

Cleber de Sousa Lima Junior

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE
RECALQUE NA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR
RESISTÊNCIA PURA DE ANÉIS FABRICADOS
COM AÇO USI-RW-550 PARA INDÚSTRIA DE
RODAS**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Outubro/2012

Cleber de Sousa Lima Junior

(Engenheiro Mecânico, Escola de Engenharia de Piracicaba, 2005)

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE
RECALQUE NA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR
RESISTÊNCIA PURA DE ANÉIS FABRICADOS
COM AÇO USI-RW-550 PARA INDÚSTRIA DE
RODAS**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio D. Brandi

São Paulo

Outubro/2012

*A gente nasce e morre só. E talvez por isso mesmo é que se precisa
tanto de viver acompanhado.*

Rachel de Queiroz

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais Cleber e Eliude e a minha noiva

Elisama.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo apoio sempre presente e pelos desafios no decorrer da vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Sérgio Duarte Brandi, pelo apoio e tempo dedicado a este trabalho.

Aos meus pais, Cleber e Eliude e a toda minha família pelo apoio e paciência no decorrer do curso.

A minha noiva Elisama pelo apoio, compreensão e motivação.

A empresa Fumagalli pelo apoio financeiro e técnico para execução deste trabalho.

Aos Srs. Paulo Becker, Sérgio Bardini, Edmilson Vieira e Vanderlei Góes, pelo apoio incondicional.

Ao Sr. Adelson Marchetti pela orientação e execução das análises metalográficas.

Ao Sr. Geraldo Rondan pelas valiosas informações e discussões sobre o tema estudado.

Ao Jaime Casanova Soeiro Júnior pelo apoio, conversas e incentivo para execução deste trabalho.

Ao Dany Centeio pela execução dos ensaios de microdureza.

CURRICULUM VITAE

Formação

- Especialista no desenvolvimento de Componentes Automotivos (UFSC - 2008)
- Engenharia Mecânica (Escola de Engenharia de Piracicaba - 2005)
- Técnico em Mecânica de Precisão (Escola SENAI Suíço-Brasileira - 1997)

Histórico Profissional

- Engenheiro de Manufatura - Maxion Wheels Fumagalli (Fevereiro/2005 - cargo atual)
Suporte a produção e a novos desenvolvimentos nas áreas de soldagem (MIGMAG e soldagem por resistência (por centelhamento e pura))
- Analista de Metrologia – ArvinMeritor Fumagalli (Fevereiro/2000 a Março/2005)
Análise dimensional de componentes e dispositivos, execução e análise de estudos de confiabilidade e capacidade de máquinas de medição.
- Analista de Metrologia – Aferitec Comp. Metrológicas (Janeiro/1998 a Fevereiro/2000).
Calibração de instrumentos de medição e máquinas utilizadas para testes de durabilidade em rodas.

RESUMO

A constante busca por redução de peso nos automóveis tem levado a indústria de autopeças a utilizar cada vez mais materiais de alta resistência com o objetivo de reduzir o peso dos componentes, as rodas de aço também seguem esta tendência na aplicação de aços de alta resistência e baixa liga, principalmente na fabricação de aros. O processo de soldagem por resistência pura é um dos processos mais utilizados para esta aplicação, devido a sua alta taxa de produtividade e boa qualidade da junta soldada. O presente trabalho tem como objetivo estudar a influência da quantidade de recalque nas microestruturas e propriedades mecânicas das juntas soldadas. Neste estudo, foram utilizadas amostras de anéis soldados de 378 mm de diâmetro, 245 mm de largura e 2,10 mm de espessura, o material utilizado foi o aço de alta resistência e baixa liga USI-RW-550. O processo de soldagem por resistência pura foi utilizado para soldagem dos anéis e a quantidade de recalque foi alterada desde 2 até 10 mm. As microestruturas e as propriedades mecânicas das amostras soldadas foram investigadas. Não foram observadas alterações na microestrutura nos diversos recalques testados, o ângulo de deformação das linhas de fluxo do material foi afetado pela quantidade de material recalcado, sendo maior para maiores quantidades de recalque. Nos testes de dobramento os corpos de prova com recalque maior que 4 mm foram aprovados, foi possível observar que para quantidades excessivas de sobremetal na operação de laminar o cordão de solda podem contribuir para o não atendimento aos requisitos do teste de dobramento. Não houve alteração nos resultados dos

testes de microdureza realizados no cordão de solda rebarbado, porém os valores de microdureza nos cordões laminados foram maiores se comparados aos cordões rebarbados.

ABSTRACT

The constant quest for weight reduction in cars has led the auto parts industry increasingly using high-strength materials in order to reduce the weight of components; steel wheels also follow this trend in the application of high strength low alloy steels, mainly in manufacturing rims. Upset welding is one of the most used process for this application due to its high productivity and good quality of the weld. The present work aims to study the influence of the amount of upset in the microstructures and mechanical properties of welded joints. In this study, samples of welded rings of 378 mm diameter, 245 mm wide and 2.10 mm thick where used, the material used was high strength low alloy steel USI-550-RW. The Upset Welding process was used to weld the rings and the amount of upset was changed from 2 to 10mm. The microstructures and the mechanical properties of welded samples were investigated. No changes were observed in the microstructure in the various upset tested, the deformation angle of the material flow lines were affected by the amount of upset material, higher for larger quantities of upset. In bending tests the samples with upset greater than 4 mm were approved, it was observed that excessive amounts of extra material for the operation of rolling the weld bead can contribute to not meeting the requirements of the bend test. There was no change in the results of microhardness test performed on the weld bead deburred, but the microhardness values in rolled weld bead were higher compared to the weld bead deburred.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Potenciais ganhos de peso quando se substitui um aço de 200MPa de limite de resistência, por um aço de ARBL [1].....	1
Figura 2.1 – Roda montada e seus componentes: aro e disco.....	3
Figura 2.2 – Esquema ilustrativo do processo de fabricação de um aro para roda de aço automotiva [2].....	4
Figura 2.3 – Condições do cordão de solda antes e após o processo de soldagem.....	5
Figura 2.4 – Forças e energias potenciais envolvidas na formação de ligações [3].....	7
Figura 2.5 – Duas superfícies ideais e duas superfícies reais unidas para formar uma solda. Superfície ideal (a) para produzir uma solda ideal (b). Vários tipos de superfícies reais (c, d) sendo pressionadas (e, f) para formar uma união quase perfeita (g). Fusão para prover uma adição de átomos e produzir uma união quase perfeita (h) [3].....	10
Figura 2.6 – Desenhos da primeira patente relacionado a utilização de pressão e aquecimento por efeito Joule para soldagem por resistência [5].....	12
Figura 2.7 – Esquema da fixação do aro na máquina de soldagem [2].....	13
Figura 2.8 – Esquema das resistências elétricas na soldagem por resistência topo-a-topo. R1 e R2: resistência de contato entre os eletrodos superiores e a peça. R3: resistência interna do material. R4 e R5: resistência de contato entre os eletrodos inferiores e a peça. R6: resistência de contato entre as faces da peça [2].....	14

Figura 2.9 – Módulo de elasticidade versus temperatura para tungstênio, aço e alumínio [8].	15
Figura 2.10 – Comparação da geração de faíscas do processo STTC (a) com o processo STTRP (b).	17
Figura 2.11 – Classificação do processo STTC conforme norma AWS A3.0M/A3.0:2010. Extraído de [10].	19
Figura 2.12 – Etapas do processo STTC [11].	21
Figura 2.13 – Cobre com aço soldados pelo processo STTC [11].	22
Figura 2.14 – Equipamento típico para STTC [12].	23
Figura 2.15 – Variáveis dimensionais para a STTC de tubos e chapas planas [11].	24
Figura 2.16 – Classificação do processo STTRP conforme norma AWS A3.0M/A3.0:2010. Extraído de [10].	29
Figura 2.17 – Junta soldada pelo processo STTRP [11].	30
Figura 2.18 – Curva típica de deslocamento e posicionamento dos eletrodos durante a STTRP [2].	31
Figura 2.19 – Fase I: aproximação das faces da junta [2].	32
Figura 2.20 – Fase II: aquecimento devido a resistência à passagem de corrente elétrica [2].	34
Figura 2.21 – Fase III: deformação plástica [2].	35
Figura 2.22 – Ilustração esquemática do efeito da recristalização dinâmica nas proximidades da interface da solda entre dois materiais unidos por pressão a temperatura maior que $0,4T_s$ [3].	36
Figura 2.23 – Fase IV: cura ou resfriamento [2].	37

Figura 2.24 – Fase V: saída [2].....	37
Figura 2.25 – Equipamento para STTRP (a) representação esquemática com as forças e componentes da maquina (b) [2]	39
Figura 2.26 – Indicações visuais da qualidade da solda [11].	42
Figura 2.27 – Microestrutura do aço USI-RW-550 indicando a presença de ferrita+bainita em contorno de grão [18].....	46
Figura 4.1 – Figura ilustrativa do mostrando as dimensões do anel utilizado no experimento.....	50
Figura 4.2 – Painel do controlador SWEP 06.....	55
Figura 4.3 – Fases referentes ao processo de soldagem [20].	56
Figura 4.4 – Abertura inicial dos eletrodos.	58
Figura 4.5 – Micrografia ilustrando o local de medição do ângulo das linhas de fluxo. Aumento 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.....	61
Figura 4.6 – Figura ilustrando a quantidade de material recalcado.....	62
Figura 4.7 – Localização dos corpos de prova nos anéis.	63
Figura 4.8 – Dimensões do corpo de prova para teste de dobramento.	65
Figura 4.9 – Distância entre suporte e dimensões do cutelo.	66
Figura 4.10 – Desenho esquemático ilustrando a disposição dos pontos para medição da dureza.	67

Figura 5.1 – Experimento I. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital. 70

Figura 5.2 – Experimento II. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital. 71

Figura 5.3 – Experimento III. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital. 72

Figura 5.4 – Experimento IV. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital..... 73

Figura 5.5 – Experimento V. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital..... 74

Figura 5.6 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento I, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®..... 77

Figura 5.7 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento II, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®..... 78

Figura 5.8 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento III, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®	79
Figura 5.9 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento IV, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®	80
Figura 5.10 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento V, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®	81
Figura 5.11 – Micrografia mostrando o entalhe formado no cordão de solda (a) Cordão rebarbado (b) Cordão laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®	84
Figura 5.12 – Perfil de microdureza do cordão de solda laminado comparando todos os experimentos.....	88
Figura 5.13 – Diferença entre as microdurezas média de cada experimento.	89
Figura 5.14 – Perfil de microdureza do cordão de solda comparando o cordão nas condições rebarbado e laminado do experimento I.....	91
Figura 5.15 – Perfil de microdureza do cordão de solda comparando o cordão nas condições rebarbado e laminado do experimento III.	92
Figura 5.16 – Perfil de microdureza do cordão de solda comparando o cordão nas condições rebarbado e laminado do experimento V.	92

Figura 5.17 – Diferença entre os valores médio de microdureza para o experimento I nas condições rebarbado e laminado.....	93
Figura 5.18 – Diferença entre os valores médio de microdureza para o experimento III nas condições rebarbado e laminado.	94
Figura 5.19 – Diferença entre os valores médio de microdureza para o experimento V nas condições rebarbado e laminado.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores típicos para tempo de soldagem para os processos STTC e STTRP [9]	17
Tabela 2.2 – Valores de pressão de recalque para várias classes de ligas metálicas [11].	27
Tabela 2.3 – Efeito das variáveis de soldagem na qualidade da solda obtidas pelos processos STTC e STTRP [11].	43
Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas do aço USI-RW-550.	44
Tabela 2.5 – Comparativo da composição química e propriedades mecânicas do aço USI-RW-550 com os aços SAE J1392 Grau 070 X e SAE J2340 Grau 490 X.	45
Tabela 4.1 – Composição química do aço USI-RW-550 utilizado no experimento.....	51
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do aço USI-RW-550 utilizado no experimento.....	52
Tabela 4.3 – Ficha técnica do equipamento de soldagem [20].....	53
Tabela 4.4 – Parâmetros de sistema utilizados nos experimentos.	57
Tabela 4.5 – Parâmetros básicos utilizados nos experimentos.....	57
Tabela 4.6 – Parâmetros de forjamento programados no controlador da máquina.	59
Tabela 4.7 – Parâmetros de limite de deslocamento utilizados nos experimentos.	60
Tabela 5.1 – Características das linhas de fluxo dos materiais.	76

Tabela 5.2 – Quantidade de material consumido.	82
Tabela 5.3 – Resultados dos testes de dobramento.	83
Tabela 5.4 – Resultados das análises de variância e testes de hipóteses.	86
Tabela 5.5 – Valores médio de microdureza Vickers dos cordões de solda laminados.	87
Tabela 5.6 – Resultados das análises de variância e testes de hipóteses para todos os experimentos dos cordões laminados.	88
Tabela 5.7 – Valores médio de microdureza Vickers dos cordões de solda rebarbados e laminados dos experimentos I, II e V.	90
Tabela 5.8 – Resultados das análises de variância e testes de hipóteses para todos os experimentos I, III e V comparando os cordões rebarbados versus laminados.	91

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

- ARBL: Alta Resistência – Baixa Liga
- STTC: Soldagem Topo-a-Topo por Centelhamento
- STTRP: Soldagem Topo-a-Topo por Resistência Pura
- FW: Flash Welding
- AWS: American Welding Society
- UW: Upset Welding
- Ts: Temperatura Solidus
- SAE: Society of Automotive Engineers
- CE: Carbono Equivalente
- IIW: International Institute of Welding
- TMCR: Thermomechanical Controlled Rolling
- IACS: International Annealed Copper Standard
- MB: Metal de Base
- ZAC: Zona Afetada pelo Calor
- ZC: Zona de Coalescência
- LCS: Linha Central da Solda
- RWMA: Resistance Welding Manufacturing Alliance

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	II
AGRADECIMENTOS.....	III
CURRICULUM VITAE.....	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	XVII
SUMÁRIO.....	XVIII
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AROS PARA RODAS DE AÇO AUTOMOTIVAS.....	3
2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SOLDAGEM.....	6
2.2.1 LIGAÇÃO ATÔMICA.....	6
2.2.2 FORMAÇÃO DA JUNTA SOLDADA.....	8
2.3 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA TOPO-A-TOPO.....	11
2.3.1 FUNDAMENTOS.....	11
2.3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA TOPO-A-TOPO APLICADOS A FABRICAÇÃO DE AROS.....	16
2.3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR CENTELHAMENTO.....	18
2.3.3.1 FUNDAMENTOS.....	18
2.3.3.2 ETAPAS DO PROCESSO.....	19

2.3.3.3 APLICAÇÕES.....	21
2.3.3.4 EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR CENTELHAMENTO.....	22
2.3.3.5 VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	24
2.3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR RESISTÊNCIA PURA....	28
2.3.4.1 FUNDAMENTOS.	29
2.3.4.2 ETAPAS DO PROCESSO.....	30
2.3.4.3 APLICAÇÕES.....	38
2.3.4.4 EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR RESISTÊNCIA PURA.....	38
2.3.4.5 VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	39
2.3.5 QUALIDADE DA SOLDA OBTIDA PELOS PROCESSOS STTC E STTRP.	40
2.4 AÇO USI-RW-550 PARA FABRICAÇÃO DE AROS.....	44
2.4.1 MICROESTRUTURA.....	46
2.4.2 SOLDABILIDADE.....	47
3. OBJETIVOS.....	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1 MATERIAIS.	50
4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.	53
4.2.1 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.	53
4.2.2 ELETRODOS.	53
4.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	54
4.3.1 PARÂMETROS DE SISTEMA.	57
4.3.2 PARÂMETROS BÁSICOS.....	57

4.3.3 PARÂMETROS DE FORJAMENTO.....	58
4.3.3.1 PARÂMETROS PARA LIMITE DE DESLOCAMENTO.....	60
4.3.4 ÂNGULO DAS LINHAS DE FLUXO DE MATERIAL.....	60
4.3.5 QUANTIDADE DE MATERIAL EXPELIDO PARA FORA DA JUNTA.....	61
4.3.6 CRITÉRIOS PARA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA.....	62
4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	64
4.4.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	64
4.5 ENSAIOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DA JUNTA SOLDADA.....	65
4.5.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	65
4.5.1.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	66
4.5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA.....	67
4.5.2.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE MICRODUREZA.....	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
5.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES MICROESTRUTURAIS.....	68
5.1.1 MICROESTRUTURA DA SEÇÃO TRANSVERSAL À LINHA CENTRAL DA SOLDA.....	68
5.1.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS LINHAS DE FLUXO.....	75
5.1.2.1 QUANTIDADE DE MATERIAL EXPELIDO PARA FORA DA JUNTA.....	82
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	83
5.2.1 RESULTADOS DOS TESTES DE DOBRAMENTO.....	83
5.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	85
5.2.2.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE HIPÓTESE DOS RESULTADOS ..	85

5.2.2.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIO DE MICRONDUREZA VICKERS DOS CORDÕES DE SOLDA NA CONDIÇÃO LAMINADO DE TODOS OS EXPERIMENTOS	87
5.1.4.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIO DE MICRONDUREZA DOS CORDÕES DE SOLDA NAS CONDIÇÕES REBARBADO E LAMINADO DOS EXPERIMENTOS I, III E V.	90
6. CONCLUSÕES.....	96
<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.</i>	98
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	99

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

Com a demanda cada vez maior por redução de peso nos automóveis, e consequente redução no peso de seus componentes, a aplicação de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) na fabricação de rodas de aço, tem sido cada vez mais frequente. Com a utilização destes aços, é possível reduzir a espessura dos componentes da roda, principalmente o aro, sem comprometer a resistência mecânica aos esforços que a roda sofre durante sua utilização, segundo Younger [1], dependendo dos esforços a que um componente é submetido, utilizando um aço com limite de escoamento de 480 MPa, pode-se ter uma redução de peso de, no mínimo, 34% quando comparado a um aço com limite de escoamento de 200 MPa, figura 1.1.

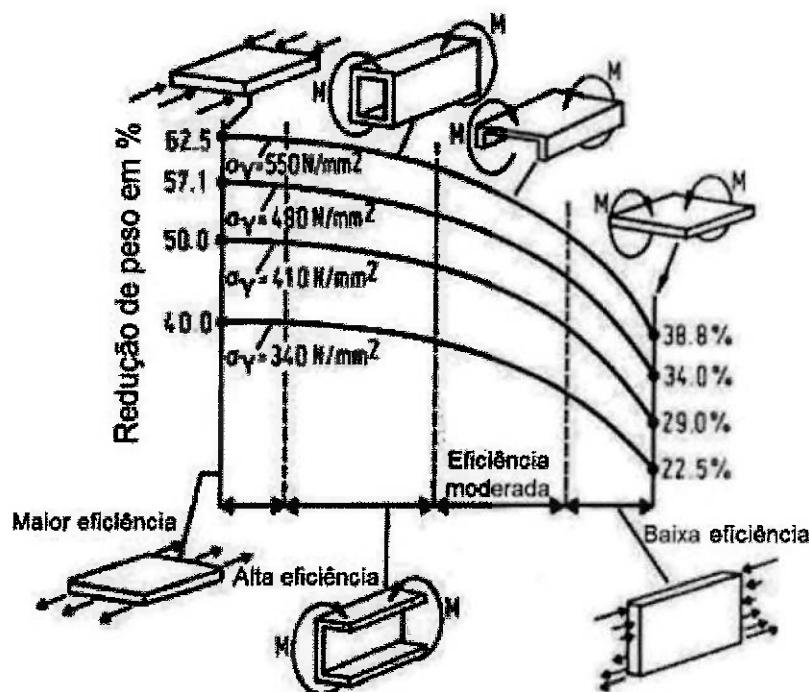


Figura 1.1 – Potenciais ganhos de peso quando se substitui um aço de 200MPa de limite de resistência, por um aço de ARBL [1].

Devido a estes motivos é crescente o número de novos projetos onde a utilização de aços de alta resistência e baixa liga é requerida.

A utilização destes aços requer técnicas e conhecimentos diferentes dos já utilizados e praticados na manufatura de rodas com aços de baixa resistência, principalmente no que diz respeito a soldagem destes aços na fabricação de aros, se os parâmetros e técnicas de soldagem não forem desenvolvidos e ajustados corretamente, a ocorrência de peças defeituosas, durante o processo de soldagem dos aros, pode ser alta chegando até a 30% das peças produzidas, e atualmente, devido a busca constante por redução nos custos de produção, a indústria de rodas de aço automotivas trabalha com índices de sucata, relacionados a defeitos originários no processo de soldagem, em torno 200 PPM ou 0,02% das peças produzidas, o que é um número bastante razoável já que uma das maiores indústrias no âmbito nacional produz em média 45.000 rodas diariamente.

O processo de soldagem por resistência pura, aplicado na fabricação de aros, apresenta muitas vantagens, tais como: preparação da junta simplificada, altas taxas de produção e boa qualidade da junta soldada.

A quantidade de variáveis envolvidas no processo de soldagem por resistência pura dos aros é muito grande, por este motivo, neste trabalho foi estudada a influência da quantidade de recalque, pois esta variável atualmente é determinada empiricamente e sua influência na ocorrência de trincas ainda é desconhecida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AROS PARA RODAS DE AÇO AUTOMOTIVAS.

A roda de aço automotiva é dividida nas seguintes partes, conforme figura 2.1:



Figura 2.1 – Roda montada e seus componentes: aro e disco.

Neste trabalho será estudado o processo de fabricação do aro, mais especificamente o processo de soldagem dos aros.

O processo de fabricação de aros consiste basicamente dos seguintes passos, ilustrados na figura 2.2:

1. Desenrolar a bobina de aço e cortá-la em retângulos;
2. Calandrar os retângulos e formar o anel, as faces cortadas do retângulo se tornam a junta de solda;

3. Soldar o anel topo-a-topo pelo processo de soldagem por resistência (por centelhamento ou resistência pura);
4. Usinar o excesso de material recalcado durante a soldagem no cordão de solda;
5. Laminar o cordão de solda;
6. Usinar o excesso de cordão de solda nas laterais do anel soldado;
7. Expandir o anel soldado através do processo de conformação conhecido como "operação do V";
8. Laminar o anel soldado para obter o perfil desejado;
9. Calibrar o aro;
10. Testar estanqueidade do aro,
11. Executar o furo para alojamento da válvula de ar.

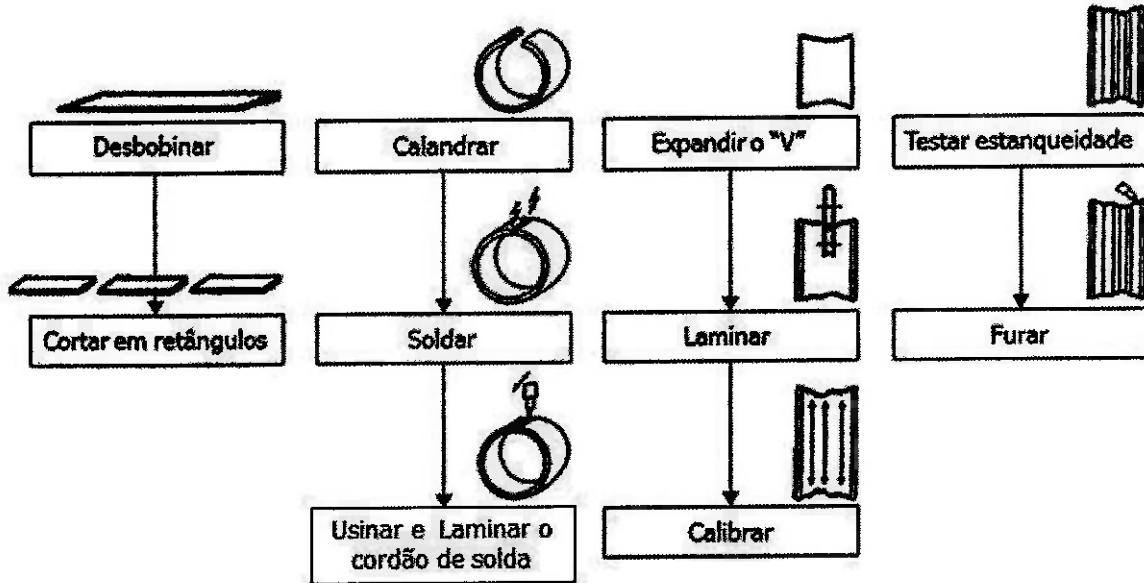


Figura 2.2 – Esquema ilustrativo do processo de fabricação de um aro para roda de aço automotiva [2].

Até antes da operação de laminação, o aro recebe a nomenclatura de anel soldado devido ao seu formato de anel que ainda não passou pelas etapas de laminação, neste trabalho será utilizada a nomenclatura de anel soldado já que as fronteiras do estudo serão do processo de soldagem até o processo de expansão denominado “operação do V”.

A figura 2.3 mostra imagens do anel antes da soldagem até a operação de laminar o cordão de solda, destacando a região onde ocorre a soldagem.

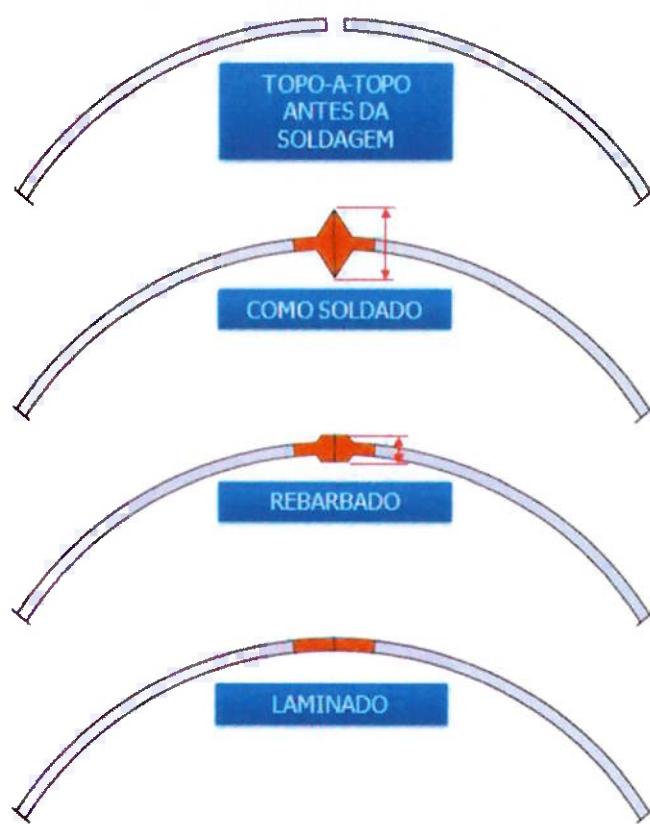


Figura 2.3 – Condições do cordão de solda antes e após o processo de soldagem.

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SOLDAGEM.

2.2.1 LIGAÇÃO ATÔMICA.

Segundo Messler [3] *soldagem é um processo em que materiais do mesmo tipo fundamental ou classe são reunidos de forma a promover uma união (e tornar-se um) através da formação de ligações primárias (e ocasionalmente secundárias), sob a ação combinada de calor e pressão.*

Para entender como ocorre a soldagem, é necessário entender quais os mecanismos envolvidos na ligação entre os átomos.

Quando dois átomos estão separados, eles não sentem a presença um do outro, sendo assim, não há força de atração ou repulsão entre eles, conforme eles se aproximam uma força de atração eletrostática ou Coulombiana, surge entre o núcleo carregado positivamente e a nuvem de elétrons com carga negativa, esta força de atração aumenta com a aproximação dos átomos, figura 2.4.

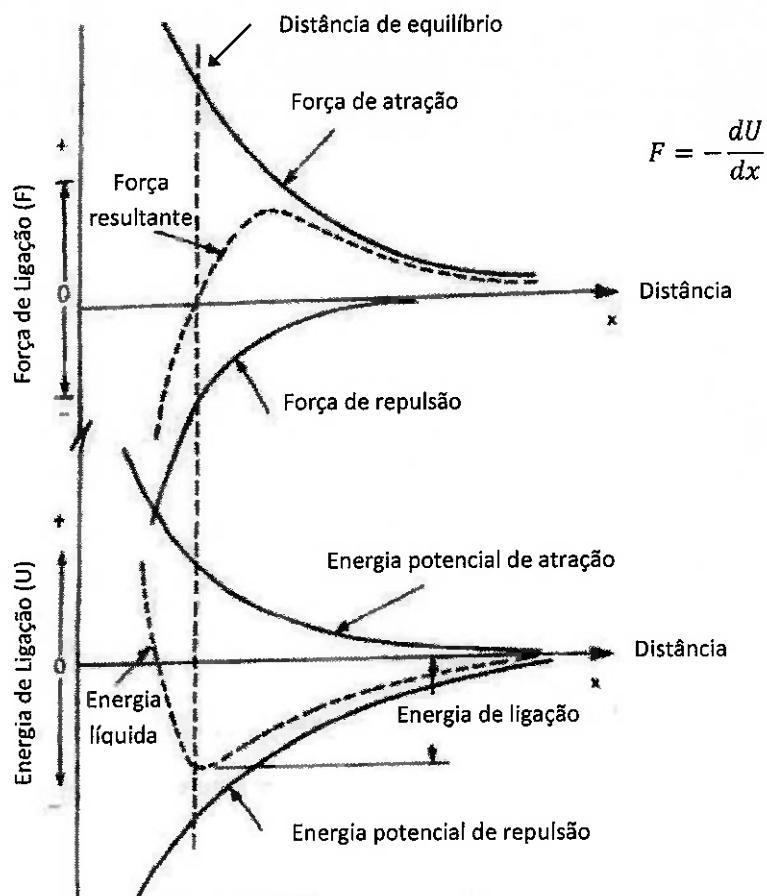


Figura 2.4 – Forças e energias potenciais envolvidas na formação de ligações [3].

A distância entre dois átomos é determinada pelo balanço das forças atrativas e repulsivas, quanto mais próximos os átomos, maior a força atrativa entre eles, mas maior ainda são as forças repulsivas devido a sobreposição das camadas mais internas.

Quando a soma das forças atrativas e repulsivas é zero, estas forças se combinam para criar uma força resultante, neste ponto os átomos estão na chamada distância de equilíbrio interatômico, nesta distância a energia

potencial líquida é mínima, o agregado de átomos¹ é estável, e os átomos estão ligados. Quando todos os átomos agregados estão na distância de equilíbrio, cada um alcança uma condição de equilíbrio nas camadas externas através do compartilhamento de elétrons (ligações covalentes ou metálicas) ou através da transferência de elétrons (ligações iônicas).

A tendência dos átomos se ligarem é a base fundamental da soldagem, tudo que é necessário para obter uma solda é trazer os átomos para sua distância de equilíbrio em número suficiente para formação de agregados atômicos [3]. Para metais este agregado atômico é cristalino, eles se organizam em redes cristalinas, o resultado da soldagem é a continuação destas redes cristalinas.

2.2.2 FORMAÇÃO DA JUNTA SOLDADA.

Em condições ideais: duas superfícies planas, livres de oxidação, imperfeições como rugosidades e sujeiras como óleo; bastaria aproximar estas superfícies para que ocorresse a ligação atômica entre elas, haveria formação de ligações e a máxima força de ligação seria alcançada, figura 2.5a, b, porém em condições reais, dois materiais nunca têm uma superfície ideal; rugosidades, óxidos, óleo, e outros tipos de contaminações, sempre estão presentes e somente poucos átomos podem realmente ser trazidos à distância

¹ Agregado de átomos: Em química, um agregado atômico frequentemente designado pelo termo inglês “cluster” é um grupo de átomos ligados, de tamanho intermediário entre uma molécula e um sólido de grande tamanho, massa ou volume.

de equilíbrio para formar uma ligação, por este motivo isso uma junta soldada não pode ser obtida somente pela aproximação das superfícies [3].

Para que ocorra a união dos materiais, é necessário que estas imperfeições, óxidos e contaminações sejam retirados da superfície dos materiais. Existem duas formas de eliminar estas impurezas e imperfeições, a primeira é através da aplicação de calor, a segunda é através da aplicação de pressão.

O calor promove a soldagem em diferentes formas:

- No estado sólido, o aquecimento devido ao calor elimina camadas adsorvidas de gases ou umidade, quebra a camada frágil de óxidos ou contaminantes orgânicos, diminui a tensão de escoamento do material proporcionando deformação plástica sob pressão, trazendo mais átomos em contato íntimo nas interfaces, figura 2.5d-g.
- Outra forma de promover a soldagem através do aquecimento por calor é através da fusão dos materiais, a fusão permite a reorganização dos átomos através do fluxo de fluido, com isso aproximando-se da distância de equilíbrio e também através da fusão de um material de adição de composição química igual ou compatível com o material de base, provendo com isso uma quantidade maior de átomos para preencher a junta, figura 2.5h.

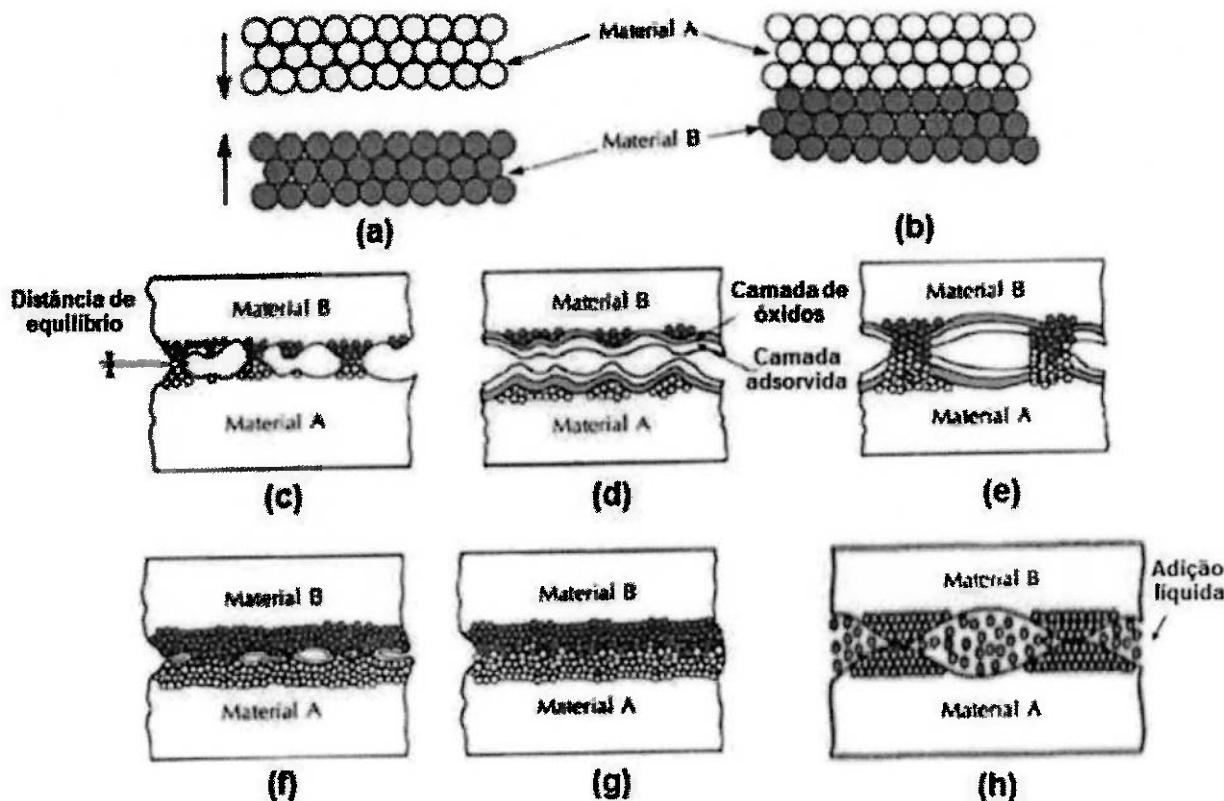


Figura 2.5 – Duas superfícies ideais e duas superfícies reais unidas para formar uma solda. Superfície ideal (a) para produzir uma solda ideal (b). Vários tipos de superfícies reais (c, d) sendo pressionadas (e, f) para formar uma união quase perfeita (g). Fusão para prover uma adição de átomos e produzir uma união quase perfeita (h) [3].

Utilizando pressão, a soldagem pode ocorrer das seguintes formas:

- Através do rompimento das camadas de umidade ou de gases adsorvidos por deformação macro ou microscópica;
- Quebra das camadas frágeis de óxidos ou contaminantes
- Deformação plástica das rugosidades e imperfeições superficiais com o objetivo de aumentar o número de átomos em contato, figura 2.5e.

A quantidade necessária de calor e pressão para unir os materiais, varia.

Altas taxas de calor e baixa ou nenhuma pressão podem unir os materiais

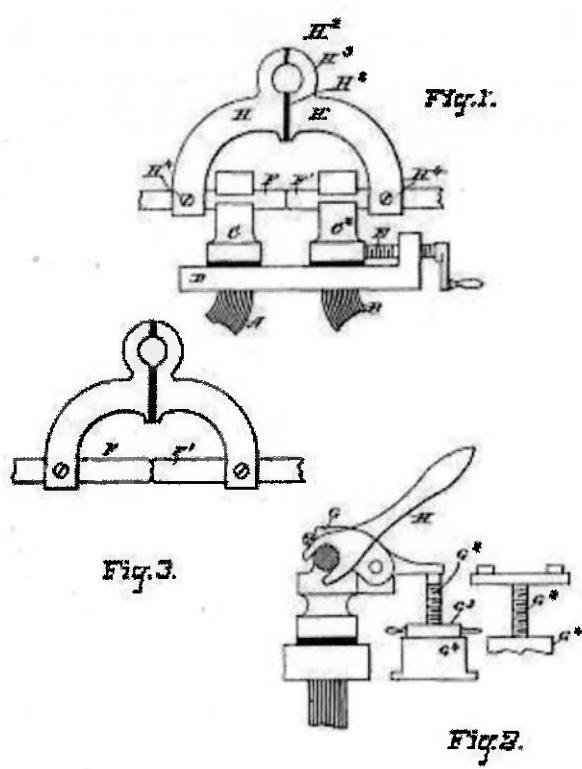
através de altas taxas de difusão no estado sólido a elevadas temperaturas ou no estado líquido por fusão. Altas pressões e baixo ou nenhum calor podem produzir união atômica deformando os átomos plasticamente em escalas macro ou microscópicas, ou através da movimentação de átomos por difusão no estado sólido.

2.3 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA TOPO-A-TOPO.

2.3.1 FUNDAMENTOS.

A união das peças no processo de soldagem por resistência topo-a-topo é feita através da geração de calor pela passagem de corrente elétrica e pela aplicação de pressão [4], sem que haja adição de material, as peças a serem soldadas são partes de um circuito elétrico, onde a geração de calor ocorre nos pontos de contato.

Eliu Thomson foi o inventor e detentor da primeira patente relacionada a utilização do Efeito Joule para soldagem por resistência, a figura 2.6, mostra algumas imagens desta patente.



ATTEST:
John H. Lindley
Secretary

INVENTOR:
Eduard Thomsen
by H. L. Townsend
Attorney

Figura 2.6 – Desenhos da primeira patente relacionado a utilização de pressão e aquecimento por efeito Joule para soldagem por resistência [5].

A energia térmica total, gerada durante a passagem da corrente elétrica, pode ser calculada pela Lei de Joule:

$$Q = \frac{1}{J} \int_0^t I^2 R_T dt \quad (1)$$

Onde: $J = 4,185 \text{ J}$

I = corrente de soldagem (A)

R_T = conjunto de resistências elétricas (J)

dt = intervalo de tempo de passagem da corrente elétrica (s)

No processo de soldagem por resistência topo-a-topo, a peças a serem soldadas são fixadas por eletrodos e posicionadas de modo que haja contato entre toda a extensão de suas faces, no caso da soldagem de aros para rodas de aço, o anel é fixado em suas extremidades pelos eletrodos inferiores, figura 2.7.

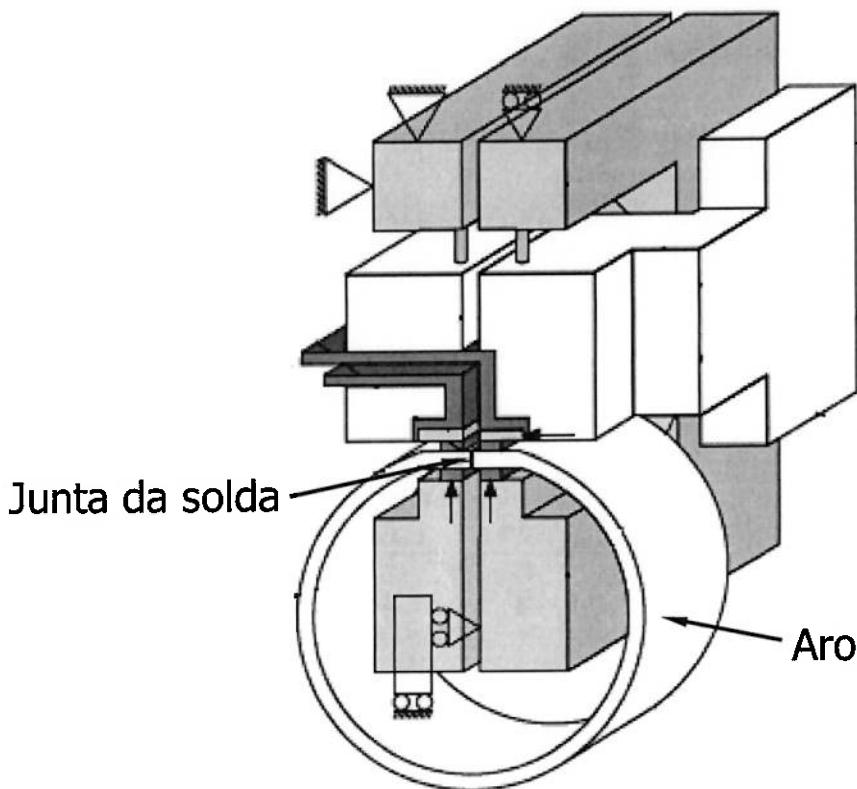


Figura 2.7 – Esquema da fixação do aro na máquina de soldagem [2]

As resistências de todo o circuito são importantes, devidos às elevadas correntes envolvidas, a resistência elétrica do conjunto é composta de seis resistências, conforme esquematizado na figura 2.8, sendo a resistência total dada pela somatória das resistências parciais:

$$R_T = \sum R_i \quad (2)$$

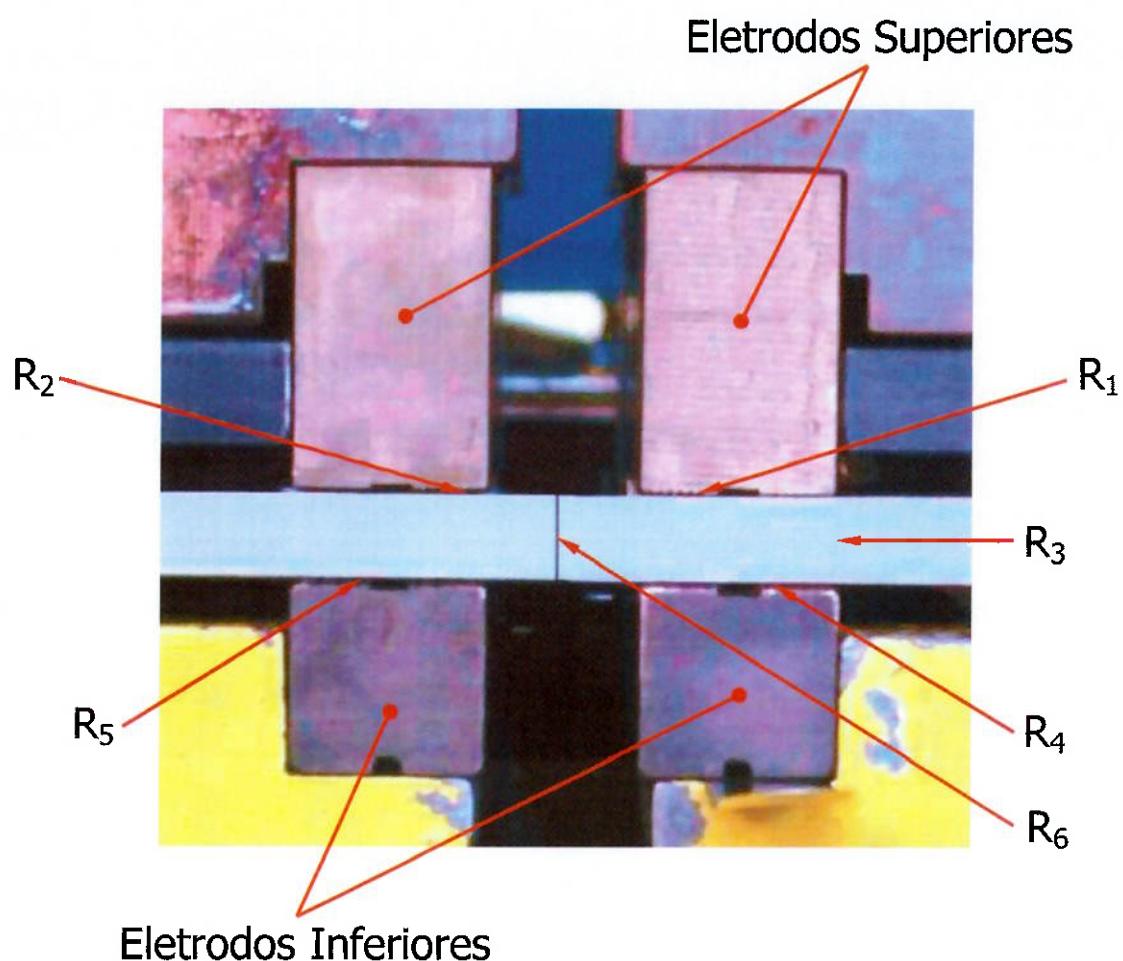


Figura 2.8 – Esquema das resistências elétricas na soldagem por resistência topo-a-topo. R_1 e R_2 : resistência de contato entre os eletrodos superiores e a peça. R_3 : resistência interna do material. R_4 e R_5 : resistência de contato entre os eletrodos inferiores e a peça. R_6 : resistência de contato entre as faces da peça [2].

Segundo Kerstens et al. [6], as resistências que contribuem para o aquecimento por efeito Joule, são a resistência interna do material, no caso R_3 e a resistência de contato, no caso R_6 que é a resistência mais importante do conjunto, porque nesse local ocorrerá a geração de calor para formação do cordão de solda.

Para que a influência das outras resistências envolvidas no processo sejam as menores possíveis, os eletrodos são fabricados com materiais ligados

com Cobre, e refrigerados para oferecer a menor resistência possível a passagem de corrente elétrica e consequentemente direcionar todo o calor produzido diretamente para junta da solda.

O aquecimento gerado pelo efeito Joule diminui o módulo de elasticidade do material, diminuindo consequentemente a tensão de escoamento σ_y , com esta redução na tensão de escoamento, figura 2.9, ao ser aplicada pressão na junta de solda, os átomos são trazidos para distância de equilíbrio, conforme discutido no capítulo 2.2.1, e acontece a soldagem, o processo de soldagem por resistência topo-a-topo utiliza um misto de pressão e calor para que ocorra a solda [7].

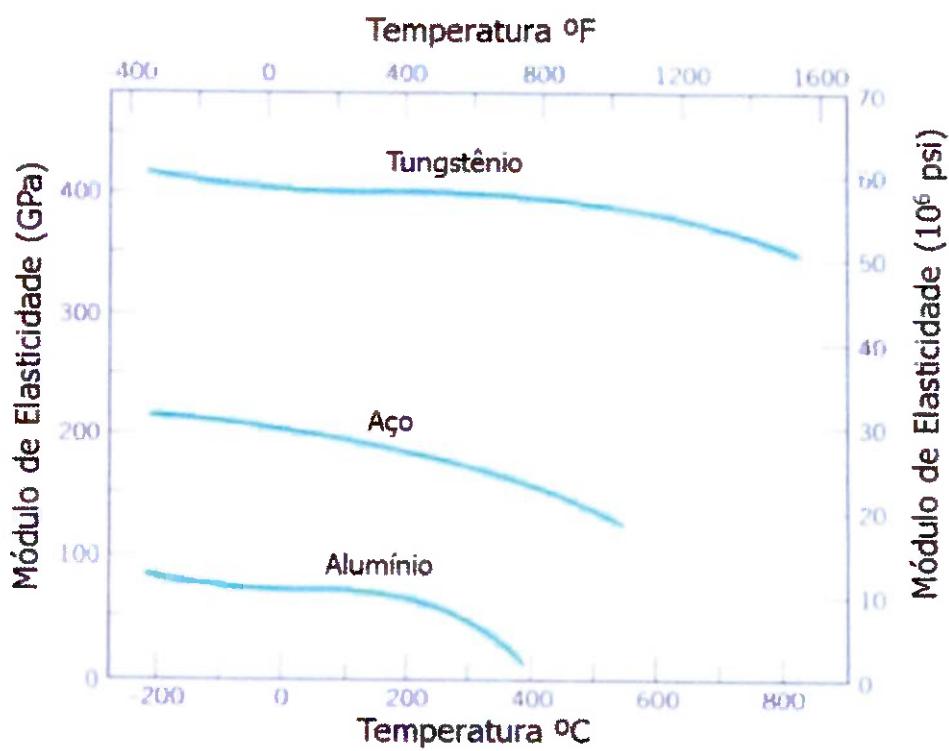


Figura 2.9 – Módulo de elasticidade versus temperatura para tungstênio, aço e alumínio [8].

2.3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA TOPO-A-TOPO APLICADOS A FABRICAÇÃO DE AROS.

Dois são os processos de soldagem utilizados na fabricação de aros para rodas de aço automotivas:

1. Soldagem topo-a-topo por centelhamento (STTC);
2. Soldagem topo-a-topo por resistência pura (STTRP).

Atualmente, o processo STTRP é o mais utilizado na indústria de rodas automotivas devido as vantagens que ele apresenta em relação ao processo STTC, estas vantagens, dentre outras, são as seguintes:

- Por não haver centelhamento, durante a soldagem, conforme ilustra a figura 2.10, não há geração de faíscas, resíduos sólidos e fumos, com isso não existe a necessidade de proteção para área onde está sendo realizada a soldagem e sistemas para extração de fumos do ambiente;
- Segundo Kucklick [9], o ciclo de soldagem pode ser até 123% menor dependendo da espessura do material, conforme dados da tabela 2.1.
- O desgaste dos eletrodos é menor no processo STTRP, valores práticos mostram que para um mesmo material de eletrodo, CuBe2, a durabilidade é, no mínimo, 50% maior, avaliando pela quantidade de peças soldadas com um conjunto de eletrodos (2 eletrodos superiores e 2 eletrodos inferiores). Esta durabilidade menor do eletrodo utilizado no processo STTC deve-se a necessidade de uma limpeza mecânica dos respingos que aderem nos eletrodos, utilizando uma barra de aço, a cada 10 peças soldadas, em média.

- A dimensão do retângulo é menor, pois não há perda de material com centelhamento durante a soldagem. Este é um dos fatores mais determinantes quando se avalia a troca de um processo por outro na indústria por estar relacionado diretamente com a quantidade de aço que será utilizado em cada aro.

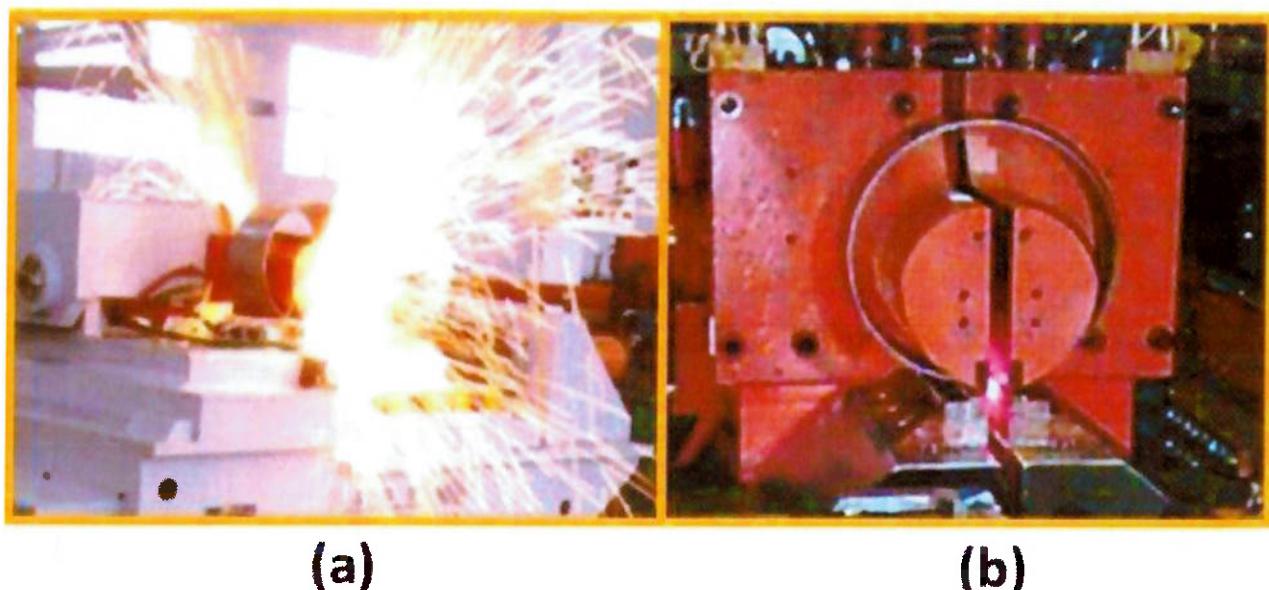


Figura 2.10 – Comparação da geração de faíscas do processo STTC (a) com o processo STTRP (b).

Tabela 2.1 – Valores típicos para tempo de soldagem para os processos STTC e STTRP [9].

ESPESSURA DO MATERIAL (mm)	TEMPO DE SOLDAGEM STTC (s)	TEMPO DE SOLDAGEM STTRP (s)
2,3	2,9	1,3
2,8	3,2	2,0
3,18	3,8	2,2
6,10	13,0	4,5

Nota: 1) Os tempos mostrados são referentes ao início do aquecimento até o final do recalque.

Apesar de todas estas vantagens, o processo STTRP apresenta algumas desvantagens em relação ao processo STTC, dentre elas as mais importantes estão relacionadas a necessidade de se ter uma qualidade da junta (qualidade do corte do retângulo) superior, em relação a uniformidade e deformação após a operação de corte do retângulo, e as condições da junta na operação de soldagem (folgas, alinhamento), porém as máquinas mais modernas utilizadas no processo STTRP possuem mecanismos e meios eletrônicos através de softwares que compensam estas possíveis desvantagens.

2.3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR CENTELHAMENTO.

2.3.3.1 FUNDAMENTOS.

Soldagem topo-a-topo por centelhamento, conhecido como Flash Welding (FW) na nomenclatura AWS, é um processo de soldagem por resistência, classificado pela norma AWS A3.0M/A3.0:2010 [10], como um processo por fusão, figura 2.11. Este processo de soldagem produz um cordão de solda nas superfícies sobrepostas de uma junta de topo pela ação de centelhamento e pela aplicação de pressão após o aquecimento. O centelhamento causado pelas altas densidades de corrente aplicadas em pequenos pontos de contato entre as duas peças, expele o material das faces da junta a medida que uma das faces move-se lentamente em direção à outra.

O ciclo de soldagem é completado com um rápido recalque entre as faces da junta.

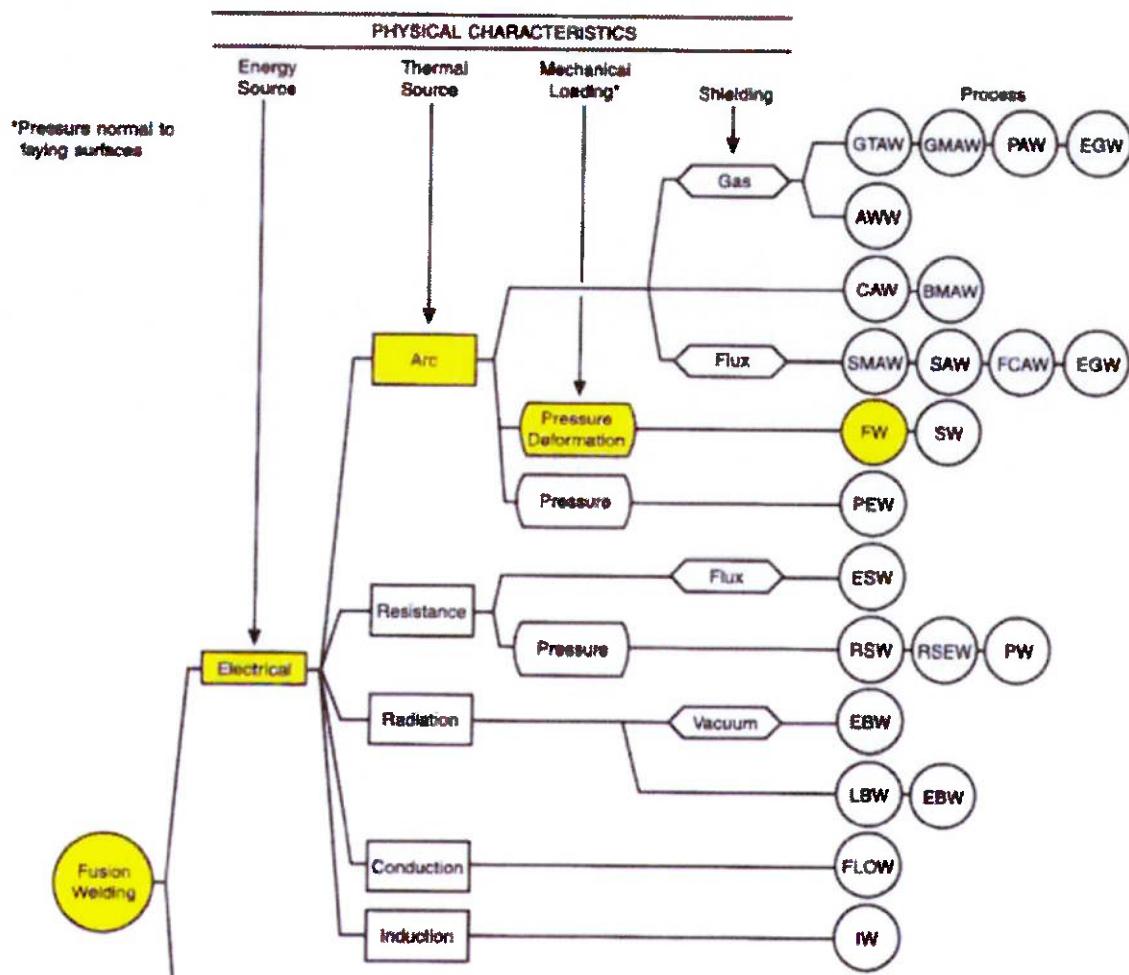


Figura 2.11 – Classificação do processo STTC conforme norma AWS A3.0M/A3.0:2010. Extraído de [10].

2.3.3.2 ETAPAS DO PROCESSO.

As etapas do processo são as seguintes, conforme ilustra a figura 2.12:

1. As peças a serem unidas são fixadas em eletrodos, um par superior e um par inferior, sendo que um destes pares, normalmente o inferior, é ligado ao secundário de um transformador da máquina de soldagem;

2. Tensão elétrica é aplicada quando um lado da junta avança em direção ao outro. As superfícies das juntas são irregulares, devido a rugosidades presentes na face da junta, e possuem camadas de óxidos e contaminações. Quando ocorre o contato entre estas rugosidades, ocorre o aquecimento devido à resistência a passagem de corrente elétrica (efeito Joule). Inicialmente, um ou vários pulsos de corrente podem ser aplicado para pré-aquecer as peças.
3. As peças são afastadas e a força é removida.
4. As faces da junta são aproximadas novamente, altas correntes são aplicadas causando a fusão e vaporização do metal nos pontos de contato, formando pequenos arcos elétricos, neste estágio ocorre o centelhamento. A corrente elétrica flui através destas rugosidades, elas rapidamente fundem e arcos ocorrem até que um pequeno volume de líquido é expulso para fora da interface. As camadas de óxidos e impurezas presentes na interface combinam com oxigênio criando uma atmosfera com baixo teor de oxigênio dentro da interface. O centelhamento nos pontos de contato aquece as regiões adjacentes. Qualquer óxido presente será expulso durante o centelhamento ou na operação final de recalque, onde estarão presentes na porção recalcada do material que será removida em operações posteriores.
5. As faces da junta continuam se aproximando com uma velocidade pré-determinada,

6. O centelhamento continua até que as superfícies sobrepostas estejam cobertas com metal fundido e uma pequena área de cada face da junta atinja a temperatura de forjamento
7. Após atingir esta temperatura é aplicada a pressão de recalque trazendo as faces em contato íntimo, até a distância de equilíbrio atômica, onde ocorre o forjamento e a concretização do cordão de solda.
8. O material recalcado, ainda quente, é removido através da usinagem do cordão de solda.

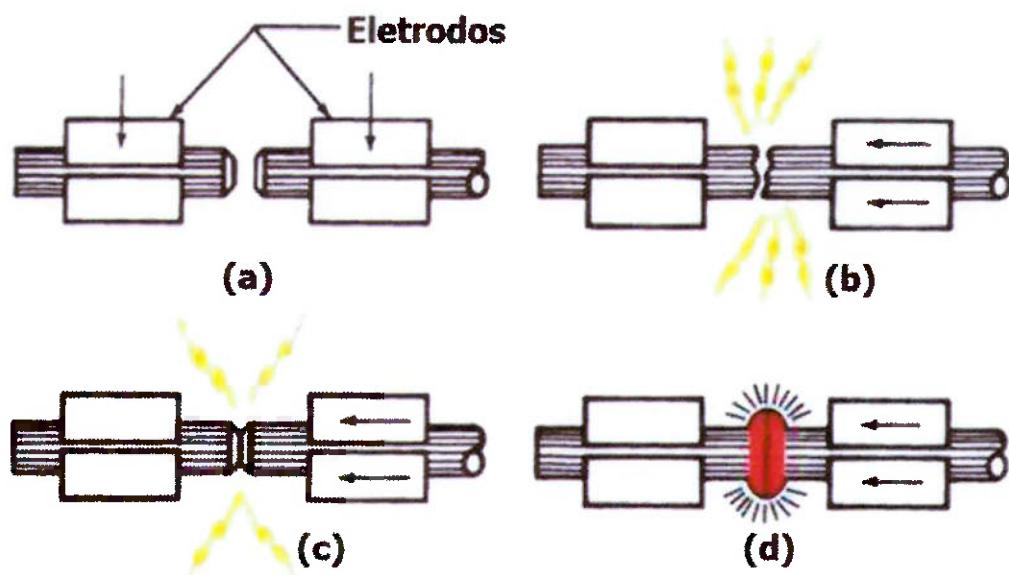


Figura 2.12 – Etapas do processo STTC [11].

2.3.3.3 APLICAÇÕES.

Vários tipos de materiais podem ser soldados através do processo STTC, dentre eles ferrosos, não ferrosos e materiais dissimilares [11].

Aço carbono, aços de baixa liga, aço inoxidável, ligas de alumínio, ligas de níquel e ligas de cobre podem ser soldadas com este processo, ligas de

titânio também podem ser soldadas, porém requerem proteção atmosférica com gás de proteção inerte para minimizar a fragilização. Materiais dissimilares podem ser soldados desde que suas características de recalque sejam similares.

A figura 2.13 ilustra uma soldagem de materiais dissimilares.

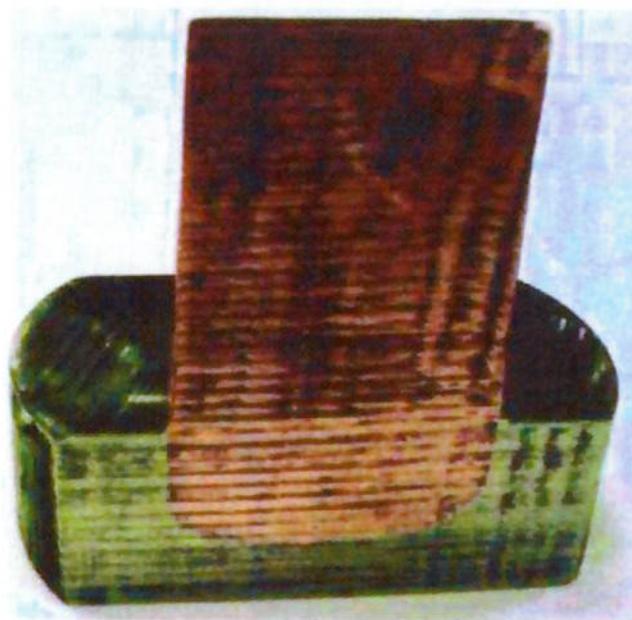


Figura 2.13 – Cobre com aço soldados pelo processo STTC [11].

Dentre os tipos de produtos soldados com o processo STTC, destacam-se: aros para rodas automotivas, tubulações para indústria de petróleo e trilhos de trem.

2.3.3.4 EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR CENTELHAMENTO.

Um equipamento para STTC consiste basicamente de seis componentes principais [11]:

1. Estrutura da máquina, onde estão montados os guias dos porta-eletrodos;
2. Os porta-eletrodos que são montados sobre os guias;
3. Dois conjuntos de mordentes, montados em cada porta-eletrodo para alinhar e fixar a peça;
4. Mecanismo de controle do deslocamento do eletrodo móvel
5. Transformador com ajuste de tap;
6. Sistema de controle da movimentação da peça e corrente de centelhamento.

A figura 2.14, ilustra os principais componentes de uma máquina para o processo STTC.

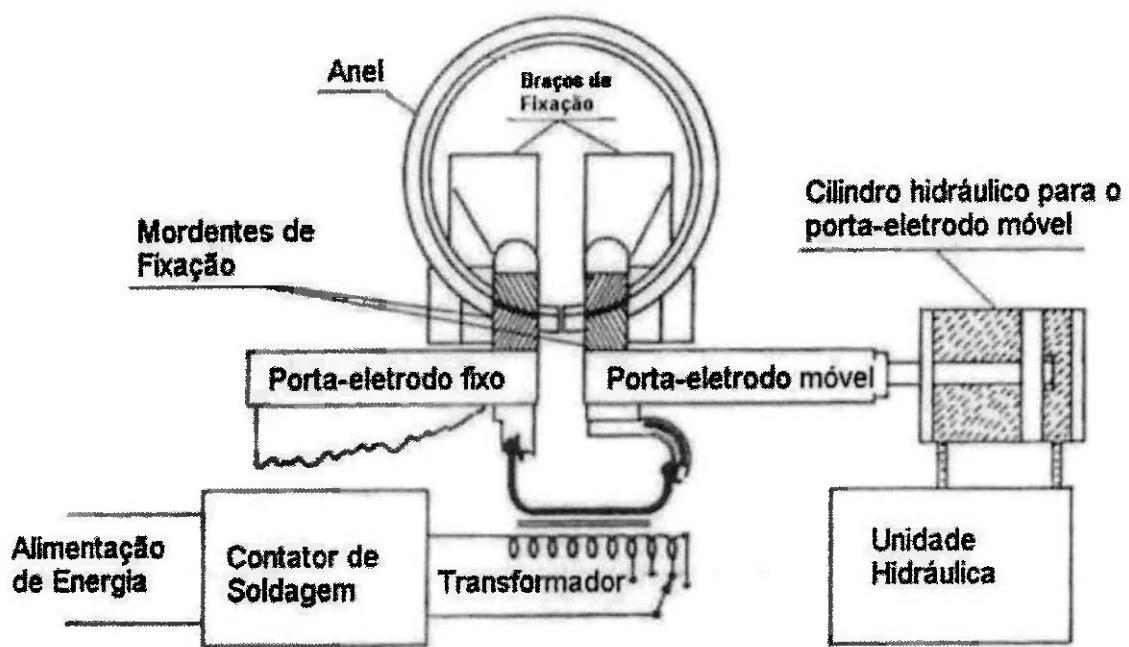
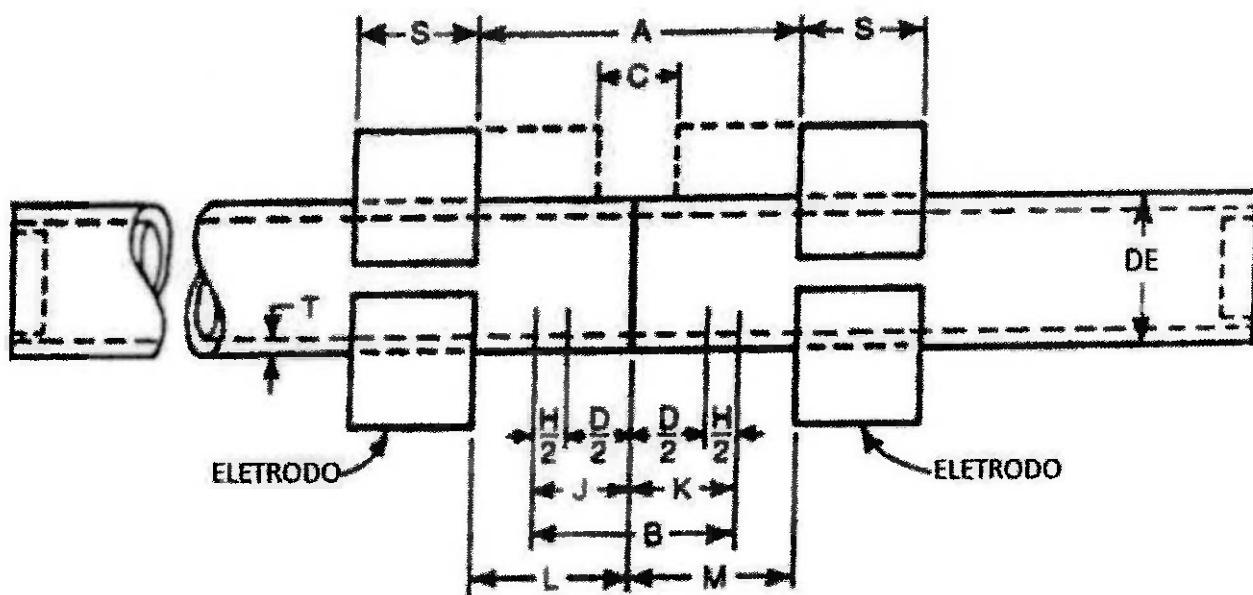


Figura 2.14 – Equipamento típico para STTC [12].

2.3.3.5 VARIÁVEIS DO PROCESSO.

O processo STTC possui variáveis dimensionais, elétricas, de força e de tempo. As variáveis dimensionais estão ilustradas na figura 2.15.



A = ABERTURA INICIAL	J = K = MATERIAL CONSUMIDO POR PEÇA
B = MATERIAL CONSUMIDO (CENTELHAMENTO E RECALQUE)	L = M = DIMENSÃO INICIAL DE CADA PEÇA
C = ABERTURA FINAL	DE = DIÂMETRO EXTERNO
D = MATERIAL CONSUMIDO POR CENTELHAMENTO	S = ÁREA MÍNIMA DE CONTATO COM ELETRODO
H = RECALQUE TOTAL	T = PARADE DO TUBO OU ESPESSURA

Figura 2.15 – Variáveis dimensionais para a STTC de tubos e chapas planas [11].

As principais variáveis do processo STTC, que são controladas e ajustadas no equipamento de soldagem, são [11]:

1. **Tensão de centelhamento:** a tensão de centelhamento é determinada por ajustes no circuito de derivação “*tap*” no transformador, quanto menor o valor de tensão, dentro de valores possíveis, melhor a qualidade

do centelhamento. Savage [13], cita valores práticos entre 2 e 16V para tensão de centelhamento, estes valores estão abaixo da diferença de potencial necessária para iniciar um arco elétrico na interface, portanto, o fluxo de corrente durante o centelhamento ocorre somente através do contato entre os picos das rugosidades das faces da junta.

2. **Tempo de centelhamento:** o centelhamento deve ocorrer dentro de um intervalo de tempo necessário para consumir a quantidade de material requerida. O intervalo de tempo necessário está relacionado com a tensão no secundário e a taxa de consumo de material durante o centelhamento, uma vez que a curva de centelhamento geralmente é parabólica, estas variáveis estão inter-relacionadas. Em qualquer caso, um centelhamento suave, para uma distância mínima de centelhamento dentro de um intervalo de tempo especificado, é necessário para produzir soldas de qualidade e sem defeitos.
3. **Recalque:** as variáveis de recalque controlam a taxa de compressão para execução do forjamento entre as faces aquecidas da junta [14], e são subdivididas em:

- a. **Ponto de desligamento da tensão de centelhamento:** em algumas aplicações, a tensão é desligada no momento em que se inicia o recalque, se a tensão for mantida após o início do recalque, ocorrerá aquecimento excessivo na junta, queima e deformação dos eletrodos, contudo com os modernos sistemas de controle, tensão e corrente podem ser mantidas a taxas precisas

durante o recalque, produzindo aquecimento uniforme da junta, auxílio no recalque, retardo na taxa de resfriamento em materiais temperáveis e diminuindo a tensão de escoamento do material.

b. **Taxa de recalque ou taxa de compressão:** o recalque é iniciado pela rápida aceleração da peça com o objetivo de unir as faces sobrepostas da junta. O metal fundido e os óxidos presentes nas faces da junta são expelidos para fora e a região aquecida da solda é recalculada. A taxa de recalque deve ser suficiente para expelir o metal fundido antes que ele se solidifique e para produzir um recalque adequado enquanto o metal tem plasticidade adequada. A máquina de soldagem deve aplicar força no eletrodo móvel para acelerar adequadamente o deslocamento da peça e vencer a resistência das peças à deformação plástica. A força requerida depende da área das faces da junta, do limite de escoamento do material aquecido e da massa do eletrodo móvel, a tabela 2.2, apresenta alguns valores usuais de pressão de recalque para alguns tipos de materiais.

c. **Distância de recalque:** a distância de recalque deve ser suficiente para: expulsar o metal líquido e os óxidos da junta e trazer toda a área das faces da junta em contato íntimo (distância de equilíbrio atômico). A quantidade de recalque necessária para se produzir uma solda sem defeitos, depende do tipo de material e da espessura da seção transversal. Uma extensão de recalque igual a 0,5 vezes a espessura da seção transversal deve ser

suficiente, entretanto algumas ligas resistentes ao calor podem requerer distâncias na ordem de 1 a 1,25 vezes a espessura [11].

- d. **Corrente:** o suprimento de corrente elétrica deve ser encerrado no final do recalque, caso a excesso de recalque seja usinado, o que ocorre na maioria das vezes, a corrente pode ser mantida por um tempo maior para alcançar a temperatura desejada para operação de usinagem.

Tabela 2.2 – Valores de pressão de recalque para várias classes de ligas metálicas [11].

CLASSIFICAÇÃO POR RESISTÊNCIA	EXEMPLOS DE LIGAS (classificação conforme SAE)	PRESSÃO DE RECALQUE	
		MPa	ksi
Baixo forjamento	SAE 1020, 1112, 1315 e aços designados como ARBL.	69	10
Médio forjamento	SAE 1045, 1065, 1335, 3135, 4130, 4140, 8620, 8630.	103	15
Alto forjamento	SAE 4340, 4640, 300M, aço ferramenta, 12% Cr e 18-8 aço inoxidável, titânio e alumínio.	172	25
Muito alto forjamento	Materiais com muito alta resistência a elevadas temperaturas, como A286, 19-9 DL, a base de níquel e ligas de cobalto.	241	35

2.3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR RESISTÊNCIA PURA.

Soldagem topo-a-topo por resistência pura, também conhecido como *Upset Welding* (UW), segundo classificação AWS, é um processo de soldagem que produz coalescência no estado sólido ao longo de toda a junta de solda, através do aquecimento, por efeito Joule, das áreas em contato, a pressão é utilizada para completar a soldagem [11].

Segundo a norma AWS A3.0M/A3.0:2010, este processo é classificado como um processo de soldagem no estado sólido, conforme apresentado na figura 2.16. Vários autores [2,6] classificam como um processo no estado sólido também. Messler [3] classifica como um processo por fusão. Esta divergência entre autores pode ser explicada pelas particularidades que o processo STTRP tem em relação a outros processos de soldagem por resistência como solda ponto, por exemplo, de qualquer forma neste presente trabalho será analisado se houve ou não fusão na solda.

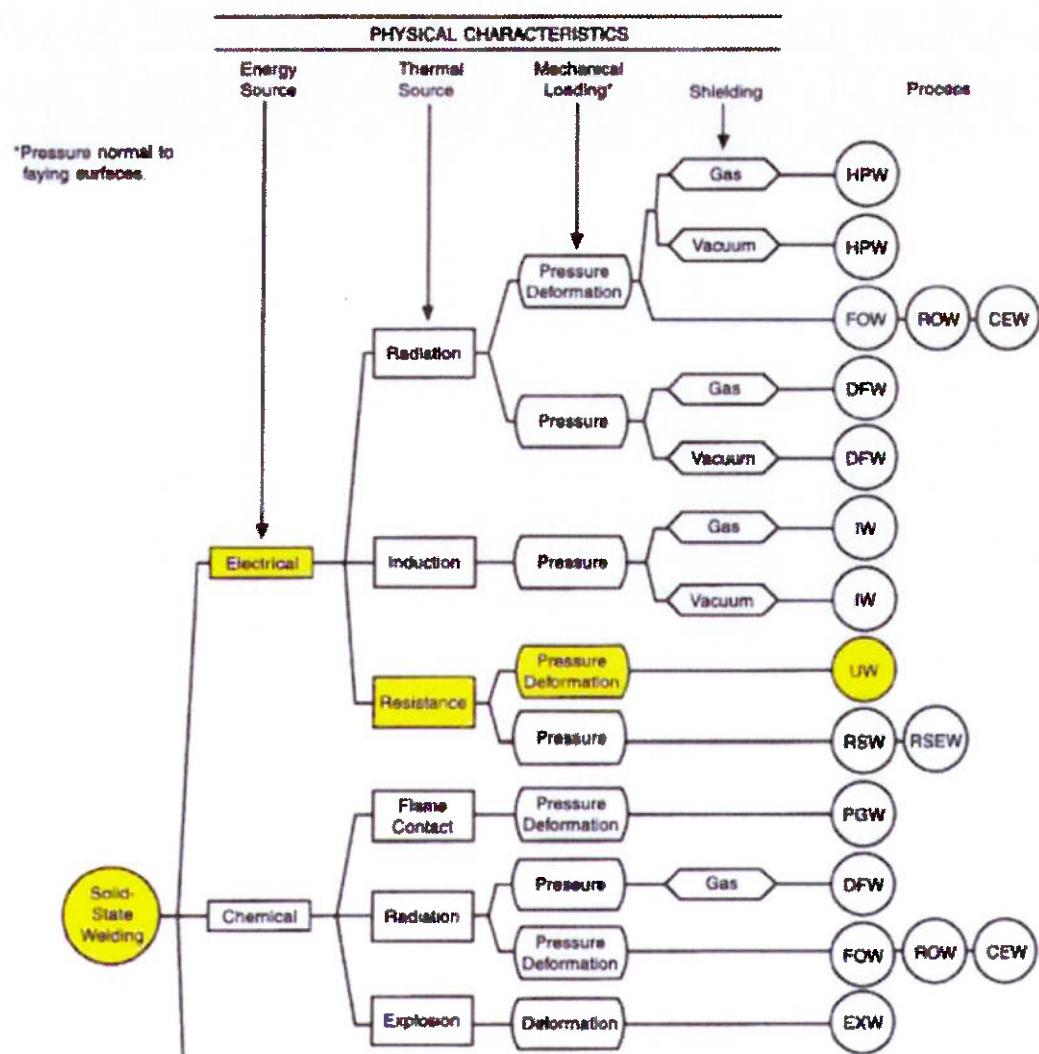


Figura 2.16 – Classificação do processo STTRP conforme norma AWS A3.0M/A3.0:2010. Extraído de [10].

2.3.4.1 FUNDAMENTOS.

Uma pequena força, necessária para aproximar as faces da junta, é aplicada, o metal é aquecido pela resistência à passagem de corrente elétrica (efeito Joule) até uma temperatura de recristalização que é alcançada rapidamente em toda interface da solda, a pressão de recalque acelera a recristalização, que auxilia na eliminação da interface entre as duas partes, formando uma união no estado sólido [11].

Durante o recalque certa quantidade de material é expelida para fora da junta, assim como óxidos e outras contaminações superficiais, que podem estar presentes na interface. A figura 2.17 ilustra uma seção transversal de uma solda realizada pelo processo STTRP em uma chapa.

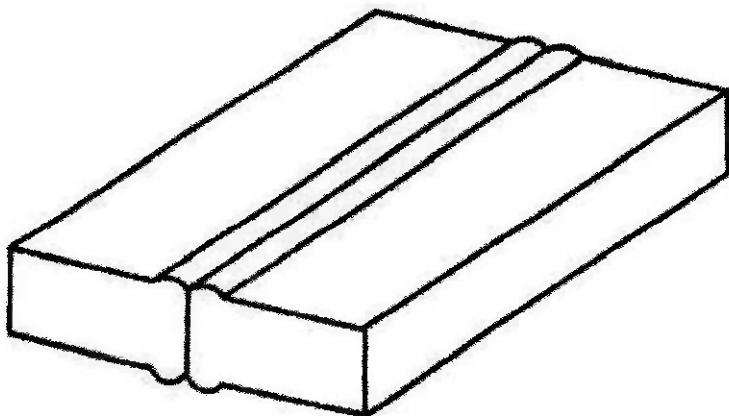


Figura 2.17 – Junta soldada pelo processo STTRP [11].

2.3.4.2 ETAPAS DO PROCESSO.

O processo STTRP pode ser dividido em cinco etapas [2]. A figura 2.18 ilustra uma curva típica de tempo versus deslocamento horizontal do eletrodo, mostrando estas etapas ou fases.

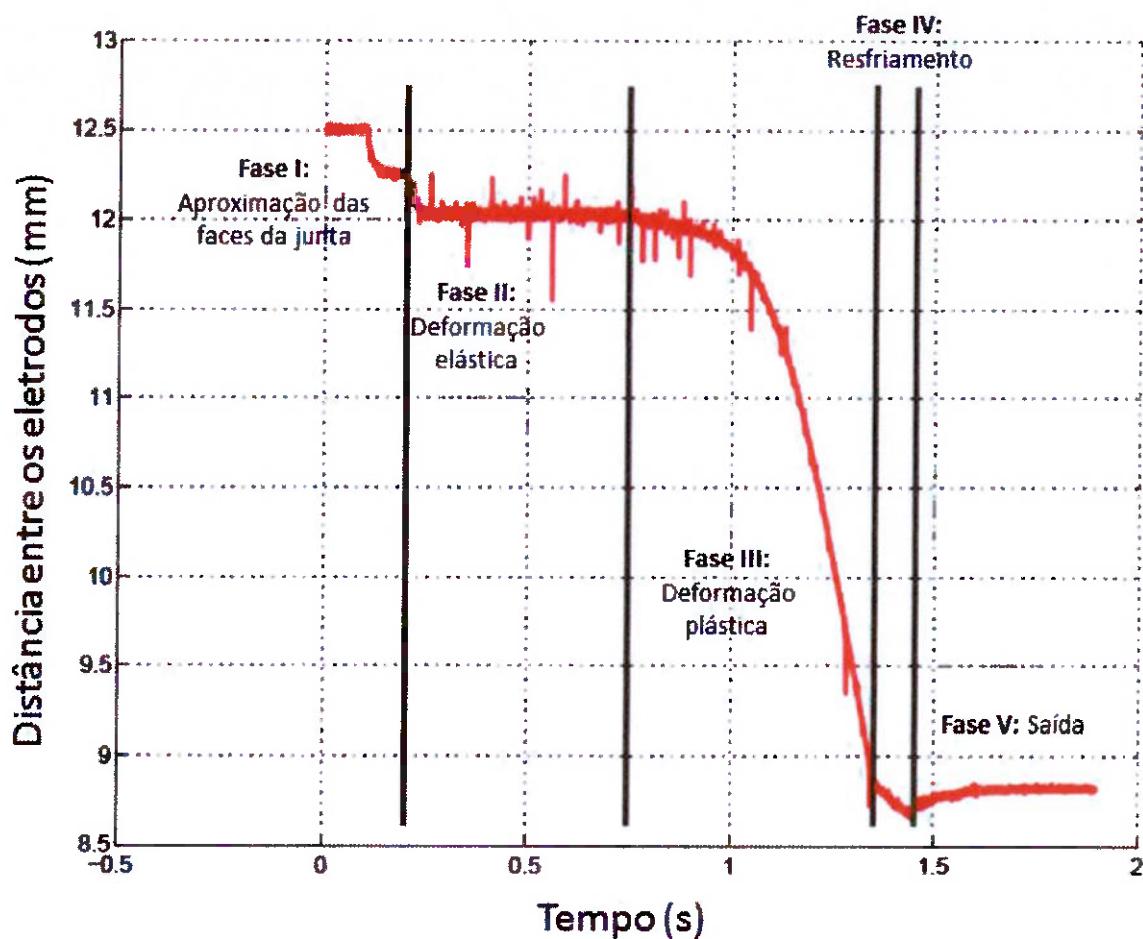


Figura 2.18 – Curva típica de deslocamento e posicionamento dos eletrodos durante a STTRP [2].

Detalhadamente, as fases do processo STTRP e as variáveis envolvidas são as seguintes:

- 1. Aproximação das faces da junta:** as peças são fixadas por dois eletrodos independentes, conforme ilustra a figura 2.19, com uma pressão de fixação com valores de aproximadamente 9 a 10 MPa, o eletrodo móvel aplica uma força de recalque constante. As faces da junta possuem irregularidades (rugosidades superficiais) oriundas do corte da chapa, devido a estas irregularidades, pontos de contato são formados. Quando ocorre a aplicação da força de recalque, a área de contato entre

as faces é menor do que a área total da seção transversal da junta. A pressão de recalque (força de recalque/área de contato) aumenta até o valor da tensão de escoamento do material σ_y , quando este valor é alcançado, as rugosidades das faces começam a deformar plasticamente, neste ponto a área de contato aumenta e a abertura entre as faces da junta diminui. A deformação dos pontos de contato é controlada pela pressão de recalque, se esta pressão se igualar a tensão de escoamento do material σ_y , iniciará a deformação plástica do material. Nesta etapa os valores práticos utilizados são de: 1 mm para o deslocamento e 0,2 s para o tempo de deslocamento [2].

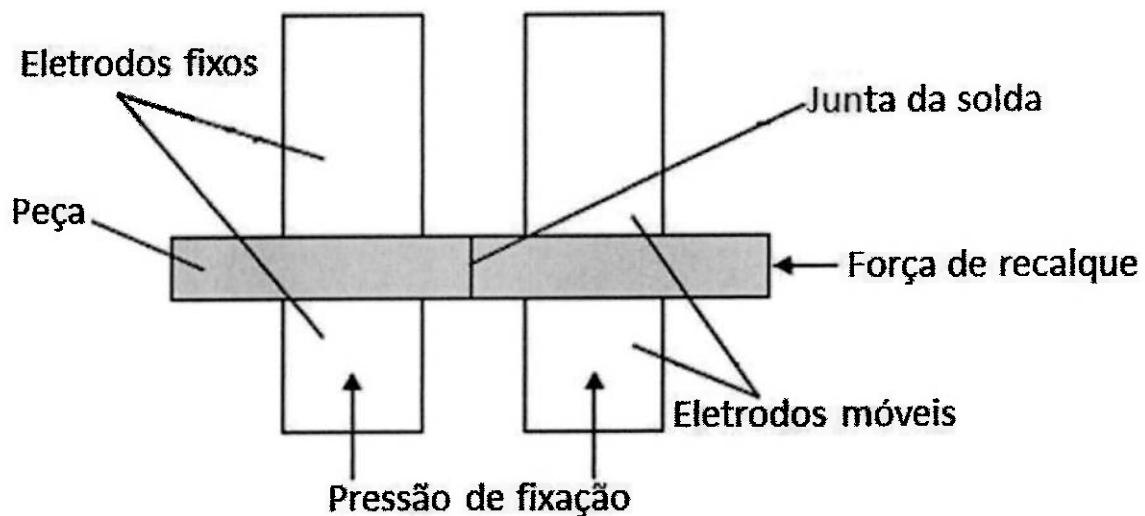


Figura 2.19 – Fase I: aproximação das faces da junta [2].

2. **Aquecimento:** quando as faces da junta estão em contato, corrente elétrica é suprida pelo secundário do transformador através dos eletrodos (superiores ou inferiores depende da configuração da máquina), conforme ilustra a figura 2.20, devido a área de contato entre

as faces da junta ser menor do que a seção transversal da peça, ocorre o aquecimento, por efeito Joule, devido a resistência a passagem da corrente elétrica, as resistências que contribuem para este aquecimento são as resistências de contato entre as faces e a resistência interna do material. A tensão de escoamento σ_y diminui com o aumento da temperatura, devido a esta diminuição, acontece um desequilíbrio entre a pressão de recalque e a tensão de escoamento do material, para reestabelecer este equilíbrio, a pressão de recalque é diminuída. Com o aquecimento, a área de contato entre as faces começa a aumentar até o ponto em que toda a face da junta está em contato, a partir deste ponto não há mais resistência a passagem da corrente nas faces da junta, a tensão de escoamento σ_y a partir deste ponto, passa a ser em função da área de contato, e o material começa a deformar plasticamente, a equação 3 relaciona a força de recalque com a área de contato da junta.

$$\sigma_y = \frac{F_R}{A_c} \quad (3)$$

Onde: F_R = força de recalque (N)

A_c = área de contato (mm^2)

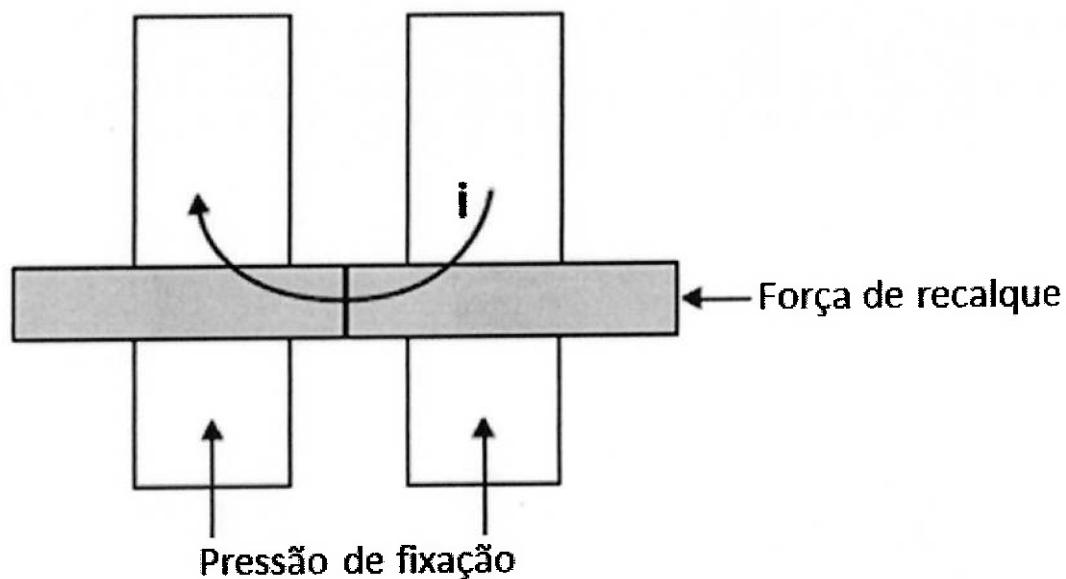


Figura 2.20 – Fase II: aquecimento devido a resistência à passagem de corrente elétrica [2].

3. Deformação plástica: o material próximo a junta de solda é aquecido a mesma temperatura que a faces da junta, neste ponto existe um equilíbrio entre a velocidade de deformação plástica e a temperatura de equilíbrio entre a peça e a junta de solda, este equilíbrio é acelerado pela pressão de recalque e pela corrente elétrica. Devido a deformação plástica o material é empurrado para fora da junta, conforme ilustra a figura 2.21, a quantidade de material que é empurrado é chamada de material recalcalado.

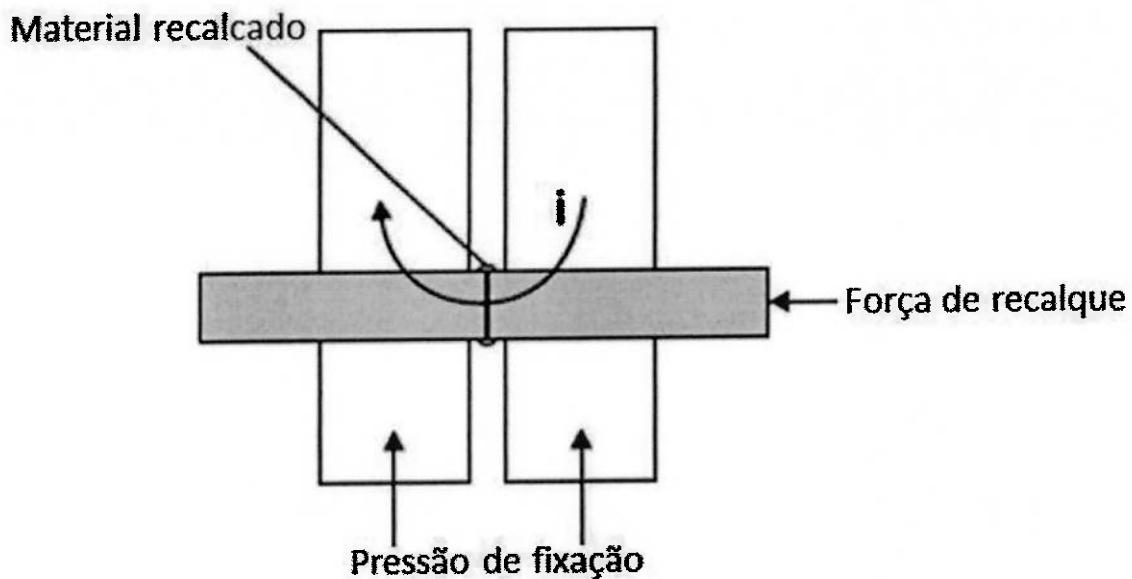


Figura 2.21 – Fase III: deformação plástica [2].

Segundo Messler [3] quando pressão é utilizada para unir os materiais através da deformação plástica, há um efeito localizado na microestrutura, este efeito depende da temperatura em que a pressão é aplicada e sobre a qual ocorre a deformação plástica. Para temperaturas 0,4 vezes a temperatura solidus, o material próximo a interface será deformado a frio, exibindo padrão característico de grãos deformados por encruamento. Se a temperatura exceder 0,4 vezes a temperatura solidus, por um tempo suficiente, o material próximo à interface sofrerá deformação plástica e imediatamente irá sofrer recristalização dinâmica, dependendo da temperatura. Logo que ocorre o deslocamento das discordâncias a energia de deformação do retículo cristalino aumenta, gerando uma força motriz para a recristalização, que ocorre instantaneamente. Esta recristalização é geralmente evidenciada por

uma microestrutura com grãos menores, adjacentes a interface da solda, conforme ilustra a figura 2.22.

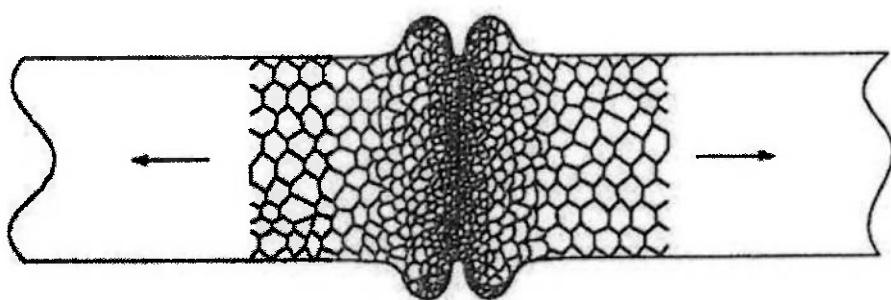


Figura 2.22 – Ilustração esquemática do efeito da recristalização dinâmica nas proximidades da interface da solda entre dois materiais unidos por pressão em temperatura maior que $0,4T_s$ [3].

4. Cura ou resfriamento: nesta fase a corrente de soldagem é interrompida e a força de recalque diminuída em etapas, conforme ilustra a figura 2.23, a primeira etapa de redução interrompe a deformação plástica, mas ainda mantém pressão na junta recém-formada, a segunda etapa previne que uma força com sentido contrário ao da força de recalque separe as peças, o resfriamento da peça ocorre por radiação e principalmente por condução já que os eletrodos são refrigerados à água.

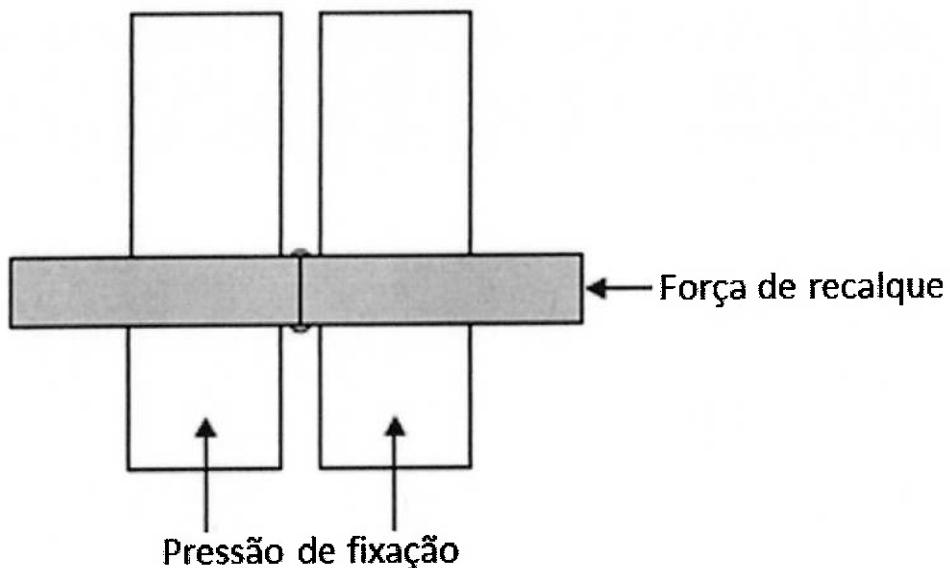


Figura 2.23 – Fase IV: cura ou resfriamento [2].

5. **Saída:** quando a temperatura é diminuída até valores baixos, não muito baixos, pois a solda ainda deve estar quente para o estágio de remoção do excesso de material recalcado, os eletrodos abrem, conforme ilustra a figura 2.24, e liberam a peça para o estágio de usinagem.

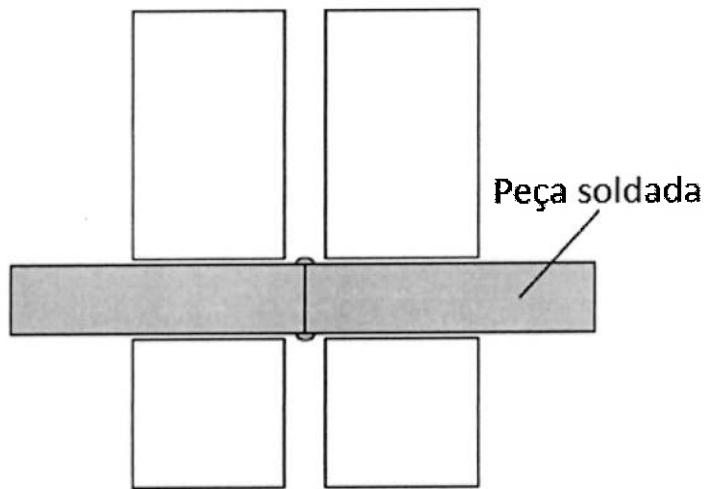


Figura 2.24 – Fase V: saída [2].

2.3.4.3 APLICAÇÕES.

Assim como no processo STTC, o processo STTRP pode ser aplicado a vários tipos de materiais, dentre eles, aço carbono, aços de baixa liga, aço inoxidável, ligas de alumínio, ligas de níquel e ligas de cobre.

Na indústria sua maior aplicação se encontra na soldagem de aros para rodas automotivas e tubulações em geral.

Uma das restrições à aplicação deste processo é quanto a preparação da junta para soldagem, que deve ser plana, relativamente uniforme e perpendicular a direção do recalque. A junta também deve estar livre de contaminações, óleo e oxidações aparentes, já que neste processo não existe a fase de centelhamento que expulsa estas contaminações e óxidos aparentes da superfície.

2.3.4.4 EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR RESISTÊNCIA PURA.

Os equipamentos para STTRP são bastante similares aos equipamentos para STTC, exceto pelo fato de não ser necessário nenhum mecanismo para o centelhamento, a figura 2.25 ilustra um equipamento utilizado para soldagem de aros.

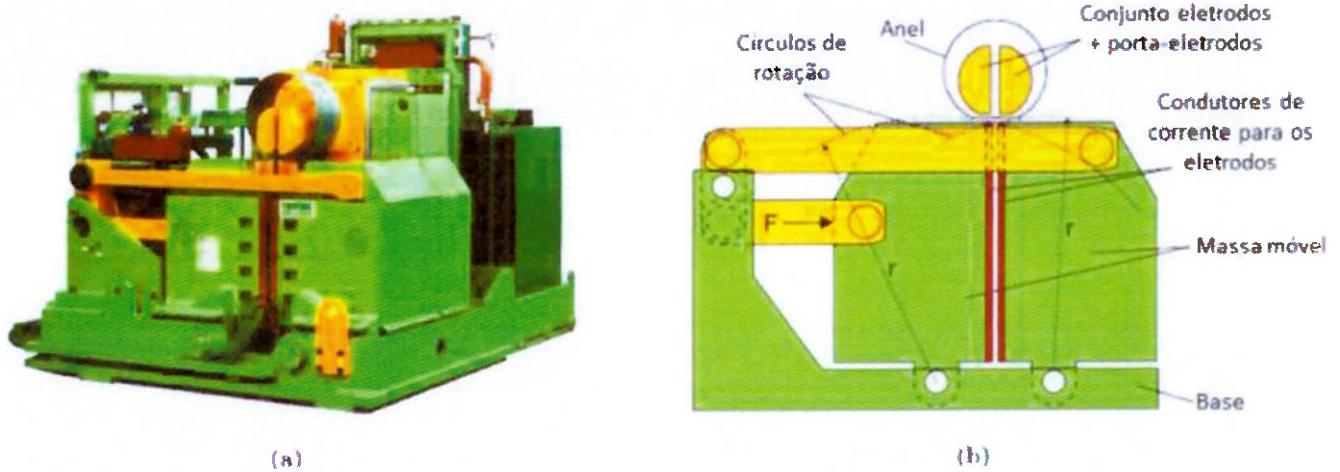


Figura 2.25 – Equipamento para STTRP (a) representação esquemática com as forças e componentes da maquina (b) [2].

2.3.4.5 VARIÁVEIS DO PROCESSO.

De forma semelhante ao processo STTC, o processo STTRP possui variáveis dimensionais, elétricas, de força e de tempo.

As variáveis dimensionais são:

- 1. Abertura inicial dos eletrodos:** abertura entre os eletrodos antes do início da soldagem, esta variável tem influência na distribuição inicial da corrente de soldagem na peça, na bibliografia não foram encontrados valores recomendados para esta abertura, os valores utilizados na indústria são definidos empiricamente ou através de dados de manuais das máquinas.
- 2. Abertura final dos eletrodos:** define o quanto de material será recalcado durante a soldagem, da mesma forma que ocorre para a abertura inicial, não são encontradas tabelas com valores recomendados para as aberturas dos eletrodos.

3. **Quantidade de material recalcado:** esta variável é definida indiretamente pela diferença entre a abertura inicial e abertura final dos eletrodos.

A variável elétrica envolvida é a:

1. **Corrente elétrica:** a corrente elétrica é suprida nas fases de aquecimento e deformação plástica, e deve ser suficiente para que o material alcance a temperatura ideal para deformação plástica, caso a corrente seja excessiva, pode ocorrer um fenômeno conhecido como "*hot spot*" ou pontos quentes, onde o material alcança o ponto de fusão gerando descontinuidades na junta soldada.

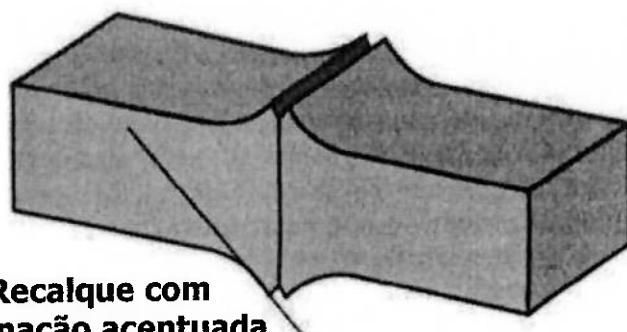
As variáveis de força são:

1. **Força de aperto dos eletrodos:** força responsável por impedir o movimento relativo entre a peça e o eletrodo durante a soldagem, esta força sempre deve ser maior que a força de recalque para evitar este movimento.
2. **Força de recalque:** força responsável por movimentar a máquina na distância programada, esta distância é dada pela diferença entre a abertura inicial e abertura final dos eletrodos.

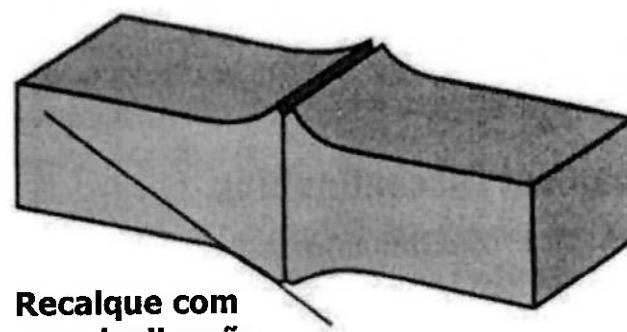
2.3.5 QUALIDADE DA SOLDA OBTIDA PELOS PROCESSOS STTC E STTRP.

Tanto na soldagem topo-a-topo por centelhamento quanto na soldagem topo-a-topo por resistência pura podem surgir descontinuidades relacionadas a preparação inadequada da junta e parâmetros de soldagem inadequados.

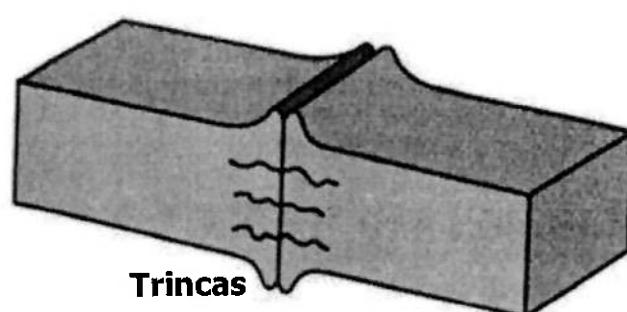
Uma das formas de se avaliar a qualidade da junta soldada é através da análise da quantidade de recalque, na literatura pesquisada não foram encontrados valores para esta quantidade de recalque ou mesmo para o ângulo ideal que a parte recalcada deve formar com a linha de centro horizontal da junta. A figura 2.26 apresenta um método de análise visual da junta, onde é possível ter uma ideia da qualidade da junta soldada através da avaliação da quantidade e geometria do material recalcado.



(a) Calor e quantidade de recalque satisfatórios



(b) Calor insuficiente, quantidade de recalque insuficiente, ou ambos.



(c) Trincas devido a calor insuficiente

Figura 2.26 – Indicações visuais da qualidade da solda [11].

A tabela 2.3 cita algumas descontinuidades e sua relação com os parâmetros de soldagem:

Tabela 2.3 – Efeito das variáveis de soldagem na qualidade da solda obtidas pelos processos STTC e STTRP [11].

Nível da variável	Tensão	Taxa de deslocamento	Tempo	Corrente	Distância ou força
Excessivo	Crateras profundas causando vazios e inclusões de óxidos na solda	Tendência a solidificar a frio	Metal muito plástico para recalque adequado	Material fundido preso no material recalado, deformação excessiva.	Tendência a recalcar o material excessivamente plástico, linhas de fluxo dobram perpendicularmente ao metal de base.
Insuficiente	Tendência a solidificar a frio, metal não suficientemente plástico para recalque adequado.	Centelhamentos intermitentes dificultando o desenvolvimento de calor suficiente no metal para formar o recalque adequado	Trincas no material recalado devido a insuficiente plasticidade do metal para formar o recalque	Trincas longitudinais na solda, inclusões e vazios não expulsos adequadamente para fora da junta.	Falha ao expulsar material fundido e óxidos para fora da junta.

2.4 AÇO USI-RW-550 PARA FABRICAÇÃO DE AROS.

Segundo bibliografia [15], aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), possuem valores típicos para limite de escoamento de 290 a 760 MPa e limite de resistência à tração de 410 a 830 MPa, seguindo esta classificação, o aço USI-RW-550 pode ser classificado como um aço ARBL devido suas propriedades mecânicas, apresentadas na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas do aço USI-RW-550.

PROPRIEDADE MECÂNICA	ESPECIFICADO
Limite de escoamento (MPa)	460 mín.
Limite de resistência à tração (MPa)	552 mín.

Como se trata de um tipo de aço desenvolvido especificamente para aplicações na indústria automobilística o aço USI-RW-550 segue uma classificação particular do fabricante, sendo que existe uma relação com a norma SAE para as propriedades mecânicas. Para a composição química, a norma SAE J1392 [16] especifica somente a quantidade de C e Mn já a norma SAE J2340 [17] especifica a quantidade mínima de alguns outros elementos como P, S, Cu, Ni, Cr e Mo.

A tabela 2.5 compara as propriedades mecânicas e a quantidade de elementos químicos requeridas para um aço conforme normas SAE J1392, SAE J2340 comparando com os valores do aço USI-RW-550.

Tabela 2.5 – Comparativo da composição química e propriedades mecânicas do aço USI-RW-550 com os aços SAE J1392 Grau 070 X e SAE J2340 Grau 490 X.

ELEMENTO QUÍMICO OU PROPRIEDADE MECÂNICA	USI-RW-550	SAE J1392 Grau 070X	SAE J2340 Grau 490X
C	0,15 máx.	0,13 máx.	0,13 máx.
P	0,025 máx.	NE ⁽¹⁾	0,060 máx.
S	0,010 máx.	NE ⁽¹⁾	0,015 máx.
Cu	NE ⁽¹⁾	NE ⁽¹⁾	0,200 máx.
Ni	NE ⁽¹⁾	NE ⁽¹⁾	0,200 máx.
Cr	NE ⁽¹⁾	NE ⁽¹⁾	0,150 máx.
Mo	NE ⁽¹⁾	NE ⁽¹⁾	0,060 máx.
Mn	1,65 máx.	1,65 máx.	NE ⁽¹⁾
Nb	0,020 mín.	NE ⁽¹⁾	0,005 mín.
Limite de escoamento (MPa)	460 mín.	480 mín.	490 mín.
Limite de resistência à tração (MPa)	552 mín.	550 mín.	560 mín.
% Alongamento ($L_0=50$ mm)	23 mín.	17 mín.	20 mín.

Nota: 1) NE = Não Especificado;

2) Valores em % massa.

2.4.1 MICROESTRUTURA.

A microestrutura do aço do aço USI-RW-550 é constituída de matriz ferrítica + bainita em contornos de grão.

Segundo literatura [18], a bainita é um microconstituente que ocorre em faixas de temperaturas intermediárias aquelas em que a perlita e a martensita são formadas.

A figura 2.27 ilustra a microestrutura do aço USI-RW-550 indicando a presença de ferrita+bainita em contorno de grão.

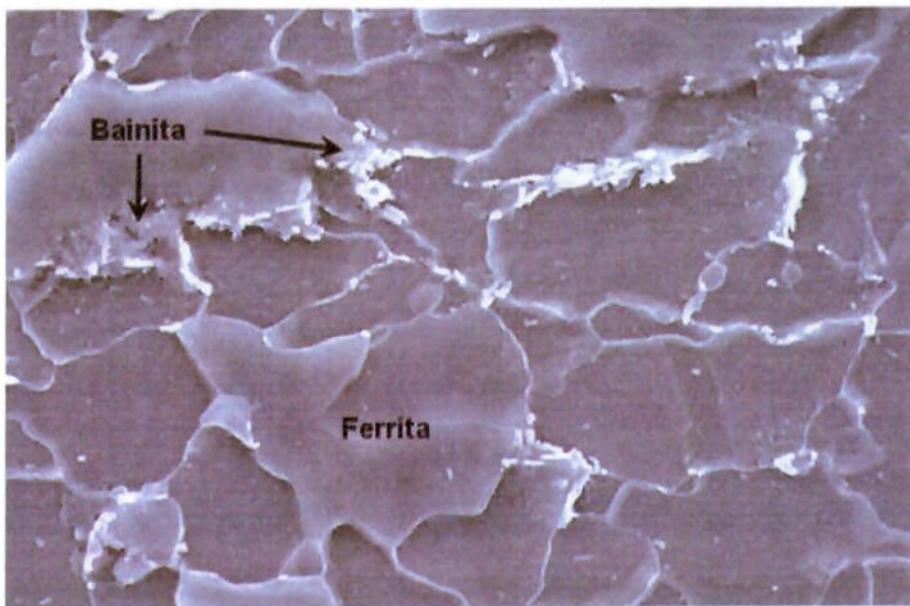


Figura 2.27 – Microestrutura do aço USI-RW-550 indicando a presença de ferrita+bainita em contorno de grão. Ataque: Nital, Aumento: 20.000x [18]

2.4.2 SOLDABILIDADE.

A soldabilidade está relacionada com o conceito da facilidade com que um material pode ser unido, atingindo propriedades mecânicas requeridas para um determinado serviço, e pode ser dividida em: metalúrgica, serviço e operacional [19].

A soldabilidade de um aço é geralmente expressa por um índice chamado de carbono equivalente (CE), o qual correlaciona a composição química do aço com a sua tendência em apresentar estruturas frágeis quando este é submetido a um determinado processo de soldagem

A fórmula utilizada para cálculo do CE, de acordo com o IIW, é a seguinte:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (4)$$

Segundo a literatura [15] aços com valores de CE entre 0,2 e 0,3 apresentam excelente soldabilidade, não sendo susceptíveis a fragilização devido a elementos químicos presentes em sua microestrutura.

Graças a quantidade reduzida de carbono presente nos aços ARBL, a fórmula de Ito e Bessyo é utilizada como parâmetro para avaliação da susceptibilidade da composição química do material, esta parâmetro, conhecido como Pcm, está descrito na equação 5.

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (5)$$

A fórmula do Pcm foi introduzida por volta de 1970, pois a fórmula do CE desenvolvida pelo IIW não se mostrava eficiente na predição da susceptibilidade a trincas em aços ARBL mais novos, devido sua reduzida quantidade de carbono presente [15]

No desenvolvimento do aço USI-RW-550 o índice de CE ou Pcm foi mantido nos menores níveis possíveis. Devido as características de utilização do material este apresenta uma quantidade de carbono pequena, 0,15 máx., e não apresenta Boro em sua composição química.

Pela análise de susceptibilidade a ocorrências de microestruturas favoráveis ao surgimento de trincas, como microestrutura martensítica, pode-se concluir que o aço USI-RW-550 não apresenta microestrutura susceptível.

3. OBJETIVOS.

Os objetivos deste trabalho são:

- Estudar a influência da quantidade de material recalcado nos anéis soldados pelo processo STTRP,
- Estudar a evolução da microestrutura e sua influência na dureza do cordão de solda após o processo de laminação do cordão.
- Verificar a influência da quantidade de material recalcado no surgimento de trincas durante o teste de dobramento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 MATERIAIS.

Os anéis utilizados nos experimentos foram fabricados através de chapas de aço de alta resistência e baixa liga USI RW 550, produzidas pelo processo TMCR, estas chapas passaram pelo processo de calandragem para produção dos anéis. O diâmetro externo dos anéis era de 378 mm, com 2,10 mm de espessura de parede e largura de 245 mm, conforme ilustra a figura 4.1.

Com o objetivo de garantir repetibilidade nos resultados, os anéis utilizados nos experimentos foram fabricados com bobinas da mesma corrida de fabricação na usina.

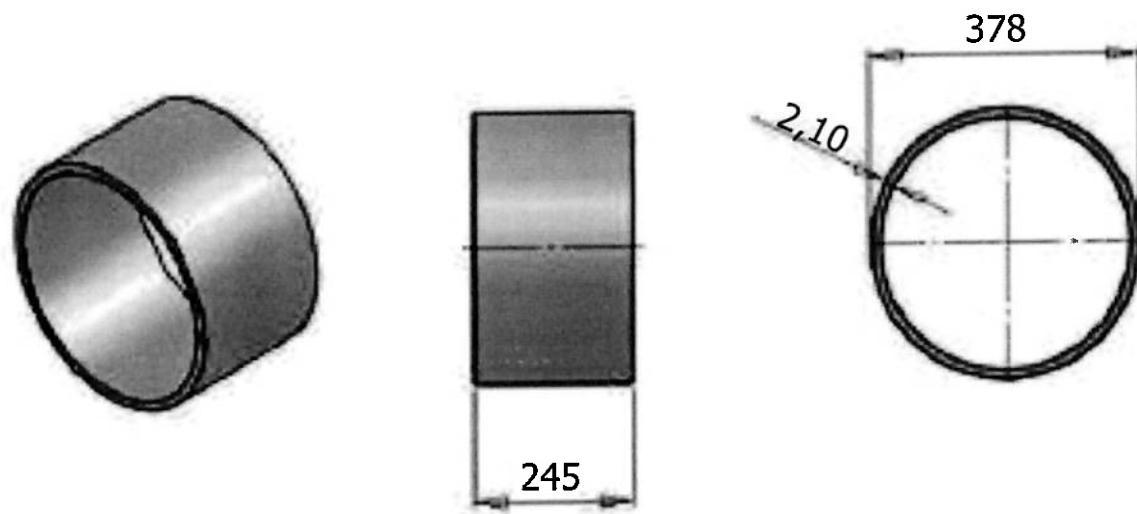


Figura 4.1 – Figura ilustrativa mostrando as dimensões do anel utilizado no experimento.

Os corpos de prova utilizados foram retirados pelo processo de corte mecânico utilizando serra de fita.

Na tabela 4.1 pode-se observar a composição química do aço utilizado no experimento e o especificado para cada elemento, os valores da tabela foram obtidos através de análise em espectrômetro LECO®.

Tabela 4.1 – Composição química do aço USI-RW-550 utilizado no experimento.

ELEMENTOS DE LIGA	ENCONTRADO	ESPECIFICADO
C	0,087	0,15 máx.
Si	0,092	0,20 máx.
Mn	1,43	1,65 máx.
P	0,016	0,025 máx.
S	0,003	0,010 máx.
Al	0,035	0,005 / 0,065
Nb	0,032	0,020 mín.
Cr	0,027	NE ⁽¹⁾
Ni	0,007	NE ⁽¹⁾
Mo	0,007	NE ⁽¹⁾
Cu	0,006	NE ⁽¹⁾
V	0,002	NE ⁽¹⁾
Σ Nb, V, Ni, Ti, Mo, Cr, Cu	0,081	0,25 máx.
CE	0,33	NE ⁽¹⁾
Pcm	0,16	NE ⁽¹⁾

Nota: 1) NE = Não Especificado;

2) CE= Carbono equivalente segundo IIW;

3) Valores em % massa.

Na tabela 4.2 pode-se observar as propriedades mecânicas do aço utilizado no experimento.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do aço USI-RW-550 utilizado no experimento.

PROPRIEDADE MECÂNICA	ENCONTRADO	ESPECIFICADO
Limite de escoamento (MPa)	528	460 mín.
Limite de resistência à tração (MPa)	611	552 mín.
% Alongamento ($L_0=50$ mm)	27	23 mín.
Dobramento 180º transversal	1,0e	1,0e ⁽¹⁾

Nota: 1) e = espessura mínima do material.

4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.

4.2.1 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.

A soldagem dos anéis foi realizada em um equipamento de soldagem da marca Schlatter, fabricado na Suíça. As características principais deste equipamento encontram-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ficha técnica do equipamento de soldagem [20].

Fabricante	Schlatter
Modelo	GAAF-15/630
Controlador	SWEP 06
Ano de fabricação	1992
Tensão no primário	380 V
Ciclo de trabalho	50%
Frequência	60 Hz
Tipo de corrente	Contínua
Potência máxima	630 kVA
Tensão no secundário	8,9 V
Corrente máxima no secundário	130 kA
Força de recalque máxima	150 kN
Força de aperto máxima	400 kN

4.2.2 ELETRODOS.

Os eletrodos utilizados na máquina para soldagem dos anéis são da classe 4 segundo classificação RWMA, fabricados em liga de Cobre e Berílio

(2% Be), endurecidos por trabalho a frio com dureza de 36 HRC e condutividade elétrica de 22 IACS².

4.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

Os parâmetros de soldagem, programados na máquina, são divididos da seguinte forma:



Os parâmetros de sistema correspondem aos parâmetros de fixação da peça, nos eletrodos, conhecido como força de aperto, e tempo de espera depois de concluída a soldagem. Durante o tempo de espera a peça ainda está presa nos eletrodos com a força de aperto programada.

Os parâmetros básicos correspondem a fase de aproximação da junta.

Os parâmetros de forjamento correspondem as demais fases do processo de soldagem (deformação plástica e resfriamento).

Existem 4 fases a serem completadas para execução da soldagem:

- Fase 1: aproximação da junta;
- Fases 2 e 3 :deformação plástica

² IACS: a norma IACS ("International Annealed Copper Standard"), é fixada em 100% para um fio de cobre de 1m de comprimento e 1mm² de seção e cuja resistividade a 20°C seja de 0,01724 Ωmm²/m

- Fase 4: resfriamento.

Estes parâmetros são inseridos na máquina através do controlador SWEP 06, a figura 4.2 ilustra este controlador.



Figura 4.2 – Painel do controlador SWEP 06.

A figura 4.3 ilustra as fases do processo, as classificações das fases para o equipamento utilizado neste trabalho são condizentes com as fases do processo estudadas na revisão bibliográfica descrita no capítulo 2.3.4.2.

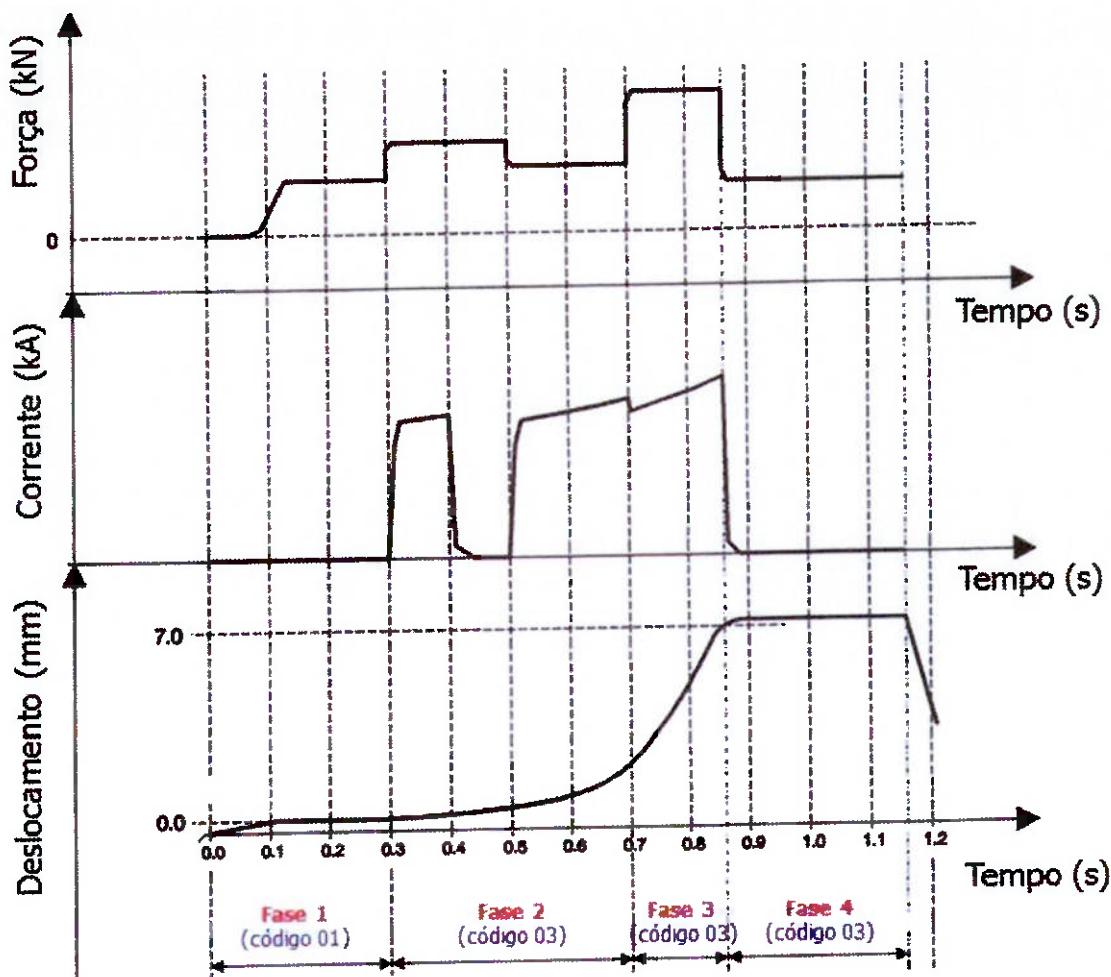


Figura 4.3 – Fases referentes ao processo de soldagem [20].

A identificação dos parâmetros é feita por dois dígitos, o primeiro dígito corresponde ao código, são eles:

- 01 (código básico de aproximação da junta),
- 03 (código referente as etapas de forjamento)
- 21 (código referente aos parâmetros de sistema)

O segundo dígito indica as etapas do programa, a quantidade de etapas do programa depende da necessidade de cada produto e é definida empiricamente com base no resultado do processo de soldagem.

4.3.1 PARÂMETROS DE SISTEMA.

A tabela 4.4 especifica quais os parâmetros básicos, código 1, utilizados em todos os experimentos.

Tabela 4.4 – Parâmetros de sistema utilizados nos experimentos.

Código	Etapa	Descrição	Unidade	Valor
21	1	Tempo de espera após o final da soldagem	s	0,5
	2	Força de aperto	kN	200

4.3.2 PARÂMETROS BÁSICOS.

A tabela 4.5 especifica quais os parâmetros básicos, código 1, utilizados em todos os experimentos.

Tabela 4.5 – Parâmetros básicos utilizados nos experimentos.

Código	Etapa	Fase	Descrição	Unidade	Valor
1	1	1	Distância entre as faces da junta antes de iniciar a soldagem	mm	0,0
	2		Abertura inicial dos eletrodos ⁽¹⁾	mm	18,0
	3		Máxima abertura entre as faces da junta antes de iniciar a soldagem (mm)	mm	1,0
	4		Força para busca do ponto zero	kN	24
	5		Velocidade de busca do ponto zero	% máx. velocidade	50
	6		Distância mínima entre os eletrodos	mm	0,3
	7		Velocidade do processo na fase de preparação	% máx. velocidade	100

Nota: 1) Parâmetro programado, o valor real da abertura dos eletrodos é obtido através de cálculos, no caso dos experimentos este valor foi de 14 mm, conforme figura 4.4.

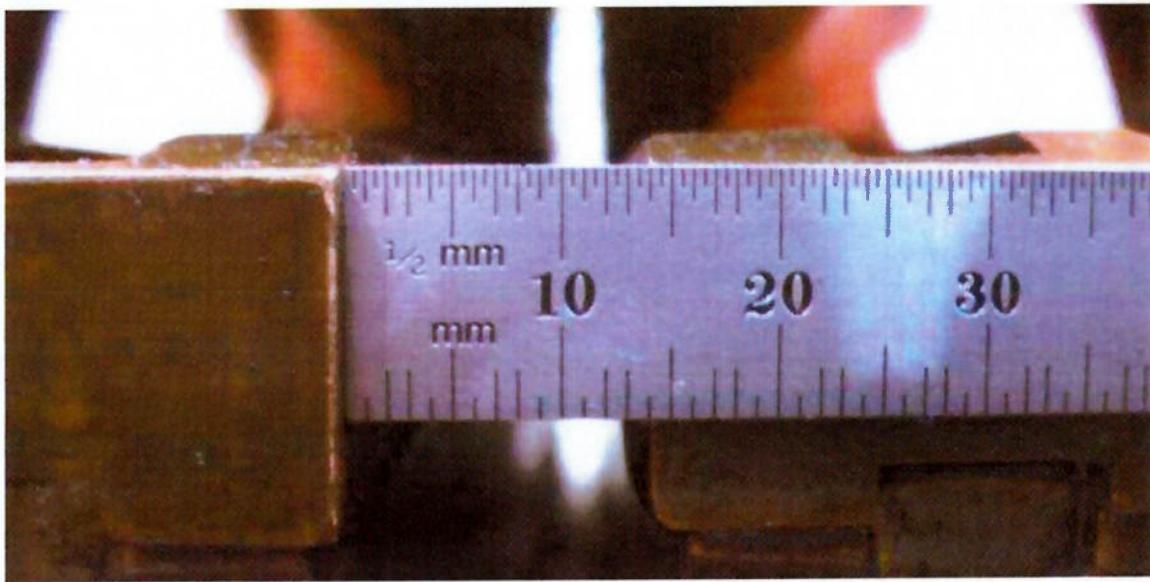


Figura 4.4 – Abertura inicial dos eletrodos.

4.3.3 PARÂMETROS DE FORJAMENTO.

A tabela 4.6 especifica quais os parâmetros de forjamento, código 3, utilizados nos experimentos. Estes parâmetros foram programados no controlador da máquina, porém o sinergismo da máquina busca completar os parâmetros especificados para o limite de deslocamento e se necessário ajusta automaticamente e de forma autônoma, os demais parâmetros para que o limite de deslocamento, que corresponde a quantidade de material recalcado, seja alcançado.

Tabela 4.6 – Parâmetros de forjamento programados no controlador da máquina.

Código	Etapa	Fase	Descrição	Unidade	Valor
3	1	2	Tempo 1	s	0,15
	2		Força 1	kN	30
	3		Corrente 1	kA	76
	4		Tempo 2	s	0,10
	5		Força 2	kN	51
	6		Corrente 2	kA	69
	7		Tempo 3	s	0,10
	8		Força 3	kN	51
	9		Corrente 3	kA	69
	10		Controle da força em cada uma das fases do forjamento ⁽¹⁾	-	111
	11		Limite de deslocamento ⁽²⁾	mm	10
3	7	3	Tempo 3	s	0,80
	8		Força 3	kN	51
	9		Corrente 3	kA	69
	10		Controle da força em cada uma das fases do forjamento ⁽¹⁾	-	001
	11		Limite de deslocamento ⁽²⁾	mm	Nota (2)
3	7	4	Tempo 3	s	0,30
	8		Força 3	kN	51
	9		Corrente 3	kA	52
	10		Controle da força em cada uma das fases do forjamento ⁽¹⁾	-	000
	11		Limite de deslocamento ⁽²⁾	mm	Nota (2)

Nota: 1) Este parâmetro indica o controle da força de recalque para cada fase (fases 2, 3 e 4) do processo. 0 para proporcional diferencial e 1 para proporcional integral e diferencial, cada dígito corresponde a uma fase.

2) O Limite de deslocamento para as fases 3 e 4 foi alterado para cada experimento, os valores utilizados constam na tabela 4.7.

4.3.3.1 PARÂMETROS PARA LIMITE DE DESLOCAMENTO.

Os parâmetros para limite de deslocamento, código 3 etapa 11, utilizados nos experimentos estão descritos na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros de limite de deslocamento utilizados nos experimentos.

Identificação dos experimentos e amostras	Quantidade de Recalque (mm)	Fase	Valor
I	2	3	1,0
		4	2,0
II	4	3	3,0
		4	4,0
III	6	3	5,0
		4	6,0
IV	8	3	7,0
		4	8,0
V	10	3	9,0
		4	10,0

4.3.4 ÂNGULO DAS LINHAS DE FLUXO DE MATERIAL.

A figura 4.5 ilustra o local de medição do ângulo das linhas de fluxo.

O maior e menor ângulo de cada amostra foi medido diretamente na foto obtida da microestrutura, utilizando um goniômetro. O menor e maior ângulo foi determinado através da medição do ângulo de todas as linhas de fluxo da figura.

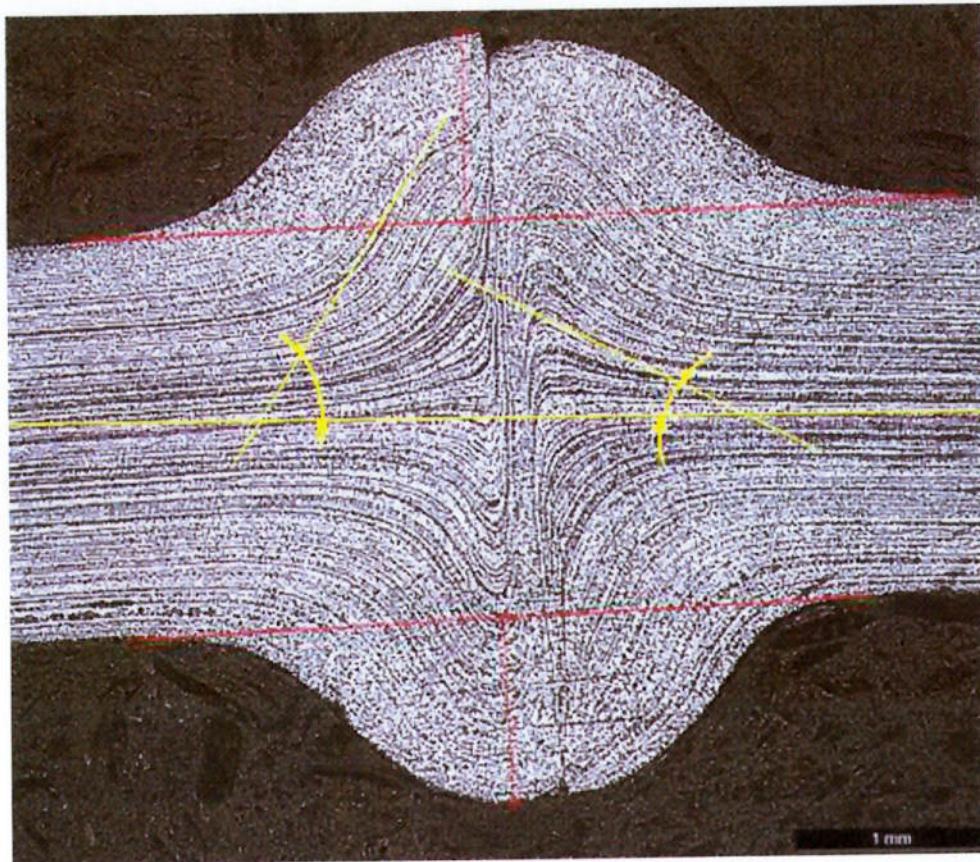


Figura 4.5 – Micrografia ilustrando o local de medição do ângulo das linhas de fluxo. Aumento 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

4.3.5 QUANTIDADE DE MATERIAL EXPELIDO PARA FORA DA JUNTA.

A quantidade de material expelido para fora da junta, quantidade de material consumido, foi analisada com o objetivo de avaliar possíveis reduções nas dimensões do retângulo.

A figura 4.6 ilustra as dimensões do cordão de solda na condição como soldado, os valores foram calculados utilizando a equação 6.

$$Mr = he + hi \quad (6)$$

Onde: Mr = quantidade total de material recalcado (mm).

he = altura do recalque externo (mm).

hi = altura do recalque interno (mm).

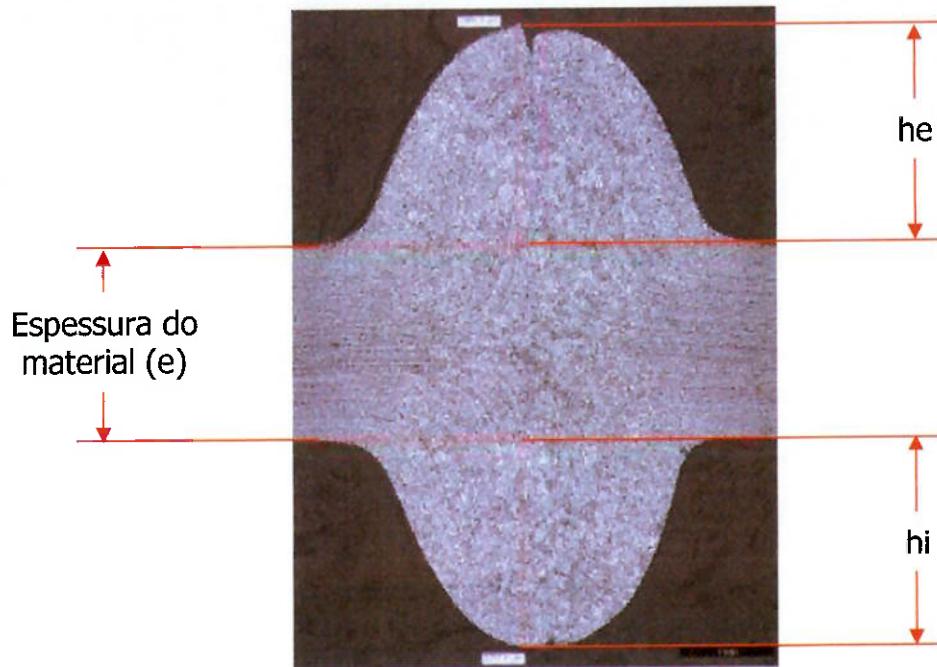


Figura 4.6 – Figura ilustrando a quantidade de material recalcado.

4.3.6 CRITÉRIOS PARA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA.

Os corpos de prova (c.p.) foram retirados do centro dos anéis soldados, no sentido transversal ao cordão de solda, para as análises de microestrutura e medição de microdureza. Para o teste de dobramento foram retiradas amostras das duas bordas do anel soldado, denominadas frente e atrás do cordão de

solda, esta denominação de frente e atrás é definida em relação ao posicionamento do anel nos eletrodos na máquina de solda.

A figura 4.7 ilustra o posicionamento dos corpos de prova no anel soldado. O critério para retirada dos corpos de provas das bordas para o teste de dobramento foi adotado devido a exigência de norma interna para qualificação da especificação de soldagem [21].

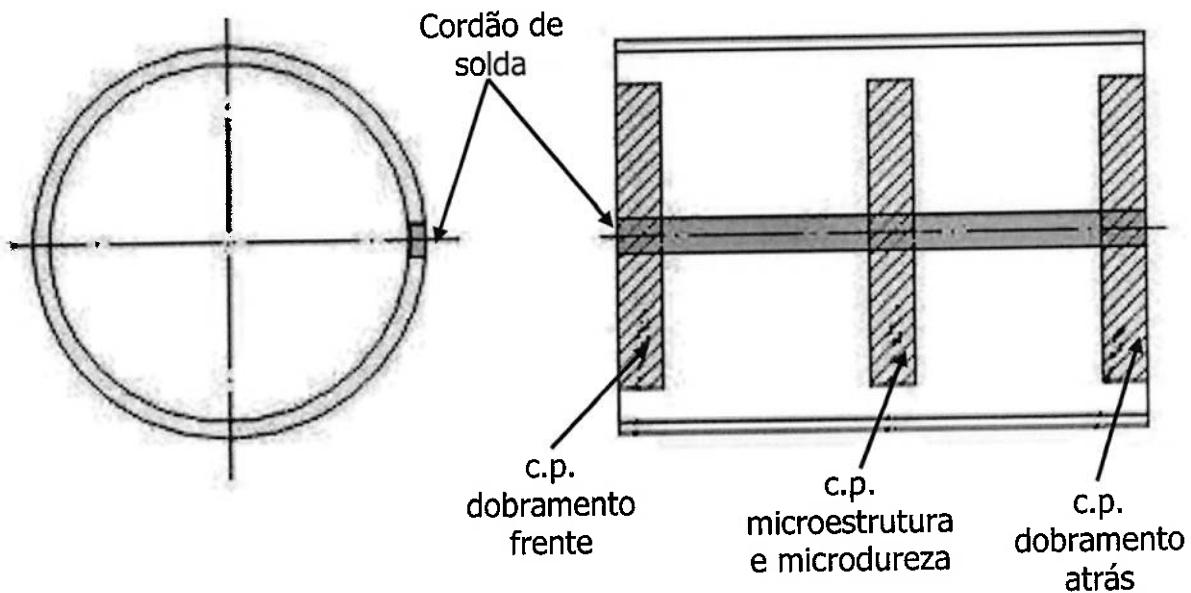


Figura 4.7 – Localização dos corpos de prova nos anéis.

Após a retirada dos corpos de prova, as respectivas amostras foram identificadas conforme tabela 4.6 e embutidas em baquelite.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.

Foram separadas 5 amostras para caracterização microestrutural, representando 5 parâmetros diferentes com 3 repetições para cada parâmetro.

Os corpos de prova foram caracterizados quanto a microestrutura presente e condições das linhas de fluxo do material.

Na análise das linhas de fluxo, os cordões foram analisados nas etapas do processo: como soldado, rebarbado e laminado, esta análise foi realizada com o objetivo de avaliar a influência de cada operação na geometria e características das linhas de fluxo.

4.4.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA.

Para as análises metalográficas de microestrutura e linhas de fluxo, foram utilizados os recursos de microscopia ótica, o equipamento utilizado foi um microscópio da marca Leica, modelo DMRM com possibilidade de aumento até 1000X e com câmera fotográfica eletrônica da marca Leica, acoplada ao equipamento, a data de calibração do equipamento é de 05/08/2011 com validade até 02/08/2013.

Os corpos de prova foram lixados com lixas de 120 a 1200 e polidos com pasta de diamante de 3 μm e 1 μm . Para a análise microestrutural os corpos de prova foram atacados com Nital a 3% e para análise das linhas de fluxo foram atacados com reagente Flash Butt Welding® (5g Cloreto Férrico + 7g ácido Pícnico + 100ml água).

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DA JUNTA SOLDADA.

4.5.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO.

Os ensaios de dobramento foram realizados conforme procedimento interno [22], e foram realizados em 10 amostras do cordão de solda, sendo 2 amostras de cada experimento, frente e atrás da solda. A figura 4.8 ilustra as dimensões do corpo de prova utilizado para o teste de dobramento.

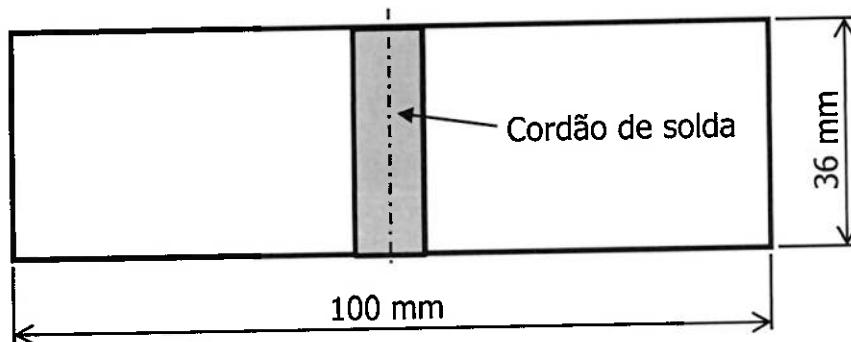


Figura 4.8 – Dimensões do corpo de prova para teste de dobramento.

O procedimento especifica que o ensaio deve ser realizado somente no cordão rebarbado, porém com o objetivo de avaliar a influência da operação de laminar o cordão nos resultados obtidos no ensaio, os testes também foram realizados no cordão laminado.

Nos c.p. dos cordões rebarbados, o excesso de material no cordão foi lixado manualmente até atingir a espessura do material, este procedimento é necessário para que seja possível observar a presença de trincas após a execução do teste, para os c.p. dos cordões laminados, não foi necessária nenhuma operação de lixamento.

Os corpos de prova foram dobrados a 90º e avaliados quanto ao surgimento de trincas conforme critérios do procedimento interno [22]. A figura 4.9 ilustra as condições do teste de dobramento, mostrando o espaçamento entre os apoios do corpo de prova (L), a espessura do corpo de prova (e), e o raio do cutelo (R).

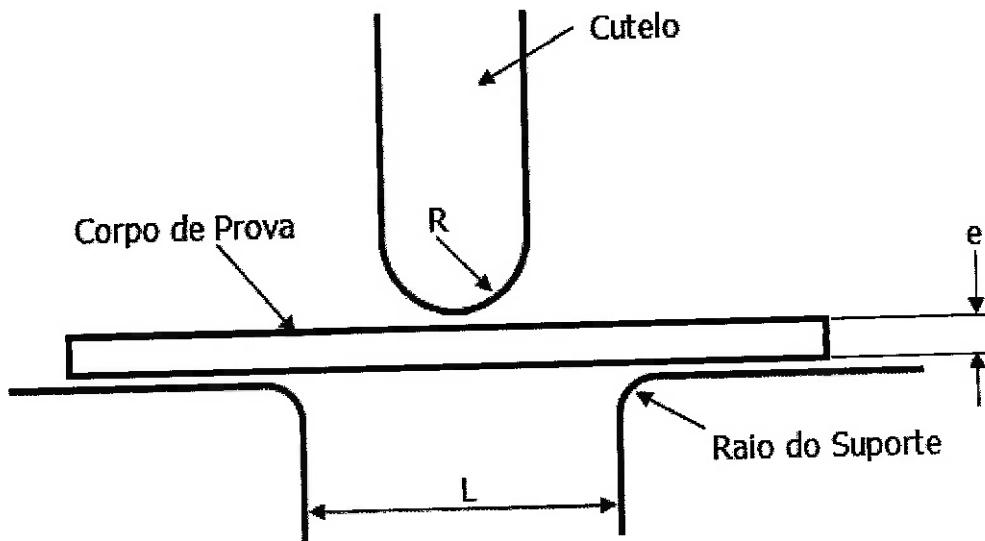


Figura 4.9 – Distância entre suporte e dimensões do cutelo.

O raio do cutelo foi de 3 mm a distância entre apoios de 8 mm e o raio do suporte de 10 mm.

Foi aplicada uma força com velocidade constante até que o corpo de prova atingisse o ângulo de 90º.

4.5.1.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE DOBRAMENTO.

O equipamento utilizado para realização dos ensaios de dobramento foi uma máquina de tração da marca Tinius Olsen modelo Super "L".

4.5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA.

Foram preparadas 5 amostras para o ensaio de microdureza, as medições foram realizadas no sentido transversal, nos cordões de solda laminados. Para efeito de verificação da influência no aumento da dureza do cordão após a operação de laminar o cordão, foi realizada a medição da microdureza nos cordões rebarbados referentes aos experimentos I, III e V.

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados com carga de 100g durante 30s, a definição da carga de teste foi baseada nos resultados obtidos por outro autor [14] em situação semelhante aos experimentos realizados neste trabalho, a disposição dos pontos para medição da microdureza Vickers está ilustrada na figura 4.10.

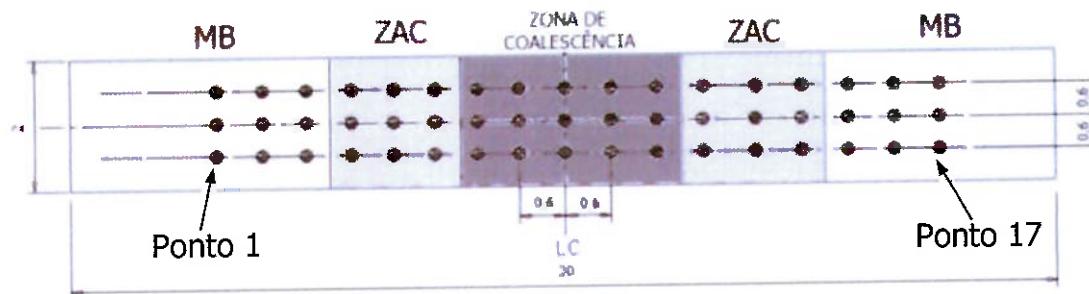


Figura 4.10 – Desenho esquemático ilustrando a disposição dos pontos para medição da dureza.

4.5.2.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE MICRODUREZA.

O equipamento utilizado para realização dos ensaios de microdureza foi um durômetro da marca Buehler, modelo MMT-3/645, a data de calibração do equipamento é de 14/06/2012 com validade até 14/12/2012.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Conforme apresentado no capítulo anterior, os anéis soldados pelo processo de soldagem topo-a-topo por resistência pura foram avaliados por caracterização microestrutural, ensaios de dobramento e ensaios de microdureza.

5.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES MICROESTRUTURAIS.

A caracterização microestrutural das juntas soldadas foi realizada através de análises metalográficas em amostras extraídas transversalmente a linha central da solda. Foram analisadas as microestruturas do Metal de Base (MB), Zona Afetada pelo Calor (ZAC), Linha Central da Solda (LCS) e Zona de Coalescência (ZC).

5.1.1 MICROESTRUTURA DA SEÇÃO TRANSVERSAL À LINHA CENTRAL DA SOLDA.

A microestrutura foi constituída de matriz ferrítica com possível presença de bainita em contornos de grão em todas as amostras analisadas, resultados condizentes com o discutido na revisão bibliográfica.

A presença ou não de bainita nos contornos de grão não é possível ser detectada por microscopia ótica, porém as propriedades mecânicas do material e as análises de microscopia eletrônica de varredura, citadas na revisão bibliográfica do aço USI-RW-550, dão uma indicação da presença da bainita nos

contornos de grão, já que o aço discutido na revisão bibliográfica é o mesmo utilizado nos experimentos.

No metal de base foi possível observar grãos deformados, característicos do encruamento a frio, devido ao processo de laminação na fabricação do aço.

Na zona afetada pelo calor foi possível observar uma diminuição no tamanho dos grãos, o que pode ser explicado pelo fenômeno de recristalização dinâmica, conforme citado por Messler [3] e discutido no capítulo 2.3.4.2.

Na região que compreende a linha central da solda e suas adjacências, foi observada uma alteração no tamanho e geometria dos grãos, alterações estas devido a temperatura maior atingida em relação a outras regiões do cordão e a deformação plástica ocorrida, neste trabalho esta região será denominada como Zona de Coalescência (ZC).

As figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 5.5 mostram as micrografias das soldas obtidas nos experimentos.

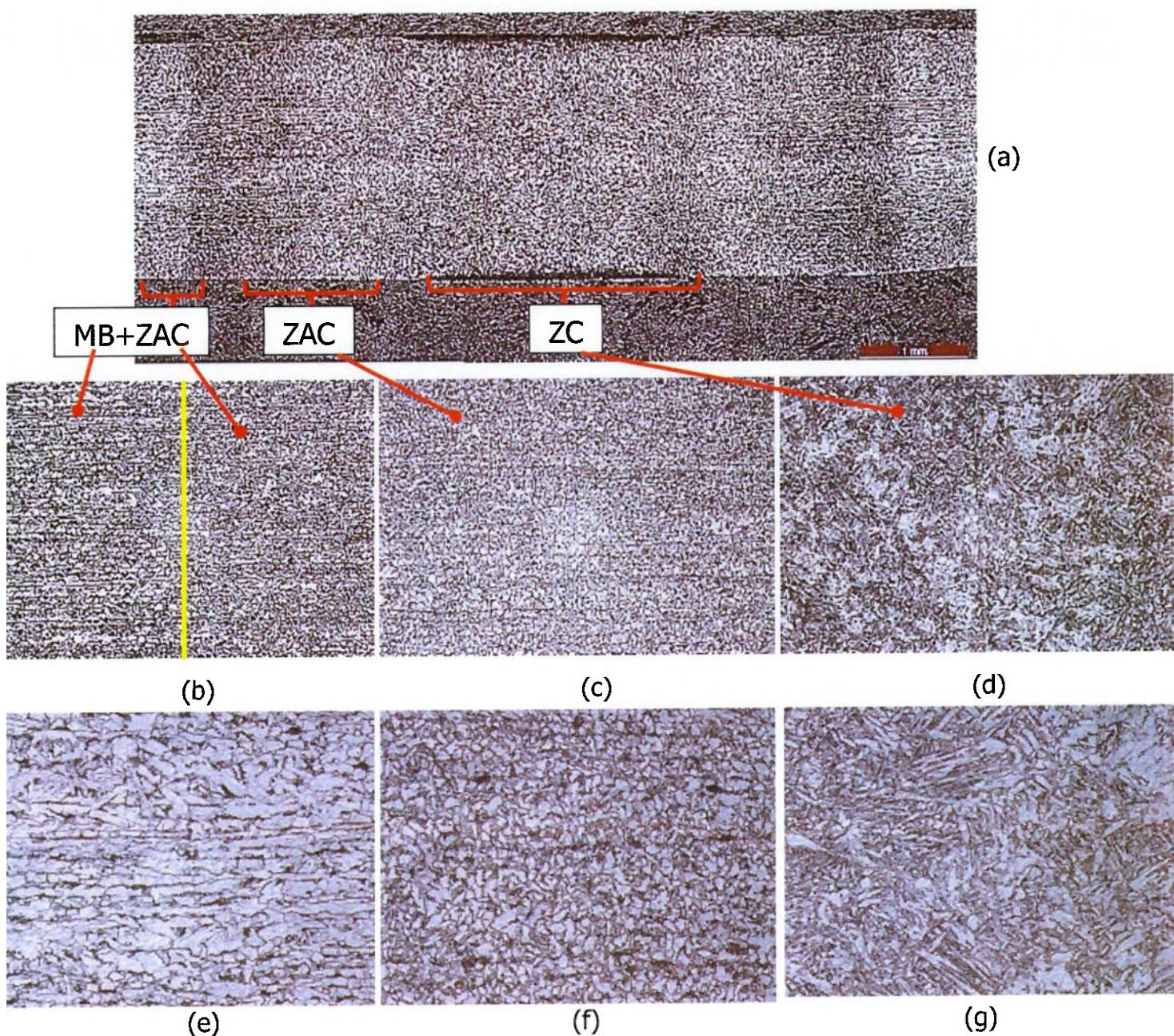


Figura 5.1 – Experimento I. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital.

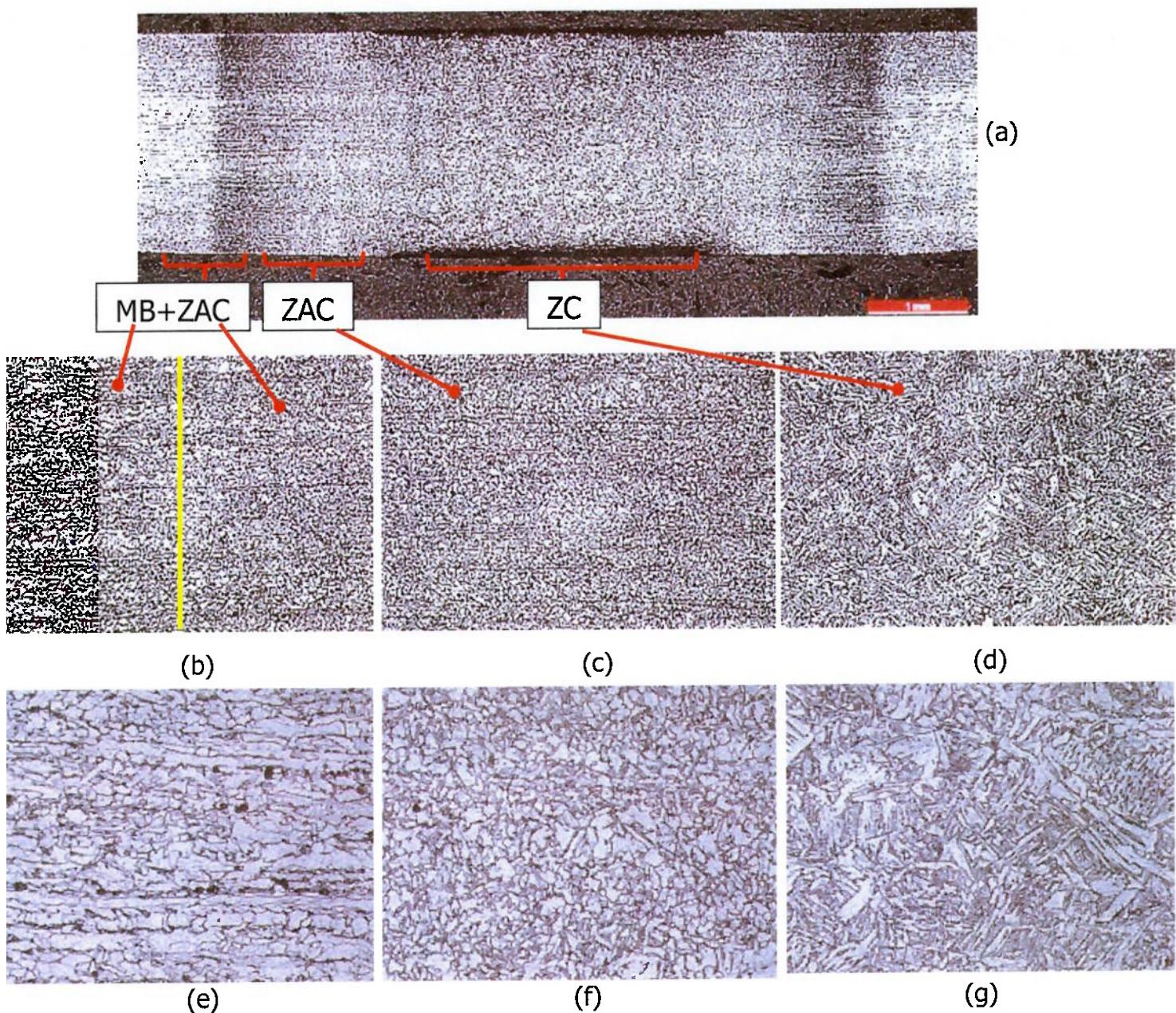


Figura 5.2 – Experimento II. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital.

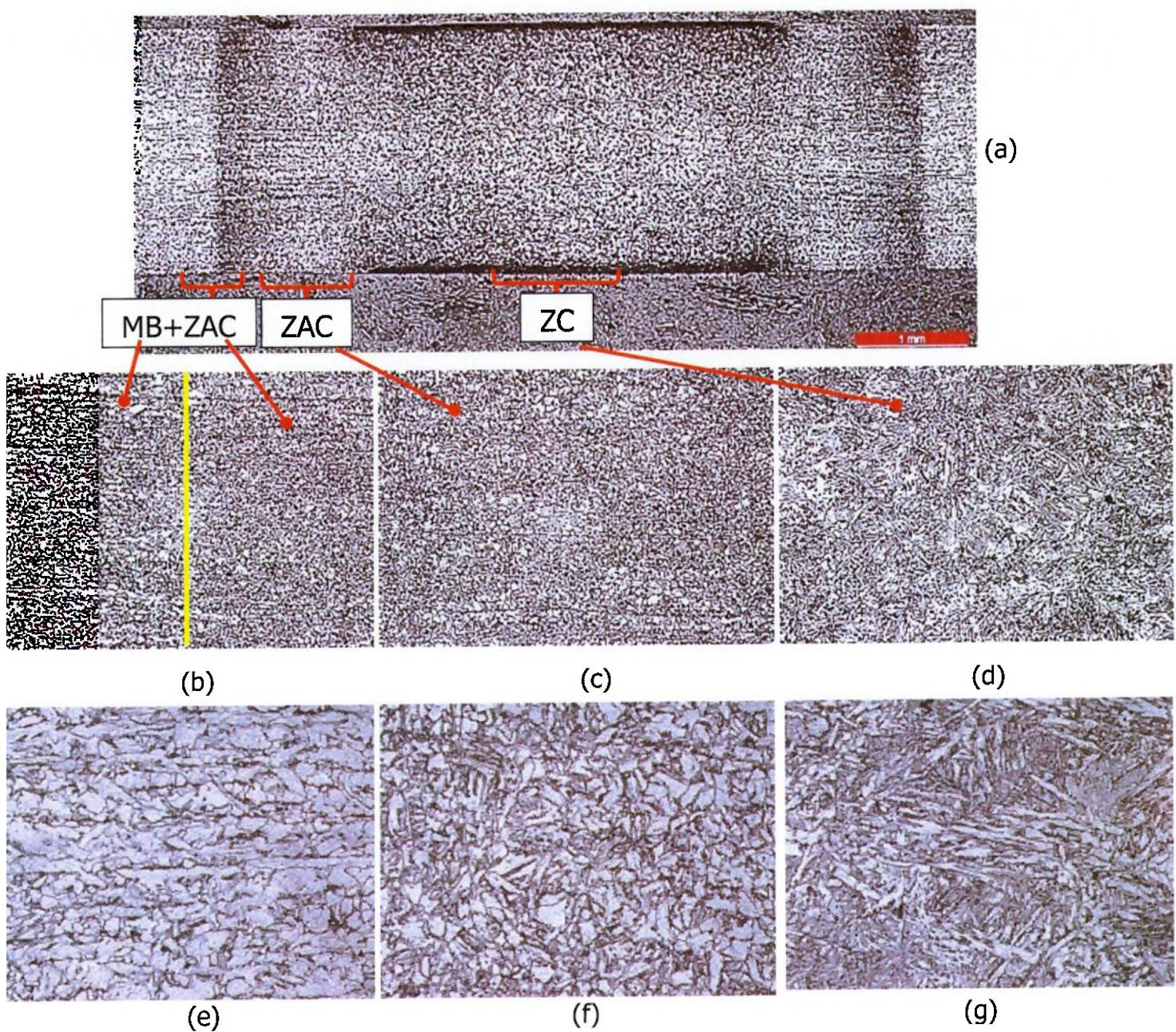


Figura 5.3 – Experimento III. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital.

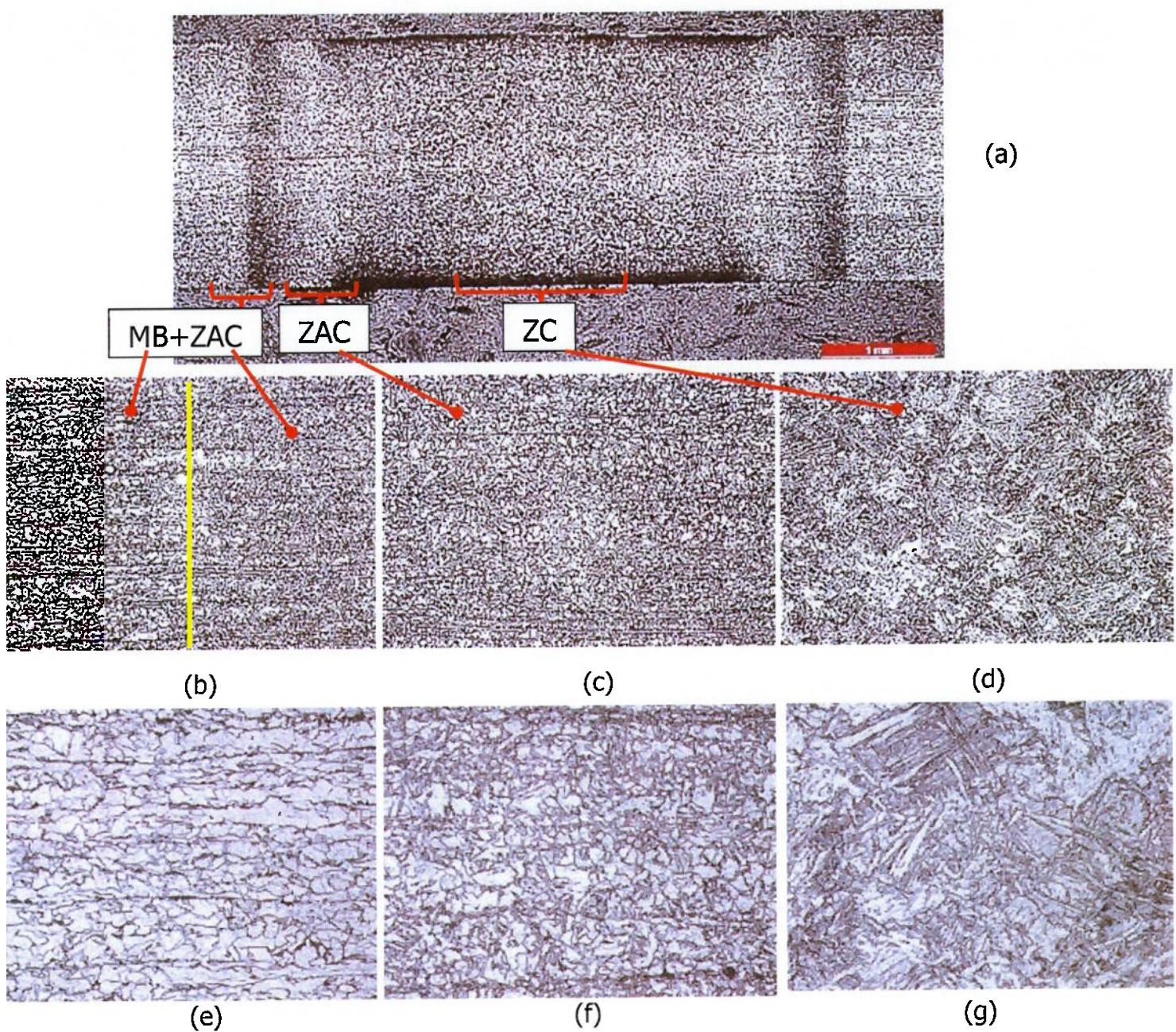


Figura 5.4 – Experimento IV. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital.

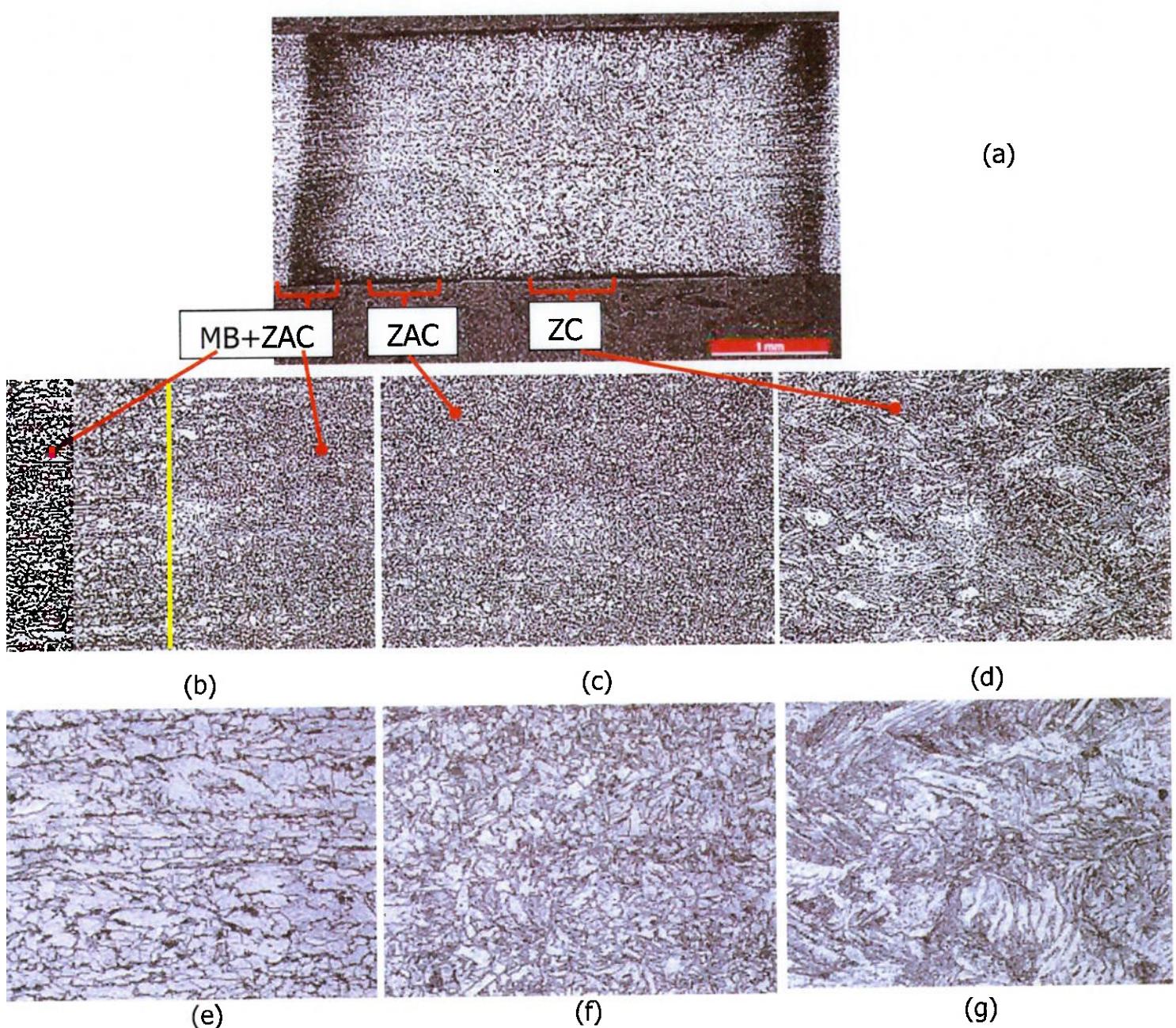


Figura 5.5 – Experimento V. (a) Micrografia do cordão de solda mostrando as diversas regiões do cordão. Aumento: 25x. (b) Zona de transição MB e ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (c) ZAC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (d) ZC. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 500x. (e) MB. Microestrutura constituída de Ferrita+Bainita em contornos de grão. Aumento: 1000x. (f) ZAC. Aumento: 1000x. (g) ZC. Aumento: 1000x. Ataque: Nital.

5.1.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS LINHAS DE FLUXO.

As linhas de fluxo provenientes da orientação das fibras do material foram deformadas na LCS através da força de recalque. Nas análises destas linhas, foi possível observar que não houve fusão dos materiais durante a soldagem, mostrando que a soldagem é no estado sólido. Com o objetivo de comparar as diferenças existentes entre as linhas de fluxo obtidas nos experimentos, foi medido o ângulo de deformação das linhas, e o alinhamento do cordão de solda, os resultados obtidos constam na tabela 5.1, nesta tabela também constam as medidas referentes a quantidade de material expelida, denominada “altura total do recalque”.

A diferença observada entre o valor programado para deslocamento, conforme mostrado na tabela 4.7, e o valor real da altura total do recalque medido nas amostras, pode estar relacionado ao fato de que nem todo material aquecido e deformado plasticamente é expelido para fora da junta, uma vez que parte do material que seria expelido para fora da junta não atingiu a temperatura ideal para recalque, algum material fica comprimido dentro da junta. Nota-se que a diferença é maior quanto maior é a quantidade de deslocamento programado, justificando esta explicação, uma vez que os parâmetros de soldagem de origem elétrica não foram alterados.

Tabela 5.1 – Características das linhas de fluxo dos materiais.

Identificação do Experimento	Ângulo da linha de fluxo ⁽¹⁾	Alinhamento do cordão de solda ⁽²⁾	Altura total do recalque ⁽³⁾	Diferença em relação ao programado
I	30° - 55°	Alinhado	1,96	-2%
II	65° - 80°	Alinhado	3,45	-14%
III	70° - 80°	Alinhado	4,60	-23%
IV	80° - 86°	Desalinhado	6,07	-24%
V	79° - 85°	Desalinhado	7,04	-30%

Nota: 1) O ângulo foi medido nas Micrografias da junta soldada sem a operação de rebarbar.

2) Alinhamento em relação a um eixo perpendicular a L.C.S., ver as figuras 5.10a e 5.11a.

3) Somatória das alturas dos dois lados, externo e interno, desconsiderando a espessura do material.

As figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 mostram o cordão de solda em três condições: como soldado, rebarbado e laminado.

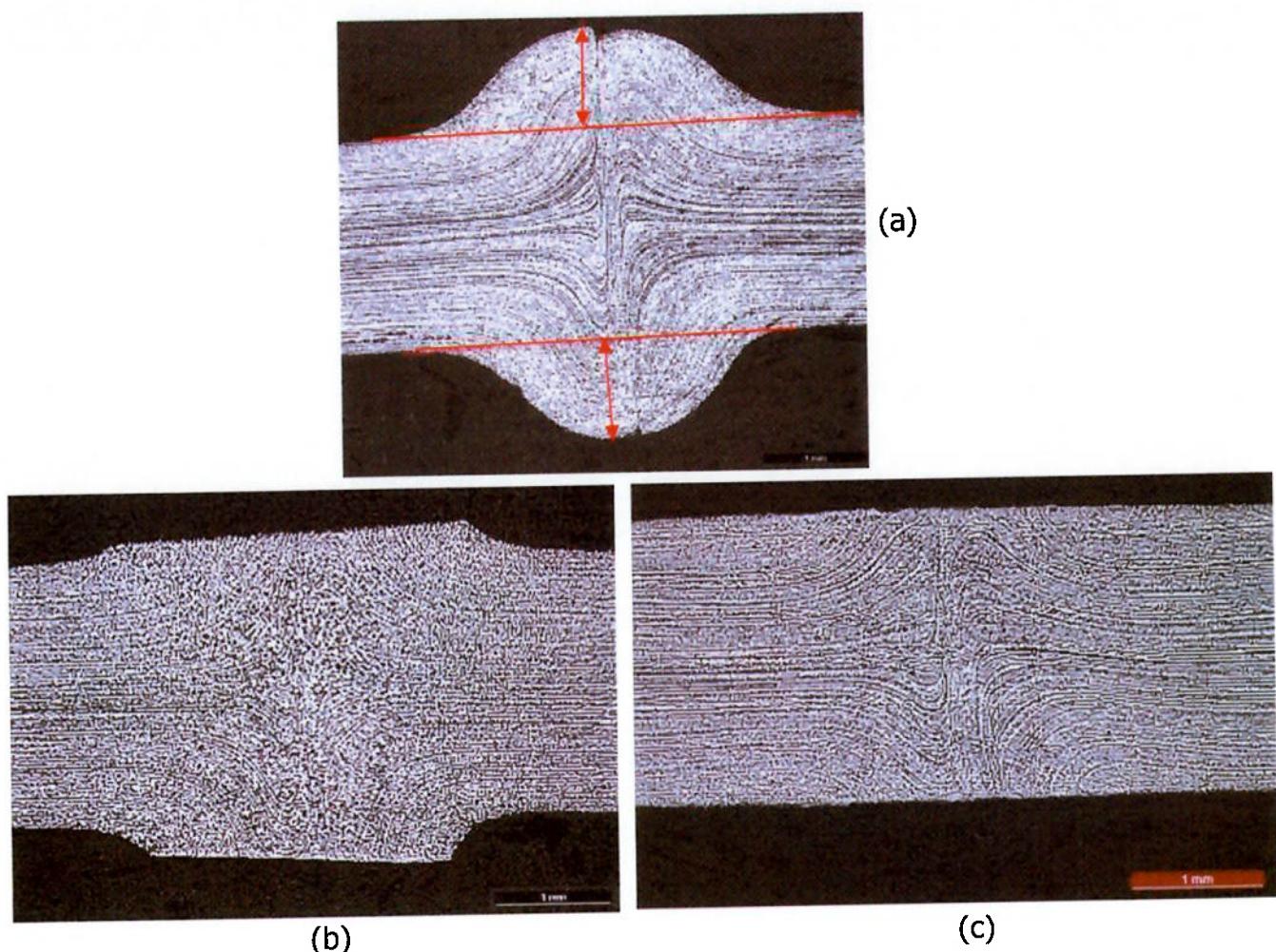


Figura 5.6 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento I, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

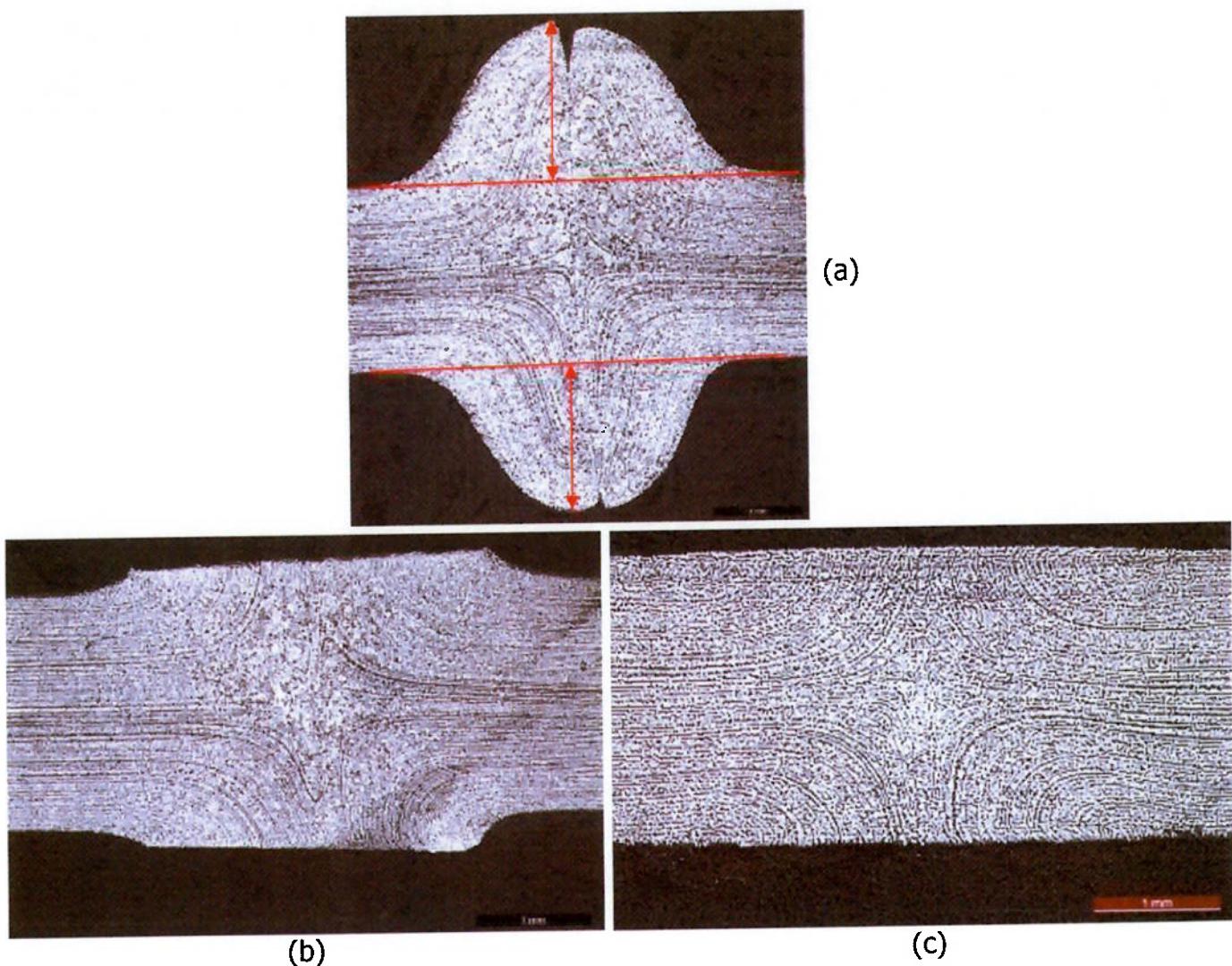


Figura 5.7 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento II, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

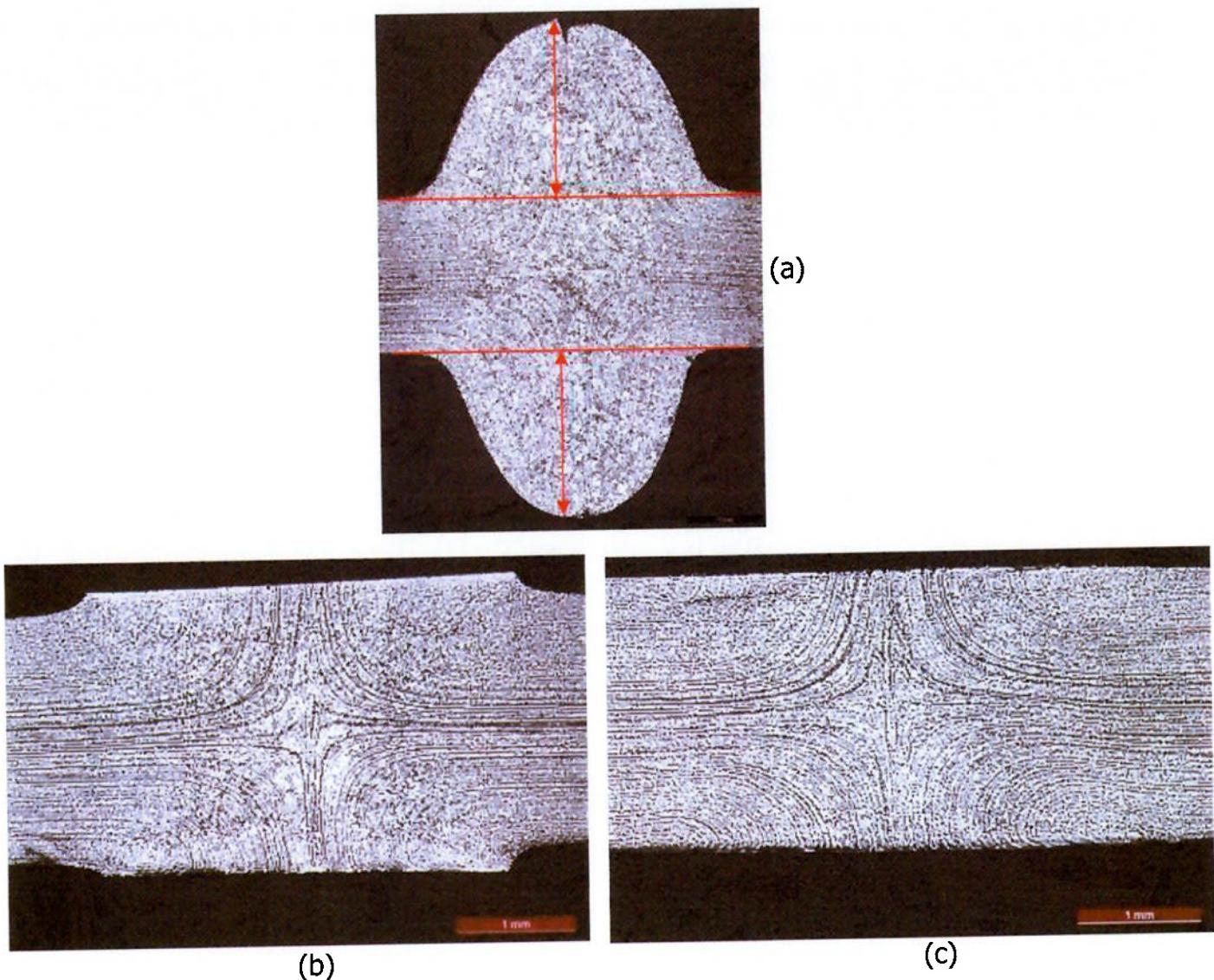


Figura 5.8 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento III, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

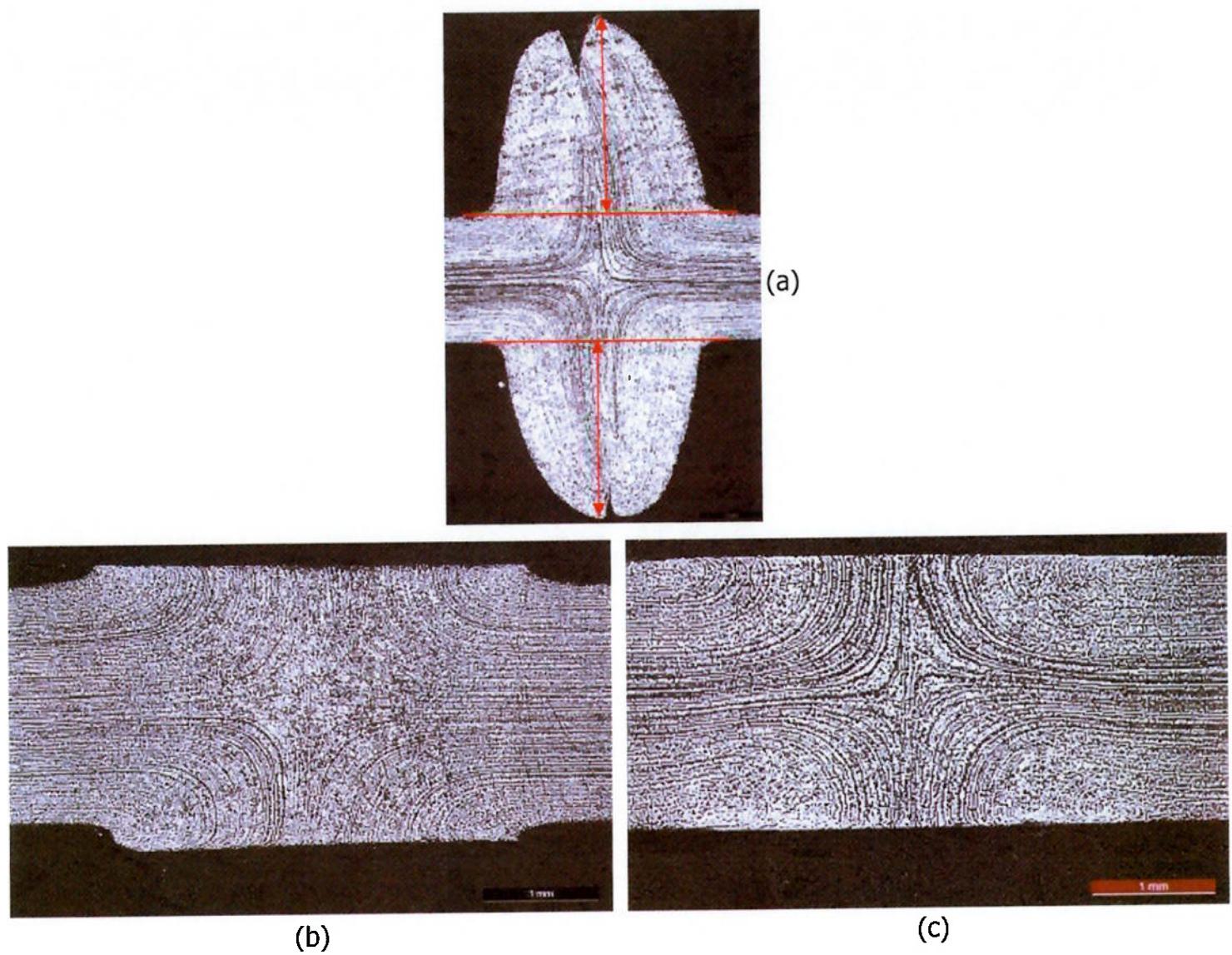


Figura 5.9 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento IV, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

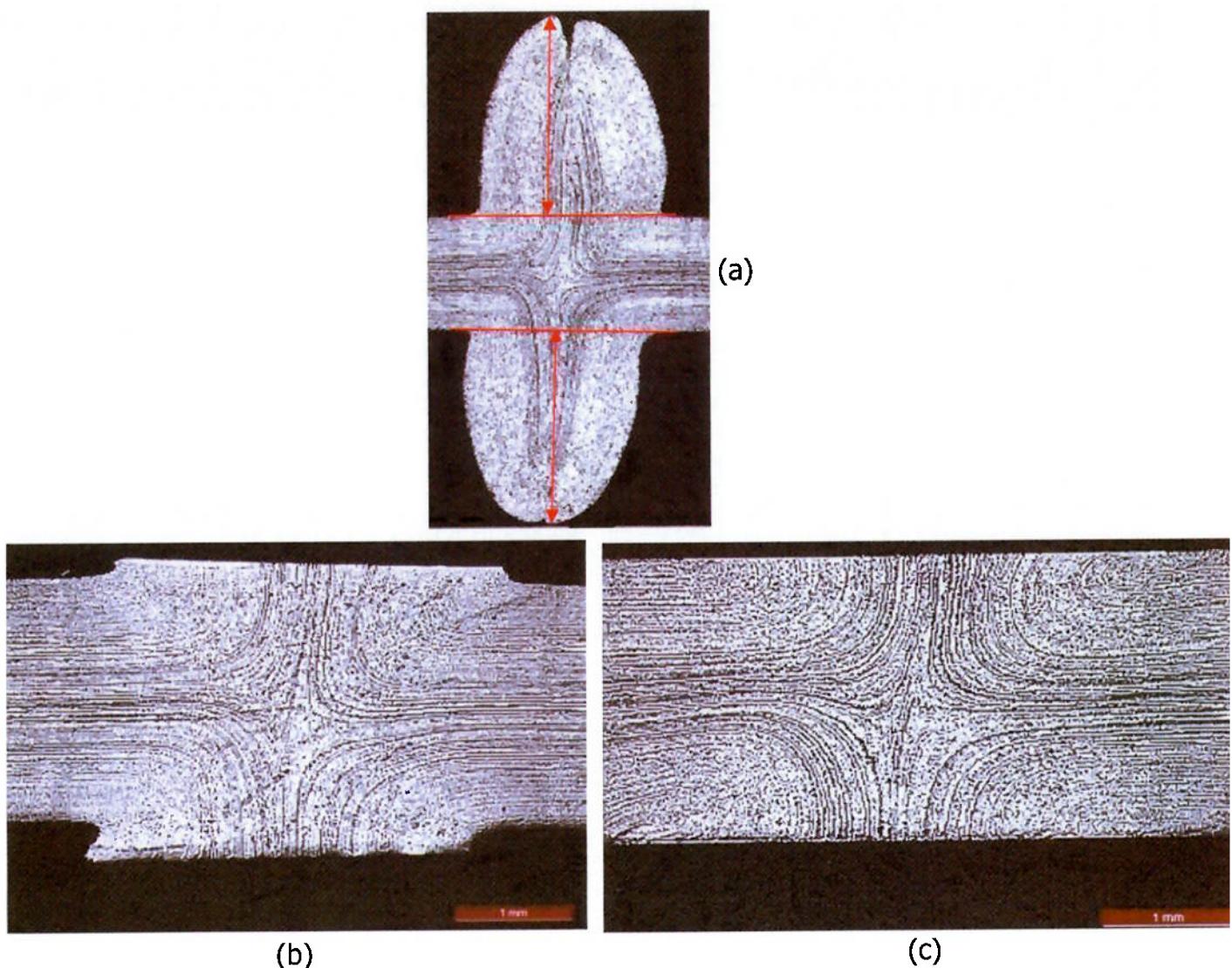


Figura 5.10 – Micrografia ilustrando os resultados das linhas de fluxo de material do experimento V, as setas mostram a altura do recalque em cada lado da junta. (a) Como soldado. (b) Rebarbado. (c) Laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

O desalinhamento observado nos c.p. dos experimentos IV e V pode ser explicado devido a maior quantidade de material expelido para fora da junta, este desalinhamento pode ser corrigido durante a soldagem através de ajustes de posicionamento do anel soldado na máquina, e foram corrigidos para as amostras IV e V, porém a correção não foi suficiente para que o cordão ficasse perpendicular a L.C.S.

5.1.2.1 QUANTIDADE DE MATERIAL EXPELIDO PARA FORA DA JUNTA.

A tabela 5.2 mostra a quantidade de material expelido para fora da junta, que é a quantidade total de material consumido durante o processo de soldagem, rebarbação e laminação do cordão. O método adotado para determinação deste valor está descrito no capítulo 4.3.2

Tabela 5.2 – Quantidade de material consumido.

Identificação do Experimento	Quantidade total de material recalcado (mm)
I	1,96
II	3,45
III	4,60
IV	6,07
V	7,04

Os dados da tabela 5.2 mostram que quanto menor a quantidade de material recalcado, menor o consumo de material no processo, devido a este consumo menor o comprimento inicial do retângulo que gerará o aro, contribuindo para um menor consumo de material por aro. Levando-se em consideração os altos volumes envolvidos no processo de fabricação de aros, esta redução pode ser significativa. Ela pode gerar uma grande redução nos custos de produção, já que a matéria-prima aço corresponde sozinha a mais de 60% do custo total de fabricação do aro.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS.

5.2.1 RESULTADOS DOS TESTES DE DOBRAMENTO.

Os resultados dos testes de dobramentos para as condições: rebarbado e laminado, estão na tabela 5.3, na tabela constam o tamanho das trincas encontradas em cada experimento.

O critério para aprovação dos c.p. no teste de dobramento, conforme procedimento interno D1.01 [22], indica que a somatória das trincas no teste de dobramento do cordão rebarbado, não pode exceder 10% da largura do corpo de prova, no caso dos testes realizados a somatória das trincas em cada c.p. não poderia exceder 3,6mm.

Tabela 5.3 – Resultados dos testes de dobramento.

Identificação do Experimento	Σ das trincas cordão rebarbado (mm)		Σ das trincas cordão laminado (mm)		Aprovado conf. critério (cordão rebarbado)
	Frente do cordão	Atrás do cordão	Frente do cordão	Atrás do cordão	
I	36	35	36	36	Não
II	0	0	36	27	Sim
III	0	0	2	0	Sim
IV	0	0	1	0	Sim
V	0	0	36	36	Sim

Os resultados obtidos nos testes de dobramento mostram que para os experimentos II, III, IV e V, o processo de soldagem está aprovado, sendo possível trabalhar com qualquer uma destas quantidades de recalque.

Para os c.p. dos experimentos II e V foi observada uma diferença em relação as trincas no cordão rebarbado quando comparado ao cordão laminado. Analisando-se as micrografias das linhas de fluxo referentes ao experimento V, foi possível observar a presença de um entalhe no cordão de solda rebarbado, como mostra a figura 5.11a, este entalhe apareceu provavelmente devido ao excesso de sobremetal deixado na operação de rebarbar somado ao desalinhamento da ferramenta responsável por rebarbar o cordão de solda.

É possível observar na micrografia do cordão laminado, figura 5.11b que este entalhe está presente no cordão de solda sob a forma de uma dobra de laminação, e atuou como concentrador de tensão gerando trincas no teste de dobramento do cordão laminado.

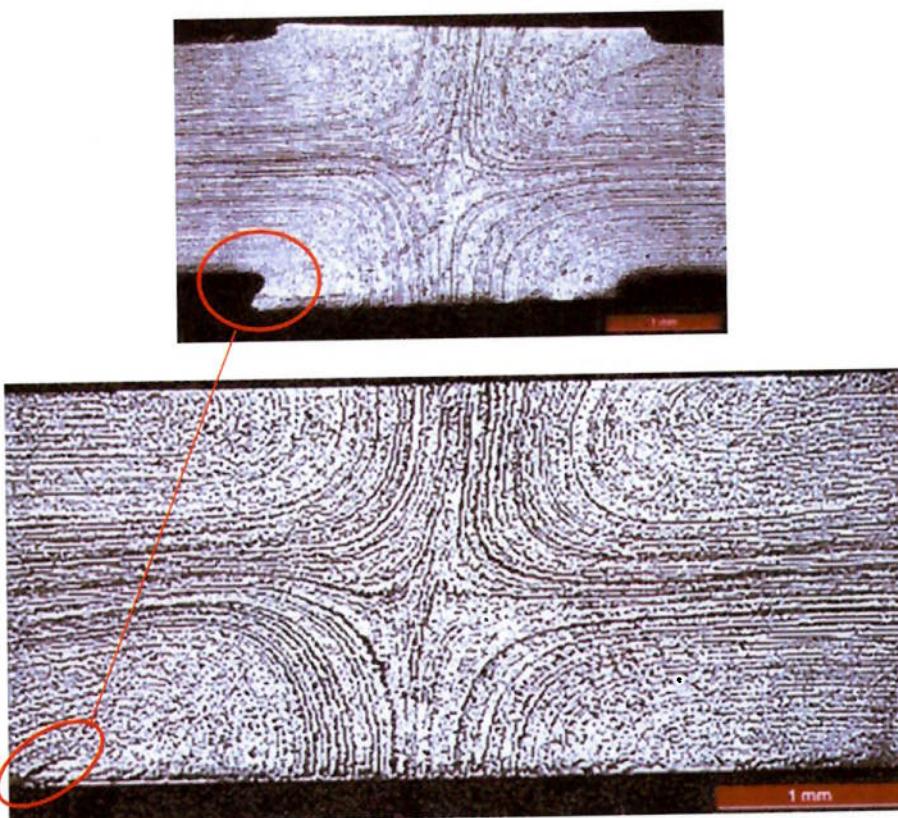


Figura 5.11 – Micrografia mostrando o entalhe formado no cordão de solda (a) Cordão rebarbado (b) Cordão laminado. Aumento: 25x. Ataque: Flash Butt Welding®.

5.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICRODUREZA.

Os ensaios de microdureza foram realizados nos c.p. dos cordões de solda laminados de todos os experimentos e nos cordões rebarbados dos experimentos I, III e V.

5.2.2.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE HIPÓTESE DOS RESULTADOS.

Devido a grande quantidade de dados obtidos, quantidade esta relacionada a quantidade de pontos obtidos por c.p. (51 pontos em cada c.p.), os pontos foram analisados através de Análise de Variância e Teste de Hipótese [23] com o objetivo de se avaliar:

1. Os valores de microdureza dos pontos: inferior, médio e superior, eram estatisticamente iguais, com um nível de significância de 95% e poderia ser considerado um valor médio para comparação dos experimentos.
2. As médias dos valores de microdureza eram semelhantes entre os diversos experimentos e entre os cordões laminados e rebarbados dos experimentos I, III e V.

Foi utilizado o software estatístico Minitab® para análise dos dados. As hipóteses adotadas, conforme Costa [23] foram as mesmas para todas as análises:

H_0 = as médias são iguais

H_A = pelo menos uma das médias é diferente

Para aceitar ou rejeitar uma hipótese o critério foi baseado no valor da distribuição de Snedecor, ou teste de F, valor este fornecido através de cálculos pelo Minitab®, o critério adotado foi o seguinte:

$F > F_{5\%}$: Rejeita H_0

$F < F_{5\%}$: Aceita H_0

O valor $F_{5\%}$ com nível de significância de 95%, foi obtido na tabela A6.6 da referência [23], as entradas na tabela para obtenção do valor de $F_{5\%}$ foram os graus de liberdade v_1 e v_2 de cada experimento. Estes graus de liberdade foram fornecidos pelo software e estão relacionados a quantidade de variáveis e números de amostras de cada experimento.

A tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos das Análises de Variância e dos Testes de Hipóteses de todos os experimentos.

Tabela 5.4 – Resultados das análises de variância e testes de hipóteses.

Identificação do Experimento	Condição do cordão	F	$F_{5\%}$	Resultado conforme critério
I	Laminado	0,58	3,23	Aceita H_0
I	Rebarbado	0,10	3,23	Aceita H_0
II	Laminado	2,41	3,23	Aceita H_0
III	Laminado	3,14	3,23	Aceita H_0
III	Rebarbado	0,43	3,23	Aceita H_0
IV	Laminado	0,03	3,23	Aceita H_0
V	Laminado	0,60	3,23	Aceita H_0
V	Rebarbado	0,24	3,23	Aceita H_0

Os resultados obtidos na Tabela 5.4 mostram, com um nível de significância de 95%, que os valores de microdureza para os pontos inferior, médio e superior são estatisticamente iguais para todos os experimentos. Baseado nestes resultados foi realizada a comparação dos valores médio de microdureza de todos os experimentos para verificar se houve diferença entre os valores encontrados para as diversas quantidades de recalque e para as diferentes condições do cordão (rebarbado e laminado).

5.2.2.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIO DE MICRODUREZA VICKERS DOS CORDÕES DE SOLDA NA CONDIÇÃO LAMINADO DE TODOS OS EXPERIMENTOS.

A tabela 5.5 mostra os valores médio de microdureza Vickers para todos os experimentos dos cordões de solda na condição laminado.

Tabela 5.5 – Valores médio de microdureza Vickers dos cordões de solda laminados.

Identificação do Experimento	Microdureza média ± desvio padrão (HV)
I	253 ±15
II	253 ±9
III	254 ±10
IV	250 ±7
V	271 ±5

A tabela 5.6 mostra os resultados obtidos na comparação dos valores médio de microdureza Vickers de todos os experimentos, dos cordões de solda na condição laminado.

Tabela 5.6 – Resultados das análises de variância e testes de hipóteses para todos os experimentos dos cordões laminados.

Identificação do Experimento	Condição do cordão	F	F _{5%}	Resultado conforme critério
I a V	Laminado	13,36	2,53	Rejeita H ₀ (aceita H _A)

O gráfico da figura 5.12 compara os diferentes perfis de microdureza Vickers obtidos em cada experimento.

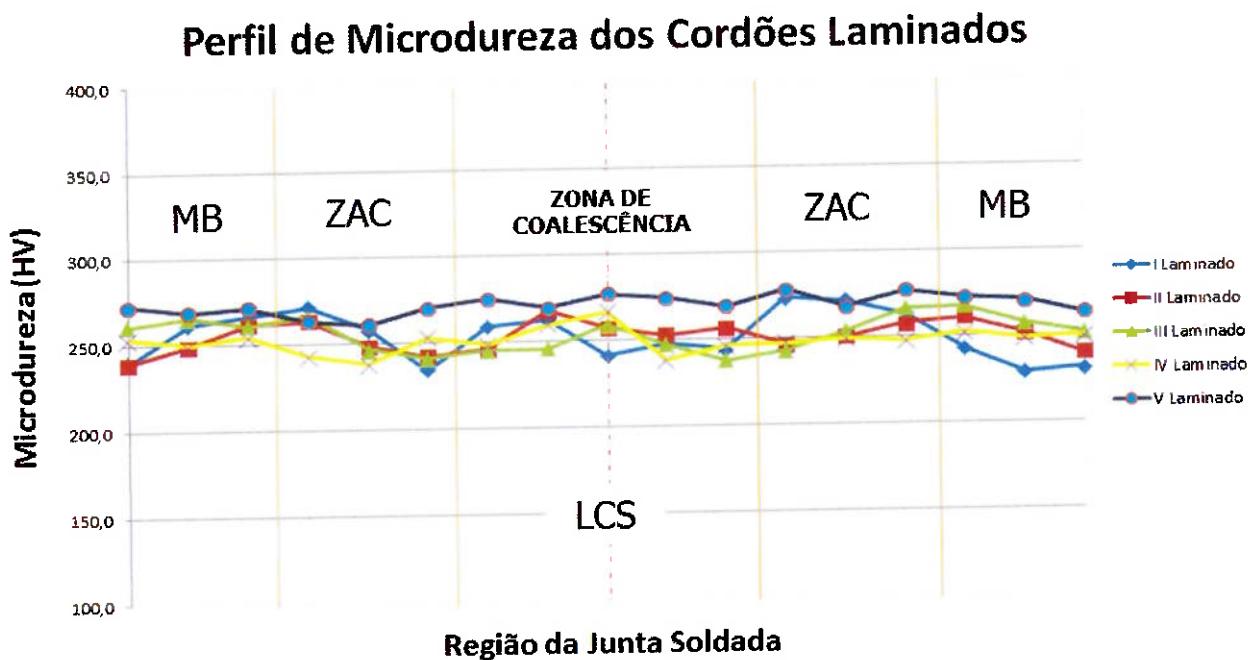


Figura 5.12 – Perfil de microdureza do cordão de solda laminado comparando todos os experimentos.

A figura 5.13, mostra o gráfico Boxplot, obtido pelo Minitab, ilustrando a diferença entre as médias.

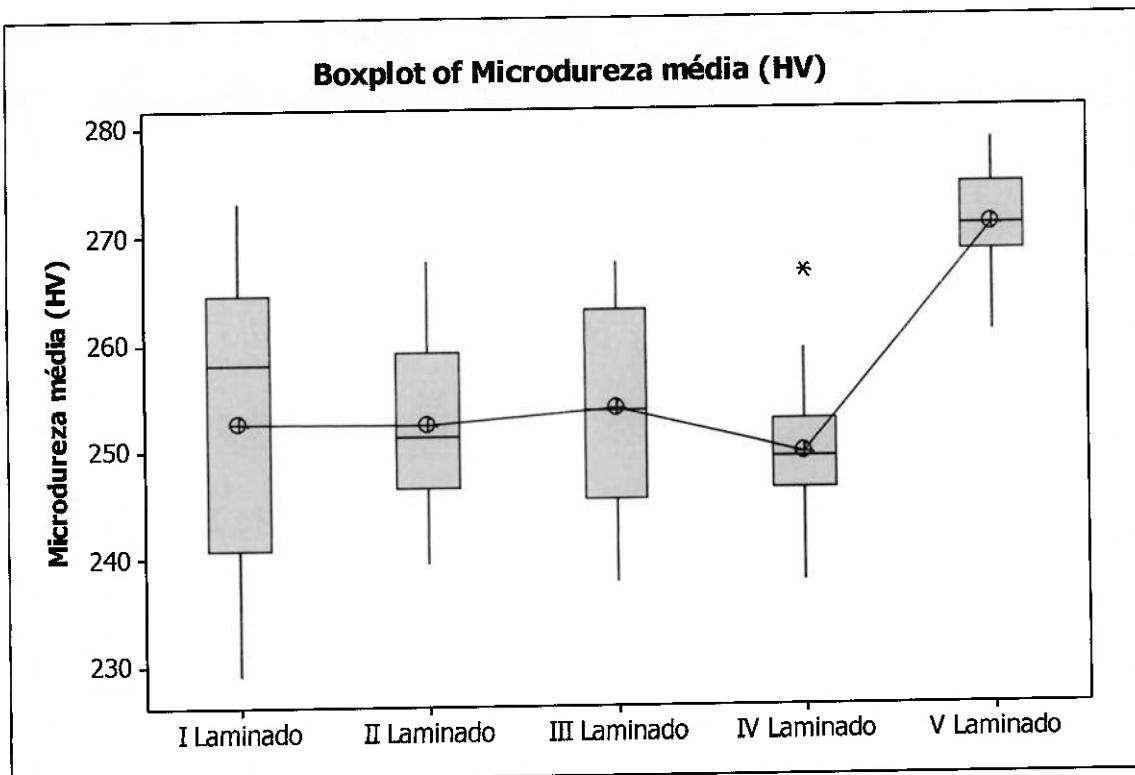


Figura 5.13 – Diferença entre a microdureza média de cada experimento.

A tabela 5.5 e os gráficos das figuras 5.12 e 5.13, mostram que para os experimentos I, II, III e IV as médias estão próximas. Por outro lado, o experimento V mostrou que a microdureza média é maior que dos outros resultados. Esta diferença pode estar relacionada a maior quantidade de sobremetal deixada no cordão de solda rebarbado, como apresentado na figura 5.10. Devido a maior quantidade de material, a pressão dos rolos que laminam o cordão de solda é maior, o que implica num encurramento maior do material e, consequentemente, aumentando a sua dureza.

5.1.4.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIO DE MICRODUREZA DOS CORDÕES DE SOLDA NAS CONDIÇÕES REBARBADO E LAMINADO DOS EXPERIMENTOS I, III E V.

A tabela 5.7 mostra os valores médio de microdureza Vickers para todos os experimentos dos cordões de solda na condição laminado e rebarbado.

Tabela 5.7 – Valores médio de microdureza Vickers dos cordões de solda rebarbados e laminados dos experimentos I, II e V.

Identificação do Experimento	Condição do cordão	Microdureza média ± desvio padrão (HV)
I	Rebarbado	236 ±13
I	Laminado	253 ±15
III	Rebarbado	237 ±10
III	Laminado	254 ±10
V	Rebarbado	237 ±17
V	Laminado	271 ±5

A tabela 5.8 mostra os resultados obtidos na comparação dos valores médio de microdureza Vickers de todos os experimentos, dos cordões de solda na condição laminado e rebarbado.

Tabela 5.8 – Resultados das análises de variância e testes de hipóteses para todos os experimentos I, III e V comparando os cordões rebarbados versus laminados.

Identificação do Experimento	Condição do cordão	F	$F_{5\%}$	Resultado conforme critério
I	Rebarbado/Laminado	11,61	4,17	Rejeita H_0 (aceita H_A)
III	Rebarbado/Laminado	25,29	4,17	Rejeita H_0 (aceita H_A)
V	Rebarbado/Laminado	60,26	4,17	Rejeita H_0 (aceita H_A)

Os gráficos das figuras 5.14, 5.15 e 5.16, comparam os diferentes perfis de microdureza Vickers obtidos em cada experimento e condição do cordão.

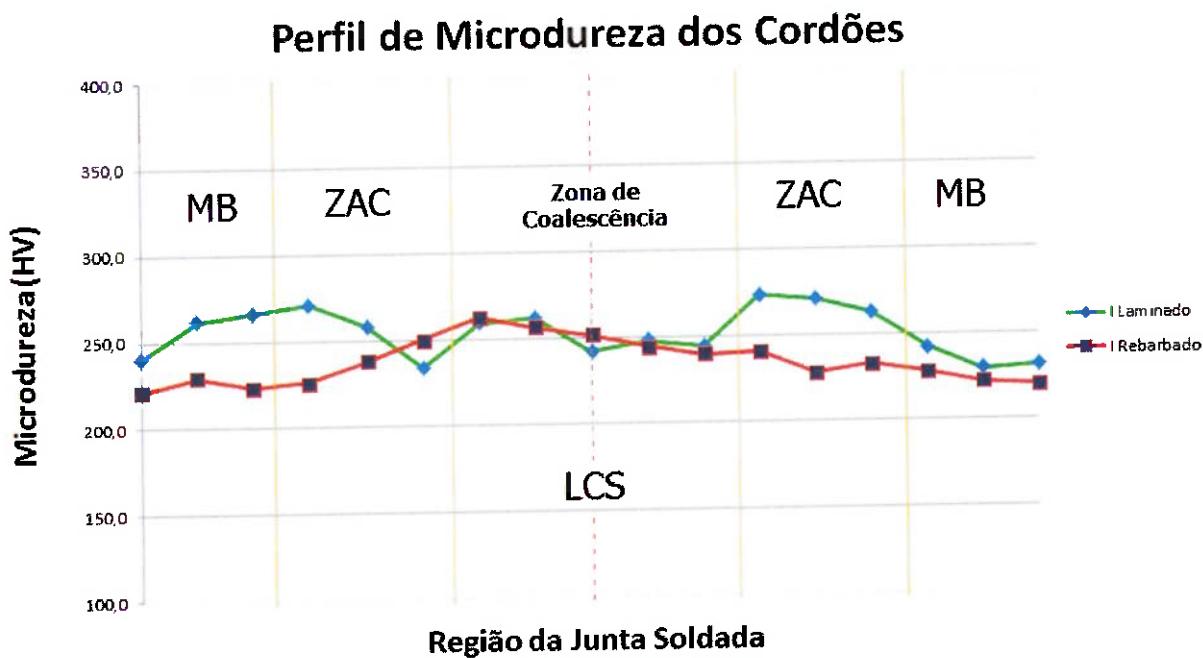


Figura 5.14 – Perfil de microdureza do cordão de solda comparando o cordão nas condições rebarbado e laminado do experimento I.

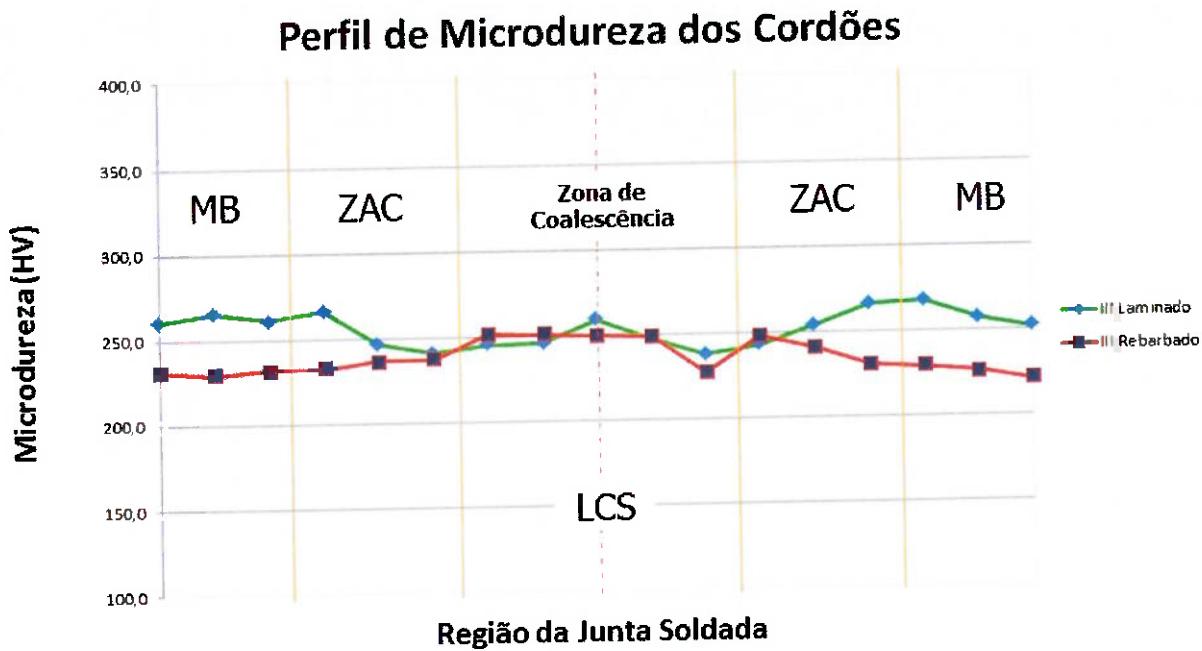


Figura 5.15 – Perfil de microdureza do cordão de solda comparando o cordão nas condições rebarbado e laminado do experimento III.

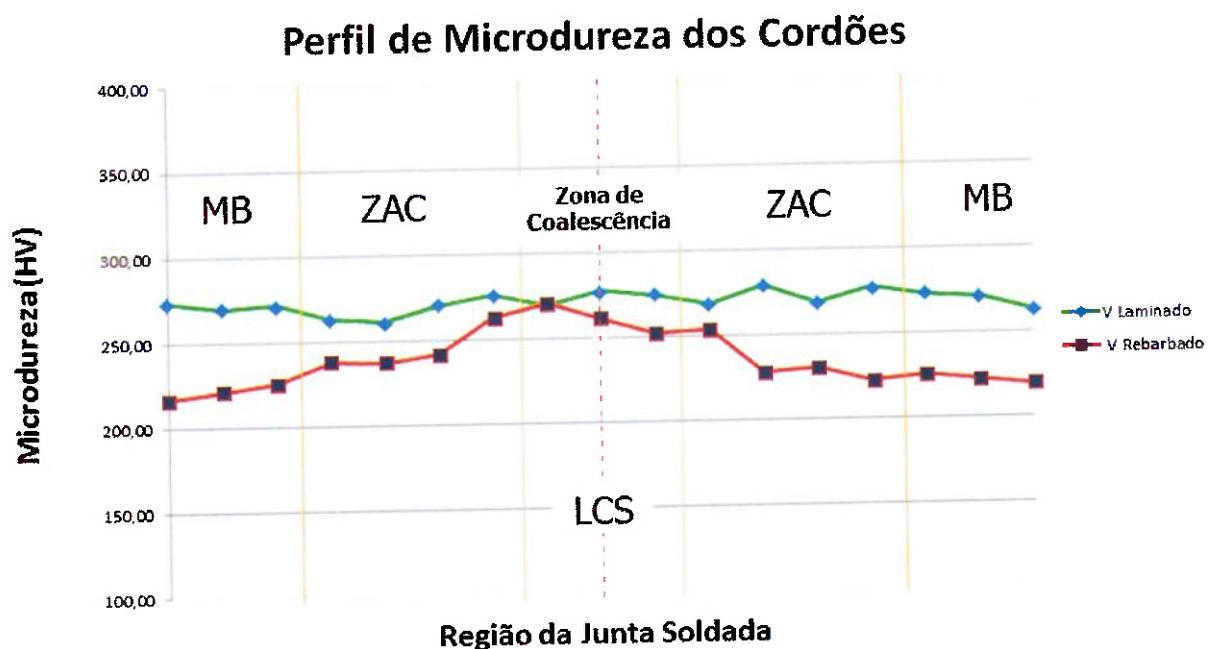


Figura 5.16 – Perfil de microdureza do cordão de solda comparando o cordão nas condições rebarbado e laminado do experimento V.

As figuras 5.17, 5.18 e 5.19 mostram os gráficos Boxplot, obtidos pelo Minitab, ilustrando as diferenças entre as médias para cada comparação das condições do cordão dos experimentos I, III e V.

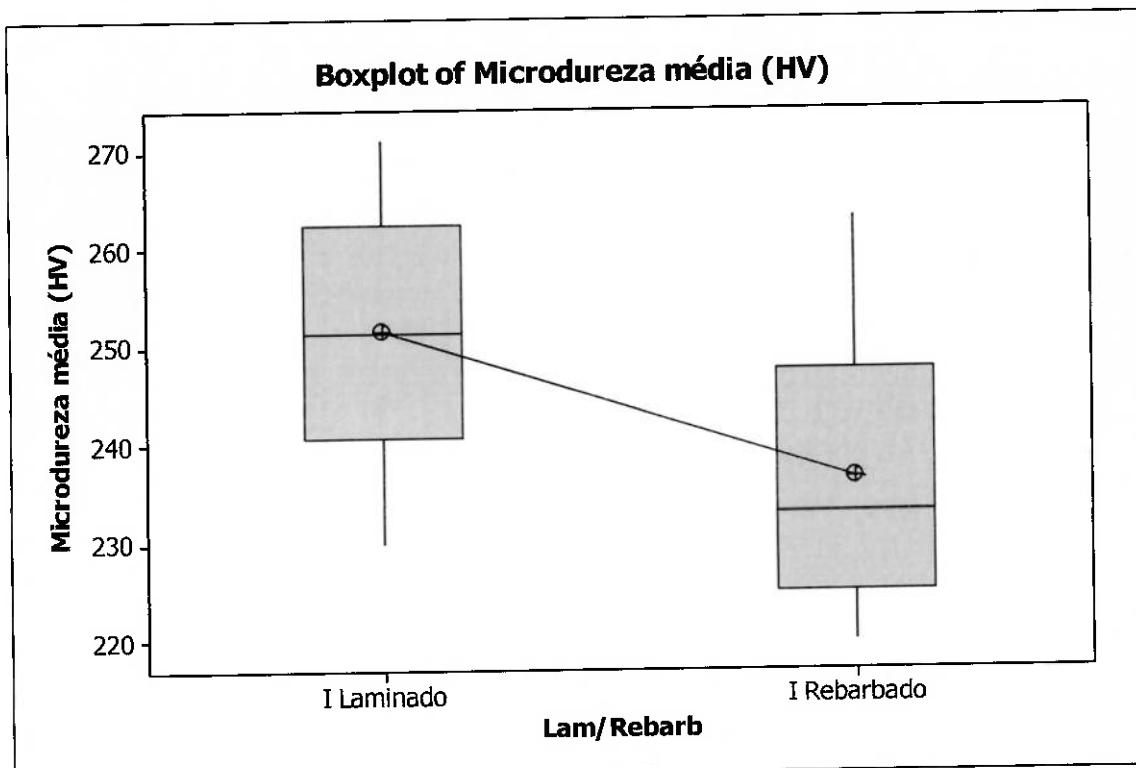


Figura 5.17 – Diferença entre os valores médio de microdureza para o experimento I nas condições rebarbado e laminado.

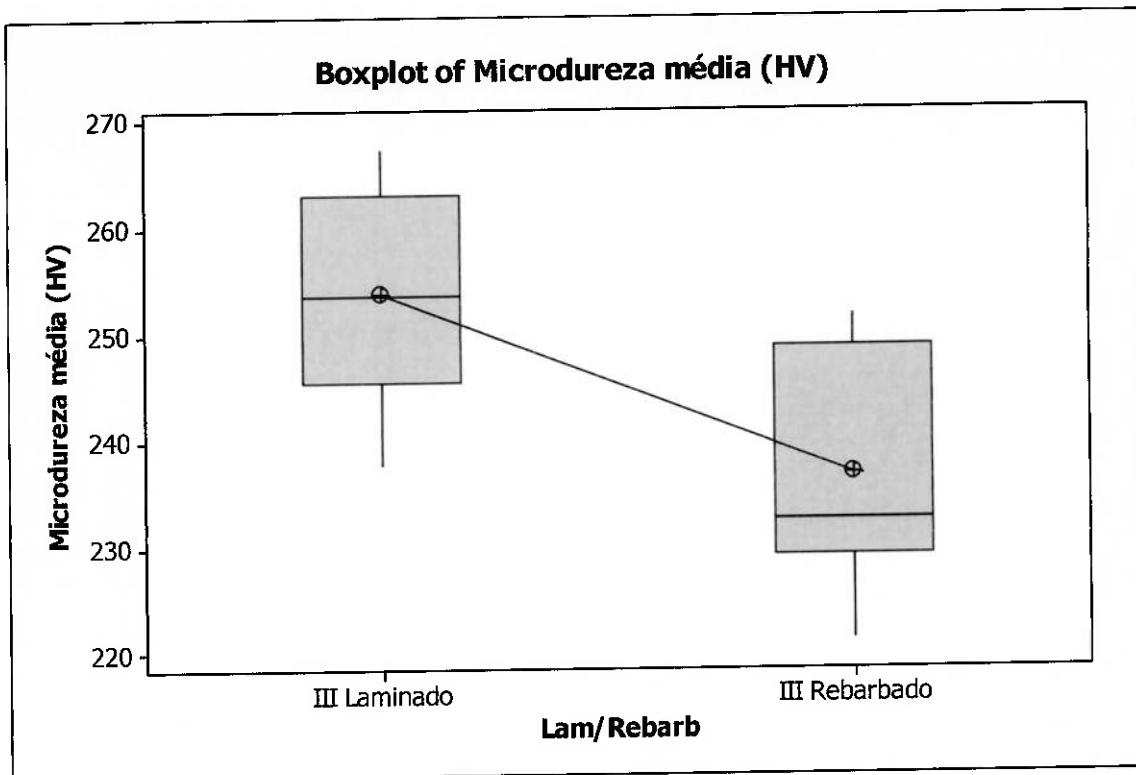


Figura 5.18 – Diferença entre os valores médio de microdureza para o experimento III nas condições rebarbado e laminado.

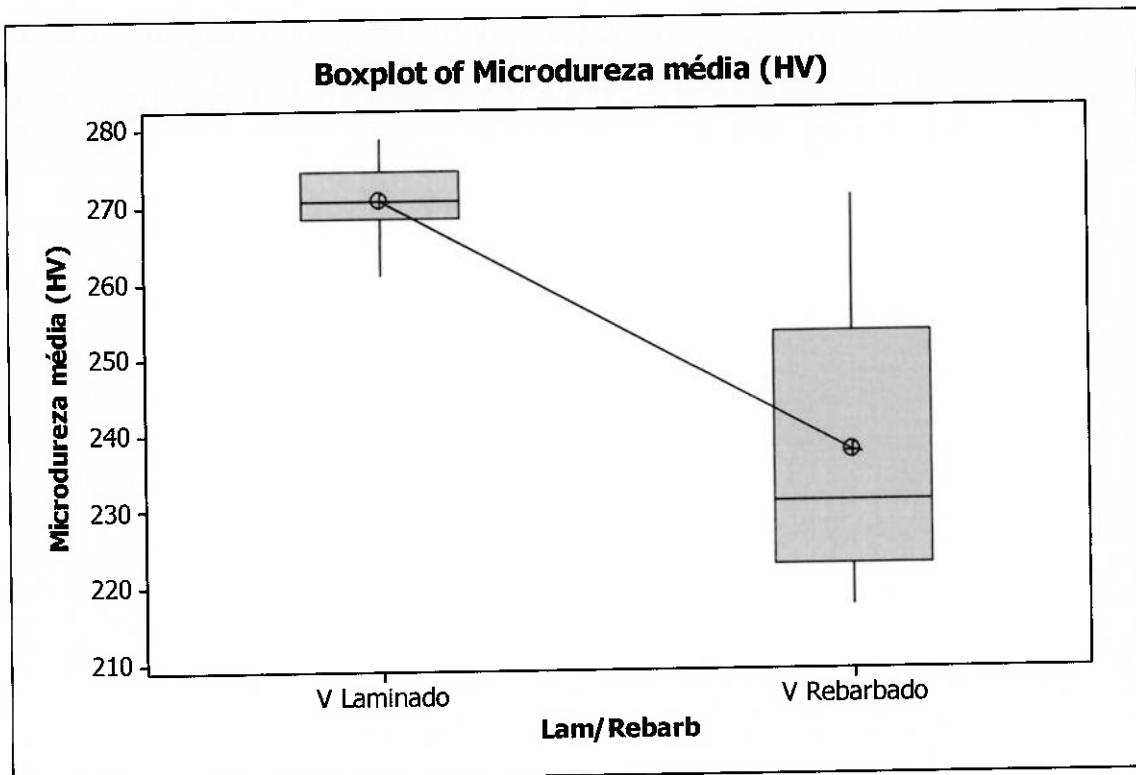


Figura 5.19 – Diferença entre os valores médio de microdureza para o experimento V nas condições rebarbado e laminado.

Os dados obtidos nas comparações mostram que a dureza dos cordões de solda laminados é maior em todos os experimentos. Este resultado indica que na operação de laminar o cordão pode haver um encruamento do material aumentando assim sua dureza.

6. CONCLUSÕES.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

1. Não houve alterações na microestrutura devido a alteração na quantidade de recalque. Da mesma maneira, não foi observada a fusão de material na interface da junta;
2. : A quantidade de recalque tem influência no ângulo das linhas de fluxo do material, não foi observada uma relação direta entre o aumento do recalque com o aumento do ângulo das linhas de fluxo, porém para todo aumento realizado na quantidade de recalque, nos valores testados nos experimentos, houve aumento no ângulo das linhas de fluxo;
3. Cordões de solda com ângulo das linhas de fluxo menor do que 65º não foram aprovados nos testes de dobramento, indicando que 65º pode ser um ângulo mínimo para que haja coalescência entre os topes do material e formação de uma junta com resistência mecânica mínima necessária para atender os requisitos do teste;
4. A redução de consumo de material é proporcional a quantidade de recalque, quanto menor a quantidade de recalque, menor o consumo de material na mesma proporção, já que o comprimento inicial do retângulo pode ser reduzido;
5. As operações de rebarbar e laminar o cordão de solda tem forte influência nos resultados dos testes de dobramento, condições inadequadas nestas operações como quantidade excessiva de sobremetal, podem criar pontos de concentração de tensão na junta,

como dobras de laminção, sendo estes, pontos de iniciação de trincas no teste de dobramento, é preciso observar para que a quantidade de sobremetal deixado na operação de rebarbar o cordão de solda seja a menor possível;

6. Através de análise de hipótese, foi possível concluir que não houve alteração na microdureza, em relação a localização dos pontos de medição nos corpos de prova (inferior, médio e superior), esta igualdade pode ser explicada pelo fato de que não foi observada diferenças na microestrutura da junta em relação ao eixo vertical, quando analisando um mesmo ponto;
7. A microdureza nos cordões laminados foi maior para o experimento V, recalque total de 7,04mm, esta diferença em relação aos outros experimentos pode ser explicada devido ao possível encruamento do material causado pelos rolos laminadores do cordão de solda, já que a quantidade de sobremetal deixada neste experimento foi maior, e como é sempre objetivada uma condição final de espessura do cordão de solda igual a do metal de base, a pressão aplicada para laminar o cordão foi maior.
8. A microdureza é maior no cordão rebarbado quando comparado ao cordão laminado para uma mesma quantidade de recalque, este incremento na dureza se deve provavelmente ao encruamento causado pela operação de laminar o cordão de solda.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Avaliar a influência da densidade de corrente aliada a quantidade de recalque na variável altura do recalque;
2. Avaliar o desempenho com um número maior de amostras, de anéis soldados com recalque de 4mm (experimento II), com objetivo de otimizar o comprimento inicial do retângulo;
3. Relacionar ângulo das linhas de fluxo com quantidade de trincas no teste de dobramento

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. PATEL, J.; KLINKENBERG, C.; HULKA KLAUS. Hot rolled HSLA strip steels for automotive and construction applications. 6th, International Symposium Niobium, 2001. Proceedings. Orlando, Florida, USA, Niobium Science & Technology, 2001. 28 p.
2. NAUS, L. J. G. DC Upset resistance welding Modeling and control of a weld process. 2005. 98 p. Master Thesis – Department of Mechanical Engineering, University of Technology Eindhoven, Eindhoven. 2005.
3. MESSLER, R. W. Jr. Principles of Welding Process, Physics, Chemistry and Metallurgy. New York: Jhon Willey & Sons Inc, 1999. 658 p.
4. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blucher, 1992. 494p.
5. THOMSON ELECTRIC WELDING COMPANY. Elihu Thomson. Method of electric Welding. US 451,345. 1895 April, 28.
6. KERSTENS, N. F. H.; RICHARDSON I. M. Heat distribution in resistance upset butt welding. Journal of Materials Processing Technology, Vol 209, p. 2715 – 2722, Jun/2008.
7. KERSTENS, N. F. H. Investigation and Control of Factors Influencing Resistance Upset Butt Welding. 2010. 176 p. PhD Thesis – Department of Materials Science and Technology, Delft University of Technology, Delft. 2010.
8. CALLISTER, W. D. Jr. Materials Science and engineering an Introduction. New York: Jhon Willey & Sons Inc, 2003. 111 - 121 p.

9. KUCKLICK, F. C. Flashless DC welding of Rims offer Advantages. *Welding Journal*, Vol. 46, Nº 3, p. 61 - 64, July/1991.
10. STANDART Welding Terms and Definitions: A3.0M/A3.0:2010. American Welding Society. Miami. 2010.
11. O'BRIEN, A. (Editor) – "AWS Welding Handbook, Volume 3 – Welding Process, Part 2", 9^a EDITION, American Welding Society, EUA, p. 74 – 158. 2007.
12. SAVAGE, W. F. Flash Welding – The Process and Applications. *Welding Journal*, Vol. 87, Nº 3, p. 227 - 237, March/1962.
13. SAVAGE, W. F. Flash Welding – Process Variables and weld Properties. *Welding Journal*, Vol. 87, Nº 3, p. 109 - 119, March/1962.
14. OMAR, G. F. Influência da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revestimento na soldagem topo-a-topo por centelhamento de serras de fitas bi metálicas. 211 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2007.
15. O'BRIEN, A. (Editor) – "AWS Welding Handbook, Volume 4 – Materials and Applications, Part 1", 9^a EDITION, American Welding Society, EUA, p. 41 – 55. 2011.
16. RECOMENDED PRACTICE for Steel, High Strength, Hot Rolled Sheet and Strip, Cold Rolled Sheet, and Coated Sheet: J1392. Society of Automotive Engineers. Pennsylvania. 2008.
17. RECOMENDED PRACTICE for Categorization and Properties of Dent Resistant, High Strength, and Ultra High Strength Automotive Sheet Steel: J2340. Society of Automotive Engineers. Pennsylvania. 1999.

18. GORNI, A. A.; XAVIER, M. D.; GOLDENSTEIN, HÉLIO; TSCHIPTSCHIN, A. P. Transformação da austenita em aços microligados com microestrutura ferrítica-bainítica. In: 62º Congresso Anual da ABM, 2007, Vitória ES. Anais do 62º Con. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2007. p. 3262-3268.
19. BRANDI, S. D. Metalurgia da Soldagem: Transferência de Calor. ZIEDAS, S.; TATINI, I. Coleção Tecnologia SENAI: Soldagem. São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 1997, Cap. 2, p. 93-102.
20. H. A. SCHLATTER AG. Manual de programação do controlador SWEP 06. Rev. 8912. Schlieren, 1992. 230 p.
21. PROCEDIMENTO para Qualificação da especificação de soldagem Q1.01. Fumagalli. Limeira, Jan/2000.
22. PROCEDIMENTO para Teste de Dobramento D1.01. Fumagalli. Limeira, Dez/1997.
23. COSTA, PEDRO L. NETO OLIVEIRA. Estatística. São Paulo: Edgar Blücher, 1986. 264p.