ANÁLISE COMPARATIVA DO GRADIENTE MICROESTRUTURAL NAS SUPERLIGAS DE NÍQUEL HASTELLOY® C-22® E C-22HS®

Caio Felipe de Oliveira Silva, caio.silva@ltad.com.br[1]
Mateus Wiliam Braun, mateus.braun@ltad.com.br[1]
Gustavo Vilela Oliveira, gustavo.oliveira@ltad.com.br[1]
Regina Paula Garcia Moura, regina.garcia@ltad.com.br[1]

[1]Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG 38400-902, Brasil,

Resumo. *As ligas de níquel HASTELLOY® C-22® e HASTELLOY® C-22HS® são essenciais em aplicações de alta responsabilidade, como na indústria de óleo e gás, devido à sua excepcional resistência à corrosão. A performance superior da liga C-22HS está associada a um processamento termomecânico que lhe confere maior resistência mecânica. Este trabalho objetiva investigar e comparar as variações microestruturais ao longo da seção transversal dessas duas ligas. Para isso, amostras foram extraídas das regiões de centro, meio-raio e borda de barras de ambos os materiais. A metodologia envolveu a preparação metalográfica padrão seguida da análise por microscopia óptica e eletrônica de varredura para caracterizar o tamanho de grão, a morfologia e a distribuição de fases. Os resultados indicam uma microestrutura mais refinada e heterogênea para a liga C-22 (27%), com variações significativas da borda para o centro, atribuídas aos gradientes de deformação do processo de deformação a frio por nós executado nesta liga. Em contraste, a liga C-22HS apresentou maior homogeneidade microestrutural. Conclui-se que o histórico de processamento impacta diretamente a uniformidade da microestrutura, o que pode influenciar as propriedades mecânicas locais do componente final.*

Palavras chave: *HASTELLOY® C-22®. HASTELLOY® C-22HS®. Caracterização de materiais. Encruamento.*

Abstract. *HASTELLOY® C-22® and HASTELLOY® C-22HS® nickel alloys are essential in critical applications, such as the oil and gas industry, due to their exceptional corrosion resistance. The superior performance of the C-22HS alloy is associated with a thermomechanical process that imparts it with higher mechanical strength. This work aims to investigate and compare the microstructural variations along the cross-section of these two alloys. For this purpose, samples were extracted from the center, mid-radius, and edge regions of bars of both materials. The methodology involved standard metallographic preparation followed by analysis using optical and scanning electron microscopy to characterize the grain size, morphology, and phase distribution. The results indicate a finer and more heterogeneous microstructure for the C-22 (27%) alloy, with significant variations from edge to center, attributed to the deformation gradients from the cold-working process performed on this alloy. In contrast, the C-22HS alloy exhibited greater microstructural homogeneity. It is concluded that the processing history directly impacts the uniformity of the microstructure, which can influence the local mechanical properties of the final component.*

Keywords: *HASTELLOY® C-22®, HASTELLOY® C-22HS®, Material characterization. Hardening.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda por materiais capazes de suportar condições operacionais extremas impulsionou o desenvolvimento de superligas à base de níquel, cruciais para a segurança e eficiência de setores industriais como óleo e gás, químico e aeronáutico. Neste contexto, as ligas da família HASTELLOY® se destacam. Desenvolvidas a partir de meados do século XX pela Haynes International, essa classe de materiais foi projetada para oferecer uma resistência superior a uma vasta gama de ambientes corrosivos. A liga HASTELLOY® C-22® (UNS N06022), por exemplo, consolidou-se como uma solução robusta contra a corrosão por pite e frestas, especialmente em meios contendo cloretos, sendo amplamente aplicada em reatores químicos e componentes para a indústria farmacêutica (Davis, 2000; Haynes International, 2021). Para atender a requisitos ainda mais rigorosos, particularmente na exploração de poços de petróleo e gás com presença de H_2S (gás sulfídrico), foi desenvolvida a liga HASTELLOY® C-22HS® (N07022), que alia a notável resistência à corrosão de seu predecessor a um patamar de resistência mecânica significativamente mais elevado (Haynes International, 2017). Neste trabalho, a fim de evitar repetição e simplificar a nomenclatura, as ligas HASTELLOY® C-22® e HASTELLOY®

C-22HS® serão subsequentemente referidas como liga C-22 e liga C-22HS.

O elo entre a microestrutura e as propriedades mecânicas é a chave para a performance e confiabilidade desses materiais em serviço. Parâmetros como limite de escoamento, resistência à tração e ductilidade são ditados diretamente por características microestruturais como o tamanho de grão, a distribuição de fases e a densidade de defeitos cristalinos (Courtney, 2000). Enquanto a liga C-22 é classicamente utilizada na condição solubilizada, exibindo uma matriz monofásica de grãos equiaxiais, a liga C-22HS adota uma abordagem distinta para alcançar suas propriedades superiores. Ela é submetida a um processo termomecânico que envolve encruamento a frio e um tratamento térmico de envelhecimento, resultando na precipitação controlada de fases endurecedoras na matriz metálica (Asphahani, 1980).

A compreensão aprofundada de como esses diferentes estados microestruturais se traduzem em desempenho mecânico é, portanto, fundamental. A resistência à deformação permanente de uma liga metálica, é um fenômeno governado em escala atômica pelo movimento de defeitos lineares na rede cristalina, conhecidos como discordâncias (Hull & Bacon, 2011). A facilidade com que as discordâncias se movem através do material sob tensão determina sua resistência mecânica. Em ligas como a C-22, o principal obstáculo ao movimento desses defeitos advém da solução sólida, onde os átomos de soluto distorcem localmente a rede. Na liga C-22HS, este efeito é amplificado pela presença de precipitados finamente dispersos, que agem como barreiras eficazes, exigindo uma tensão muito maior para permitir o deslizamento das discordâncias e, consequentemente, a deformação plástica (Dieter, 1988). A microestrutura, portanto, atua como um campo de obstáculos cujo arranjo define o comportamento mecânico macroscópico da liga.

Sabe-se que processos de fabricação, como o forjamento e a laminação, podem gerar gradientes térmicos e de deformação ao longo da seção transversal de um componente, resultando em uma microestrutura não homogênea. Essa heterogeneidade pode levar a variações locais nas propriedades mecânicas, com potenciais implicações para a integridade do componente. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho se propõe a realizar uma análise comparativa detalhada da microestrutura das ligas C-22 e C-22HS. O objetivo é investigar e quantificar as possíveis diferenças microestruturais entre as regiões de centro, meio-raio e borda de amostras de ambas as ligas, buscando correlacionar as variações observadas com os distintos históricos de processamento de cada material.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Neste trabalho foram utilizadas ligas à base de níquel-cromo-molibdênio do tipo C-22 e C-22 HS, fornecidas pela Haynes International. A liga C-22 foi analisada no condição solubilizada, aqui denominada C-22 (SA) e na sua condição deformada a frio, detalhada na seção seguinte, e aqui denominada C-22 (27%), enquanto a liga C-22 HS, conforme a especificação ASTM B637-18, foi estudada na condição como recebida, servindo como parâmetro de comparação microestrutural.

Tabela 1: Composição química das ligas C-22 e C-22HS (em % peso) (Haynes International, 2017).

Elemento químico	Peso (%) C-22	Peso (%) C-22HS
Níquel	56	61
Cromo	22	21
Molibdênio	13	17
Ferro	3	2,0
Cobalto	2,5	1,0
Tungstênio	3	1,0
Manganês	0,5	0,8
Silício	0,08	0,08
Carbono	0,01	0,01
Cobre	0,5	0,5
Vanádio	0,35	-
Alumínio	-	0,5

A principal diferença entre elas é que a C-22HS possui um teor de Molibdênio mais elevado e é projetada para endurecimento por encruamento, além de apresentar uma microestrutura refinada de fábrica para otimização das propriedades mecânicas.

2.2. Processo de Deformação a Frio

A amostra da liga C-22 foi submetida a um processo de laminação a frio para induzir o encruamento. O processo consistiu na passagem do material por um laminador de rolos, com uma redução de diâmetro total de 27%. A deformação foi aplicada de forma controlada e progressiva com diferentes passos até a laminação final para garantir a uniformidade ao longo da amostra.

2.3. Preparação Metalográfica

As amostras de ambas as ligas foram seccionadas transversalmente à direção de laminação, utilizando uma máquina de corte por eletroerosão a fio, a fim de evitar alterações microestruturais induzidas pelo calor. As amostras foram embutidas em resina e submetidas a um processo de lixamento manual com lixas de carbeto de silício em granulometrias sucessivas de 240, 400, 600 e 1200 mesh. Posteriormente, realizou-se o polimento com pastas de diamante em suspensão alcoólica, nas granulometrias de 9 µm, 6 µm, 3 µm e 1 µm, até a obtenção de uma superfície especular e livre de riscos, conforme ASTM E3-11 (2017).

O ataque químico para revelação da microestrutura foi realizado por via eletrolítica. Foi utilizada uma solução de 95% ácido clorídrico e 5% ácido oxálico, aplicando-se uma tensão de 5 V por uma fonte da marca Instrutherm FA-3003 por um período de 8 a 10 segundos. Após o ataque, as amostras foram lavadas em água corrente e submetidas a uma limpeza final em banho de ultrassom com álcool isopropílico para remover a camada de óxido formada. Os resultados são apresentados no capítulo 3.

2.4. Caracterização Microestrutural

A análise microestrutural foi conduzida em três regiões distintas das amostras: borda, meio raio e centro, para avaliar a homogeneidade do material. Foram empregadas as seguintes técnicas:

- Microscopia Ótica (MO): observação conduzida em microscópio óptico (MO) Olympus, modelo BX51M. Neste dispositivo está acoplado uma câmera digital Zeiss, modelo AxioCam ICc5 e, juntamente com o uso do software ZenCore foi realizada a captura e análise das imagens necessárias para a análise geral da morfologia, tamanho e distribuição dos grãos.
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): Análises de MEV foram conduzidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução da marca Zeiss, modelo Supra 40, do tipo FEG, equipado com análise de energia dispersiva de raio X para obter imagens de maior magnificação e detalhamento, permitindo a observação de feições como bandas de deformação e a topografia da superfície atacada.
- Mapa de Microdureza: Foi realizado um mapa de microdureza Vickers com o Microdurometro Struers, Duramin 40 AC1, em uma seção transversal das amostras para correlacionar as variações de dureza com as características microestruturais observadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Microestrutura da Condição Inicial (C-22 SA)

A análise a seguir apresenta a microestrutura da liga C-22 na condição como recebida. Por meio de MO, como mostra a Figura 1, e MEV, Figura 2, foi possível observar uma microestrutura monofásica austenítica (CFC), caracterizada por grãos poligonais e equiaxiais. A presença de maclas de recozimento é uma característica típica para ligas de níquel com baixa energia de falha de empilhamento após o tratamento de solubilização. O tamanho de grão demonstra uniformidade ao longo da amostra, indicando um processamento termomecânico adequado. O mapa de microdureza nesta condição Figura 3 mostra valores de dureza baixos e homogêneos (260 - 439 HV0,1), consistentes com um material no estado recozido e livre de tensões residuais significativas. Não há a presença de bandas de deformação.

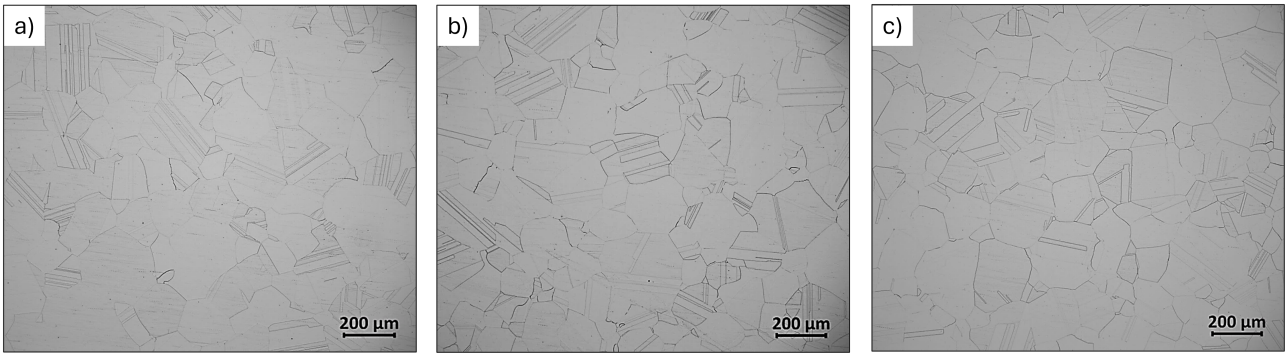

Figura 1: Imagens do MO da liga C-22 para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

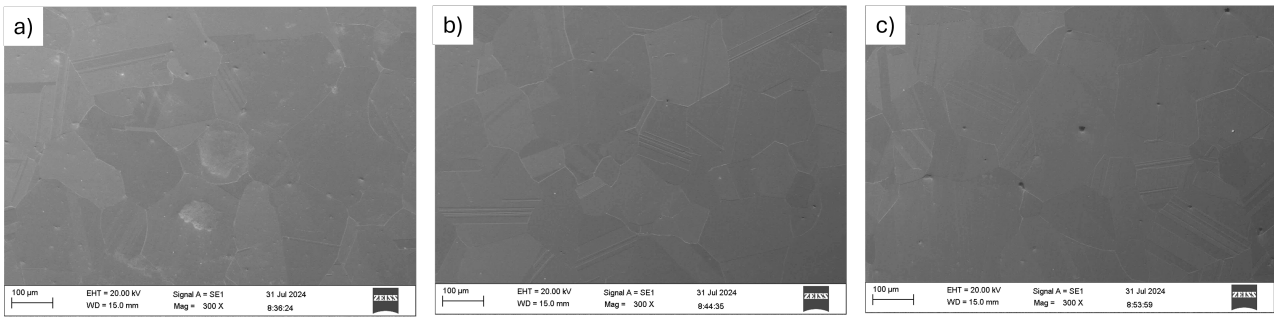

Figura 2: Imagens do MEV da liga C-22 para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda Figura 1: Imagens do MO da liga C-22 para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

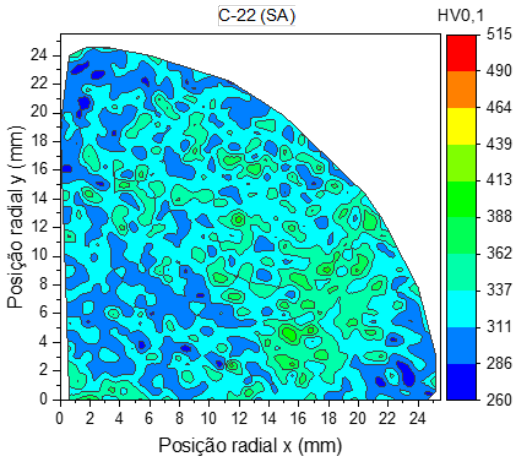

Figura 3: Mapa de microdureza da liga C-22 Solubilizada Figura 1: Imagens do MO da liga C-22 para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

3.2. Microestrutura Após Deformação a Frio (C-22 27%)

Após a laminação a frio com 27% de redução, a microestrutura da liga C-22 sofreu alterações drásticas, como pode-se visualizar nas Figuras 4 a 6. A característica mais evidente é a diminuição do tamanho de grão, decorrente do acentuado alongamento dos grãos na direção da laminação (plano da imagem). Em maior magnificação, utilizando MEV, foi possível identificar a presença de bandas de deformação (ou bandas de cisalhamento) no interior dos grãos mais grosseiros, indicando regiões de deformação plástica localizada e intensa na região da borda como mostra a Figura 5. O mapa de microdureza da amostra deformada (Figura 6) revela um aumento significativo nos valores de dureza em comparação com a condição inicial. Passando de (260 - 439 HV0,1) para (311 - 515 HV0,1), com maiores valores identificados na região da borda. Este aumento é a manifestação macroscópica do encruamento. O mapa também indica pequenas heterogeneidades na dureza, associadas à orientação cristalográfica de cada grão e à intensidade das bandas de deformação.

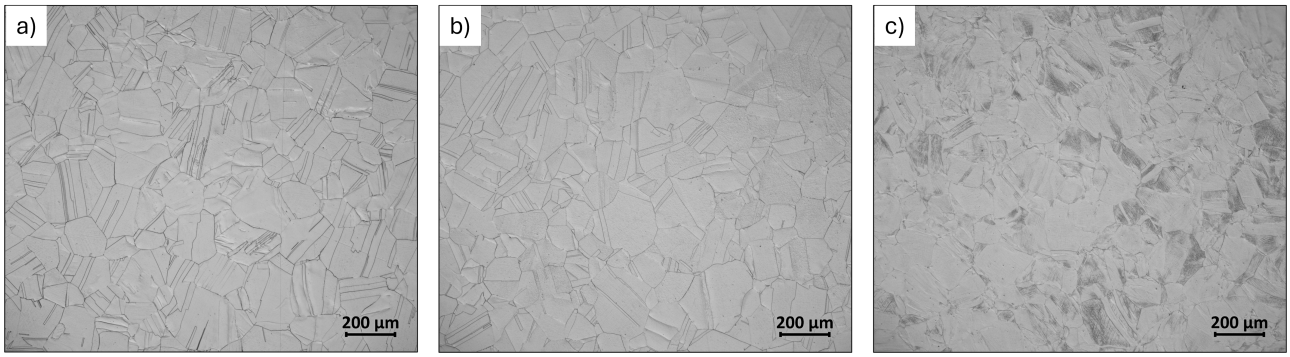

Figura 4: Imagens do MO da liga C-22 27% para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

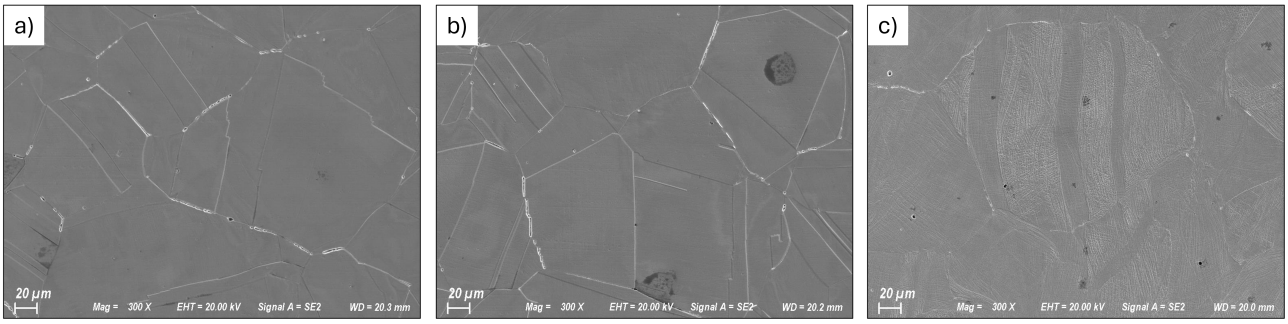

Figura 5: Imagens do MEV da liga C-22 27% para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

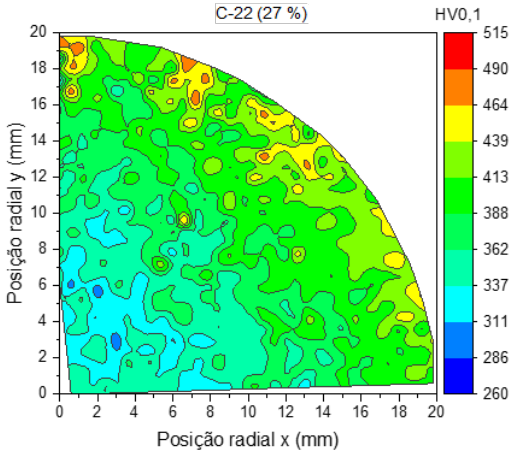

Figura 6: Mapa de microdureza da liga C-22 27% (LTAD, 2025).

3.3. Microestrutura de Referência (C-22HS)

A análise da liga C-22HS, revela uma microestrutura significativamente mais refinada e homogênea (Figuras 7 e 8). Os grãos são notavelmente menores e mais uniformes em tamanho e distribuição quando comparados aos da liga C-22 solubilizada. Esta microestrutura é o resultado de um processo termomecânico rigorosamente controlado durante sua fabricação, visando otimizar as propriedades mecânicas desde o início. A ausência de grãos grosseiros ou morfologia heterogênea demonstra um alto grau de controle de processo. O mapa de microdureza (Figura 9) confirma essa homogeneidade, apresentando valores de dureza elevados (401 - 540 HV0,1) (superiores aos da C-22 solubilizada) e com baixa dispersão ao longo de toda a amostra.

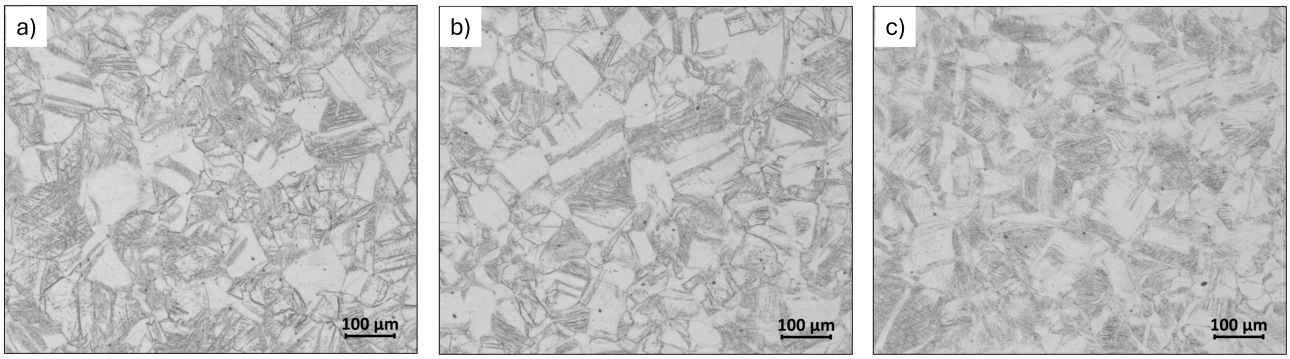

Figura 7: Imagens do MO da liga C-22HS para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

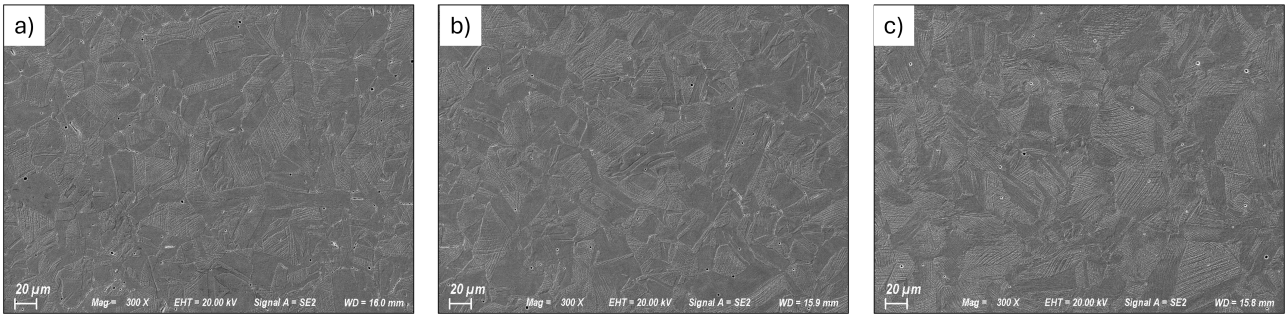

Figura 8: Imagens do MEV da liga C-22HS para as regiões: a) centro; b) meio raio; e c) borda (LTAD, 2025).

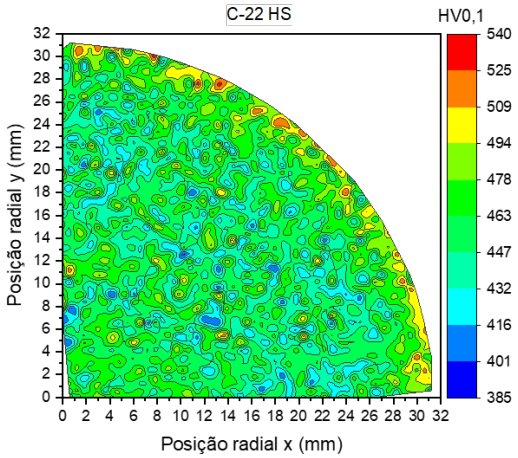

Figura 9: Mapa de microdureza da liga C-22HS (LTAD, 2025).

3.4. Discussão e Análise Comparativa

A deformação plástica a frio impõe uma mudança fundamental na microestrutura do material. O alongamento dos grãos é uma consequência cinemática da mudança de forma imposta pela laminação. No nível atômico, a deformação ocorre pelo movimento de discordâncias. Com o aumento da deformação, a densidade de discordâncias cresce exponencialmente. Elas se movem, se multiplicam e interagem umas com as outras, formando emaranhados e estruturas celulares que atuam como barreiras eficazes ao seu próprio movimento subsequente (Askeland; Wright, 2016). Para que a deformação continue, uma tensão maior precisa ser aplicada, o que se traduz no aumento da resistência mecânica e da dureza do material – o cerne do fenômeno do encruamento.

Ao comparar a microestrutura da liga C-22 deformada com a da liga C-22HS, nota-se que a C-22HS já apresenta, na condição como recebida, grãos mais finos e uma distribuição microestrutural extremamente homogênea. Um processo de laminação bem controlado, como o aplicado na fabricação da C-22HS, resulta em um refinamento de grão mais uniforme em toda a seção do produto. Esta homogeneidade microestrutural é crucial para as propriedades mecânicas finais, pois garante um comportamento mais isotrópico e previsível, além de contribuir para uma melhor combinação de resistência e tenacidade. A microestrutura refinada e homogênea da C-22HS serve, portanto, como um modelo ideal do que pode ser alcançado através de um controle rigoroso do processo de conformação mecânica.

Os contornos de grão alongados e a alta densidade de discordâncias na amostra deformada atuam como fortes obstáculos não apenas ao movimento de novas discordâncias, mas também à propagação de trincas. Uma trinca que tenta se propagar através desta microestrutura encruada encontrará uma rede densa de barreiras, sendo forçada a mudar de direção múltiplas vezes, o que dissipa energia e aumenta a tenacidade à fratura do material (Courtney, 2000).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho caracterizou com sucesso as microestruturas de ligas de níquel em diferentes condições, permitindo as seguintes conclusões:

- A liga C-22 na condição como recebida (solubilizada) apresentou uma microestrutura de grãos equiaxiais e macladados, com baixa dureza.
- Após 27% de deformação a frio, a liga C-22 exibiu uma microestrutura com grãos alongados e um significativo aumento de dureza, confirmando a eficácia do encruamento como mecanismo de endurecimento, porém, apresentando heterogeneidade na seção transversal da barra.

- A liga C-22HS apresentou uma microestrutura de grãos finos e homogêneos, resultado de um processo de fabricação otimizado, servindo como um exemplo de alto desempenho mecânico e homogeneidade.
- A comparação entre as amostras evidencia que tanto o refino de grão (presente na C-22HS) quanto o encruamento (induzido na C-22 27%) são rotas eficazes para aumentar a resistência mecânica, ao criarem barreiras microestruturais ao movimento de discordâncias e à propagação de trincas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua profunda gratidão ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a todos os seus colaboradores pelo indispensável suporte técnico. Um agradecimento especial é direcionado aos engenheiros do laboratório, por sua dedicação e mentoria na condução de projetos com alunos de iniciação científica, cujo apoio foi fundamental para a realização deste estudo. Agradecemos à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC-UFU) pela infraestrutura disponibilizada e à comissão organizadora do 33º Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pela oportunidade de compartilhar este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. (2016). *Ciência e engenharia dos materiais.*(8nd print ed.),247-273.ISBN: 978-1-118-32457-8

ASPHAHANI, A. I. (1980). Corrosion Resistance of Nickel-Containing Alloys in Hydrochloric Acid and Hydrogen Chloride,489-499.

ASTM INTERNATIONAL. (2018). *ASTM B637-18: Standard Specification for Precipitation-Hardening and Cold Worked Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock.*,1-7. https://doi.org/10.1520/B0637-16

ASTM INTERNATIONAL.(2017). *ASTM E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.*,1-12. https://doi.org/10.1520/E0003-11R17

COURTNEY, T. H.(2000) *Mechanical Behavior of Materials.*.(2nd print ed.),184-208.ISBN-13 978-0-511-65836-5.

DAVIS, J. R. (2000). *Nickel, Cobalt, and Their Alloys.*, 284-322.ISBN: 0-87170-685-7

DIETER, G. E. (1988) *Mechanical Metallurgy.*(3rd print ed.),158-186.ISBN 07-016890-3

HAYNES INTERNATIONAL. (2021).*HASTELLOY® C-22® alloy: Corrosion-Resistant Nickel-Chromium-Molybdenum Alloy.*

HAYNES INTERNATIONAL.(2017).*HASTELLOY® C-22HS® alloy: High-Strength Corrosion-Resistant Alloy.*

HULL, D.; BACON, D. J. (2011). *Introduction to Dislocations.*(5th print ed.),109-136.https://doi.org/10.1016/C2009-0-64358-0

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA EM ATRITO E DESGASTE (LTAD-UFU). (2025).*Mapas de dureza obtidos por ensaios realizados nas amostras das ligas HASTELLOY®*

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.