



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

JOÃO PEDRO TELES ARAÚJO

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE TRINCAS POR SOLIDIFICAÇÃO EM LIGAS
CUPRONÍQUEL SUBMETIDAS AO ENSAIO TRANS-VARESTRAINT**

FORTALEZA

2024

JOÃO PEDRO TELES ARAÚJO

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE TRINCAS POR SOLIDIFICAÇÃO EM LIGAS
CUPRONÍQUEL SUBMETIDAS AO ENSAIO TRANS-VARESTRAINT

Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A689 Araújo, João Pedro Teles.
Análise da formação de trincas por solidificação em ligas cuproníquel submetidas ao ensaio trans-
varestraint / João Pedro Teles Araújo. – 2024.
60 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta.
1. Ensaio trans-varestraint. 2. Trincas a quente por solidificação. 3. Soldagem TIG autógeno. I. Título.
CDD 669
-

JOÃO PEDRO TELES ARAÚJO

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE TRINCAS POR SOLIDIFICAÇÃO EM LIGAS
CUPRONÍQUEL SUBMETIDAS AO ENSAIO TRANS-VARESTRAINT

Trabalho de conclusão de curso em Engenharia
Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovado em: 24/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Émerson Mendonça Miná

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.e Adroaldo José Silva de Moura Filho

Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

A Deus.

Aos meus pais, Michelle Teles e Ocelio
Valente.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Em primeiro lugar, agradeço imensamente aos meus pais e meus avós, cujo apoio incondicional, amor e paciência foram fundamentais durante todo o percurso acadêmico. Seu encorajamento constante e compreensão foram essenciais para enfrentar os desafios e manter o foco. Meu irmão, Noah, também desempenhou um papel crucial com sua presença constante e incentivo, pelo que sou profundamente grato.

Agradeço sinceramente ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta, cuja orientação experiente e comprometimento foram cruciais para a realização deste trabalho. Sua dedicação e suporte foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento deste projeto, do mesmo modo aos meus amigos Adroaldo e Izaac, cuja assistências foram essências na conclusão do projeto. À minha namorada, Gabriele Bernardo, expressei minha imensa gratidão pelo apoio emocional, pela compreensão e pelo incentivo contínuo, que foram fundamentais para manter minha motivação e equilíbrio durante esta jornada.

Agradeço também ao meu amigo próximo, João Victor, cuja amizade leal e conselhos sempre enriqueceram minha perspectiva e ajudaram a superar momentos desafiadores. Reconheço o valioso suporte do Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem, que me forneceu os recursos e o ambiente necessários para realizar os ensaios cruciais para este TCC.

Agradeço o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP (PRH 31.1), suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

Finalmente, acima de tudo, sou grato a Deus pela força, inspiração e perseverança que me permitiram enfrentar os desafios e concluir este trabalho. Cada um de vocês teve um papel vital na realização deste projeto e serei eternamente grato por todo o apoio e contribuição.

"O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional" (MODENESI, 2012, p. 2).

RESUMO

Um dos problemas observados na indústria do petróleo e gás diz respeito a falha de tubulações de CuNi utilizadas na construção de sistemas de incêndio. Por isso, esta pesquisa foca-se em uma liga de CuNi com amplo uso e que tem ganhado destaque no setor petrolífero devido a suas distintas propriedades mecânicas e suas possíveis utilizações. Duas ligas foram estudadas neste projeto: a primeira é a UNS C70600, composta por cerca de 90% de cobre e 10% níquel e a segunda, é composta por aproximadamente 70% de cobre e 30% níquel, ambas ligas bastante utilizadas em sistema de tubulações para combate a incêndio, trocadores de calor e operação em água salgada, entre outras funções. O estudo foi direcionado para apresentar e comparar os dados de geração de trinca a quente por solidificação quando ambas as ligas sofrem a aplicação de diferentes níveis de deformação. Na pesquisa, foram aplicadas deformações de 2% e 8% e duas energias distintas por meio do ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint e o processo de soldagem TIG autógeno, respectivamente. O ensaio proporcionou dados importantes para análises, como o maior comprimento de trinca (MCL) e o comprimento total de trinca (TCL). Com os resultados foi possível observar valores próximos quando analisado o MCL durante a deformação de 2%, mas um valor bastante distinto, cerca de 310% superior, quando utilizado a deformação de 8%, em relação ao TCL, observou-se nas ligas estudadas que ambas apresentaram menos de 1 mm de diferença em relação ao comprimento de trincas observados, tanto na deformação de 2% quanto na deformação de 8%.

Palavras-chave: trans-varestraint; trinca; solidificação; cuproníquel.

ABSTRACT

One of the problems observed in the oil and gas industry concerns the failure of CuNi pipes used in the construction of fire systems. Therefore, this research focuses on a CuNi alloy with wide use and that has gained prominence in the petroleum sector due to its distinct mechanical properties and its possible uses. Two alloys were studied in this project: the first is UNS C70600, composed of about 90% copper and 10% nickel and the second is composed of approximately 70% copper and 30% nickel, both alloys widely used in piping systems for fire fighting, heat exchangers and operation in salt water, among other functions. The study was aimed at presenting and comparing the data of hot crack generation by solidification when both alloys undergo the application of different levels of deformation. In the research, deformations of 2% and 8% and two different energies were applied through the Trans-Varestraint weldability test and the autogenous TIG welding process, respectively. The test provided important data for analysis, such as the longest crack length (MCL) and the total crack length (TCL). With the results, it was possible to observe similar values when analyzing the MCL during the 2% deformation, but a very different value, about 310% higher, when using the 8% deformation in relation to the TCL, it was observed in the alloys studied that both presented less than 1 mm difference in relation to the observed crack length, both in the deformation of 2% and in the deformation of 8%.

Keywords: trans-varestraint; cracking; solidification; copper-nickel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases do sistema isomorfo cuproníquel.....	22
Figura 2 – Comportamento do aumento de dureza com a adição de Mn da liga CuNi contendo 20% de Ni com diferentes teores de manganês.	25
Figura 3 – Condutividade térmica de ligas de CuNi a 20°C em função do teor de níquel.....	27
Figura 4 – Coeficiente médio de expansão linear de ligas de CuNi em função de teor de níquel.....	27
Figura 5 – Resistividade elétrica e coeficiente de temperatura da resistência elétrica de ligas de CuNi em função do teor de níquel.	28
Figura 6 – Repartição térmica. A - ZF, B - ZTA e C - MB.....	31
Figura 7 – Circuito de soldagem TIG	32
Figura 8 – Trinca a quente em metal de base CuNi 70/30	34
Figura 9 – Exemplo de circuito de soldabilidade Trans-Varestraint	36
Figura 10 – Bancada de ensaio Trans-Varestraint: 1 – Sistema de aquisição de dados; 2 – Fonte de soldagem multiprocesso; 3 – Tartilope e tocha de soldagem TIG; 4 – Máquina de ensaio Trans-Varestraint.	39
Figura 11 – Máquina de ensaio Trans-Varestraint: 1 – Sistema de fixação da peça e posicionamento da tocha; 2 – Cilindro hidráulico; 3 – Sistema acumulador de pressão; 4 – Unidade e tanque hidráulico; 5 – Motor-bomba; 6 – Quadro de comando e controle; 7 – Sistema de resfriamento do óleo.....	40
Figura 12 – Fluxograma de atividades executadas no estudo.....	41
Figura 13 – Desenho técnico do canal usinado.....	42
Figura 14 – Exemplificação de uma amostra posicionada para realização do ensaio Trans-Varestraint.	44
Figura 15 – Medições realizadas na amostra D2A1.....	57
Figura 16 – Medições realizadas na amostra D2A2	57
Figura 17 – Medições realizadas na amostra D8A1.....	58
Figura 18 – Medições realizadas na amostra D8A2.....	58
Figura 19 – Medições realizadas na amostra D2A1A*	59
Figura 20 – Medições realizadas na amostra D2A2A*	59
Figura 21 – Medições realizadas na amostra D2A1B*	60
Figura 22 – Medições realizadas na amostra D2A2B*	60
Figura 23 – Medições realizadas na amostra D8A1A*	61
Figura 24 – Medições realizadas na amostra D8A2A*	61
Figura 25 – Medições realizadas na amostra D8A1B*	62
Figura 26 – Medições realizadas na amostra D8A2B*	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação do MCL das ligas	48
Gráfico 2 – Comparação do TCL das ligas	49
Gráfico 3 – Comparação do MCD das ligas	50
Gráfico 4 – Comparação do MCL para cada deformação com energias distintas	51
Gráfico 5 – Comparação do TCL para cada deformação com energias distintas	52
Gráfico 6 – Comparação do MCD para cada deformação com energias distintas.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas da liga CuNi 90/10	23
Tabela 2 – Propriedades mecânicas de ligas de CuNi forjadas em formato de tiras e chapas de acordo com EM 1652.	26
Tabela 3 – Taxa de corrosão da liga de CuNi contendo 30% de níquel e diferentes	29
Tabela 4 – Fração em peso de todas as fases formadas ao final da solidificação, BTR.....	30
Tabela 5 – Composição química da liga comercial UNS C70600.....	37
Tabela 6 – Composição química do eletrodo AWS 5.7 ERCuNi	38
Tabela 7 – Condições de ensaio.	43
Tabela 8 - Composição química das zonas fundidas dos corpos de prova obtidos	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LPTS	Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem
DKI	German Copper Institute
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ISO	Organização Internacional de Normalização
CFC	Cúbico de Face Centrada
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
BTR	Brittlement Temperature Range
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MCL	Maior Comprimento de Trinca
TCL	Comprimento Total das Trincas
MCD	Máximo Comprimento de Trinca na Direção de Soldagem
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
UNS	Sistema de Numeração Unificado
CuNi	Cobre-níquel
AWS	Sociedade Americana de Soldagem
ASM	Sociedade Americana de Metais
ER	Eletrodo
ZF	Zona Fundida
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
T_f	Temperatura de Fusão
T_c	Temperatura Crítica
MB	Metal de Base

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
μm	Micrômetro
α	Solução sólida
L	Fase Líquida
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
mm	Milímetro
N	Newton
mm^2	Milímetro quadrado
min	Minuto
Kg	Quilograma
dm^3	Decímetro cúbico
W	Watts
M	Metro
K	Kelvin
Ω	Ohm
G	Gramma
m^2	Metro quadrado
s	Segundo
”	Polegadas
cm	Centímetro
Kj	Quilojoule
®	Marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVO	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivo específico	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Evolução do uso da liga cuproníquel	21
3.2	Diagrama de fases das ligas cuproníquel	21
3.3	Liga CuNi 90/10	22
3.3.1	<i>Propriedades físicas</i>	23
3.3.2	<i>Propriedades químicas</i>	24
3.3.3	<i>Aplicação</i>	24
3.4	Liga CuNi 70/30	25
3.4.1	<i>Propriedades mecânicas e físicas</i>	25
3.4.2	<i>Propriedades químicas</i>	28
3.4.3	<i>Aplicação</i>	29
3.5	Faixas de solidificação	29
3.6	Macroestrutura de soldas	30
3.7	Soldagem das ligas de cobre-níquel	31
3.7.1	<i>Soldagem Tungsten Inert Gas (TIG)</i>	32
3.8	Trincas	33
3.8.1	<i>Trinca a quente</i>	33
3.8.1.1	<i>Trincas de solidificação</i>	34
3.9	Ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint	35
4	METODOLOGIA	37
4.1	Materiais e equipamentos	37

4.1.1	<i>Composição química da liga cuproníquel 90/10</i>	37
4.1.2	<i>Composição química da liga cuproníquel 70/30</i>	37
4.1.3	Corte de tubulação.....	38
4.1.4	Planificação dos tubos da liga de CuNi 90/10	38
4.1.5	Central de usinagem	38
4.1.6	Bancada utilizada na realização dos ensaios Trans-Varestraint.....	39
4.1.7	Máquina de ensaios Trans-Varestraint.....	40
4.2	Procedimentos experimentais.....	40
4.2.1	Confecção do corpo de prova	41
4.2.2	Ensaio Trans-Varestraint.....	42
4.2.3	Medição e caracterização metalúrgica das trincas	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Medição das composições químicas dos materiais escolhidos	46
5.2	Estudo dos efeitos da deformação e da energia de soldagem na formação de trincas em ligas cobreníquel.....	46
5.3	Comparação das ligas de cobreníquel com energia constante.....	47
5.3.1	<i>Análise estatística do MCL</i>	47
5.3.2	<i>Análise estatística do TCL</i>	48
5.3.3	<i>Análise estatística do MCD</i>	49
5.4	Resultados da comparação das duas energias de soldagem com a liga CuNi 70/30	50
5.4.1	<i>Resultados obtidos em relação ao MCL</i>	51
5.4.2	<i>Resultados obtidos em relação ao TCL</i>	52
5.4.3	<i>Resultados obtidos em relação ao MCD</i>	52
6	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE A – MEDIÇÕES UTILIZADAS NAS AVALIAÇÕES DAS TRINCAS DA LIGA CuNi 90/10	57

APÊNDICE B – MEDIÇÕES UTILIZADAS NAS AVALIAÇÕES DAS TRINCAS DA LIGA CuNi 70/30	59
---	-----------

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do ano de 2023, publicado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), houve evoluções positivas na quantidade de reservas totais e provadas tanto de petróleo e gás natural no Brasil, no período de 2013 a 2022, o Brasil no ano de 2022 ocupou a 9ª posição na produção de petróleo no mundo, produzindo cerca de 3,1 milhões de barris/dia, garantindo uma boa alimentação do setor da matriz energética. Portanto, é possível verificar que atualmente existe bastante investimentos no setor, principalmente para aumentar a produção e reduzir custos de processo. Uma área que tem recebido parte desse investimento é a construção de tubulações para transporte de fluídos, que necessitam de ligas metálicas com propriedades específicas para suportar o ambiente corrosivo e as tensões aplicadas durante o processo de locomoção do fluído, como água.

A liga cobre-níquel, cuproníquel (CuNi), é representada como uma liga que apresenta composição majoritária de cobre, com teor entre 60% e 90%, seguido de níquel e alguns outros elementos em menores proporções, caso adicionados, como ferro e manganês. A liga possui alta resistência a corrosão, devido ao teor de cobre, além de possuir característica antimicrobiana, sendo empregada em equipamentos marinhos e industriais, como: sistemas de tubulações, trocadores de calor e tubos de condensadores. Sua presença na indústria do petróleo é importante, principalmente nas plataformas petrolíferas, pois além de possuir as características mencionadas, a liga cuproníquel possui elevada resistência à temperatura, podendo manter suas propriedades mecânicas e químicas estáveis durante uma elevada faixa de temperatura, auxiliando no processo de manutenção dos equipamentos.

Diversas pesquisas têm sido realizadas acerca das aplicações desse material, prioritariamente relacionadas as dificuldades encontradas durante a manutenção de equipamentos dessas ligas, por meio de soldagem, como em tubulações. Uma dessas pesquisas, foi demandada ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) e está relacionada a falha que pode ser de natureza de trincas a quente por solidificação durante a soldagem de manutenção de tubos cobre níquel.

As trincas a quente podem ser determinadas como tipos de fissuras que podem ocorrer durante o processo de soldagem, especificamente enquanto o metal está quente e no

processo de solidificação. Existem três tipos principais de trinca a quente: liquação, perda de ductilidade e solidificação.

A trinca a quente por solidificação se forma normalmente no centro do cordão de solda e nas suas proximidades, ela ocorre devido a concentração de soluto, ou elementos de liga, durante sua solidificação, enquanto a contração do sólido irá gerar tensões internas que são agravadas pela presença de impurezas que possuem baixa temperatura de fusão, destaca-se enxofre e o fósforo, além disso, as trincas intergranulares, ocorrem devido à presença de um filme líquido entre os dendritos durante a solidificação. O estudo foi focado na análise dessas trincas, logo, será utilizado o ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint, que é amplamente utilizado em trabalhos de pesquisa para avaliação de trincas a quente por solidificação em juntas soldadas.

O ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint utiliza uma carga, em determinado momento durante a soldagem, com o intuito de provocar a formação de trincas a quente, que foram caracterizadas e analisadas, em termo de quantidade e comprimento.

O estudo realizado foi executado concomitantemente com uma outra pesquisa, ainda em andamento na data atual (setembro de 2024), a cerca do mesmo assunto, a qual, alguns de seus dados, serão apresentados e devidamente citados ao longo deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Esse estudo tem como objetivo geral identificar entre as ligas cuproníquel 90/10 e 70/30 qual apresenta maior susceptibilidade a formação de trincas a quente por solidificação, quando submetida ao ensaio Trans-Varestraint, em diferentes níveis de energia e deformação.

2.2 Objetivo específico

- A) O primeiro objetivo específico é obter os materiais de base estudados na forma de chapas (ligas 90/10 e 70/30);
- B) realizar ensaios nos materiais de base estudados variando energia de soldagem e deformações plásticas do material;
- C) avaliar a geração de trincas a quente por solidificação em duas ligas de CuNi com composições distintas, uma liga com de 90%Cu e 10%Ni e outra liga com 70%Cu e 30%Ni, utilizando uma energia de soldagem constante e dois níveis distintos de deformação aplicada;
- D) avaliar a geração de trincas a quente por solidificação na liga de CuNi com 70%Cu e 30%Ni, utilizando duas energias de soldagem distintas e em dois níveis de deformação aplicados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Evolução do uso da liga cuproníquel

“As ligas de cobre são de origem antiga e foram empregadas como matéria prima para a fabricação de ferramentas, sendo utilizadas pelos seres humanos desde a idade da pedra até a idade do bronze” (Habashi, 1998, p. 65). O seu uso auxiliou na história da humanidade, como no caso de ferramentas agrícolas, utensílios domésticos e até instrumentos musicais.

Ao longo dos séculos, foram aperfeiçoadas diversas técnicas capazes de refinar elementos mais puros e de mesclá-los a fim de poder usufruir de propriedades específicas desses elementos. O início do uso de ligas de materiais mais nobres marcou um auge na indústria e mercado, possibilitando maior durabilidade e eficiência destes materiais nas mais diversas aplicações. Estudos sobre novas ligas e aprofundamento de conhecimento ainda são tópicos amplamente discutidos e estudados.

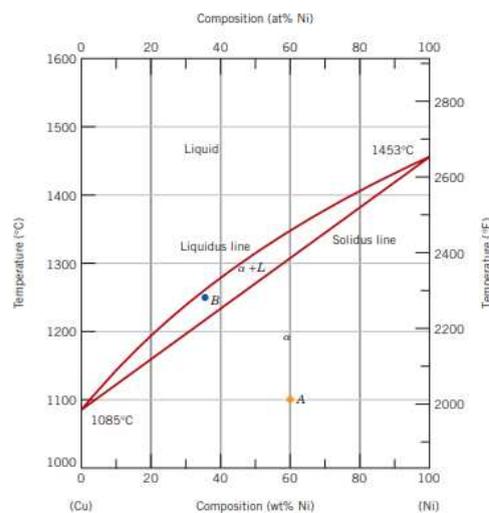
Atualmente, pode-se citar uma importante aplicação no setor da indústria de petróleo e gás no que se refere a tubulações com a função de transporte de água, no caso uma liga de cobre-níquel apresenta propriedades superiores do que esses materiais em sua forma pura, por exemplo, a liga possui uma melhor tenacidade do que o cobre puro além de também ser maleável e capaz de ser moldada em diferentes formas, utilizado na fabricação de tubulações de diferentes tamanhos e formas e apresentar excelente resistência a corrosão em ambientes marinhos, a liga consegue usufruir das capacidades de ambos os elementos, tornando-se uma melhoria para os equipamentos.

3.2 Diagrama de fases das ligas cuproníquel

A série de ligas cobre-níquel (UNS C70100 - UNS C72900) variam prioritariamente com a concentração de níquel presente nas mesmas, afetando severamente suas propriedades, garantindo uma vasta gama de utilidades. O destaque é referente as ligas que apresentam as composições de níquel de 10% (UNS C70600) e 30% (AWS 5.7 CuNi), ambas

as ligas são bastante utilizadas no mercado devido a suprir diversas necessidades da sociedade. Um fato importante de mencionar se encontra quando é analisado o seu diagrama de fases, cujo se trata de um sistema isomorfo binário. A liga possui três diferentes regiões de fases, observadas na Figura 1, que são compostas por uma fase líquida (L), solução sólida (α) e uma região entre essas duas fases (L + α), limitada por duas linhas, a liquidus e a solidus, que correlacionam as temperaturas e as composições das ligas com a fase presente. A liga cuproníquel é interessante pois além de na fase líquida possuir uma solução homogênea de cobre e níquel, na região de solução sólida, que consiste de átomos de cobre e níquel, ambos também são solúveis entre si, possibilitando a fácil variação de teores de cobre e níquel. Isso ocorre devido a alguns fatores importantes, inicialmente por se tratar de dois elementos que possuem a mesma estrutura cristalina, ambos possuem a estrutura cúbica de face centrada (CFC), além de, possuírem raios atômicos semelhantes, tanto quanto eletronegatividades e valência (CALLISTER, 2006), obedecendo as regras de solubilidade de Hume-Rothery.

Figura 1 – Diagrama de fases do sistema isomorfo cuproníquel.



Fonte: CALLISTER 7th edition, p. 259.

3.3 Liga CuNi 90/10

A liga UNS C70600, também denominada como liga de CuNi 90/10 e será mencionada como tal a partir desse momento neste documento, pertence ao subgrupo das ligas

de cobre, a qual contém cerca de 90% de cobre e de 10% de níquel, porém, existem casos da adição de outros elementos como o manganês e o ferro, capazes de modificarem severamente as propriedades, como a adição de 2.3% de Fe, pode aumentar a resistência à corrosão e diminuir levemente a ductilidade do material (Habashi, 1998).

Neste estudo, a liga CuNi foi utilizada como metal de base para os testes realizados e também será analisada em conjunto com a liga de AWS 5.7 ERCuNi, cuja composição comumente contém cerca de 70%Cu e 30%Ni, utilizada como metal de adição em larga escala da soldagem de tubulações de materiais de liga CuNi 90/10.

3.3.1 Propriedades físicas

Apesar de possuir elevado teor de cobre, a liga cuproníquel é majoritariamente prateada, devido ao teor de níquel da mesma, a liga 90/10 apresenta diversas propriedades positivas que justificam seu uso, como suas propriedades térmicas e elétricas, além de resistência a corrosão em água salina (ASM Handbook, 1998). A Tabela 1 apresenta propriedades importantes da liga, por meio dela é possível observar as propriedades de alta condutibilidade elétrica e térmica dessa liga, pode estar conectado com um resultado observado nessa pesquisa.

Tabela 1 – Propriedades físicas da liga CuNi 90/10.

Densidade a 20°C (g/cm ³)	Ponto de fusão (°C)	Coeficiente médio de expansão térmica (20 – 300°C) (10 ⁻⁶ /°C)	Condutibilidade elétrica volumétrica a 20°C (%I.A.C. S)	Condutibilidade térmica a 20°C (cal/em s °C)	Calor específico a 20°C (cal/g °C)	Resistividade elétrica a 20°C (ohm mm ² /m)
			Recozido			Recozido
8,94	1150	17,1	9,1	0,1	0,09	0,19

Fonte: Termomecanica São Paulo.

3.3.2 *Propriedades químicas*

As ligas CuNi estão entre as ligas de cobre resistentes à corrosão. “São resistentes à umidade, ácidos não oxidantes, álcalis e soluções salinas, ácidos orgânicos e gases como oxigênio, cloro, cloreto de hidrogênio, fluoreto de hidrogênio, dióxido de enxofre e dióxido de carbono” (Copper-Nickel, 2018, tópico 2.3). O motivo desta propriedade é semelhante ao encontrado nas ligas de CuAl, no qual é formado um revestimento protetor estável na superfície, devido ao metal da liga.

3.3.3 *Aplicação*

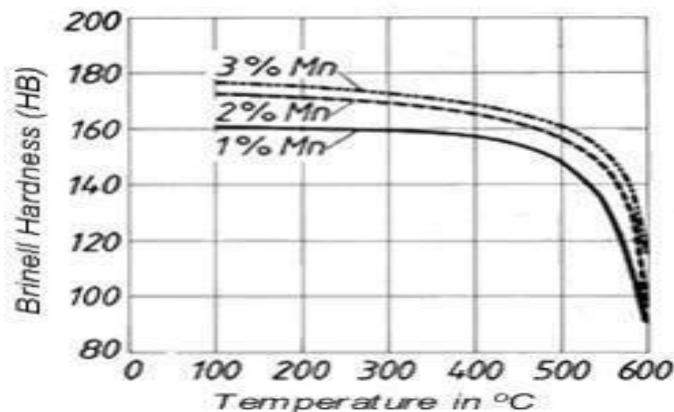
A liga de CuNi 90/10 é caracterizada, primariamente, por seu uso em ambientes de elevada corrosão, especialmente causada por água salgada, porém é aplicada em outros contextos também, podem-se citar:

- Indústria de petróleo e gás: Por meio de componentes offshore, isto é, tubulações submarinas, válvulas e também trocadores de calor, como dito previamente, utilizada devido a sua alta resistência à corrosão.
- Indústria automotiva: Pode ser utilizada em sistemas de refrigeração e trocadores de calor em veículos que são operados em ambientes corrosivos, vale ressaltar que em menor escala.
- Indústria química: Diversos equipamentos, tubulações e válvulas presentes em ambientes químicos agressivos, as propriedades observadas da liga possibilitam seu uso.
- Indústria marítima: Devido a sua propriedade de resistência à corrosão marinha e condutividade térmica, a liga de CuNi 90/10 é bastante utilizada em componentes estruturais de submarinos, navios, também como tubulações, trocadores de calor, válvulas e sistema de refrigeração.

3.4 Liga CuNi 70/30

O arame AWS 5.7 ERCuNi representa o eletrodo utilizado, possui a função de servir como metal de adição durante o processo de soldagem, amplamente utilizado para soldagem de ligas de CuNi 90/10, devido tanto pela proximidade de composição química, como metal de base, tanto para ampliar propriedades do equipamento soldado. No estudo será analisado a composição química da liga CuNi 70/30, composta por aproximadamente 70% de cobre e 30% de níquel, a partir desse momento a liga será chamada como CuNi 70/30, além disso, a mesma possui a adição de outros elementos com baixo teor, com destaque para o manganês, cuja adição promove a redução de dureza da liga com a temperatura, como pode ser observado na Figura 2 com uma liga de 20% de Ni, e do ferro, devido a aperfeiçoar as propriedades de resistência à corrosão das ligas de CuNi (Copper-Nickel, 2018).

Figura 2 – Comportamento do aumento de dureza com a adição de Mn da liga CuNi contendo 20% de Ni com diferentes teores de manganês.



Fonte: German Copper Institute, DKI.

3.4.1 Propriedades mecânicas e físicas

É importante notar as diferenças obtidas devido ao aumento expressivo do níquel na liga, em comparação com a liga CuNi 90/10, pois “o níquel tem um efeito significativo nas propriedades físicas e mecânicas das ligas CuNi. Embora a resistência à tração, resistência ao

calor, temperatura solidus e liquidus e a resistência à corrosão aumenta com o teor de níquel, a condutividade térmica e elétrica diminuem” (Copper-Nickel, 2018, tópico 2.2.1.1). A Tabela 2 apresenta alguns valores mencionados acima para a liga.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de ligas de CuNi forjadas em formato de tiras e chapas de acordo com EM 1652.

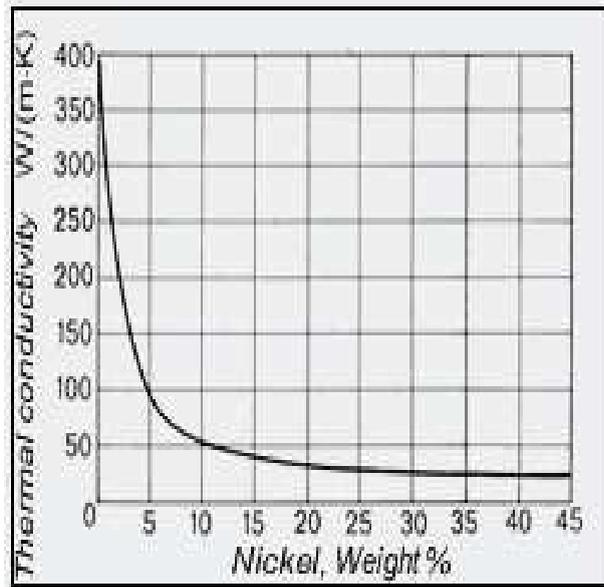
Símbolo	Numeração	Espessura (mm)	Resistência à tração (N/mm ²)	0.2% Tensão de escoamento (N/mm ²)	Elongação		Dureza Vickers (HV)
					A50mm para espessura de até 2.5mm %min.	A para espessura acima 2.5mm %min.	
	R350	0.3 to 15	350 to 420	(min 120)	-	35	-
CuNi30- Mn1Fe	H080	CW354H	-	-	-	-	80 to 120

Fonte: German Copper Institute, DKI.

O efeito do níquel é bastante visível na liga, visto que cerca de 15% deste elemento é capaz de modificar a coloração da liga drasticamente, quanto mais níquel é adicionado a liga, mais prateada mesma se tornará, sendo em alguns casos difíceis de diferenciar superfícies polidas dessa liga com a cor da prata. As figuras seguintes informam como o teor de níquel pode afetar suas propriedades mecânicas e demonstram como pode-se obter uma ampla gama de capacidades. A densidade de cobre puro (8.93 kg/dm³ em 20 °C) varia pouco com a adição do elemento de níquel, pois, o mesmo possui uma densidade semelhante (8.9 kg/dm³ em 20°C), quando se observa outras propriedade é possível perceber que a adição de níquel é capaz de afetar as características do cobre, quando formada a liga, pode ser notado que a partir do aumento de teor de níquel a condutividade térmica sofre um severo decaimento, exponencial até cerca de 10% de níquel, e se mantém em torno de 40% de níquel, observado na Figura 3. Além disso, é possível notar diferenças no coeficiente médio de expansão linear, no qual também apresenta uma diminuição com o aumento do teor de níquel, comportamento apresentado na Figura 4. Em relação a resistividade elétrica, a mesma aumenta com a adição de níquel na liga, alcançando uma máxima na concentração de cerca de 45% de níquel, propriedade essencial para se tornar um material de resistência, essa concentração pode também se

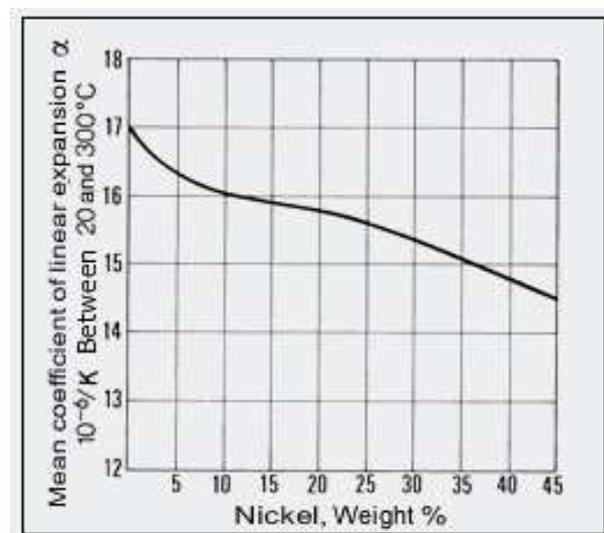
relacionar com o mínimo coeficiente de temperatura da resistência elétrica do material, propriedades apresentadas na Figura 5 (Copper-Nickel, 2018).

Figura 3 – Condutividade térmica de ligas de CuNi a 20°C em função do teor de níquel.



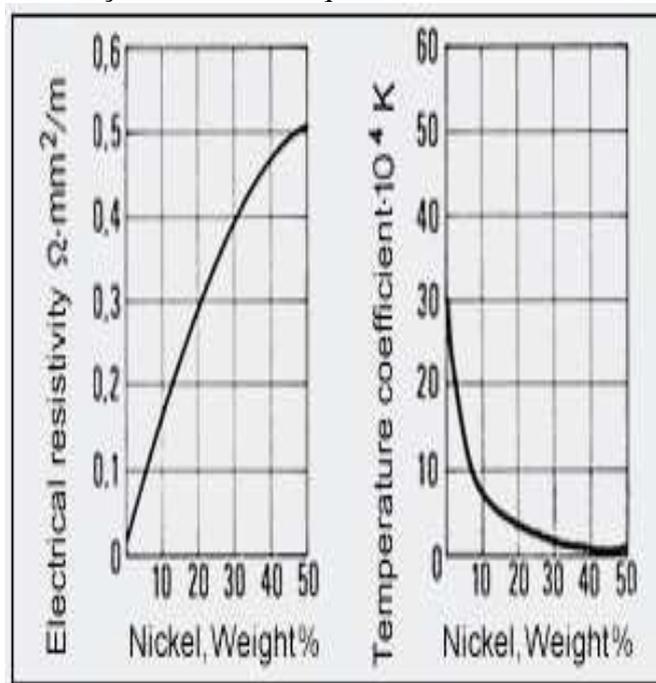
Fonte: German Copper Institute, DKI.

Figura 4 – Coeficiente médio de expansão linear de ligas de CuNi em função do teor de níquel.



Fonte: German Copper Institute, DKI.

Figura 5 – Resistividade elétrica e coeficiente de temperatura da resistência elétrica de ligas de CuNi em função do teor de níquel.



Fonte: German Copper Institute, DKI.

3.4.2 Propriedades químicas

De forma geral, as ligas CuNi 90/10 e 70/30, apresentam ótimas propriedades no que se refere a resistência à corrosão, especialmente em água salgada. Para aprimorar essa característica pode ser realizado o controle de teor do ferro na liga, na Tabela 3 é possível observar a taxa de corrosão da liga CuNi 70/30, decorrendo da variação no teor de Fe e no fluxo de vazão em itens semi-acabados. O ferro que se encontra dissolvido na fase sólida da liga de CuNi, aprimora a resistência a corrosão da mesma no modo que se forma uma camada de óxido, uniforme e aderente em contato com água e é ampliado quanto mais rápido é o fluxo da água do mar, cujo representa o ambiente de seu uso principal, porém, é importante mencionar que a solubilidade do ferro na solução sólida de CuNi diminui em menores temperaturas, portanto para essas ligas, é importante realizar um tratamento térmico de endurecimento por envelhecimento (Copper-Nickel, 2018).

Tabela 3 – Taxa de corrosão da liga de CuNi contendo 30% de níquel e diferentes teores de ferro em água do mar e em vários fluxos de vazão; temperatura de 30°C e duração do teste de 60 dias.

Teor de Fe (%)	Formato do semi-acabado	Taxa de corrosão em g/m ² a uma vazão de m/s de:			
		3	4.12	6.1	8.23
0.04	Tubo	27.5	-	35.5	-
0.49		2.2	-	2.7	-
0.03	Barra	-	24.7	-	22.9
0,48		-	2.5	-	3.2

Fonte: German Copper Institute, DKI.

3.4.3 Aplicação

A liga CuNi 70/30, apresenta propriedades semelhantes a liga CuNi 90/10, possuindo em suas vastas utilizações os mesmos elementos químicos em composições distintas, o seu superior teor de níquel promove uma maior resistência mecânica ao material, porém, sua fabricação possui um custo mais elevado, suas aplicações são geralmente semelhantes em comparação com a liga de CuNi 90/10, portanto, uma análise específica de caso é necessária para sua utilização, vale ressaltar seu uso primariamente em tubulações e componentes de bombas.

3.5 Faixas de solidificação

O modelo de Scheil auxilia na obtenção do comportamento real da solidificação em materiais, como as ligas de CuNi, com elevado nível de confiança. Os dados são obtidos a partir de uma equação que irá gerar um gráfico que é dividido em 4 estágios de solidificação, demonstrando com mais confiança o comportamento esperado na etapa de solidificação para situações fora do equilíbrio (SANTOS, 2020). Muitas informações podem ser obtidas por meio

do modelo de Scheil, como o valor do Brittlement Temperature Range (BTR) que será discutido posteriormente.

A partir da curva de Scheil é possível determinar dados como quais são as fases formadas no final da solidificação, junto com suas composições, o valor do BTR e a faixa de solidificação da liga estudada. A Tabela 4 apresenta os valores medidos em relação as fases precipitadas durante a solidificação das ligas, é possível notar que a liga CuNi 90/10 somente precipitou a fase γ , além de apresentar valores menores para o BTR e para a faixa de solidificação.

Tabela 4 – Fração em peso de todas as fases formadas ao final da solidificação, BTR e faixa de solidificação.

Liga	γ (%)	ALB2_C32 (%)	P2ZN3 (%)	BTR (°C)	Faixa de solidificação (°C)
ERCuNi 70/30	99,0005	0,00194	0,0025	206,6	297,08
CuNi 90/10	100	-	-	89	149,09

Fonte: Moura Filho, em andamento¹.

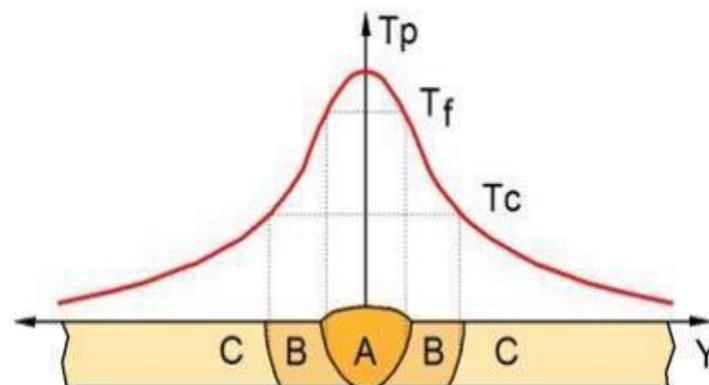
3.6 Macroestrutura de soldas

Durante qualquer processo de soldagem, o metal de base irá sofrer influências térmicas na região de soldagem, com a temperatura diminuindo no metal de base, quanto mais distante da soldagem estiver (MODENESI, 2012). Diante disso, são determinadas três regiões específicas, dependendo da posição do metal em relação a região de soldagem. Na Figura 6 podem ser visualizadas, essas regiões, que são delimitadas pelas temperaturas alcançadas e as microestruturas específicas formadas na solidificação e resfriamento da junta soldada. São classificadas como:

¹ A ser publicado pelas Edições UFC em 2025.

- Zona Fundida (ZF): Essa faixa é limitada pela total fusão do metal de base com o material de adição formando uma composição química heterogênea, incorporando propriedades específicas do mesmo junto com a mudança de sua microestrutura, é caracterizada por apresentar uma temperatura de pico maior do que sua temperatura de fusão (T_f), responsável por possibilitar a fusão dos materiais.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): A zona termicamente afetada pelo calor está próxima a ZF, ocorrendo modificações nas suas microestruturas, as suas temperaturas de pico são superiores a temperatura crítica (T_c), representa a temperatura mínima para ocorrer uma transformação relevante como a mudança de fase, e inferiores a T_f , representa a temperatura mínima que o metal irá começar a ser afetado termicamente pela soldagem, característica do material de base.
- Metal de base (MB): Representa o distanciamento mínimo, e superior, para que não sejam observados os efeitos da soldagem em sua microestrutura, sua temperatura de pico é menor do que T_c .

Figura 6 – Repartição térmica. A - ZF, B - ZTA e C - MB.



Fonte: MODENESI, 2012, p. 83.

3.7 Soldagem das ligas de cobre-níquel

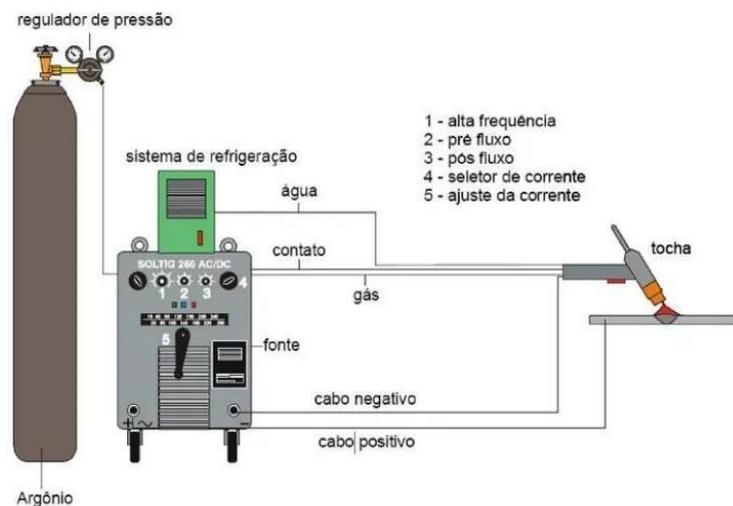
Inicialmente, é importante ressaltar que a realização da soldagem irá depender de diversos fatores, como as características das ligas e suas propriedades, mas também dos parâmetros de soldagem utilizados e dos materiais de adição. As ligas de CuNi podem ser soldadas por meio de diversas técnicas, os processos mais comuns serão brevemente apresentados nesse segmento.

3.7.1 Soldagem Tungsten Inert Gas (TIG)

A soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), representa um outro tipo de processo de soldagem a arco elétrico, porém possui algumas diferenças do processo mencionado anteriormente, nesse processo se utiliza de um eletrodo não consumível, composto de tungstênio puro ou na forma de liga, sua soldagem apresenta um cordão de alta qualidade e utiliza gás inerte de proteção para proteger o arco durante a soldagem, usualmente argônio, além disso, devido ao elevado custo da operação, o processo TIG também consegue operar com corrente alternada, além da corrente contínua (KOU, 2003).

No projeto, foi utilizado o processo TIG autógeno, no qual não houve a utilização de metal de adição no processo de soldagem e a mesma ocorreu concomitantemente ao teste de soldabilidade Trans-Varestraint.

Figura 7 – Circuito de soldagem TIG.



Fonte: RML máquinas e equipamentos.

3.8 Trincas

As trincas no processo de soldagem apresentam um enorme entrave para a qualidade do componente soldado, podendo comprometer sua integridade e inviabilizar seu uso. Existem diversos tipos de trincas de soldagem, podendo ocorrer em diversas fases do processo de soldagem, entre as mesmas pode-se citar a trinca por solidificação (MODENESI, 2012).

3.8.1 *Trinca a quente*

A trinca a quente pode ser caracterizada como um tipo de fissura que ocorre durante a soldagem, enquanto o material está submetido a altas temperatura, isto é, temperaturas superiores a metade de sua temperatura líquida (MODENESI, 2012).

O artigo de Paul W. Holsberg, 1970, sobre os estudos de soldabilidade da liga modificada de CuNi 70/30, com adição de ferro, berílio ou cromo, utiliza técnicas de soldagem simuladas e o teste Varestraint. O artigo apresenta chances de formação de trinca a quente em ligas CA717 em regiões aquecidas entre 1000 – 1400 °F, além disso, evidencia não haver trincas a quente nas ligas IN732, CA716 nas regiões afetadas termicamente, de acordo com o teste Varestraint, como também, o autor informa que nenhuma trinca foi observada no teste Varestraint e o comportamento de ductilidade a quente foram semelhantes ao da liga CA715.

As trincas a quente afetam severamente a qualidade da soldagem, são consideradas como defeitos de soldagem e podem ser minimizadas a partir do ajuste de composição química da liga. A Figura 8 caracteriza trincas a quente, classificada como trinca por solidificação, ela será discutida posteriormente.

soldagem (MODENESI, 2012), peças que possuem um maior nível de restrição tendem a apresentar trincas por solidificação mais facilmente.

3.9 Ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint

O ensaio Trans-Varestraint (Transverse Variable Restraint), é um dos principais ensaios de soldagem realizados, é uma variante do ensaio Varestraint, que foi desenvolvido “para avaliar quantitativamente a influência do metal base e de outras variáveis do processo de soldagem na tendência de formação de trincas de solidificação” (MODENESI, 2012, p.174).

O ensaio utiliza uma chapa que é soldada e sofre flexão simultaneamente, com o intuito de proporcionar a formação de trincas a quente, importante mencionar que o ensaio Trans-Varestraint é derivado do ensaio Varestraint, devido a direção da aplicação das tensões. No caso do ensaio Trans-Varestraint é utilizado uma tensão transversal em relação à direção da soldagem, enquanto o ensaio Varestraint utiliza a tensão paralela a direção da soldagem. O motivo dessa direção acarreta diretamente em um fator muito importante que é na formação de trincas na região central do cordão de solda (SHANKAR et al., 2000).

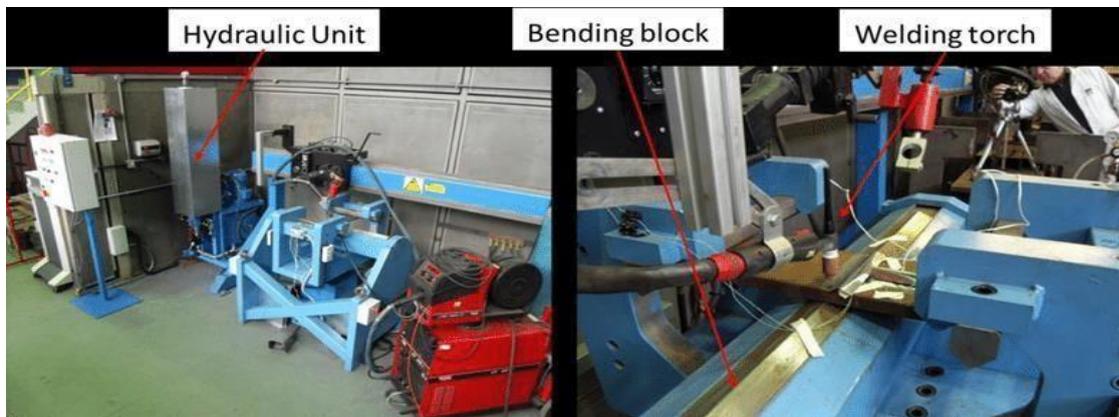
A susceptibilidade de um material às trincas de solidificação pode estar relacionada com a faixa de temperatura em que a liga se encontra mais suscetível a formação de trincas a quente, conhecida como BTR (Brittlement Temperature Range). De acordo com Santos (2020, p. 36) “O valor de BTR trata-se do intervalo de temperatura onde o material estará mais suscetível à formação de trincas a quente, ou seja, quanto maior o BTR, maior a susceptibilidade do material à formação de tais falhas”.

Para avaliar e comparar ligas quanto a sua susceptibilidade a formação de trincas de solidificação durante a soldagem, o teste de soldabilidade Trans-Varestraint é bastante utilizado, pois o mesmo promove, a formação de trincas mais longas na linha central do cordão, o determinado maior comprimento de trinca (MCL), pois o mesmo está relacionado a curva de resfriamento do material em conjunto com a velocidade de soldagem (SHANKAR et al., 2000), por meio deste ensaio é possível quantificar a susceptibilidade de um material em relação as trincas de solidificação.

Santos (2020) descreve o procedimento de realização do teste de soldabilidade Trans-Varestraint construído no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem da UFC:

A Figura 9 apresenta brevemente o circuito de soldabilidade Trans-Varestraint, também será desenvolvido posteriormente.

Figura 9 – Exemplo de circuito de soldabilidade Trans-Varestraint.



Fonte: Lee Aucott.

4. METODOLOGIA

4.1 Materiais e equipamentos

No estudo, foi inicialmente utilizado um tubo de liga de CuNi 90/10 com diâmetro de 19” e espessura de parede de 3/8”, o qual teve que ser cortado e planificado na prensa hidráulica para obter a liga na forma de chapa. Para se confeccionar uma chapa com a composição química da outra liga estudada no projeto, foi utilizado o arame eletrodo AWS 5.7 ERCuNi, cuja composição nominal é aproximadamente 70%Cu e 30%Ni. Canais foram usinados nas chapas planificadas da liga de CuNi 90/10 e preenchidos por soldagem com o processo MIG/MAG, empregando o eletrodo mencionado.

4.1.1 *Composição química da liga cuproníquel 90/10*

A Tabela 5 representa a faixa de composição da liga de CuNi 90/10, metal de base utilizado no projeto, obtido a partir da norma padrão ASTM B111, que especifica o uso para tubos.

Tabela 5 – Composição química da liga comercial UNS C70600.

CuNi 90/10	%Cu	%Ni	%Fe	%Mn
Composição química	88.7 – 91.2	9.0 – 11	1.0 – 1.8	Até 1

Fonte: Norma ASTM.

4.1.2 *Composição química da liga cuproníquel 70/30*

A Tabela 6 representa a faixa de composição química da liga do arame, utilizado como eletrodo, AWS 5.7 ERCuNi.

Tabela 6 – Composição química do eletrodo AWS 5.7 ERCuNi.

CuNi 70/30	%Cu	%Ni	%Mn	%Ti	%Al	%Fe	%Si	%P	%S
Composição química	Bal	30– 32	0.5 - 1	0.2– 0.5	0.03	0.4– 0.75	0.1	0.01	0.01

Fonte: AWS A5.7/A5.7 ERCuNi.

4.1.3 Corte de tubulação

Inicialmente, o tubo foi cortado com auxílio da máquina de corte, totalizando 6 tubos da liga de CuNi 90/10, que foram divididos ao meio, novamente, gerando um total de 12 semi-cortes que foram prensados e geraram as chapas utilizadas no trabalho.

4.1.4 Planificação dos tubos da liga de CuNi 90/10

Os tubos produzidos na etapa de corte, foram planificados por meio do uso de uma prensa hidráulica, para auxiliar a confecção do corpo de prova para o ensaio Trans-Varestraint.

4.1.5 Central de usinagem

Metade das chapas planificadas na etapa anterior foram encaminhadas para o passo de usinagem para obter o dimensionamento final das chapas para a realização dos ensaios

Trans-Varestraint, enquanto a outra metade foi ajustada, também pela central de usinagem, na formação de um canal para que seja possível realizar o preenchimento com a deposição do arame eletrodo AWS 5.7 ERCuNi no metal base UNS C70600 e depois para odimensionamento final do corpo de prova. Foi necessário realizar essa etapa para diminuir o efeito da diluição do metal de base sobre o arame, para garantir uma composição química maispróxima da liga de CuNi 70/30 na região que foi realizado o ensaio.

4.1.6 Bancada utilizada na realização dos ensaios Trans-Varestraint

Para a execução dos ensaios Trans-Varestraint foi utilizada a bancada, observada na Figura 10, na qual pode ser visualizado a fonte utilizada. É uma fonte multiprocesso do tipo IMC Inversal 450. As soldagens foram feitas com o processo TIG autógeno. Para o deslocamento da tocha TIG foi utilizado tartilope, que é um aparato que possibilita o avanço controlado e automático da tocha. Um sistema para obtenção de dados e a própria máquina para o ensaio Trans-Varestraint também podem ser vistos na Figura 10.

Figura 10 – Bancada de ensaio Trans-Varestraint: 1 – Sistema de aquisição de dados; 2 – Fonte de soldagem multiprocesso; 3 – Tartilope e tocha de soldagem TIG; 4 – Máquina de ensaio Trans-Varestraint.



Fonte: Moura Filho, em andamento¹.

¹ A ser publicado pelas Edições UFC em 2025.

4.1.7 Máquina de ensaios Trans-Varestraint

O LPTS foi responsável pela fabricação da máquina de ensaios Trans-Varestraint utilizada nesse projeto. Ela é constituída por um sistema de resfriamento de óleo, uma unidade hidráulica, um sistema acumulador de pressão, um cilindro hidráulico e um suporte para o posicionamento da peça e tocha de soldagem, que podem ser visualizadas na Figura 11.

Figura 11 – Máquina de ensaio Trans-Varestraint: 1 – Sistema de fixação da peça e posicionamento da tocha; 2 – Cilindro hidráulico; 3 – Sistema acumulador de pressão; 4 – Unidade e tanque hidráulico; 5 – Motor-bomba; 6 – Quadro de comando e controle; 7 – Sistema de resfriamento do óleo.



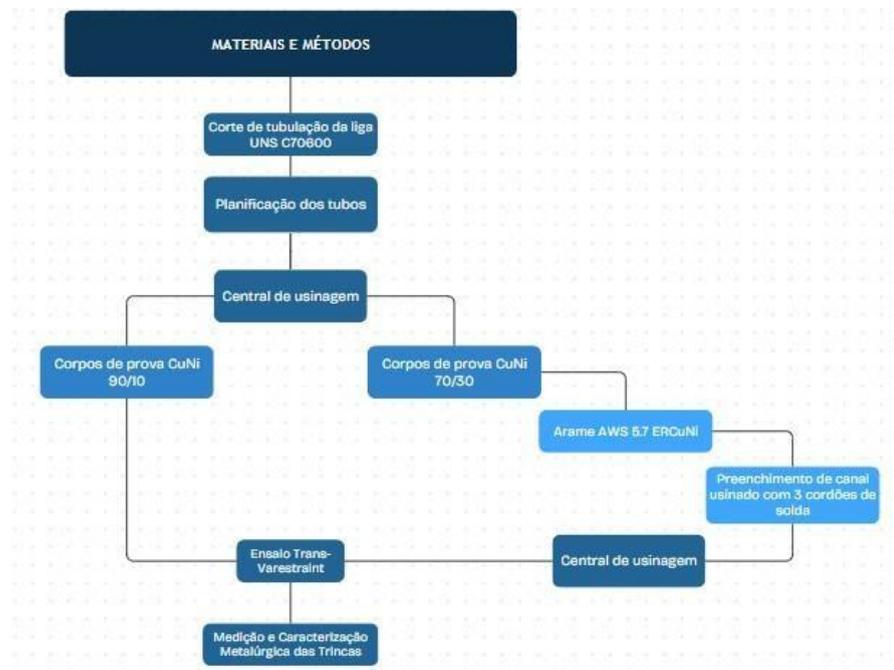
Fonte: Moura Filho, em andamento¹.

4.2 Procedimentos experimentais

Nesta seção, será apresentado os procedimentos executados no trabalho afim de obter os dados de resultados. Na Figura 12, é possível observar a ordem de atividades adotada durante o estudo.

¹ A ser publicado pelas Edições UFC em 2025.

Figura 12 – Fluxograma de atividades executadas no estudo

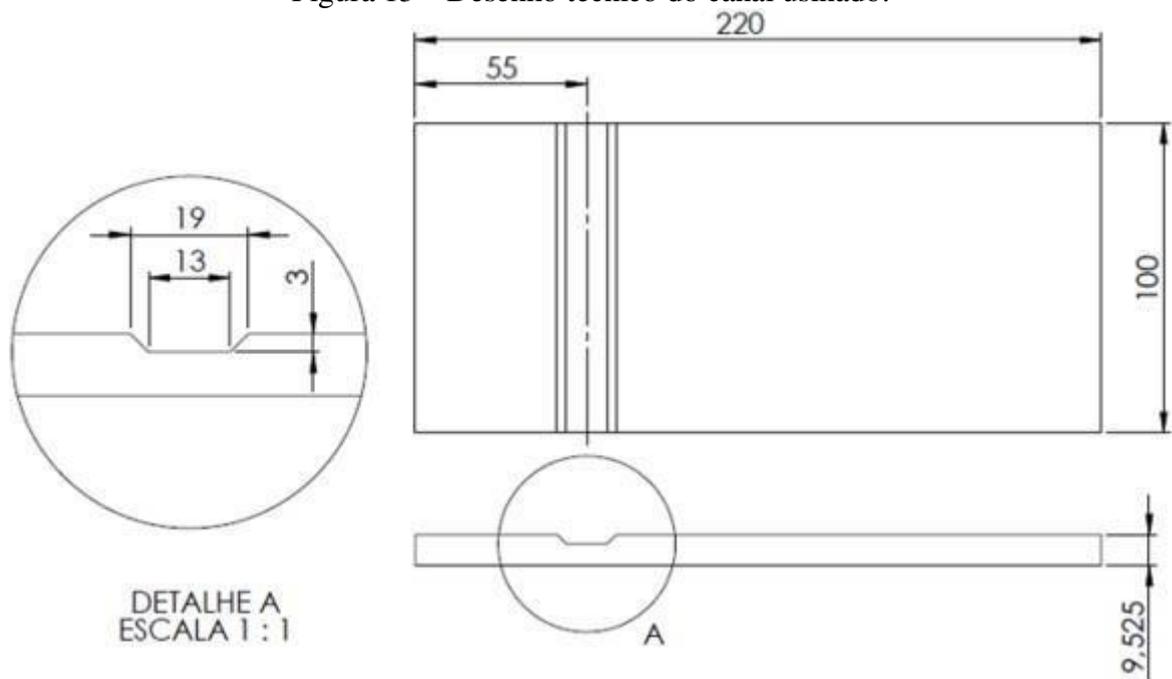


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Confecção do corpo de prova

O corpo de prova consiste de um canal usinado em uma chapa de 220 x 100 mm com 9,5 mm de espessura, obtida a partir do corte com serra fita circular e conformação plástica. Em relação a segunda metade das chapas, estas foram soldadas com o processo MIG/MAG pulsado para realizar o preenchimento dos canais usinados da calha. Três camadas de cordões foram depositadas, visando diminuir a diluição no metal de base e obter na última camada uma composição química similar ao do arame eletrodo AWS 5.7 ERCuNi. O esquema do corpo de prova pode ser verificado na Figura 13.

Figura 13 – Desenho técnico do canal usinado.



Fonte: Moura Filho, em andamento¹.

Com o canal preenchido com o arame eletrodo AWS 5.7 ERCuNi, estas chapas foram usinadas para remoção do reforço das soldas acima da superfície da chapa, a fim de atingirem as dimensões finais definidas para o ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint. Cada submetida ao ensaio apresentava as seguintes dimensões: comprimento de 220 mm largura de 100 mm e espessura de 9,5 mm.

4.2.2 Ensaio Trans-Varestraint

O estudo foi focado em avaliar os efeitos das energias de soldagem e deformações em ligas cuproníquel, em relação a formação de trincas a quente por solidificação. As condições de ensaio podem ser visualizadas nas Tabela 7, no qual foram utilizadas duas ligas de CuNi com composições distintas, duas energias de soldagem, definidas como energia alta (1,09 KJ/mm) e baixa (0,74 KJ/mm), além de dois níveis de deformação aplicados no ensaio

¹ A ser publicado pelas Edições UFC em 2025.

(2% e 8%), totalizando 6 condições de ensaio distintas que foram realizadas em duplicatas, totalizando na geração de 12 amostras.

Tabela 7 – Condições de ensaio.

Liga	Nível de energia (kJ/mm)	Nível de deformação (%)
CuNi 90/10	1,09	2
		8
CuNi 70/30	1,09	2
		8
	0,74	2
		8

Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio Trans-Varestraint desenvolvido e realizado no LPTS segue as determinações das normas AWS B4.0:2007 e ISO/TR 17641-3:2005(E).

A soldagem utilizada é do tipo TIG autógeno, pois não ocorre adição de ligas durante a soldagem. O movimento da tocha da soldagem foi garantido com auxílio de um tartilope, enquanto a posição inicial da tocha se encontra no centro do canal.

O nível de deformação será aplicado com base no raio de curvatura do cutelo, componente da máquina. De forma geral, quanto maior o raio de curvatura do cutelo menor é a deformação aplicada sobre a peça, e após a realização do ensaio é esperado que o corpo de prova adquira a curvatura do cutelo utilizado. A Figura 14 representa essa organização, além disso, foram aguardados 10 minutos para a remoção da carga após o ensaio como recomenda a norma.

É importante mencionar que a distância da extremidade fixa até o centro do canal depende da deformação aplicada, os testes com deformação de 2% apresentaram uma distância fixa de 55 mm da extremidade até o centro do canal, enquanto a deformação de 8% utilizou uma distância de 65 mm. Essa diferença ocorre devido ao raio de curvatura do cutelo ser pequeno, dependendo de um maior apoio para a base da peça, evitando que ocorra o afastamento da peça em relação ao cutelo.

Figura 14 – Exemplificação de uma amostra posicionada para realização do ensaio Trans-Varestraint.



Fonte: Moura Filho, em andamento¹.

O ensaio Trans-Varestraint é característico por aplicar uma tensão sobre a chapa durante a soldagem. A partir de um determinado tempo de início da soldagem, foi determinado que a carga seria executada quando o o arco voltaico tivesse se locomovido 60 mm e o processo de soldagem continuaria pelos 40 mm restantes.

4.2.3 Medição e caracterização metalúrgica das trincas

A medição, como mencionada anteriormente, foi realizada com o auxílio de um estereoscópio, ZEISS SteREO Discovery V20, em uma magnificação de 40x. O software utilizado para medição das trincas foi o Zen Core v2.7 do próprio fabricante do estereoscópio.

Para parâmetros de comparação na identificação da liga mais susceptível a trincas a quente, foram utilizadas as amostras obtidas no ensaio de soldabilidade Trans-Varestraint, foram usadas as seguintes medidas: maior comprimento de trinca (MCL), comprimento total das trincas (TCL) e máximo comprimento de trinca na direção de soldagem (MCD).

¹ A ser publicado pelas Edições UFC em 2025.

O maior comprimento de trinca (MCL), corresponde, como o nome informa, o maior comprimento de trinca. É importante ressaltar, para o critério de escolha de trinca, foram determinadas trincas a quente de solidificação, aquelas que se originam na linha de soldagem, independente da direção da mesma em relação a direção de soldagem.

No caso do MCL, foram escolhidas as maiores trincas de cada ensaio, independentemente de sua direção e foram comparadas em relação a energia utilizada, a liga e a deformação aplicada, quando possível.

O comprimento total das trincas (TCL), representa o somatório de todos os comprimentos de trinca obtidos durante o ensaio, ou seja, todas as trincas que se encaixam no critério de escolha têm o seu comprimento somado, objetivando um valor, o mesmo será comparado com outros ensaios da mesma forma que o MCL.

O máximo comprimento de trinca na direção de soldagem (MCD), necessita da aplicação de uma técnica específica, na qual sob as linhas de trinca é traçado uma linha vertical na direção de soldagem, que tornará a linha da trinca em uma hipotenusa de um triângulo retângulo, quando as duas extremidades restantes forem conectadas, este cateto formado será determinado como MCD.

Diante da variação de comprimentos e angulações de trincas, foram testadas todas as trincas com capacidade de apresentarem o maior valor, porém, somente será considerado o maior valor obtido de cada ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Medição das composições químicas dos materiais escolhidos

As composições químicas podem ser visualizadas na Tabela 8 para a composição da liga de CuNi 90/10 e para a nova composição química adquirida do preenchimento do canal pelo arame AWS 5.7 ERCuNi, cujo qual, como mencionado anteriormente, foi realizado uma soldagem de 3 cordões para diminuir o efeito da diluição na área estudada para auxiliar a confiabilidade da composição química do material.

Tabela 8 - Composição química das zonas fundidas dos corpos de prova obtidos por espectrometria.

Liga	Composição química p%								
	Cu	Ni	Mn	Fe	Ti	Si	C	P	S
CuNi 90/10	85,7	12,628	0,478	1,1	0,02	0,0087	0,0074	0,0024	0,0033
	Cr	Mo	W	Al	B	Co	Mg	Nb	Pb
	0,0042	0,0034	0	0,0013	0	0,012	0,014	0,0021	0,019
CuNi 70/30	Cu	Ni	Mn	Fe	Ti	Si	C	P	S
	71	25,48	0,731	0,711	0,192	0,01	0,032	0,005	0,005
	Cr	Mo	W	Al	B	Co	Mg	Nb	Pb
	0,0087	0,0028	1,394	0,0031	0,0092	0,17	0,013	0,001	0,002
	V	Ta	Zr	Sn	Zn	N	Hf		
	0,0065	0,18	0,001	0,1	0,025	0,049	0,022		

Fonte: Moura Filho, em andamento¹.

5.2 Estudo dos efeitos da deformação e da energia de soldagem na formação de trincas em ligas cobreníquel

Como mencionado na metodologia, foram analisadas um total de 12 amostras, utilizando de duplicatas para cada condição de ensaio para dedução mais precisa dos dados

¹ A ser publicado pelas Edições UFC em 2025.

obtidos. Os resultados dos ensaios serão abordados a seguir, onde em todas as condições ensaiadas foram evidenciadas a presença de trincas a quente por solidificação.

O parâmetro de escolha para as trincas a quente por solidificação foi determinado pela posição de formação das trincas, sendo que somente foram consideradas trincas por solidificação, aquelas que se originaram na linha de soldagem ou próxima a esta posição.

5.3 Comparação das ligas de cobreníquel com energia constante

Esta primeira etapa, está focada em apresentar os valores alcançados na análise das amostras obtidas do ensaio Trans-Varestraint, para tal análise, foi utilizada uma energia constante equivalente a 1,09 kJ/mm, e duas amostras de ambas as ligas, 90%Cu/10%Ni e 70%Cu/30%Ni, para cada nível de deformação aplicado, 2% e 8%.

Por fim, para a geração e análises dos dados estatísticos foi utilizado o software Statistica v.12 ®, utilizando o modo de análise de variância (ANOVA) para identificar parâmetros críticos que influenciam o comprimento de trincas a quente por solidificação gerados, onde são avaliados os fatores: energia, material e deformação. Cada análise irá gerar um valor “p”, que auxilia a determinar a significância dos resultados para o estudo. Valores menores do que 5% para p, demonstram fatores que apresentam maior influência sobre os resultados, isto é, pode-se afirmar com 95% de confiança, que os fatores analisados influenciam na variável de resposta. No Apêndice A é possível observar as medições dos comprimentos de trincas realizadas. Os resultados apresentados a partir dessa seção são exclusivos deste estudo.

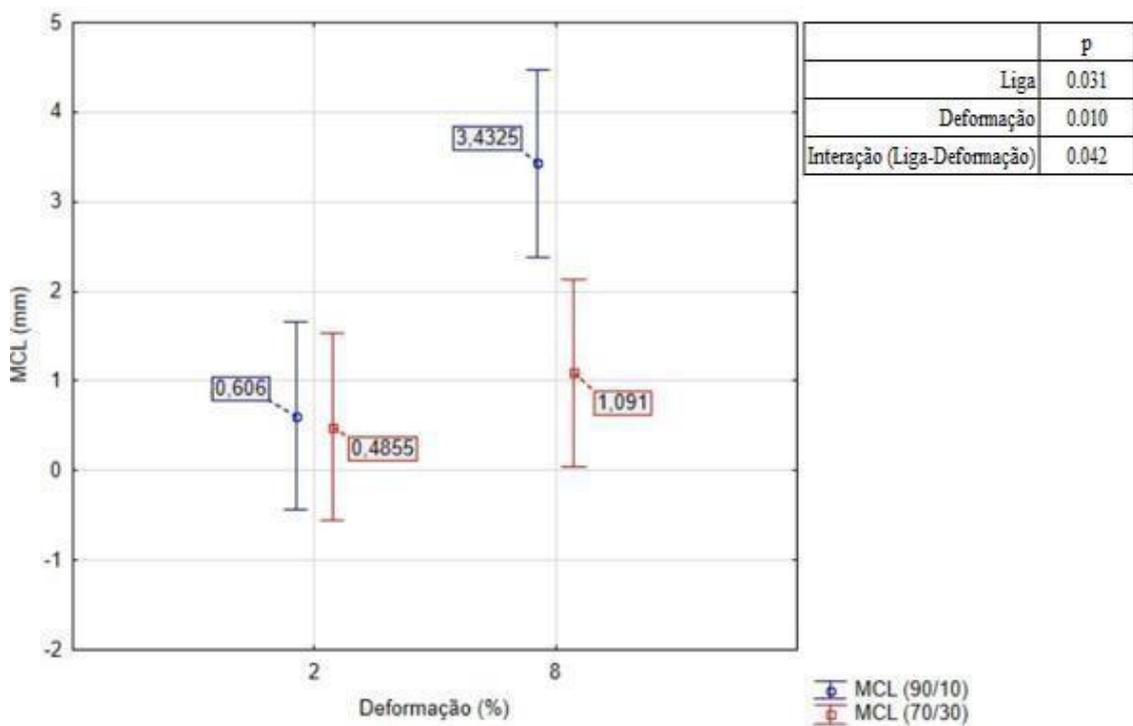
5.3.1 *Análise estatística do MCL*

O maior comprimento de trinca (MCL), com base nos resultados gerados, apresentou valores maiores na liga de CuNi 90/10 em relação a liga de CuNi 70/30, no ensaio Trans-Varestraint.

Os valores de “p” podem ser vistos no Gráfico 1. Observa-se que tanto as ligas estudadas quanto a deformação influenciaram com 95% de confiança o MCL.

O Gráfico 1, também apresenta os valores de MCL para ambas as ligas e nas deformações estudadas. a liga 90/10 foi a que apresentou os maiores valores de MCL na deformação de 8%. Deformações de 2% não apresentaram diferenças significativas para as duas ligas. Aparentemente, o maior percentual de Ni na liga 70/30 proporcionou uma maior resistência do material à propagação das trincas.

Gráfico 1 – Comparação do MCL das ligas.



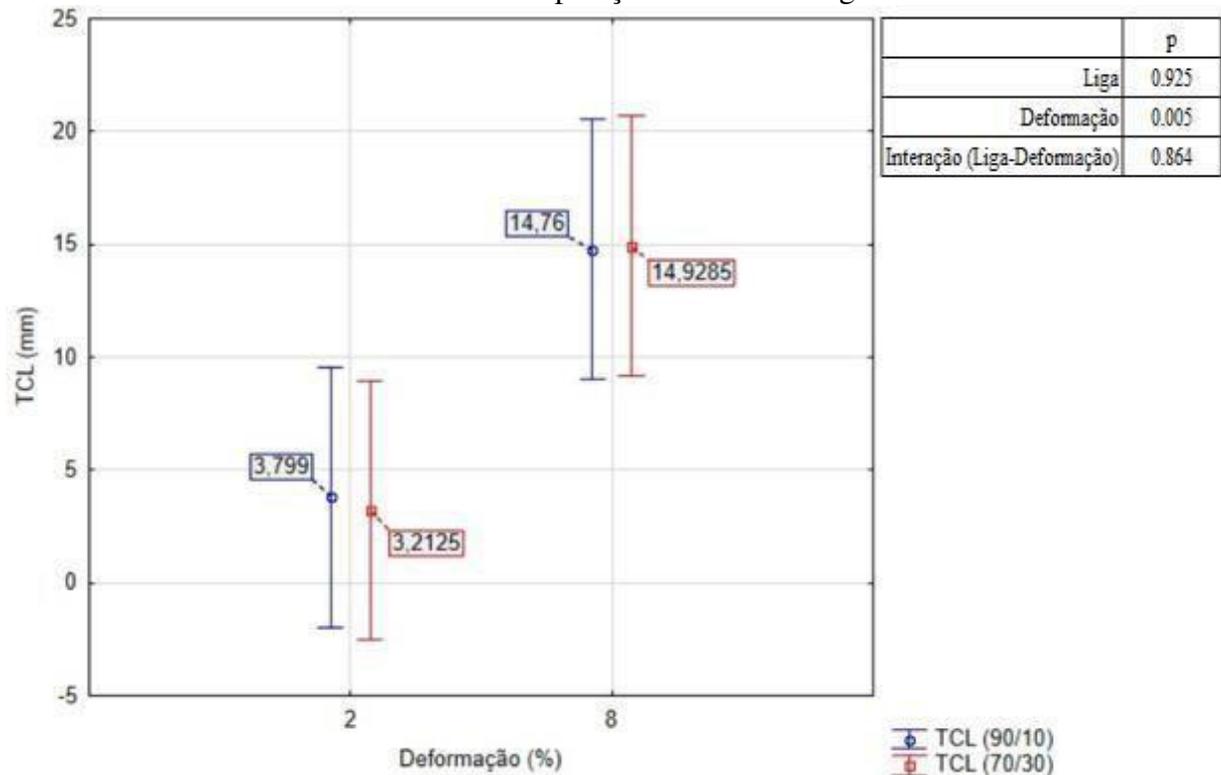
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.2 Análise estatística do TCL

Os valores de “p” podem ser vistos no Gráfico 2. Observa-se que apenas a deformação influenciou com 95% de confiança os valores obtidos em relação TCL, visto que somente a deformação apresentou um valor de p menor do que 5%.

O Gráfico 2 também apresenta o comportamento de ambas as ligas quanto ao comprimento total das trincas de solidificação formadas. Para as ligas utilizadas seus comportamentos se mostraram análogos. O nível de deformação para ambas as ligas apresentou influência.

Gráfico 2 – Comparação do TCL das ligas.



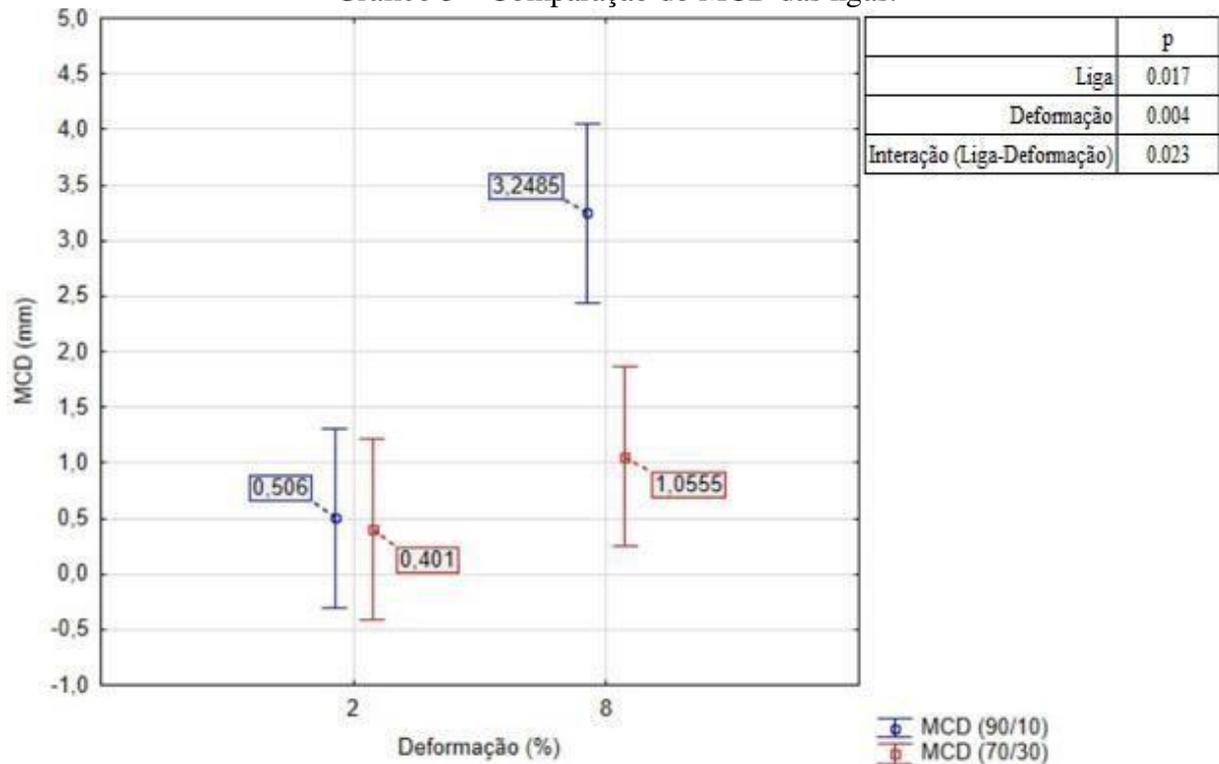
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.3 Análise estatística do MCD

Os valores de “p” podem ser vistos no Gráfico 3. Observa-se que tanto as ligas estudadas quanto a deformação influenciaram com 95% de confiança o MCD. Os resultados de “p” mostram também uma interação forte entre os fatores Liga e Deformação. Em níveis baixos de deformação, ambas as ligas se comportam de forma similar. No entanto, com o aumento da deformação, a liga 70/30 tem apresentado maior resistência ao crescimento de trincas (Gráfico 3). A liga de CuNi 90/10 apresentou uma trinca de mais de três vezes o tamanho da maior observada na liga de CuNi 70/30.

Novamente, o maior percentual de Ni na liga 70/30 pode ter proporcionado uma maior resistência do material à propagação das trincas, possivelmente devido a precipitação de fases secundárias, visto que a liga de CuNi 90/10 solidifica predominantemente como fase γ .

Gráfico 3 – Comparação do MCD das ligas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Resultados da comparação das duas energias de soldagem com a liga CuNi 70/30

A análise a partir deste subitem é focada nos dados obtidos nos ensaios Trans-Varestraint, quando foram utilizadas duas energias distintas, equivalentes a 1,09 kJ/mm e 0,74 kJ/mm. Os ensaios foram realizados em duplicatas, empregando a liga 70%Cu/30%Ni, para cada nível de deformação aplicado, isto é, 2% e 8%, e as duas energias mencionadas anteriormente.

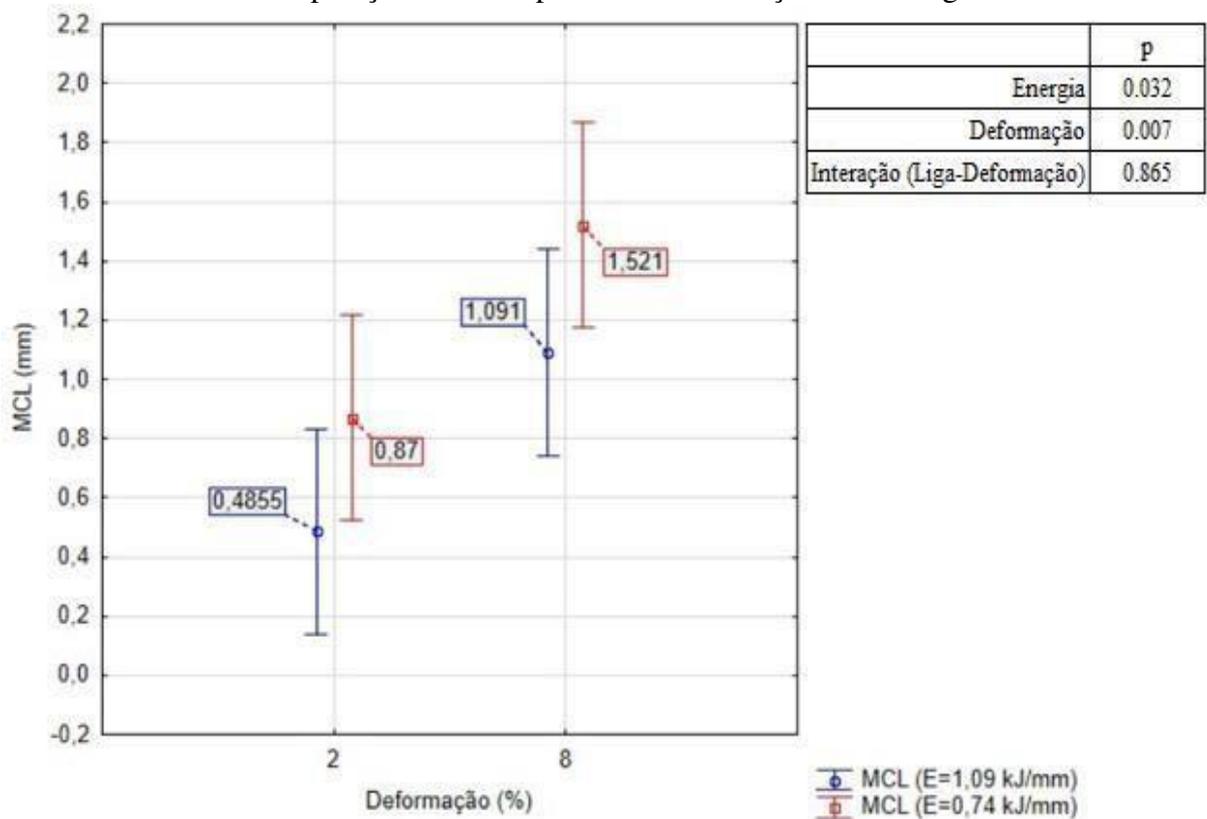
5.4.1 Resultados obtidos em relação ao MCL

De forma geral, o maior comprimento de trinca (MCL), com base nos resultados gerados, apresentou valor maior quando é utilizada a energia mais baixa (0,74 kJ/mm) em relação a energia alta (1,09 kJ/mm).

Os valores de “p” podem ser vistos no Gráfico 4. Observa-se que tanto a energia quanto a deformação influenciaram com 95% de confiança o MCL.

Em relação ao gráfico do MCL, é percebido um aumento do mesmo em relação ao aumento da deformação. Contudo, em energia baixa verificou-se a formação de trinca com maior comprimento, resultado não esperado.

Gráfico 4 – Comparação do MCL para cada deformação com energias distintas.



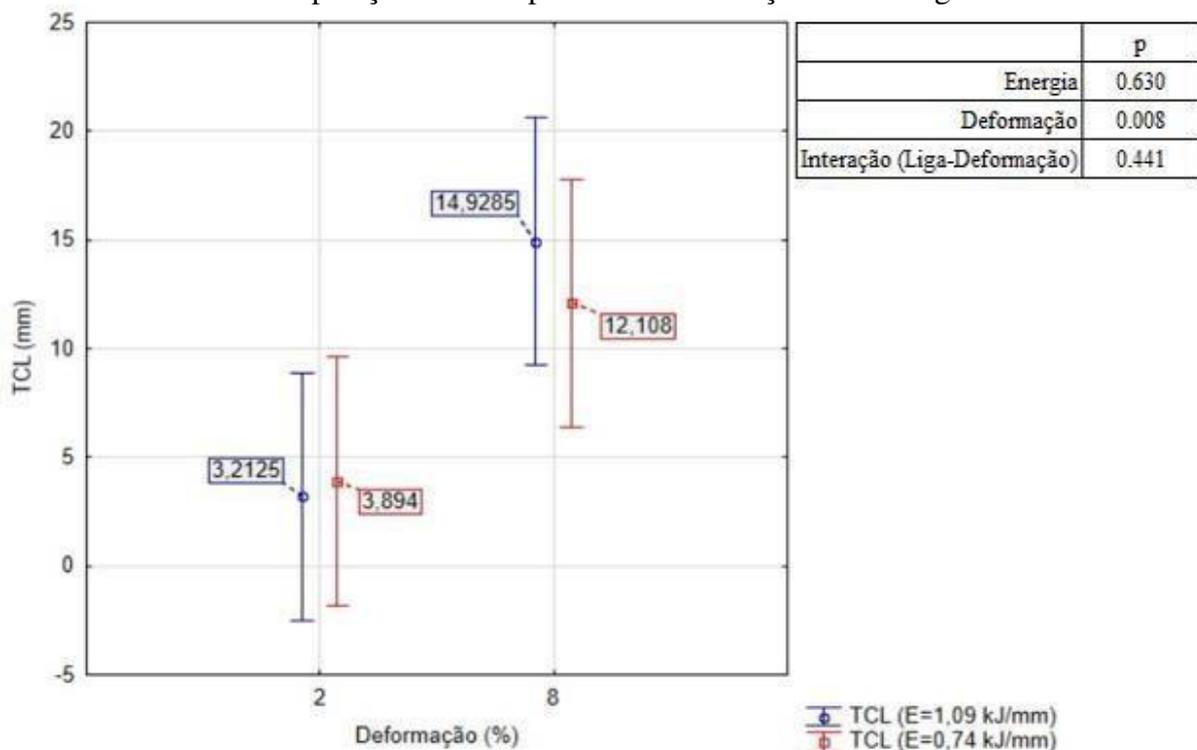
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.2 Resultados obtidos em relação ao TCL

Os valores de “p” podem ser vistos no Gráfico 5. Observa-se que apenas a deformação influenciou com 95% de confiança o TCL

As figuras do Apêndice B, representam as trincas consideradas para a análise dessa etapa, junto com suas medições, é possível notar uma elevada presença na quantidade de trincas observadas nesses ensaios.

Gráfico 5 – Comparação do TCL para cada deformação com energias distintas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

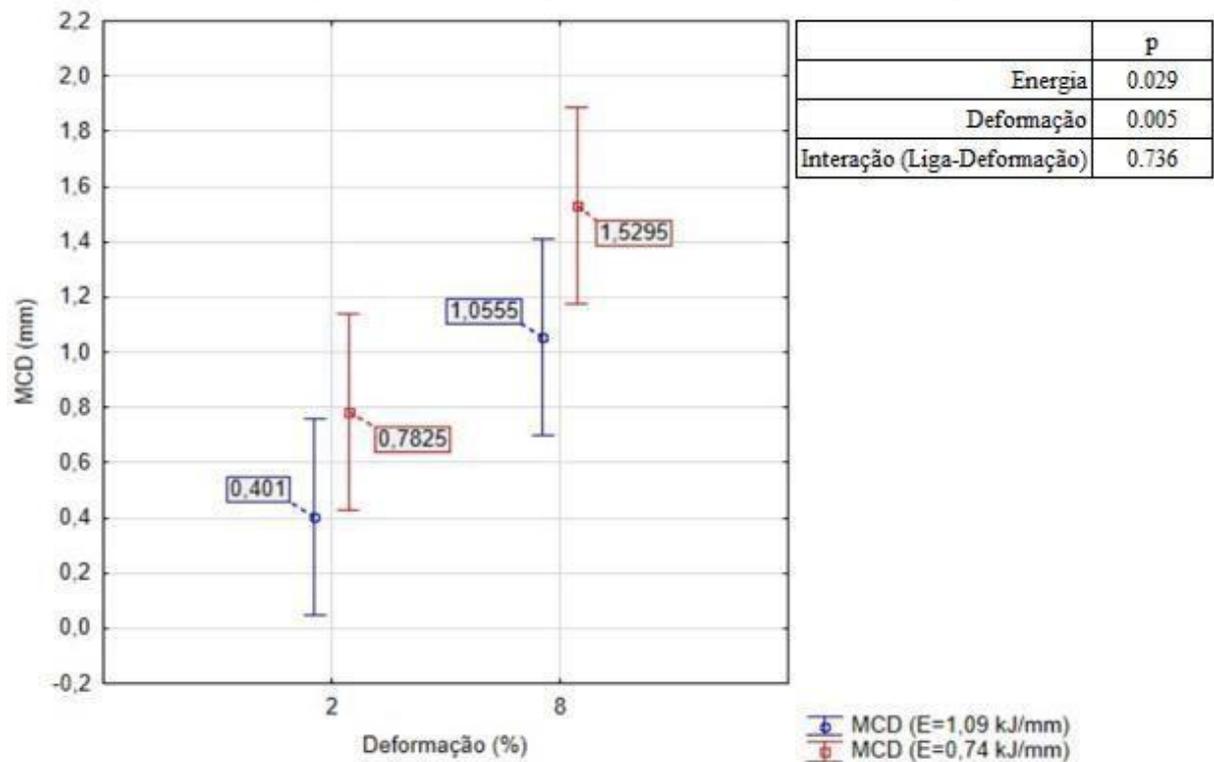
5.4.3 Resultados obtidos em relação ao MCD

Os valores do máximo comprimento de trincas na direção de soldagem (MCD), também apresentaram um comportamento próximo aos dados obtidos no MCL, houve uma grande distinção nos dados observados quando aplicado as deformações de 2% e 8%. Esse

comportamento pode estar vinculado ao fato de que a energia mais alta proporcionou que essa amostra tivesse tempo para amortecer as trincas geradas, isto é, como a amostra que utilizou a energia alta teve mais tempo para solidificar, pois alcançou a temperatura máxima mais rapidamente que a amostra que utilizou a energia baixa, e nessa diferença de tempo, é possível que houve o amortecimento das trincas e devido a isso é percebido trincas menores.

Os valores de “p” podem ser vistos no Gráfico 6. Observa-se que tanto a energia quanto a deformação influenciaram com 95% de confiança o MCD. Resultado similar ao observado na análise do maior comprimento de trinca (MCL).

Gráfico 6 – Comparação do MCD para cada deformação com energias distintas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos das análises das amostras dos ensaios de Trans-Varestraint, em ambas as ligas cuproníquel utilizadas, e em todas as energias e deformações aplicadas, é possível concluir:

- (a) A liga 70/30 apresentou uma maior resistência ao crescimento de trincas em relação a liga 90/10;
- (b) em todas as análises realizadas, o nível de deformação teve um valor para p menor do que 5%, indicando que em todos os casos a deformação foi apresentada como um fator que apresenta maior influência na geração de trincas;
- (c) em relação aos dados obtidos do gráfico do TCL, durante a comparação de energia da liga de CuNi 70/30, é possível inferir que a deformação aplicada afeta diretamente a quantidade de trincas observadas na chapa, enquanto a variação de energia se torna evidente na deformação de 8%.

REFERÊNCIAS

- CALLISTER, William D. Binary Isomorphous Systems. In: WILLIAM, Callister. **Materials Science and Engineering. An Introduction**. 7. ed. Department Of Metallurgical Engineering The University Of Utah: John Wiley & Sons, Inc., 2017. p. 259.
- MODENESI. Fissuração em juntas soldadas. In: MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: 2012. p. 156-177.
- HOLSBERG, Paul. Weldability Studies of Modified 70-30 CuNi Alloys. **Welding Research Supplement**. Annapolis, Md, p. 554-558. dez. 1970.
- SANTOS, Georgia Effgen. **ESTUDO DA SOLDABILIDADE DE CONSUMÍVEIS DE LIGAS A BASE DE NÍQUEL EM SOLDAGEM DISSIMILAR COM AÇO CARBONO POR MEIO DO ENSAIO TRANS-VARESTRAINT**. 2020. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- HABASHI, Fathi. **Alloys: Preparation, Properties, Applications**. Québec: Wiley, 1998.
- NABOKA, Michael; GIORDANO, Jennifer. **Copper alloys: Preparation, properties, applications**. Nova York: Nova Science Publishers, 2011.
- BARROS, Edilson Ferreira de. **AValiação de Liga de Cuproníquel em Água do Mar Contaminada com Fertilizantes Nitrogenados**. 2020. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Montagem Industrial, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2020.
- INSTITUTE, German Copper. **Copper-Nickel Alloys: Properties, Processing, Applications**. 2018. Disponível em: https://www.copper.org/applications/marine/cuni/properties/DKI_booklet.html. Acesso em: 12 ago. 2024.
- TERMOMECANICA. **Cuproníquel 90-10**. 2021. Disponível em: https://www.termomecanica.com.br/download/conteudo_tecnico/Cupron%C3%ADquel%2090-10.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.
- STATHARAS, Dimitrios *et al.* **Getting the Strain Under Control: Trans-Varestraint Tests for Hot Cracking Susceptibility**. 2019. Disponível em: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/server/api/core/bitstreams/a09e401d-decd-478f-a0f9-6daa54254390/content>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- Shankar V, Gill TPS, Mannan SL, Sundaresan S. **Criteria for hot cracking evaluation in austenitic stainless steel welds using longitudinal varestraint and transvarestraint tests**. Science and Technology of Welding and Joining. 2000;5(2):91-97. doi:10.1179/136217100101538074.
- ASM Handbook. The Metals Handbook Desk Edition. 2ª ed., 1998.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2. ed. Rio de Janeiro: Wiley, 2003.

CTSTUBES. **ASTM B 111/B 111M Copper and Copper-Alloy seamless tubes C44300, C68700, C71500, C70600**. 2004. Disponível em: <https://www.ctstubes.com/wp-content/uploads/2018/10/ASTM-B111-Copper-and-Brass-Tubes.pdf>. Acesso em: 14 ago.2024.

ALLOY, Tec. **AWS A5.7/A5.7 ER CuNi**. 2016. Disponível em: [https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/cobre-bronze-e-suas-ligas/arames-e-varetas/TEC%20ALLOY%2067%20\(ER%20CuNi\).pdf](https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/cobre-bronze-e-suas-ligas/arames-e-varetas/TEC%20ALLOY%2067%20(ER%20CuNi).pdf). Acesso em: 4 jul. 2024.

Alan A. L. **Mechanism of Solidification Cracking During Welding of High-Strength Steels for Subsea Linepipe**, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/1-Transvarestraint-weldability-test-rig_fig55_31229309. Acesso em: 13 jul. 2024.

RML. **Equipamentos para soldagem TIG**. Disponível em: <https://www.rmlmaquinas.com.br/loja/noticia.php?loja=762235&id=47>. Acesso em: 3 jul. 2024.

**APÊNDICE A – MEDIÇÕES UTILIZADAS NAS AVALIAÇÕES DAS TRINCAS
DA LIGA CuNi 90/10**

OBSERVAÇÃO:

DX – DEFORMAÇÃO (X %)

AY – AMOSTRA (N° Y)

Figura 15 – Medições realizadas na amostra D2A1.



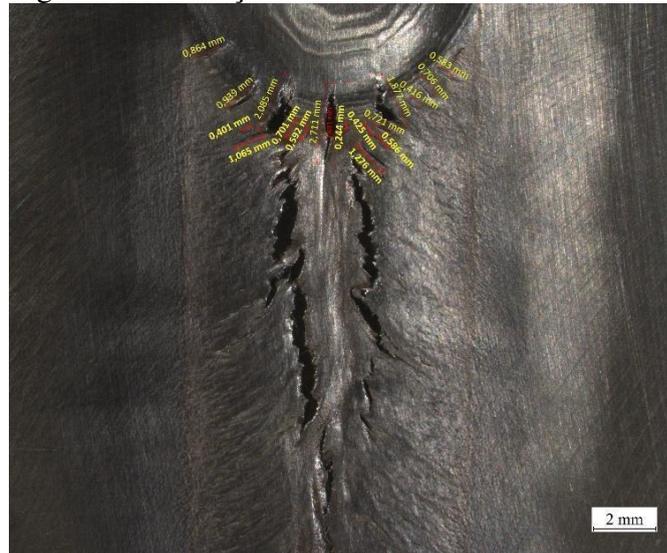
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Medições realizadas na amostra D2A2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Medições realizadas na amostra D8A1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Medições realizadas na amostra D8A2.



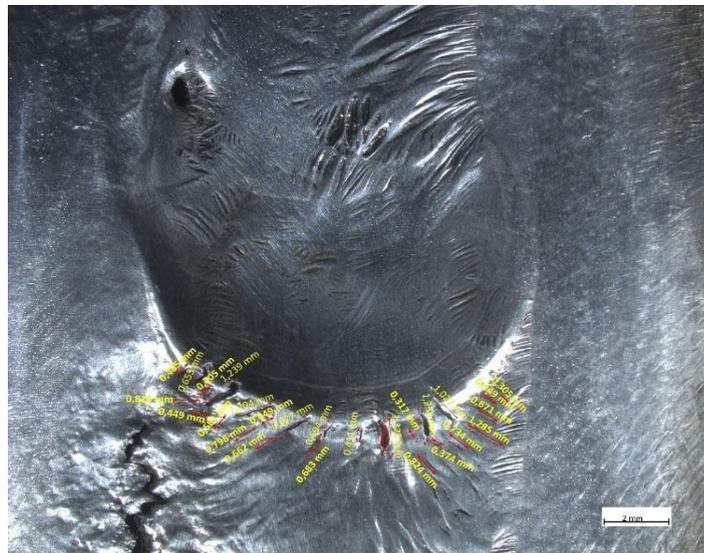
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Medições realizadas na amostra D8A1A*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Medições realizadas na amostra D8A2A*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

