

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA – CÂMPUS SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA SOLDAGEM POR ATRITO
ROTATIVO COAXIAL ENTRE O COBRE ELETROLÍTICO E A
LIGA CuCrZr PARA GARANTIR CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.**

WAGNER DE CAMPOS SABOR

ORIENTADOR: PROF. DR. FRANCISCO YASTAMI NAKAMOTO

São Paulo - SP
junho/2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA – CÂMPUS SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA SOLDAGEM POR ATRITO ROTATIVO COAXIAL ENTRE O COBRE ELETROLÍTICO E A LIGA CuCrZr PARA GARANTIR CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.

WAGNER DE CAMPOS SABOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração: **Materiais e Processos de Fabricação.**

Orientador: Dr. Francisco Yastami Nakamoto

São Paulo - SP
junho/2018

Catalogação na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S113a	<p>Sabor, Wagner de Campos Análise dos parâmetros da soldagem por atrito rotativo coaxial entre o cobre eletrolítico e a liga CuCrZr para garantir condutividade elétrica. / Wagner de Campos Sabor. São Paulo: [s.n.], 2018. 104 f. il.</p> <p>Orientador: Francisco Yastami Nakamoto Co-orientador: Givanildo Alves dos Santos</p> <p>Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018.</p> <p>1. Materiais Dissimilares. 2. Cobre Eletrolítico. 3. Liga Cu Cr Zr . 4. Soldagem Por Atrito Rotativo. 5. Condutividade Elétrica. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título.</p> <p>CDD 620.1</p>
-------	--

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO
PAULO

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA SOLDAGEM POR ATRITO ROTATIVO
COAXIAL ENTRE O COBRE ELETROLÍTICO E A LIGA CuCrZr PARA
GARANTIR CONDUTIVIDADE ELÉTRICA”

Autor: Wagner de Campos Sabor
Orientador: Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:

Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto
IFSP – SPO

Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos
IFSP - SPO

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha
USP

São Paulo, 03 de julho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar o discernimento e as condições necessárias e suficientes para a consecução deste trabalho.

À minha esposa Zenaide, meus filhos Wagner Jr., Tiago e Diego pelo constante incentivo, compreensão, paciência e força em todos os momentos durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Francisco Yastami Nakamoto que me orientou e acompanhou neste trabalho com dedicação, sempre incentivando e participando, ao Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos, coordenador do curso de Mestrado, pelas contribuições, orientações, confiança e presteza na disseminação de seus conhecimentos.

Agradeço a todos os professores do curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do IFSP que, com seus conhecimentos, dedicação e profissionalismo, me possibilitaram o aprendizado de novos conhecimentos e conceitos utilizados neste trabalho e que serão muito úteis na vida profissional.

Especialmente, agradeço aos amigos: José dos Santos Garcia Neto, Eriki Masahiro Takara, Ricardo Ferreira Ianelli, Profa. Me. Suely Midori Aoki, Eng. Me. Vinicius Torres dos Santos, Prof. Dr. Cesar da Costa, Prof. Dr. Garabed Kenchian, Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart, Eng. José Antonio Batista de Souza, Eng. Humberto Lima, Eng. Vanderci Ribeiro, Eng. Marcos Ribeiro, Prof. Dr. Marcio Bottaro, Rogério dos Santos, Prof. Me. Luís Roberto Kanashiro, Prof. Me. Tarcisio Furlanetto, Prof. Luís Kundrat, Eng. Roberto Colige Jr., Eng. Cleber Segantini, Eng. Marcos Antonio Laranjeira, Eng. Marcos Roberto Teixeira da Silva, pela presteza, ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ainda, as empresas TERMOMECANICA São Paulo S.A. (doação de material para os ensaios, realização de ensaios destrutivos e não destrutivos), AMPCO Metal S.A. (doação de material para os ensaios e literatura), VIDJAYA Informática Ltda (automação do equipamento), HYDAC Tecnologia Ltda (empréstimo do equipamento hidráulico), DYNAR

Automatização Industrial Ltda (doação de mangueiras hidráulicas), MEGABRAS Industria de eletrônicos Ltda (cessão de equipamento para medição de resistência elétrica) e Luvata São Paulo – Comércio e Indústria Ltda (cessão de equipamento para medição de condutividade elétrica) que, sem o apoio destas, o trabalho de pesquisa não poderia ser concluído.

Agradeço também aos amigos e professores: Prof. Dr. Eduardo Gui Perpétuo Bock, Prof. Me. Ricardo Dias, Prof. Me. Ricardo Cruz, Prof. Me. Clovis Velecico, Prof. Me. Marcio Zurlo, Prof. Me. Antônio Tadeu Rogerio Franco, Eng. Me. Joaquim A. F. Rocha, Prof. Me. Marcos Aguiar e Eng. Sidmar Ceresani pela colaboração e apoio.

Agradeço ainda, a todas as pessoas que direta ou indiretamente me incentivaram e apoiaram para a consecução deste trabalho.

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

Albert Einstein

RESUMO

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA SOLDAGEM POR ATRITO ROTATIVO COAXIAL ENTRE O COBRE ELETROLÍTICO E A LIGA CuCrZr PARA GARANTIR CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.

A união de materiais similares e dissimilares realizadas por soldagem por atrito rotativo ou *Friction Rotary Welding* (FRW) é muito utilizada na indústria, principalmente na indústria automobilística para a fabricação de peças com geometrias complexas ou compostas de materiais dissimilares, em que os processos tradicionais de soldagem por fusão não são possíveis ou não recomendados devido às restrições das condições de contorno que envolvem propriedades do material e/ou processo. Esta pesquisa visa obter a correlação dos parâmetros de soldagem FRW entre o cobre eletrolítico e a liga CuCrZr, mantendo a qualidade da condutividade elétrica na região da solda. A soldagem dos corpos de prova foi realizada em um equipamento adaptado para realizar o processo, ou seja, foi realizado o *retrofit* de um torno mecânico convencional, com a adaptação de reforços estruturais, sistema hidráulico, sistema de controle eletrônico de rotação, sensores e software dedicado. Após uma extensa pesquisa experimental, os melhores parâmetros para a obtenção de soldas de boa qualidade foram determinados. O presente trabalho contribuirá para o processo de fabricação de terminais e hastes para transformadores e eletrodos para soldagem por resistência, dentre outras aplicações. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, dureza e microdureza *Vickers*, inspeções metalográficas, micrográficas e macrográficas, ensaios não destrutivos e ensaios de condutividade elétrica, que comprovam a eficiência das soldas, boa resistência mecânica e melhora na condutividade elétrica.

Palavras chave: Materiais Dissimilares, Cobre Eletrolítico, Liga CuCrZr, Soldagem por Atrito Rotativo, Condutividade Elétrica

ABSTRACT

ANALYSIS OF FRICTION ROTARY WELDING PARAMETERS BETWEEN THE ELECTROLYTIC COPPER AND THE CuCrZr ALLOY TO GUARANTEE ELECTRICAL CONDUCTIVITY

The union of similar and dissimilar materials made by Friction Rotary Welding (FRW) is widely used in industry, mainly in the automobile industry for the manufacture of parts with complex geometries or composed of dissimilar materials in which traditional melt welding processes are not possible or not recommended due to design constraints involving material and / or process properties. The objective of this research is to obtain the correlation of the FRW welding parameters between the electrolytic copper and the CuCrZr alloy, maintaining the quality of the electrical conductivity in the region of the weld. The welding of the specimens was carried out in an equipment adapted to carry out the process, that is, the retrofit of a conventional lathe was performed, with the adaptation of structural reinforcements, hydraulic system, electronic rotation control system, sensors and software dedicated. After an extensive experimental research, the best parameters for the achievement of good quality welds were determined. The present work will contribute to the manufacturing process of transformer terminals and rods for resistance welding, among other applications. The specimens were submitted to tensile tests, Vickers hardness and microhardness test method, metallographic, micrographic and macrographic inspections, non-destructive testing and electrical conductivity tests that prove the efficiency of the welds, good mechanical resistance and improvement in electrical conductivity.

Keywords: dissimilar materials, electrolytic copper, CuCrZr alloy, rotary friction welding, electrical conductivity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Sequência do processo de soldagem por atrito rotativo coaxial adaptado de ASM Metals Handbook vol. 6	21
Figura 2.	Fases do processo: “A” - Fase de aceleração da velocidade de rotação até atingir a estabilidade; “B” - Fase de aplicação da pressão de atrito; “C” – Fase em que se atinge a temperatura de forjamento em função do tempo; “D” – Fase de parada da velocidade de rotação e aplicação da pressão de forjamento.....	22
Figura 3.	Micrografias do cobre eletrolítico. “A” – aumento 100 X; “B” – aumento 200 X; “C” – aumento 500 X.....	30
Figura 4.	Amostra com ampliação de 100 vezes (A); 200 vezes (B).....	31
Figura 5.	Amostra com ampliação de 100 vezes (A); 200 vezes (B).....	32
Figura 6.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido transversal. Aumento 50X.	34
Figura 7.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido transversal. Aumento 100X.....	35
Figura 8.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150). Aumento 50X.....	35
Figura 9.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150). Aumento 100X.....	36
Figura 10.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150) - sentido longitudinal. Aumento 50X.	36
Figura 11.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido longitudinal. Aumento 100X.....	37
Figura 12.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido longitudinal. Aumento 50X.	37
Figura 13.	Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido longitudinal. Aumento 100X.....	37
Figura 14.	Diagrama de fases Cu O. NEUMANN et al, 1984	38
Figura 15.	Diagrama de fases pseudo binário da liga C18150. Fonte: GOULART, P.R. - 2018.....	39
Figura 16.	Desenho do corpo de prova para o ensaio de tração.....	41
Figura 17.	Torno mecânico original.....	45
Figura 18.	Placa e Encoder.....	46
Figura 19.	Pinça de fixação do corpo de prova.....	47

Figura 20.	Novas pinças de fixação estriadas internamente (lado rotativo - esquerda e lado fixo - direita).....	47
Figura 21.	Fixação da placa de três castanhas.....	48
Figura 22.	Suporte de fixação do cilindro hidráulico.....	48
Figura 23.	Travamento do cabeçote móvel no barramento.....	49
Figura 24.	Ancoragem do cabeçote móvel ao barramento “A” esquerda - parte superior; “B” direita – parte inferior.....	49
Figura 25.	Rasgo de passagem para o termopar interno.....	50
Figura 26.	Suporte do termopar tipo “K”.....	50
Figura 27.	Acoplamento do cabeçote móvel ao carro principal.....	51
Figura 28.	Sensor de posicionamento.....	52
Figura 29.	Sistema de controle do sistema hidráulico.....	53
Figura 30.	Unidade hidráulica.....	55
Figura 31.	Suporte do termômetro.....	55
Figura 32.	Peça em forma de alicate para fixar o termopar externo.....	56
Figura 33.	Proteção basculante.....	57
Figura 34.	Tela de setup de parâmetros.....	58
Figura 35.	Tela de comando individual de acionamentos.....	58
Figura 36.	Fluxograma da automação do equipamento de soldagem por atrito.....	61
Figura 37.	Medição de resistência elétrica.....	65
Figura 38.	Gráfico da Resistência Elétrica pós soldagem.....	67
Figura 39.	Gráfico da Resistência Elétrica pós usinagem.....	68
Figura 40.	Macrografia de soldagem com junta cônica (160°) Amostra nº 30.....	69
Figura 41.	Macrografia de soldagem com junta plana. Amostra nº 43.....	69
Figura 42.	Micrografia do C11000 – Metal de base. Aumento de 100 X.....	70
Figura 43.	Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 200 X.....	70
Figura 44.	Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 500 X.....	71
Figura 45.	Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 100 X.....	71
Figura 46.	Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 200 X.....	72
Figura 47.	Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 500 X.....	72
Figura 48.	Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 100 X.....	72
Figura 49.	Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 200 X.....	73

Figura 50.	Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 500 X.....	73
Figura 51.	Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 1000 X.....	73
Figura 52.	Micrografia da Região da solda. Aumento de 50 X.....	74
Figura 53.	Micrografia da Região da solda. Aumento de 100 X.....	74
Figura 54.	Micrografia da Região da solda. Aumento de 200 X.....	75
Figura 55.	Micrografia da Região da solda. Aumento de 500 X.....	75
Figura 56.	Micrografia da Região da solda. Aumento de 1000 X.....	75
Figura 57.	Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 100 X.....	76
Figura 58.	Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 200 X.....	76
Figura 59.	Micrografia do C11000 - Longe da solda. Aumento de 500 X.....	76
Figura 60.	Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 100 X.....	77
Figura 61.	Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 200 X.....	77
Figura 62.	Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 500 X.....	77
Figura 63.	Micrografia do C18150. Aumento de 50 X.....	78
Figura 64.	Micrografia do C18150. Aumento de 100 X.....	78
Figura 65.	Micrografia do C18150. Aumento de 200 X.....	78
Figura 66.	Micrografia do C18150. Aumento de 500 X.....	79
Figura 67.	Micrografia do C18150. Aumento de 1000 X.....	79
Figura 68.	Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 50 X.....	79
Figura 69.	Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 100 X.....	80
Figura 70.	Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 200 X.....	80
Figura 71.	Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 500 X.....	80
Figura 72.	Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 1000 X.....	81
Figura 73.	Corpos de prova antes do ensaio de tração.....	81
Figura 74.	Corpos de prova após o ensaio de tração.....	82
Figura 75.	Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 34.....	82
Figura 76.	Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 46.....	83
Figura 77.	Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 47.....	83

Figura 78.	Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 50	84
Figura 79.	Gráfico dos limites de resistência à tração obtidos após a soldagem, nos corpos de prova de nº 34, 46, 47 e 50.....	85
Figura 80.	Gráfico da dureza HV 10 Amostra nº 43	86
Figura 81.	Gráfico da dureza HV – 10 Amostra nº 30	86
Figura 82.	Gráfico da dureza HV – 0,1 Amostra nº 43	87
Figura 83.	Gráfico da dureza HV – 0,1 Amostra nº 30	88
Figura 84.	Imagem da gamagrafia da amostra nº 49, na posição “A” (esquerda) e laudo técnico com a avaliação dos resultados (direita).	89
Figura 85.	Imagem da gamagrafia da amostra nº 49, na posição “B” (esquerda) e laudo técnico com a avaliação dos resultados (direita).	90
Figura 86.	Amplitude do eco de fundo do diâmetro da amostra	91
Figura 87.	Amplitude do eco de fundo do diâmetro da amostra	91
Figura 88.	Radiografia da amostra nº 54 posição “A” e “B”	92
Figura 89.	Radiografia da amostra nº 54 posição “C”, “D” e “E” (posição inclinada).	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Principais processos de soldagem por atrito AWS (1997).	19
Tabela 2.	Soldabilidade dos materiais. Adaptado de: ANSI/AWS C6.1-89.	20
Tabela 3.	Propriedades mecânicas do cobre eletrolítico em temperatura ambiente.	29
Tabela 4.	Propriedades físicas e mecânicas da liga CuCrZr em temperatura ambiente.....	33
Tabela 5.	Controle eletrônico de rotação	59
Tabela 6.	Dados das modificações no sistema de transmissão.....	62
Tabela 7.	Registro dos parâmetros utilizados nos ensaios.	64
Tabela 8.	Medição da Resistência elétrica pós soldagem.....	66
Tabela 9.	Medição da Resistência elétrica pós usinagem.....	68
Tabela 10.	Resultados dos ensaios de tração.	84
Tabela 11.	Resultados dos ensaios de dureza Vickers HV – 10. Amostra nº 43. ...	85
Tabela 12.	Resultados dos ensaios de dureza Vickers HV – 10 Amostra nº 30. ...	86
Tabela 13.	Resultados dos ensaios de microdureza Vickers HV – 0,1. Amostra nº 43 (junta plana).	87
Tabela 14.	Resultados dos ensaios de micro dureza Vickers HV – 0,1. Amostra nº 30 (junta cônica).....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA6351 - T6	Liga de alumínio tratada termicamente
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC -	Analogic Digital Converter
AMPCOLOY® 972 - Ltda.	Liga de CuCrZr marca registrada pela Ampco Metal Brasil
ANSI -	American National Standards Institute
ASM -	American Society of Materials
ASTM -	American Society for Testing and Materials
AWS -	American Welding Society
C 110 -	Sigla da liga de cobre eletrolítico 99,9% - (Termomecânica)
C11000 -	Liga de cobre eletrolítico 99,9%, de acordo com a UNS
C18150 -	Liga de CuCrZr
CP -	Corpos de prova
CuCrZr -	Liga de cobre, cromo e zircônio
DIN -	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EPI -	Equipamentos de proteção individual
FRW -	Friction Rotary Welding
I.A.C.S. -	International Annealed Copper Standard
IFSP -	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Latão (CLA)	Latão Corte Livre Americano (C 36000)
NR -	Norma Regulamentadora
RSW -	Resistance Spot Welding
UNS -	Unified Number System
ZTA -	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade de medida
A -	Área	mm ²
F -	Força	Newton [N]
HRB -	Dureza Rockwell	escala "B"
HRF -	Dureza Rockwell	escala "F"
L -	Comprimento	metro
m/Ω.mm ²	Condutividade elétrica	metro/ohm x milímetro ²
N.m -	Torque	Newton x metro
P _a	Pressão de atrito	MPa
P _f	Pressão de forjamento	MPa
R -	Resistência elétrica	Ω
rpm -	Velocidade de rotação	rotações por minuto
T _c	Temperatura de aquecimento	°C
T _a	Tempo de aquecimento	segundos (s)
T _f	Tempo de forjamento	segundos (s)
W/m.K -	Condutividade térmica	Watts/metro x Kelvin
ρ	Resistividade elétrica	ohm.mm ² / m
Ω	Unidade de resistência elétrica	ohm

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contexto.....	13
1.2 Motivação.....	14
1.3 Justificativa.....	15
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Considerações Iniciais.....	17
2.2 Definição de soldagem por atrito rotativo.....	17
2.3 Parâmetros envolvidos no processo.....	21
2.3.1 Velocidade relativa de rotação.....	23
2.3.2 Pressão de atrito.....	23
2.3.3 Tempo de aplicação da pressão de atrito.....	24
2.3.4 Temperatura de forjamento.....	25
2.3.5 Pressão de forjamento ou recalque.....	25
2.3.6 Tempo de aplicação da pressão de forjamento.....	26
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Referências práticas.....	27
3.2 Método de preparação para a soldagem.....	27
3.3 Materiais utilizados.....	28
3.3.1 Dados técnicos do Cobre eletrolítico (C11000).....	28
3.3.2 Dados técnicos da liga CuCrZr - AMPCOLOY® 972.....	33
3.4 Diagrama de fase.....	38
3.5 Procedimento para preparação dos materiais e soldagem.....	40
3.6 Procedimento para ensaio de tração.....	41
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO.....	44
4.1 Equipamento de soldagem por atrito rotativo.....	45

4.2 Software para automação e controle do equipamento de soldagem por atrito rotativo	57
4.3 Descrição da automação do equipamento para realização de solda por atrito ...	59
4.3.1 Controle de velocidade de rotação do eixo árvore	59
4.3.2 Sensoriamento de rotação	59
4.3.3 Fluxograma da automação do equipamento de soldagem por atrito rotativo ...	61
4.4 Modificações e aprimoramentos do equipamento	61
4.5 Comentários sobre os parâmetros dos ensaios	63
4.6 Resultados dos ensaios de resistência elétrica	65
4.7 Macrografias pós soldagem	69
4.8 Micrografias pós soldagem.....	70
4.9 Resultados dos ensaios de tração	81
4.10 Resultados dos ensaios de dureza Vickers.....	85
4.11 Resultados dos ensaios de microdureza Vickers.....	87
4.12 Resultados dos ensaios de gamagrafia.....	89
4.13 Resultados dos ensaios de ultrassom	91
4.14 Resultados dos ensaios de radiografia industrial	92
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
5.1 Resultados e discussão.....	94
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	98
6.1 Conclusão	98
6.2 Contribuições e Limitações	98
6.3 Publicações	99
6.4 Trabalhos Futuros	100
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS	101

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A crescente busca por inovação tecnológica em processos de fabricação mais eficientes e eficazes vem ocorrendo no cenário da indústria mundial. Associado aos avanços tecnológicos no desenvolvimento de novos materiais, promovem o contínuo aperfeiçoamento dos processos de fabricação e, inclusive, o surgimento de novos processos.

Diante desta realidade, a soldagem por atrito rotativo é um dos processos que permite a união de materiais similares e dissimilares tornando possível a união de peças com geometrias complexas como, por exemplo, peças prismáticas unidas com peças cilíndricas ou de peças que, se fossem construídas por usinagem haveria um grande desperdício de material.

Ainda, para garantir menor custo, é comum soldar por atrito rotativo peças de materiais dissimilares como, por exemplo, brocas para perfuração, onde somente existe a necessidade de aços ligados na parte que entra em contato com o solo e, na haste, parte que somente transmite o movimento rotativo, pode ser utilizado um aço carbono.

Na soldagem por atrito rotativo coaxial não se utiliza materiais de adição, gases de proteção, aporte térmico, fluxos (no caso de união de materiais dissimilares que só seria possível por brasagem), elevadas correntes elétricas, entre outros. Também, não existe a necessidade de utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) mais sofisticados como no caso das soldas por fusão, pois neste processo não há a emissão de fumos metálicos que exigem a utilização de máscaras respiratórias para proteção individual e/ou sistemas de exaustão para a proteção coletiva, uso de

máscaras para proteção da visão, com filtros apropriados para a intensidade de luz e raios ultravioleta e infravermelhos e vestuários tais como mangotes e avental/jalecos, como ainda a utilização de perneiras para a proteção contra os respingos.

Devido aos motivos supracitados, a *Friction Rotary Welding (FRW)*, doravante chamada de *soldagem por atrito rotativo coaxial*, revela-se como um processo de fabricação muito importante e, em alguns casos, torna-se uma opção para a união de materiais que não se consegue pelos processos usuais de soldagem por fusão.

Desta forma, a análise dos parâmetros da soldagem por atrito rotativo entre o cobre eletrolítico (C11000) e a liga CuCrZr (C18150) para garantir condutividade elétrica mostra-se interessante do ponto de vista de diminuição de custo com matéria prima e desenvolvimento tecnológico para utilização na indústria.

1.2 Motivação

A pesquisa para esse trabalho é motivada pelos desafios da soldabilidade de materiais dissimilares, ou seja, no presente trabalho a união do cobre eletrolítico recozido - C11000 (99,9% - segundo especificação do fabricante) com a liga CuCrZr - C18150. Um segundo aspecto que motivou o presente trabalho é em relação ao custo de material, uma vez que se verifica um alto custo na confecção dos eletrodos de soldagem por resistência que utilizam a liga C18150, popularmente denominados de solda a ponto. Na soldagem por resistência por pontos a união de peças metálicas é produzida, geralmente, em superfícies sobrepostas, pelo calor gerado na junta através da resistência à passagem de uma corrente elétrica, ou efeito Joule, e pela aplicação de pressão de contato, podendo ocorrer uma certa quantidade de fusão na interface (MARQUES et al., 2009).

Em outro segmento de mercado, como por exemplo o segmento de contadores de redes elétricas de média e alta tensão, podemos utilizar a liga CuCrZr para obter maior durabilidade e resistência contra as intempéries e problemas de mau contato elétrico devido ao aquecimento excessivo que o mau contato elétrico provoca em ambas as partes do dispositivo ou sistema, ou seja, alterando as características elétricas para suportar a elevação da temperatura provocada pelo mau contato elétrico. Também podem ser aplicados ao segmento de conectores elétricos para

redes de média e alta tensão, onde são exigidas alta condutividade elétrica e resistência a corrosão.

O terceiro aspecto, após extensa pesquisa sobre o assunto, verificou-se poucas referências bibliográficas que abordam especificamente a soldagem por atrito rotativo coaxial entre o cobre eletrolítico com a liga CuCrZr.

1.3 Justificativa

No que tange a obter dados científicos, torna-se necessário investigar os fenômenos inerentes ao processo de soldagem por atrito rotativo entre os materiais dissimilares: cobre eletrolítico e a liga CuCrZr e as influências dos parâmetros que regem a soldagem destes materiais, visando obter parâmetros ótimos que poderão levar à consecução de soldas de boa qualidade e que garantam a condutividade elétrica e propriedades mecânicas suficientes para atender às demandas da indústria. Desta forma, o presente trabalho se justifica na possibilidade de redução considerável de custos com matérias primas, mediante estudos futuros, e, inclusive, permite rever o projeto de equipamentos de solda a ponto e processos de fabricação de contadores elétricos.

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estabelecer os parâmetros ótimos de soldagem por atrito rotativo coaxial entre o cobre eletrolítico e a liga de CuCrZr, para que a condutividade elétrica fique dentro dos parâmetros que as normas da ABNT (que regem estes assuntos/setores) determinam; obter propriedades mecânicas satisfatórias e reduzir ao máximo as perdas com a deformação plástica resultantes do processo. Ainda, estudar a possibilidade de obtenção de diminuição nos custos com matéria prima, com a substituição de parte de peças fabricadas inteiramente com a liga CuCrZr, com a utilização do cobre eletrolítico na fabricação, pois se trata de material com menor custo e possui melhor condutividade elétrica.

1.4.1 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos são destacados:

- Investigar por meio de ensaios não destrutivos, os parâmetros e resultados da condutividade elétrica, mediante ensaios de resistência elétrica com micro ohmímetro (ponte de *Kelvin*), além da realização de ensaios de ultrassom, gamagrafia, radiologia industrial, para se verificar o atingimento do coalescimento total ou parcial da junta soldada;
- Analisar as propriedades mecânicas, por meio de ensaios destrutivos tais como: dureza e microdureza *Vickers*, resistência à tração e análises macrográficas e micrográficas para confirmação da qualidade da junta soldada;
- Fornecer dados para que sejam possíveis estudos futuros que se refiram à condutividade elétrica em aparelhos e/ou dispositivos que estejam sujeitos a esforços mecânicos, fadiga e à corrosão elétrica por deficiência no contato elétrico.

Assim sendo, mediante os resultados obtidos na soldagem por atrito rotativo coaxial do cobre eletrolítico e da liga CuCrZr, poderão ser estimados/estabelecidos os parâmetros de soldagem que garantam as propriedades elétricas e mecânicas capazes de suprir as necessidades da indústria e corroborar para trabalhos futuros sobre o assunto.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, é apresentado o estado da arte sobre o processo de soldagem por atrito rotativo coaxial de modo a obter informações consolidadas sobre os parâmetros envolvidos no processo, características necessárias do equipamento e, ainda, as melhores formas de detectar defeitos ou falhas nas soldas para a consecução de uniões de qualidade satisfatória, visando diminuição de custos de fabricação e conformidade com as necessidades da indústria.

2.2 Definição de soldagem por atrito rotativo

Soldagem por atrito rotativo coaxial é um processo de soldagem no estado sólido, onde o calor necessário para a soldagem é gerado pelo movimento relativo entre as duas interfaces em contato. A conversão direta da energia mecânica em energia térmica, sem a aplicação de calor de qualquer outra fonte externa, é um dos parâmetros responsáveis pela promoção da união abaixo da temperatura de fusão dos materiais na interface de contato. Além disso, a aplicação da pressão de forjamento resulta na união dos materiais, sendo que na soldagem por atrito rotativo coaxial, uma peça rotativa é mantida em contato com uma peça estacionária, sob pressão constante ou com gradual aumento até que a interface atinja a temperatura de soldagem (ASM, 1993).

Segundo MARQUES et al. (2009), soldagem por atrito rotativo coaxial é um processo de soldagem no estado sólido, em que a união entre as peças se dá pelo

aquecimento, abaixo da temperatura de fusão, promovido pelo atrito mecânico entre as superfícies de contato e por uma força de compressão atuando nas peças. No processo, uma das peças está girando com velocidade constante e a outra peça está parada. Após o contato inicial entre as peças, uma força axial é aplicada por um cilindro hidráulico que provoca uma deformação plástica nas peças. Quando se atinge a temperatura de forjamento, o movimento rotativo é interrompido e, na sequência, é aplicada uma segunda pressão, de forjamento, maior que a pressão de atrito, por um determinado tempo, para que haja o coalescimento dos materiais, gerando assim uma solda.

A soldagem por atrito rotativo coaxial apresenta algumas vantagens em relação aos processos de soldagem por fusão (MACHADO, 1996):

- Não é utilizado metal de adição ou consumíveis;
- A junta apresenta propriedades mecânicas e qualidade elevadas;
- Não é necessário atmosfera protetora, em geral;
- A ZTA é extremamente reduzida;
- A soldagem das peças ocorre em velocidade elevada (tempos muito pequenos);
- Os gastos com energia elétrica são muito menores que qualquer outro processo de soldagem;
- Podem ser soldados a maioria dos metais, sendo eles similares ou dissimilares.

Também existem desvantagens em relação ao processo de soldagem por atrito coaxial:

- Aços de corte fácil que contenham chumbo, telúrio e enxofre acima de 0,13 % e os ferros fundidos não podem ser soldados;
- O investimento com o equipamento é relativamente alto;
- O equipamento de soldagem deve ter rigidez suficiente para suportar os altos esforços aplicados e manter o alinhamento das peças;
- As peças devem ser capazes de resistir aos esforços aplicados na região de aquecimento (interface de contato);
- As peças devem ter geometria compatível com o processo;
- Peças com geometria complexa que necessitam de dispositivos especiais de fixação.

Na literatura são encontradas as variações da solda por atrito. A seguir é apresentada a tabela 1, com os principais processos de soldagem por atrito:

Soldagem por Fricção com Rotação Contínua	<i>Continuous Drive Friction Welding – CDFW</i>
Soldagem por Fricção por Inércia	<i>Inertia Drive Friction Welding – IFW</i>
Soldagem por fricção com mistura mecânica	<i>Friction Stir Welding – FSW</i>
Soldagem por Fricção Orbital	<i>Orbital Friction Welding</i>
Soldagem por Fricção Radial	<i>Radial Friction Welding</i>
Deposição Superficial por Fricção	<i>Friction Surfacing</i>
Soldagem por Fricção Alternada Linear	Linear Reciprocating Friction Welding
Soldagem por Fricção Alternada Angular	Angular Reciprocating Friction Welding
Soldagem por Fricção Pontual	<i>Friction Spot Welding – FSpW</i>
Soldagem por Fricção Pontual com mistura	<i>Friction Stir Spot Welding – FSSW</i>

Tabela 1. Principais processos de soldagem por atrito AWS (1997).

Os processos mais comuns são a soldagem por atrito rotativo convencional ou, também conhecido por soldagem por atrito rotativo com rotação contínua e a soldagem por atrito inercial, sendo que nesta pesquisa, será abordado o processo de soldagem por atrito rotativo convencional, pois o equipamento desenvolvido para as pesquisas foi dimensionado para este tipo de soldagem.

A tabela 2 abaixo, segundo a ANSI/AWS C6.1-89, indica possíveis combinações em relação aos materiais que podem, ou não, serem soldados pelos processos de soldagem por atrito rotativo coaxial. A lista de ligas foi compilada a partir de literatura de soldagem de fricção disponível, fonte: ANSI/AWS C6.1-89

Soldabilidade dos materiais	
	Ligas de Zircônio Materiais para válvulas (Automotivas) Vanádio Urânio Carbonetos de Tungstênio Tungstênio Ligas de Titânio Titânio Tório Tântalo Aços ferramenta Aço inoxidável Aços sinterizados Aço maraging Aço de fácil usinagem Aço carbono Ligas de aço Ligas de prata Prata Ligas de Nióbio Nióbio Ligas de Níquel Níquel Monel Molibdênio Ligas de Magnésio Magnésio Aço sinterizado Cobre Níquel Cobre Cobalto Cerâmica Aço fundido Carbonetos, cementados Bronze Latão Ligas de Alumínio Alumínio
Alumínio	
Ligas de Alumínio	
Latão	
Bronze	
Carbonetos, cementados	
Aço fundido	
Cerâmica	
Cobalto	
Cobre	
Cobre Níquel	
Aço Sinterizado	
Magnésio	
Ligas de Magnésio	
Molibdênio	
Monel	
Níquel	
Ligas de Níquel	
Nióbio	
Ligas de Nióbio	
Prata	
Ligas de Prata	
Ligas de Aço	
Aço Carbono	
Aços de fácil usinagem	
Aços Maraging	
Aços sinterizados	
Aços inoxidáveis	
Aços ferramenta	
Tântalo	
Tório	
Titânio	
Ligas de Titânio	
Tungstênio	
Carbonetos de Tungstênio	
Urânio	
Vanádio	
Materiais para válvulas (Automotivas)	
Ligas de Zircônio	

LEGENDA:

- Boa soldabilidade
- pode ser soldado, mas não produzirá união com máxima força de tração (solda frágil)
- Não solda

Tabela 2. Soldabilidade dos materiais. Adaptado de: ANSI/AWS C6.1-89.

2.3 Parâmetros envolvidos no processo

Os parâmetros envolvidos no processo de soldagem por atrito rotativo convencional são a velocidade relativa de rotação ou velocidade angular (rpm), a pressão de atrito (P_a), tempo de aplicação da pressão de atrito (t_a) ou a temperatura para forjamento ($T^{\circ}\text{C}$), a pressão de forjamento ou recalque (P_f) e o tempo de aplicação dessa pressão (t_f) e, neste capítulo, estão ordenados de acordo com a sequência em que ocorrem no processo de soldagem (ASM, 1993).

Uma das formas de representar o processo de soldagem por atrito rotativo convencional é por meio de gráficos, como o apresentado na figura 1:

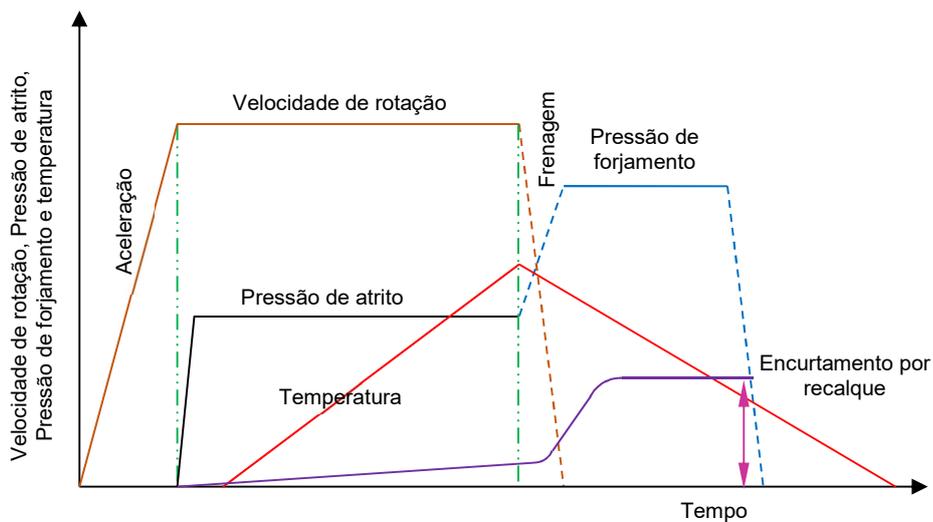


Figura 1. Sequência do processo de soldagem por atrito rotativo coaxial adaptado de ASM Metals Handbook vol. 6

Outra forma de representar o processo de soldagem por atrito rotativo convencional se dá por meio de fotos tiradas nos momentos onde os parâmetros de soldagem se desenvolvem, conforme figura 2:

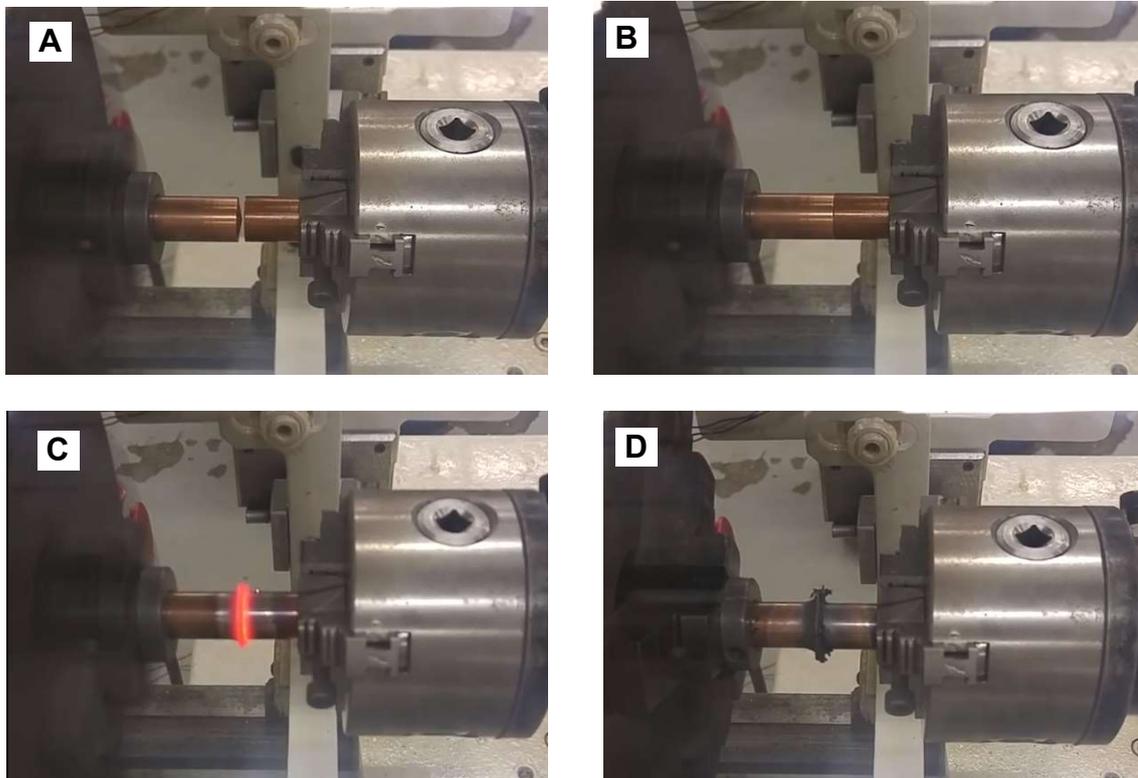


Figura 2. Fases do processo: “A” - Fase de aceleração da velocidade de rotação até atingir a estabilidade; “B” - Fase de aplicação da pressão de atrito; “C” – Fase em que se atinge a temperatura de forjamento em função do tempo; “D” – Fase de parada da velocidade de rotação e aplicação da pressão de forjamento.

Descrição das etapas do processo:

- Na etapa “A”, temos o início do processo de soldagem. A peça que gira é acelerada até atingir a rotação estipulada e estabilizar-se nesta rotação.
- Na etapa “B”, a peça estacionária é deslocada em direção a peça rotativa por meio de um cilindro hidráulico e após o contato, é aplicada a pressão de atrito, P_a .
- Na etapa “C”, com a combinação da rotação, pressão de atrito e decorrido o tempo de atrito, atinge-se a temperatura de forjamento, T_c , momento que é cessada a rotação.

- Na etapa “D”, aplica-se imediatamente após a parada da rotação, uma pressão de forjamento, P_f , maior que a pressão de atrito, por um determinado tempo, o tempo de forjamento t_f , para que se consolide a solda, finalizando o processo.

2.3.1 Velocidade relativa de rotação

A velocidade de rotação (rpm) é a responsável por produzir uma velocidade relativa nas superfícies em contato, ou seja, na interface das peças, transformando energia mecânica em calor.

Segundo MACHADO (1996), a velocidade é a variável que menos influi sobre as características da junta soldada, sendo que varia de 1.800 rpm para o alumínio comercialmente puro e 8.000 rpm para a liga de cobre comercialmente puro.

Segundo a AWS (1997) podem ser utilizadas várias faixas de velocidade de rotações, sem gerar problemas significativos na qualidade da junta soldada. Altas velocidades de rotação associadas com baixos aquecimentos podem ser utilizadas para obtenção de junções com boa qualidade para a soldagem de materiais com alta condutividade térmica, como ligas de cobre, ligas de alumínio, e também para a soldagem de aços com alta resistência mecânica, endurecidos por meio de tratamento térmico.

Quando se utiliza rotações maiores, associadas a uma pressão de atrito suficiente, diminui-se o tempo de aquecimento e, também, a zona termicamente afetada (WAINER et al., 2011).

2.3.2 Pressão de atrito

A pressão de atrito (P_a), juntamente com a velocidade de rotação (rpm) e com o tempo de aplicação da pressão de atrito (t_a), são o que promovem a fase de aquecimento (fase fundamental do processo de soldagem por atrito) na interface das peças em contato e que, por meio de um cilindro hidráulico, aplica-se uma pressão axial constante na interface das peças para gerar o calor necessário para que ocorra a soldagem (YILBAS et al., 1995)

A pressão de atrito (P_a) varia de acordo com cada material ou ligas a serem soldadas por atrito rotativo, quer sejam similares ou dissimilares, sendo que esta pressão deve ser muito bem determinada para que o aquecimento seja suficiente e não excessivo, afim de que a Zona Termicamente Afetada (ZTA), seja a menor possível e a perda de material por conformação a quente seja a menor possível na obtenção de soldas de qualidade aceitável (MARQUES, et al., 2009).

Pressões de atrito (P_a) muito baixas provocam aquecimento insuficiente gerando, normalmente, falhas ou uniões incompletas, entretanto, pressões excessivas, induzem ao calor excessivo, o que pode causar fragilização da ZTA e, por sua vez, produzir uniões soldadas de baixa qualidade. Portanto, a pressão de atrito deve ser constante e mantida pelo tempo estipulado (WAINER et al., 2011).

2.3.3 Tempo de aplicação da pressão de atrito

O tempo de aplicação da pressão de atrito (t_a), juntamente com a velocidade de rotação (rpm) e a pressão de atrito (P_a), é o responsável pelo aumento ou diminuição da temperatura de aquecimento (T_c) na interface das peças, ou seja, se variar somente o tempo de atrito, mantendo rotação e pressão de atrito constantes, teremos maior ou menor temperatura na interface de contato das peças em contato (MARQUES et al., 2009).

O tempo de aquecimento (t_a) é muito importante na primeira fase de soldagem, quando ocorre o contato na interface dos materiais e, decorrido este tempo, ocorre a parada do movimento relativo de rotação com a frenagem da máquina e cessa-se a aplicação da pressão de atrito (P_a), iniciando a aplicação da pressão de forjamento (P_f) durante o tempo de forjamento (t_f) estipulado (WAINER et al., 2011).

Segundo SATHIYA et al. (2006), quando tempo de atrito é pequeno, o aquecimento na interface pode não ser suficiente, podendo surgir regiões com falta de união. Por outro lado, se o tempo de atrito for muito longo, ocorrerá consumo excessivo de material devido ao aquecimento excessivo e redução na produção.

2.3.4 Temperatura de forjamento

A temperatura de forjamento ou temperatura de trabalho a quente é aquela em que o material se deforma plasticamente com menor pressão aplicada, ou seja, o trabalho a quente é definido como a deformação sob condições de temperatura, pressão e taxa de deformação tais que processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a deformação. Ela ocorre a uma tensão constante, e como a tensão de escoamento plástico decresce com o aumento da temperatura, a energia necessária para a deformação é geralmente muito menor para o trabalho a quente do que para o trabalho a frio ou a morno, baseada na resistência ao escoamento do material. Grupo CIMM, <https://www.cimm.com.br>, acessado em 21 nov. 2017.

Para que a perda de material por conformação (recalque) seja a menor possível, a temperatura de forjamento deverá também ser a menor possível, porém, deve ser suficiente para que ocorra a união sem prejudicar a qualidade da solda (WAINER et al., 2011).

2.3.5 Pressão de forjamento ou recalque

A pressão de forjamento (P_f) é responsável pelo término da soldagem, pois é ela que promove a difusão atômica, juntamente com a temperatura de aquecimento ($T^{\circ}C$) e o tempo de forjamento (t_f).

Pressões de forjamento baixas, podem acarretar em soldas com pontos com falta de união ou mesmo soldas sem difusão atômica, ocasionando falhas. Por outro lado, pressões de forjamento (P_f) excessivas, podem danificar a geometria da junta soldada e também ocasionar perda de material excessiva pela deformação (RATKOVIĆ et al., 2017).

2.3.6 Tempo de aplicação da pressão de forjamento

O tempo de aplicação da pressão de forjamento (t_f) é responsável pela consolidação da difusão atômica e deve ser suficiente para que a solda tenha boa qualidade.

Se o tempo de aplicação da pressão de forjamento (t_f) for pequeno, a difusão atômica não ocorrerá na interface dos materiais, ocasionando soldas de qualidade insuficiente. Também, se for demasiado haverá uma redução na produção, encarecendo o processo (RATKOVIĆ et al., 2017).

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Referências práticas

O presente trabalho teve como ponto de partida o trabalho anterior de KANASHIRO (2017), em que foram analisados os seguintes parâmetros:

- Relação do tempo de atrito e região zona termicamente afetada;
- Relação entre a Pressão de atrito e a temperatura de deformação plástica;
- Relação entre a Pressão de recalque e a difusão da estrutura metálica formada.

Neste trabalho, evidenciou-se a qualidade da junta soldada por meio de ensaios destrutivos e análise metalográfica.

No trabalho desenvolvido por FURLANETTO (2018), foram analisados:

- Estudo da estrutura cristalina da junta soldada por meio de análise micrográfica;
- Os resultados obtidos por soldagem por atrito rotativo coaxial por meio de ensaios destrutivos;
- Estudo da influência da diminuição ou aumento de fase beta do zinco (soluto) na peça antes e após soldagem;

Evidenciou-se, neste trabalho, a qualidade da junta soldada por meio de ensaios destrutivos e análise metalográfica.

3.2 Método de preparação para a soldagem

Para a preparação da soldagem no equipamento, fixa-se os corpos de prova nas placas universais de 3 castanhas (giratória e fixa), inserindo a parte do CP feita com a liga C11000 na pinça correspondente a placa do eixo árvore do equipamento

(lado giratório) e a parte feita com a liga C18150 inserida na pinça da placa do cabeçote móvel (lado estacionário), posiciona-se e trava-se o cabeçote móvel por meio da ancoragem previamente localizada no barramento do torno.

O software desenvolvido pela empresa Vidjaya possibilita o controle do freio do eixo árvore por meio da temperatura ou do tempo de atrito. Optou-se pelo controle do tempo de atrito, pois, devido às características de condutividade térmica dos materiais envolvidos (ligas de cobre), não foi possível medir a temperatura com o termopar utilizado devido à alta dissipação de calor.

A seguir, no programa, entra-se com os dados de rotação de trabalho, da pressão de atrito, do tempo de atrito, da pressão de forjamento e do tempo em que se exerce a pressão de forjamento.

Antes de iniciar a soldagem, posiciona-se os corpos de prova a uma distância entre 2 mm e 3 mm por meio do sensor de posicionamento. Depois, se aciona a tecla “Processo” (software) e o equipamento inicia com a rotação selecionada até que esta esteja estabilizada e então, o atuador hidráulico avança a peça estática em direção a peça giratória e quando há o contato, começa a exercer a pressão de atrito até atingir o tempo estipulado, momento em que o freio motor é acionado e ocorre a parada do movimento rotacional e instantaneamente é exercida a pressão de forjamento durante o tempo estipulado. Terminado o processo programado, o equipamento se desliga.

3.3 Materiais utilizados

Os materiais utilizados nesta pesquisa são o cobre eletrolítico da liga C 110 (Termomecanica), correspondente a norma ASTM - C11000 e norma DIN E-Cu57, com diâmetro de 5/8” (15,875 mm) e a liga CuCrZr - AMPCOLOY® 972, com diâmetro de 16 mm, correspondente a norma DIN 44759 A 2/2 e norma ASTM C18150 ambos, respectivamente, adquiridos por meio de doação pelas empresas Termomecanica São Paulo S.A., e pela empresa Ampco Metal Brasil Ltda.

3.3.1 Dados técnicos do Cobre eletrolítico (C11000)

O cobre eletrolítico (C11000) tem as seguintes características, segundo a Termomecanica São Paulo S.A.:

(https://www.termomecanica.com.br/download/conteudo_tecnico/Cobre%20Eletrol%C3%ADtico.pdf acessado em 02/08/2017).

Composição Química

Cobre* 99,90 % mínimo (*incluindo Prata)

Propriedades físicas

Resistência a Tração: 225 MPa

Limite de Escoamento: 78 MPa

Alongamento: 62%

Dureza: 27,3 HRF

Tamanho de Grão: 0,035mm

Massa específica a 20 °C (g/cm³)8,89

Propriedades Elétricas

Condutividade Elétrica Volumétrica a 20°C (% I.A.C.S)100 a 101,5

Resistividade Elétrica (ohm.mm² / m) (100 – 200 °C) ... 0,017 a 0,01724

Características Tecnológicas:

Ponto de Fusão1083°C

Faixa de Temperatura de Recozimento 475-750°C

Faixa de Temperatura para Trabalho a Quente 750 - 875°C

Temperatura de Solidificação 1065°C

Conformabilidade a Quente Excelente

Conformabilidade a Frio Excelente

Usinabilidade relativa (Latão CLA = 100%) 20%

Forma	Grau de dureza	Limite de resistência à tração (MPa)		Limite de escoamento (MPa)	Alongamento	Faixa de dureza (HRF)
		Mínimo	Máximo			
redondo	recozido	195	255	55	25	50 máx.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do cobre eletrolítico em temperatura ambiente.

Micrografias do Cobre eletrolítico C11000

As amostras foram retiradas da barra no sentido transversal e longitudinal, sendo embutidas a frio em resina acrílica. As micrografias apresentadas na figura 3, foram realizadas em microscópio óptico da marca Leica modelo DMLM.

Reagente utilizado em todas as micrografias é composto por 10,7% de ácido clorídrico, 3,4% de cloreto férrico e 85,9% de álcool por 25 segundos.

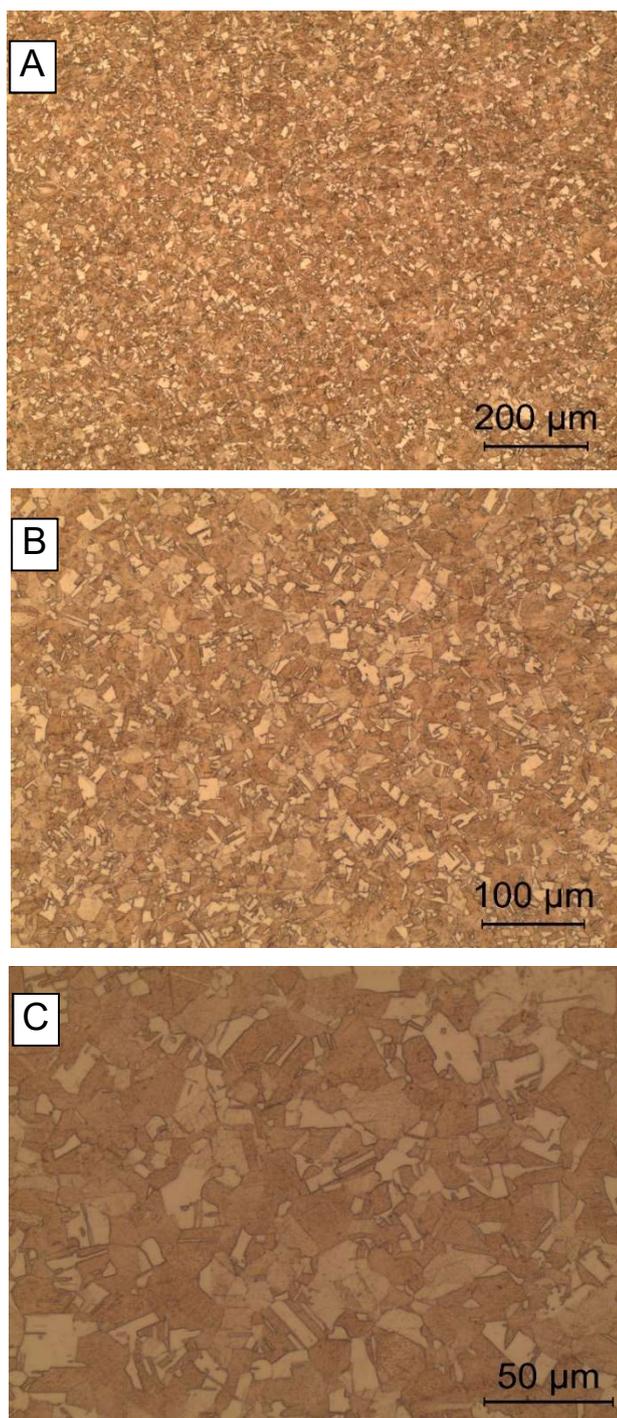


Figura 3. Micrografias do cobre eletrolítico. “A” – aumento 100 X; “B” – aumento 200 X; “C” – aumento 500 X.

Amostra Transversal

O material da liga C11000, conforme figura 4, apresentou uma estrutura recristalizada homogênea com grão de 0,025 mm.

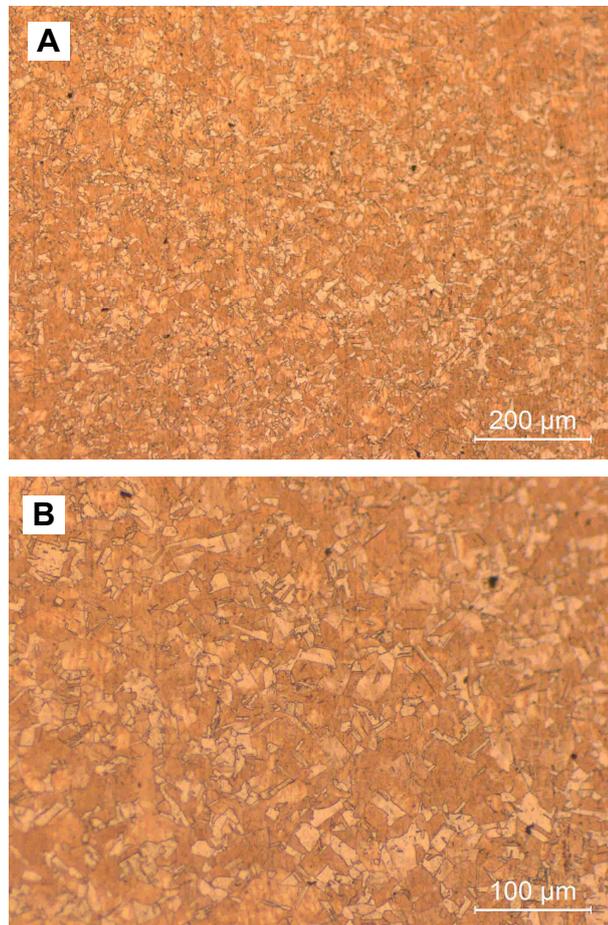


Figura 4. Amostra com ampliação de 100 vezes (A); 200 vezes (B).

Amostra Longitudinal

A figura 5, apresenta o material da liga C11000 com estrutura recristalizada homogênea com grão de 0,025 mm, conforme figura 4:

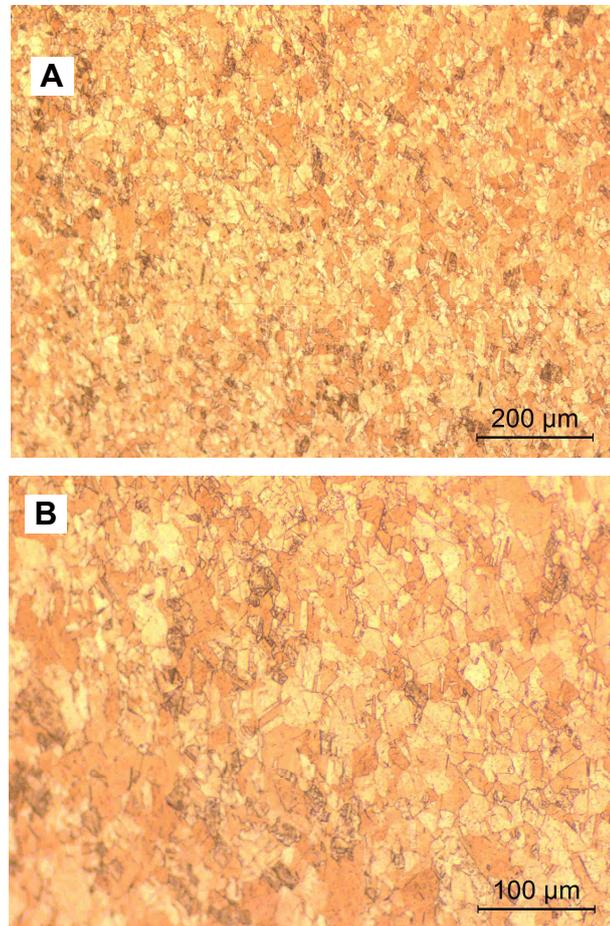


Figura 5. Amostra com ampliação de 100 vezes (A); 200 vezes (B).

3.3.2 Dados técnicos da liga CuCrZr - AMPCOLOY® 972

A liga C18150 - CuCrZr, segundo o fabricante, é uma liga de cobre endurecido por precipitação. Uma vez tratada termicamente, esta liga mantém as propriedades mecânicas juntamente com uma boa ductilidade na faixa de temperatura de 300 a 500°C. Os atributos desta liga versátil incluem alta condutividade elétrica e altas propriedades mecânicas. (<https://www.ampcometal.com/pt-br/productos/ampcoloy-ligas-de-alta-condutividade/ampcoloy-972/>)

Composição nominal (% em massa)

Cromo (Cr)	1,0 %
Zircônio (Zr)	0,1 %
outros	Máx. 0,2 %
Cobre (Cu)	Restante

Propriedades físicas e mecânicas	Unidades	ϕ 10 – 25 mm
Tensão máxima de tração	MPa	520
Limite de escoamento (0.5%)	MPa	466
Módulo de elasticidade	GPa	120
Alongamento	%	20
Dureza Brinell	HB	152
Dureza Rockwell	HRB	82
Condutividade térmica	W/m.K	320
Condutividade elétrica Y	m / Ω.mm ²	51
Condutividade elétrica	% I.A.C.S.	86
Resistividade elétrica	Ω.mm ² /m	0,0196

Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas da liga CuCrZr em temperatura ambiente.

Análise Microestrutural da liga CuCrZr - AMPCOLOY® 972

As amostras foram retiradas da barra no sentido transversal e longitudinal, sendo embutidas a frio em resina acrílica em conformidade com a norma ASTM E3. As micrografias foram realizadas em microscópio óptico da marca Leica modelo DMLM.

Em todas as micrografias foi utilizado reagente composto por 10,7% de ácido clorídrico, 3,4% de cloreto férrico e 85,9% de álcool por 25 segundos.

Sentido Transversal

As figuras 6 e 7, apresentam micrografias realizadas em microscópio óptico da marca Leica modelo DMLM, no sentido transversal.

O material apresentou uma descontinuidade estrutural entre a superfície e o núcleo do material.

Superfície:

O material apresentou uma microestrutura fina composta por matriz α com microconstituintes intermetálicos disperso na matriz.

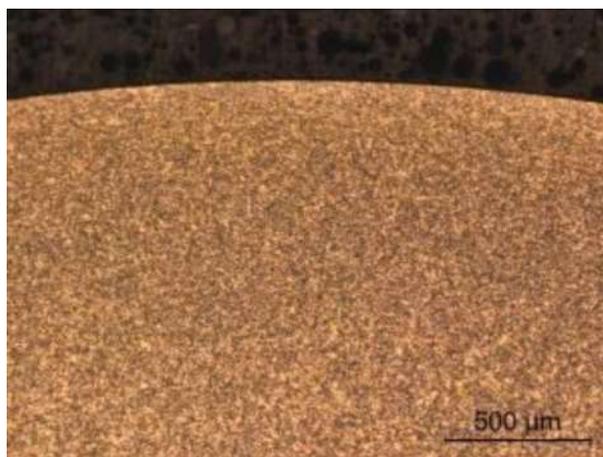


Figura 6. Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido transversal. Aumento 50X.

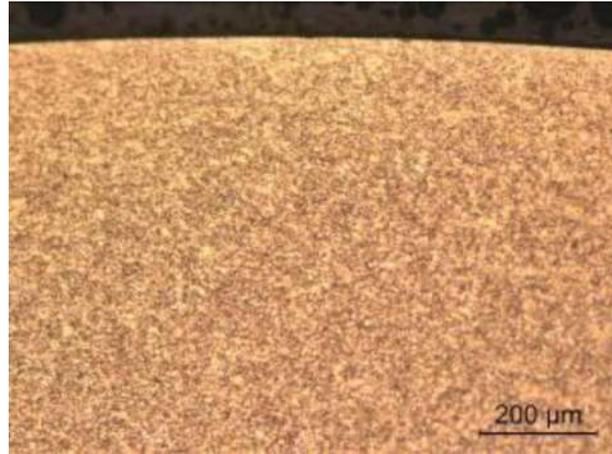


Figura 7. Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido transversal. Aumento 100X.

Núcleo

O material apresentou uma microestrutura recristalizada composta por matriz α com microconstituintes intermetálicos dispersos na matriz e tamanho de grão de 0,025 mm a 0,060 mm, conforme figuras 8 e 9.

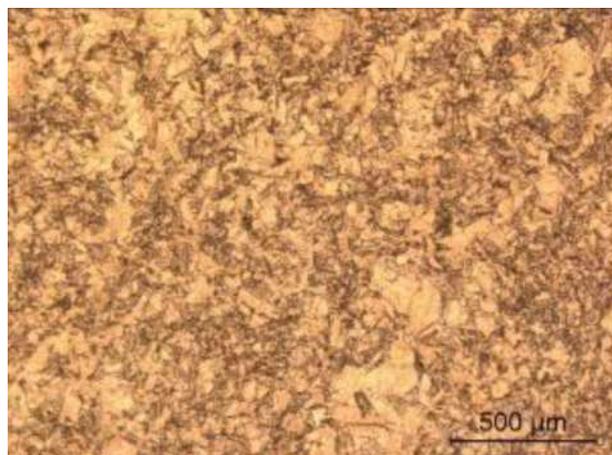


Figura 8. Micrografia da liga CuCrZr (C18150). Aumento 50X.

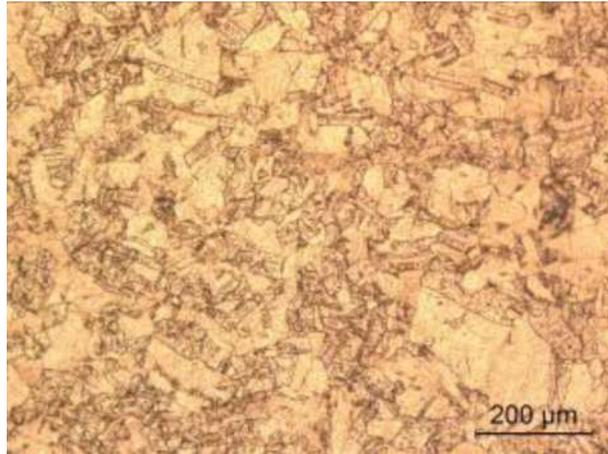


Figura 9. Micrografia da liga CuCrZr (C18150). Aumento 100X.

Sentido Longitudinal

Nas figuras 10, 11, 12 e 13, o material apresentou uma descontinuidade estrutural entre a superfície e o núcleo do material com formação granular alongada devido ao processo de conformação mecânica.

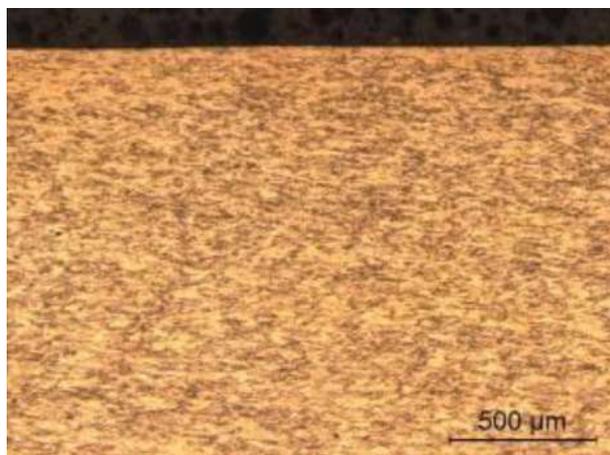


Figura 10. Micrografia da liga CuCrZr (C18150) - sentido longitudinal. Aumento 50X.

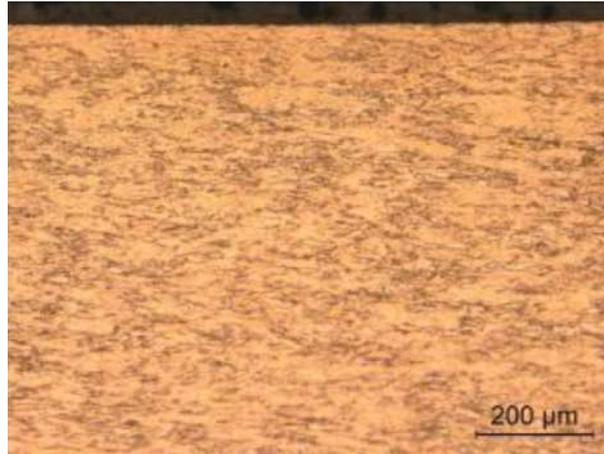


Figura 11. Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido longitudinal. Aumento 100X.



Figura 12. Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido longitudinal. Aumento 50X.



Figura 13. Micrografia da liga CuCrZr (C18150) – sentido longitudinal. Aumento 100X.

3.4 Diagrama de fase

A seguir, são apresentados os diagramas de fases dos materiais utilizados na soldagem por atrito rotativo coaxial.

Na figura nº 14, é apresentado o diagrama de solubilidade de O₂ no cobre, demonstrando a quantidade de O₂ presente na liga C11000 em % atômico e em massa.

O cobre eletrolítico, segundo informado pela Termomecanica São Paulo S.A., possui aproximadamente 50 ppm (partes por milhão) de O₂.

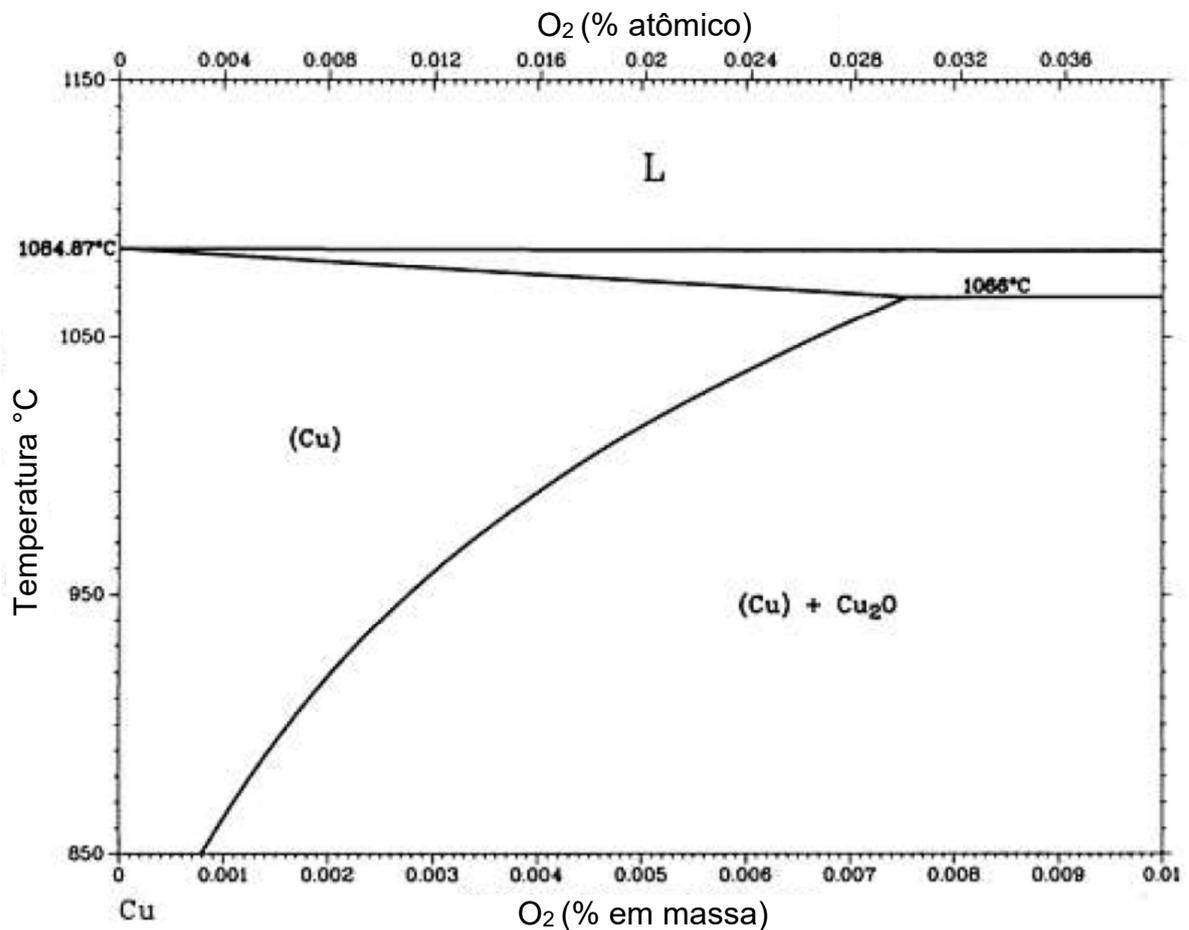


Figura 14. Diagrama de fases Cu O. NEUMANN et al, 1984

No diagrama de fases da liga C18150, adota-se a porcentagem de cromo entre 0,5% a 1,5% e porcentagem de zircônio entre 0,1% a 0,2% (fixo) e o restante de cobre, em massa, conforme apresentado na figura nº 15.

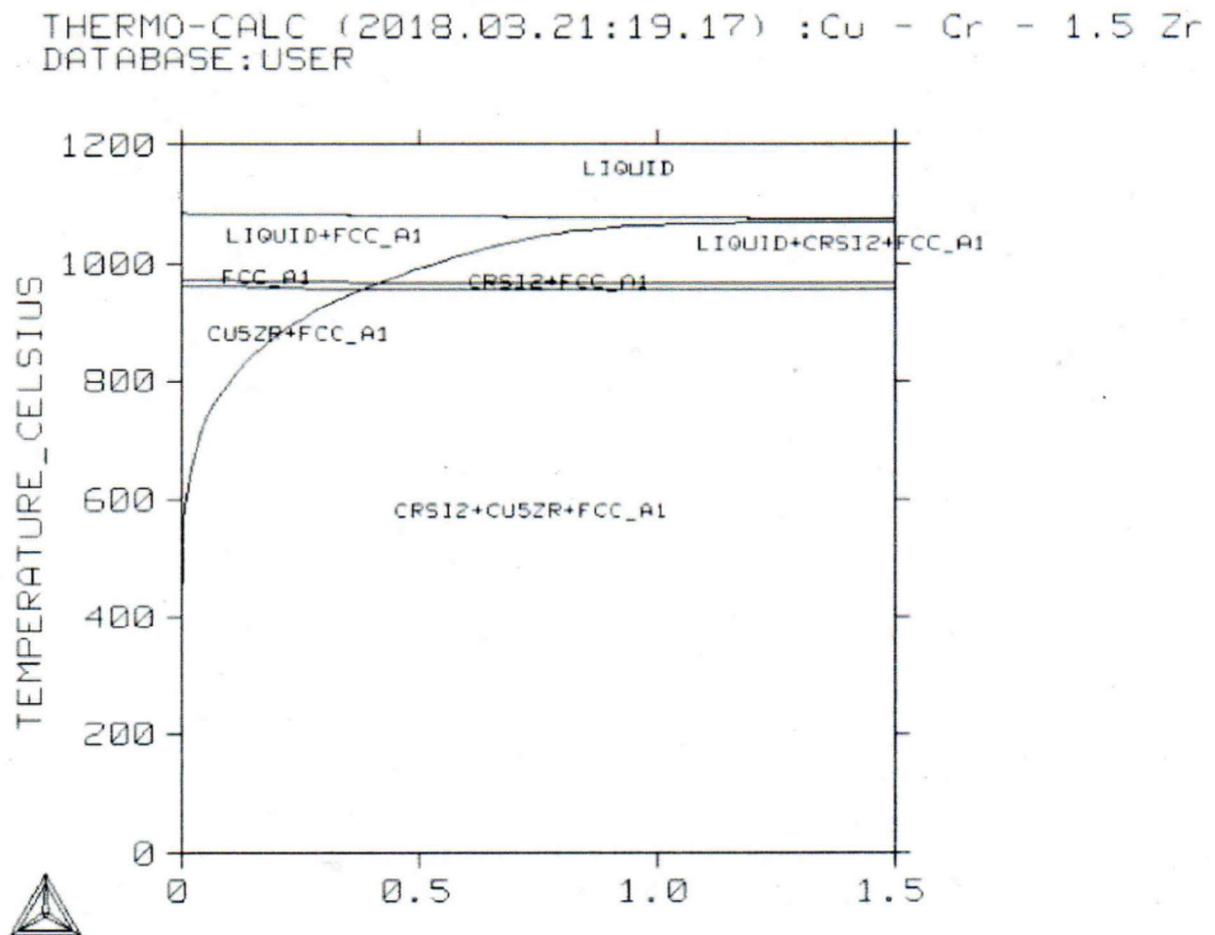


Figura 15. Diagrama de fases pseudo binário da liga C18150.
Fonte: GOULART, P.R. - 2018.

3.5 Procedimento para preparação dos materiais e soldagem

Os procedimentos adotados para a preparação dos corpos de prova e para a realização das soldagens seguirão a norma ANSI/AWS C 6.1-89R (1989):

- Cortar o material no comprimento (preferencialmente em torno mecânico ou torno CNC, para que um lado fique com a face acabada, economizando material);
- Facear no comprimento desejado, no lado cortado pelo bedame, caso a opção seja por junta plana; Optando-se por junta em ângulo, tornear o lado não acabado de cada material com ângulo de 160° , sendo que a parte com a liga C11000 fique com conicidade externa e a outra parte com a liga C18150, fique com conicidade interna, de modo a fazer com que a deformação por conformação mecânica seja a menor possível;
- Medir o comprimento de cada material (recomendável) ou medir o comprimento total dos dois materiais juntos e registrar;
- Assegurar-se que as pinças de fixação estejam na temperatura ambiente;
- Fixar cada material no equipamento, observando-se o lado correto de fixação (liga C11000 do lado rotativo e liga C18150 do lado estacionário);
- Limpar as faces dos materiais para a remoção de óxidos, graxas ou poeira;
- Estabelecer os parâmetros de soldagem;
- Fixar o(os) termopar(es), se utilizados;
- Posicionar o cabeçote móvel e fixá-lo, juntamente com a ancoragem;
- Posicionar os CP's para a aproximação pelo sensor de posicionamento;
- Executar a soldagem;
- Aguardar o corpo de prova esfriar;
- Medir o comprimento final do corpo de prova e registrar.

3.6 Procedimento para ensaio de tração

Os procedimentos adotados para a confecção dos corpos de prova e a realização do ensaio de tração, seguem a norma ABNT 6892-1:2013, conforme figura 16:

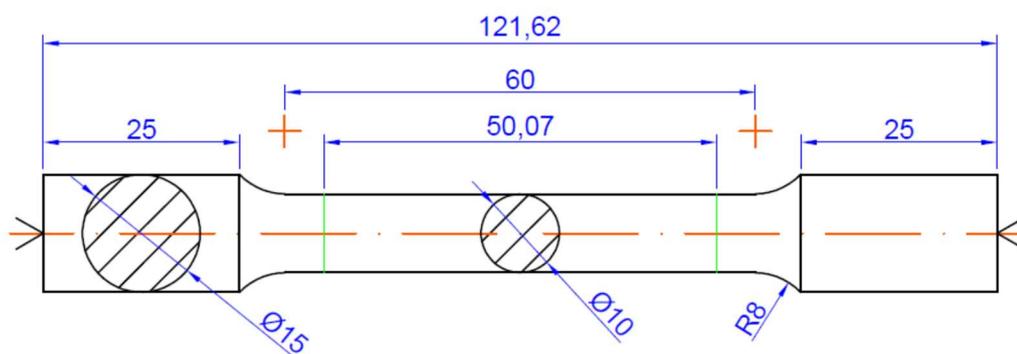


Figura 16. Desenho do corpo de prova para o ensaio de tração.

3.7 Procedimento para embutimento a frio

O embutimento a frio tem como objetivo não provocar quaisquer alterações por aquecimento pós soldagem nas amostras que serão utilizadas nas análises metalográficas, preservando as características do material e seguirão a norma ABNT NBR 13284 (1995):

Extração dos corpos de prova

- Cortar longitudinalmente no comprimento (o comprimento deve conter a região soldada, a zona termicamente afetada e o material de base de cada uma das partes) e, se necessário, usinar exatamente até o centro do corpo de prova (sentido radial), evitando esforços de usinagem excessivos durante o processo;
- Cortar transversalmente no comprimento apropriado.

Embutimento a frio

O embutimento a frio consiste em posicionar o corpo de prova – CP de forma a assegurar que não haja movimentação durante o processo de polimerização. Consiste em fixar o CP em uma placa de vidro, com tamanho aproximado de 60 mm x 60 mm x 4 mm, centralizado (conforme o tamanho da amostra) e fazer retenções na amostra para melhor aderência/fixação na resina acrílica. Realização embutimento a frio:

- Limpar as superfícies da amostra, do molde e do vidro;
- Colar o molde e a amostra centralizada no molde (utilizado tubo de PVC) no vidro (cola de cianoacrilato ou similar);
- Untar com vaselina sólida somente as paredes do molde e superfícies do vidro para facilitar a desmontagem, sem encostar na amostra;
- Preparar a resina acrílica (pó + líquido polimerizador);
- Depositar a resina acrílica no molde;
- Colocar o conjunto em dispositivo para polimerização;
- Completar com água fria até encher o dispositivo;
- Colocar a tampa do dispositivo e apertar os parafusos de fixação até criar pressão interna;
- Aguardar 20 minutos e retirar do dispositivo para polimerização;
- Remover a amostra embutida do molde, utilizando dispositivo para extração (construído exclusivamente para tal fim).

3.8 Procedimentos de preparação dos corpos de prova para as análises metalográficas

Os procedimentos adotados para a preparação das amostras para as análises metalográficas foram a realização do embutimento a frio das amostras, seguido das etapas de lixamento de desbaste, intermediário e de acabamento, para finalmente realizar a etapa de polimento, de acordo com a norma ABNT NBR 13284:1995.

Para as análises metalográficas, em todos os ensaios foi utilizado como reagente uma solução composta por 10,7% de ácido clorídrico, 3,4% de cloreto férrico e 85,9% de álcool, com tempo de exposição de 25 segundos.

3.9 Procedimentos para ensaios de condutividade elétrica

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de condutividade elétrica, foram realizados conforme a norma ABNT NBR 16462 (2016) e ABNT NBR 6815 (ABNT, 2010).

Segundo as normas supracitadas, pode-se medir a resistência elétrica em vez de medir a condutividade elétrica. Para tal, é necessário a utilização da fórmula que corresponde a:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} (\Omega)$$

Onde:

R = Resistência elétrica;

ρ = Resistividade elétrica do material;

L = Comprimento;

A = Área da seção transversal.

Desta forma, foram realizados os cálculos necessários para estimar a resistência elétrica dos materiais envolvidos.

Os ensaios de medição de resistência elétrica foram realizados na empresa MEGABRÁS, com micro ohmímetro, de modelo MPK 2000E, utilizando terminais de contato “tipo garra”.

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO

A partir da realização da pesquisa bibliográfica, verificou-se que existem pouquíssimas referências bibliográficas que tratam especificamente dos materiais utilizados no presente trabalho em relação à soldagem por atrito rotativo coaxial.

No início deste trabalho, foram obtidas soldas efetivas com a liga C11000 e a liga C18150. Entretanto, não em números estatisticamente confiáveis, necessitando-se da realização de mais experimentos que garantissem a repetitividade do processo.

Em alguns casos, houve experimentos em que a soldagem ocorreu de forma parcial, ou seja, não foi obtida uma solda efetiva. Fato este, verificado por ensaio visual dos corpos de prova e por teste de flexão, realizado em morsa de bancada, onde os corpos de prova se romperam na solda, com relativa facilidade. Nestes corpos de prova, as velocidades de rotação (1.500 rpm a 2.000 rpm) foram muito menores do que o recomendado na literatura (8.000 rpm) e as pressões de atrito variaram entre 0,1 MPa (menor pressão que o equipamento fornecia) e 0,6 MPa.

Nos corpos de prova em que se obteve a soldagem por completo, trabalhou-se com rotações abaixo das rotações recomendadas e tempo de atrito maiores que os recomendados pela literatura para o atingimento da temperatura de forjamento, o que ocasionou altas taxas de deformação por conformação mecânica e consequentemente, excesso de perda de material.

Estes corpos de prova não foram submetidos a ensaios para comprovar a qualidade da solda, ou seja, não foram realizados ensaios destrutivos para garantir a resistência mecânica por meio de ensaios de tração e micro dureza *Vickers* e ainda, não foi realizada análise microscópica e de resistência elétrica por meio de testes com micro ohmímetro.

Após um ano e meio de tentativas não tão bem-sucedidas e vários experimentos testando os parâmetros necessários, chegou-se a parâmetros ótimos para a consecução de soldas de boa qualidade, onde a qualidade das juntas soldadas foi comprovada por meio dos ensaios realizados.

4.1 Equipamento de soldagem por atrito rotativo

No início da pesquisa sobre soldagem por atrito rotativo coaxial, do Curso de Mestrado Acadêmico do Instituto Federal de São Paulo – IFSP, os testes estavam sendo realizados por KANASHIRO (2017) em uma empresa que possuía um equipamento de soldagem por atrito rotativo construído para tal finalidade, porém, devido a uma necessidade da empresa, os testes tiveram que ser interrompidos. Surgiu então a necessidade de se construir ou adaptar um equipamento que possibilitasse a continuidade dos ensaios.

O equipamento de soldagem por atrito rotativo foi desenvolvido com várias modificações em um torno mecânico da marca Romi modelo S 20, com aproximadamente 30 anos de fabricação (Fig. 17). Foi realizado mediante a contribuição de várias pessoas envolvidas no projeto de modificação e aprimoramento do aparato.



Figura 17. Torno mecânico original.

Este torno mecânico tem capacidade de usinar peças com 300 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento, tendo um motor elétrico de 2,2 kW e 1.150 rpm e com uma gama de rotações, utilizando mudanças na caixa de engrenagens manualmente, de 40 rpm, 63 rpm, 100 rpm, 160 rpm, 250 rpm, 400 rpm, 630 rpm e 1.000 rpm, informadas pelo fabricante. Seguem descritas as modificações realizadas para adaptar o torno mecânico e transformá-lo em um equipamento de soldagem por atrito rotativo para atender exclusivamente as necessidades desta pesquisa.

Todas as modificações e alterações realizadas para adaptar o equipamento foram planejadas e projetadas para que, segundo necessidade do IFSP, possam ser revertidas a qualquer momento, voltando o equipamento a ser um torno mecânico convencional como era anteriormente. Adaptou-se ao equipamento um sensor indutivo para controlar a rotação do eixo árvore, executando-se furações no flange de fixação da placa universal de três castanhas e inserindo parafusos para a leitura do sensor indutivo, funcionando assim como um *Encoder*, conforme apresentado na figura 18.

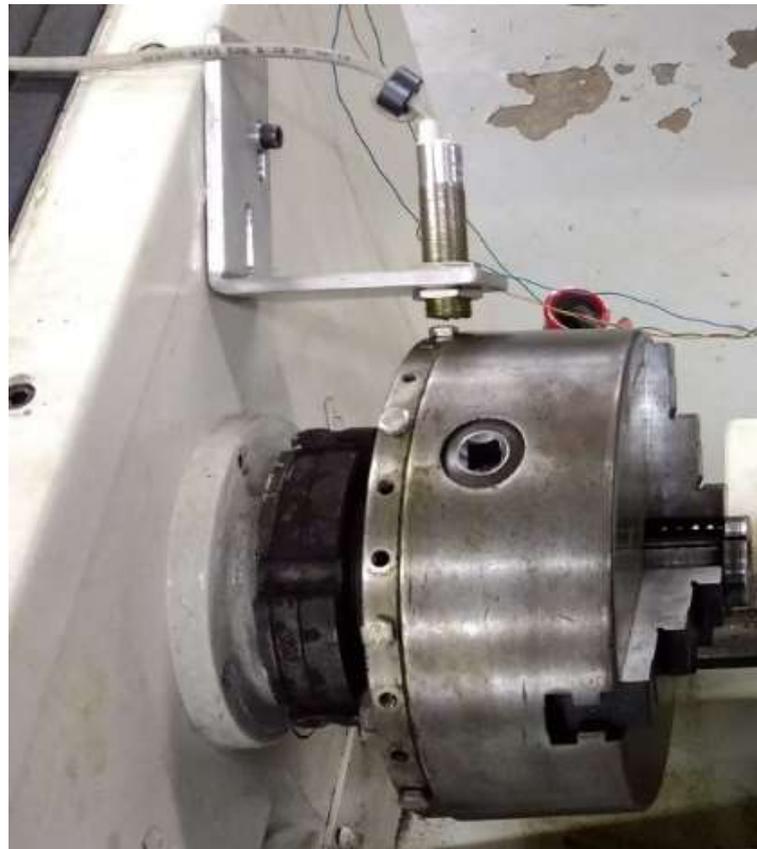


Figura 18. Placa e Encoder.

Para fixar o corpo de prova no lado móvel (eixo árvore), foi construída uma pinça com 3 rasgos e com um furo não passante, para impedir o deslocamento do corpo de prova no sentido axial e esta, fixada na placa de três castanhas, tendo seu diâmetro externo um escalonamento (flange) para evitar o deslocamento axial devido ao esforço do cilindro hidráulico, conforme apresentado na figura 19.

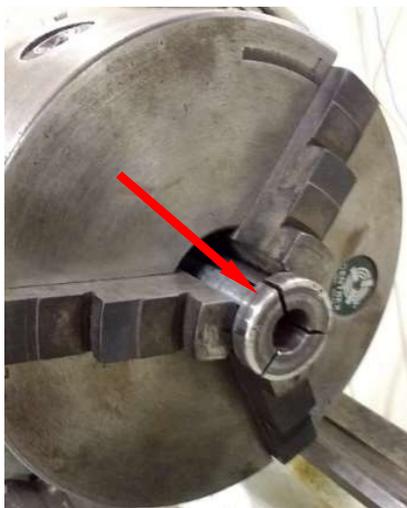


Figura 19. Pinça de fixação do corpo de prova.

Posteriormente, foram confeccionadas duas pinças com sulcos internos para evitar o deslizamento rotacional (giro) dos corpos de prova durante a soldagem. A figura 20 apresenta as pinças confeccionadas para a realização dos ensaios.



Figura 20. Novas pinças de fixação estriadas internamente (lado rotativo - esquerda e lado fixo - direita).

O cabeçote móvel, no equipamento, ficou sendo responsável para alojar o lado fixo e para isso foi necessário construir um flange para fixar uma placa universal de três castanhas na ponta do mangote, de forma que o corpo de prova fique escorado no flange, impedindo deslocamentos (Fig. 21).



Figura 21. Fixação da placa de três castanhas.

A figura 22 apresenta a adaptação realizada no cabeçote móvel para a fixação de um cilindro hidráulico, por meio um conjunto soldado fixado na parte superior do cabeçote móvel e o cilindro hidráulico fixado a este suporte. A haste do cilindro foi acoplada ao mangote, por meio de eixo com rosca externa fixada na rosca da haste do cilindro que comanda o movimento de avanço e retrocesso do mangote e, conseqüentemente a peça submetida ao experimento.



Figura 22. Suporte de fixação do cilindro hidráulico.

No cabeçote móvel do torno foram feitas Usinagens que envolveram execução de rasgo para adaptar uma melhor fixação do cabeçote móvel junto ao barramento, ou seja, travamento do cabeçote móvel ao barramento, pois verificou-se que a fixação original não suportaria o esforço mecânico realizado pelo cilindro hidráulico (Fig. 23).



Figura 23. Travamento do cabeçote móvel no barramento.

Considerando-se a necessidade de aprimoramento para a fixação do cabeçote móvel e a garantia de impedimento que este se movimentasse devido ao esforço de compressão do cilindro hidráulico, foi desenvolvido e implementado um sistema ancoragem apoiado diretamente no barramento do torno. Foram confeccionadas as placas de aço fixadas no barramento com a função de escora, conforme apresentado na figura 24.

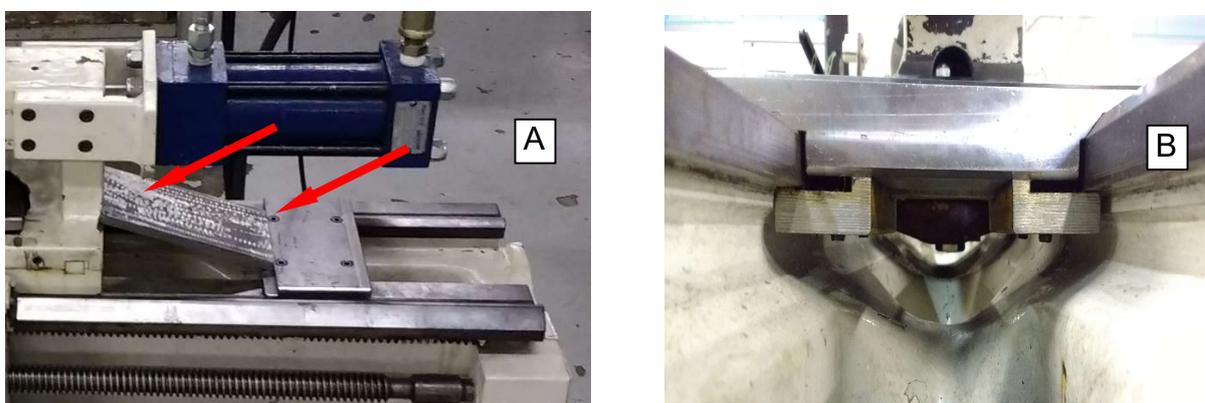


Figura 24. Ancoragem do cabeçote móvel ao barramento “A” esquerda - parte superior; “B” direita – parte inferior.

Na lateral dianteira do cabeçote móvel foi feito oblongo no sentido longitudinal com o objetivo de dar passagem aos fios de um termopar interno para a medição da temperatura. Também foi executado um rasgo no mangote do cabeçote móvel para a inserção e passagem dos fios para o termopar interno (Fig. 25).



Figura 25. Rasgo de passagem para o termopar interno.

Para medição da temperatura na região mais próxima possível do contato entre as peças, houve a necessidade de se fazer um suporte com ação de mola para o termopar interno, que garantisse que a ponta do termopar estivesse em contato permanente com essa região (Fig. 26).



Figura 26. Suporte do termopar tipo “K”.

Para facilitar o deslocamento do cabeçote móvel, este foi acoplado ao carro principal do torno com a utilização de cantoneira, placa e parafusos. Assim, quando

há a necessidade de deslocar manualmente o cabeçote é só deslocar o carro principal e este, por estar acoplado ao cabeçote, o desloca simultaneamente (Fig. 27).



Figura 27. Acoplamento do cabeçote móvel ao carro principal.

Para fazer aproximação do lado fixo ao lado rotativo, foi desenvolvido um sistema de posicionamento, onde o cilindro hidráulico avança até chegar a uma distância de 2 a 3 mm entre as peças, utilizando um sensor de presença por barreira de luz, conforme apresentado na figura 28.

O sensor de presença por barreira de luz foi instalado com a finalidade de aproximar os corpos de prova a uma distância pré-determinada antes do início do processo de soldagem. O sensor é composto de um elemento ativo e um elemento sensor, ambos utilizam pinos digitais do microcontrolador.

O elemento ativo consiste de um feixe de laser de baixo consumo e o elemento sensor é um foto transistor que detecta a presença do feixe gerado pelo elemento ativo. Ambos foram fixados ao carro móvel com altura fixa, alinhada ao centro da placa de três castanhas e com possibilidade de ajuste lateral.

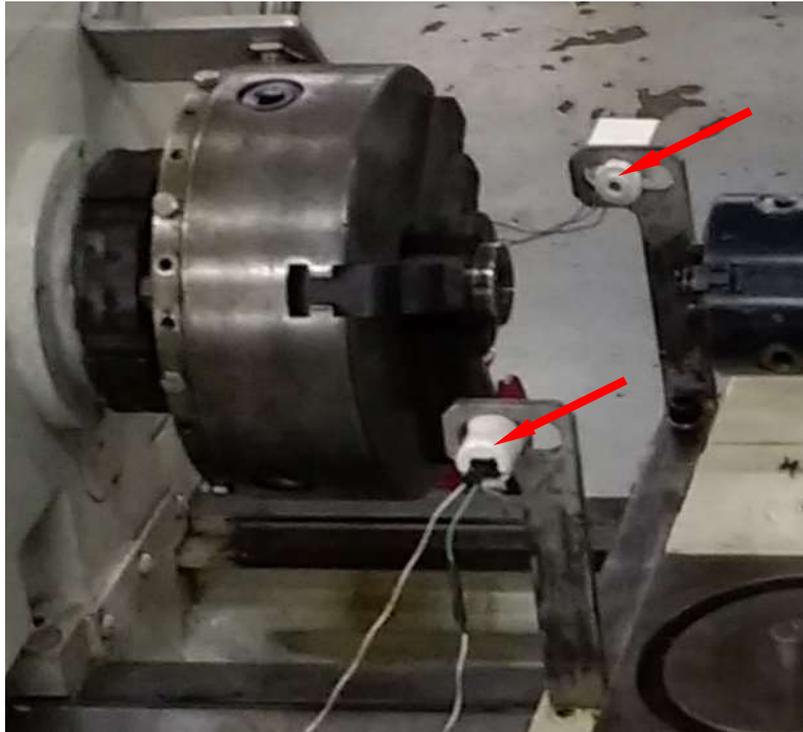


Figura 28. Sensor de posicionamento.

O sistema de controle hidráulico foi desenvolvido com a finalidade de promover o contato para gerar o atrito entre os materiais envolvidos e executar a pressão de recalque necessária para finalizar o processo de soldagem por atrito.

A figura 29 apresenta o fluxo das informações entre os dispositivos de sensoriamento e atuação do sistema hidráulico implementado.

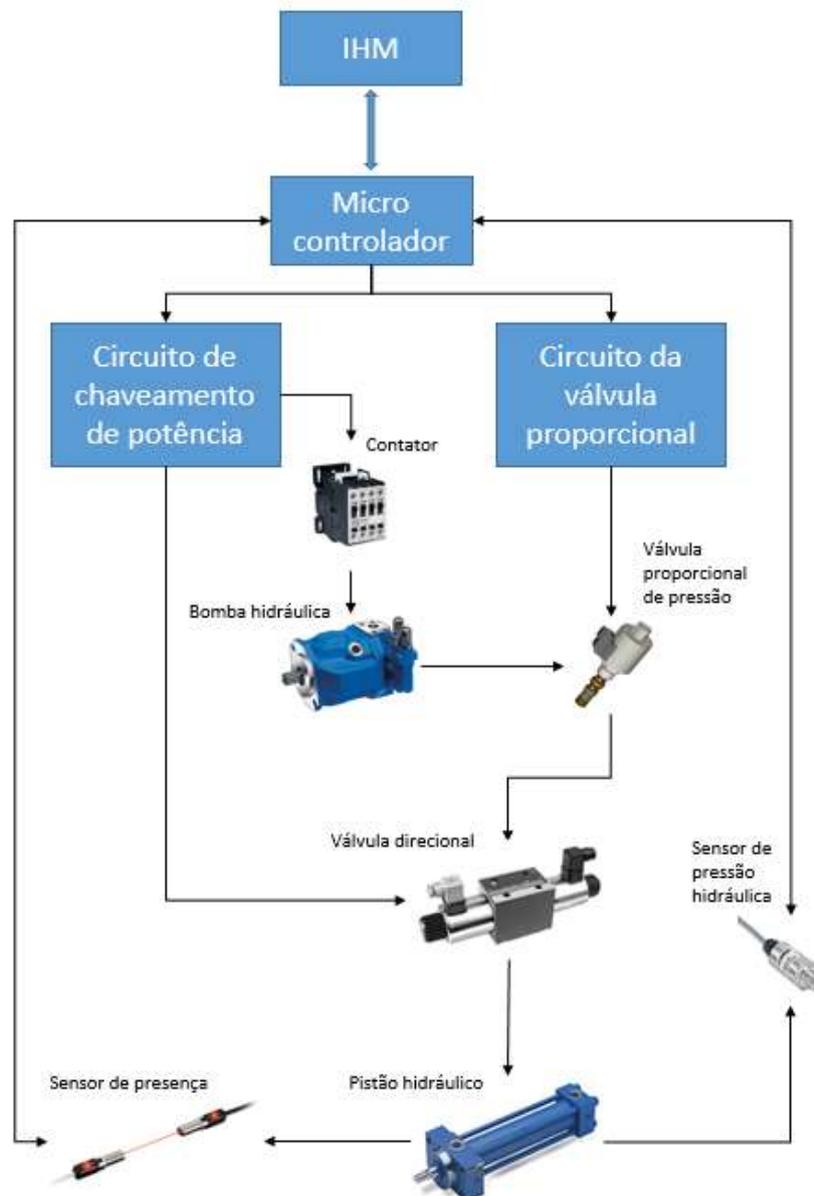


Figura 29. Sistema de controle do sistema hidráulico.

O sistema possui apenas um atuador composto por uma válvula hidráulica de dupla ação, porém, seu controle é realizado por outros três elementos, sendo eles, o acionamento ON/OFF da bomba hidráulica, o controle direcional por uma válvula solenoide de 5/2 vias e o controle de pressão aplicado do cilindro por uma válvula de controle proporcional de pressão.

O controle liga/desliga da bomba hidráulica e da válvula solenoide direcional é realizado através de pinos digitais do microcontrolador. Os sinais do microcontrolador passam por um circuito de isolamento ótico e por um isolador galvânico com o objetivo de proteger o microcontrolador (baixa potência) dos acionamentos de solenoides e contatores (circuitos de alta potência). O acionamento da válvula proporcional de pressão se dá através da geração de um sinal digital pulsado (PWM – *Pulse Width Modulation*). Este tipo de controle permite criar um sinal de tensão pulsado pelo microcontrolador para variar a tensão e corrente média a ser aplicada na bobina da válvula, aumentando ou diminuindo a pressão do sistema proporcionalmente.

O sinal PWM proveniente do PIC possui uma amplitude de 5V e um consumo máximo de 25mA, portanto, fez-se necessário elaborar um circuito com base em transistor MOSFET para que essa amplitude fosse incrementada para 12V (tensão de operação da válvula) e com um consumo de até 2A.

Sensoriamento de pressão aplicada ao cilindro hidráulico

O transdutor de pressão que foi instalado no sistema é do fabricante Hydac. O equipamento foi alocado de forma a realizar a medição apenas no avanço do pistão uma vez que não se faz necessária a medição no recuo do cilindro.

O transdutor gera um nível de tensão analógico entre 0 e 10V de acordo com a pressão medida. O sinal é convertido proporcionalmente para gerar um nível de tensão adequado para o microcontrolador (0-5V). O sinal é direcionado para uma das portas especiais do microcontrolador com função de conversão analógico-digital (ADC) e é então convertido para seu respectivo valor de 10bit. Este valor é traduzido para o valor de pressão através de uma equação gerada a partir do gráfico de resposta apresentado no manual do transdutor.

Para comandar o cilindro hidráulico utilizou-se uma unidade hidráulica da empresa HIDAC e para fixar esta unidade ao torno, foi feito um suporte fixado ao torno para fixar a unidade hidráulica junto ao torno, conforme a Fig. 30.



Figura 30. Unidade hidráulica.

Foi confeccionado um suporte para que o termômetro digital ficasse próximo ao lado fixo com o objetivo de facilitar o posicionamento de um termopar externo o mais próximo possível da face no corpo de prova, conforme apresentado na figura 31.



Figura 31. Suporte do termômetro.

Para medição da temperatura externa no corpo de prova utiliza-se um termopar acoplado ao termômetro digital e para fixação da ponta do termopar, foi feita uma peça em forma de alicate com ação de uma mola para a rápida fixação e posicionamento do termopar, conforme a Fig. 32.

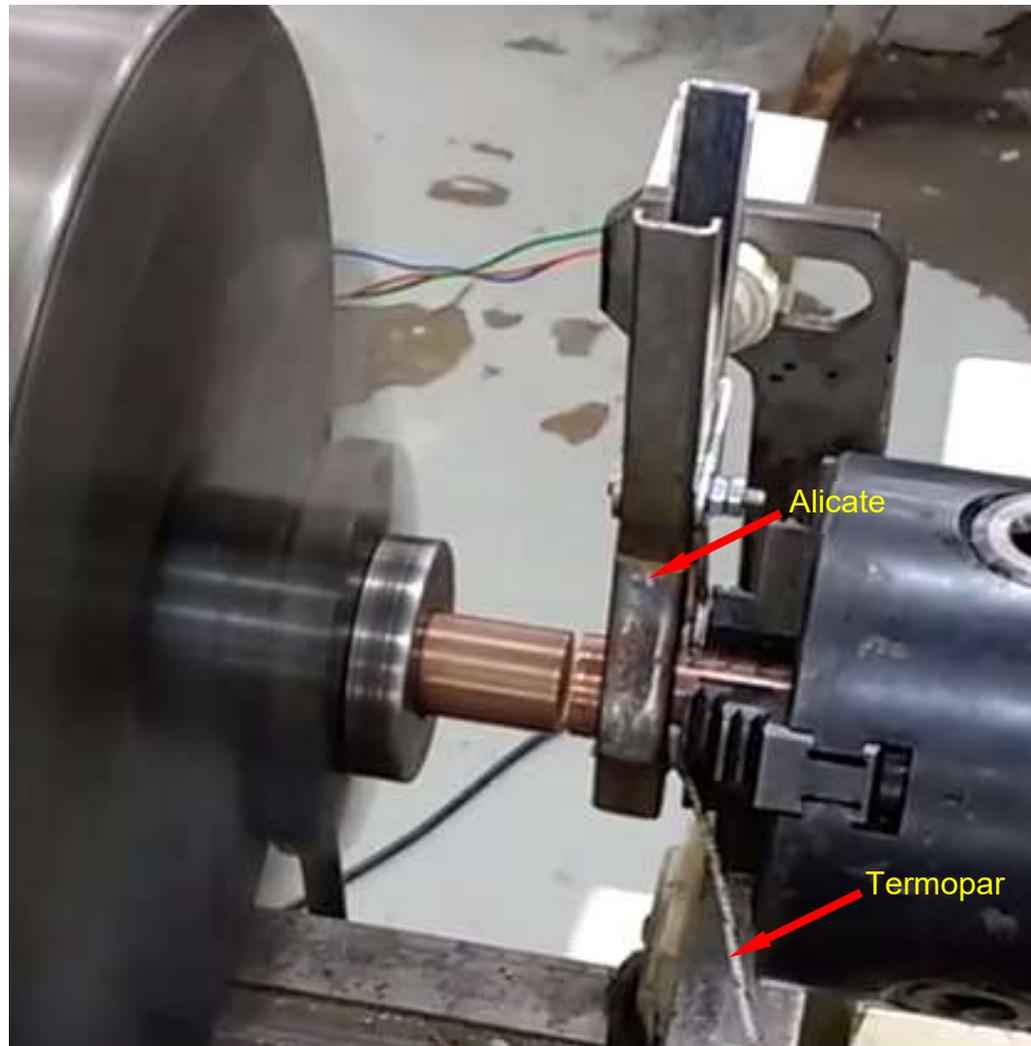


Figura 32. Peça em forma de alicate para fixar o termopar externo.

Para garantir a segurança do operador durante a realização dos experimentos no aparato, foi construída uma proteção contra partículas volantes, feita com estrutura basculante de aço com vidros para melhor observar, fotografar ou filmar o comportamento dos corpos de prova e impedir que o operador ou outras pessoas que estejam no entorno do aparato sejam atingidas por partículas quentes que se desprendiam durante o processo de soldagem, conforme apresentado na figura 33.

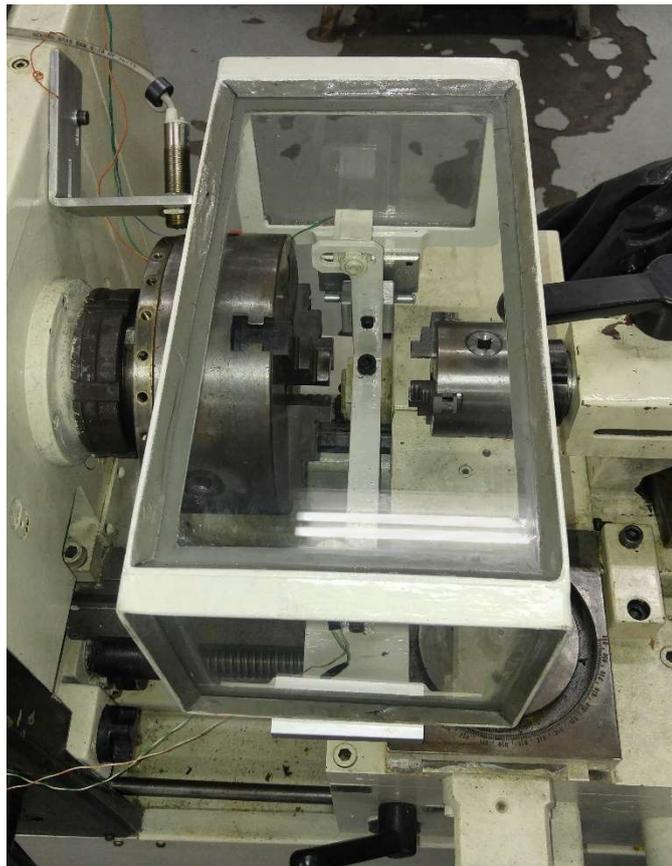


Figura 33. Proteção basculante.

4.2 Software para automação e controle do equipamento de soldagem por atrito rotativo

Destaca-se a necessidade de utilização do software e hardware para o sistema de automação e controle do processo de soldagem por atrito rotativo, projetado e realizado pela empresa Vidjaya Informática, sendo que, por meio dele, se pode controlar o processo pela temperatura de soldagem ou pelo tempo de atrito entre as

peças, controlando também a pressão de atrito, tempo de pressão de atrito, pressão de forjamento (recalque) e o tempo que esta pressão é exercida e a rotação de saída por meio de inversor de frequência e também pela relação de transmissão interna do torno (caixa de mudança de velocidades), que nos possibilita o aumento de torque em função de rotações menores conforme as Fig. 34 e 35.

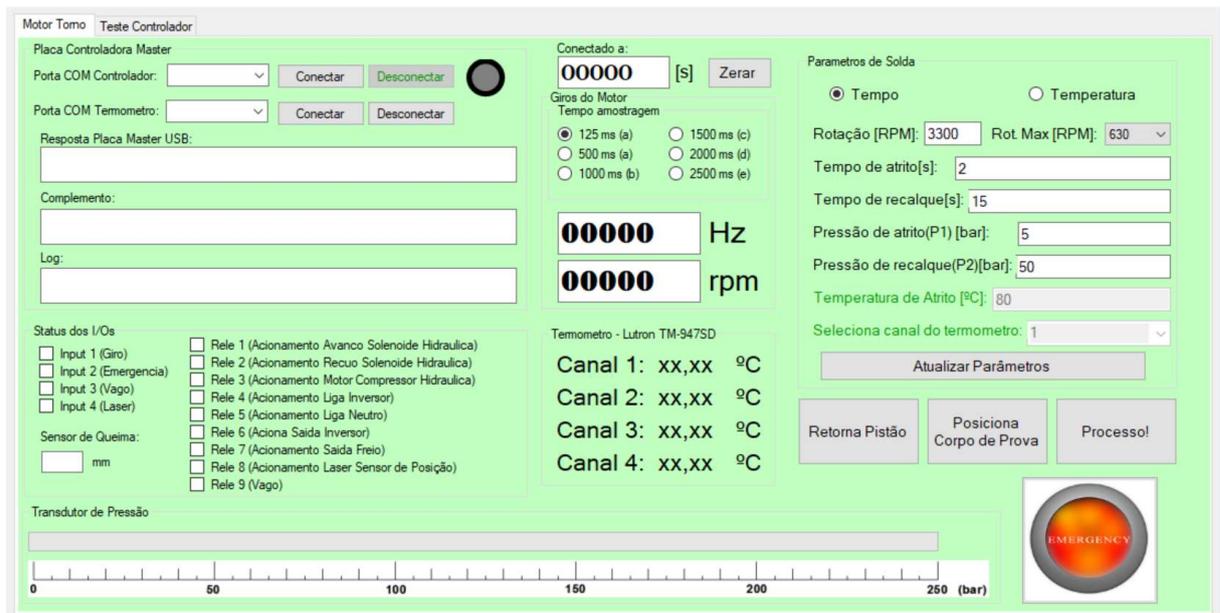


Figura 34. Tela de setup de parâmetros.

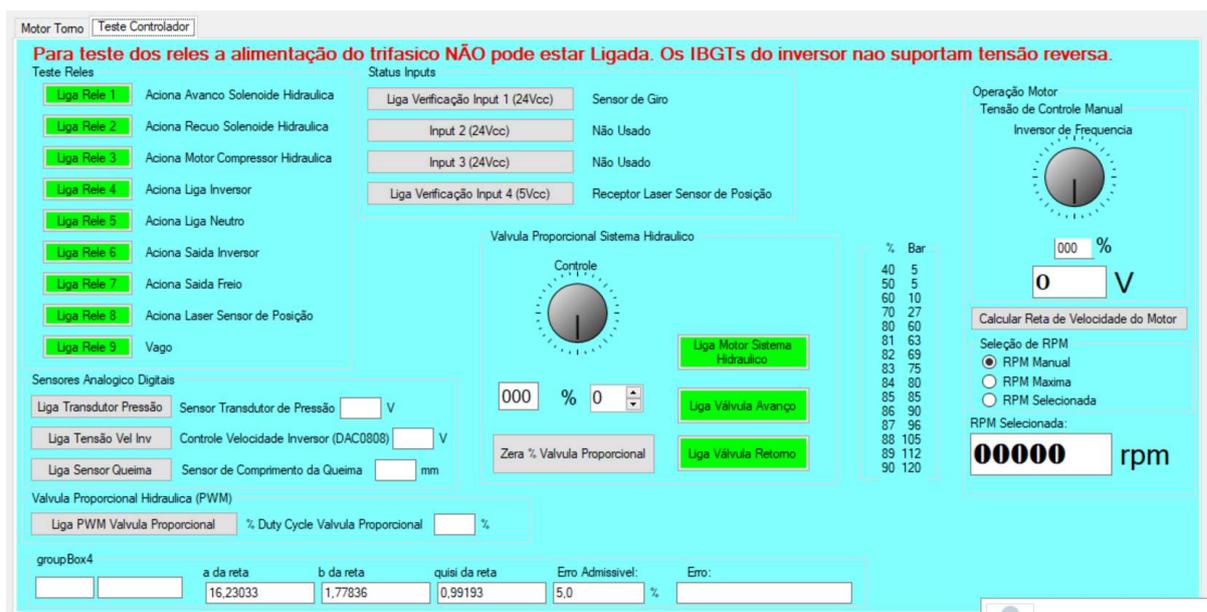


Figura 35. Tela de comando individual de acionamentos.

4.3 Descrição da automação do equipamento para realização de solda por atrito

4.3.1 Controle de velocidade de rotação do eixo árvore

O controle eletroeletrônico da velocidade de rotação do eixo árvore é feito utilizando-se um inversor de frequência em conjunto com o sistema microcontrolado.

O microcontrolador gera um sinal de 8 bits que é convertido em um sinal analógico com intervalo entre 0 e 10V. Dessa forma temos um sinal analógico com o valor mínimo de 0V e um valor máximo de 10V com resolução de 39mV.

O sinal de 0-10V é conectado à entrada de controle proporcional de frequência do inversor. Portanto a frequência de saída do controle do motor varia entre 0 e 60 Hz dependendo do sinal analógico de entrada.

Valor gerado pelo uC PIC (8bit)	Sinal analógico de controle do inversor [V]	Frequência de controle do motor [Hz]
0V	0	0
64	2,5	15
128	5	30
192	7,5	45
255	10V	60

Tabela 5. Controle eletrônico de rotação

4.3.2 Sensoriamento de rotação

A placa de castanhas foi usinada para a fixação dos elementos sensores de material ferroso para permitir a utilização do sensor indutivo.

Quando um material ferroso se aproxima do sensor indutivo, um sinal digital é gerado e enviado para o sistema de controle. A rotação do motor é determinada através da contagem do número de pulsos recebidos em um determinado período, com um determinado número de elementos sensores. Quanto mais elementos

sensores utilizados, maior é a precisão de leitura de rotação, porém menor é a rotação máxima de leitura.

Dois terminais do sensor devem ser conectados a uma fonte de energia elétrica de corrente contínua e os demais enviam um sinal digital normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF) para o sistema de controle.

O sinal enviado pelo sensor (0 ou 24V) passa por um circuito *Smith-trigger*. Esse circuito tem a função de comparar o sinal de entrada a um determinado limiar de tensão inferior e um limiar superior.

Quando esse sinal estiver abaixo do limiar inferior, o circuito apresenta em sua saída um estado de nível lógico 0 (*Low*) e quando esse sinal estiver acima do limiar superior a saída será um nível lógico 1 (*High*). Se o sinal estiver entre os dois limiares, o nível lógico do estado anterior será mantido.

Com o circuito Schmith-trigger, aumentamos a confiabilidade da leitura do sinal gerado pelo sensor além de reduzir de forma eficaz mudanças de estado inexistentes, normalmente geradas por fatores externos.

O sinal de saída do circuito Schmith-Trigger varia digitalmente de acordo com sua tensão de alimentação (no caso, 0 ou 24V). Esse sinal passa por um circuito de adaptação para que seja adaptado à tensão de operação do microcontrolador (0 ou 5V), por um circuito de isolamento ótica e finalmente é direcionado para uma de suas entradas digitais.

Por sua vez, o microcontrolador armazena a quantidade de pulsos gerados pelos elementos sensores em um período conhecido, dessa forma é possível calcular a rotação do motor que é então utilizada em outros algoritmos dentro do próprio microcontrolador e exportada para o sistema supervisor.

4.3.3 Fluxograma da automação do equipamento de soldagem por atrito rotativo

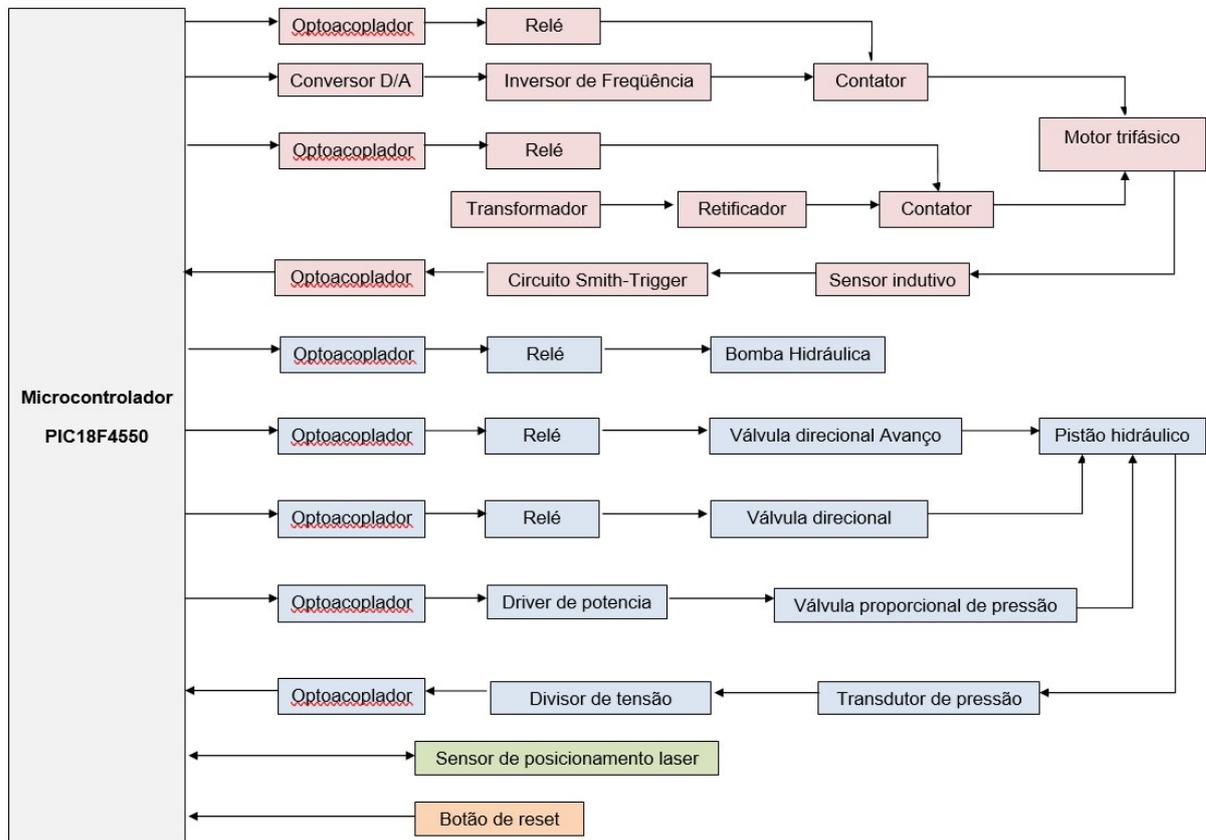


Figura 36. Fluxograma da automação do equipamento de soldagem por atrito.

4.4 Modificações e aprimoramentos do equipamento

Em razão da necessidade de maior rotação na saída do eixo, foram necessárias novas modificações para aprimoramento do aparato. Primeiramente, foi substituída a relação de transmissão (polias e correias) gerando rotação máxima de 2200 rpm, para a soldagem de ligas de alumínio.

Segundo a AWS (1997) necessitava-se de rotações maiores para a consecução dos experimentos com ligas de cobre e, então, foi substituída a relação de transmissão para aumentar a rotação de saída, chegando a 3.250 rpm de saída, com potência de 2,2 kW.

Porém, o equipamento ainda não tinha torque suficiente para realizar a soldagem dos corpos de prova, mesmo trabalhando com a pressão mínima de atrito

de 0,1 MPa, surgindo a necessidade de aumentar o torque e, assim sendo, foi trocada a relação de transmissão, voltando à relação de transmissão anterior e substituindo o motor elétrico por um motor de 5,5 kW, com 3.450 rpm.

Com esta modificação foi possível um aumento tanto do torque quanto da rotação máxima de saída. Desprezando-se as perdas pelas transmissões, uma vez que a potência nominal do motor é fornecida pelo fabricante e que as rotações de saída foram medidas por um tacômetro digital e analógico, ambos calibrados. A variação máxima foi de 3 unidades na rotação, conforme apresentado na tabela 6.

<i>Cálculos de Rotação final e Torque de saída</i>												
Etapas	Potência do motor	Rotação do motor (rpm)	ϕ Polia motora (mm)	ϕ Polia movida (mm)	Rotação da Polia movida (rpm)	Relação de transmissão no eixo árvore		Rotação do motor x rotação de saída	Rotação de saída indicada na máquina (rpm)	Rotação calculada de saída (rpm)	Rotação real de saída (rpm)	Torque de saída (N.m)
Original	2206 W	1150	68	147	538	0,478	2,091	0,98	1000	1125	1125	18,73
		1150				0,752	1,329	0,62	630	715	715	29,46
		1150				1,182	0,846	0,40	400	455	455	46,30
		1150				1,888	0,530	0,25	250	285	285	73,91
1ª modificação	2206 W	1150	120	147	940	0,459	2,181	1,78	1000	2050	2050	10,28
		1150				0,752	1,329	1,13	630	1256	1303	16,17
		1150				1,182	0,846	0,72	400	799	829	25,41
		1150				1,888	0,530	0,45	250	501	519	40,59
2ª modificação	2206 W	1150	190	147	1486	0,457	2,187	2,83	1000	3250	3250	6,48
		1150				0,749	1,329	1,72	630	1975	1980	10,64
		1150				1,177	0,846	1,10	400	1257	1265	16,65
		1150				1,885	0,530	0,69	250	788	793	26,56
3ª modificação	5516 W	3585	120	147	2933	0,478	2,091	1,71	1000	6132	6132	8,59
						0,754	1,326	1,08	630	3888	3888	13,55
						1,186	0,844	0,69	400	2474	2474	21,29
						1,903	0,525	0,43	250	1541	1541	34,18

Tabela 6. Dados das modificações no sistema de transmissão.

Todas as modificações foram realizadas com o objetivo de suprir as necessidades do processo em relação a estabilidade, rigidez e atendimento aos parâmetros requeridos, para que a soldagem por atrito rotativo de materiais dissimilares que foram utilizados no experimento, segundo as normas vigentes, garantam condutividade elétrica.

4.5 Comentários sobre os parâmetros dos ensaios

Na última tentativa realizada para obtenção de soldagens de boa qualidade, ocorreram situações adversas, em que pequenas variações nos parâmetros provocaram grandes diferenças na qualidade da soldagem.

Com bases nos dados da tabela 7, observa-se que nos corpos de prova nº 34 e 42, não houve a aproximação da parte estacionária por meio do sensor de posicionamento e, por este motivo, parte do tempo destinado à pressão de atrito foi gasto com o deslocamento do cilindro hidráulico da sua posição de recuo até a posição em que houve o contato entre as peças, o que provocou menor atrito e conseqüentemente, menor temperatura para a realização da soldagem e também, pouquíssima perda por conformação.

Nos corpos de prova nº 28 ao 32 foram utilizadas a relação de transmissão indicada no equipamento de 1.000 rpm e nos demais corpos de prova, foi utilizada a relação de transmissão de 630 rpm com o objetivo de obter torque maior durante o processo de soldagem.

Ainda, nos ensaios dos corpos de prova nº 28 ao 32, foram utilizadas juntas cônicas, com ângulo de 160°, pois os corpos de prova estavam usinados nesta condição com a finalidade de tornar as juntas mais concêntricas. As demais juntas estavam sem ângulo de inclinação (juntas planas de 180°).

Nos corpos de prova de nº 28 ao 39, foram realizados ajustes nos parâmetros de soldagem para atingir os parâmetros ótimos para a consecução das juntas.

Nos corpos de prova de nº 40 ao 54, foram utilizados parâmetros ótimos de rotação de trabalho, pressão de atrito, tempo de atrito, pressão de recalque e tempo de recalque, resultando em uma porcentagem de perda por conformação (encurtamento dos corpos de prova) de aproximadamente 3,8% no comprimento.

<i>Registro de ensaios</i>										
Ensaio nº	Rotação indicada na máquina [rpm]	Rotação de trabalho [rpm]	Pressão de atrito [Mpa]	Tempo de atrito [s]	Pressão de recalque [Mpa]	Tempo de recalque [s]	Comprimento inicial [mm]	Comprimento final [mm]	Perda por conformação [%]	Média de perda por conformação [%]
28	1000	3200	0,4	7	4	10	127,10	126,01	0,9	4,8
29	1000	3200	0,4	6	4	10	127,80	126,54	1,0	
30	1000	3300	0,4	6	4	10	127,70	124,68	2,4	
31	1000	3500	0,4	7	4	10	127,70	123,72	3,1	
32	1000	3400	0,4	5	4	10	129,00	127,90	0,9	
33	630	3300	0,5	6	5	10	128,73	114,14	11,3	
34	630	3300	0,5	5	5	10	128,25	127,60	0,5	
35	630	3300	0,5	5	5	10	128,25	113,47	11,5	
36	630	3300	0,5	3	5	10	128,20	116,50	9,1	
37	630	3300	0,4	3	5	10	128,20	119,13	7,1	
38	630	3200	0,4	3	5	10	127,37	117,45	7,8	
39	630	3200	0,4	2	5	10	125,06	122,71	1,9	
40	630	3300	0,4	2	5	10	125,06	117,14	6,3	3,8
41	630	3300	0,4	2	5	10	124,95	122,12	2,3	
42	630	3300	0,4	2	5	10	124,60	122,92	1,3	
43	630	3300	0,4	2	5	10	124,80	118,62	5,0	
44	630	3300	0,4	2	5	10	124,82	120,61	3,4	
45	630	3300	0,4	2	5	10	124,67	121,12	2,8	
46	630	3300	0,4	2	5	10	124,87	121,47	2,7	
47	630	3300	0,4	2	5	10	124,98	121,26	3,0	
48	630	3300	0,4	2	5	10	124,94	121,74	2,6	
49	630	3300	0,4	2	5	10	124,91	118,48	5,1	
50	630	3300	0,4	2	5	10	124,93	120,90	3,2	
51	630	3300	0,4	2	5	10	124,92	116,50	6,7	
52	630	3300	0,4	2	5	10	125,95	125,50	0,4	
53	630	3300	0,4	2	5	10	124,92	116,41	6,8	
54	630	3300	0,4	2	5	10	124,87	117,21	6,1	

Tabela 7. Registro dos parâmetros utilizados nos ensaios.

4.6 Resultados dos ensaios de resistência elétrica

Os ensaios de resistência elétrica foram realizados na empresa MEGABRAS Indústria Eletrônica Ltda, utilizando um micro ohmímetro digital da sua linha de produtos, modelo MPK-2000e, conforme figura 37, sendo que as leituras de resistência são exibidas em um display alfanumérico com resolução de 4½ dígitos e mede resistências de até 200 Ω , com resolução de 0,1 $\mu\Omega$, utilizando correntes de prova de 1 mA até 10 A, com exatidão de $\pm (0,10\%$ do valor medido + 0,005% do fundo de escala), com temperatura de 20 °C \pm 1 °C.



Figura 37. Medição de resistência elétrica.

Nos corpos de prova, na parte correspondente ao cobre eletrolítico (C11000), o diâmetro é de 15,87 mm (5/8”), sendo que a área da sessão transversal corresponde a 197,81 mm² e na parte correspondente à liga CuCrZr (C18150), o diâmetro é de 16 mm, com sua área da sessão transversal de 201,06 mm².

Houve variação em relação ao comprimento inicial das partes dos dois materiais, sendo que foram consideradas para calcular a perda por conformação. Os corpos de prova foram executados mediante critérios de diminuição de custos com a usinagem, ou seja, o comprimento de cada parte da amostra foi usinado de forma a se retirar a quantidade mínima de material. Estão listados, na tabela 8, os comprimentos obtidos após o corte e faceamento das partes integrantes dos CP's.

A resistividade do cobre eletrolítico (C11000), utilizada para os cálculos, segundo a TERMOMECANICA São Paulo SA, é de $0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

A resistividade da liga CuCrZr (C18150), utilizada para os cálculos, segundo a AMPCO Metal S.A., é de $0,0196 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

A seguir, a tabela 8 e a figura 38 apresentam os dados comparativos entre as resistências elétricas calculadas e os valores medidos nos corpos de prova pós soldagem.

Resistência Elétrica (pós soldagem)								
Nº	L (m)	R _{C11000} (calculada) ($\mu\Omega$)	L (m)	R ₁₈₁₅₀ (calculada) ($\mu\Omega$)	R _{Total} (calculada) ($\mu\Omega$)	R _{medida} ($\mu\Omega$)	Compr. Final (m)	≠ Real x Cálculo (%)
28	0,06101	5,2	0,065	6,34	11,6	11,3	0,12601	2,4
29	0,06154	5,3	0,065	6,34	11,6	11,4	0,12654	1,9
30	0,05968	5,1	0,065	6,34	11,5	11,3	0,12468	1,4
31	0,05872	5,0	0,065	6,34	11,4	11,2	0,12372	1,6
32	0,0629	5,4	0,065	6,34	11,7	11,2	0,1279	4,6
33	0,05037	4,3	0,064	6,22	10,5	9,6	0,11414	9,0
34	0,06379	5,5	0,064	6,22	11,7	11,3	0,1276	3,4
35	0,04969	4,3	0,064	6,22	10,5	9,9	0,11347	5,6
36	0,05268	4,5	0,064	6,22	10,7	10,0	0,1165	7,0
37	0,05526	4,7	0,064	6,23	11,0	10,0	0,11913	8,9
38	0,0536	4,6	0,064	6,22	10,8	10,0	0,11745	7,7
39	0,06265	5,4	0,06	5,85	11,2	10,8	0,12271	3,9
40	0,05714	4,9	0,06	5,85	10,8	9,9	0,11714	8,0
41	0,06212	5,3	0,06	5,85	11,2	10,5	0,12212	6,1
42	0,06217	5,3	0,061	5,92	11,3	10,3	0,12292	8,6
43	0,05794	5,0	0,061	5,92	10,9	9,8	0,11862	10,0
44	0,06	5,2	0,061	5,91	11,1	10,1	0,12061	8,7
45	0,06067	5,2	0,06	5,89	11,1	10,3	0,12112	7,3
46	0,06084	5,2	0,061	5,91	11,1	10,2	0,12147	8,4
47	0,06083	5,2	0,06	5,89	11,1	10,4	0,12126	6,5
48	0,06138	5,3	0,06	5,88	11,2	10,7	0,12174	4,1
49	0,05817	5,0	0,06	5,88	10,9	10,2	0,11848	6,2
50	0,06059	5,2	0,06	5,88	11,1	10,5	0,1209	5,3
51	0,0562	4,8	0,06	5,88	10,7	9,9	0,1165	7,5
52	0,06528	5,6	0,06	5,87	11,5	10,6	0,1255	7,7
53	0,05626	4,8	0,06	5,86	10,7	9,7	0,11641	9,3
54	0,05709	4,9	0,06	5,86	10,8	10,8	0,11721	-0,3
							Média	- 8,4

Tabela 8. Medição da Resistência elétrica pós soldagem.

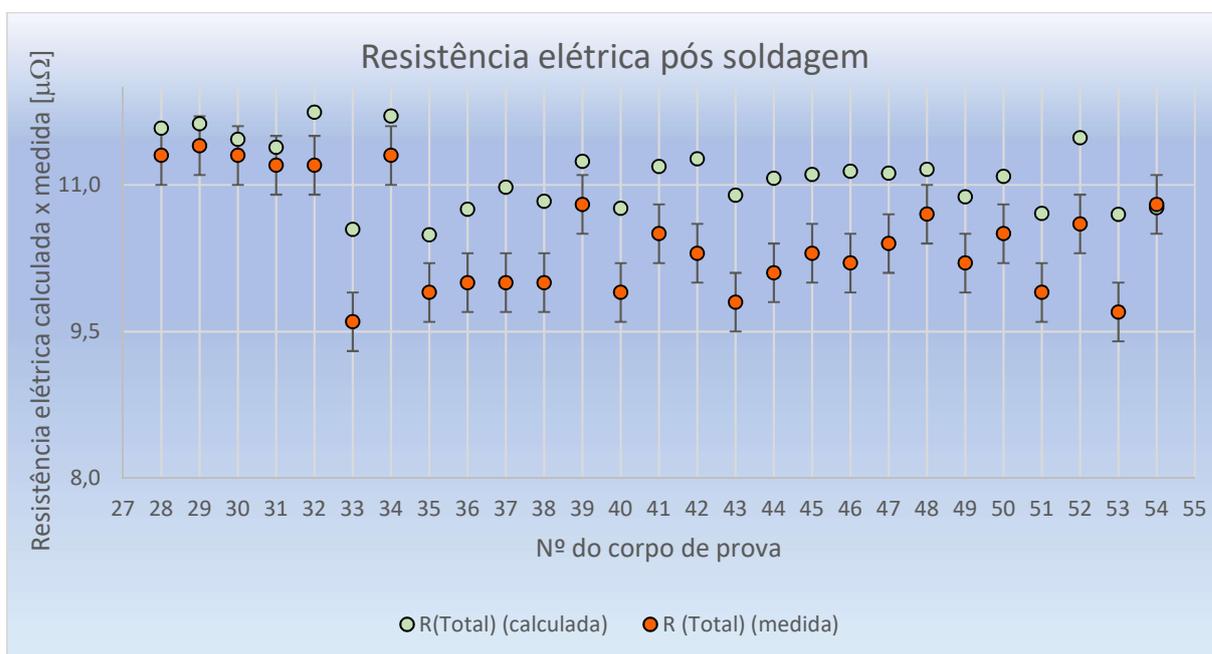


Figura 38. Gráfico da Resistência Elétrica pós soldagem.

A partir da realização da soldagem e da medição da resistência elétrica dos CP's pós soldagem, realizou-se usinagem dos CP's no diâmetro, eliminando as rebarbas ocasionadas pela conformação mecânica e diminuindo o diâmetro dos CP's para 15 mm, com tolerância de $\pm 0,02$ mm, sendo a área da sessão transversal de $176,71 \text{ mm}^2$.

Os ensaios de resistência elétrica foram realizados novamente na empresa MEGABRAS Indústria Eletrônica Ltda, utilizando o mesmo micro ohmímetro digital utilizado nas medições anteriores.

Os CP's de nº 46 e 47, também previstos para ensaio de tração, estavam sendo usinados em outro local e por este motivo, não foi realizado neles o ensaio de resistência elétrica. Os demais CP's não relacionados, foram guardados para que, em uma eventualidade, possam servir de contraprova.

A seguir, segue tabela 9 e a figura 39, com os valores de resistência elétrica pós usinagem:

Resistência Elétrica (pós usinagem)								
CP Nº	L (m)	R _{C11000} (μΩ)	L (m)	R ₁₈₁₅₀ (μΩ)	R _{Total} (μΩ)	R _{medida} (μΩ)	≠ R medida x R Cálculada (%)	
31	0,0536	5,16	0,06385	7,08	12,2	12,1	-1,1	
32	0,06265	6,03	0,06006	6,66	12,7	12,7	0,0	
33	0,05714	5,50	0,06000	6,65	12,2	11,1	-8,7	
34	0,06212	10,10	-	11,72	21,8	21,6	-5,3	
36	0,06217	5,98	0,06075	6,74	12,7	11,2	-11,9	
37	0,05794	5,57	0,06068	6,73	12,3	11,6	-5,7	
38	0,06	5,77	0,06061	6,72	12,5	11,7	-6,4	
40	0,06084	5,85	0,06063	6,72	12,6	11,3	-10,2	
41	0,06083	5,98	0,06043	6,65	12,6	11,8	-6,2	
50	0,05817	10,04	-	11,76	21,8	21,8	0,0	
51	0,06059	5,83	0,06031	6,69	12,5	11,4	-8,9	
53	0,0562	5,41	0,0603	6,69	12,1	11,3	-6,6	
54	0,06528	6,28	0,06022	6,68	13,0	11,5	-11,3	
Média							- 6,1	

Tabela 9. Medição da Resistência elétrica pós usinagem.

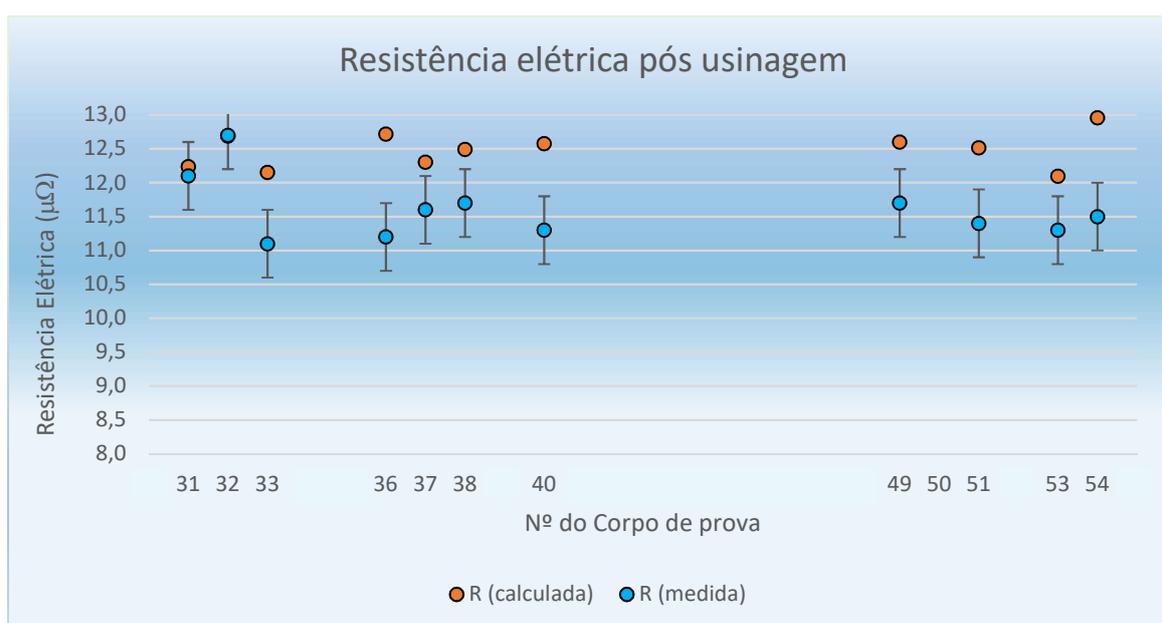


Figura 39. Gráfico da Resistência Elétrica pós usinagem.

4.7 Macrografias pós soldagem

O embutimento das amostras de nº 30 e 43 foram realizados por embutimento a frio, com resina acrílica, em conformidade com a norma ASTM E3.

O objetivo de realizar o embutimento a frio foi de que não houvesse qualquer interferência da temperatura de embutimento convencional (± 150 °C) nas amostras, preservando as condições finais da soldagem, conforme as figuras 40 e 41.

Reagente: composto por 10,7% de ácido clorídrico, 3,4% de cloreto férrico e 85,9% de álcool por 25 segundos.



Figura 40. Macrografia de soldagem com junta cônica (160°) Amostra nº 30.



Figura 41. Macrografia de soldagem com junta plana. Amostra nº 43.

4.8 Micrografias pós soldagem

O polimento final das amostras de nº 30 e 43, o ataque com o reagente e as imagens micrográficas foram realizados na Termomecanica São Paulo S.A., em microscópio óptico da marca Leica modelo DMLM.

Em todas as micrografias a seguir, foi utilizado reagente composto por: 10,7% de ácido clorídrico, 3,4% de cloreto férrico e 85,9% de álcool, com ataque por um período de 25 segundos.

Amostra 43 – junta plana

As figuras nº 42, 43 e 44 referem-se a liga C11000 na região do metal de base, com as características de tamanho de grão = 0,025 mm, apresentando estrutura homogênea com linhas de deslizamento.

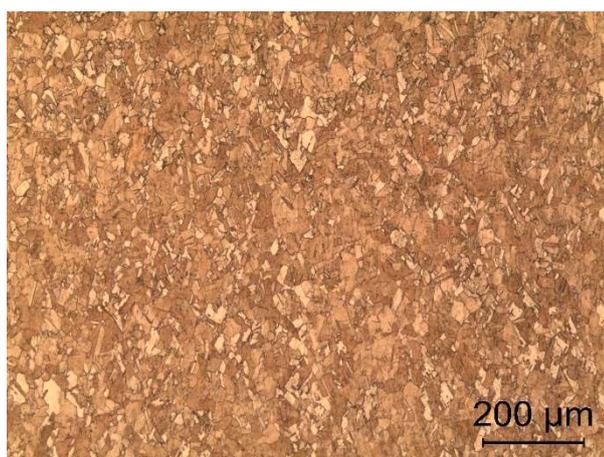


Figura 42. Micrografia do C11000 – Metal de base. Aumento de 100 X

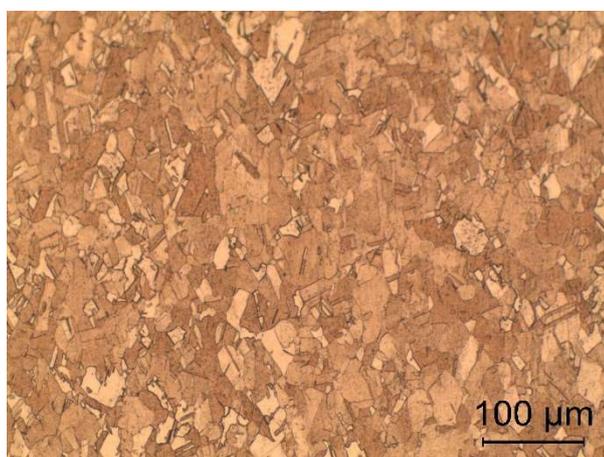


Figura 43. Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 200 X

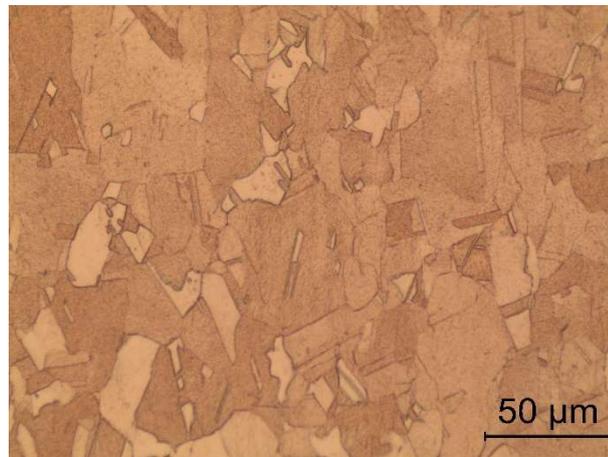


Figura 44. Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 500 X

C11000 – Na Zona Termicamente Afetada - ZTA

As figuras de nº 45, 46 e 47, referem-se a liga C11000 na região da ZTA, com as características de tamanho de grão = 0,045 mm, apresentando estrutura homogênea.



Figura 45. Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 100 X

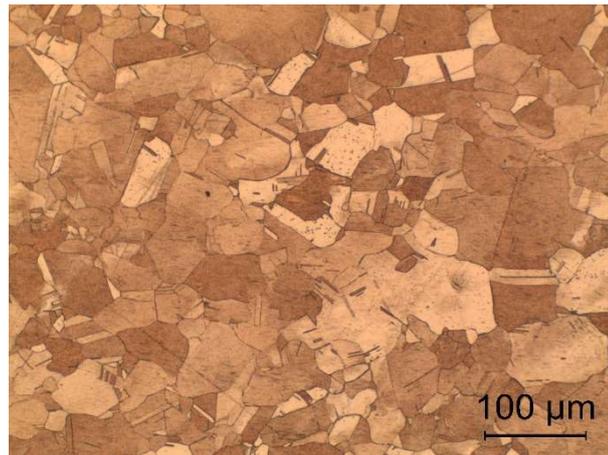


Figura 46. Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 200 X

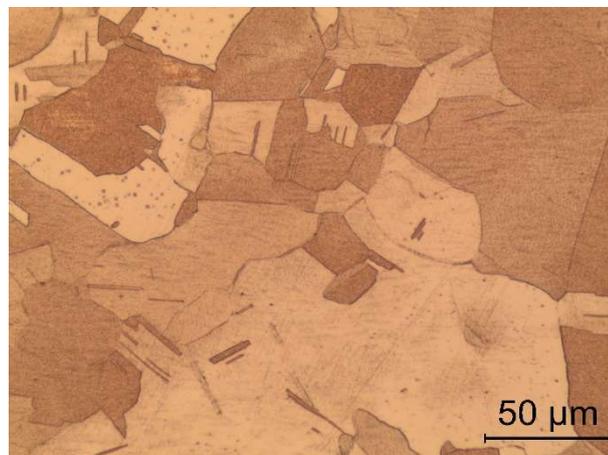


Figura 47. Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 500 X

C18150 - CuCrZr

As figuras de nº 48, 49, 50 e 51, referem-se a liga C18150, apresentando estrutura bruta de fusão em toda a extensão da amostra, sem variação ao se aproximar da região soldada.



Figura 48. Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 100 X

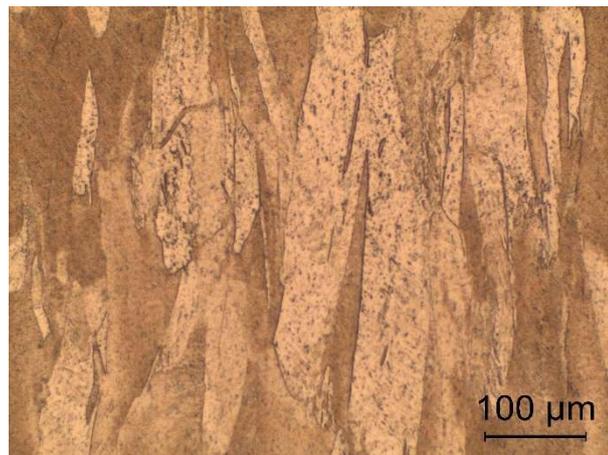


Figura 49. Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 200 X

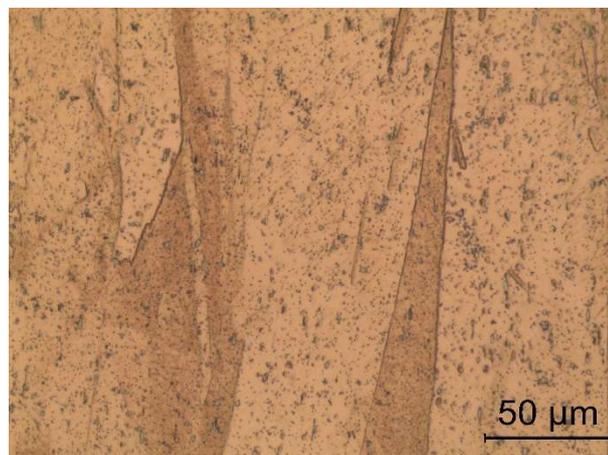


Figura 50. Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 500 X

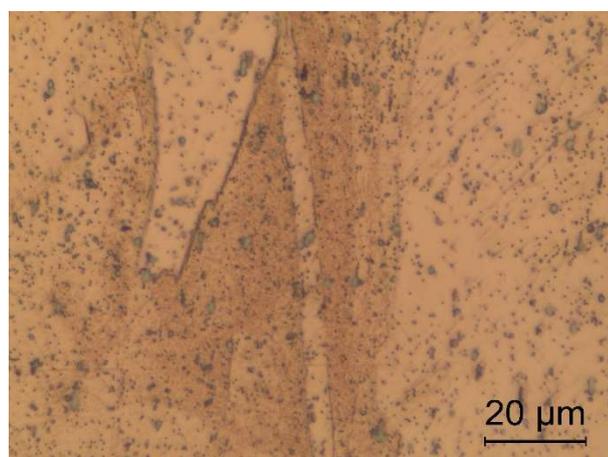


Figura 51. Micrografia do C18150 - ZTA. Aumento de 1000 X

Região da solda

As figuras nº 52, 53, 54, 55 e 56, referem-se a região da solda, sem alteração da estrutura dos metais; sem aparecimento de tensão; sem pontos de oxidação; sem difusão dos metais; solda uniforme.

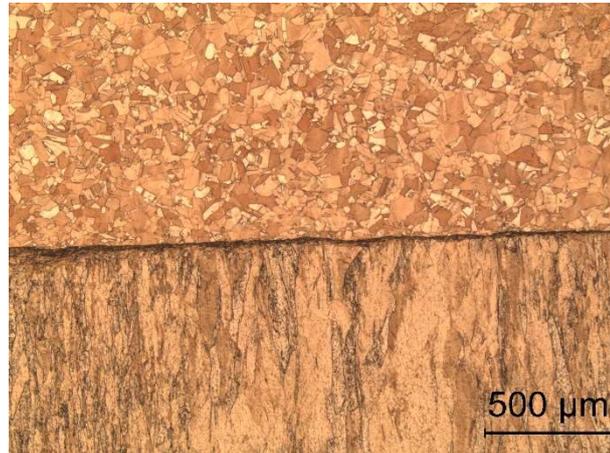


Figura 52. Micrografia da Região da solda. Aumento de 50 X



Figura 53. Micrografia da Região da solda. Aumento de 100 X

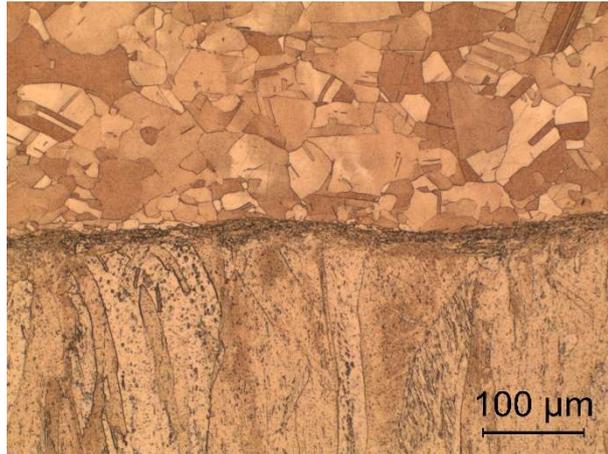


Figura 54. Micrografia da Região da solda. Aumento de 200 X

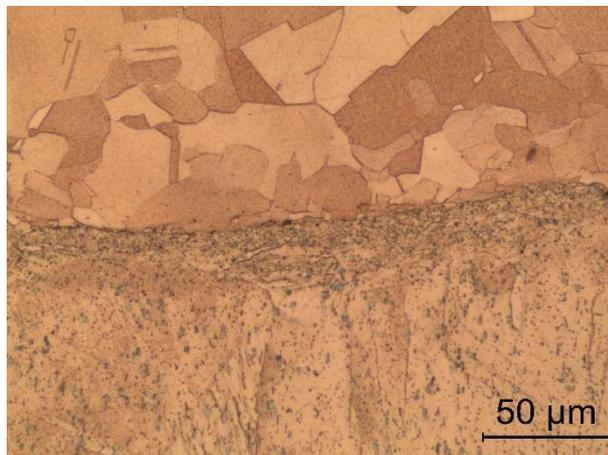


Figura 55. Micrografia da Região da solda. Aumento de 500 X

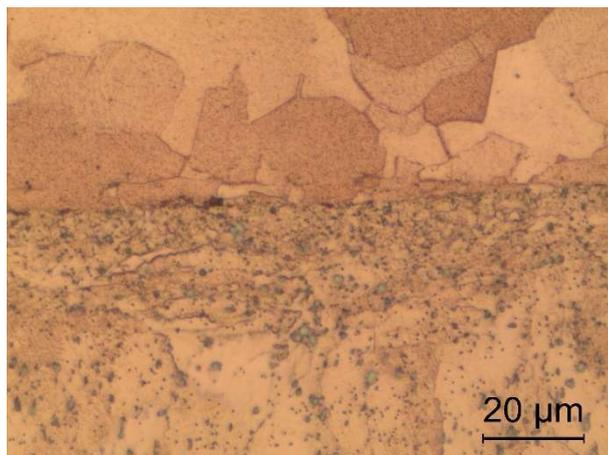


Figura 56. Micrografia da Região da solda. Aumento de 1000 X

Amostra 30 (Junta Cônica – 160°)**C11000 – metal de base**

As figuras nº 57, 58 e 59, referem-se a liga C11000 na região do metal de base, com as características de tamanho de grão = 0,025 mm, apresentando estrutura homogênea.



Figura 57. Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 100 X

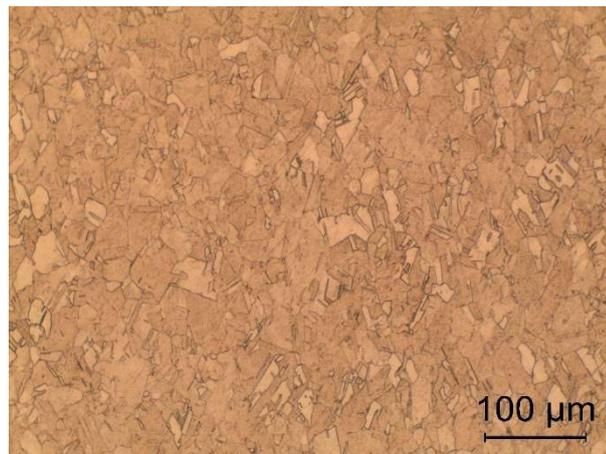


Figura 58. Micrografia do C11000 - Metal de base. Aumento de 200 X

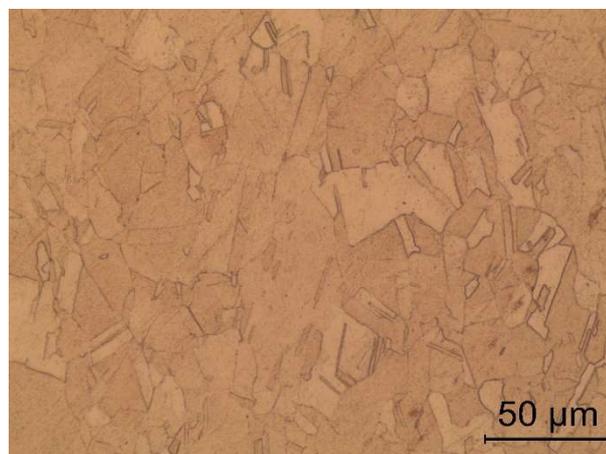


Figura 59. Micrografia do C11000 - Longe da solda. Aumento de 500 X

C11000 – Na Zona Termicamente Afetada - ZTA

As figuras nº 60, 61 e 62, referem-se a liga C11000 na ZTA, com as características de tamanho de grão = 0,035 mm, apresentando estrutura homogênea



Figura 60. Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 100 X

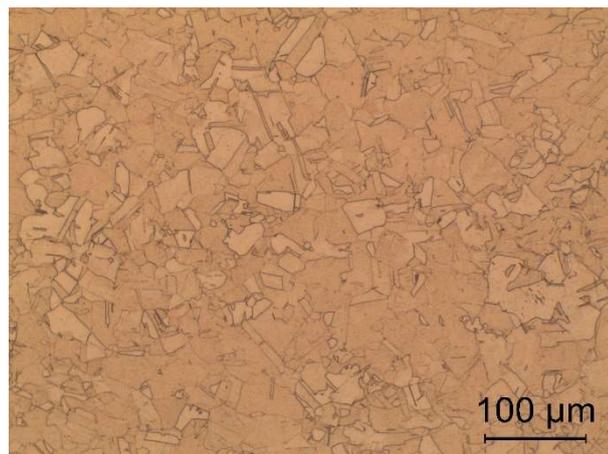


Figura 61. Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 200 X

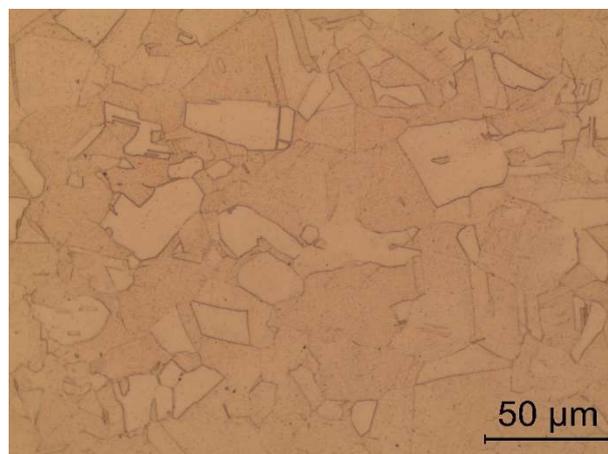


Figura 62. Micrografia do C11000 - ZTA. Aumento de 500 X

C18150 - CuCrZr

As figuras nº 63, 64, 65, 66 e 67, referem-se a liga C18150, apresentando estrutura bruta de fusão em toda a extensão da amostra, sem variação ao se aproximar da região soldada.

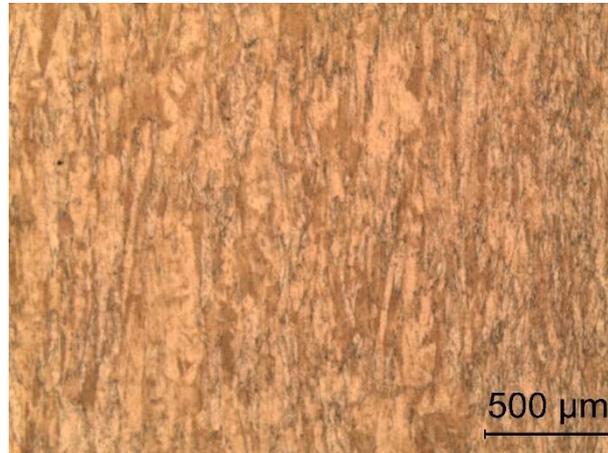


Figura 63. Micrografia do C18150. Aumento de 50 X

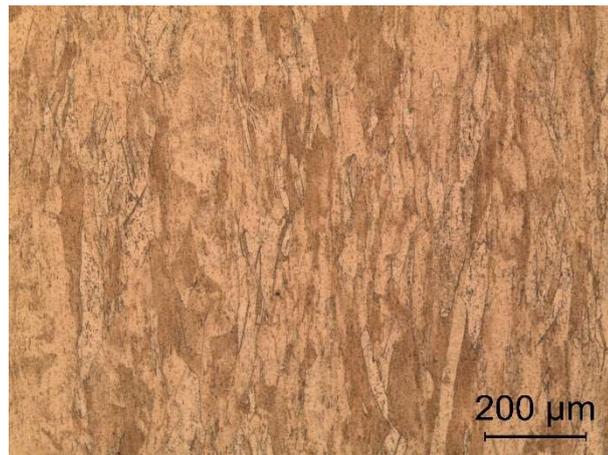


Figura 64. Micrografia do C18150. Aumento de 100 X



Figura 65. Micrografia do C18150. Aumento de 200 X

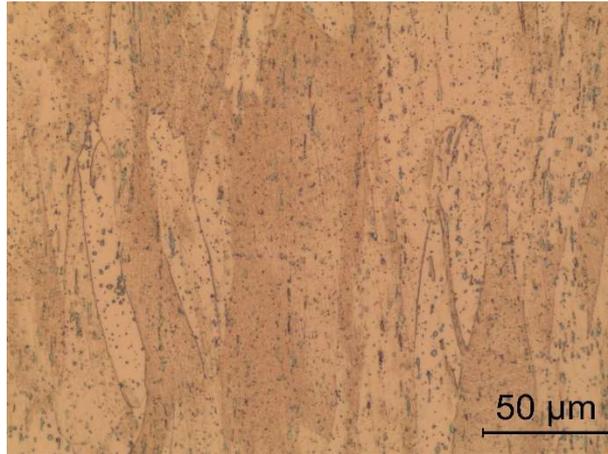


Figura 66. Micrografia do C18150. Aumento de 500 X

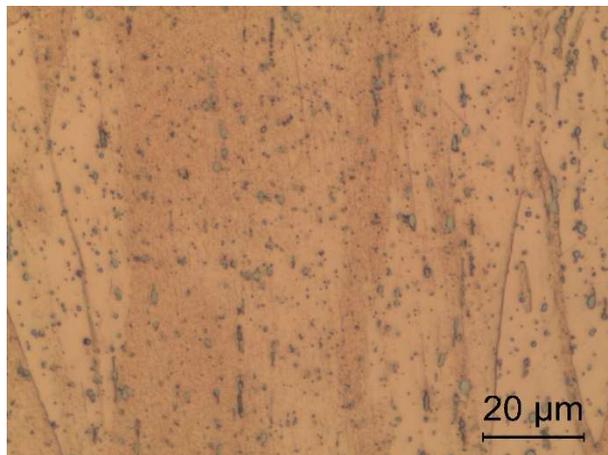


Figura 67. Micrografia do C18150. Aumento de 1000 X

Região da Solda

As figuras nº 68, 69, 70, 71 e 72, referem-se a região da solda, apresentando pequena formação de óxidos; início de difusão dos metais.

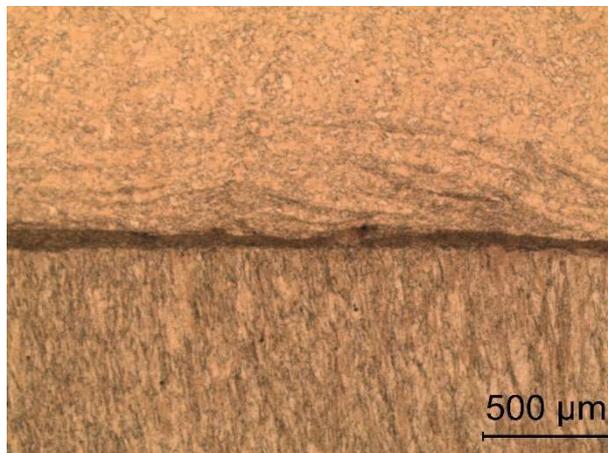


Figura 68. Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 50 X

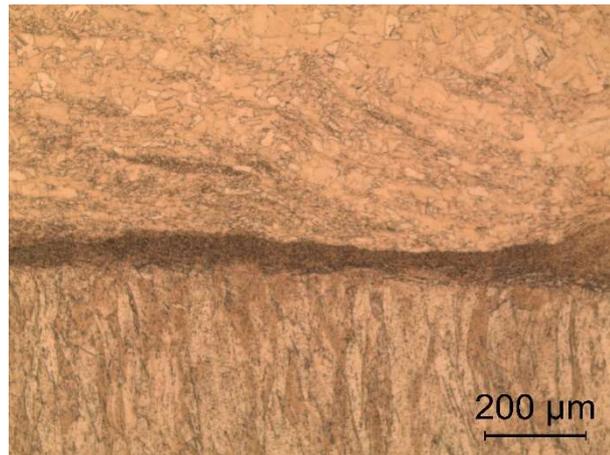


Figura 69. Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo).
Aumento de 100 X

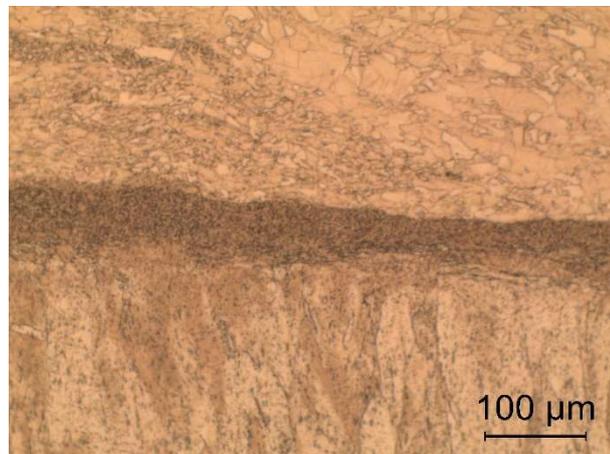


Figura 70. Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo).
Aumento de 200 X

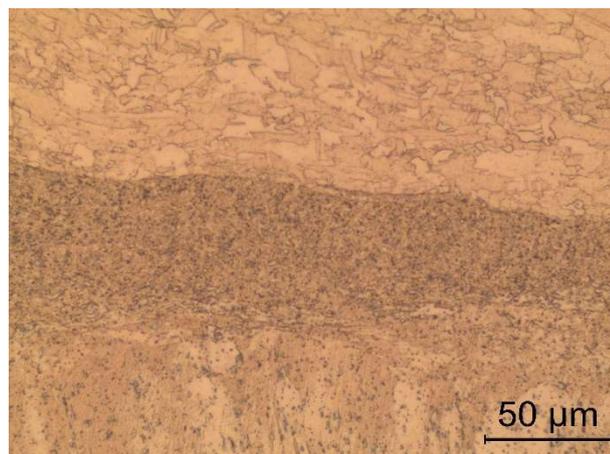


Figura 71. Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo).
Aumento de 500 X

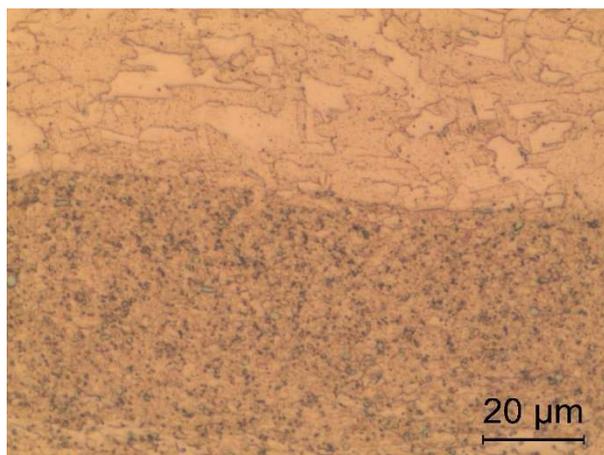


Figura 72. Micrografia da junta soldada C11000 (acima); C18150 (abaixo). Aumento de 1000 X

4.9 Resultados dos ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados na empresa Termomecanica São Paulo S.A. em máquina de tração da marca Instron 100 kN (Serie 4482).

O objetivo da realização dos ensaios de tração foi de verificar se as soldas estariam dentro dos limites de resistência estabelecidos pelos fornecedores dos materiais, atingindo-se um limite mínimo de resistência a tração, embora as aplicações a que este trabalho se destina, não envolvam resistência à tração.

As figuras nº 73 e 74, demonstram a geometria dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração, confeccionados conforme a norma ABNT 6892-1:2013.



Figura 73. Corpos de prova antes do ensaio de tração



Figura 74. Corpos de prova após o ensaio de tração

As figuras nº 75, 76, 77 e 78,, referentes as amostras de nº 34, 46, 47 e 50, respectivamente, apresentam as curvas tensão x deformação a que foram submetidos estes corpos de prova, evidenciando os resultados obtidos no ensaio de tração.

Amostra nº 34

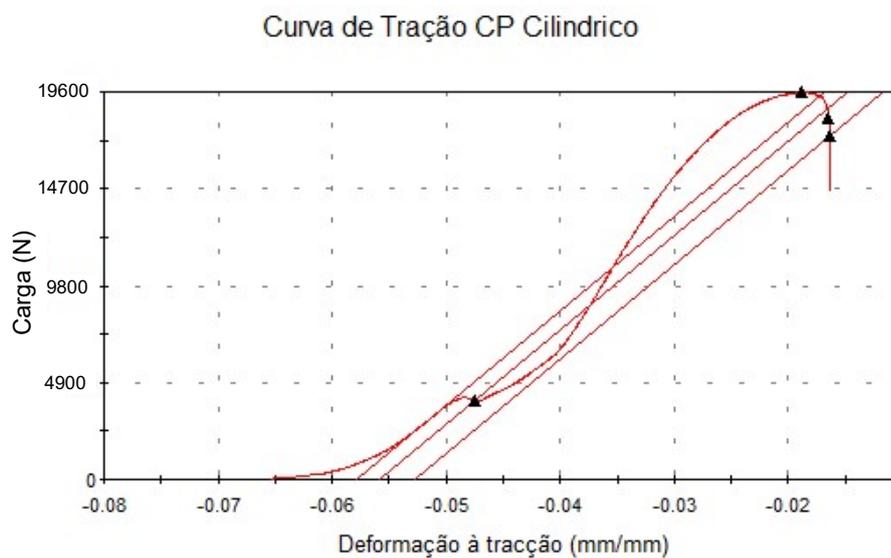


Figura 75. Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 34

Amostra nº 46

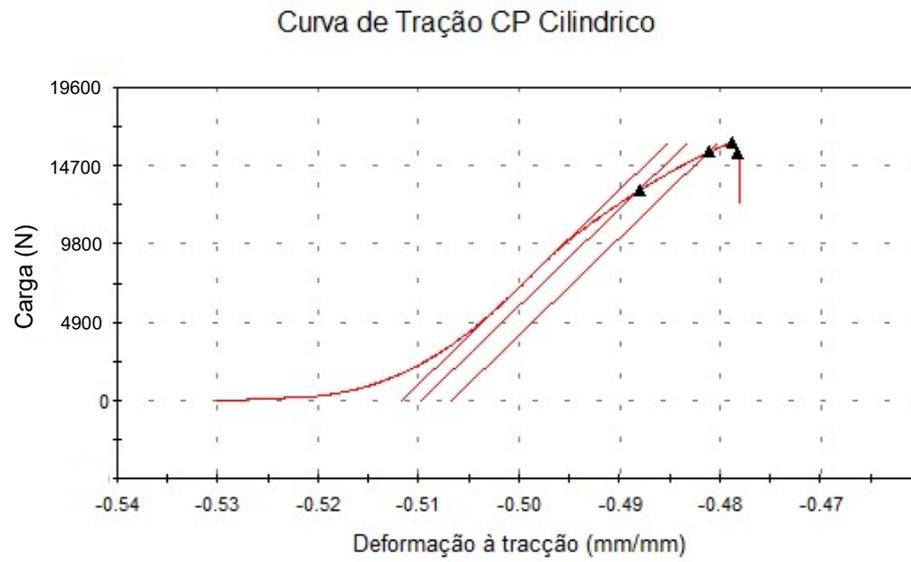


Figura 76. Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 46

Amostra nº 47

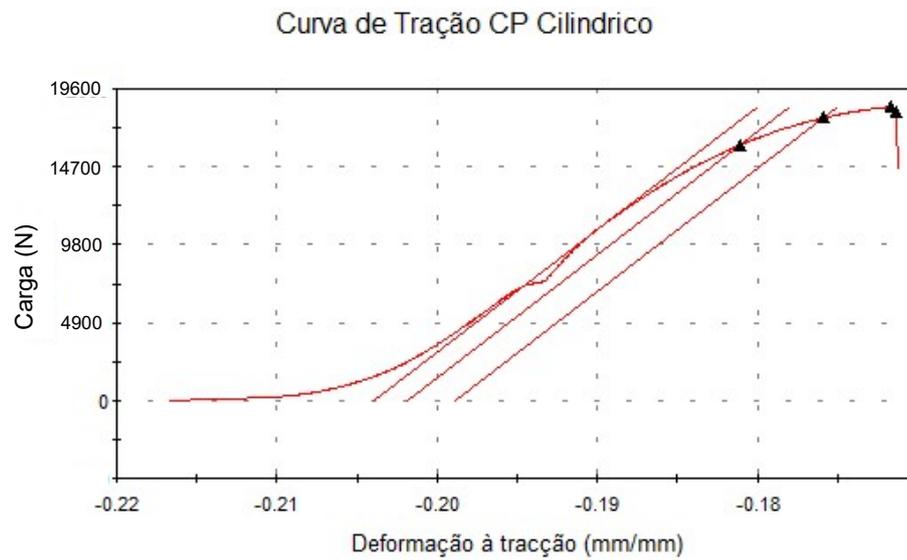
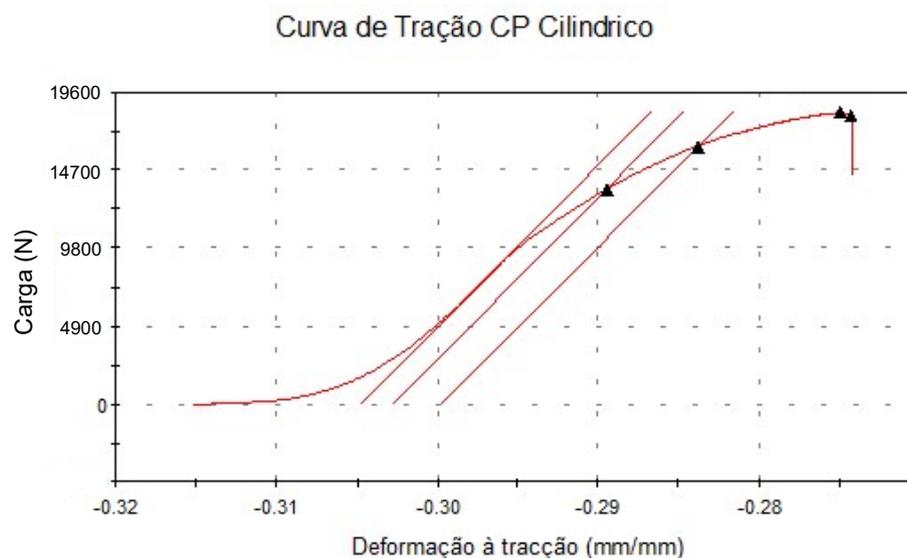


Figura 77. Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 47

Amostra nº 50**Figura 78. Curva carga/deformação do ensaio de tração amostra nº 50**

Na tabela 10, em que foram transformados os valores em kgf por N (Newtons), e na figura 79, são apresentados os valores obtidos nos ensaios de tração a que foram submetidos os corpos de prova de nº 34, 46, 47 e 50 que, após inspeção visual de todas as amostras obtidas com os parâmetros ótimos de soldagem, detectou-se serem as amostras que teriam maior probabilidade de apresentar falhas, e.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento 2% (MPa)	Limite de Escoamento 5% (MPa)	Carga Máxima (N)	Alongamento (%)
34	249	51	221	19586	8
46	205	167	198	16145	4
47	234	204	225	18456	10
50	233	172	206	18356	10
Média	229	141	215	18064	7

Tabela 10. Resultados dos ensaios de tração.

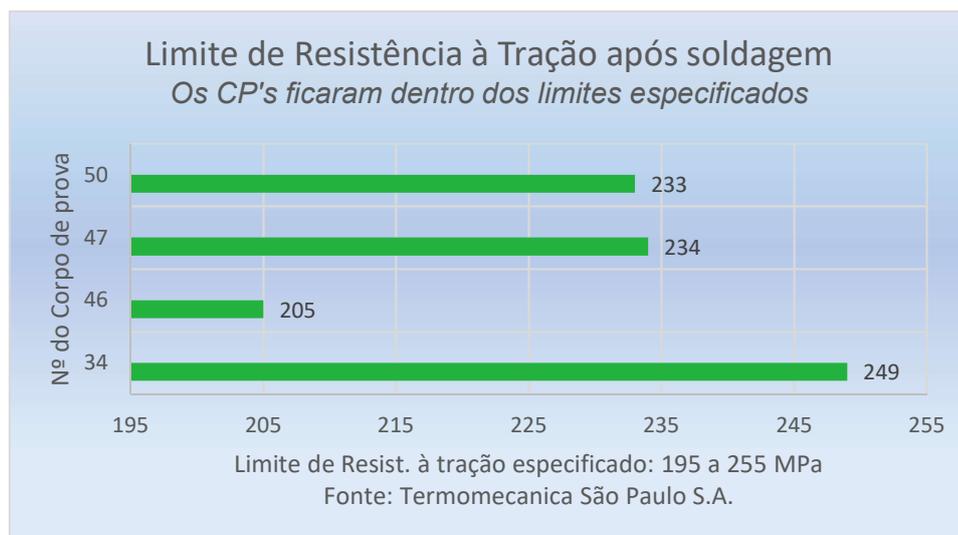


Figura 79. Gráfico dos limites de resistência à tração obtidos após a soldagem, nos corpos de prova de nº 34, 46, 47 e 50

4.10 Resultados dos ensaios de dureza Vickers

Os ensaios de dureza Vickers HV 10 nas duas amostras, de nº 30 e 43, foram realizados em conformidade com a norma ABNT NBR NM 6507-1 na empresa Termomecanica São Paulo S.A. em durômetro universal Wolpert, com carga de 98,07 N, pelo tempo de 20 segundos.

Foram executadas medições nas duas amostras, sendo 5 pontos na região do metal de base e 5 medições na zona termicamente afetada (ZTA) para cada uma das ligas, conforme as tabelas de nº 11 e 12 e figuras 80 e 81.

Amostra 43 - Dureza HV 10			
C18150 Metal de base	C18150 ZTA	C11000 ZTA	C11000 Metal de base
171,8	150,3	57,0	84,3
177,9	152,9	60,4	92,6
172,7	155,0	58,7	93,4
175,6	152,8	59,6	92,4
167,9	148,9	57,2	92,6
MÉDIA			
173,18	151,98	58,58	91,06

Tabela 11. Resultados dos ensaios de dureza Vickers HV – 10. Amostra nº 43.

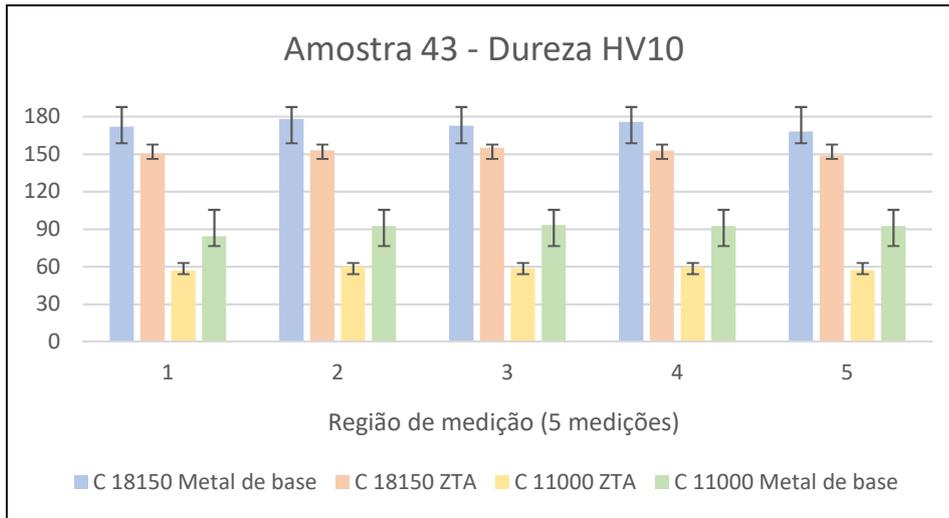


Figura 80. Gráfico da dureza HV 10 Amostra nº 43

Amostra 30 (Cônica) - Dureza HV 10			
CuCrZr Metal de base	CuCrZr ZTA	C11000 ZTA	C11000 Metal de base
172,5	161,7	56,6	91,2
175,2	166,4	57,2	93,1
175,2	168,1	58,6	86,3
178,3	167,5	58,0	90,7
172,0	165,5	57,1	91,1
MÉDIA			
174,64	165,84	57,50	90,48

Tabela 12. Resultados dos ensaios de dureza Vickers HV – 10 Amostra nº 30.

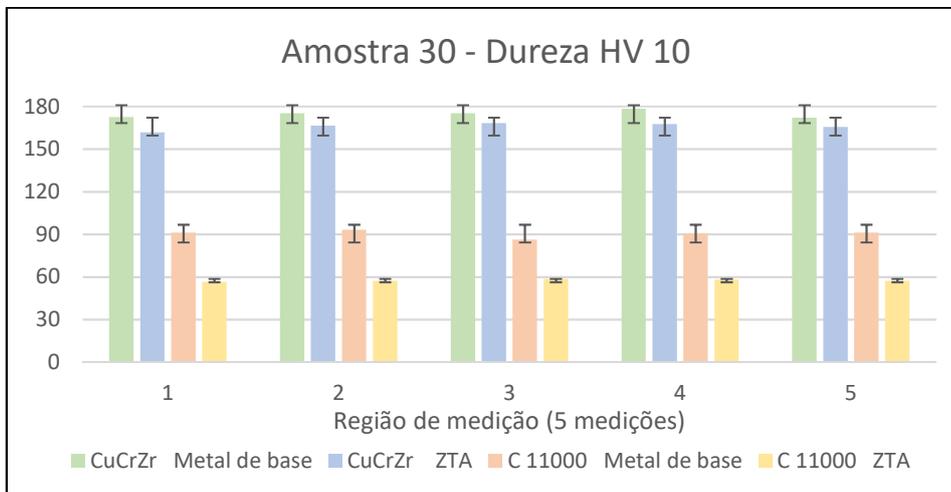


Figura 81. Gráfico da dureza HV – 10 Amostra nº 30

4.11 Resultados dos ensaios de microdureza Vickers

Os ensaios de micro dureza Vickers HV 0,1 nas duas amostras, de nº 30 e 43, foram realizados em conformidade com a norma ABNT NBR NM 6507-1, na empresa Termomecanica São Paulo S.A., em micro durômetro Buehler, com carga de 0,98 N, pelo tempo de 20 segundos.

As medições foram executadas nas duas amostras, começando pela liga C18150, seguindo na direção da liga C11000, perfazendo 9 pontos na região do metal de base de cada uma das ligas e 5 medições na região da solda. Houve diminuição da dureza na região da ZTA nas duas amostras, conforme tabelas 13 e 14 e figuras 82 e 83.

Amostra 43 (junta plana) - Microdureza HV 0,1			
Região da Solda	Medições ao longo da peça, começando pelo CuCrZr		
97,0	149,0	148,0	150,0
98,0	146,0	145,0	147,0
98,0	144,0	144,0	143,0
98,0	98,0	98,0	98,0
97,0	73,0	76,0	75,0
-	80,0	82,0	84,0
-	86,0	91,0	88,0
MÉDIA: 97,60			

Tabela 13. Resultados dos ensaios de microdureza Vickers HV – 0,1. Amostra nº 43 (junta plana).

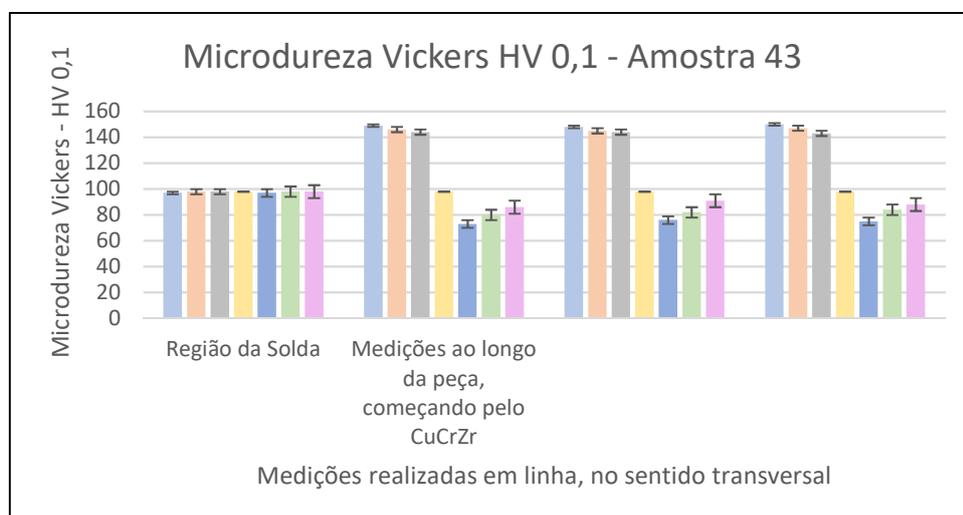


Figura 82. Gráfico da dureza HV – 0,1 Amostra nº 43

Amostra 30 (cônica) - Microdureza HV 0,1			
Região da Solda	Medições ao longo da peça, começando pelo CuCrZr		
119,0	165,0	165,0	162,0
122,0	145,0	144,0	142,0
125,0	138,0	137,0	134,0
129,0	129,0	125,0	122,0
130,0	85,0	81,0	80,0
-	94,0	91,0	90,0
-	98,0	98,0	99,0
MÉDIA: 125,0			

Tabela 14. Resultados dos ensaios de micro dureza Vickers HV – 0,1. Amostra nº 30 (junta cônica).

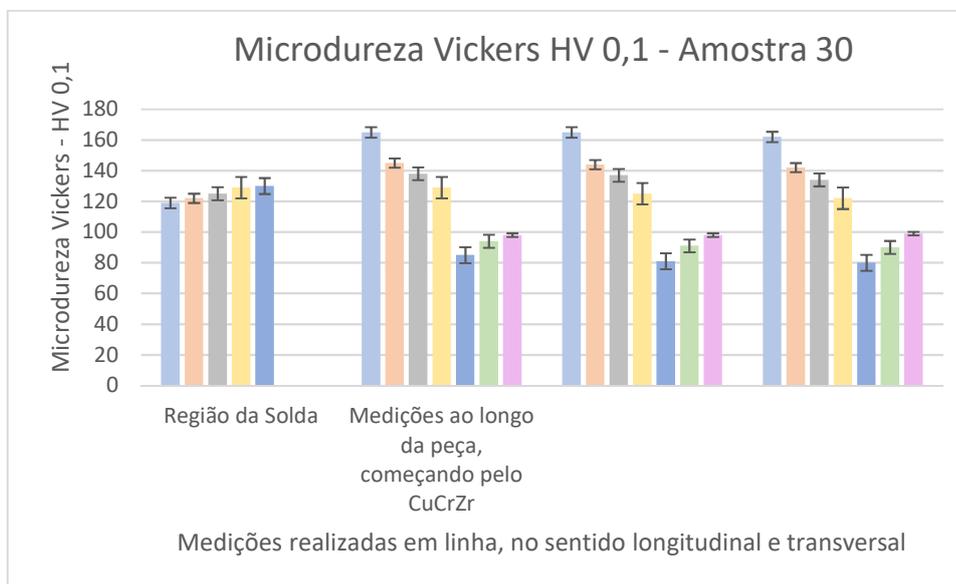


Figura 83. Gráfico da dureza HV – 0,1 Amostra nº 30

4.12 Resultados dos ensaios de gamagrafia

O objetivo da realização do ensaio de radiografia industrial foi de detectar possíveis macro descontinuidades na solda que poderiam resultar em diminuição da área da seção transversal e, conseqüentemente, em aumento da resistência elétrica.

Para o ensaio de gamagrafia, foi utilizada a amostra soldada de nº 49, realizado na empresa EBE Metaltec, sendo realizados ensaios em duas posições (A e B). Não foram detectadas macro descontinuidades na solda, tais como falta de difusão (regiões sem união) e porosidades.

No laudo de inspeção, das duas posições, foi assinalado por engano, junta com chanfro em “V”, sendo que o CP nº 49 foi soldado com junta plana.

As figuras nº 84 e 85 referem-se a gamagrafia e laudo técnico com a avaliação dos resultados.

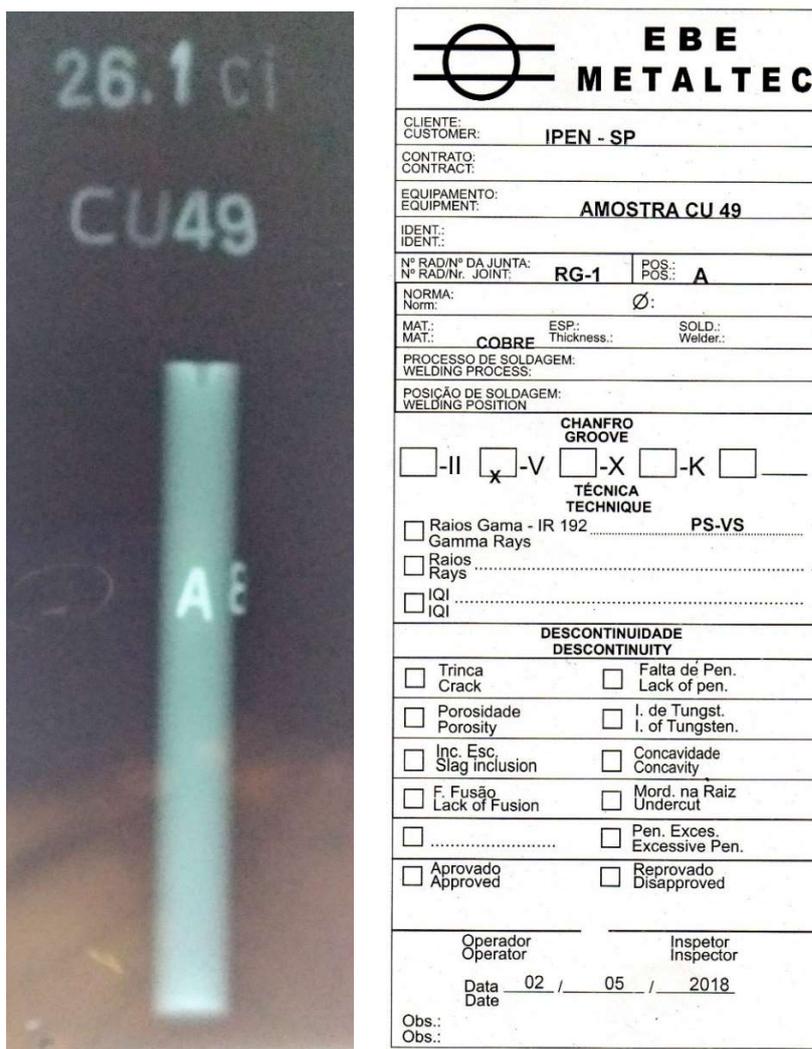
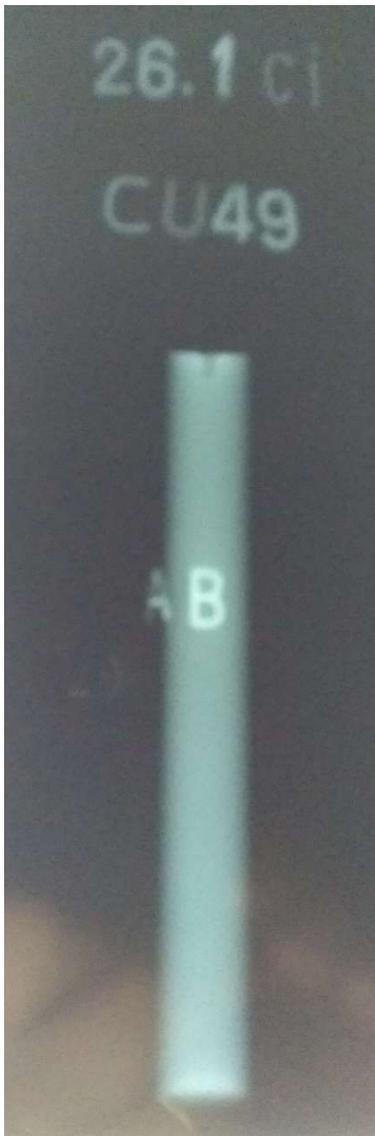


Figura 84. Imagem da gamagrafia da amostra nº 49, na posição “A” (esquerda) e laudo técnico com a avaliação dos resultados (direita).



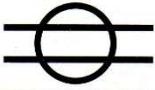
 EBE METALTEC	
CLIENTE: CUSTOMER:	IPEN - SP
CONTRATO: CONTRACT:	
EQUIPAMENTO: EQUIPMENT:	AMOSTRA CU 49
IDENT: IDENT.:	
Nº RAD/Nº DA JUNTA: Nº RAD/Nr. JOINT:	RG-1
POS: POS.:	B
NORMA: Norm.:	Ø:
MAT.: MAT.:	COBRE
ESP.: Thickness.:	
SOLD.: Welder.:	
PROCESSO DE SOLDAGEM: WELDING PROCESS:	
POSIÇÃO DE SOLDAGEM: WELDING POSITION	
CHANFRO GROOVE	
<input type="checkbox"/> -II <input checked="" type="checkbox"/> -V <input type="checkbox"/> -X <input type="checkbox"/> -K <input type="checkbox"/> _____	
TÉCNICA TECHNIQUE	
<input type="checkbox"/> Raios Gama - IR 192 PS-VS Gamma Rays	
<input type="checkbox"/> Raios Rays Rays	
<input type="checkbox"/> IQI IQI	
DESCONTINUIDADE DESCONTINUITY	
<input type="checkbox"/> Trinca Crack	<input type="checkbox"/> Falta de Pen. Lack of pen.
<input type="checkbox"/> Porosidade Porosity	<input type="checkbox"/> I. de Tungst. I. of Tungsten.
<input type="checkbox"/> Inc. Esc. Slag inclusion	<input type="checkbox"/> Concavidade Concavity
<input type="checkbox"/> F. Fusão Lack of Fusion	<input type="checkbox"/> Mord. na Raiz Undercut
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Pen. Exces. Excessive Pen.
<input type="checkbox"/> Aprovado Approved	<input type="checkbox"/> Reprovado Disapproved
Operator Operator	Inspector Inspector
Data <u>02</u> / <u>05</u> / <u>2018</u> Date	
Obs.: Obs.:	

Figura 85. Imagem da gamagrafia da amostra nº 49, na posição “B” (esquerda) e laudo técnico com a avaliação dos resultados (direita).

4.13 Resultados dos ensaios de ultrassom

O objetivo da realização do ensaio de ultrassom foi detectar possíveis macro descontinuidades na solda e nos ensaios foi utilizado o aparelho da marca GE Krautkramer USM 36, utilizando um transdutor de 45° - 4 MHz, em conformidade com a norma ABNT NBR 16616:2017.

A figura nº 86 refere-se ao eco de fundo do diâmetro da amostra, utilizado como parâmetro para a detecção de macro descontinuidades nas amostras e a figura 87, ao pico encontrado ao percorrer a região da solda.

O teste de ultrassom foi realizado nas amostras de nº 31, 33, 36, 37, 38, 40, 49, 51, 53 e 54, onde não foram encontradas macro descontinuidades.



Figura 86. Amplitude do eco de fundo do diâmetro da amostra



Figura 87. Amplitude do eco de fundo do diâmetro da amostra

4.14 Resultados dos ensaios de radiografia industrial

O objetivo da realização do ensaio de radiografia industrial foi de detectar possíveis macro descontinuidades na solda que poderiam resultar em diminuição da área da seção transversal e, conseqüentemente, em aumento da resistência elétrica.

Foi utilizado um equipamento gerador VMI Pulsar Plus 800, gerador de raios X diagnóstico de alta frequência operando de 40 kV a 150 kV com correntes de 50 mA a 800 mA em tempos de irradiação de até 6 segundos.

As imagens das figuras nº 88 e 89 evidenciam que, utilizando técnica convencional na posição perpendicular e inclinada em relação a superfície na amostra de nº 54, em duas posições “A” e “B” (frontal) e “C”, “D” e “E” (inclinada).

Não foram detectadas macro descontinuidades na amostra, de acordo com o método de ensaio utilizado.

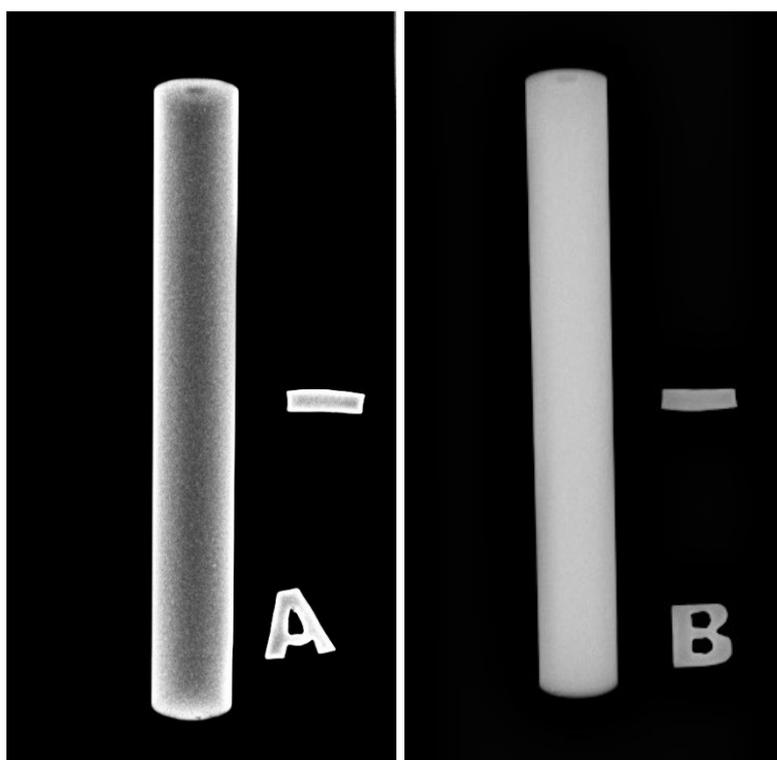


Figura 88. Radiografia da amostra nº 54 posição “A” e “B”

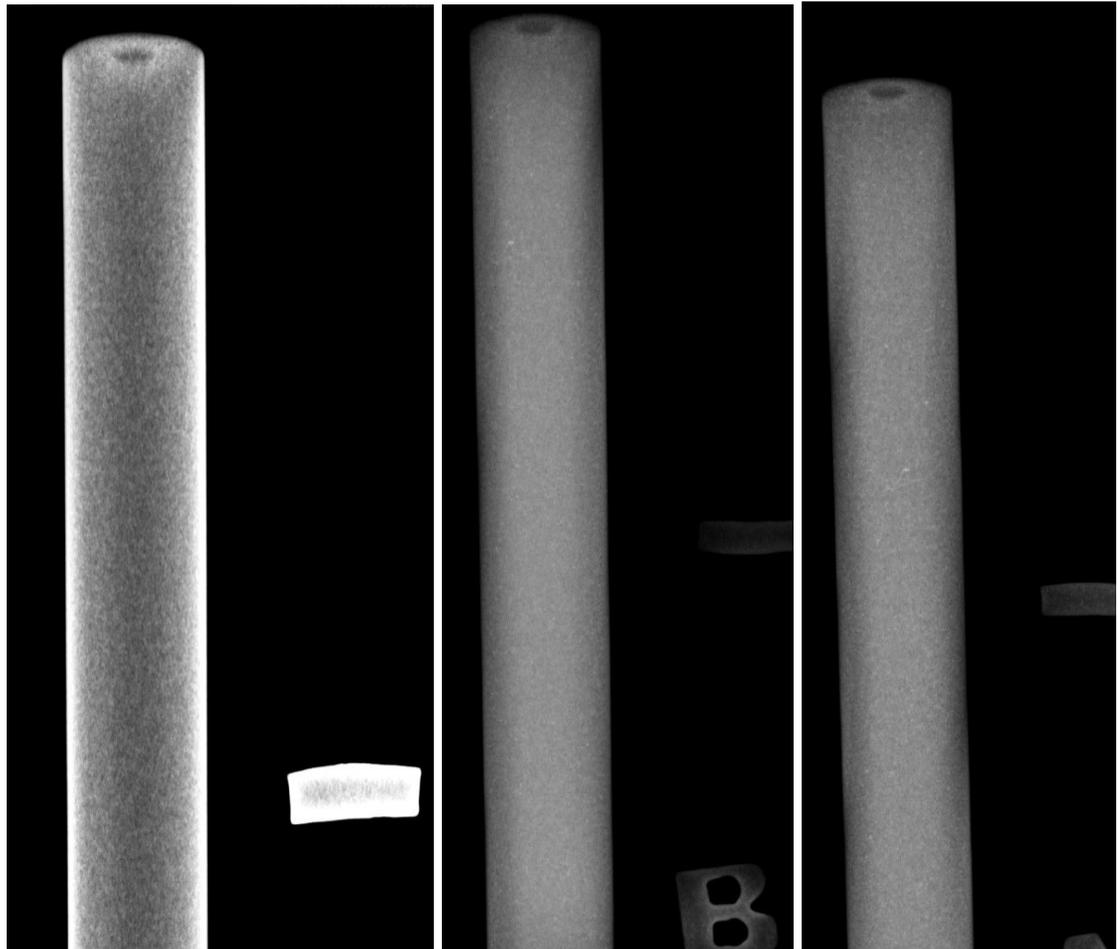


Figura 89. Radiografia da amostra nº 54 posição “C”, “D” e “E” (posição inclinada).

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados e discussão

Os resultados obtidos na soldagem por atrito coaxial entre as ligas C11000 (cobre eletrolítico) e C18150 (CuCrZr) mostram-se satisfatórios no que se refere à resistência mecânica da junta soldada, pois os valores obtidos mediante aos ensaios de tração, ficaram dentro dos limites que os fabricantes, Termomecanica São Paulo S.A. e AMPCO Metal S.A., garantem em relação aos seus produtos.

As cargas máximas atingidas no ensaio ficaram entre 16.145 e 19.586 N, com média de 18.064 N. Também, os valores de resistência à tração ficaram dentro dos limites estabelecidos, entre 195 e 255 MPa, tendo a média de 229 MPa.

O rompimento das amostras submetidas ao ensaio de tração ocorreu muito próximo da zona de ligação entre os metais, porém não ocorreram na solda. O rompimento ocorreu em todos os CP's na parte da liga C11000, isto se explica pelo fato de que, dentre as duas ligas, é a que tem menor resistência mecânica.

Este fato demonstra que o processo de soldagem por atrito coaxial demonstrou ser eficiente na junção de materiais dissimilares: liga C11000 e C18150.

A perda por conformação devido ao processo de soldagem foi observada somente na liga C11000, pois na liga C18150 não houve deformação. Sendo que a taxa de perda de material por deformação média na liga C11000 ficou em torno de 8%.

As micrografias mostraram que a união entre a liga C11000 e C18150 ocorreu sem apresentar descontinuidades, como por exemplo: falta de difusão entre os metais na junta soldada, tampouco porosidades ou inclusões que poderiam fragilizar as soldas.

Ainda, no que tange ao tratamento térmico de envelhecimento da liga C18150, pôde-se constatar que não houve alteração da microestrutura em função do aquecimento durante a soldagem ao longo do comprimento analisado, apresentando estrutura bruta de fusão em toda a extensão da amostra, sem variação ao se aproximar da região soldada, preservando o tratamento térmico da fabricação.

A liga C11000, apresentou estrutura homogênea com linhas de deslizamento. Na ZTA houve crescimento no tamanho dos grãos por conta do processo de soldagem, passando de 0,025 mm para 0,035 mm a 0,045 mm. Isto se deve ao aquecimento necessário, provocado pelo atrito, para se chegar a temperatura de trabalho a quente para promover a difusão entre os metais envolvidos sob pressão de recalque, provocando um “recozimento” do material na ZTA.

No ensaio de dureza Vickers, notou-se que a partir da região do metal base, em ambas as ligas ocorreu um decréscimo na dureza ao se aproximar da ZTA.

Este decréscimo se manteve menor na liga C18150, em torno de 20 pontos na amostra de nº 43 e de 10 pontos na amostra de nº 30. Na liga C11000, o decréscimo foi maior e igual nas duas amostras, em torno de 32 pontos.

No ensaio de micro dureza Vickers também evidenciou um decréscimo na dureza ao se aproximar da ZTA. Na amostra de nº 43 (junta plana) a micro dureza na liga C18150 teve um decréscimo de 5 pontos na média e na liga C11000, houve decréscimo de 13 pontos, na média. Na amostra de nº 30 (junta cônica), o decréscimo na dureza na liga C18150 foi mais acentuado, em torno de 28 pontos na média e na liga C11000 foi de 16 pontos na média.

No ensaio de gamagrafia realizados na amostra de nº 49, em duas posições, as imagens mostram que não foram encontradas macro descontinuidades na solda, tais como falta de difusão e porosidades que poderiam diminuir a área da sessão transversal da solda, resultando em um aumento da resistência elétrica e o laudo técnico emitido pela empresa, confirma estas informações.

No ensaio de radiografia realizados na amostra de nº 54, em cinco posições, sendo duas na posição perpendicular e três na posição oblíqua à superfície, as imagens mostram que não houve macro descontinuidades que poderiam ocasionar a diminuição da área da sessão transversal da solda, resultando em um aumento da resistência elétrica na solda.

Os ensaios de ultrassom foram realizados nas amostras 31, 33, 36, 37, 38, 40, 49, 51, 53 e 54. Adotou-se o procedimento de tomar como referência o eco de fundo

de cada amostra e percorrer a região soldada em várias posições para detectar possíveis macro descontinuidades que poderiam ocasionar a diminuição da área da seção transversal da solda, resultando em um aumento da resistência elétrica na solda, em que não foram encontradas macro descontinuidades em nenhuma amostra.

Nos testes de resistência elétrica foram levantados todos os dados de cada uma das partes a serem soldadas, ou seja, diâmetro externo, resistividade do material, comprimento inicial, comprimento final e área da seção transversal e foram realizados em duas etapas, a primeira etapa consistiu em medir a resistência elétrica de cada uma das 27 amostras (5 com juntas cônicas e 22 com junta plana) após serem soldadas; na segunda etapa, foi realizada a medição da resistência elétrica pós usinagem de 11 amostras, que foram selecionadas por terem sido soldadas com os mesmos parâmetros.

Os resultados obtidos na medição da resistência elétrica pós soldagem (27 amostras) ficaram abaixo dos valores calculados, sendo que a diferença ficou em torno de 8,4%, em média, menor que os valores calculados para cada amostra.

Os resultados obtidos na medição da resistência elétrica pós usinagem (11 amostras) também ficaram abaixo dos valores calculados, sendo que a diferença ficou em torno de 6,1%, em média, menor que os valores calculados para cada amostra.

O fato de que as amostras pós usinagem tiveram menor diferença entre a resistência medida em relação a resistência calculada, se deve ao fato de que a região da ZTA na liga C11000, a qual se deformou por conformação, ficou com configuração cônica nas duas amostras, sendo mais extensa perto da região periférica do corpo de prova e menor quando se aproxima do centro da peça, devido ao aquecimento provocado pelo atrito ser maior na região periférica do corpo de prova e menor à medida que se aproxima do núcleo, conforme demonstrado nas figuras de nº 42 e 43, o que nos permite concluir que, ao se retirar material no diâmetro das amostras, houve diminuição de área na ZTA.

Além dos resultados das medições de resistência elétrica ficarem abaixo dos valores calculado, as micrografias revelam, na liga C11000, um aumento no tamanho de grão ao se aproximar da ZTA, passando de 0,025 mm para 0,035 mm a 0,045 mm, o que configura um recozimento na região da ZTA e com isso, um aumento da condutividade elétrica.

Ainda, nos ensaios de dureza e de micro dureza que foram realizados, a região da ZTA apresentou uma diminuição da dureza devido ao recozimento ocorrido na região da ZTA das amostras.

O padrão de condutividade elétrica pela I.A.C.S. - *International Annealed Copper Standard* é o cobre eletrolítico recozido e o aumento do tamanho de grão, juntamente com a diminuição da dureza, melhoraram a condutividade elétrica.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

6.1 Conclusão

Em face do disposto anteriormente, comprovado pelos ensaios realizados de resistência mecânica, dureza e micro dureza *Vickers*, gamagrafia, ultrassom, raios “X” e resistência elétrica, conclui-se que o processo de soldagem por atrito rotativo coaxial utilizado, atendeu o objetivo proposto para a soldagem do cobre eletrolítico com o CuCrZr, utilizando parâmetros ótimos que garantiram a condutividade elétrica e resistência mecânica para atender às necessidades da indústria.

Também, o ensaio não destrutivo de resistência elétrica se mostrou uma alternativa eficiente e interessante para a verificação da qualidade nas juntas soldadas, pois é extremamente fácil de ser realizado, não requer treinamento sofisticado e o custo do aparelho é muito menor, se comparado a outros instrumentos e equipamentos para ensaios não destrutivos.

6.2 Contribuições e Limitações

Tendo em vista a dificuldade em encontrar literatura a respeito da soldagem por atrito rotativo coaxial referente aos materiais envolvidos na presente pesquisa, ou seja, a liga C11000 e a liga C18150, espera-se que os dados fornecidos possam embasar e fornecer informações úteis para trabalhos futuros relacionados ao processo de soldagem por atrito coaxial de materiais dissimilares.

A principal contribuição deste trabalho foi a definição dos parâmetros para realizar a soldagem por atrito coaxial dos corpos de prova das ligas C11000 e C18150, garantindo a condutividade elétrica e resistência mecânica e permitindo a possibilidade de aprimoramento dos projetos de condutores elétricos que empregam tais materiais.

Foram identificadas algumas limitações referentes ao desempenho do aparato utilizado, no que se refere à aquisição de temperatura por meio de termômetro infravermelho, pois devido ao fato de que as superfícies a medir a temperatura possuem brilho, o equipamento disponível não atendeu as necessidades. Também não foi possível a medição da temperatura de trabalho a quente por meio de termopares do tipo “K”, pois estes não tinham sensibilidade suficiente em relação ao tempo necessário para realizar as soldagens, sendo foco de trabalhos futuros para o aprimoramento do aparato visando fornecer dados sobre a temperatura. Ainda, a compensação da potência necessária para realizar o processo de soldagem foi suprida com a diminuição da rotação (relação de transmissão) empregada nos ensaios.

6.3 Publicações

Este trabalho foi inicialmente exposto oralmente na fase de projeto, no 1º Congresso MEC 3F – 1º Congresso de Engenharia Mecânica das 3 Fronteiras, ocorrido no período de 16 a 21 de maio de 2016, na cidade de Foz do Iguaçu.

Em 2017, foi apresentado oralmente na qualidade de pesquisa e desenvolvimento no 2º MEC3F 2017 - Congresso de Engenharia e Ciências Aplicadas nas Três Fronteiras, na cidade de Foz do Iguaçu, evento este, ocorrido em 22 e 23 de novembro de 2017, que reuniu algumas universidades da Argentina, do Brasil e Paraguai.

6.4 Trabalhos Futuros

Os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

- Desenvolvimento de soldagem por atrito rotativo de outras ligas de cobre similares;
- Desenvolvimento de soldagem por atrito rotativo de outras ligas de cobre dissimilares;
- Desenvolvimento de soldagem por atrito rotativo de outras ligas envolvendo o cobre, com outros materiais metálicos;
- Estudo da temperatura de conformação mecânica para a consecução de juntas soldadas pelo processo de soldagem por atrito rotativo coaxial;
- Estudo do processo de soldagem por atrito inercial em ligas de cobre.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 6892-1:2013 - Materiais metálicos - Ensaio de Tração, 2015.

ABNT NBR 16616:2017 – Ensaio não destrutivo – Ultrassom convencional – Qualificação de procedimento, 2017.

ABNT NBR 6810:2010 - Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos, 2010.

ABNT NBR 6814:1986 Versão Corrigida:2001 - Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica, 1986.

ABNT NBR 6815:2010 Fios e cabos elétricos - Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos.

ABNT NBR 7300:2010 - Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistividade volumétrica, 2010.

ABNT NBR 11301:1990 – Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100 %), 1990.

ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio, 2008.

ABNT NBR NM ISO 6507-4:2008 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 4: Tabela de valores de dureza, 2008.

ABNT NBR 13284:1995 - Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica

ABNT NBR 15739:2016 - Ensaio não destrutivo - Radiografia em juntas soldadas - Detecção de descontinuidades, 2016.

ABNT NBR 16462:2016 Barras e perfis de cobre para aplicações elétricas - Características físicas, químicas, elétricas e dimensionais - Especificação. 2016.

ABNT NBR NM-IEC60811-1-1:2001 - Capítulo 1: medição de espessuras e dimensões externas - Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas.

ALVES, E. P. Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa. Dissertação de mestrado – São José dos Campos: INPE, 2010.

American Friction Welding, Inc. Disponível em: <<https://www.teamafw.com/friction-welding-process/>>. Acesso em: 12 maio 2017.

AMPCO METAL S.A. Disponível em: <<https://www.ampcometal.com/pt-br/productos/ampcoloy-ligas-de-alta-condutividade/ampcoloy-972/>>. Acesso em: 03 mar 2017.

ANSI – American National Standards Institute / ASM – American Society of Metals. Recommended Practices for Friction Welding. ANSI/AWS C 6.1-89 (R 2009).

ASM – American Society of Metals, Metals Handbook Welding Bracing and Soldering v.6, Metals Park Ohio, USA: Fundamentals of Friction Welding, 1993.

A.W.S. American Welding Society, Welding Handbook v.2, CHAPTER 23, FRICTION WELDING – JULY 1997.

A.W.S. American Welding Society, Welding Handbook v.3, 8ª ed. Welding Copper and Copper Alloys – 1997.

BATRA, I. S. et al. Microstructure and Properties of a Cu-Cr-Zr alloys. Elsevier Journal of Nuclear Materials. 2001 Vol 299, p 91-100.

CALLISTER JR., W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC Editora – 2016.

CIMM, Grupo. Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br>> Acesso em: 09 mai. 2017

Copper Development Association. Joining of Copper and Copper Alloys. CDA Publication No 98, september 1994.

Copper Development Association. Cost-Effective Manufacturing: Joining of Copper and Copper Alloys. CDA Publication No 98, september 1994.

Copper Development Association Inc. Disponível em: <<https://alloys.copper.org/alloy/C18150>>. Acesso em: 23 abr. 2017

Copper Development Association Inc. Disponível em: <https://www.copper.org/resources/properties/MICROSTRUCTURE/CHROM_CU.HTML>. Acesso em 07 NOV. 2017.

Divagar, S. R. Joining the Different Materials Using Friction Welding - A Review. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2015 Vol. 4, No. 1, p 117 – 122.

FURLANETO, T. Estudo dos Parâmetros de Soldagem por Atrito Rotativo Coaxial entre Pinos Similares de Latão Binário Fio Máquina 65/35, Dissertação de Mestrado

(Eng. Mecânica), Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – 2017.

FUXIANG, H. et al. Analysis of Phases in a Cu–Cr–Zr Alloy. *Scripta Materialia*, 2003. N° 48 p 97–102.

KANASHIRO, L.R. Desenvolvimento e Instrumentação de Equipamento e Estudo dos Parâmetros da Soldagem por Atrito Rotativo na União Similar AA6351-T6, Dissertação de Mestrado (Eng. Mecânica), Departamento de Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – 2017.

MACHADO, I.G. Soldagem & técnicas conexas: processos. Porto Alegre – 1996.

MAALEKIAN M. Friction welding – critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007. Vol 12 N° 8 p 738 – 759.

MANUFACTURING TECHNOLOGY, INC. - <http://www.mtiwelding.com> - Acesso em 11 abr. 2017

MARQUES, P.V. et al. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Ed. UFMG 2009. 3ª ed. 363 p.

MATTEI, F. Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção, Dissertação de Mestrado, UFRGS – 2011.

MAYO D., MARIANO A., MAFFÍA E. G. Effect of Solution Treatment in CuCrZr Alloy Structure. *AASCIT Journal of Materials*. 2017; Vol. 3 N°3 p 14-18.

MODENESI, P.J., MARQUES, P.V., 2006 “Soldagem I – Introdução aos Processos de Soldagem.” – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006.

NEUMANN, J.P., ZHONG, T., CHANG, Y.A., The Cu-O (Copper-Oxygen) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1984. Vol. 5 N°. 2 p 136 – 140.

PENG L. et al. Analytical Description of Heat Generation and Temperature Field During the Initial Stage of Rotary Friction Welding. *Journal of Manufacturing Processes* – 2017 N° 25 p 181–184.

RATKOVIĆ N. R., et al. Influence of Friction Welding Parameters on Properties of the Al-Cu Joint. *FME Transactions*, 2017. N° 45, p 165-171.

RATKOVIĆ N. R., et al. Quality Analysis of Al-Cu Joint Realized by Friction Welding. *Technical Gazette*, 2009. Vol n°16, N° 3, p 1-7.

SAHIN, M. Joining of Aluminium and Copper Materials with Friction Welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010. N° 49 P 527–534.

SANTOS, G.A. Tecnologia dos Materiais Metálicos. Editora Érica – São Paulo – 2015.

SATHIYA, P. et al. Optimization for friction welding parameters with multiple performance characteristics. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* 2006. Vol 3, N° 4 p 309 - 318.

SILVA G.C. et al. Parâmetros de soldagem e propriedades mecânicas de ligas similares e dissimilares unidas por solda a fricção. CONEM 2016.

SINGLA, Y.K., CHHIBBER, R., DUTTA, B.K. Influence of Friction Welding Parameters on the Tensile Strength of Bimetallic Weld Joints. MMU Journal of Management & Technology – 2016. P 41-49. TORSAKUL, S., KONGSIB, J., BREZNING, A. N. The Influence of Annealing on Material Properties of Rotary-Friction Welded Steel-Parts. IEEM International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2015. p 170 – 174.

TERMOMECANICA SÃO PAULO S.A. Disponível em: <https://www.termomecanica.com.br/download/conteudo_tecnico/Cobre%20Eletr%C3%ADtico.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2017.

THOMPSON FRICTION WELDING. Disponível em: <<http://www.thompson-friction-welding.com/>>. Acesso em 23 mai. 2017.

TURRETA, I. Análise do desgaste de eletrodos de solda por resistência a ponto em função do número de pontos soldados em chapas galvanizadas, POLI – USP, 2016.

UDAY, M. B. et al. Advances in friction welding process: a review. Science and Technology of Welding and Joining - 2010. Vol 15 N° 7, p 534-558.

UZKUT, M. et al *Friction Welding And Its Applications In Today's World*. In: 2nd International Symposium on Sustainable Development, June 8-9 2010, Sarajevo

WAINER, E. et al. Soldagem: processos e metalurgia. Editora Edgard Blucher – 2011.

YILBAS, B.S., Friction welding of St-Al and Al-Cu materials. Elsevier Journal of Materials Processing Technology – 1994. Vol. 49, p 431-443