

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
ETEC TRAJANO CAMARGO  
CURSO DE TÉCNICO EM METALURGIA**

**LUCAS LUAN TINTINO BARBOZA  
SAMARA DOS SANTOS PEREIRA DE PAULA**

**FLUÊNCIA/IMPACTO DA POROSIDADE DO CORPO DE PROVA DA LIGA  
CoCrMo**

**LIMEIRA - SP  
2024**

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
ETEC TRAJANO CAMARGO  
CURSO TÉCNICO DE METALURGIA**

**LUCAS LUAN TINTINO BARBOZA  
SAMARA DOS SANTOS PEREIRA DE PAULA**

**FLUÊNCIA/IMPACTO DA POROSIDADE DO CORPO DE PROVA DA LIGA  
CoCrMo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora, como exigência parcial para a obtenção de título de Técnico em Metalurgia da Escola Técnica Trajano Camargo sob a orientação do Professor João Augusto Montesano.

**LIMEIRA - SP  
2024**

## RESUMO

O objetivo desse estudo é aumentar a confiabilidade do ensaio de tração da liga CoCrMo. Este estudo surgiu a partir das reprovações observadas nos ensaios mecânicos das ligas metálicas de Co-Cr-Mo. As análises metalográficas mostraram uma alta porosidade nos corpos de prova, o que comprometia a obtenção dos resultados esperados. Para abordar esse problema, decidimos modificar as dimensões dos corpos de prova, optando por um modelo menor. Essa alteração visa promover uma solidificação mais rápida, reduzindo a formação de porosidade e, conseqüentemente, melhorando a resistência mecânica das ligas. O Corpo de Prova Novo (CPN) proposto é uma tentativa de otimizar o processo e garantir que os ensaios mecânicos atendam às especificações necessárias. Esperamos que os resultados deste estudo contribuam para avanços na compreensão e aplicação das ligas Co-Cr-Mo em contextos biomédicos.

**Palavras-chave:** Ligas CoCrMo, Propriedades mecânicas, Materiais biomédicos.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>4</b>
1.1	– OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	– OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3	- JUSTIFICATIVAS .....	5
<b>2.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>6</b>
2.1	– FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.2-	METODOLOGIA .....	6
2.3-	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	13
<b>3</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>17</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>18</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

O objetivo desse estudo é aumentar a confiabilidade do ensaio de tração da liga CoCrMo. Este estudo surgiu a partir das reprovações observadas nos ensaios mecânicos das ligas metálicas de Co-Cr-Mo. As análises metalográficas mostraram uma alta porosidade nos corpos de prova, o que comprometia a obtenção dos resultados esperados. Para abordar esse problema, decidimos modificar as dimensões dos corpos de prova, optando por um modelo menor. Essa alteração visa promover uma solidificação mais rápida, reduzindo a formação de porosidade e, conseqüentemente, melhorando a resistência mecânica das ligas. O Corpo de Prova Novo (CPN) proposto é uma tentativa de otimizar o processo e garantir que os ensaios mecânicos atendam às especificações necessárias. Esperamos que os resultados deste estudo contribuam para avanços na compreensão e aplicação das ligas Co-Cr-Mo em contextos biomédicos.

### **1.1 – Objetivo Geral**

O objetivo desse estudo visa investigar e compreender o impacto da alteração do corpo de prova no processo de solidificação e sua influência na porosidade e nas propriedades mecânicas de corpos de prova em uma liga de cobalto F-75, CoCrMo, buscando contribuir para o desenvolvimento de materiais biomédicos mais confiáveis e eficazes.

### **1.2 – Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre os efeitos da porosidade em ligas metálicas, com foco na liga de cobalto F-75, CoCrMo.
- Definir um plano de pesquisa detalhado, incluindo os materiais a serem utilizados, os métodos de preparação dos corpos de prova e os procedimentos de análise das propriedades mecânicas e da porosidade.

- Preparar os corpos de prova novo e antigo, seguindo os procedimentos estabelecidos e garantindo a representatividade dos materiais em estudo.
- Realizar análises químicas para verificar a composição dos materiais e avaliar se estão de acordo com as especificações da liga de cobalto F-75, CoCrMo.
- Caracterizar a microestrutura dos materiais por meio de microscopia ótica e eletrônica de varredura, identificando a presença e a distribuição da porosidade
- Quantificar a porosidade presente nos corpos de prova por meio de análises porosimétricas e observar a distribuição e as características dos poros utilizando.

### **1.3 - Justificativas**

A necessidade de garantir a integridade estrutural e as propriedades mecânicas das ligas de CoCrMo é amplamente reconhecida na comunidade científica e na indústria biomédica. A porosidade decorrente do processo de solidificação é uma das principais causas de reprovação, podendo comprometer a segurança e a eficácia dos implantes. Portanto, é essencial desenvolver estratégias que minimizem a formação de porosidade e melhorem. Neste contexto, o novo corpo de prova (CPN) proposto visa aumentar a taxa de resfriamento na região de concentração da porosidade, região que ocorre as deformações, com o objetivo de aumentar a confiabilidade do ensaio de tração.

A análise comparativa entre o CPN, tanto na condição bruta quanto solubilizada, e o CP antigo (CPA) permitirá avaliar o impacto dessa modificação no padrão de solidificação e nas propriedades mecânicas da liga cobalto F-75, CoCrMo. Os resultados obtidos contribuirão para o avanço do conhecimento científico nesta área e poderão fornecer insights valiosos para a validação dos materiais de implantes biomédicos.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 – Fundamentação Teórica**

O problema em questão surgiu quando os corpos de prova utilizados em nossos testes não estavam alcançando a resistência mecânica desejada. Após uma análise detalhada, identificou-se que a principal causa para essa deficiência era a porosidade observada nos corpos de prova. A porosidade, por sua vez, estava sendo ocasionada pela região de solidificação durante o processo de fabricação.

Os corpos de prova, ao serem solidificados, apresentavam uma estrutura porosa que comprometia sua integridade e resistência. A origem da porosidade estava relacionada à solidificação, que ocasionava a formação de bolhas de ar e outros vazios na estrutura do material, resultando em corpos de prova com propriedades mecânicas inferiores.

Para abordar e mitigar esse problema, decidimos adotar uma estratégia de alteração nas dimensões dos corpos de prova. Especificamente, optou-se por reduzir o dimensional dos corpos de prova. Essa mudança foi baseada na premissa de que corpos de prova menores teriam uma taxa de solidificação mais eficiente, resultando em uma redução da porosidade e, conseqüentemente, uma melhoria nas propriedades mecânicas.

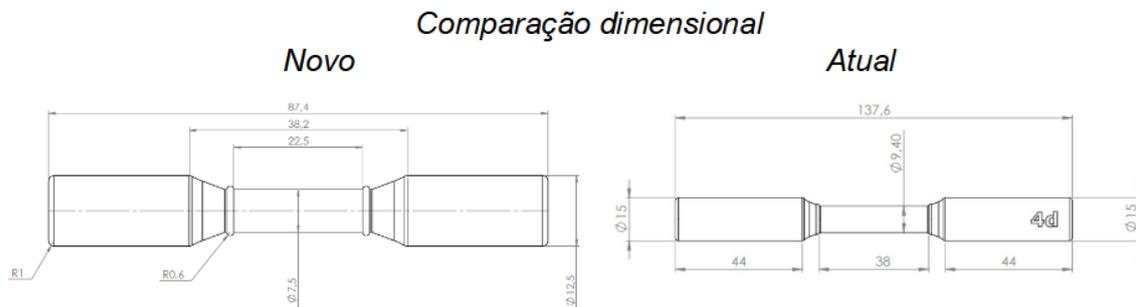
A implementação dessa modificação visa não apenas melhorar a resistência dos corpos de prova, mas também garantir que os resultados dos testes sejam mais representativos e confiáveis, alinhando-se às especificações desejadas

### **2.2- METODOLOGIA**

Optamos por reduzir o dimensional dos corpos de prova. Essa mudança foi baseada na premissa de que corpos de prova menores teriam uma taxa de solidificação mais eficiente, resultando em uma redução da porosidade e, conseqüentemente, uma melhoria nas propriedades mecânicas.

A implementação dessa modificação visa não apenas melhorar a resistência dos corpos de prova, mas também garantir que os resultados dos testes sejam mais confiáveis, alinhando-se às especificações desejadas

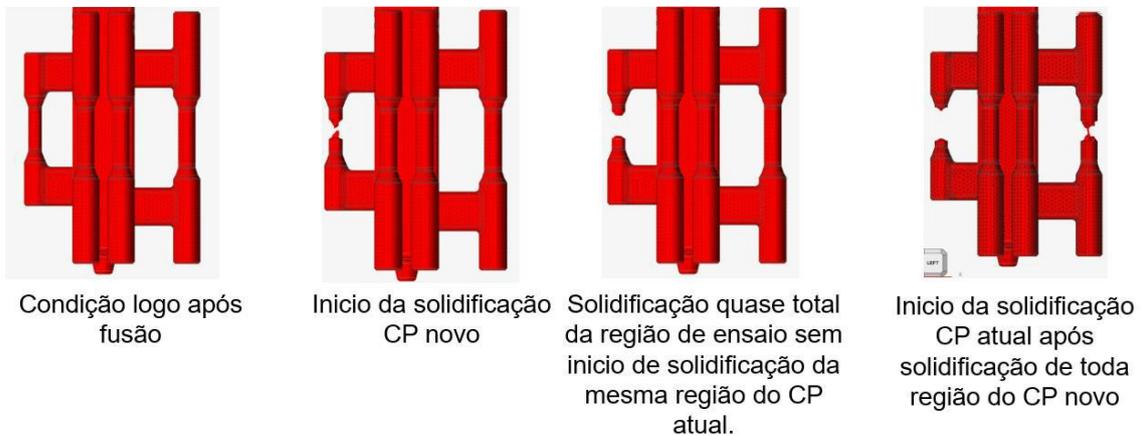
**Figura 1** - Corpos de prova para ensaio de tração nas condições definidas



**Fonte:** Os autores, 2024

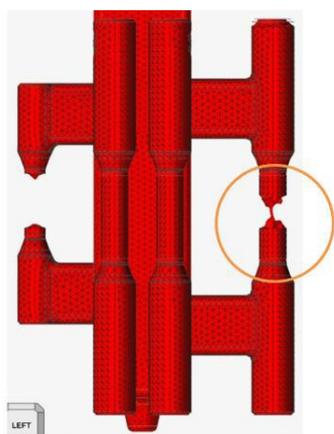
## Simulação de Solidificação

**Figura 2** - Simulação de solidificação do CPN e CPA



**Fonte:** Desenho técnico realizado na empresa

É possível observar um intervalo de solidificação diferente nas regiões do CP que criará uma região propícia para formação de microporosidades e segregação durante o resfriamento, resultando em fragilização do corpo de prova.

**Figura 3** - Simulação de solidificação do CPN e CPA

**Fonte:** Desenho técnico realizado na empresa

### Preparação da liga CoCrMo

Para esse estudo foram utilizados 6 corpos de prova (CP) para cada condição, liga atual da empresa Fundimazza, mostrada como “P” (PADRÃO). 3 será para avaliação da condição bruto de solidificação e 3 para o tratamento térmico de solubilização, que aparecerá seguido da letra “s”. Os materiais utilizados para fusão foram fornecidos pela empresa Fundimazza.

A liga Co-28Cr-6Mo ASTM F75 foi produzida a partir da carga de 100 kg no forno.

**Figura 4** – Tabela das composições carga do forno

<b>Matéria prima</b>	<b>Grau de pureza (%)</b>	<b>Forma/granulometria</b>
Co	99,80	Esferas ou escamas
Cr	99,40	Pedras 3x60 mm
Mo	99,85	Placas 1x10x50 mm

**Fonte:** Autores, 2024

Os elementos foram pesados e fundidos em forno de indução de média frequência com capacidade de 150 kg. A fusão ocorreu a uma temperatura de 1600 °C  $\pm$ 20 °C, sendo posteriormente coletada uma amostra para análise química, por meio do espectrômetro de emissão óptica da marca GNR Metal Lab 75-80J localizado na empresa Fundimazza, para garantir o especificado pela norma. Após os ajustes de composição química, o metal líquido foi fundido no cacho de corpos de prova,

utilizados os seguintes parâmetros de processo de fundição: temperatura de vazamento de 1.600 °C e temperatura da casca cerâmica 1.050 °C com tolerância de  $\pm 20$  °C. Foi realizada a desoxidação no forno e na panela de transferência com Si metálico, cujos teores foram de 150 g e 20 g, respectivamente.

**Figura 5** - Passagem do metal líquido do forno para a panela de fusão.



**Fonte:** Os autores,2024

A fusão dos CPs foi realizada em 2 cachos cerâmicos com 4 cavidades, totalizando 8 CP por condição. A Figura abaixo apresenta a casca cerâmica usada e os cachos fundidos com Si na superfície como desoxidante.

**Figura 6** - Cacho cerâmico usado para fusão das amostras. A esquerda os CP fundidos cobertos com



**Fonte:** Os autores, 2024

Cacho cerâmico usado para fusão das amostras. À esquerda os CP fundidos cobertos com desoxidante.

A análise química do material foi realizada por meio de espectroscopia de emissão óptica utilizando o equipamento GNR Metal Lab 75-80J e a base de dados de ligas de Cobalto. O propósito da análise química foi verificar se as concentrações dos elementos nas amostras estavam em conformidade com as concentrações inicialmente estabelecidas e dentro da faixa de especificação definida pela Norma ASTM F75. Antes da análise química propriamente dita, foi empregado um padrão de cobalto primário para a verificação da precisão do equipamento, com a frequência de calibração do mesmo realizada periodicamente.

**Figura 7** - Espectômetro de emissão óptica GNR Metal Lab 75-80 J e amostras retiradas para verificação



Fonte: Os autores, 2024

### Tratamento Térmico

O objetivo do tratamento térmico de solubilização é promover a dissolução total ou parcial dos carbonetos e fase  $\sigma$  nos contornos de grão e gerar aumento da ductilidade do material e sua resistência à corrosão. O processo consiste em aquecer o material até uma determinada temperatura, manutenção na temperatura por 1 h/pol de espessura e resfriamento rápido em água (*water quenching*)

Os parâmetros de solubilização foram de 1.200 °C (T<sub>0</sub>) e permanência de 90 minutos de patamar, seguido de resfriamento em água (*water quenching*) a temperatura de 25°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).

**Figura 8** - Termostato usado no controle de temperatura da água



Fonte: Os autores, 2024

A faixa de temperatura do TT foi escolhido com base nos trabalhos anteriores da literatura aos quais verificaram fusão precoce dos carbonetos para temperaturas

mais elevadas de solubilização. Elevadas temperaturas de solubilização em atmosferas não protetivas também promovem a oxidação excessiva da liga ASTM F75. Temperaturas abaixo da usada também geram aumento de fases secundárias nos contornos de grão ao invés de promover a dissolução dos mesmos (FLEMING et al., 2019; KAJIMA et al., 2018; MINETA et al., 2012).

**Figura 9** - Tratamento térmico de solubilização

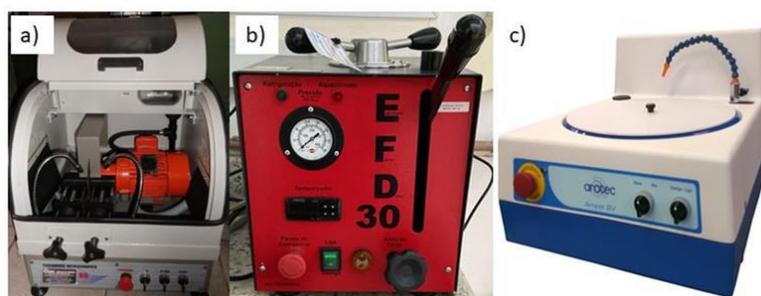


Fonte: Os autores, 2024

### **Análise metalográfica, Microscopia óptica**

A preparação das amostras foi obtida seguindo os procedimentos da Norma ASTM E3 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*) com cortadora metalográfica

**Figura 10** - Cortadora, embutidora e poltriz utilizada na preparação das amostras



Fonte: Os autores, 2024

As amostras foram primeiro cortadas na região fora do comprimento útil do CP, lixadas, polidas e embutidas a quente com baquelite para a análise metalográfica. A escolha da região fora do comprimento útil do CP, como ilustra a Figura acima, deve-se ao fato da liga ASTM F75 apresentar transformação de fase induzida por deformação.

**Figura 11-**Comparações do tamanho do corpo de prova



**Fonte:** Os autores, 2024

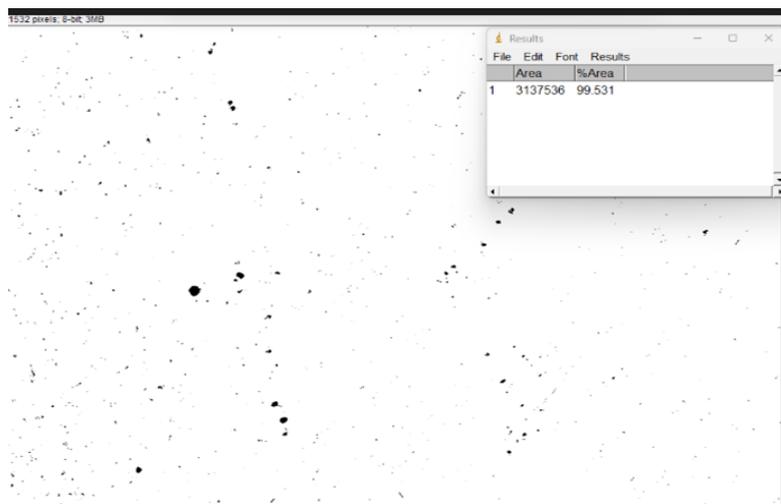
optamos por reduzir o dimensional dos corpos de prova. Essa mudança foi baseada na premissa de que corpos de prova menores teriam uma taxa de solidificação mais eficiente, resultando em uma redução da porosidade e, conseqüentemente, uma melhoria nas propriedades mecânicas.

A implementação dessa modificação visa não apenas melhorar a resistência dos corpos de prova, mas também garantir que os resultados dos testes sejam mais confiáveis, alinhando-se às especificações desejadas

## **2.3- Análise de Resultados**

### **Análise da microestrutura metalográfica**

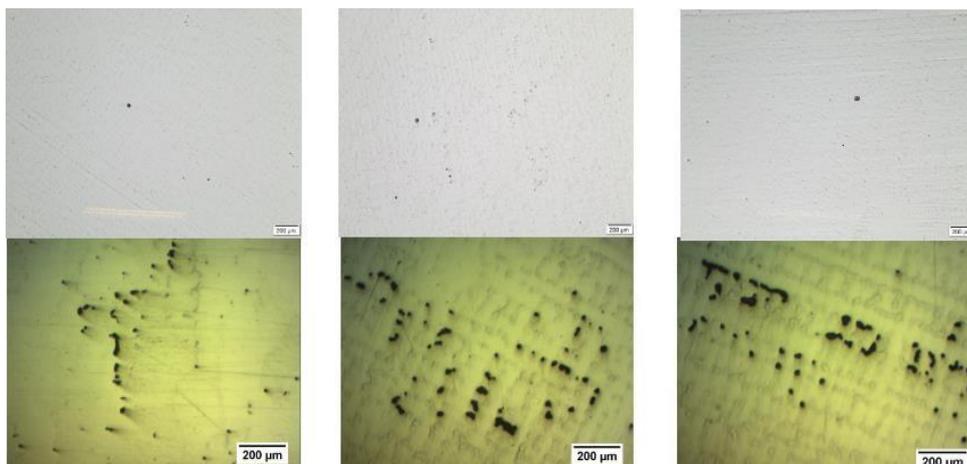
A diferença na porosidade entre os corpos de prova novo e antigo pode ser devido à taxa de solidificação. Corpos de prova menores geralmente solidificam mais rápido, resultando em uma estrutura mais compacta e menos porosidade. Isso explica por que o corpo de prova novo tem menos porosidade do que o antigo.

**Figura 12 - Microestrutura bruta CPN****Figura 13 - Microestrutura bruta CPA**

Fonte: Os autores, 2024

- Análises de imagem pelo ImageJ calculou redução de porosidade nos Cps de 1,5% do antigo para 0,5% no modelo Novo.
- Condição solubilizado apresenta condições melhores devida homogeneidade do processo

**Figura 14** - Microestrutura bruto CPN e microestrutura solubilizado CPA



Fonte: Os autores, 2024

## Ensaio de tração

O limite de resistência à tração, limite de escoamento, redução de área e alongamento percentual até a fratura foram obtidos por meio do ensaio de tração com a máquina de ensaios universal da marca Emic DL10000 com célula de carga Trd 28, sem utilização de extensômetro. O ensaio foi realizado na temperatura de 22 °C e a taxa de deformação empregada foi constante de 0,02mm/s, de acordo com a Norma ASTM E8M (*Tension Test of Metallic Materials*)

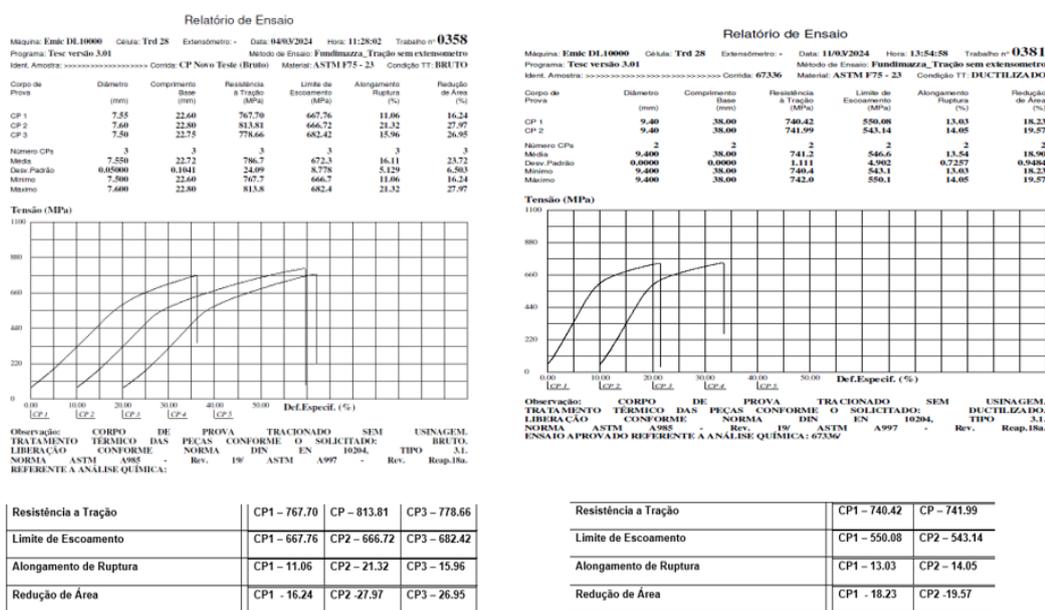
**Figura 15** - Máquina de ensaio universal Emic DL10000



Fonte: Os autores, 2024

A geometria dos CPs está de acordo com a Norma ASTM A957 (*Standard Specification for Investment Castings*) referente aos produtos manufaturados por fundição de precisão. Foram ensaiados três corpos de prova para cada condição investigada, sendo que a superfície dos CPs possui características de bruto de solidificação, ou seja, sem usinagem. O limite de escoamento foi obtido utilizando-se o offset de 0,2% de deformação, e o alongamento percentual por meio das medidas de comprimento inicial (Lo) e final (L) após a fratura, obtidos por meio de medição com paquímetro digital.

Figura 16 – Relatório do Ensaio mecânico



Fonte: Os autores, 2024

### **3. CONCLUSÃO**

Concluimos a partir das análises realizadas que o corpo de prova de menor apresenta uma maior confiabilidade nos resultados mecânicos e apresenta menor porosidade. Essa redução na porosidade está diretamente relacionada ao aumento da resistência mecânica e à maior consistência nos resultados. Esses resultados são importantes para otimizar o processo de fabricação do CPN, com o objetivo de obter materiais mais resistentes e confiáveis, gerando impactos positivos para a indústria. Adicionalmente, observou-se uma redução nos custos de produção ao diminuir o tamanho do corpo de prova, o que representa uma vantagem econômica significativa.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10325:2001 - "Aço e ligas metálicas — Ensaio de tração".

ABNT NBR 15430:2006 - "Aço e ligas metálicas — Determinação da resistência ao desgaste — Método de ensaio por abrasão".

ABNT NBR 8402:1984 - "Metalografia — Preparação de amostras e análise".

ALMANZA-CASAS, E.; PÉREZ-LÓPEZ, M. J.; RODRÍGUEZ-ROSALES, N. A. **Effect of Heat Treatment on the Corrosion Resistance in a Co–28Cr–6Mo Alloy Casting for Surgical Implants**. International Journal of Metalcasting, v. 12, n. 1, p. 71–78, 27 jan. 2018.

ANTUNES, L. H. M.; DE LIMA, C. R. P. **Cobalt-Chromium Alloys – Properties and Applications**. Em: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. [s.l.] Elsevier, 2018.

ANTUNES, R. A.; DE OLIVEIRA, M. C. L. **Corrosion fatigue of biomedical metallic alloys: Mechanisms and mitigation**. Acta Biomaterialia, v. 8, n. 3, p. 937–962, 1 mar. 2012.

ARTHRITIS FOUNDATION. Implant market. Disponível em: <<https://www.arthritis.org/>>. Acesso em: 23 de maio de 2023.

ASM. Metallography and Microstructure. ASM International, 2004.

ASM. Metallography and Microstructure. ASM International, 2004.

DAVIS, J. **Handbook of Materials for Medical Devices**. ASM International, 2003. p. 205–216.

FLEMING, T. J. et al. **The effect of induction heating power on the microstructural and physical properties of investment cast ASTM-F75 CoCrMo alloy**. Journal of Materials Research and Technology, v. 8, n. 5, p. 4417–4424, 1 set. 2019.

FLEMING, T. J.; KAVANAGH, A.; DUGGAN, G. **The effect of melt temperature on the mechanical properties of cast ASTM F75 CoCrMo alloy as explained by nitrogen and oxygen content**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 5, p. 9479–9486, set. 2020.

GUERRA-LÓPEZ, F. V. et al. **The effect of small additions of Nb and Ti on the sliding wear behavior of a Co-30Cr-5Mo alloy.** *Wear*, v. 522, p. 204846, 1 jun. 2023.

HASSANI, F. Z. et al. **Grain Refinement of Co-Cr-Mo-C Through Plastic Deformation Followed by Reversion of Lamellar Eutectoid Structure.** *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 28, n. 2, p. 1112–1121, 2 fev. 2019.

INTO, Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia. Dicas dos especialistas. Disponível em: <<https://www.into.saude.gov.br/dicas-dos-especialistas/joelho>>. Acesso em: 19 de Julho de 2023.

KAISER, R. et al. **Effects of Section Size, Surface Cooling Conditions, and Crucible Material on Microstructure and As-Cast Properties of Investment Cast Co-Cr Biomedical Alloy.** *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 44, n. 12, p. 5333– 5342, 14 dez. 2013.

METIKOŠ-HUKOVIĆ, M. et al. **Influence of alloying elements on the corrosion stability of CoCrMo implant alloy in Hank's solution.** *Acta Biomaterialia*, v. 2, n. 6, p. 693–700, 2006.

MINETA, S. et al. **Precipitates in Biomedical Co-28Cr-6Mo-(0–0.41)C Alloys HeatTreated at 1473 K to 1623 K (1200 °C to 1350 °C).** *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 43, n. 9, p. 3351–3358, 13 set. 2012.

Wiles, P. **The surgery of the osteo-arthritic hip**, *Br J Surg.* 45 (1957). p. 488-497