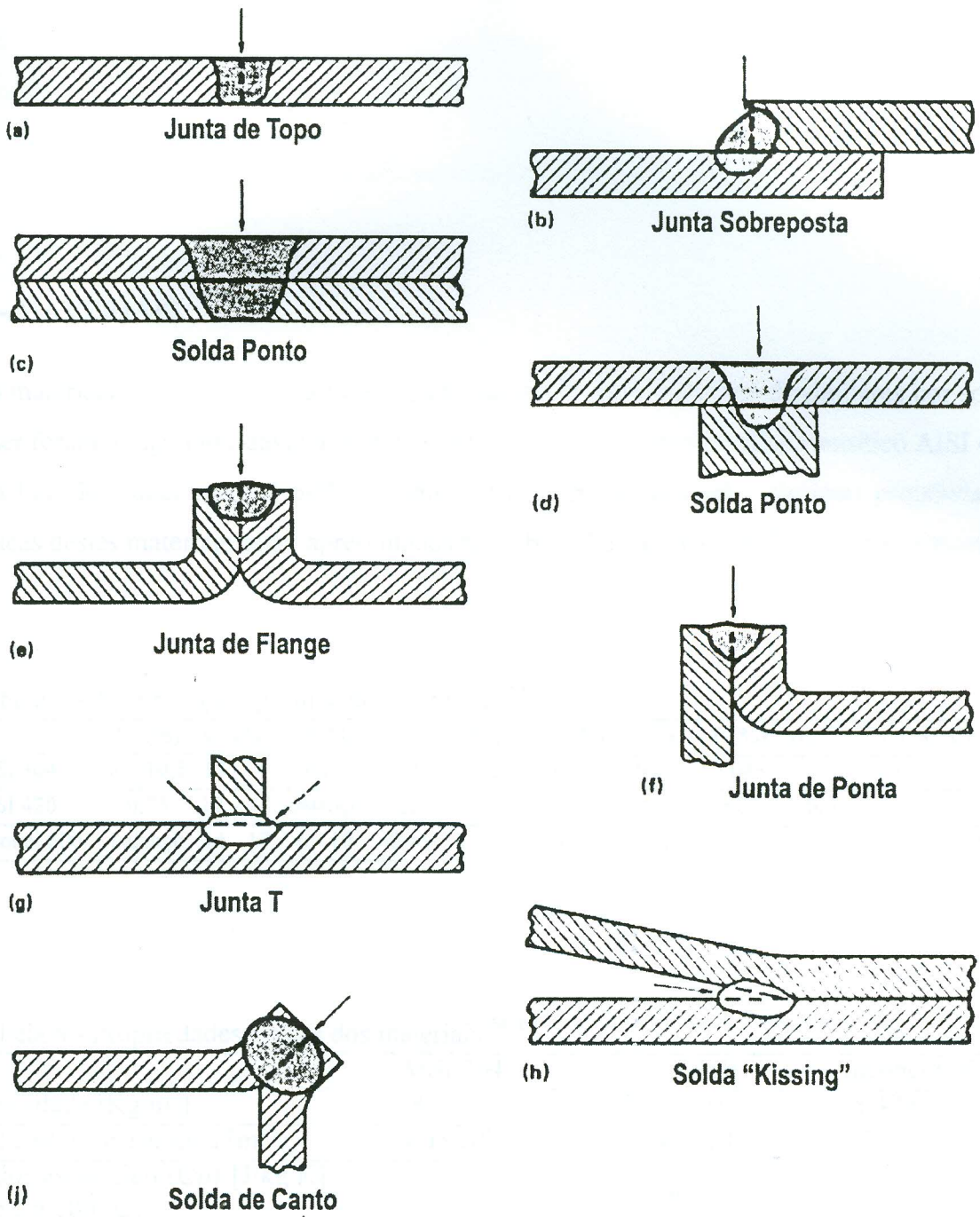


Figura 15 – Geometria de juntas para solda laser em chapa fina

### 3. - MATERIAIS

Os materiais utilizados para a investigação da união entre materiais dissimilares por solda laser foram: o aço inoxidável austenítico AISI 304, o aço inoxidável martensítico AISI 420 e a liga de níquel Inconel 600. A composição química nominal e algumas propriedades físicas destes materiais estão apresentadas na Tabela 7 e na Tabela 8<sup>64 65</sup>, respectivamente.

Tabela 7 – Composição química dos materiais<sup>64</sup>

	Ni (%)	Cr (%)	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mo (%)	N <sub>2</sub> (%)	Cu (%)
AISI 304	8 – 10,5	18 - 20	balanço	0,08	2	0,75	0,03	0,045		0,1	
AISI 420	0,75	12 – 14	balanço	0,15	1	1	0,03	0,04	0,5		
Inconel 600	balanço	14 - 17	6 - 10	0,15	1	0,5	0,015				0,5

Tabela 8 - Propriedades físicas dos materiais<sup>64, 65</sup>

	AISI 304	AISI 420	Inconel 600
Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	8 x 10 <sup>3</sup>	7,73 x 10 <sup>3</sup>	8,47 x 10 <sup>3</sup>
Difusividade Térmica [m <sup>2</sup> /s]	4,05.10 <sup>-6</sup>	3,94 x 10 <sup>-6</sup>	3,96.10 <sup>-6</sup>
Calor específico (Cp) [J/kg.K] (de 0 a 100 °C)	500	460	444
Condutibilidade térmica (k) [W/m.K]	34,1 (1673-1727 K) 16,2 (0 – 100 °C)	14 (de 0 – 100 °C)	14,9 (0 – 100 °C)
Ponto de fusão [K]	1673-1727	1727-1783	1628-1688
Temperatura de sólido [K]	1673	1727	1628
Temperatura de Líquido [K]	1727	1783	1688
Calor de vaporização [kJ/kg.K]	6330		
Entalpia de fusão [J/mm <sup>3</sup> ]	8,7		

Os dados da Tabela 8 demonstram que as propriedades físicas de todos os três materiais escolhidos são similares. Esta similaridade fornece condições favoráveis para a soldagem a laser.

A seguir, algumas características dos materiais eleitos:

### 3.1. Aços Inoxidáveis

São ligas ferrosas de excelente resistência à corrosão em diversos ambientes. São basicamente ligas de Fe - Cr ou Fe - Cr - Ni, contendo ainda elementos como C, N, Mo, Mn, Nb, Ti, entre outros, seja como elementos de liga ou como elementos residuais.

A forma mais usual de classificar estes materiais é baseada em suas microestruturas, resultantes do balanço de elementos de liga e de tratamentos térmicos e mecânicos aplicados. A partir deste critério classificam-se os aços inoxidáveis em: austeníticos, martensíticos e ferríticos.

#### 3.1.1. Aços inoxidáveis austeníticos

Estes aços são os que apresentam estrutura predominantemente austenítica à temperatura ambiente, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Nesta classe estão, principalmente, as ligas Fe - Cr - Ni, com a distribuição de elementos em % peso entre 16 e 30% para o Cr, entre 6 e 26% para o Ni e menos de 0,3% para o carbono.

Os aços inoxidáveis austeníticos à temperatura ambiente, apresentam um baixo limite de escoamento, um elevado limite de resistência e uma grande ductilidade. Entre os aços inoxidáveis, os austeníticos são os de melhor soldabilidade e resistência à corrosão. Formam o grupo mais usado e numeroso entre os aços inoxidáveis. Suas principais aplicações encontram-se na indústria química, alimentícia e refino de petróleo, onde certamente o aço inoxidável AISI 304 é o mais utilizado.

#### 3.1.2. Aços inoxidáveis martensíticos

Estes aços são os que, devido à sua elevada temperabilidade, podem apresentar uma estrutura completamente martensítica, mesmo após um resfriamento ao ar calmo. Nesta classe estão ligas Fe - Cr - C, com teores em % peso entre 11 e 18% de Cr e entre 0,1 e

0,5% de C. Em alguns casos, contudo, podendo apresentar teores de C de até 1%, e ter sua estrutura austenitizada a uma temperatura elevada.

Os aços inoxidáveis martensíticos são, portanto, ligas endurecíveis por tratamento térmico e, em geral, são usados no estado temperado e revenido. Embora sua resistência à corrosão seja inferior à dos outros tipos de aços inoxidáveis, ainda apresenta-se satisfatória para meios de baixa agressividade.

Esta classe de aços inoxidáveis é particularmente adequada para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, alta dureza e resistência à abrasão (ou erosão) tanto em ambientes secos como úmidos. Como exemplos de suas aplicações, temos: componentes de turbinas a gás ou a vapor, mancais e peças de cutelaria. Entre os martensíticos, o tipo mais comum é o aço inoxidável AISI 420.

### 3.2. Ligas de Níquel

Estas ligas são principalmente empregadas em aplicações que requerem altas temperaturas e que são submetidas a ambientes altamente corrosivos. O sistema de classificação das ligas níquel é determinado pela quantidade de elementos principais em cada uma. Assim elas se dividem em quatro famílias: ligas binárias como as Ni-Cu e Ni-Mo; ligas ternárias como as Ni-Cr-Fe e Ni-Cr-Mo; ligas complexas como a Ni-Cr-Fe-Mo-Cu; e superligas. Normalmente as ligas de níquel são conhecidas pelos seus nomes comerciais como: Monel, Hastelloy, Inconel, Incoloy, Nimonic, Pyromet, etc.

#### 3.2.1. Inconel 600

Como visto, esta foi a liga de níquel usada na presente investigação de união entre materiais dissimilares. Ela está classificada como sendo da família das ligas ternárias, por ter como elementos principais o Ni-Cr-Fe. Como todas as ligas de níquel que contêm cromo, esta também apresenta uma boa resistência à oxidação em temperaturas elevadas, bem como alta resistência à corrosão.

O Inconel 600 tem boa resistência a altas temperaturas tanto em meios oxidantes quanto em meios redutores. Por ser um material com alta resistência à fluência, esta liga é de grande importância para serviços que requerem resistência mecânica a altas temperaturas. Suas principais aplicações estão relacionadas à produção de componentes de turbinas e

componentes da indústria aeronáutica e aeroespacial e na indústria automobilística em válvulas de motores de alto desempenho.

### 3.3. Soldabilidade

#### 3.3.1. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis podem ser considerados ligeiramente mais difíceis de soldar que os aços de baixo carbono. Estas dificuldades podem variar muito conforme a classe do aço inoxidável. Algumas propriedades físicas destes aços, como: baixo ponto de fusão, baixa condutibilidade térmica, alto coeficiente de expansão térmica e alta resistência elétrica, tornam necessários cuidados especiais nos procedimentos de soldagem.

Um aspecto fundamental na soldagem destes materiais é a necessidade de limpeza, que deve ser feita de modo a minimizar as contaminações que deteriorem a sua resistência à corrosão. Cuidados com a forma do cordão também são muito importantes, uma vez que as irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira e início de corrosão<sup>66, 67</sup>.

Os aços inoxidáveis austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção daqueles que contém adição de enxofre (usado para facilitar a usinagem). Como a composição química dos materiais influencia no processo de soldagem, atenção especial também deve ser dada em alguns casos específicos.

Os aços inoxidáveis austeníticos com teor de carbono superior a 0,06% em peso, durante o ciclo térmico de soldagem, podem precipitar carbonetos nos contornos de grão da zona termicamente afetada [ZTA]. Isto diminui a resistência à corrosão, mas pode ser minimizado através de uma soldagem em alta velocidade.

Em materiais com alta quantidade de elementos gamagênicos, o cordão de solda pode solidificar-se com uma estrutura completamente austenítica. Nestas condições, a solda torna-se muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação.

A alta velocidade de soldagem também pode reduzir o problema de distorção decorrente do baixo ponto de fusão, da baixa condução de calor e do alto coeficiente de expansão

térmica dos aços austeníticos. Portanto, para se obter uma união com distorções mínimas é necessária altas velocidades de trabalho que geram um baixo aporte térmico no processo de soldagem. No caso de chapas finas, dispositivos especiais de fixação e um ponteamto cuidadoso são ainda necessários para se minimizar este problema.

Os aços inoxidáveis martensíticos têm variações em seu grau de soldabilidade principalmente pela quantidade de carbono em sua composição; quando o teor deste elemento é baixo, estes aços podem ser soldados sem maiores problemas. Já, para teores de carbono acima de 0,15%, devido à tendência de temperabilidade ao ar, é necessário o uso de pré-aquecimento e, freqüentemente, de pós-aquecimento para a soldagem. A temperatura de pré-aquecimento varia usualmente entre 230 e 290 °C, e o pós-aquecimento deve ser feito imediatamente após a soldagem, a uma temperatura entre 650 e 760 °C, seguido de resfriamento lento até a temperatura ambiente. Pré-aquecimento ou pós-aquecimento deficiente leva à formação de trincas de têmpera na região de solda, que são potencializadas com a presença de hidrogênio.

Para os aços inoxidáveis, em geral, existem diagramas empíricos que permitem a previsão da microestrutura da solda. O mais conhecido é o diagrama de Schaeffler <sup>68</sup> que, a partir da composição química dos materiais expressas pelos equivalentes de cromo ( $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb$ ) e de níquel ( $Ni_{eq} = Ni + 30 C + 0,5 Mn$ ), fornece a previsão da microestrutura do cordão de solda e a possibilidade de ocorrência de problemas na união.

Na Figura 16, que ilustra este diagrama, observa-se na parte central uma pequena área triangular de cor cinza. Esta é uma região de coexistência de ferrita e de austenita, onde se obtém bons resultados na soldagem. Nos processos de soldagem em que se utiliza material de adição, este deve ser projetado a fim de se obter como resultado, após a sua diluição com o metal base, um cordão de solda com a composição química dentro desta região.

Neste diagrama também são indicadas quatro áreas (numeradas de 1 a 4) típicas de ocorrência de problemas na soldagem de aços inoxidáveis. Nestas áreas, os problemas que podem ocorrer são os seguintes: [1] trincas de solidificação ou por perda de ductilidade em temperaturas acima de 1250 °C; [2] formação de fases intermetálicas após aquecimento a temperaturas entre 450 e 900 °C; [3] crescimento de grão na ZTA; [4] fragilização e trincas pela formação de martensita na estrutura.

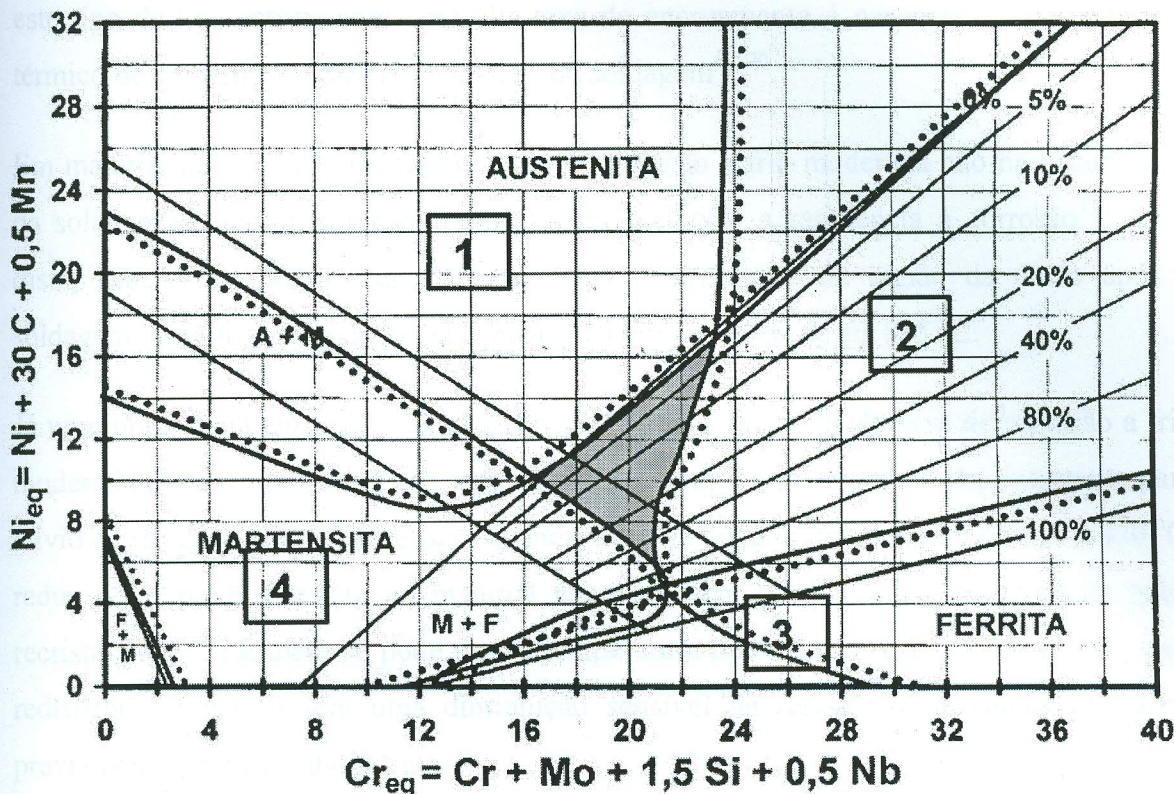


Figura 16 – Diagrama de Schaeffler mostrando a microestrutura que se forma no cordão de solda em cada região em função dos equivalentes de cromo e níquel.

Para se utilizar o diagrama de Schaeffler deve-se calcular o Cr e Ni equivalentes, pela composição química do cordão de solda. Desta maneira, com a localização do ponto ( $Cr_{eq}$ ,  $Ni_{eq}$ ) no diagrama, a microestrutura é determinada pela leitura direta da estrutura nesta região. Em aplicações em que os materiais são dissimilares, o ponto que representa a solda no diagrama estará em algum lugar sobre o segmento de reta que une os pontos destes materiais ( $Cr_{eq}$ ,  $Ni_{eq}$ ) no diagrama. A posição desse ponto no segmento dependerá da composição química resultante no cordão de solda.

### 3.3.2. Inconel 600

O Inconel 600 é uma liga de níquel constituída por solução sólida. Este tipo de liga geralmente é soldada sem necessidade de maiores cuidados quando está no estado recozido ou de deformação a frio moderada. Deve ser dada atenção, no processo de soldagem destas ligas, ao aporte térmico que deve ser mantido tão baixo quanto possível para minimizar recozimento e crescimento de grão na ZTA. O pré-aquecimento não é recomendado; se

este tipo de liga estiver com uma alta taxa de encruamento é necessário um tratamento térmico de recozimento do material antes da soldagem<sup>69,70</sup>.

Em material na condição recozido ou de deformação a frio moderada não há necessidade da solda passar por tratamento térmico para melhorar a resistência à corrosão<sup>71</sup>. Além disto, sabe-se que neste material não ocorre fragilização na região da união após a soldagem, mesmo depois de longa exposição à temperaturas de até 815 °C.

Já uma união feita em liga de níquel constituída de solução sólida com deformação a frio moderada pode ser posta em uso sem tratamento térmico ou depois de um tratamento para alívio de tensão. O alívio de tensão, quando feito na faixa de temperatura de 430 a 870 °C, reduz ou remove a tensão no material encruado sem produzir uma estrutura de grãos recristalizados. Também se pode usar a temperatura numa faixa entre 315 e 430 °C, para redistribuir a tensão sem uma diminuição sensível na resistência mecânica produzida previamente pelo trabalho a frio.

Outra metodologia de tratamento pós-soldagem, empregada na união de liga de níquel constituída de solução sólida nestas condições, é a aplicação de deformação a frio e recozimento subsequente. O cordão de solda gerado neste material tem a zona de fusão formada por uma estrutura dendrítica, com ductilidade menor que o material no estado encruado. Esta metodologia de tratamento fornece como resultado uma estrutura mais uniforme ao longo da união.

#### 4. - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, os materiais utilizados para a investigação da união entre materiais dissimilares por solda laser foram: o aço inoxidável austenítico AISI 304, o aço inoxidável martensítico AISI 420 e a liga de níquel Inconel 600. Suas composições químicas nominais são mostradas na Tabela 7. Estas composições foram confirmadas por análise feita através de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda, realizada em um equipamento marca Rigaku, modelo RIX – 3000 do laboratório de Fluorescência de raios X do CQMA/IPEN. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição química dos materiais analisados no IPEN

	Ni (%)	Cr (%)	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mo (%)	N <sub>2</sub> (%)	Cu (%)
AISI 304	8,9	18,4	71,2		1,06	0,34		0,03	0,05		0,05
AISI 420	0,13	13,0	86,2		0,17	0,46		0,04			0,02
Inconel 600	74,9	14,9	9,4		0,27	0,27	0,04				0,21

O material utilizado no experimento foi preparado a partir de chapas de 0,8 mm de espessura, cortadas nas dimensões de 20 mm x 50 mm. Os materiais foram utilizados dois a dois, e montados em um dispositivo desenvolvido especialmente para este trabalho a fim de auxiliar no posicionamento e fixação (Figura 17). Assim, os requisitos de tolerância, tanto no alinhamento entre as peças como também na folga da junta foram atendidos.

A união entre os materiais foi feita por solda autógena de topo ao longo da aresta de 50 mm. Cada uma delas foi soldada com o feixe laser incidente em uma posição diferente em relação à junta. O feixe foi posicionado tanto na junta como deslocado de 0,1 e 0,2 mm

para ambos os lados. A Tabela 10 apresenta as combinações de materiais e posicionamento do feixe laser utilizados.

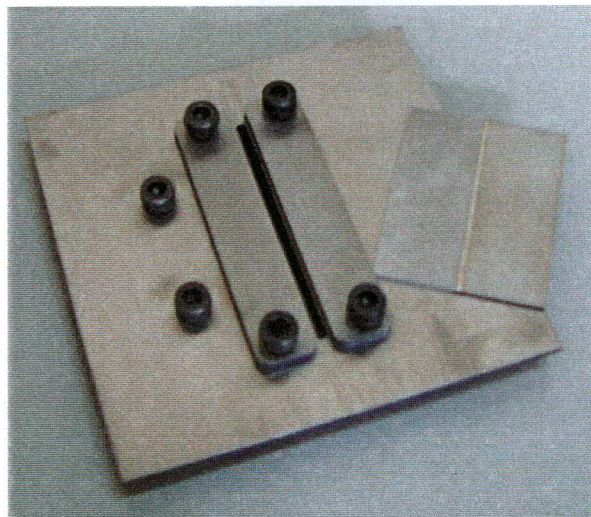
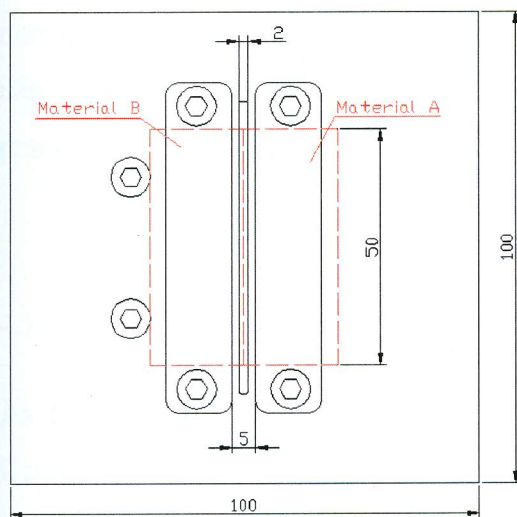


Figura 17 – Dispositivo de posicionamento e fixação para o experimento de solda laser.

Tabela 10 – Amostras utilizadas no experimento de soldagem.

Amostra	Materiais	Posição do feixe em relação à junta	folga na junta (mm)
AM/M02	AISI304 / AISI420	0,2 mm p/ lado do AISI420	zero
AM/M01	AISI304 / AISI420	0,1 mm p/ lado do AISI420	0,020
AM/J	AISI304 / AISI420	na linha da junta	0,015
AM/A01	AISI304 / AISI420	0,1 mm p/ lado do AISI304	0,020
AM/A02	AISI304 / AISI420	0,2 mm p/ lado do AISI304	zero
AI/I02	AISI304 / Inconel 600	0,2 mm p/ lado do Inconel 600	0,020
AI/I01	AISI304 / Inconel 600	0,1 mm p/ lado do Inconel 600	0,020
AI/J	AISI304 / Inconel 600	na linha da junta	0,015
AI/A01	AISI304 / Inconel 600	0,1 mm p/ lado do AISI304	0,020
AI/A02	AISI304 / Inconel 600	0,2 mm p/ lado do AISI304	0,010
MI/I02	AISI420 / Inconel 600	0,2 mm p/ lado do Inconel 600	0,010
MI/I01	AISI420 / Inconel 600	0,1 mm p/ lado do Inconel 600	
MI/J	AISI420 / Inconel 600	na linha da junta	0,015
MI/M01	AISI420 / Inconel 600	0,1 mm p/ lado do AISI420	0,010
MI/M02	AISI420 / Inconel 600	0,2 mm p/ lado do AISI420	0,020

Na Tabela 10 também são apresentados os valores da folga entre os materiais (folga na junta). As medidas das folgas foram registradas para se verificar sua influência. Estes dados foram desconsiderados na avaliação dos experimentos por representarem valores mínimos, bem abaixo da tolerância recomendada na literatura <sup>25</sup>. Este fator, provavelmente não deve ter interferido nos resultados. O fato dos valores identificados terem sido praticamente iguais, também dificultou a determinação de sua real influência.

#### 4.1. Equipamento Laser

As soldas foram realizadas em um equipamento desenvolvido no IPEN, denominado Central de Processamento de Materiais a Laser (CPML) Figura 18. Este equipamento é composto por uma fresadora CNC de quatro eixos, onde foi acoplado um laser de Nd:YAG pulsado também desenvolvido no próprio instituto. As principais características deste laser são: energia por pulso de até 10 J, taxa de repetição de até 500 Hz, potência média de saída de 100W, potência pico de 3 KW e largura temporal dos pulsos controlada desde 0,2 até 10 ms.

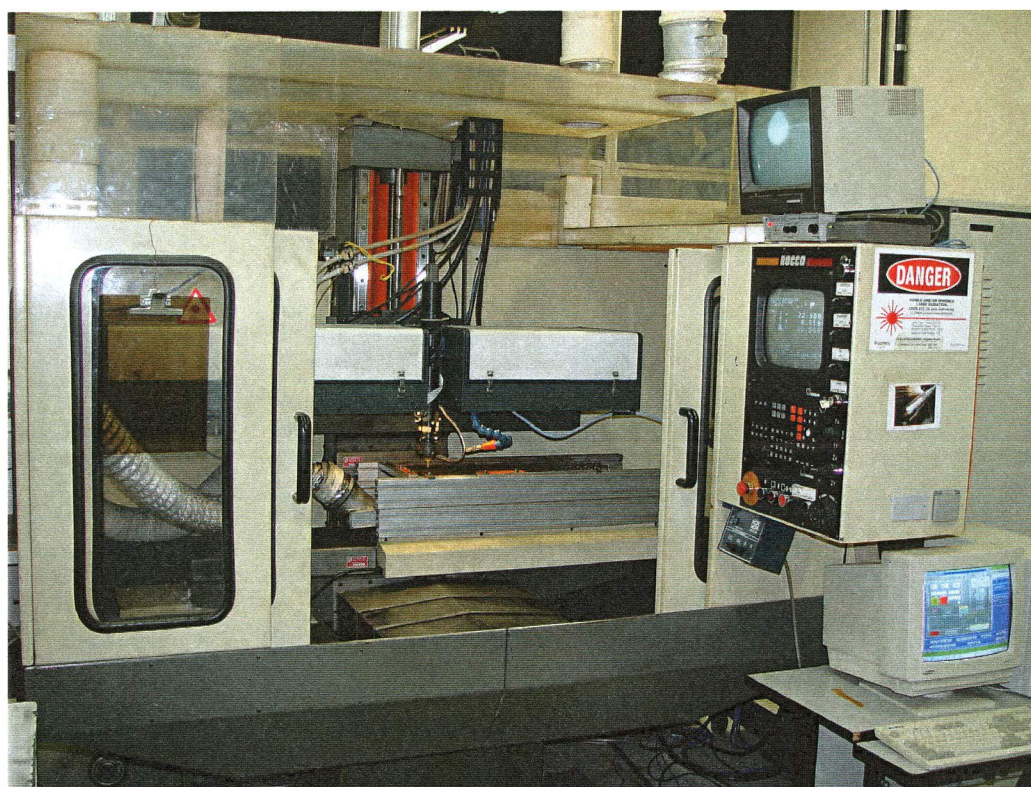


Figura 18 – Central de processamento de materiais a laser – CPML

O ressonador do laser foi desenhado para operar em modo espacial multimodo, com  $M^2$  de aproximadamente 15. Assim, a distribuição espacial de energia é composta pela sobreposição de diversos modos, cada um com distribuição gaussiana, gerando uma distribuição homogênea e concêntrica. Como resultado, temos uma distribuição espacial de energia que é algo entre uma função gaussiana com maior intensidade no centro e uma distribuição do tipo “top hat”, com intensidade não tão pronunciada no eixo do feixe. Este tipo de feixe é particularmente adequado à soldagem a laser, pois ao mesmo tempo em que permite uma precisa focalização da energia no ponto desejado, o que seria difícil com feixe tipo “top hat” com grande  $M^2$ , ainda não apresenta intensidade demasiadamente alta no seu centro, o que levaria a efeitos indesejados na poça de soldagem.

O perfil de distribuição temporal da energia neste laser é do tipo retangular, ou seja, é praticamente constante com o tempo. A Figura 19 abaixo mostra um traço de osciloscópio típico desta distribuição temporal.

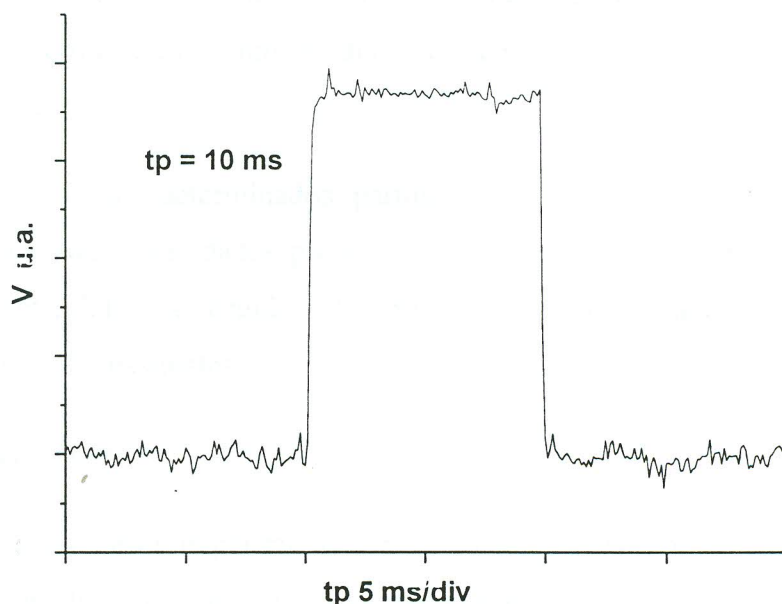


Figura 19 - Comportamento temporal de um pulso laser da CPML.

Embora muitos sistemas modernos de lasers dedicados à soldagem utilizem sistemas especiais para conformação temporal do pulso laser<sup>72</sup>, com rampas de aquecimento e resfriamento, neste nosso caso, a forma retangular se mostrou bastante satisfatória.

## 4.2. Os Ensaaios de Soldagem

Os parâmetros do laser utilizados no experimento foram os seguintes:

energia ( $E$ ) = 6,0 J,

potência média ( $P_m$ ) = 84 W,

tempo de pulso ( $t_p$ ) = 7 ms

frequência de pulsos ( $f$ ) = 14 Hz.

O feixe laser foi focalizado por uma lente de comprimento focal  $f = 100\text{mm}$ , e o ponto focal ficou localizado a 3 mm abaixo da superfície do material.

Os cordões de solda foram realizados com velocidade de soldagem ( $v$ ) = 300 mm/min, o que propiciou uma sobreposição parcial dos pulsos estimada em 30%. O gás de assistência utilizado para a proteção da solda foi o argônio com uma vazão de 10 l/min; este gás foi soprado por um bocal com 6 mm de diâmetro, concêntrico ao feixe, distante 4mm da superfície das peças.

Estes parâmetros foram determinados partindo-se da longa experiência do grupo na soldagem do aço 304. Estes dados pré-existentes foram, então, testados preliminarmente nas junções pretendidas no estudo. Os resultados foram bastante satisfatórios, sendo necessário apenas alguns ajustes.

## 4.3. Análise das Soldas

As uniões geradas neste experimento foram investigadas por microscopia óptica e eletrônica, por medidas de microdureza e pela análise da distribuição em % peso dos principais elementos químicos (Fe, Ni e Cr) da seção transversal do cordão de solda.

As seções transversais do cordão de solda analisadas foram retiradas das amostras soldadas em duas posições diferentes: a 5 mm e a 10 mm do final do cordão, Figura 20.

Estas seções foram preparadas por processo metalográfico e a sua estrutura metalúrgica foi revelada em equipamento de ataque eletro-químico, marca Buehler modelo electromet 4. A solução química utilizada foi: uma parte de ácido nítrico e uma parte de água. As amostras foram atacadas por esta solução durante aproximadamente 90 segundos sob uma diferença de potencial de 1,5 volt. Devido à diferença entre os materiais, foi grande a dificuldade na revelação simultânea das suas estruturas na mesma amostra.

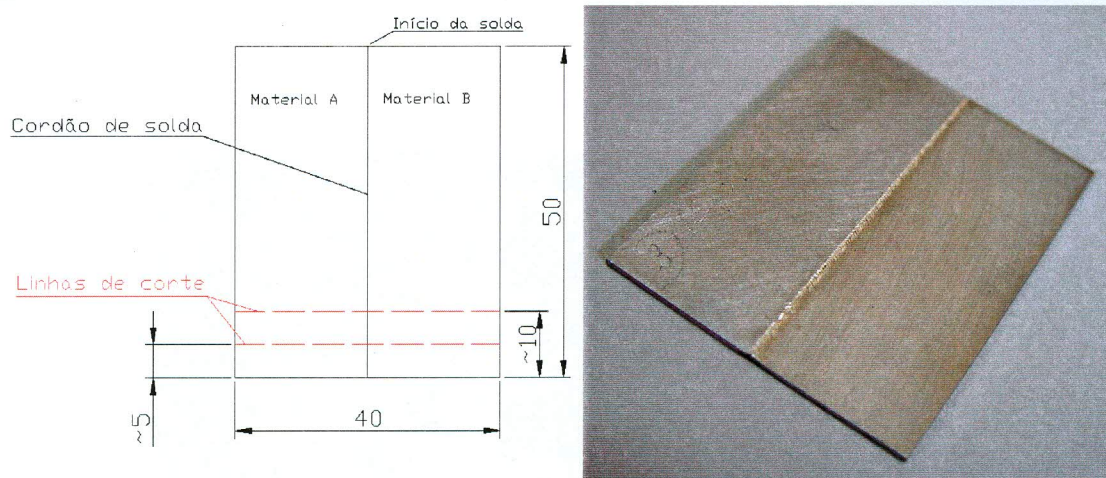


Figura 20 – Esquema da posição de corte das amostras para obtenção da seção transversal do cordão de solda.

#### 4.3.1. Microscopia Óptica

Na observação em microscópio óptico da seção transversal do cordão de solda investigou-se a geometria do cordão, a profundidade de penetração e a ocorrência de trincas na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona de fusão (ZF). A possibilidade de formação de poros, gerados pelo colapso do “keyhole” também foi investigada na zona de fusão. Esta investigação foi feita para todos os posicionamentos do feixe em relação à junta, e o equipamento utilizado foi um microscópio óptico marca Leica, modelo MDLP do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN.

#### 4.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

Nos microscópios eletrônicos de varredura (MEV), o primeiro da marca Philips modelo XL30 do CCTM – Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais do IPEN e o segundo da marca Joel modelo JXA 6400 do Centro Tecnológico da Marinha, foram investigadas a seção transversal das uniões, a microestrutura e a variação de %peso dos principais elementos químicos por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX). Esta análise foi feita ao longo da seção transversal, em pontos a uma profundidade de aproximadamente 0,3 mm, como pode ser visto na Figura 21.

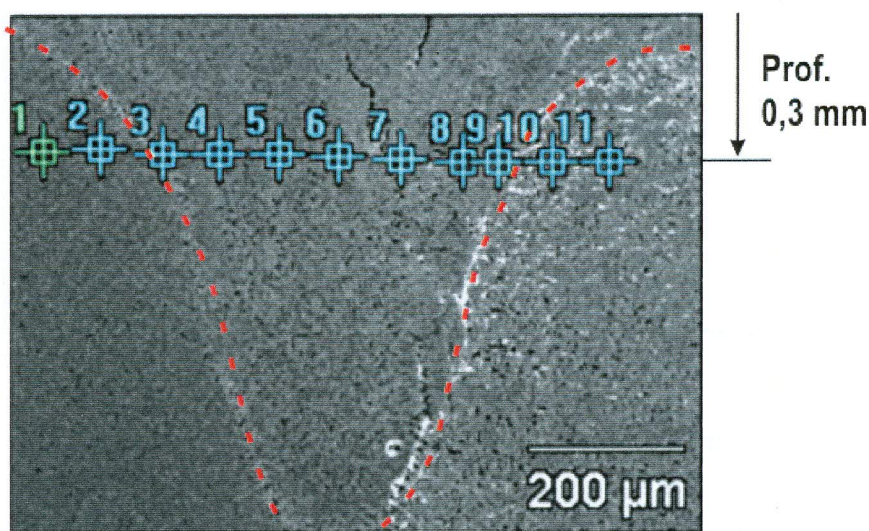


Figura 21 – Foto de MEV com esquema de localização dos pontos onde foram medidas a %peso dos principais elementos e a microdureza Vickers.

#### 4.3.3. Ensaio de Microdureza

A microdureza Vickers, para avaliação do cordão de solda e da zona termicamente afetada, também foi feita a uma profundidade de 0,3 mm conforme mostrado na Figura 21. Utilizou-se nestes casos, carga de 40 gramas em um equipamento de dureza instrumentada marca Fischer, modelo Fischerscope H100V, pertencente ao Laboratório de Fenômenos da Superfície, do departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP. Neste aparelho os ensaios obedeceram ao seguinte procedimento: aplicação da força máxima em 60 passos com duração de 0,1 s; assim que atingida, a carga máxima é mantida por 10 s, e após este tempo a carga é removida em 100 passos de 0,1 s cada um.

Os resultados destes ensaios foram analisados numericamente por meio de curvas de regressão, tanto para a etapa de carregamento como para a de descarregamento, conforme exemplificado na Figura 22. Com os dados da etapa de descarregamento foi calculada a microdureza Vickers e o módulo de elasticidade do material, segundo o método Oliver & Pharr<sup>73</sup>, adotado pela ISO/FDIS 14577-1 de 2002, que está integrado com o equipamento.

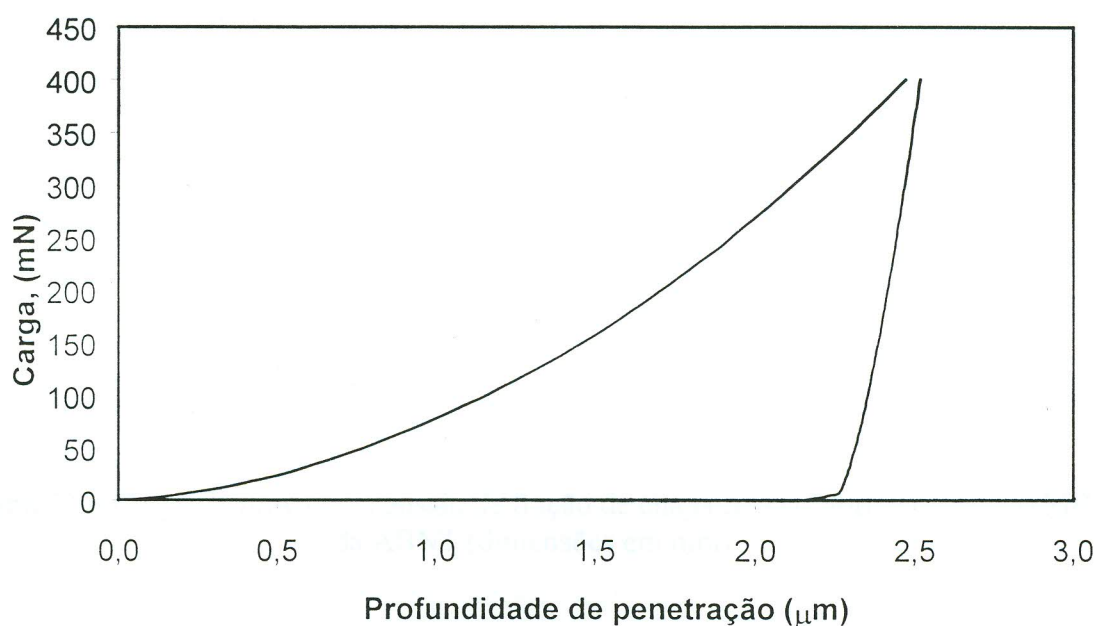


Figura 22 -- Gráfico da carga pela profundidade em uma indentação do ensaio de microdureza instrumentada.

#### 4.3.4. Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi baseado no método MB - 4 da ABNT, que indica as formas e dimensões dos corpos de prova. A chapa utilizada neste trabalho é classificada como uma chapa fina pela norma. Assim, os corpos de prova devem ter o cordão de solda transversal localizado no centro<sup>74</sup> e suas dimensões normalizadas como mostrado na Figura 23.

Em ensaio de tração de materiais soldados o único valor que deve ser considerado é a carga de ruptura, pois um material soldado é heterogêneo. Esta heterogeneidade torna imprevisível a determinação do local de ruptura, impedindo a medição da secção inicial e o cálculo da resistência à tração e da estrição do material. A determinação de qual parte do

material sofre escoamento também é duvidosa. Sabe-se também que o cordão de solda afeta o alongamento do material durante o ensaio; se não houver nenhuma irregularidade geométrica entre o cordão de solda e o metal de base, admite-se calcular o limite de resistência e a estricção com finalidades práticas.

A partir dos resultados dos ensaios de tração obtém-se um outro parâmetro que qualifica uma união: o da eficiência de solda. Este fator é definido como o quociente entre a carga de ruptura do material soldado e a carga de ruptura do material base, dado em %.

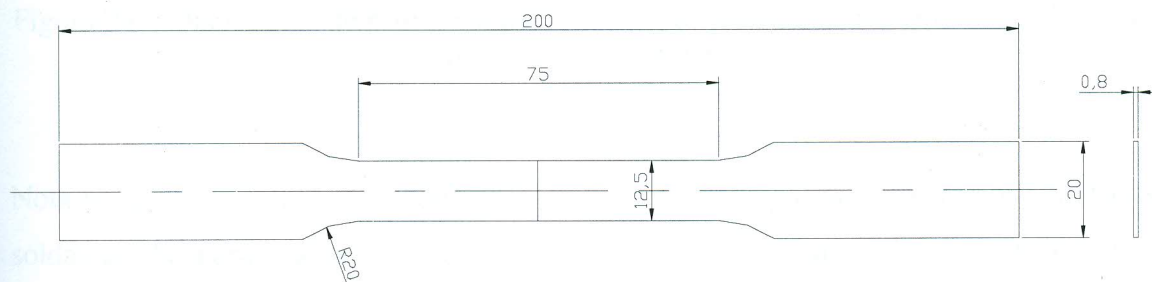


Figura 23 – Corpo de prova para ensaio de tração de chapa fina conforme o método MB-4 da ABNT (dimensões em mm).

Novas uniões foram necessárias para que fosse possível a retirada dos corpos de prova para tração nas dimensões requeridas pela norma. Assim, os materiais que estão sendo alvo deste estudo foram preparados partindo-se das mesmas chapas de 0,8 mm de espessura, porém cortadas nas dimensões de 110 mm x 80 mm. Os materiais foram unidos dois a dois, conforme a Tabela 10, em um dispositivo similar ao da Figura 17, mas de maiores dimensões conforme Figura 24. Este dispositivo tem a função de auxiliar no posicionamento, na fixação e atender os requisitos de tolerância.

A união entre os materiais foi feita por solda autógena de topo ao longo da aresta de 80 mm. Os parâmetros do laser, utilizados no experimento, foram os seguintes: energia ( $E$ ) = 4,5 J, potência média ( $P_m$ ) = 50 W, tempo de pulso ( $t_p$ ) = 7 ms e frequência de pulsos ( $f$ ) = 11 Hz. O feixe laser foi focalizado por uma lente de comprimento focal  $f = 100$  mm. O ponto focal ficou localizado a 1 mm abaixo da superfície do material.

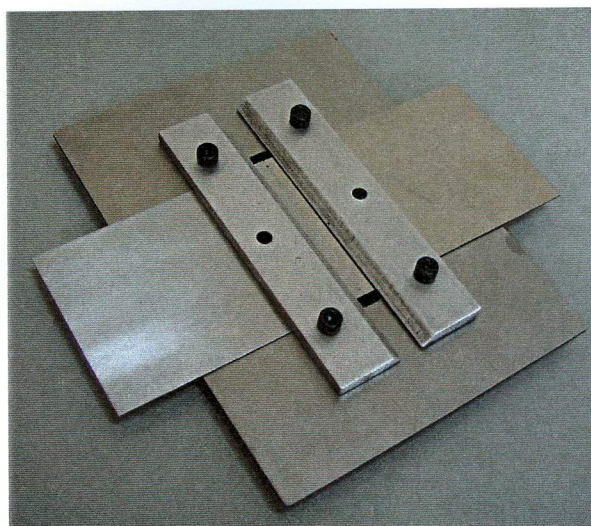
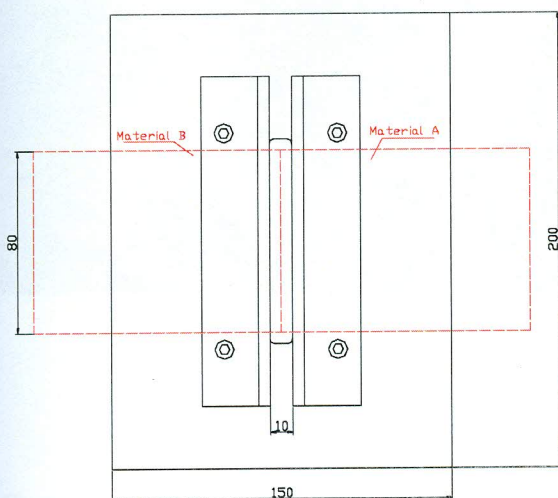


Figura 24 – Dispositivo de posicionamento e fixação para o experimento de solda laser dos corpos de prova de tração (dimensões em mm).

Nota-se que, neste caso, os parâmetros do laser não são os mesmos que os utilizados na soldas usadas para análises de microscopia e microdureza. Isto se deveu a problemas com o equipamento que, na época, reduziram a energia máxima de saída do laser. Para obtenção de uma solda equivalente às anteriores, nestas novas condições, adotamos o seguinte procedimento: a velocidade de deslocamento foi modificada para se obter a mesma taxa de sobreposição parcial; a posição focal em relação à superfície também foi modificada para se obter uma densidade de energia similar; a penetração total foi uma condição necessária e também obtida neste caso.

Assim, os cordões de solda foram realizados com velocidade de soldagem ( $v$ ) = 220 mm/min e sobreposição parcial dos pulsos também estimada em 30%. O gás de assistência utilizado para a proteção da solda foi o argônio com uma vazão de 10 l/min, soprado por um bocal com 6 mm de diâmetro, concêntrico ao feixe.

Três corpos de prova para tração foram retirados de cada união, como apresentado na Figura 25, com o cordão de solda posicionado transversalmente e no centro do corpo de prova, conforme o método MB-4 da ABNT.

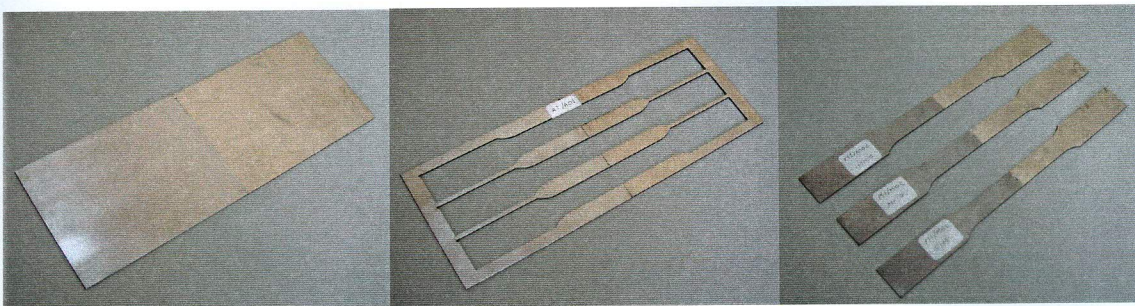


Figura 25 – Corpos de prova de tração, cortados a laser.

O ensaio de tração foi executado em uma máquina universal de ensaios, marca Instron , modelo 4400R, no Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais do IPEN, Figura 26. Os ensaios foram feitos a uma velocidade de deslocamento do cabeçote de 5 mm/min e uma taxa de amostragem de 10 pontos por segundo.

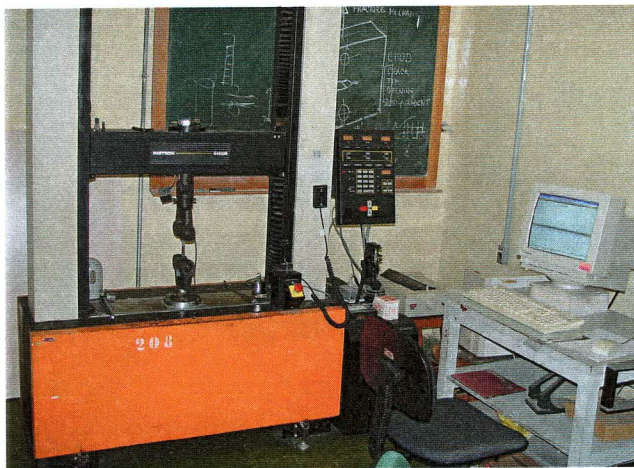


Figura 26 – Máquina de ensaio de tração

## 5. – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para expor com maior clareza, a apresentação dos resultados foi dividida em função dos materiais que compõem a união. A solda entre aços inoxidáveis, o austenítico AISI 304 e o martensítico AISI 420, é a primeira análise apresentada e discutida. Em seguida temos a união entre o aço inoxidável austenítico AISI 304 e a liga de níquel Inconel 600. Por último são apresentados os resultados do procedimento de soldagem entre o aço inoxidável martensítico AISI 420 e a liga de níquel Inconel 600.

### 5.1. Soldagem entre os Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 420

#### 5.1.1. Microscopia e distribuição em % peso dos principais elementos

Inicialmente foram realizadas análises por microscopia ótica (MO) nas soldas laser. Estas soldas foram autógenas, efetuadas em passe único, com a utilização da técnica de soldagem por “keyhole”. Nas seções transversais dos cordões de solda, apresentadas desde a Figura 27 até a Figura 31, observa-se que a variação do posicionamento do feixe não influencia a geometria do cordão, o qual é sempre típico de soldagem por “keyhole”.

Todas as condições de soldagem apresentam uma união uniforme, isentas de trincas na zona de fusão e também na zona termicamente afetada. Poros na zona de fusão, que são gerados por colapso do “keyhole” durante a solda, também não são observados. As dimensões da largura do cordão apresentaram valores médios de 1 mm na superfície e de 0,45 mm na raiz. Com estas dimensões de cordão, fica claro que qualquer variação no processo de soldagem pode comprometer a união entre os materiais. Este comprometimento pode ocorrer, inclusive, quando se usa o feixe laser com deslocamento de 0,2 mm em relação à junta.

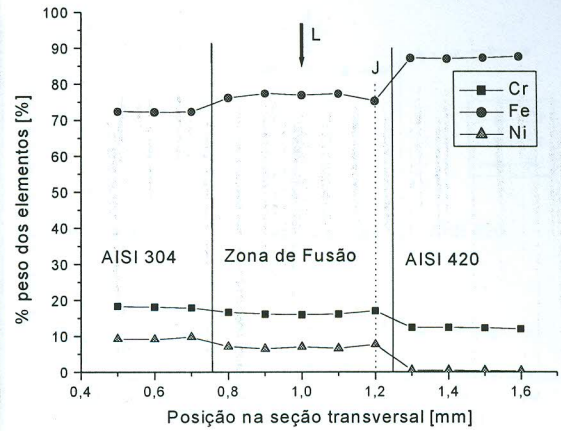
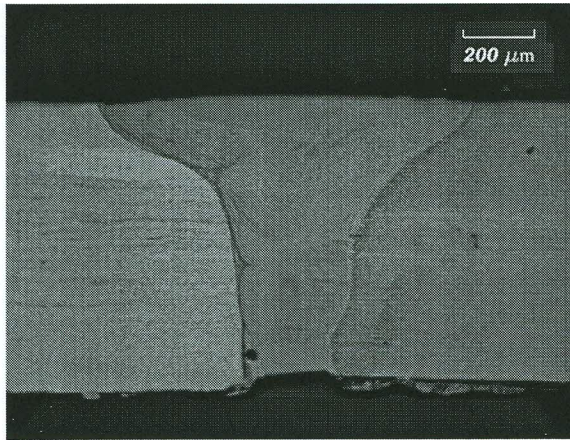


Figura 27 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/A02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

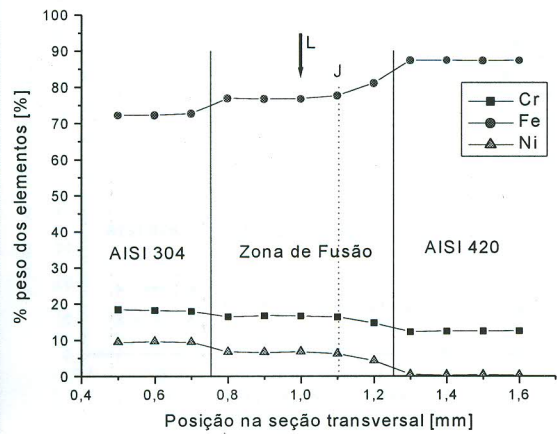
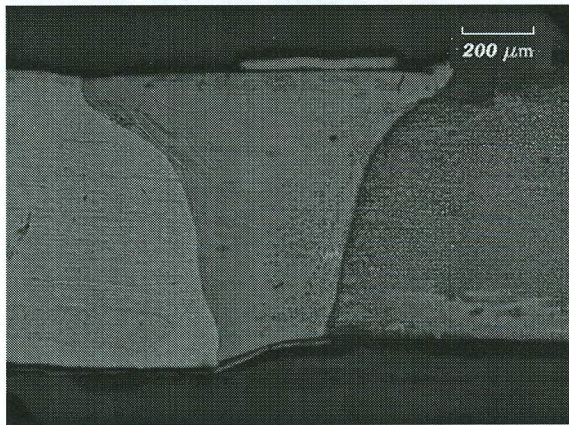


Figura 28 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/A01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

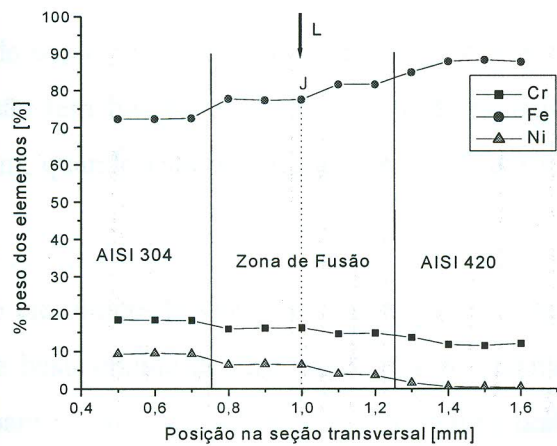
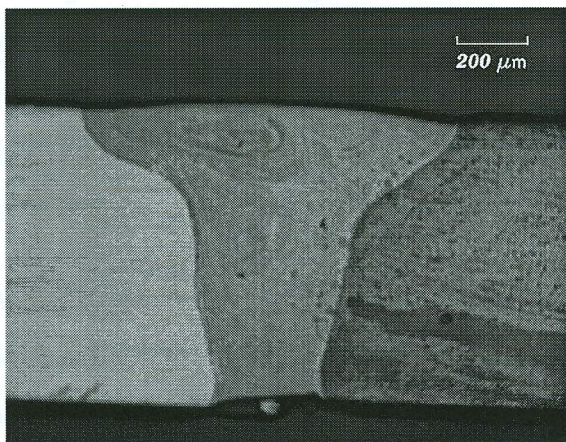


Figura 29 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/J. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

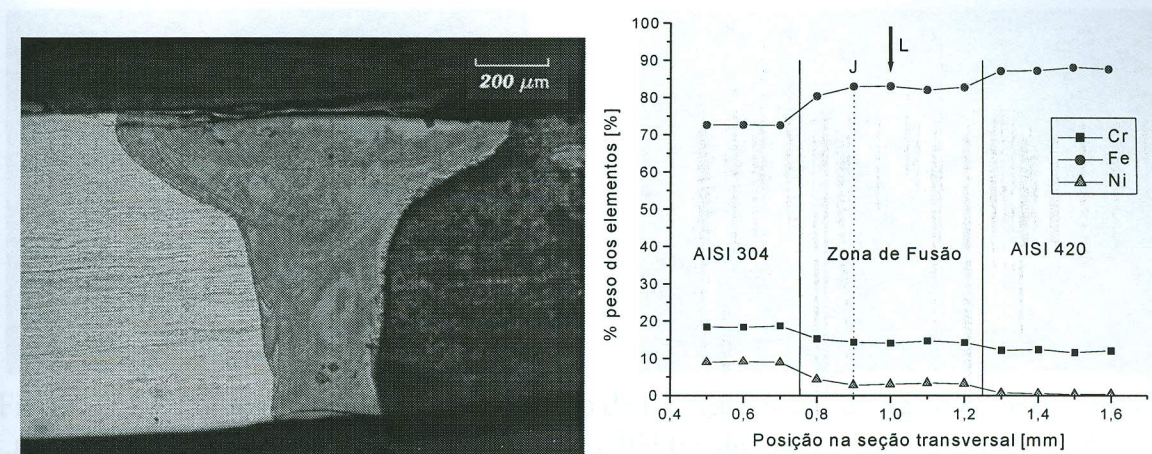


Figura 30 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/M01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

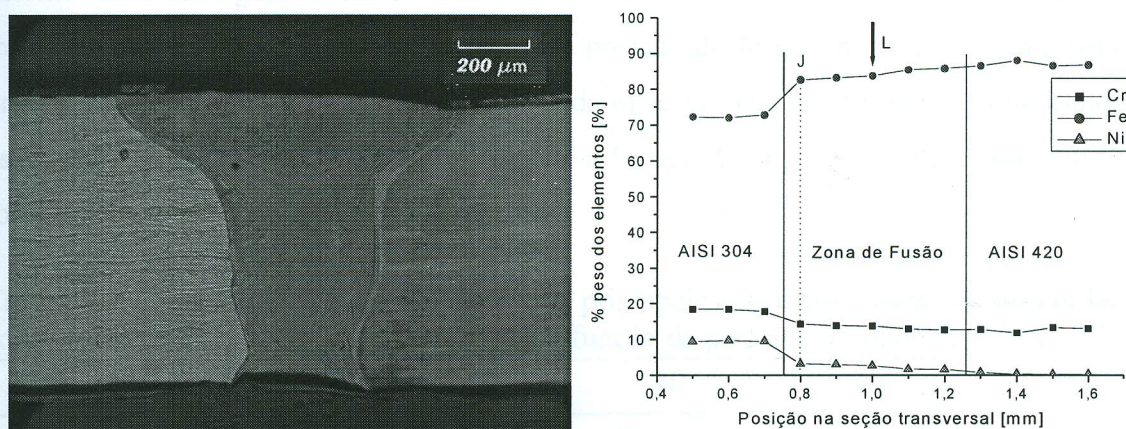


Figura 31 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/M02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

Na Figura 27 e até a Figura 31 também são apresentadas a distribuição em % peso dos principais elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da união. Observa-se que a distribuição dos elementos na zona de fusão tem boa homogeneidade, tanto quando o feixe está posicionado na junta, como também, quando está deslocado para qualquer lado em relação à junta.

A investigação destas uniões no microscópio eletrônico de varredura mostrou que a zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, conforme mostrada na Figura 32. Esta estrutura, que é benéfica para as propriedades mecânicas de uma união, ocorre principalmente devido à alta velocidade de resfriamento, que é uma característica típica do processo de solda laser<sup>46</sup>.

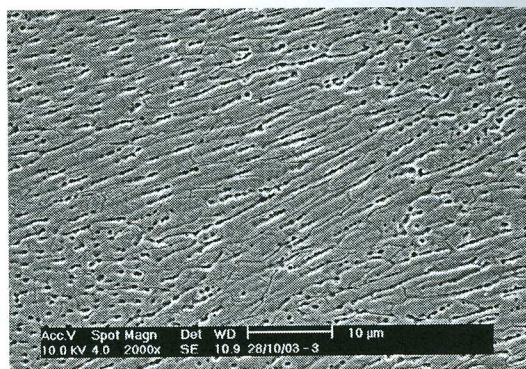
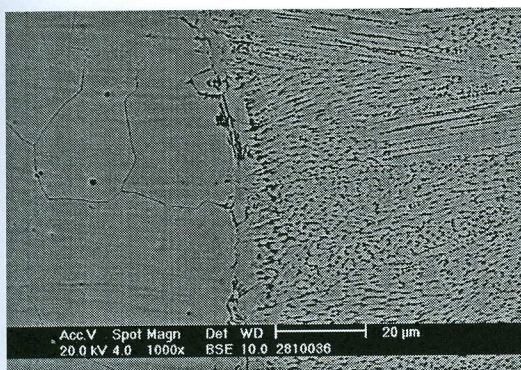


Figura 32 – Detalhes de cordão de solda típico de processo laser, da união entre o AISI 304 e o AISI 420, mostrando a ZF e ZAC do AISI 304 (esquerda) e a zona de fusão (direita).

Na investigação da seção transversal dos cordões de solda em microscopia óptica foram determinadas suas geometrias e dimensões. Assim, definiu-se uma área média da seção transversal destes cordões. Com esta área e a posição do feixe em relação à junta pode-se prever qual a porcentagem volumétrica de cada material na zona de fusão. Conhecendo-se estes valores construiu-se a Tabela 11, e que a % peso dos principais elementos químicos foi estimada.

Tabela 11 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos no cordão de solda laser dos aços AISI 304 x AISI 420 em função da posição do feixe em relação à junta

	AISI 304	AISI420	Ni	Cr	Fe
	(% vol. na ZF)	(% vol. na ZF)	(% peso)	(% peso)	(% peso)
AISI 304			8,9	18,4	72,7
AISI 420			0,13	13,0	86,87
AM/A02	0,846	0,154	7,55	17,57	74,88
AM/AO1	0,673	0,327	6,03	16,63	77,33
AM/J	0,5	0,5	4,52	15,70	79,78
AM/M01	0,327	0,673	3,00	14,77	82,23
AM/M02	0,154	0,846	1,48	13,83	84,69

Na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) obteve-se os valores da % peso dos principais elementos químicos (Ni, Cr e Fe) ao longo da seção transversal do cordão de solda laser. A Figura 33 apresenta estas variações em % peso de cada um dos principais elementos, para cada posição do feixe laser e conseqüentemente da zona de fusão em relação à junta.

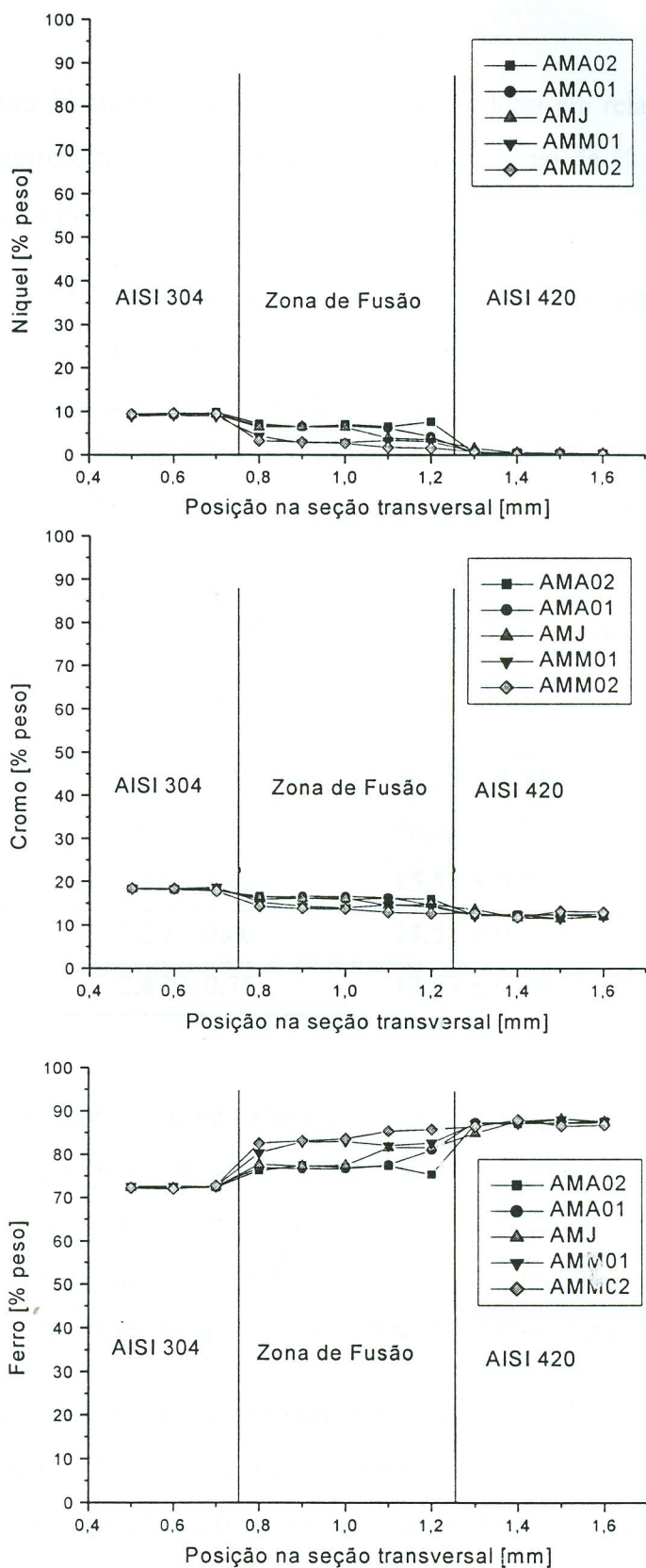


Figura 33 – Distribuição do níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para união entre AISI 304 e AISI 420.

Os gráficos da Figura 33 sugerem que a posição do feixe laser em relação à junta, quando se faz uma união entre estes aços, influenciam na distribuição de % peso dos principais elementos químicos na zona de fusão.

A homogeneidade na distribuição dos elementos ao longo da seção transversal da zona de fusão é claramente vista na Figura 33. Isto ocorre tanto quando o feixe está posicionado na junta, como também, quando está deslocado para qualquer um dos lados. Portanto, por estas medidas, podemos calcular os valores médios da % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda laser. Estes valores são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta

Amostra	Ni (% peso)	Cr (% peso)	Fe (% peso)
AM/A02	6,95 ± 0,45	16,18 ± 0,44	76,67 ± 0,88
AM/A01	6,07 ± 0,29	16,12 ± 0,18	77,80 ± 0,41
AM/J	5,33 ± 1,46	15,53 ± 0,78	79,13 ± 2,22
AM/M01	3,29 ± 0,60	14,51 ± 0,49	82,20 ± 1,07
AM/M02	2,42 ± 0,75	13,47 ± 0,66	84,11 ± 1,40

As medidas acima demonstram que a metodologia empregada para se estimar a % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda está correta. Os dados estimados e obtidos nas análises por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX), para os cordões de solda, são praticamente os mesmos. Os desvios encontrados na comparação dos valores são atribuídos às variações que ocorrem durante os procedimentos experimentais.

Como visto no capítulo Materiais, no item que trata da soldabilidade dos aços inoxidáveis, o diagrama de Schaeffler nos permite prever a microestrutura na região de solda dos aços inoxidáveis. Isto é feito, localizando-se no diagrama o ponto de equivalentes de cromo ( $Cr_{eq}$ ) e de níquel ( $Ni_{eq}$ ), calculados a partir da composição química do cordão de solda. A Tabela 13 apresenta os valores de equivalentes de cromo ( $Cr_{eq}$ ) e de níquel ( $Ni_{eq}$ ), calculados tanto para a % peso estimada como para os valores médios obtidos a partir do

espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) dos principais elementos químicos do cordão.

Tabela 13 – Valores de equivalentes de cromo ( $Cr_{eq}$ ) e de níquel ( $Ni_{eq}$ )

	Calculado		EDX	
	$Ni_{eq}$	$Cr_{eq}$	$Ni_{eq}$	$Cr_{eq}$
	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)
AISI 304	12,3	19,5		
AISI 420	5,1	15,0		
AM/A02	11,2	18,8	11,7	17,7
AM/AO1	9,9	18,0	10,5	17,6
AM/J	8,7	17,2	9,5	17,1
AM/M01	7,5	16,5	7,2	16,1
AM/M02	6,2	15,7	6,1	15,0

O diagrama de Schaeffler, mostrado na Figura 34, tem no centro uma pequena área triangular, onde a ferrita e austenita são as estruturas esperadas. Esta área, como já mencionado, define a região que fornece uma solda de boa qualidade e isenta de defeitos. As outras regiões anotadas no gráfico com os números de 1 a 4, ao contrário, são áreas típicas de ocorrência de problemas na soldagem de aços inoxidáveis.

Os pontos ( $Cr_{eq}$ ,  $Ni_{eq}$ ) do cordão de solda laser, oriundos tanto da % peso estimada como medida, mostrados na Tabela 13, foram colocados no diagrama de Schaeffler. Nota-se que os pontos da % peso estimados estão sobre o segmento de reta da união dos pontos ( $Cr_{eq}$ ,  $Ni_{eq}$ ) dos materiais de base, como esperado em aplicações em que os materiais são dissimilares.

Com os pontos colocados no diagrama de Schaeffler fica claro que o posicionamento do feixe laser na junta ou deslocado no sentido do aço AISI 304 fornece uma união de excelente qualidade. Por outro lado, vemos também que, quando a soldagem for executada com o feixe laser deslocado no sentido do aço AISI 420, é prevista a formação de uma estrutura martensítica, a qual pode causar fragilização e fissuras no cordão de solda.

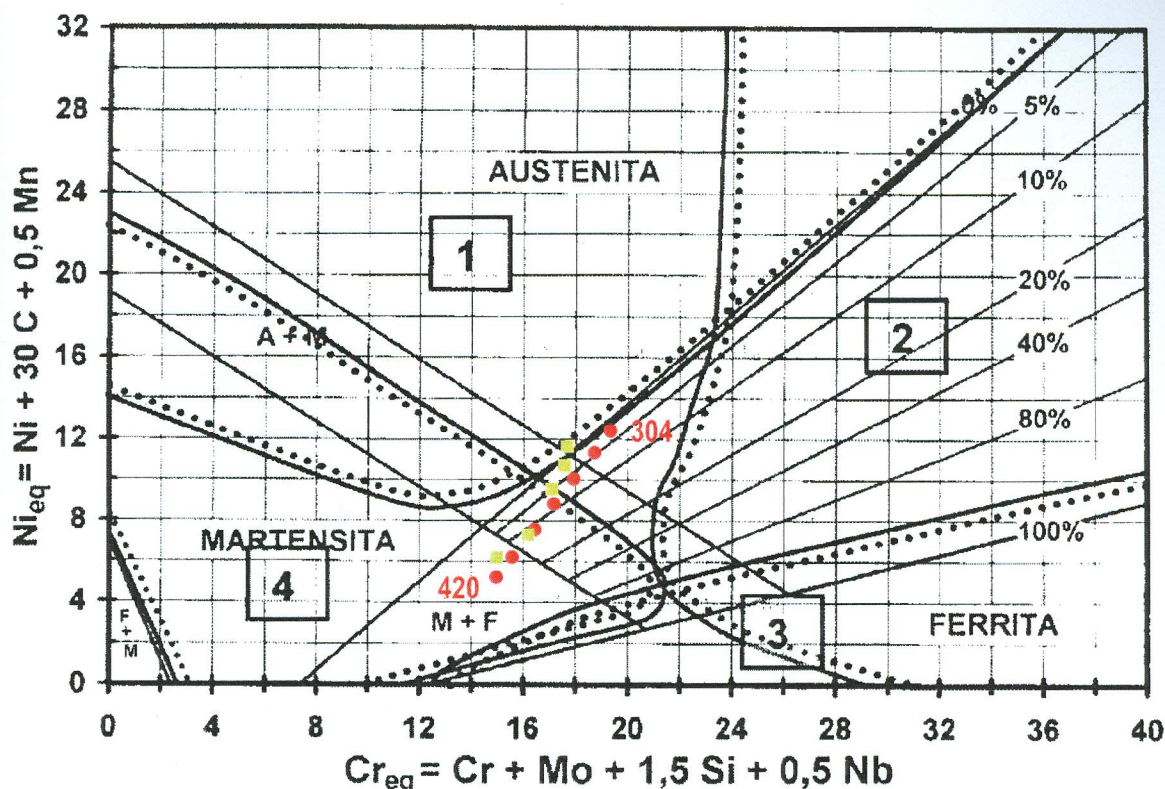


Figura 34 – Diagrama de Schaeffler mostrando os pontos dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser, [●] previstos e [■] medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta.

### 5.1.2. Ensaios de Microdureza Vickers

Ao longo das seções transversais dos cordões de solda também foram executados ensaios de microdureza Vickers. Estas medidas foram feitas com uma carga de 40 gramas ao longo de uma linha paralela à superfície, e situada a uma profundidade de 0,3 mm, com metodologia de posicionamento similar àquela da análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX). Na Figura 35 são apresentados os perfis de microdureza obtidos desta maneira.

Observa-se então, que o valor máximo de dureza localiza-se na zona termicamente afetada do aço AISI 420, ocorrendo para qualquer posição do feixe laser incidente. Este resultado era esperado, pois o aço AISI 420 é um aço inoxidável martensítico. Durante o processo de soldagem a laser, a zona termicamente afetada é submetida a um ciclo térmico com altas velocidades de resfriamento, o que propicia a formação de estrutura martensítica nesta região.

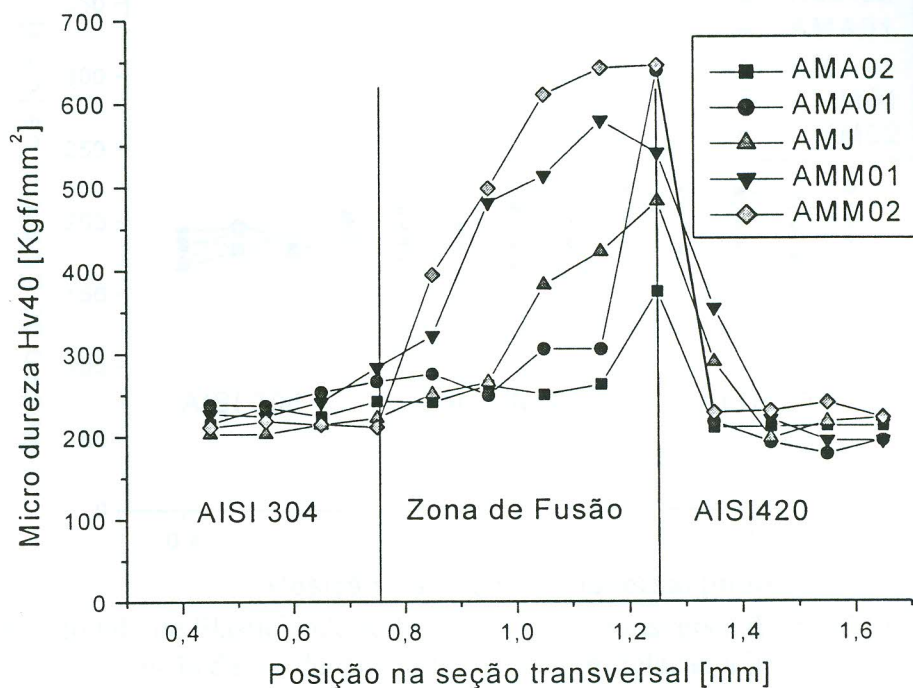


Figura 35 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, na união entre AISI 304 e AISI 420.

Observa-se que, conforme a posição do feixe laser varia, do aço AISI 420 no sentido do aço AISI 304, vai ocorrendo uma redução gradativa no perfil de dureza ao longo da seção transversal na zona de fusão. Esta variação nos perfis de dureza confirma o que foi apresentado no diagrama de Schaeffler, Figura 34. Quando o feixe está deslocado no sentido do 420, a zona de fusão contém uma grande quantidade de martensita, que vai se reduzindo até chegar a zero conforme o feixe vai caminhando para o aço AISI 304.

Os valores do módulo de elasticidade, que são obtidos no mesmo ensaio de medida de dureza, (equipamento de dureza instrumentada marca Fischer, modelo Fischerscope H100V), estão apresentados na Figura 36. Nota-se neste gráfico que os valores do módulo de elasticidade na zona de fusão estão bem próximos aos valores do módulo de elasticidade de cada material isoladamente. O aço AISI 304 tem módulo de elasticidade  $E = 193 \text{ GPa}$  e o aço AISI 420 tem  $E = 200 \text{ GPa}$ <sup>75</sup>. Isto demonstra que, aparentemente, é mantida a continuidade desta importante propriedade mecânica.

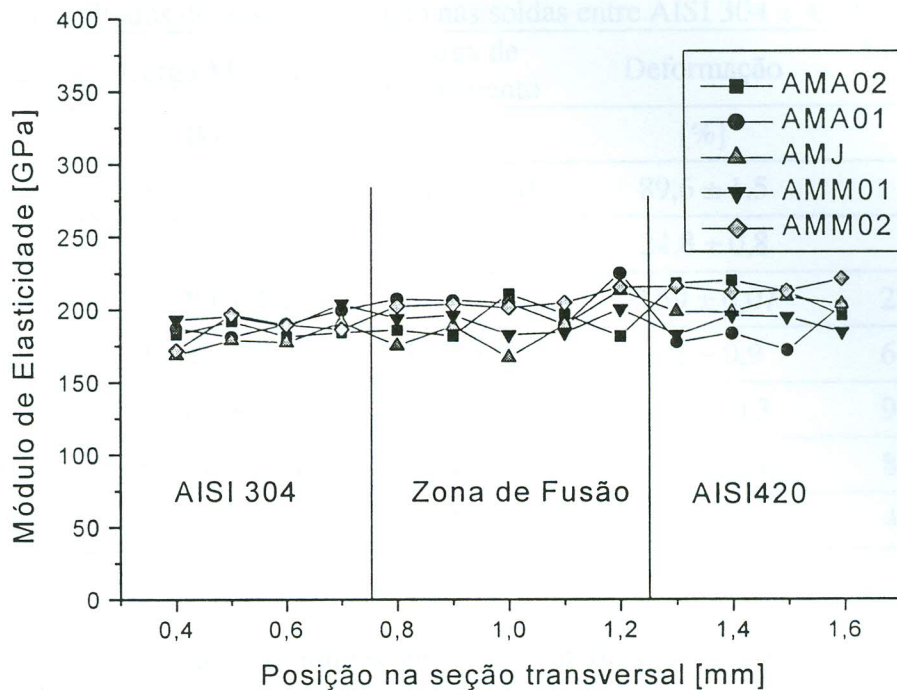


Figura 36– Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta.

### 5.1.3. Ensaio de Tração

No ensaio de tração baseado no método MB - 4 da ABNT foram medidas a carga máxima, a carga de escoamento e a deformação sofrida por cada união; os resultados são apresentados na Tabela 14. Cada união foi analisada em 3 posições diferentes, próximo ao início, ao meio e ao final do cordão de solda.

A eficiência da solda, que é o quociente entre a carga máxima que o material soldado resistiu e a carga máxima suportada pelo material de base no ensaio, em %, também é apresentada na Tabela 14. Como se trata de união entre materiais dissimilares, foi utilizado aqui o valor de carga máxima do material de base com menor resistência mecânica, ou seja, o AISI 420. Na geometria utilizada no experimento este material apresentou 679,6 kgf de carga máxima.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração nas soldas entre AISI 304 e AISI 420

Amostra	Carga Máxima	Carga de Escoamento	Deformação	Eficiência da Solda
	[kgf]	[kgf]	[%]	[%]
AISI 304	687,9 ± 1,2	281,0 ± 8,0	89,6 ± 1,5	
AISI 420	679,6 ± 2,8	428,7 ± 11,3	24,8 ± 0,8	
AMA02	152,9 ± 4,4		0,59 ± 0,07	22,5 ± 0,6
AMA01	414,8 ± 17,1	283,4 ± 2,2	6,3 ± 0,9	61,0 ± 2,5
AMJ	679,5 ± 1,9	295,3 ± 1,6	50,5 ± 0,3	99,9 ± 0,1
AMM01	598,6 ± 12,0	291,4 ± 0,4	24,3 ± 2,1	88,1 ± 1,8
AMM 02	326,5 ± 12,9	285,4 ± 0,8	2,2 ± 0,4	48,0 ± 1,9

Se levarmos em conta que as uniões entre os materiais foram feitas com solda laser autógena, temos então que a eficiência da solda poderia atingir o valor máximo de 100%. Este valor indica a perfeição na regulagem dos parâmetros de processo (e nenhuma perda de material). Na Tabela 14 observamos que a amostra AMJ (com o feixe na junta) corresponde aos parâmetros que fornecem uma eficiência máxima de soldagem. Esta eficiência fica clara na Figura 37 que apresenta a amostra que se rompeu fora da região de soldagem.

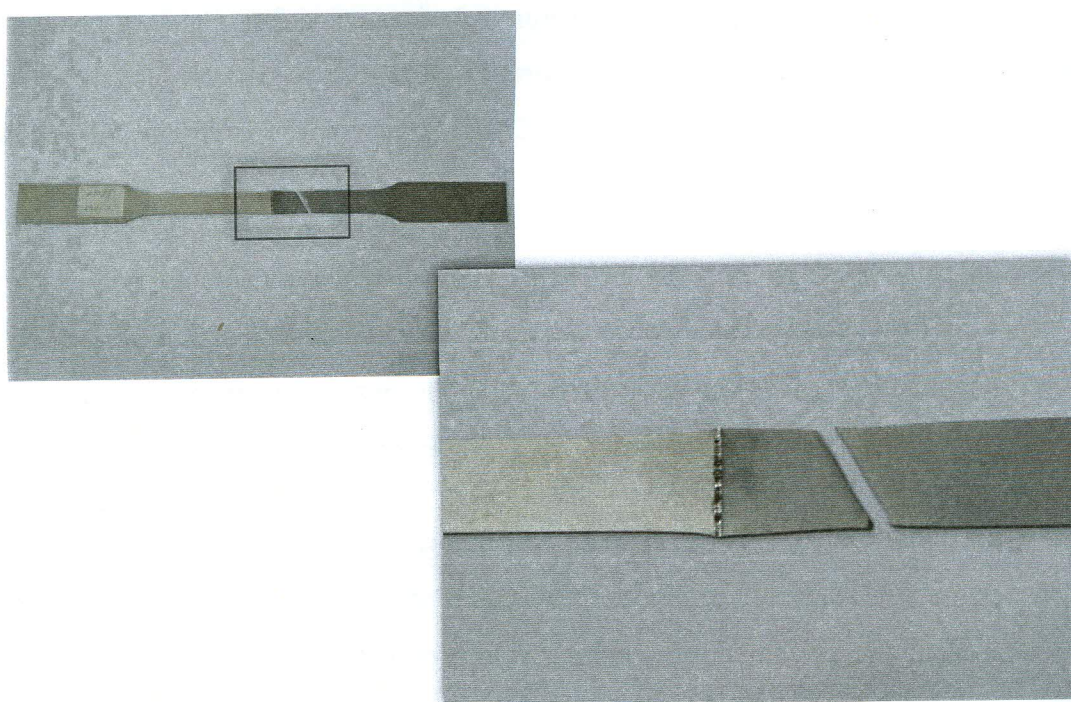


Figura 37 – Corpo de prova de tração AMJ submetido ao ensaio.

Observou-se que a solda laser introduz irregularidades mínimas entre o cordão de solda e o metal de base. Assim os problemas em ensaios de tração dos materiais soldados, tais como, corpos de prova compostos de materiais heterogêneos e a dificuldade na determinação do local de escoamento, tornam-se irrelevantes. Portanto, a carga de escoamento nos ensaios de tração também pode ser registrada (Tabela 14).

Esta tensão de escoamento foi aqui apresentada por se tratar de um parâmetro importante e de referência para cálculo de projetos de componentes mecânicos e estruturais. Nota-se que a tensão de escoamento das amostras soldadas tem valor similar à do aço AISI 304, que tem o menor valor de escoamento entre os materiais utilizados nesta união. Assim pode-se afirmar que o escoamento está se iniciando no aço AISI 304.

O critério de referência de uma boa união, neste trabalho, foi a adoção de um valor mínimo de eficiência de solda. Este valor foi definido pela relação entre a menor carga de escoamento e a carga máxima dos materiais envolvidos neste experimento, no ensaio de tração. Nesta união o quociente obtido entre a carga de escoamento do AISI 304 e a carga máxima suportada pelo aço AISI 420 foi de 42%. Este, portanto, é o valor de referência adotado.

Dos resultados apresentados na Tabela 14, verifica-se que as uniões feitas com o feixe posicionado na junta e deslocado de 0,1 mm na direção de qualquer um dos materiais, atenderam a este critério de avaliação. O critério foi atendido também quando o feixe foi deslocado 0,2 mm na direção do aço AISI 420.

O posicionamento do feixe, com deslocamento de 0,2 mm na direção do AISI 304 (AMA02), levou a uma eficiência de solda que ficou abaixo do valor mínimo de referência ( $22,5\% \pm 0,6\%$ ). Este resultado pode ter como causa as dimensões do cordão de solda gerado pelos parâmetros de laser, adotados neste trabalho, e o posicionamento do feixe, conjugados. A análise por microscopia ótica já havia indicado esta possibilidade.

As curvas de tração obtidas apresentam, como seria de se esperar, um comportamento influenciado pelos dois materiais de base. Desta maneira, as curvas dos corpos de prova soldados ficam localizadas na região compreendida entre as curvas dos materiais de base, Figura 38 até a Figura 42.

Nos gráficos do ensaio de tração pode-se observar que o comportamento, tanto dos materiais de base quanto dos materiais unidos, é similar. O módulo de elasticidade pode ser considerado o mesmo para todas as condições analisadas, confirmando o resultado fornecido pelo equipamento de dureza instrumentada apresentados na Figura 36.

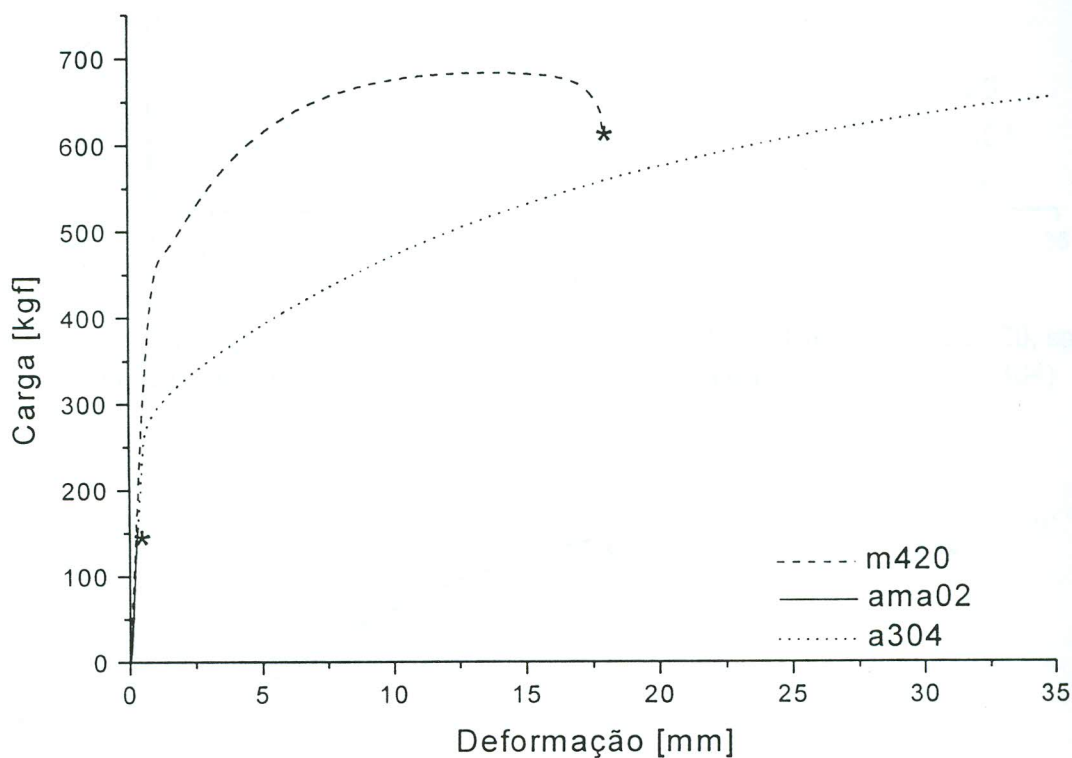


Figura 38 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMA02 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304)

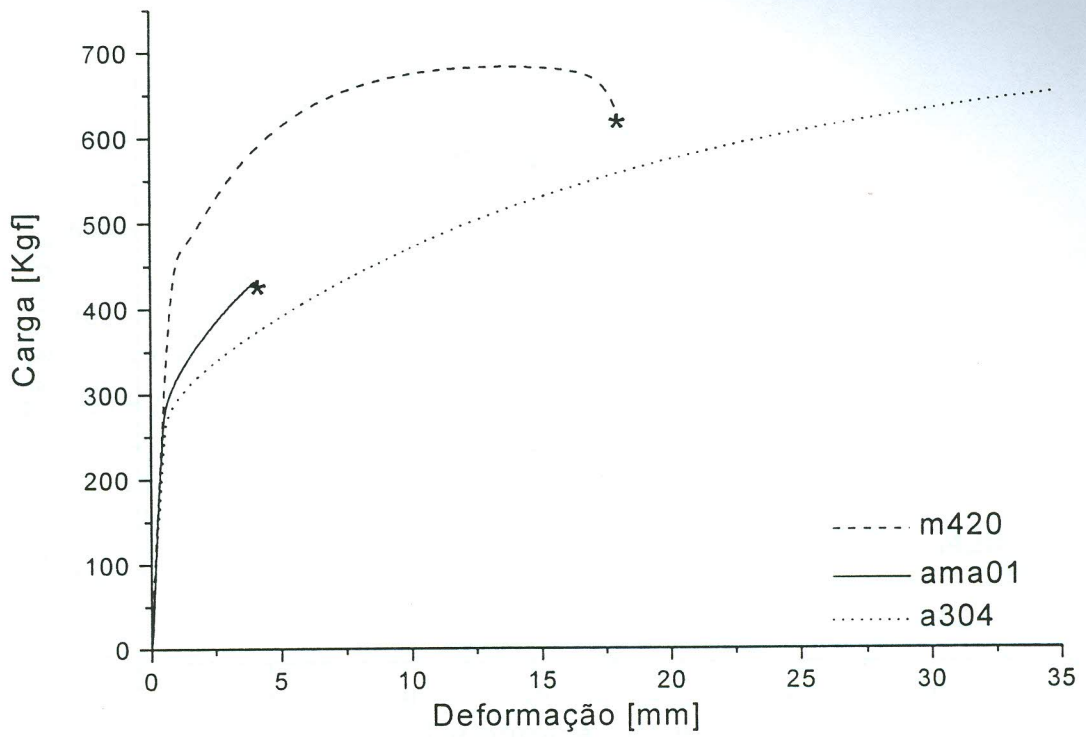


Figura 39 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMA01 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304)

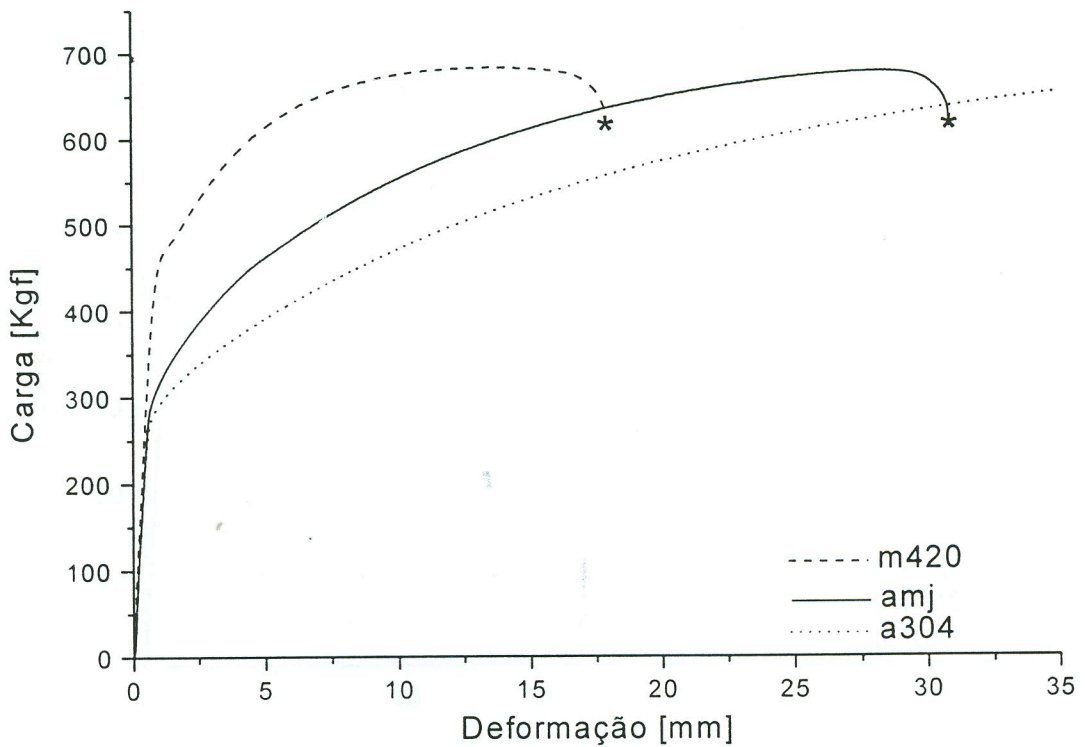


Figura 40 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMJ (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado na junta)

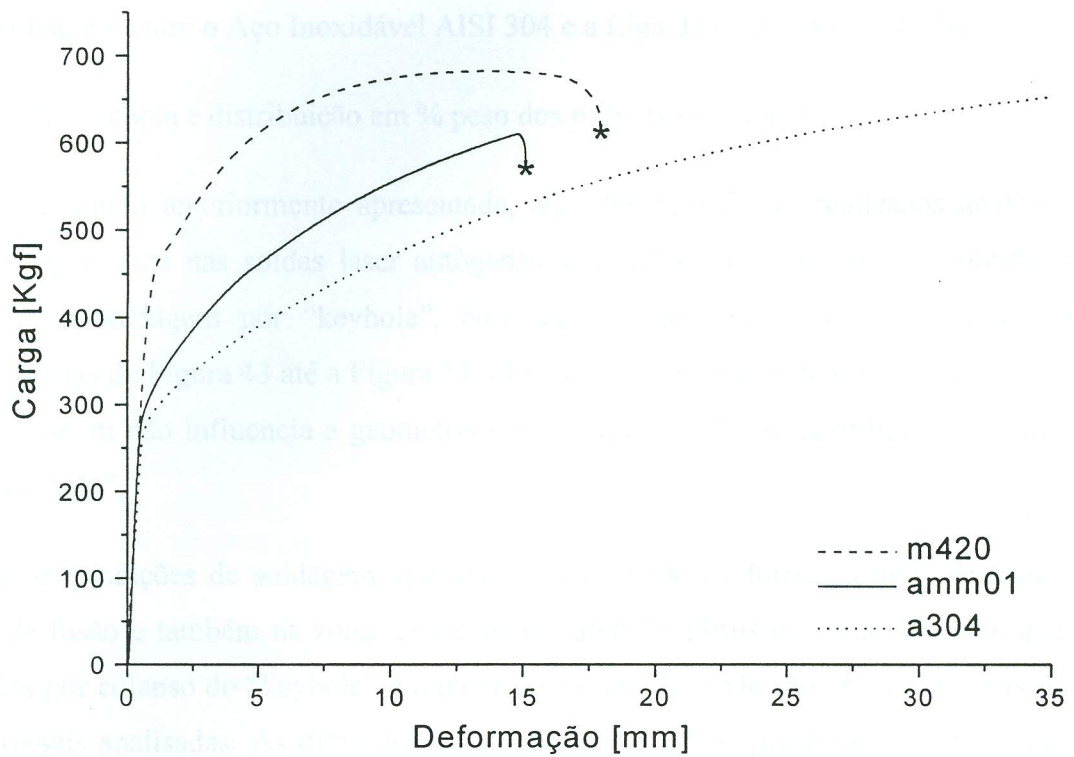


Figura 41 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMM01 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420)

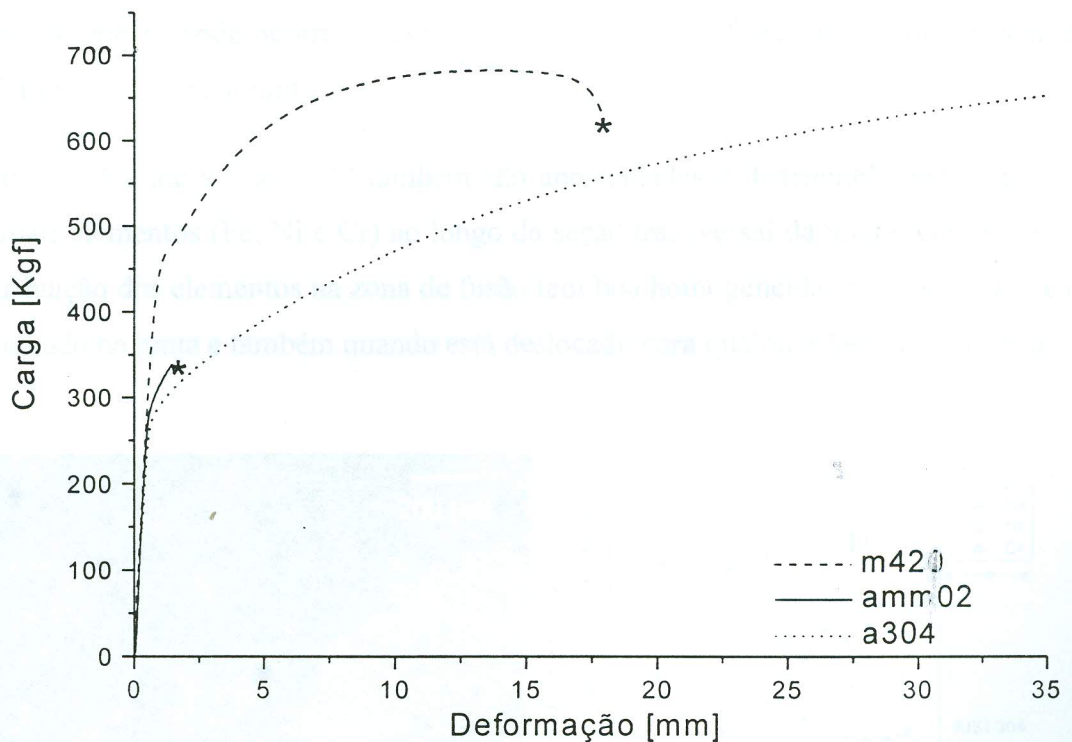


Figura 42 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AMM02 (AISI 304 e AISI 420, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420)

## 5.2. Soldagem entre o Aço Inoxidável AISI 304 e a Liga de Níquel Inconel 600.

### 5.2.1. Microscopia e distribuição em % peso dos principais elementos

Como na união anteriormente apresentada, aqui também foram realizadas análises por microscopia ótica nas soldas laser autógenas, efetuadas em passe único e obtidas pela técnica de soldagem por “keyhole”. Nas seções transversais dos cordões de solda, apresentadas da Figura 43 até a Figura 47, observa-se que a variação do posicionamento do feixe também não influencia a geometria do cordão, o qual é sempre típico de soldagem por “keyhole”.

Todas as condições de soldagem apresentam uma união uniforme, isentas de trincas na zona de fusão e também na zona termicamente afetada. Poros na zona de fusão, que são gerados por colapso do “keyhole” durante a solda, também não são observados nas seções transversais analisadas. As dimensões da largura do cordão apresentaram valores médios de 1 mm na superfície e de 0,40 mm na raiz. Com estas dimensões de cordão qualquer variação no processo de soldagem pode comprometer a união entre os materiais. Este comprometimento pode ocorrer, inclusive, quando se usa o feixe laser com deslocamento de 0,2 mm em relação à junta.

Na Figura 43 e até a Figura 47 também são apresentadas a distribuição em % peso dos principais elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da união. Observa-se que a distribuição dos elementos na zona de fusão tem boa homogeneidade quando o feixe está posicionado na junta e também quando está deslocado para qualquer lado a partir dela.

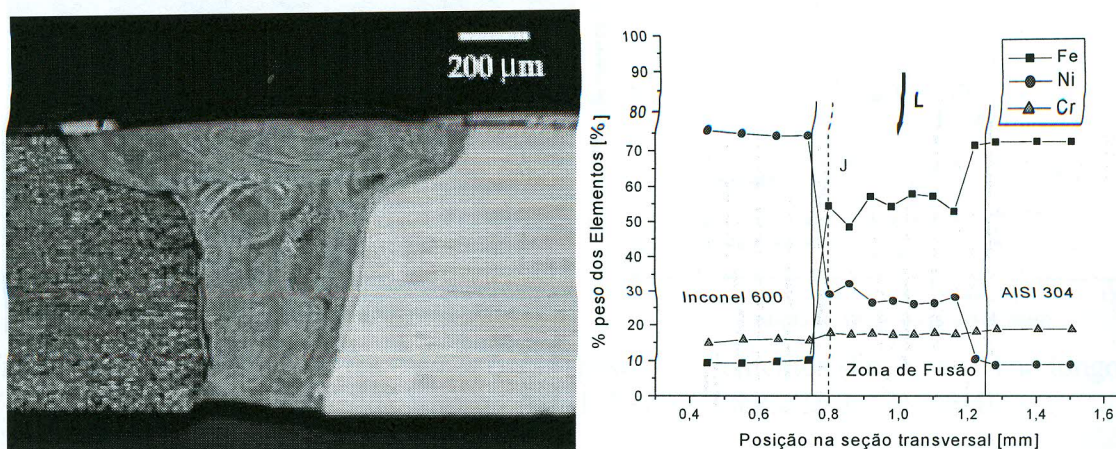


Figura 43 - Microscopia ótica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AIA02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

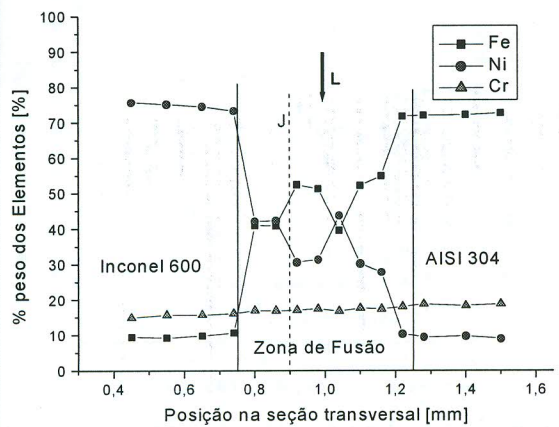
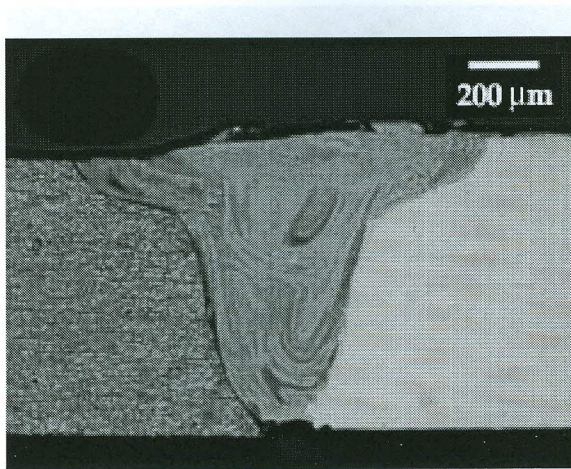


Figura 44 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AIA01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

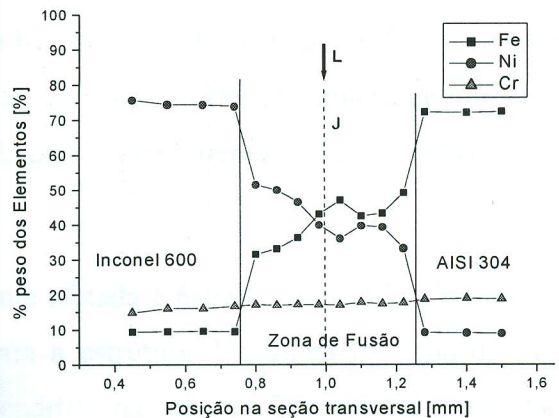
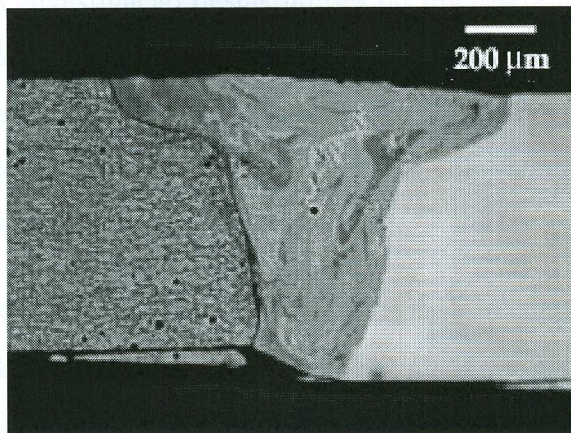


Figura 45 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AIJ. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

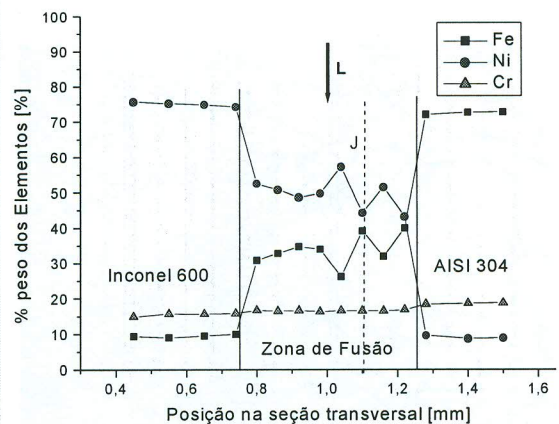
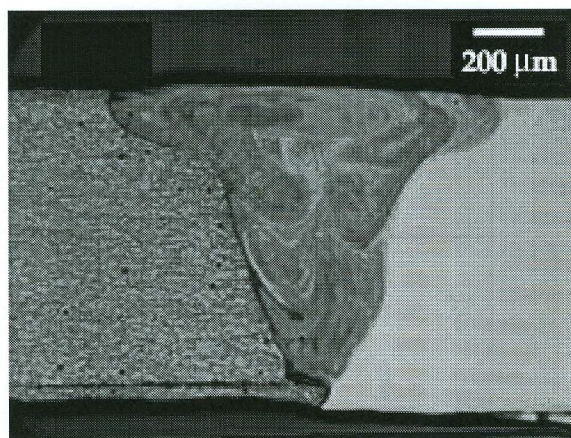


Figura 46 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AII01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

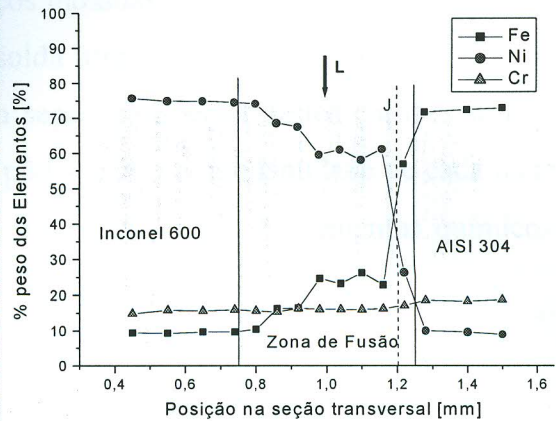
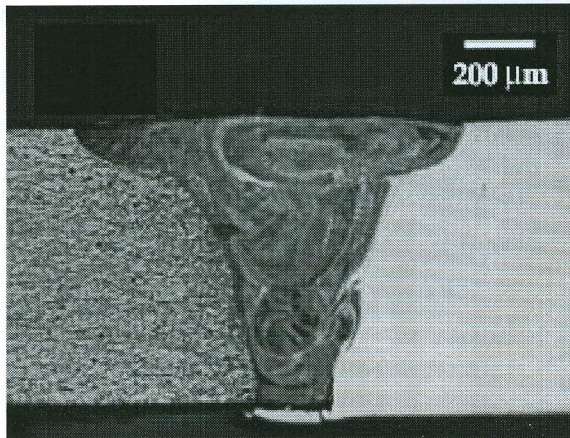


Figura 47 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AII02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

A investigação destas uniões no microscópio eletrônico de varredura mostrou que a zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, conforme mostrado na Figura 48. Esta estrutura, que é benéfica para as propriedades mecânicas de uma união, ocorre, principalmente, devido à alta velocidade de resfriamento, característica típica do processo de solda laser<sup>46</sup>.

Nota-se, na Figura 48, que a zona termicamente afetada é estreita, passando abruptamente da estrutura granular do material de base para a estrutura dendrítica na zona de fusão. Observa-se também que o crescimento das dendritas na zona de fusão segue a orientação dos grãos adjacentes do material de base.

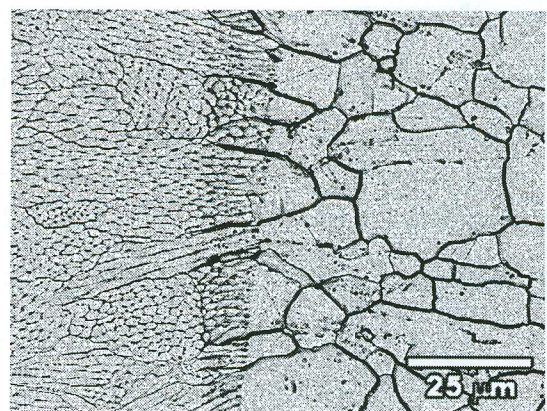
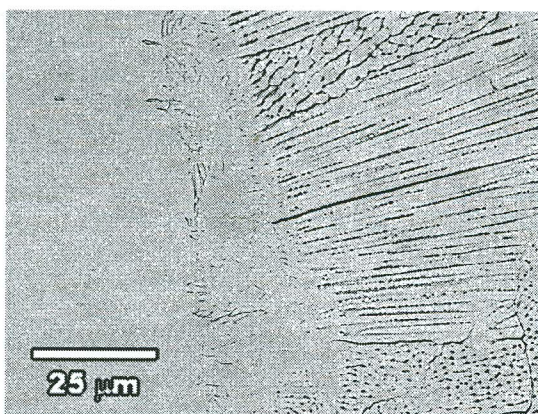


Figura 48 - Detalhes do cordão de solda típicos de processo laser da união entre o AISI 304 e o Inconel 600, mostrando a ZF e ZAC (AISI 304 à esquerda e Inconel 600 à direita).

Assim como no caso da soldagem entre os aços inoxidáveis, aqui também se determinou a geometria e as dimensões dos cordões de solda através da observação em microscopia óptica. Assim, obteve-se uma área média da seção transversal destes cordões. Com esta área e a posição do feixe em relação à junta pôde-se prever a quantidade de cada material na zona de fusão, e com isto, estimar a % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda. Estes valores estão na Tabela 15.

Tabela 15 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos do cordão de solda laser do AISI 304 x Inconel 600 em função da posição do feixe em relação à junta

	AISI 304	Inconel 600	Ni	Cr	Fe
	(% vol. na ZF)	(% vol. na ZF)	(% peso)	(% peso)	(% peso)
AISI 304			8,9	18,4	72,7
Inconel 600			75,7	14,9	9,4
AI/A02	0,846	0,154	19,19	17,86	62,95
AI/A01	0,673	0,327	30,74	17,26	52,00
AI/J	0,5	0,5	42,30	16,65	41,05
AI/I01	0,327	0,673	53,86	16,04	30,10
AI/I02	0,154	0,846	65,41	15,44	19,15

Na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) obteve-se os valores da % peso dos principais elementos químicos (Ni, Cr e Fe) ao longo da seção transversal do cordão de solda laser. A Figura 49 apresenta estas variações em % peso de cada um dos principais elementos, para cada posição do feixe laser e conseqüentemente da zona de fusão em relação à junta.

Nestes gráficos, observa-se que a posição do feixe laser em relação à junta realmente influencia a distribuição dos principais elementos químicos na zona de fusão, quando se faz uma união entre o aço AISI 304 e a liga de níquel Inconel 600.

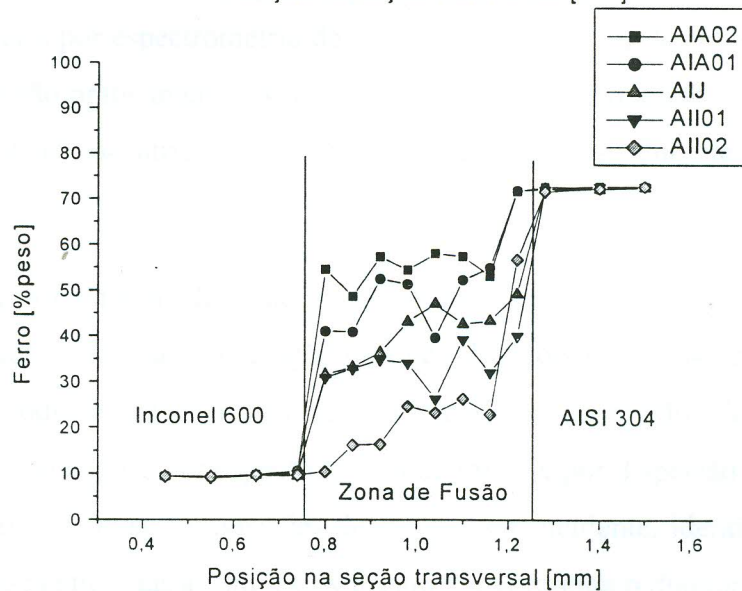
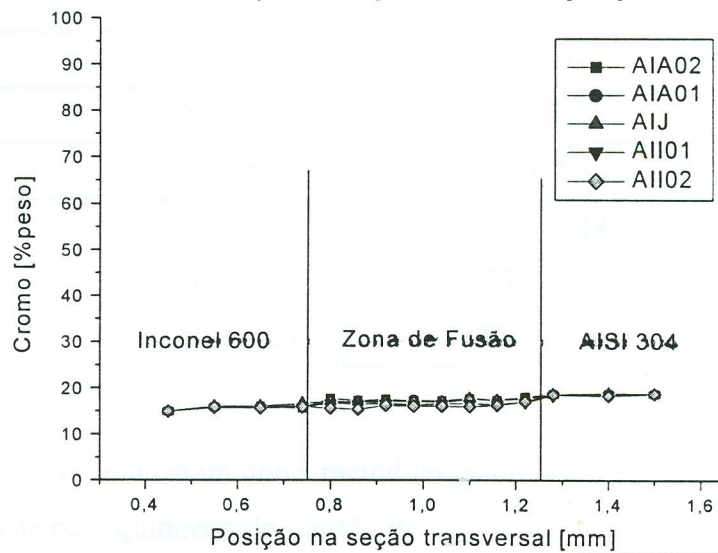
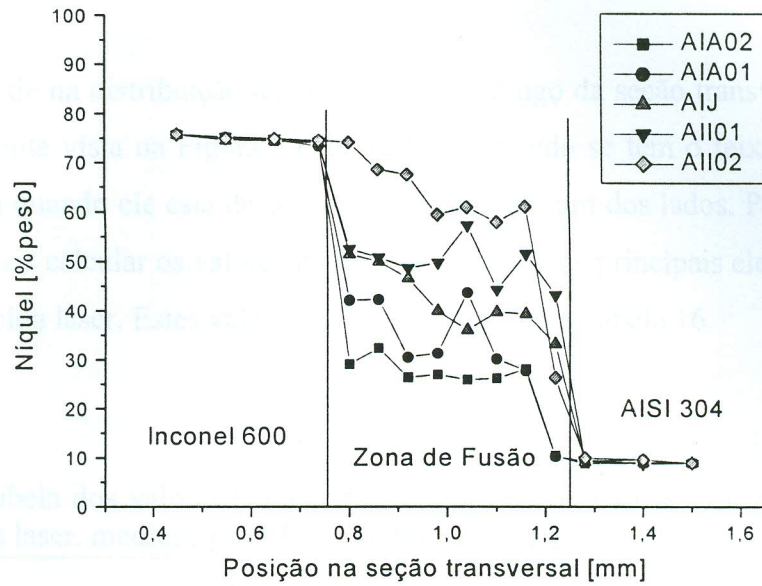


Figura 49– Distribuição dos elementos níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta da união entre AISI 304 e Inconel 600.

A homogeneidade na distribuição dos elementos ao longo da seção transversal da zona de fusão é claramente vista na Figura 49. Isto ocorre quando se tem o feixe posicionado na junta e também quando ele está deslocado para qualquer um dos lados. Portanto, por estas medidas podemos calcular os valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser. Estes valores são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta

Amostra	Ni	Cr	Fe
	(% peso)	(% peso)	(% peso)
AI/A02	27,87 ± 2,27	17,37 ± 0,22	54,73 ± 3,27
AI/A01	35,42 ± 6,92	17,12 ± 0,32	47,46 ± 6,65
AI/J	43,30 ± 5,96	17,15 ± 0,29	39,55 ± 5,87
AI/I01	50,68 ± 3,93	16,53 ± 0,12	32,79 ± 3,95
AI/I02	62,51 ± 4,38	15,95 ± 0,32	21,55 ± 4,27

As medidas da Tabela 16 mostram que a metodologia empregada para se estimar a % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda está correta. Os dados estimados e obtidos nas análises por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) para os cordões de solda são praticamente os mesmos. Os desvios encontrados na comparação dos valores aqui também são atribuídos às variações que ocorrem durante os procedimentos experimentais.

Um diagrama de fase da zona de fusão foi construído com o auxílio do programa Thermo-calc<sup>76</sup> a partir dos dados da composição química dos dois materiais envolvidos. Através deste programa pode-se prever a estrutura do material nesta região. Com o diagrama de fase e o resultado da análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) na zona de fusão para todas as posições do feixe laser incidente, identificou-se a mesma estrutura austenítica em todas as uniões. A Figura 50, apresenta o diagrama de fase da zona de fusão da união do AISI 304 com o Inconel 600, construído pelo programa Thermo-calc.

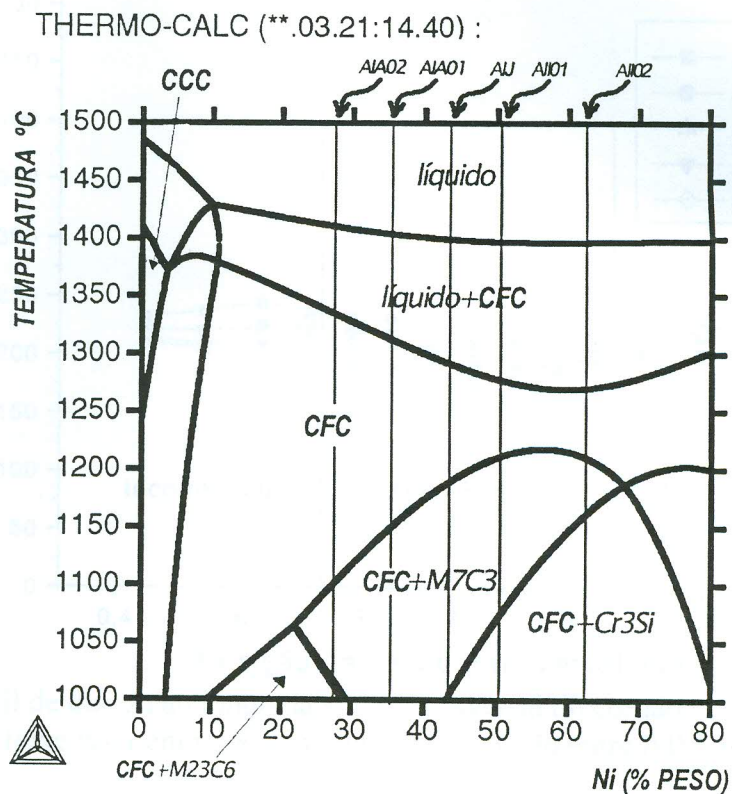


Figura 50 - Diagrama de fase da zona de fusão da união do AISI 304 com o Inconel 600, construído no Thermo-calc.

### 5.2.2. Ensaios de Microdureza Vickers

Ao longo das seções transversais dos cordões de solda também foram executados ensaios de microdureza Vickers. Estas medidas foram feitas com uma carga de 40 gramas ao longo de uma linha paralela à superfície e situada a uma profundidade de 0,3 mm, com metodologia de posicionamento similar à análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX). Na Figura 51 são apresentados os perfis de microdureza obtidos desta maneira.

Observa-se então, dos resultados de microdureza, que o posicionamento do feixe não influencia no perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda. Nota-se que os valores de dureza na zona de fusão são similares aos dos materiais de base. Este fato confirma que no cordão a estrutura formada é austenítica, como previsto no diagrama de fase.

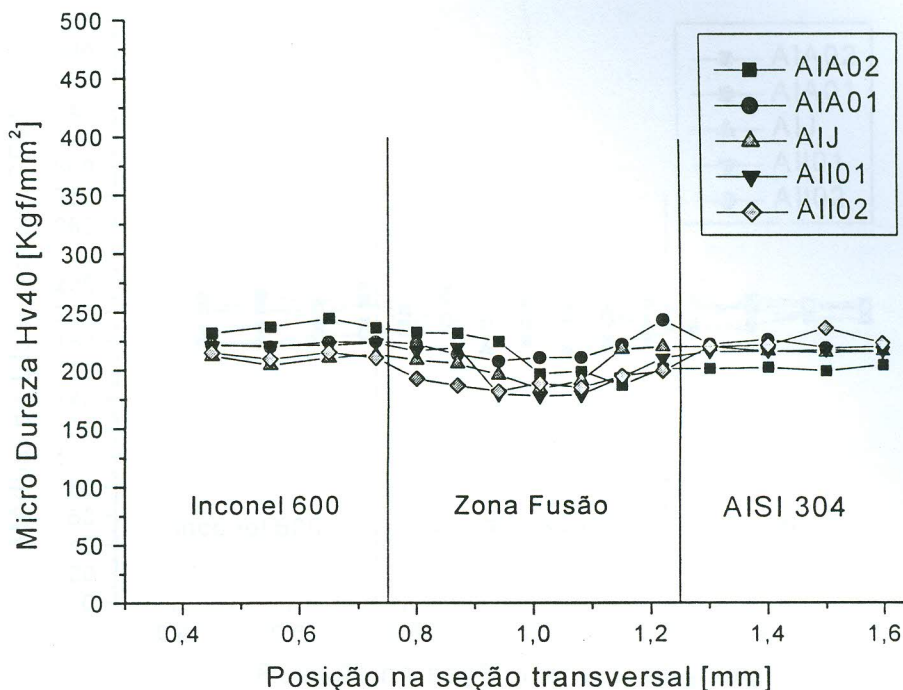


Figura 51 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para a união entre AISI 304 e Inconel 600.

Os valores do módulo de elasticidade, que são obtidos no mesmo ensaio de medida de dureza estão apresentados na Figura 52. Nesta figura observamos que, aparentemente, é mantida a continuidade desta importante propriedade mecânica. A variação nos valores do módulo de elasticidade ao longo da seção transversal manteve-se na mesma faixa de valores do módulo de elasticidade dos materiais envolvidos: o aço AISI 304 tem módulo de elasticidade  $E = 193 \text{ GPa}$  e a liga de níquel Inconel 600 tem  $E = 207 \text{ GPa}$ <sup>75</sup>.

### 5.2.3. Ensaio de Tração

Cada união foi analisada em 3 posições diferentes: próximo ao início (i), ao meio (m) e ao final (f) do cordão de solda. Como anteriormente, este ensaio seguiu o método MB - 4 da ABNT. Na Tabela 17 são apresentados os resultados de deformação, carga máxima e carga de escoamento suportada por cada união.

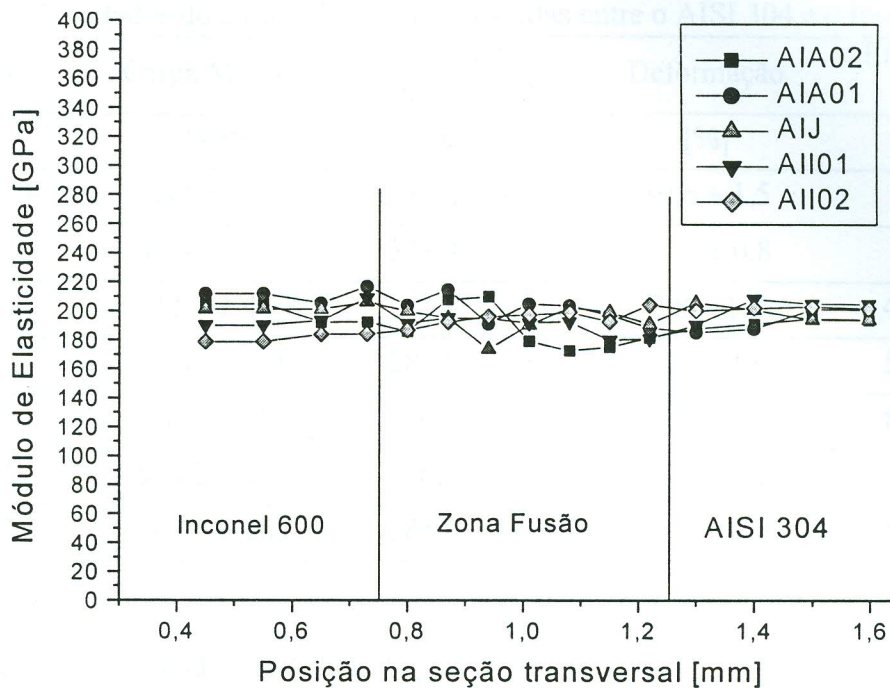


Figura 52 – Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta na união do AISI 304 x Inconel 600.

A eficiência da solda que, lembrando, é a relação entre a carga máxima suportada pelo material soldado e a carga máxima suportada pelo material de base em %, também são apresentados na Tabela 17. Como se trata de união entre materiais dissimilares, aqui foi utilizado o valor de carga máxima do material de base com menor resistência mecânica, ou seja, o AISI 304. Na geometria deste experimento, este aço suportou uma carga de 687,90 kgf.

Observa-se destes resultados, que os parâmetros utilizados na união com o feixe laser incidindo na junta - amostra AMJ, fornecem o maior valor de eficiência de soldagem.

Como no caso anterior, da união entre os aços inoxidáveis, foi empregado um critério de referência como indicativo de uma boa união. Este critério é o valor mínimo de eficiência de solda. Neste caso, este valor foi determinado pela carga de escoamento e pela carga máxima suportada pelo AISI 304, por ser o material de menor resistência mecânica. Aqui, o valor de referência foi de 41%.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de tração nas soldas entre o AISI 304 e o Inconel 600.

Amostra	Carga Máxima	Carga de Escoamento	Deformação	Eficiência da Solda
	[kgf]	[kgf]	[%]	[%]
AISI 304	687,9 ± 1,2	281,0 ± 8,0	89,6 ± 1,5	
Inconel 600	694,1 ± 0,7	329,4 ± 0,1	57,7 ± 0,8	
AIA 02	311,7 ± 46,7		2,8 ± 1,7	45,3 ± 6,8
AIA 01	408,2 ± 9,8	286,9 ± 1,5	8,0 ± 0,8	59,3 ± 1,4
AIJ	617,9 ± 7,7	296,9 ± 1,1	37,5 ± 1,5	89,8 ± 1,1
AII 01	573,2 ± 11,1	296,4 ± 0,3	28,0 ± 2,3	83,3 ± 1,6
AII 02	367,5 ± 26,6	285,0 ± 1,8	5,3 ± 1,7	53,4 ± 3,9

Dos resultados apresentados na Tabela 17, verifica-se que todas as uniões feitas entre estes materiais têm os valores de eficiência de soldagem acima do valor do critério de referência de uma boa união. O posicionamento do feixe com deslocamento de 0,2 mm, assim como no caso anterior, pode comprometer a qualidade da união, pois quando este deslocamento se deu na direção do AISI 304 a eficiência da solda ficou em 45,3 %, próxima ao valor de referência. De fato, quando levamos em conta o valor do desvio de  $\pm 6,8$  %, verificamos que este caso não pode ser considerado como uma solda com eficiência de soldagem acima do valor mínimo.

Da mesma maneira que para o caso da solda entre o AISI 304 e o AISI 420, aqui, as curvas dos corpos de prova soldados ficam localizadas na região compreendida entre as curvas dos materiais de base, Figura 53 até Figura 57.

Assim, como na soldagem entre os dois aços inoxidáveis, vemos que o comportamento tanto dos materiais de base quanto dos materiais unidos são similares. O módulo de elasticidade pode ser considerado o mesmo para todas as condições analisadas, o que confirma os resultados fornecidos pelo equipamento de dureza instrumentada, apresentados na Figura 52.

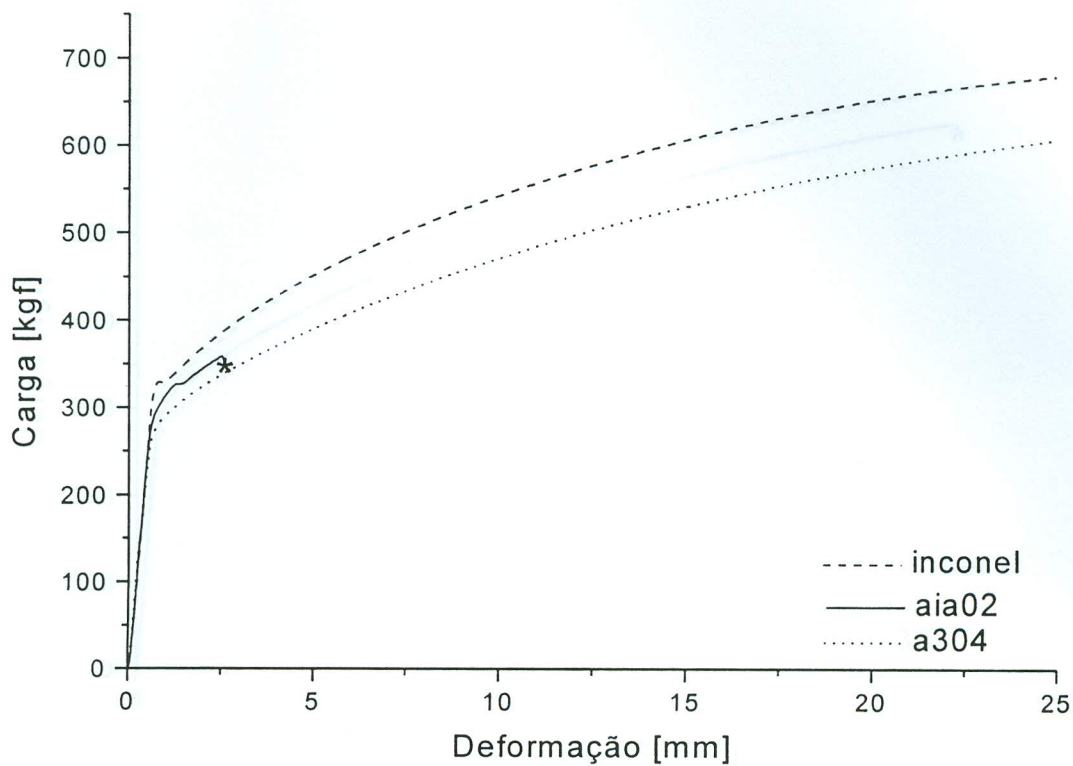


Figura 53 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AIA02 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304)

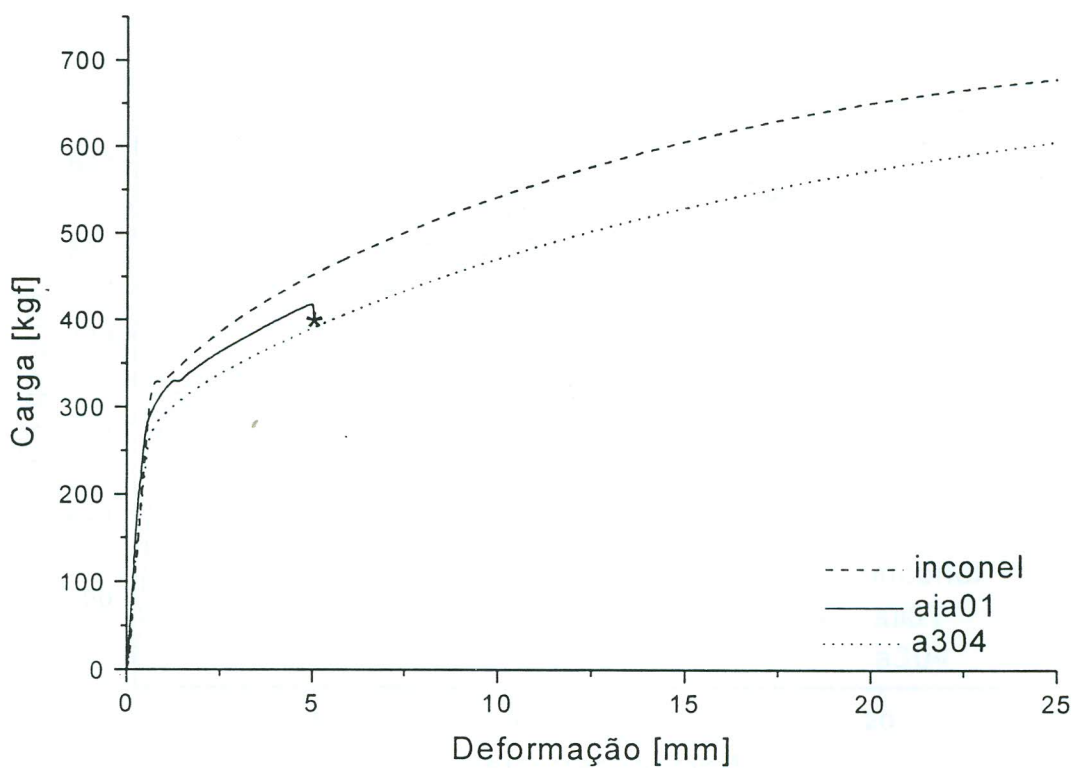


Figura 54 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AIA01 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 304)

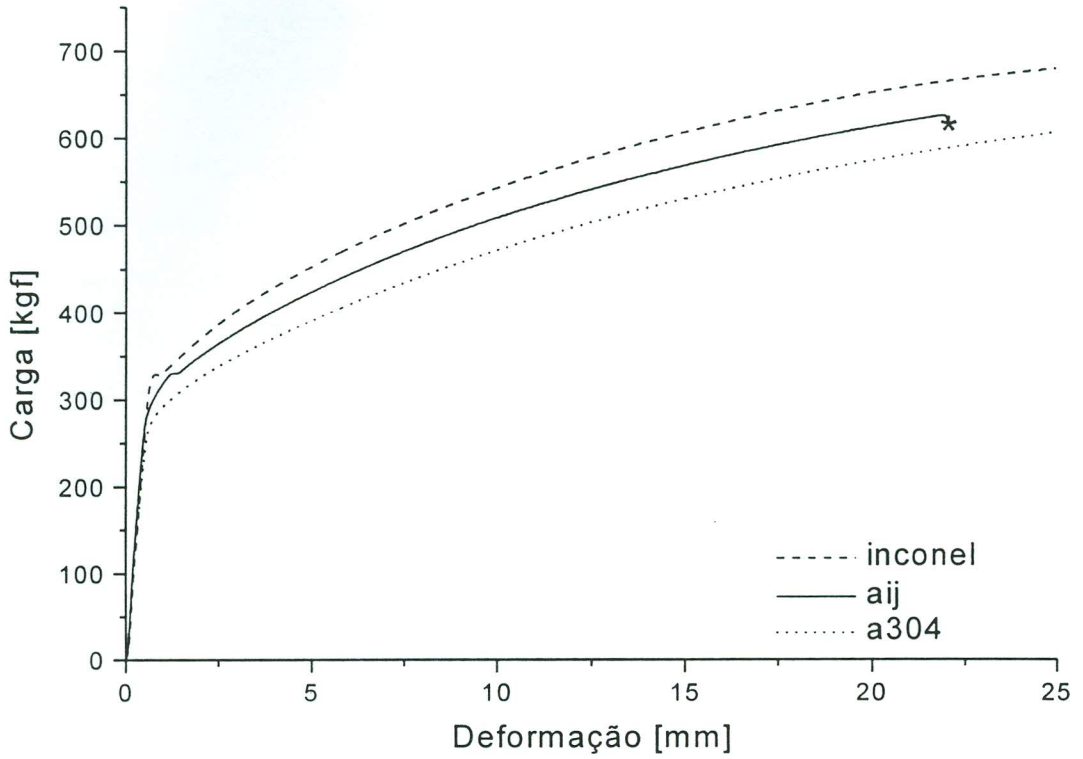


Figura 55 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AIJ (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado na junta).

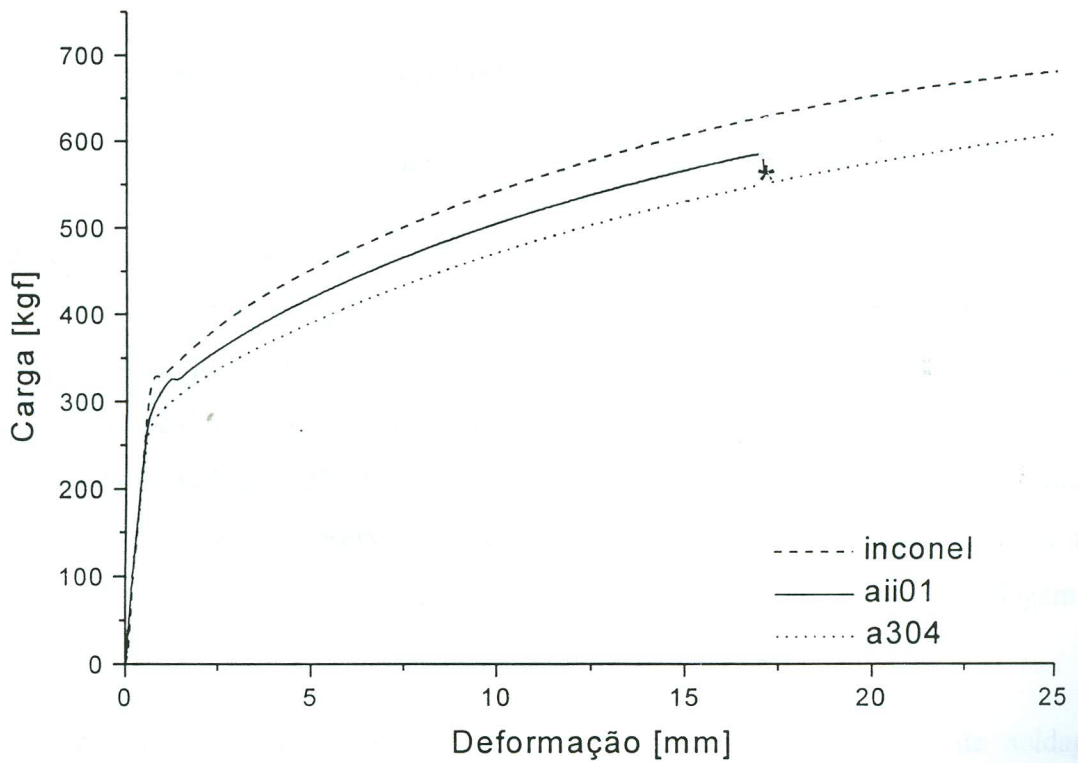


Figura 56 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AII01 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do Inconel 600).

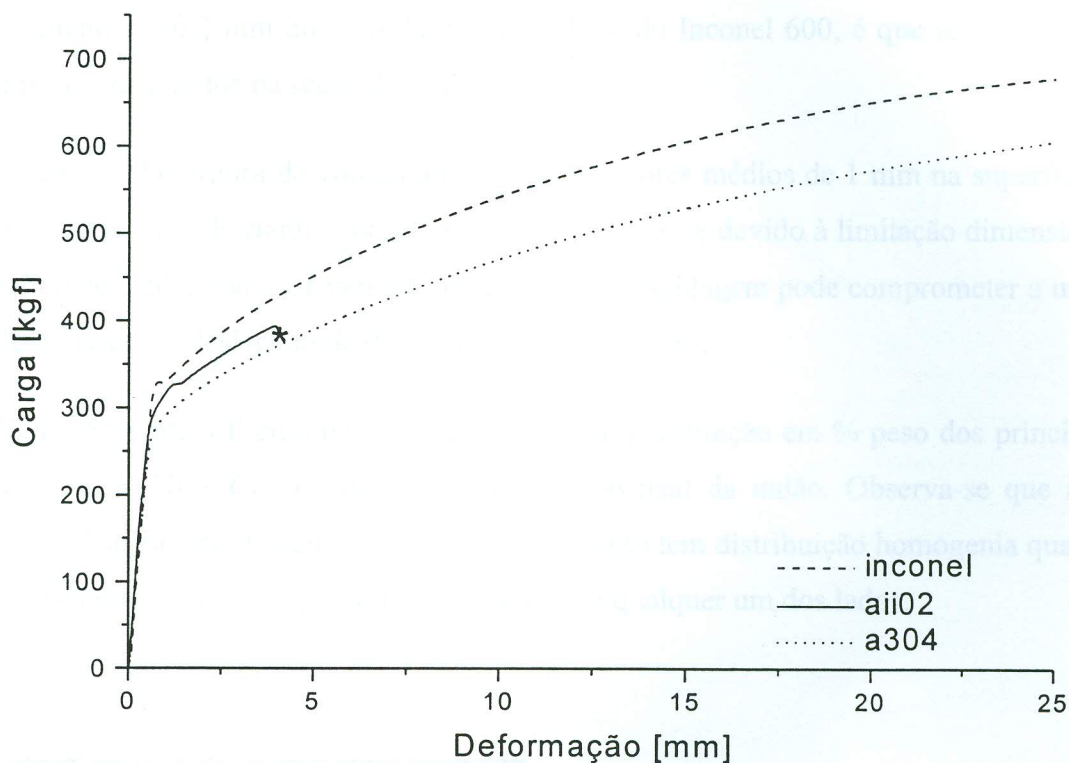


Figura 57 – Gráfico do ensaio de tração na amostra AII02 (AISI 304 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do Inconel 600).

### 5.3. Soldagem entre o Aço Inoxidável AISI 420 e a Liga de Níquel Inconel 600.

#### 5.3.1. Microscopia e distribuição em % peso dos principais elementos

Como nas uniões anteriores, aqui também foram realizados os mesmos procedimentos de análises para a solda entre o AISI 420 e o Inconel 600. Estes materiais também foram unidos por solda laser autógena, efetuada em passe único, utilizando-se a técnica de soldagem por “keyhole”. As microscopias óticas na seção transversal dos cordões de solda são apresentadas da Figura 58 até a Figura 62, sendo cada figura para um posicionamento diferente do feixe laser. Observa-se que a variação de posicionamento do feixe aqui também não influencia a geometria do cordão, que continua sendo típica de soldagem por “keyhole”.

Neste caso, diferentemente das soldas anteriores, todas as condições de soldagem apresentam trincas na zona de fusão. A ocorrência de poros, que são gerados por colapso do “keyhole” durante a solda, também são observados. Somente na amostra MII02, com

deslocamento de 0,2 mm do feixe laser para o lado do Inconel 600, é que se obteve uma solda isenta de defeitos na seção analisada.

As dimensões da largura do cordão apresentaram valores médios de 1 mm na superfície e de 0,45 mm na raiz. Portanto, como nos casos anteriores, e devido à limitação dimensional do cordão de solda, qualquer variação no processo de soldagem pode comprometer a união se o feixe laser for deslocado de 0,2 mm em relação à junta.

Na Figura 58 e até a Figura 62 são apresentadas a distribuição em % peso dos principais elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da união. Observa-se que aqui também a distribuição dos elementos na zona de fusão tem distribuição homogeneia quando o feixe está posicionado na junta ou deslocado para qualquer um dos lados.

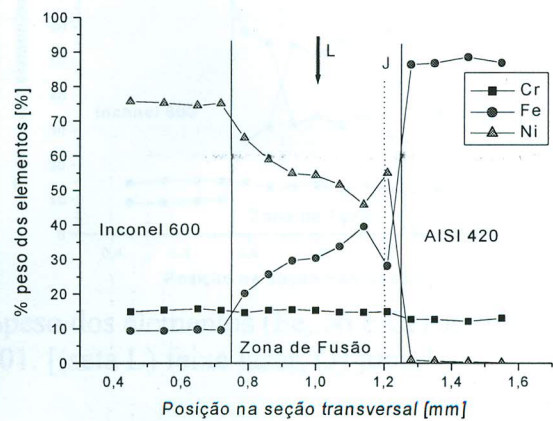
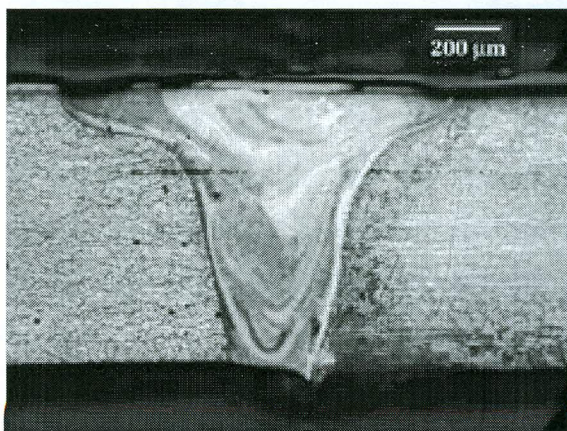


Figura 58 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MII02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

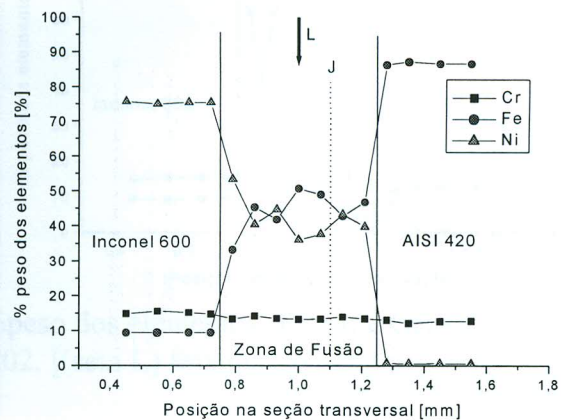
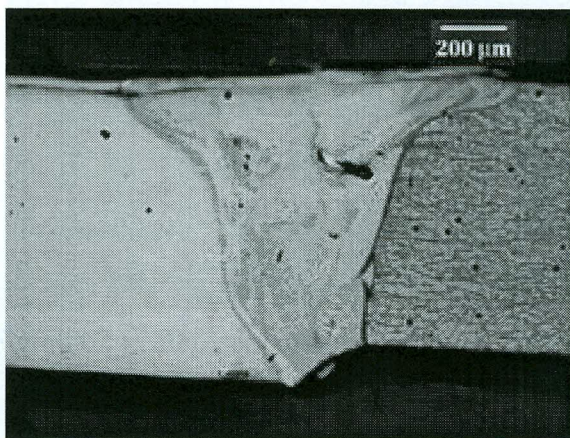


Figura 59 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MII01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

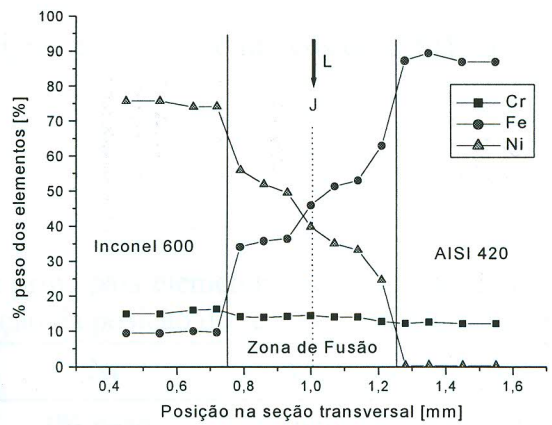
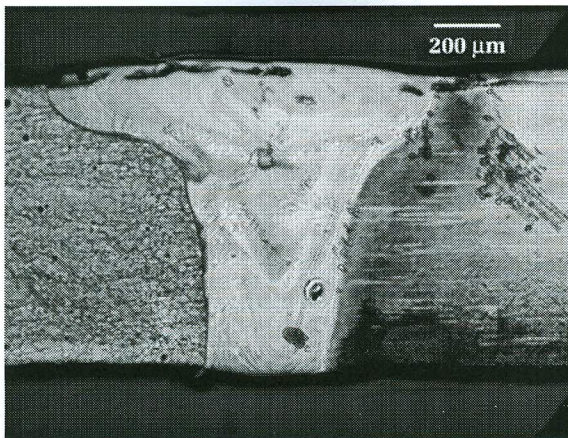


Figura 60 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MIJ. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

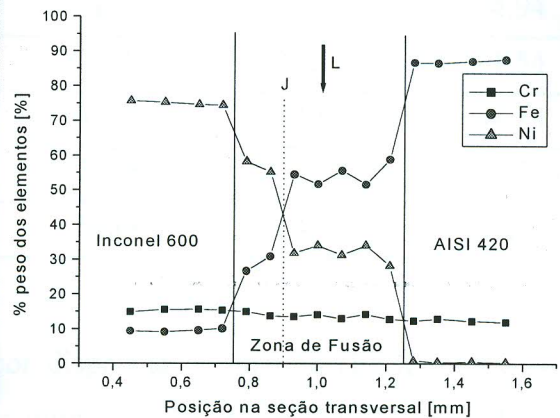
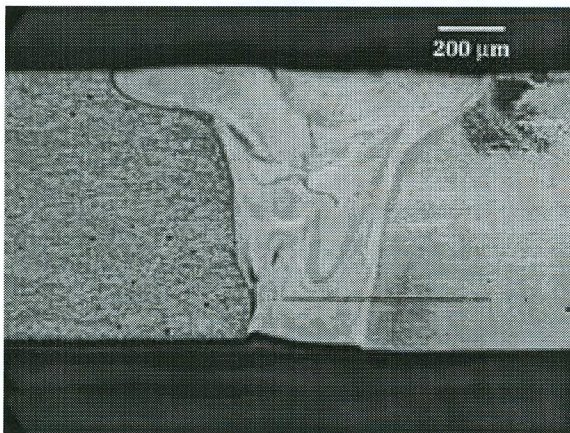


Figura 61 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MIM01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

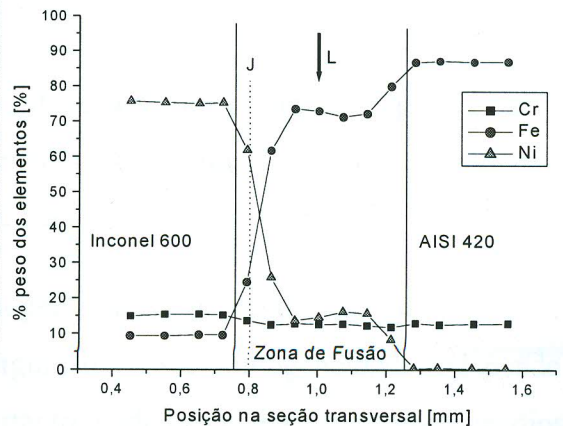
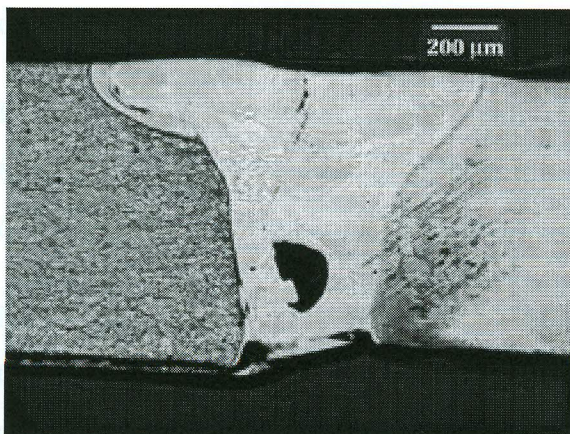


Figura 62 - Microscopia óptica e gráfico da %peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra MIM02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

Na Tabela 18 é apresentada a % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda, estimada pela área média destes cordões.

Tabela 18 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos do cordão de solda laser de AISI 420 x Inconel 600 em função da posição do feixe em relação à junta

Amostra	AISI 304	Inconel 600	Ni	Cr	Fe
	(% vol. na ZF)	(% vol. na ZF)	(% peso)	(% peso)	(% peso)
AISI 420			0,13	13,00	86,87
Inconel 600			75,70	14,90	9,40
MIM02	0,846	0,154	11,77	13,29	74,94
MIMO1	0,673	0,327	24,84	13,62	61,54
MIJ	0,500	0,500	37,92	13,95	48,13
MII01	0,327	0,673	50,99	14,28	34,73
MII02	0,154	0,846	64,06	14,61	21,33

Na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) obteve-se os valores da % peso dos principais elementos químicos (Ni, Cr e Fe) ao longo da seção transversal do cordão de solda. A Figura 63 apresenta estas variações em % peso de cada um dos principais elementos, para cada posição do feixe laser e conseqüentemente da zona de fusão em relação à junta.

Da mesma maneira que nos casos anteriores, observa-se nestes gráficos, que a posição do feixe laser em relação à junta também influencia na distribuição de porcentagem em peso dos principais elementos químicos na zona de fusão.

Novamente ocorre uma distribuição homogeneia dos elementos ao longo da seção transversal, a qual é claramente vista na Figura 63. Esta homogeneidade independe da posição do feixe laser em relação à junta. Portanto, podemos calcular os valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser analisados por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX). Estes valores, assim calculados são apresentados na Tabela 19.

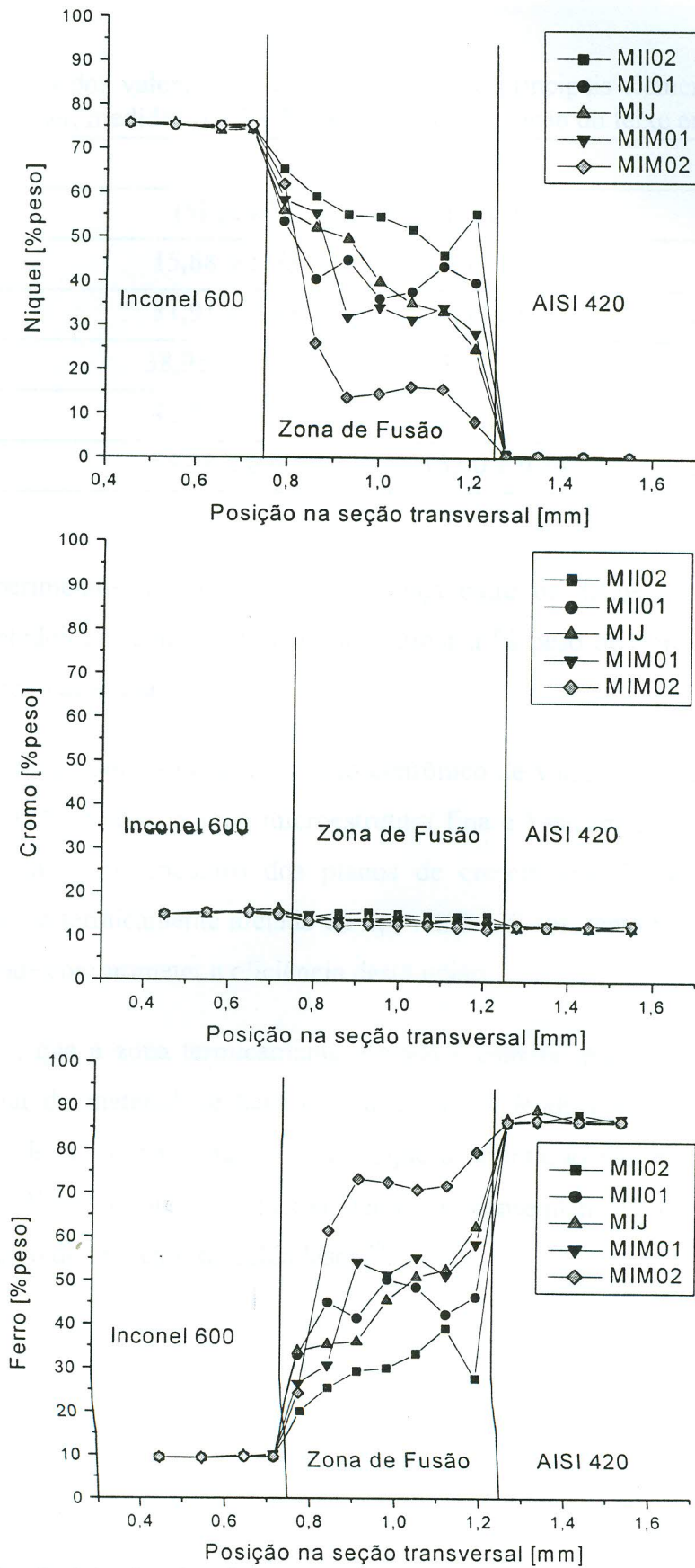


Figura 63 – Distribuição do níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para união entre Inconel 600 e AISI 420.

Tabela 19 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta

	Ni	Cr	Fe
	(% peso)	(% peso)	(% peso)
MI/M02	15,68 ± 5,73	12,42 ± 0,37	71,90 ± 5,89
MI/MO1	31,91 ± 2,43	13,57 ± 0,64	54,52 ± 3,03
MI/J	38,95 ± 10,35	13,81 ± 0,59	47,51 ± 10,41
MI/I01	42,58 ± 6,22	13,63 ± 0,39	43,79 ± 6,20
MI/I02	55,08 ± 6,00	15,00 ± 0,34	29,63 ± 6,07

Como nos experimentos anteriores, a semelhança entre os dados obtidos confirma a validade da metodologia empregada para se estimar a % peso dos principais elementos químicos do cordão de solda.

A investigação destas uniões no microscópio eletrônico de varredura, Figura 64, mostrou que a zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, com a ocorrência de trincas no encontro dos planos de crescimento dendrítico. Observa-se também que a zona termicamente afetada do aço AISI 420 apresenta uma alta quantidade de poros, que pode comprometer a eficiência desta união.

Nota-se também, que a zona termicamente afetada é estreita; passa-se abruptamente da estrutura granular do material de base para a estrutura dendrítica na zona de fusão. O crescimento das dendritas na zona de fusão segue a orientação dos grãos adjacentes do material de base. Este fato ocorre, principalmente, em consequência da alta velocidade de resfriamento, típico do processo de solda laser <sup>46</sup>.

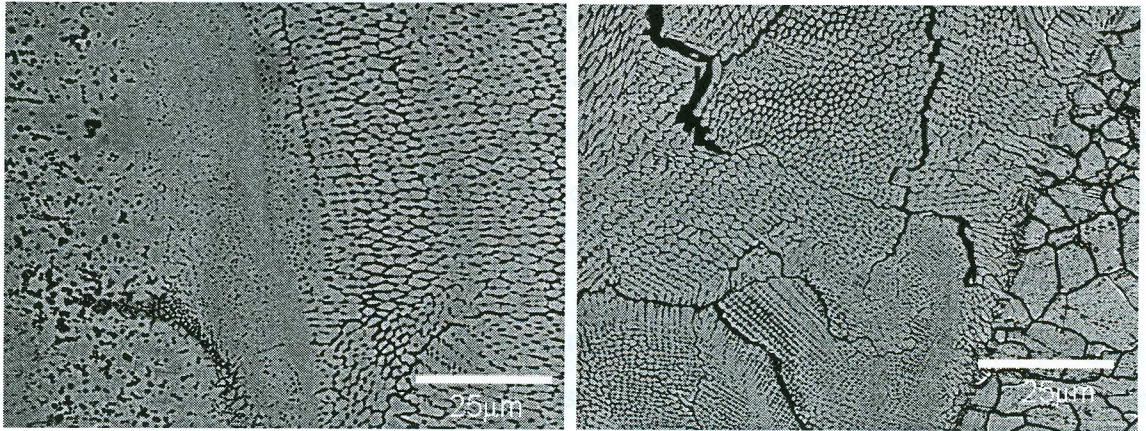


Figura 64 – Detalhes de cordão de solda típico de processo laser, da união entre o AISI 420 e o Inconel 600, mostrando a ZF e ZAC (AISI 420 à esquerda e Inconel 600 à direita)

Na tentativa de identificar a origem do trincamento no cordão de solda deste tipo de união, investigou-se a região da zona de fusão que contém trincas da amostra MIJ.

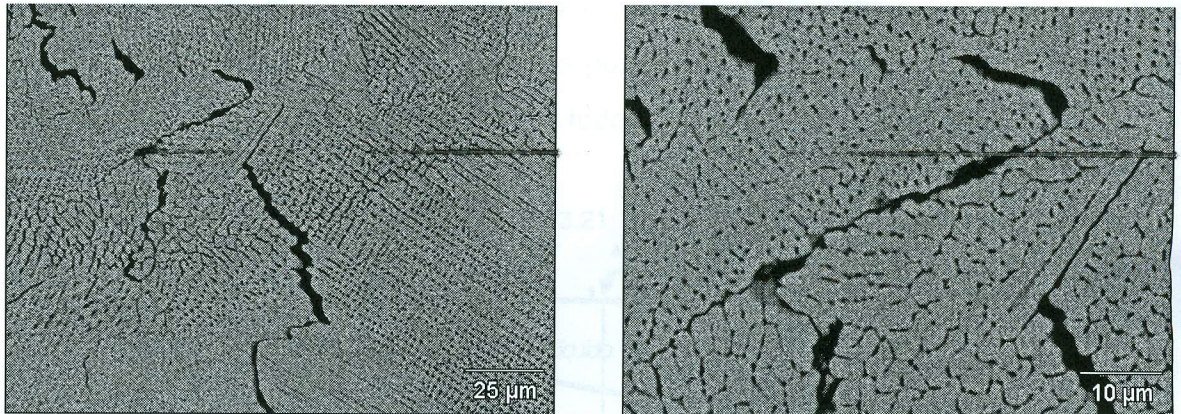


Figura 65 - Detalhe das trincas na zona de fusão da solda laser da amostra MIJ

Pode-se observar na Figura 65 que a presença de fissuras na união entre estes materiais dão indício de serem do tipo trincas a quente, pois este tipo de trinca ocorre no contorno de grão de uma estrutura austenítica.

Em materiais austeníticos o defeito de soldagem mais comum são as trincas a quente. Estas trincas ou fissuras são geradas principalmente pela presença de filmes líquidos de baixo ponto de fusão no contorno da austenita primária. Estes filmes permitem a separação dos grãos pela ação das tensões térmica e de contração e se desenvolvem durante o esfriamento e a solidificação<sup>77, 78, 79</sup>.

A alta contração é devida ao alto coeficiente de expansão térmica da austenita durante o resfriamento do cordão, que se solidifica pela austenita primária. Em altas temperaturas esta austenita não tem ductilidade suficiente para permitir o relaxamento das tensões térmicas; por isto, a tendência de formação de fissuras ou trincas durante o último estágio de solidificação<sup>77, 78</sup>.

Impurezas, como enxofre e fósforo aumentam a probabilidade de trinca a quente na solidificação da austenita primária. A baixa solubilidade destas impurezas na austenita gera uma alta segregação durante a solidificação; isto resulta na formação do filme líquido de baixo ponto de fusão e conseqüentemente em trincas na solda.

Um diagrama de fase da zona de fusão foi construído, com o auxílio do programa Thermo-calc<sup>76</sup>, com os dados da composição química dos dois materiais envolvidos para se prever a estrutura do material nesta região. Com o diagrama de fase e o resultado da análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) da % peso dos principais elementos na zona de fusão para todas as posições do feixe laser incidente, tem-se uma estrutura austenítica na zona de fusão para todos os casos.

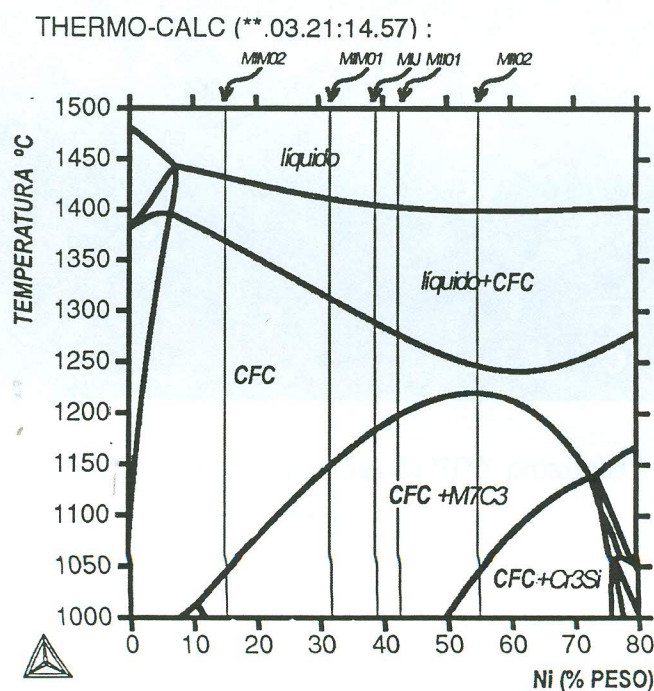


Figura 66 - Diagrama de fase construído no Thermo-calc para a união entre os materiais AISI 420 e Inconel 600.

Na tentativa de confirmar se as trincas ocorridas na união entre o Inconel 600 e o AISI 420 são deste tipo, uma nova espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) foi feita nas regiões próxima à trinca e distante dela. Com isto, pode-se então avaliar as variações na composição química nestes pontos. A Figura 67 apresenta os pontos analisados, próximos à trinca, e a Tabela 20 apresenta os valores obtidos na análise destes pontos. Da mesma forma, a Figura 68 mostra a localização dos pontos distantes da trinca, e a Tabela 21 apresenta os valores desta segunda análise. Por último, para facilitar a comparação entre os resultados das análises distantes e próximas à fissura, foi construída a Tabela 22, que contém os valores médios das % peso dos pontos.

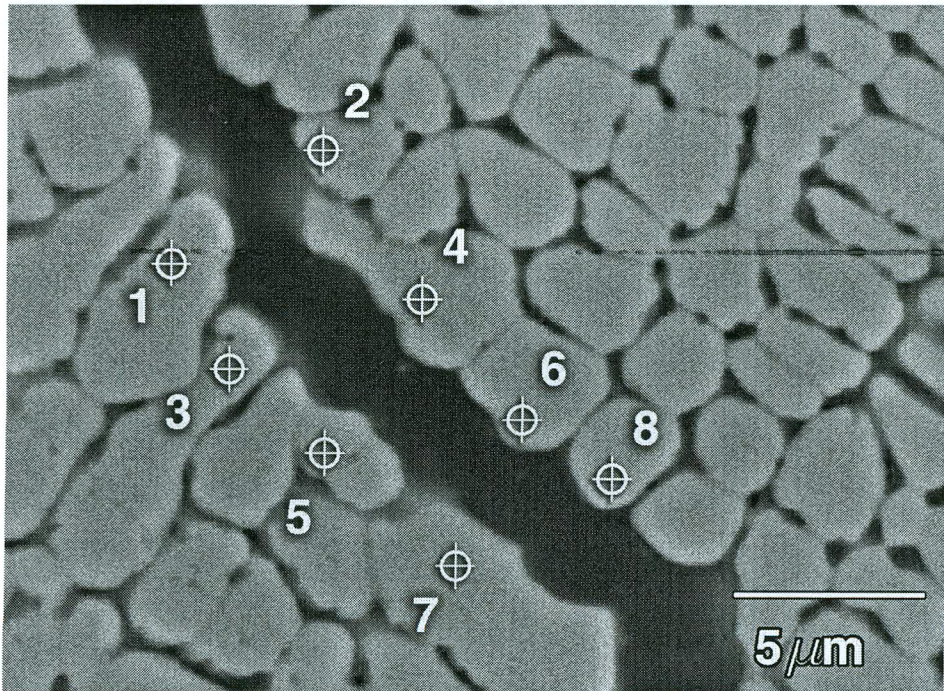


Figura 67 - Pontos onde foram feitas as medidas de EDX próximas à trinca na amostra MIJ.

Tabela 20 – Tabela dos valores da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, próximos à trinca na amostra MIJ.

Ponto	Ni (% peso)	Cr (% peso)	Fe (% peso)	Si (% peso)	P (% peso)	S (% peso)
1	38.34	14.11	47.05	0.50	0.00	0.00
2	37.50	13.85	48.34	0.27	0.00	0,04
3	37.90	14.03	47.59	0.37	0,10	0,01
4	37.81	14.10	47.70	0.39	0.00	0.00
5	39.02	13.78	46.65	0.42	0.00	0,13
6	39.01	13.59	46.94	0.46	0.00	0.00
7	40.51	13.56	45.03	0.82	0.00	0,08
8	39.27	13.95	46.36	0.42	0.00	0.00
Média	38,67 ± 0,99	13,87 ± 0,22	46,96 ± 1,0	0,46 ± 0,16	0,01 ± 0,04	0,03 ± 0,05

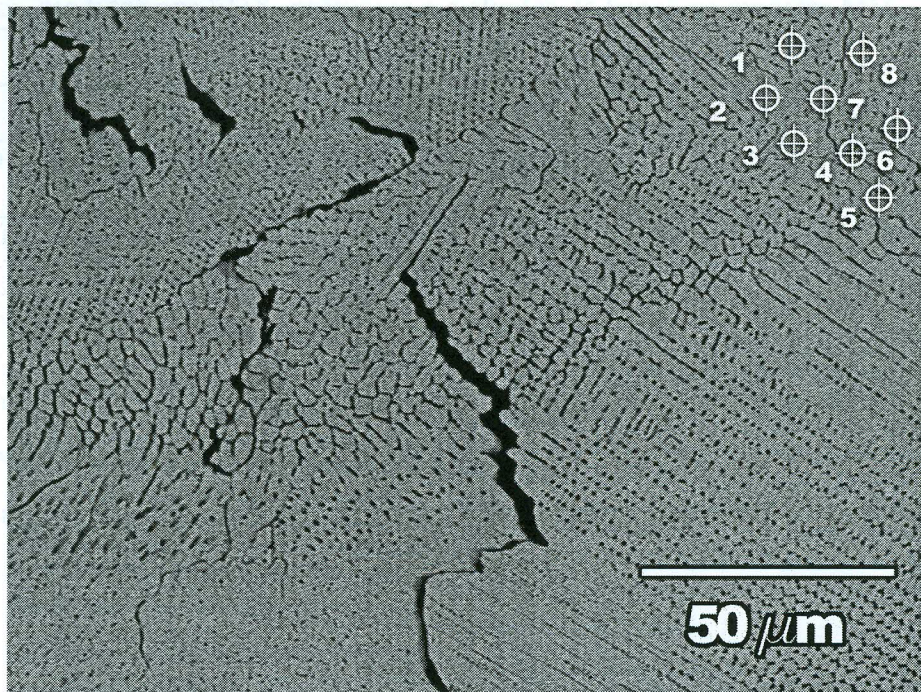


Figura 68 - Pontos onde foram feitas as mediadas de EDX distantes da trinca na amostra MIJ.

Tabela 21 – Tabela dos valores da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, distantes da trinca na amostra MIJ.

	Ni	Cr	Fe	Si	P	S
Ponto	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)
1	27,83	13,91	57,80	0,46	0,00	0,00
2	28,89	13,27	57,31	0,48	0,03	0,01
3	30,41	13,65	54,94	0,74	0,00	0,26
4	26,26	13,48	59,37	0,49	0,13	0,28
5	29,59	13,18	56,67	0,56	0,00	0,00
6	28,88	13,43	57,17	0,41	0,00	0,12
7	32,84	14,09	52,29	0,78	0,00	0,00
8	28,19	14,98	56,35	0,41	0,00	0,06
Média	29,11 ± 1,95	13,75 ± 0,58	56,49 ± 2,11	0,54 ± 0,14	0,02 ± 0,05	0,09 ± 0,12

Tabela 22 – Tabela dos valores médios da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, próximos e distantes da trinca na amostra MIJ.

	Ni	Cr	Fe	Si	P	S
Média	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)	(% peso)
Próximo à trinca	38,67 ± 0,99	13,87 ± 0,22	46,96 ± 1,0	0,46 ± 0,16	0,01 ± 0,04	0,03 ± 0,05
Distante da trinca	29,11 ± 1,95	13,75 ± 0,58	56,49 ± 2,11	0,54 ± 0,14	0,02 ± 0,05	0,09 ± 0,12

Para complementar estes dados, também foi realizado uma espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) ao longo de uma linha que passa pela trinca. O intuito era o de fornecer mais subsídios na identificação da origem destes defeitos. A Figura 69 apresenta o local dos pontos e a Tabela 23 os resultados da análise.

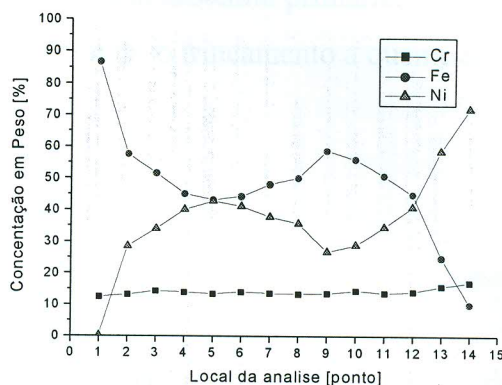
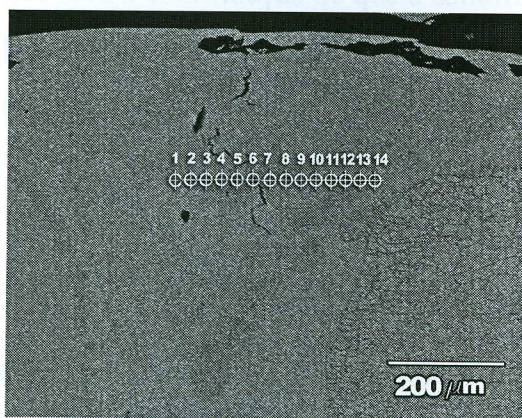


Figura 69 - Posição da linha de pontos que passa pela trinca onde foram feitas as medidas de EDX na amostra MIJ.

Tabela 23 - Tabela dos valores da % peso de elementos químicos do cordão de solda laser, medidos por EDX, para análise da trinca na união entre o Inconel 600 e o AISI 420.

Ponto	Ni (% peso)	Cr (% peso)	Fe (% peso)	Si (% peso)	P (% peso)	S (% peso)
1	0,07	12,51	86,72	0,69	0,00	0,00
2	28,55	13,15	57,56	0,59	0,09	0,06
3	33,95	14,31	51,57	0,58	0,00	0,00
4	40,08	13,96	45,03	0,40	0,00	0,13
5	42,73	13,46	43,18	0,56	0,00	0,07
6	41,16	14,06	44,28	0,50	0,00	0,00
7	37,80	13,60	48,11	0,50	0,00	0,00
8	35,78	13,46	50,15	0,50	0,00	0,11
9	26,86	13,58	58,73	0,58	0,16	0,09
10	28,90	14,42	56,03	0,54	0,00	0,11
11	34,64	13,71	50,82	0,27	0,10	0,00
12	40,96	14,12	44,96	0,33	0,00	0,09
13	58,60	15,87	24,94	0,48	0,00	0,11
14	72,05	17,18	10,11	0,49	0,14	0,03

Observa-se na Tabela 22 e na Tabela 23 o aumento na concentração de níquel e uma redução na concentração de elementos tais como Si, S e P nos grãos próximos à trinca, o

que leva à confirmação de que a solidificação ocorre pela austenita primária. Os elementos Si, S e P estão segregando no contorno de grão e gerando o trincamento a quente neste tipo de união.

### 5.3.2. Ensaio de Microdureza Vickers

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados nas mesmas condições usadas nas análises anteriores e são apresentados na Figura 70. Neste caso, o posicionamento do feixe laser também não tem influência sobre o perfil de dureza.

Nota-se que o valor de dureza máxima, assim como no caso da soldagem dos dois aços inoxidáveis, também se localiza na zona termicamente afetada do aço AISI 420, independentemente da posição do feixe laser incidente. Este fato já era esperado, pois o aço AISI 420 é um aço inoxidável martensítico. Durante o processo de soldagem a laser, a zona termicamente afetada é submetida a um ciclo térmico com altas velocidades de resfriamento, o que propicia a formação de estrutura martensita na região.

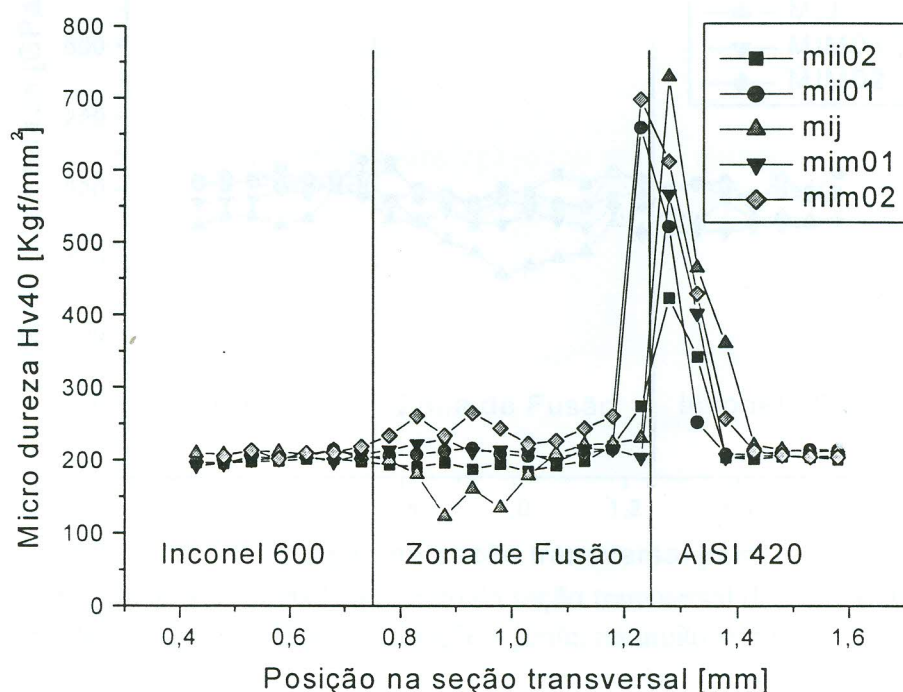


Figura 70 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta para a união entre o AISI 420 e o Inconel 600.

Na zona de fusão desta união observa-se que os valores de dureza permanecem similares aos dos materiais de base; este fato é atribuído à grande quantidade de níquel que estabiliza a estrutura austenítica. Aqui, esta quantidade de níquel, na zona de fusão, variou de 15,68% peso, para a amostra MIM02, até 55,08% peso, para a amostra MII02.

Os valores do módulo de elasticidade, que são obtidos no ensaio de dureza, estão apresentados na Figura 71. Nota-se que aqui também a variação nos valores do módulo de elasticidade, ao longo da seção transversal do cordão, estão praticamente na mesma faixa de valores do módulo de elasticidade dos materiais envolvidos. O aço AISI 420 tem módulo de elasticidade  $E = 200$  GPa e a liga de níquel Inconel 600 tem  $E = 207$  GPa<sup>75</sup>. Este fato mostra, que também neste caso, aparentemente é mantida a continuidade desta importante propriedade mecânica.

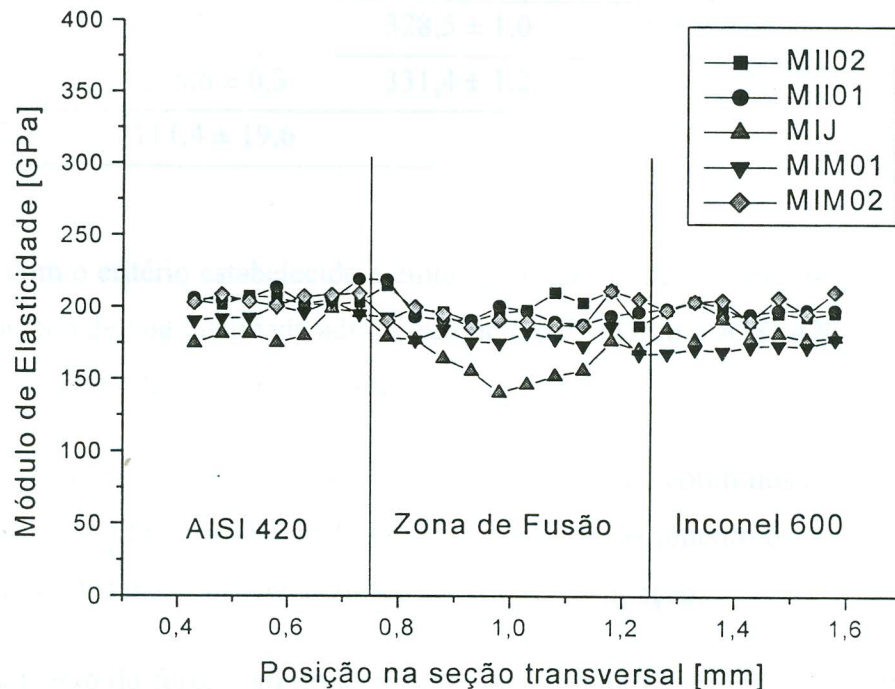


Figura 71 – Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, na união AISI 420 x Inconel 600.

### 5.3.3. Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração e as eficiências calculadas das soldas estão na Tabela 24. Para este cálculo também foi utilizado o valor da carga máxima do material de base com menor resistência mecânica, que no caso foi o AISI 420 com 679,6 kgf. Vemos que neste caso, as maiores eficiências foram obtidas com o feixe laser incidindo na junta e deslocado de 0,1 mm em relação a esta na direção do AISI 420, ou seja, amostras MIJ e MIM01.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de tração nas soldas entre o AISI 420 e o Inconel 600

Material	Carga Máxima [kgf]	Carga de Escoamento [kgf]	Deformação [%]	Eficiência da Solda [%]
AISI 420	679,6 ± 2,8	428,7 ± 11,3	24,8 ± 0,8	
Inconel 600	694,1 ± 0,7	329,4 ± 0,1	57,7 ± 0,8	
MIM02	274,1 ± 32,0		1,0 ± 0,1	40,3 ± 4,7
MIM01	481,5 ± 42,6	329,8 ± 0,4	7,3 ± 2,5	70,8 ± 6,3
MIJ	444,4 ± 13,3	328,5 ± 1,0	5,1 ± 0,4	65,4 ± 2,0
MII01	375,6 ± 0,3	331,4 ± 1,2	2,8 ± 0,1	55,3 ± 0,1
MII02	111,4 ± 19,6		0,40 ± 0,07	16,4 ± 2,9

De acordo com o critério estabelecido e empregado nas uniões anteriores, para que a solda seja considerada de boa qualidade admite-se que a união entre o AISI 420 e o Inconel 600 tenha eficiência de solda maior que 49%.

Dos resultados apresentados na Tabela 24, vemos que, assim como nos casos anteriores, as uniões feitas com o feixe posicionado na junta e com deslocamento de 0,1 mm na direção de qualquer um dos materiais atendem aos critérios de avaliação.

O posicionamento do feixe com deslocamento de 0,2 mm, na direção de qualquer um dos materiais, levou a uma solda com valores de eficiência abaixo do valor de referência.

No que diz respeito ao comportamento dos materiais unidos em relação aos materiais de base, os resultados dos ensaios de tração são semelhantes aos outros dois casos de

soldagem aqui estudados. O módulo de elasticidade aqui também pode ser considerado o mesmo para todas as condições analisadas, confirmando os resultados fornecidos pelo equipamento de dureza instrumentada apresentados na Figura 71.

As curvas obtidas nos ensaios de tração dos corpos de prova soldados, como visto anteriormente, apresentam um comportamento que é influenciado pelos dois materiais de base. Estas curvas ficam localizadas na região compreendida entre as curvas dos materiais de base, conforme mostrados da Figura 72 até a Figura 76.

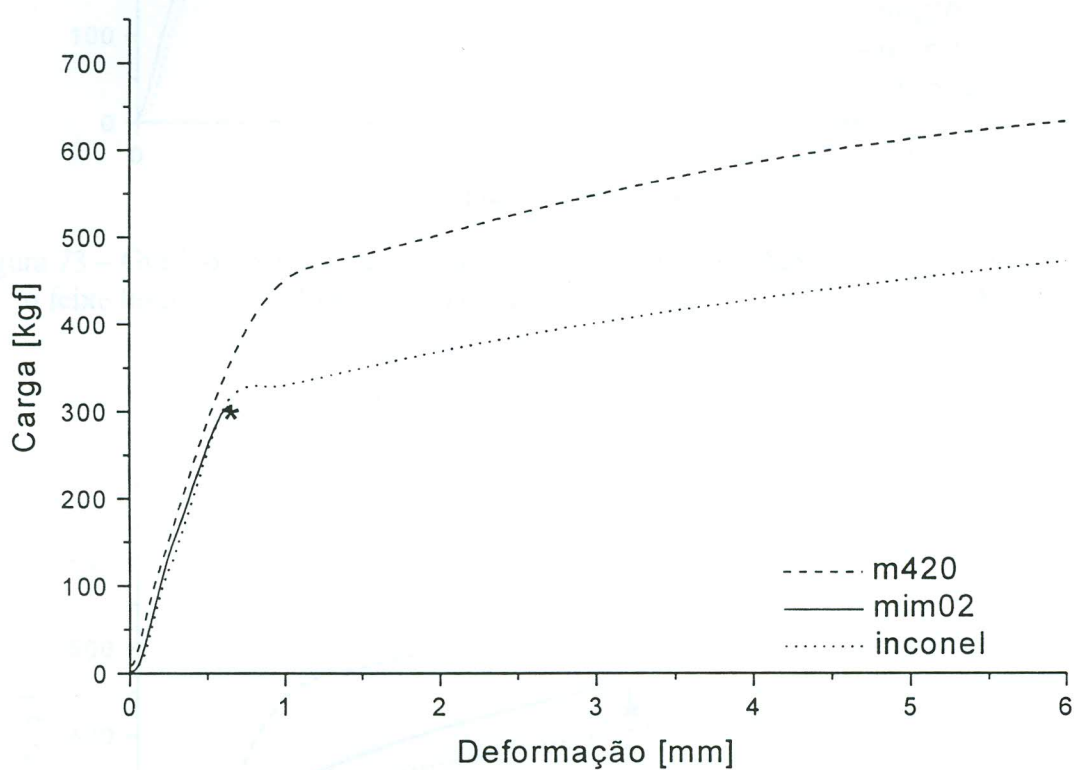


Figura 72 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MIM02 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420)

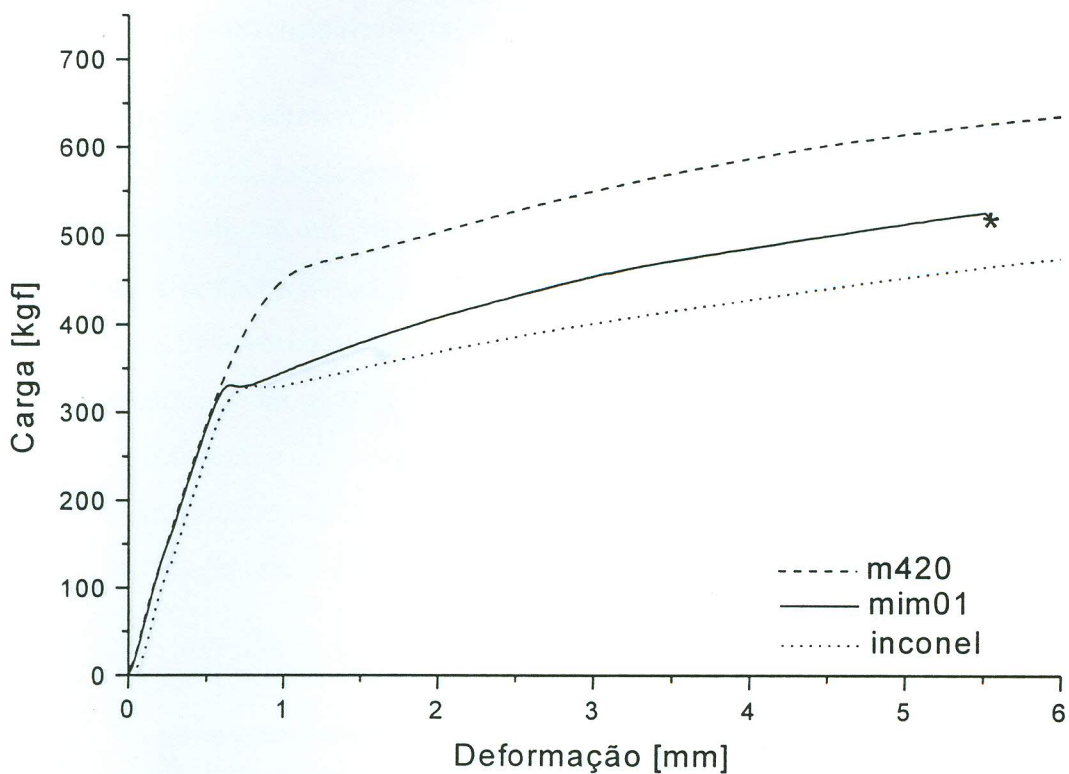


Figura 73 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MIM01 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do aço AISI 420)

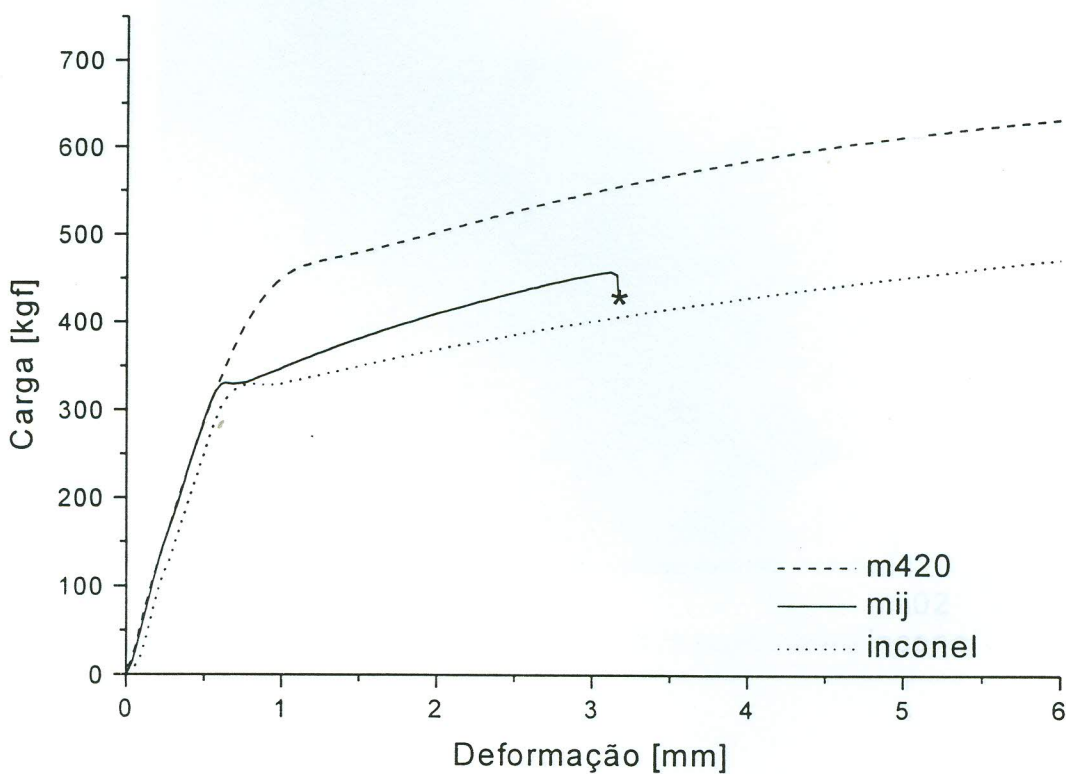


Figura 74 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MIJ (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado na junta)

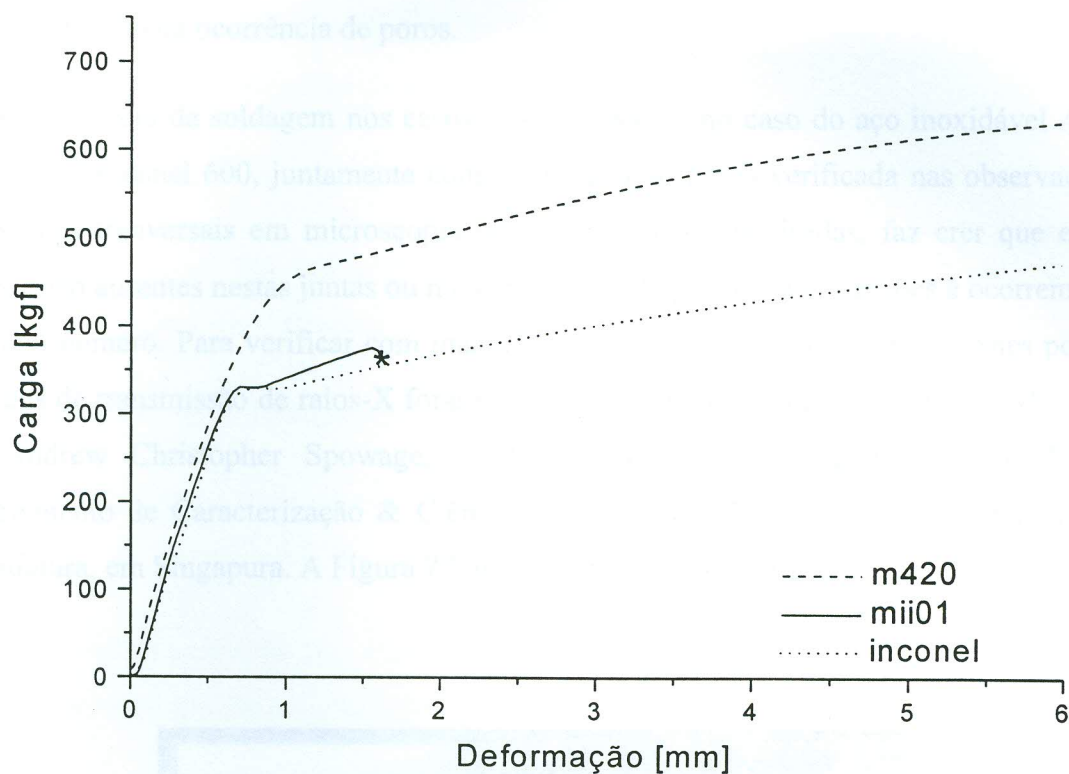


Figura 75 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MII01 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,1 mm em relação à junta na direção do Inconel 600)

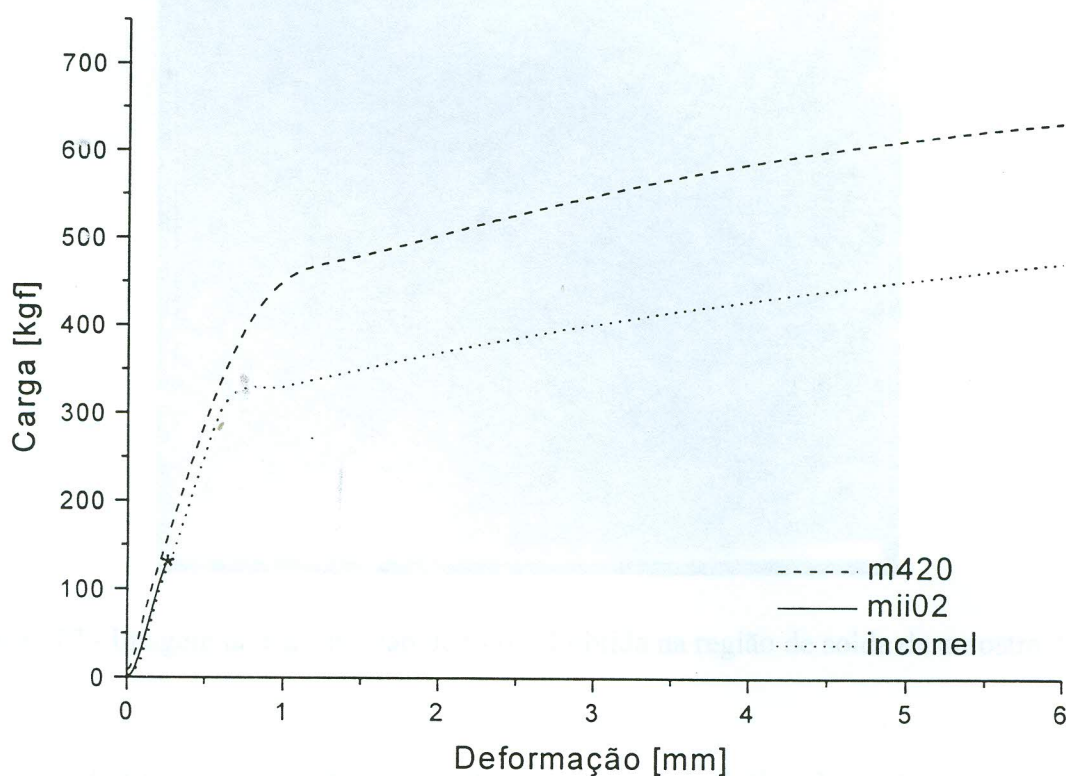


Figura 76 – Gráfico do ensaio de tração na amostra MII02 (AISI 420 e Inconel 600, com o feixe laser localizado a 0,2 mm em relação à junta na direção do Inconel 600)

#### 5.4. Observação da ocorrência de poros.

A boa eficiência da soldagem nos casos dos dois aços e no caso do aço inoxidável AISI 304 com o Inconel 600, juntamente com a ausência de poros verificada nas observações das seções transversais em microscopia óptica das seções analisadas, faz crer que estes poros estão ausentes nestas juntas ou no máximo são de pequenas dimensões e ocorrem em pequeno número. Para verificar com mais clareza e quantificar a ocorrência destes poros, imagens de transmissão de raios-X foram obtidas do cordão de solda da amostra AIJ, pelo Dr. Andrew Christopher Spowage, do laboratório de Tecnologias de raios X do departamento de Caracterização & Ciência dos Materiais do Instituto de Tecnologia da Manufatura, em Singapura. A Figura 77 mostra o resultado obtido.

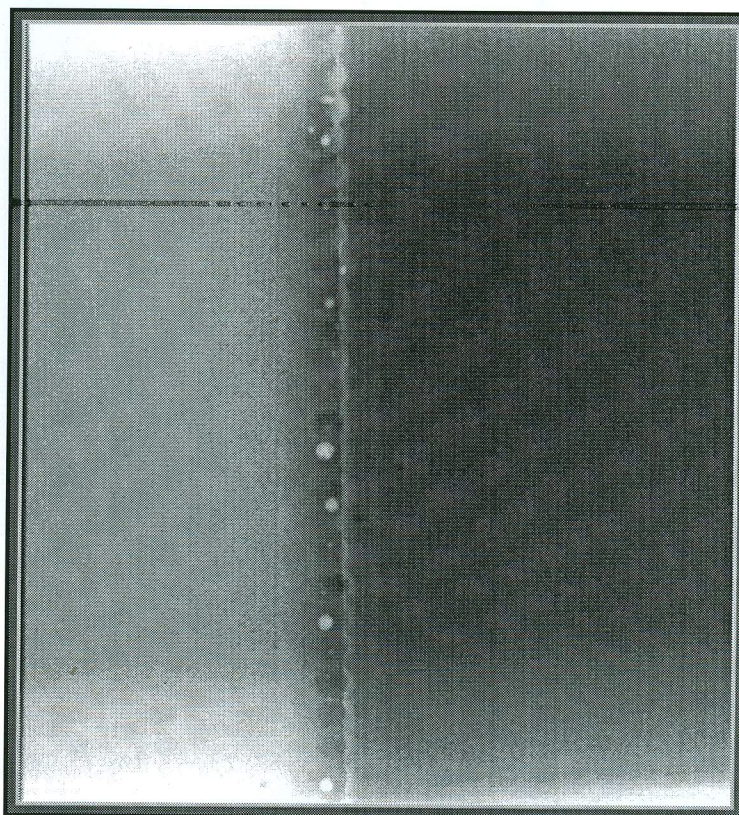


Figura 77 - Imagem de transmissão de raios-X obtida na região de solda da amostra AIJ

A Figura 77, diferentemente do observado na microscopia óptica da seção transversal do cordão de solda, mostra a ocorrência de alguns poros. Devido ao grande campo de visão

desta foto, que neste caso mostra mais de 9 mm do cordão, nos possibilita afirmar ser ela representativa de todo o cordão de solda.

Uma análise do observado na Figura 77 mostra que:

- os poros maiores têm um diâmetro de aproximadamente 350  $\mu\text{m}$  enquanto que os menores são de aproximadamente 150  $\mu\text{m}$ .
- a densidade de poros é de aproximadamente um poro a cada 1,5mm.
- o volume dos poros (volume total verificado na Figura 77) corresponde a 2% do volume da solda.

Estes resultados mostram que, embora ocorra presença de poros, estes são de pequenas dimensões e não são em número suficiente para afetar a qualidade da solda.

## 6. – CONCLUSÕES

O controle preciso da localização do feixe laser é conseqüência de suas propriedades de focalização e do sistema de posicionamento.

Na solda laser autógena, efetuada em passe único pela técnica de soldagem por “keyhole”, a variação do posicionamento do feixe, na união entre estes materiais, não influencia na geometria do cordão. Este fato é atribuído à semelhança entre as propriedades físicas dos materiais envolvidos.

Os parâmetros utilizados neste experimento ficaram próximos do limite suportado pelo equipamento utilizado. Estas condições determinaram as dimensões da largura do cordão, que apresentaram valores médios de 1 mm na superfície e de 0,45 mm na raiz. Com estas dimensões, qualquer variação no processo de soldagem pode comprometer a união entre os materiais, principalmente quando se usa o feixe laser com deslocamento de 0,2 mm em relação à junta.

A distribuição em % peso dos principais elementos (Fe, Ni e Cr), ao longo da seção transversal da zona de fusão, tem boa homogeneidade tanto quando o feixe está posicionado na junta como também quando está deslocado para qualquer um dos lados.

A zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, que é benéfica para as propriedades mecânicas de uma união. Isto ocorre, principalmente, devido à alta velocidade de resfriamento, que é uma característica do processo de solda laser.

A metodologia empregada neste estudo para se estimar a % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda é correta. Os dados estimados foram confirmados na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) em todos os casos.

As curvas obtidas nos ensaios de tração dos corpos de prova soldados apresentam um comportamento que é influenciado pelos dois materiais de base.

#### Soldagem entre os Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 420

Todas as condições de soldagem apresentam uma união uniforme, isentas de trincas na zona de fusão e também na zona termicamente afetada. Também não houve, durante a soldagem, a ocorrência de poros por colapso do “keyhole” na seções transversais da zona de fusão analisada.

No diagrama de Schaeffler fica claro que o posicionamento do feixe laser na junta ou deslocado no sentido do aço AISI 304 fornece uma união de excelente qualidade. Quando o feixe laser é deslocado no sentido do aço AISI 420, é prevista a formação de uma estrutura martensítica.

A zona termicamente afetada do aço AISI 420, para qualquer posição do feixe laser incidente, apresentou o valor máximo de microdureza. Nesta região houve a formação de uma estrutura martensita; isto ocorreu pela associação de dois fatores: o fato do aço AISI 420 ser um aço inoxidável martensítico e o processo de solda a laser submeter a zona termicamente afetada a um ciclo térmico com altas velocidades de resfriamento.

Conforme se varia a posição do feixe laser, do aço AISI 420 para o aço AISI 304, observa-se uma redução gradativa no perfil de dureza ao longo da seção transversal na zona de fusão. Quando o feixe está deslocado no sentido do AISI 420, a zona de fusão contém uma grande quantidade de martensita, a qual vai se reduzindo até chegar a zero conforme o feixe vai caminhando para a direção do aço AISI 304, como mostrado no diagrama de Schaeffler.

Os valores do módulo de elasticidade, ao longo da seção transversal do cordão de solda, estão praticamente na mesma faixa de valores do módulo de elasticidade dos materiais envolvidos: o aço AISI 304 tem módulo de elasticidade  $E = 193 \text{ GPa}$  e o aço AISI 420 tem  $E = 200 \text{ GPa}$ <sup>75</sup>. Este fato mostra que, neste tipo de união, é mantida a continuidade desta importante propriedade mecânica.

A amostra AMJ atingiu a eficiência máxima de soldagem. No ensaio de tração, o rompimento aconteceu fora da região de soldagem, indicação da perfeição na regulagem dos parâmetros de processo.

A eficiência de solda das uniões feitas com o feixe posicionado na junta, e deslocado de 0,1 mm na direção de qualquer um dos materiais, atenderam ao critério estipulado neste estudo. Este critério também foi atendido quando o feixe foi deslocado de 0,2 mm na direção do aço AISI 420.

O posicionamento do feixe com deslocamento de 0,2 mm na direção do AISI 304 (AMA02) levou a uma solda com eficiência que ficou abaixo do valor mínimo de referência. Este resultado pode ter como causa a conjugação de dois fatores: as dimensões do cordão de solda gerado pelos parâmetros do laser adotados neste trabalho, e o posicionamento do feixe. A análise por microscopia ótica já havia indicado esta possibilidade.

#### Soldagem entre o Aço Inoxidável AISI 304 e a Liga de Níquel Inconel 600

A alta velocidade de resfriamento gera uma zona termicamente afetada bastante estreita; esta zona passa abruptamente de uma estrutura granular, do material de base, para uma estrutura dendrítica na zona de fusão. O crescimento destas dendritas na zona de fusão segue a orientação dos grãos adjacentes do material de base.

O posicionamento do feixe não tem influência sobre o perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda.

O maior valor de eficiência de soldagem é obtido na união com o feixe laser incidindo na junta (amostra AIJ).

Todas as uniões feitas entre estes materiais têm os valores de eficiência de soldagem acima do valor do critério de referência de uma boa união. Contudo, o posicionamento do feixe com deslocamento de 0,2 mm, pode ser considerado não adequado, pois quando este deslocamento se deu na direção do AISI 304 a eficiência da solda apresentou valores bem próximos aos de referência.

Soldagem entre o Aço Inoxidável AISI 420 e a Liga de Níquel Inconel 600.

Neste caso, diferentemente das soldas anteriores, todas as condições de soldagem apresentam trincas na zona de fusão. A ocorrência de poros por colapso do “keyhole” nesta zona, também é observada. Somente na amostra MII02, com deslocamento de 0,2 mm do feixe laser para o lado do Inconel 600, é que se obteve uma solda isenta destes defeitos.

A zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, com a ocorrência de trincas no encontro dos planos de crescimento dendrítico. A zona termicamente afetada do aço AISI 420 apresenta uma alta densidade de poros, fato que compromete a eficiência desta união.

As trincas e fissuras na união entre estes materiais são do tipo trincas a quente. Este tipo de trinca ocorre tipicamente no contorno de grão de uma estrutura austenítica.

Com o diagrama de fase e o resultado da análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) da % peso dos principais elementos na zona de fusão para todas as posições do feixe laser incidente, confirma-se que a estrutura na zona de fusão é austenítica para todos os casos.

Nos grãos próximos à trinca ocorreu um aumento na concentração de níquel e uma redução na concentração de elementos tais como Si, S e P. Isto leva à confirmação que a solidificação ocorre pela austenita primária. Os elementos Si, S e P estão segregando no contorno de grão e gerando o trincamento a quente neste tipo de união.

Independentemente da posição do feixe laser incidente, o valor de dureza máxima localiza-se na zona termicamente afetada do aço AISI 420, e a zona de fusão tem valores de dureza similares aos dos materiais de base. Este fato confirma que a zona de fusão é composta por uma estrutura austenítica e que o ciclo térmico com altas velocidades de resfriamento do processo de soldagem a laser propicia a formação de estrutura martensítica somente na zona termicamente afetada do AISI 420.

Por fim, a técnica de soldagem a laser de materiais dissimilares é promissora, podendo futuramente concorrer com outros métodos já consolidados e que estão sendo utilizados comercialmente.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O uso de energias maiores poderia proporcionar a criação de uma poça de fusão de dimensões maiores, o que, além de diminuir a exigência quanto às tolerâncias de posicionamento dos materiais, ainda poderia possibilitar um maior controle da poça de fusão.

O uso de um sistema laser com possibilidade de controle do perfil temporal do pulso. Se tal perfil possuir uma fase de aquecimento, uma de soldagem e uma de solidificação, com rampas de intensidade adequadas a cada tipo de união, a possibilidade de se obter maiores eficiências de soldagem seria grandemente aumentada.

O controle da taxa de resfriamento da poça de solda também seria um parâmetro interessante para investigação, já que a velocidade de resfriamento do material fundido é de fundamental importância para a formação da estrutura resultante. Este controle poderia ser feito através de um segundo feixe laser, posicionado logo atrás do feixe principal de soldagem, ou por um processo de aquecimento indutivo, que também seria posicionado no cordão recém formado.

## 7. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 READY J. F. **Industrial Applications of Lasers**. Ed. Academic Press. 2<sup>a</sup> ed., ISBN 0125839618. 1997.
- 2 STEEN, W. M. **Laser Material Processing**. Ed. Springer-Verlag. 2a ed., ISBN 3540761748. 1998.
- 3 SEMAK, V. V., KNOROVSKY, G. A., MAC CALLUM, D. O. On the possibility of microwelding with laser beams. **J. Phys. D: Appl. Phys.**; n. 36, p. 2170–2174, 2003.
- 4 UENISHI, K., SEKI, M. KUNIMASA, T., et al. YAG Laser Micro Welding of Stainless Steel and Shape Memory Alloy, Proc. of **Third Intern. Symp. Laser Precision Microfabrication**, SPIE, v.4830, p. 57-63, 2003
- 5 ZHANG, L., FONTANA, G. Autogenous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydraulic valves. **J. Materials Processing Technology**; n.74, p. 174-182, 1998.
- 6 ZHANG, L., GOBBI, S. L., RICHTER, K.H. Autogenous welding of Hastelloy X to Mar-M 247 by laser. **J. Materials Processing Technology**; n.70, p. 285-292, 1997.
- 7 SUN, Z., KUO, M. Bridging the joint gap with wire feed laser welding. **J. Materials Processing Technology**; n.87, p. 213-222, 1999.
- 8 CHEN, C. M., KOVACEVIC, R. Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding. **J. of Machine Tools & Manufacture**, n. 44, p. 1205-1214, 2004.
- 9 DARWISH, S. M., Analysis of Weld-bonded Dissimilar Materials, **Int. J. Adhesion & Adhesives**, v. 24, p. 347-354, 2004.
- 10 KREIMEYER, M., VOLERTSEN, F. Processing titanium-aluminum hybrid joints for aircraft applications. **Lasers in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 73-78, Munich, Germany, June 2005.
- 11 BINDA, B., CAPELLO, E., PREVITALI, B. A semi-empirical model of the temperature field in the AISI 304 laser welding. **J. Materials Processing Technology**; n.155-156, p. 1235-1241, 2004.
- 12 BRUGGEMANN, G., MAHRLE, A. BENZIGER, T. Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at

- 
- laser beam welding of steels and aluminium alloyings. **NDT&E International**; n. 33, p. 453-463, 2000.
- 13 BYOUNG, C. K., HOON, K. T., SOO, K. J., BUM, K. K., YONG, L. H. Investigation on the effect of laser pulse shape during Nd:YAG laser microwelding of thin Al sheet by numerical simulation. **Metallurgical and Materials Trans. A**, v. 33A, p.1449-1457, 2002.
  - 14 DU, J., LONGOBARDI, J., LATHAM, W. P., KAR, A. Laser marginal lap micro-welding for ultra thin sheet metal. **J. Laser Applications**, v. 14, n. 1, p. 4-8, 2002.
  - 15 CHANG, w. s., Na, S. J. A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro-joining. **J. Materials Processing Technology**; n.120, p. 208-214, 2002.
  - 16 WETTER, N. U., ROSSI, W. **ICS Lectures on Industrial Applications of Lasers**. Unido Publication - Spero Penha Morato – Editor, Viena, Áustria. ISBN – 921106402, 93 pgs., 2000.
  - 17 HEL, X., FUERSCHBACH, P. W., DEBROY, T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel. **J. Phys. D: Appl. Phys.**; n. 36, p. 1388–1398, 2003.
  - 18 KAISER, E., SCHÄFER, P. Pulse shaping optimizes the quality of pulsed seam- and spotwelds. **Lasers in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 695-698, Munich, Germany, June 2005.
  - 19 DULEY, W. W. **CO2 Lasers: Effects and Applications**, Ed. Academic Press, 1976.
  - 20 JIN, X., LI, L., ZHANG, Y. A heat transfer model for deep penetration laser welding based on an actual keyhole. **Int. J. Heat and Mass Transfer**, li, 46, p. 15-22, 2003.
  - 21 LEE, J. Y., KO, S. H., FARSON, D. F., YOO, C. D. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding. **J. Physics D: applied physics**. n. 35, p. 1570-1576, 2002.
  - 22 KI, H., MOHANTY, P. S., MAZUMDER, J. Modeling of laser keyhole welding: part 1. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution. **Metallurgical and Materials Trans. A**, v. 33A, p. 1817-1830, 2002.
  - 23 KI, H., MOHANTY, P. S., MAZUMDER, J. Modeling of laser keyhole welding: part 2. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution. **Metallurgical and Materials Trans. A**, v. 33A, p. 1830-1842, 2002.
  - 24 MACKWOOD, A. P., CRAFER, R. C., Thermal modeling of laser welding and related processes: a literature review. **Optics & Laser Technology**, v. 37, p. 99-115, 2005.
  - 25 DULEY, W. W. **Laser welding**, Ed. A Wiley-Interscience publication. ISBN: 0-471-24679-4. 1998.

- 
- 26 HO, C. Y., WEN, M. Y. Distribution of the intensity absorbed by the keyhole wall in laser processing. **J. Materials Processing Technology**; n.145, p. 303-310, 2004.
- 27 DARWISH, S. M., AL-TAMIMI, A., AL-HABDAN, S. A knowledge base for metal welding process selection. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, v. 37, n. 7, p. 1007-1023, 1997.
- 28 STEEN, W. M. **Laser Material Processing**. Ed. Springer-Verlag. 2a ed., cap. 4. ISBN 3540761748. 1998.
- 29 JONES, L., ALFILE, J. P., AUBERT, P., et al. Advanced cutting, welding and inspection methods for vacuum vessel assembly and maintenance. **Fusion Engineering and Design**; n. 51-52, p. 985-991, 2000.
- 30 SUN, Z., KARPPI, R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview. **J. Materials Processing Technology**; n. 59, p. 257-267, 1996.
- 31 TUSEK, J., KAMPUS, Z., SUBAN, M. Welding of tailored blanks of different materials. **J. Materials Processing Technology**; n. 119, p. 180-184, 2001.
- 32 LI, Z., GOBBI, S. L., Laser welding for lightweight structures. **J. Materials Processing Technology**; n. 70, p. 137-144, 1997.
- 33 KLOTZBACH, A., FLEISCHER, V., MORGENTHAL, L., BEYER, E. Sensor guided welding system for YAG – laser applications. **Lasers in Manufacturing 2005 – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing**, pp.17-19, Munich, Germany, June 2005.
- 34 KAIERLE, S., ABELS, P., KRATZCH, C. Process monitoring and control for laser materials processing – an overview. **Lasers in Manufacturing 2005 – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing**, pp. 101-106, Munich, Germany, June 2005.
- 35 HAND, D. P., FOX, M. D. T., HARAN, F. M., PETERS, C., MORGAN, S. A., McLEAN, M. A., STEEN, W. M., JONES, J. D. C. Optical focus control system for laser welding and direct casting. **Optics and Lasers Engineering**, v. 34, p. 415-427, 2000.
- 36 IAKOVOU, D., AARTS, R.G.K.M., MEIJER, J. Integrated Sensors for Robotic Laser Welding. **Lasers in Manufacturing 2005 – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing**, pp. 121-126, Munich, Germany, June 2005.
- 37 MÜLLER-BORHANIAN, J., DEININGER, C., DAUNSINGER, F., HÜGEL, H. Camera Based monitoring during laser beam welding – influences of the detection wave length. **Lasers in Manufacturing 2005 – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing**, pp. 137 – 141, Munich, Germany, June 2005.
- 38 BERTHE, L., DELAGE, D., LEPRETRE, D., BACINELLO, L., KNAPP, W., DUMONT, N., DURAND, F. Study and control process in laser conduction welding for millisecond pulse duration range. Proc. of **Third Intern. Symp. Laser Precision Microfabrication**, SPIE, v.4830, p. 69-72, 2003.

- 
- 39 HOLLACHER, M. K., NICOLAY, T., KATTWINKEL, A., KESSLER, B. Industrial process monitoring and quality control in remote laser welding applications. **Lasers in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 107-110, Munich, Germany, June 2005.
- 40 PEAK, U. C., GAGLIANO, F. P. Thermal Analysis of Laser Drilling Process. **IEEE Journal Quantum Electronics**, vol QE-8, p. 112-119. 1972.
- 41 TZENG, Y. Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process. **J. Materials Processing Technology**; n. 102, p. 40-47, 2000.
- 42 BENYOUNIS, K. Y., OLABI, A. G., HASHMI, M. S. J. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. **J. Materials Processing Technology**; n. 164-165, p. 978-985, 2005.
- 43 LI, Z., GOBBI, S. L., NORRIS, I., ZOLOTOVSKI, S., RICHTER, K. H., Laser welding techniques for titanium alloy sheet. **J. Materials Processing Technology**; n. 65, p. 203-208, 1997.
- 44 SCHUBERT, E.; KLASSEN, M.; ZERNER, I. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. **J. Materials Processing Technology**; n.115, p. 2-8, 2001.
- 45 MIYAMOTO, I., MORDIKE, B. L. Laser Materials Processing, Proc. of **ICALEO'93**, Ed. Denney, P., vol. 2306, 1994.
- 46 NEVES, M. D. M., BERRETTA, J. R., ROSSI, W., NOGUEIRA, E. C., WETTER, N. U., VIEIRA Jr., N. D. Soldagem do Aço Inoxidável AISI304 por Laser de Nd:YAG. **Soldagem & Inspeção, ABS**, ano 5, n. 6, suplemento técnico.2001.
- 47 BERRETTA, J. R., NEVES, M. D. M., ROSSI, W., ALMEIDA, I. A., MORATO, S. P., VIEIRA Jr., N. D. Soldagem com Laser de Nd:YAG do Aço Inoxidável Martensítico AISI420. In: **XXV CONSOLDA**, CD-ROM. 2000.
- 48 EL-BATAHGY, A. Effect of Laser Welding Parameters on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels, **Materials Letters**, v. 32, p. 155-163, 1997.
- 49 PENG, Y., CHEN, W., WANG, C., BAO, G., TIAN, Z. Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, n. 34, p. 3145-3149, 2001.
- 50 BAHUN, C. J., ENGQUIST, R. D. **Proc. National Electronics Conference, IEEE**, 607-619, Chicago, October, 1962.
- 51 FUERSCHBACH, P. W., EISLER, G.R. Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption. **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 7, n. 4, p. 241-246. 2002.
- 52 TAN, C. W., CHAN, Y.C., LEUNG, B. N. W., TSUN, J., SO, A. C. K. Characterization of Kovar-to-Kovar laser welded joints and its mechanical strength. **Optics and Lasers in Engineering**, n. 43, p. 151-162, 2005.
- 53 NOOLU, N. J., KERR, H. W., ZHOU, Y., XIE, J. Laser Weldability of Pt and Ti Alloys, **Materials Science & Engineering A**, v. 397, p. 8-15, 2005.

- 54 WU, C. P., TSAY, L. W., CHEN, C. Notched tensile testing of T-200 maraging steel and its laser welds in hydrogen. **Materials Science and Engineering A**, v. 346, p. 302-309, 2003.
- 55 ZHANG, X., CHEN, W., ASHIDA, E. Relationship between weld quality and optical emissions in underwater Nd:YAG laser welding. **Optics and Lasers Engineering**, v. 41, p. 717-730, 2004.
- 56 KATAYAMA, S. Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals, **Welding International**, v. 18, n. 8, p. 618-625, 2004.
- 57 KIM, J., KIM, C., CHUNG, C. Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser, **J. Materials Processing Technology**; n.114, p. 51-56, 2001.
- 58 MORISHIMA, Y., KOSHIISHI, M., KASHIWAKURA, K., HASHIMOTO, T. Re-weldability of neutron irradiated type 304 and 316L stainless steels. *J. of Nuclear Materials*, v. 329-333, p. 663-667, 2004.
- 59 CHEN, C. M., KOVACEVIC, R. Joining of Al 6061 Alloy to AISI 1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding, **J. Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p. 1205-1214, 2004.
- 60 SUN, Z. Feasibility of Producing Ferritic/austenitic Dissimilar Metal Joints by High Energy Density Laser Beam Process, **J. Pres. Ves. & Piping**, v. 68, p. 153-160, 1996.
- 61 COSTA, A. P., QUINTINO, L., GREITMANN, M. Laser Beam Welding Hard Metals to Steel, **J. Materials Processing Technology**; n.141, p. 163-173, 2003.
- 62 JOKIEL, M., DÜRR, U., HOLTZ, R., LIEBERS, R. Laser Welding of Dissimilar Metals: Strategies with Pulsed Nd:YAG Lasers. **Lasers in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp.631-636, Munich, Germany, June 2005.
- 63 OLOWINSKY, A. M., KRAMER, T., DURAND, F. Laser Beam microwelding in the watch industry. **SPIE**, p. 4637-4672, 2002.
- 64 MatWeb Material Property Data – homepage que fornece informações sobre materiais. Disponível em: <http://www.matweb.com>. Acesso em: 8 de maio 2003.
- 65 DAVIS, J. R., at al. **Metal Handbook**, v. 1, ed. 10, ASM Intern. Handbook Committee, 1990.
- 66 TSAY, L. W., YOUNG, M. C., CHEN, C. Fatigue Crack Growth Behavior of Laser-processed 304 Stainless Steel in Air and Gaseous Hydrogen, **Corrosion Science**, v. 45, p. 1985-1997, 2003.
- 67 BERRETTA, J. R., NEVES, M. D. M. Estudo de Processo de Solda Laser na Empresa Ferrolene S.A., estudo de caso, 2000.
- 68 **Metals Handbook**, Welding, Brazing and Soldering, ASM, ed. 9, v. 6, ISBN 0-87170-007. 1993.
- 69 HAN, W. J., BYEON, J. G., PARK, K. S. Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beam. , **J. Materials Processing Technology**; n.113, p. 234-237, 2001.

- 
- 70 GOBBI, S., ZHANG, L., NORRIS, J., RICHTER, K. H., LOREAU, J. H. High Powder CO<sub>2</sub> and Nd:YAG laser welding of wrought Inconel 718. , **J. Materials Processing Technology**; n.56, p. 333-345, 1996.
- 71 KIM, J., MOON, J. C-ring Stress Corrosion Test for Inconel 600 and Inconel 690 Sleeve Joint Welded by Nd:YAG Laser, **Corrosion Science**, v. 46, p. 807-818, 2004.
- 72 NAEEM M., COLLINS P., Micro-joining with Nd:YAG laser, **Lasers in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 643-649, Munich, Germany, June 2005.
- 73 OLIVER, W. C., PHARR, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, **J. Mater. Res.**, v.7, p. 1564-83, 1992.
- 74 Souza, S. A.. “**Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**”, 5ª ed., Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1982.
- 75 MatWeb Material Property Data – homepage que fornece informações sobre materiais. Disponível em: <http://www.matweb.com> . Acesso em: 17 de agosto 2004.
- 76 Thermo-Calc Software 2000, versão L, KTH tockholm Royal Institute, Estocolmo, Suécia.
- 77 LIPPOLD. J. C. Centerline Cracking in Deep Penetration Electron Beam Welds in Type 304L Stainless Steel, **Welding Research Supplement**, p. 127s-136s, may,1985.
- 78 SHANKAR, V., GILL, T. P. S., MANNAN, S. L. Evaluation of Hot Cracking in Nitrogen-Bearing and Fully Austenitic Stainless Steel Weldments, **Welding Research Supplement**, p. 193s-201s, may,1998.
- 79 BROOKS, J. A., THOMPSON, A. W., WILLIAMS, J. C. A Fundamental Study of the Beneficial Effects of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking, **Welding Research Supplement**, p. 71s-83s, march,1984.