



Desenvolvimento de Ligas Metálicas para Aplicação como Implantes via Processo de Manufatura Aditiva

Palavras-Chave: Manufatura Aditiva, Manufatura Tradicional, Liga Ti-Cu

Autores:

Pedro Conde Fontes de Brito, FCA – UNICAMP

Prof. Dr. Rodrigo José Contieri (orientador), FCA - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

As ligas de titânio têm sido amplamente utilizadas na área biomédica devido às suas excelentes propriedades, como biocompatibilidade, resistência mecânica e resistência à corrosão [Chen, 2024]. Com o avanço da Manufatura Aditiva (MA), tornou-se possível projetar implantes personalizados com estruturas complexas, incluindo geometrias de treliça que melhoram a relação resistência/peso, promovendo um melhor desempenho mecânico e conforto para os pacientes [Razzaq, 2025]. Dentre as ligas de titânio, as composições contendo cobre (Ti-Cu) apresentam grande potencial para aplicação em implantes, uma vez que o cobre introduz efeitos antibacterianos, além de influenciar a resistência mecânica e a microestrutura da liga.

A fabricação de ligas metálicas por MA possibilita o controle preciso da composição química ao longo da estrutura do implante, permitindo a otimização das propriedades mecânicas e biológicas para aplicações específicas. Entretanto, em troca dessa maior liberdade geométrica e de precisão, ainda há desafios na normalização e garantia de qualidade devido à sua complexidade, inconsistência e ao grande número de variantes dependentes. Agora, no caso da Manufatura Tradicional (MT), essa continua dominando em termos de qualidade e confiabilidade, com métodos de controle de qualidade das peças resultantes bem definidos [Pereira et al., 2019], porém seu detrimento resume-se na realização de peças complexas e singulares, que são exatamente o caso das próteses. Sendo assim, presente estudo visa investigar a influência do gradiente de composição em ligas Ti-Cu processadas via MA e via MT, explorando o impacto das variações na microestrutura, como presença de porosidade e circularidade desse, e nas propriedades mecânicas, como dureza.

No caso das ligas Ti-Cu, estudos indicam que a adição controlada de cobre favorece a formação da fase Ti_2Cu , a qual pode influenciar significativamente a dureza e outras propriedades mecânicas [Liu et al., 2014]. Além disso, a técnica de fusão a laser em leito de pó (L-PBF) tem sido apontada como eficaz para inibir a segregação de cobre durante a solidificação, promovendo uma microestrutura mais fina e homogênea, com distribuição uniforme dos elementos de liga (influência das altas taxas de resfriamento), conforme evidenciado por Zhang et al., 2020. Assim, a presente pesquisa busca preencher lacunas no conhecimento sobre a correlação entre a microestrutura, a precipitação de fases e o comportamento mecânico de ligas Ti-Cu fabricadas aditivamente, contribuindo para o desenvolvimento de implantes metálicos mais eficientes e personalizados.

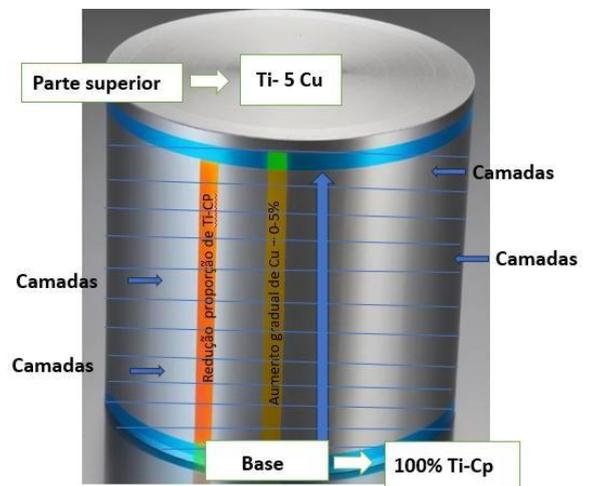


Figura 2. Ilustração do cilindro com gradiente de composição Ti-xCu (x=0 a 5%Cu) por PBF-L, mostrando a adição gradual da liga Ti-10Cu e a diminuição de Ti-Cp nas camadas subsequentes. **Fonte:** Durães (2025).

Agora, as ligas de Ti-Cu realizadas por Manufatura Tradicional foram fabricadas através de um processo combinado de fusão por arco-voltaico e tratamento térmico. Inicialmente, utilizou-se lingotes de titânio (Ti) e cobre (Cu) com pureza de 99,995%, que foram fundidos em um forno especial sob atmosfera controlada de argônio. O processo ocorreu em ambiente com vácuo de 10^{-3} Pa para evitar contaminação, e os lingotes foram fundidos e invertidos quatro vezes para assegurar completa homogeneização da liga. Após a fusão, o material foi submetido a um tratamento térmico a 950°C por três horas em forno a vácuo, seguido de resfriamento lento até a temperatura ambiente, o que permitiu a formação controlada das fases α -Ti e Ti_2Cu na microestrutura.

Para a caracterização e testes, corpos de prova com dimensões de $10 \times 10 \times 5$ mm foram preparados para estudos microestruturais e, enquanto amostras cilíndricas ($\Phi 4 \times 10$ mm e $\Phi 4 \times 2$ mm) foram usinadas para testes mecânicos. Todas as superfícies foram cuidadosamente lixadas e polidas para eliminar irregularidades. Foram fabricados corpos de prova de 2, 5, 7 e 10% de Cu. Para a análise em questão apenas foram necessários os corpos de 2% e 5% de Cu.

Com todas as amostras já preparadas para serem analisadas, as realizadas por MA foram colocadas em um Microscópio óptico, da marca Olympus/BX60M, presente no Laboratório de Metalurgia Física, para originar as Figuras 3 e 4, as quais servirão de base para investigar as propriedades mecânicas da liga. Sabendo que a potência máxima (nominal da máquina) do OmniSint-160 usado é de 410 Watts, 102,5 e 143,5 representam, respectivamente, 25% e 35% da potência máxima. Isso será importante mais tarde na comparação entre os dados obtidos a partir do momento que o estudo realizado leva em conta as diferenças entre “Ti-CuS25”, fotos das amostras obtidas com 25% da potência do laser (Figura 3) e “Ti-CuS35”, fotos das amostras obtidas com 35% da potência do laser (Figura 4).



Figura 3. Imagem de microscopia óptica das microestruturas das Ligas de Ti-Cu originadas com 25% da potência nominal do laser, aproximadas em 50 vezes, com pouca, média e alta taxa de cobre, respectivamente. **Fonte:** Durães (2025).



Figura 4. Imagem de microscopia óptica das microestruturas das Ligas de Ti-Cu originadas com 35% da potência nominal do laser, aproximadas em 50 vezes, com pouca, média e alta taxa de cobre respectivamente. **Fonte:** Durães (2025).

Além de serem analisadas em um Microscópio óptico, as amostras também foram caracterizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura, da marca FEI/Inspect F50, as quais servirão de base para investigar as propriedades mecânicas da liga. Para complementar as análises das amostras, a técnica de microscopia eletrônica de varredura foi combinada com mapeamento de raios-X, por meio do Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X Shimadzu/EDX7000, usando espectroscopia dispersiva de energia (MEV – EDS), confirmando assim a quantidade de Cu nas imagens que serão analisadas, podendo classificar as imagens em quantidade média e alta de cobre.

Na Figura 5 tem-se a quantidade considerada média de cobre, sendo ela 2,1% de Cu tanto para a potência de 102,5W quanto para a potência de 143,5W e a quantidade considerada alta de cobre, sendo ela 4% de Cu para a potência de 102,5W e 5% de Cu para a potência de 143,5W.

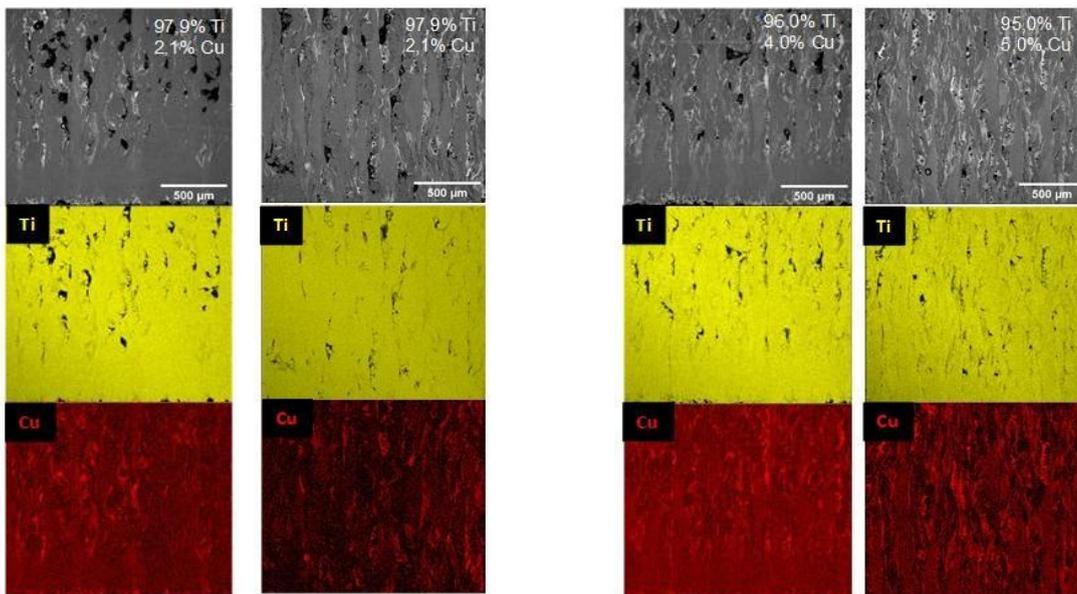


Figura 5. Imagens da microscopia eletrônica de varredura seguida do mapeamento de raios-X da distribuição de Ti e Cu para as potências do nível de cobre médio e alto, respectivamente, e de 102,5 W e 143,5 W, respectivamente. **Fonte:** Durães (2025).

No caso das amostras realizadas por MT, essas também foram analisadas por Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura, porém nesse caso o equipamento utilizado foi o SEM modelo Nova NaNOSEM-450 (Fabricante: FEI, EUA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Utilizando o aplicativo ImageJ, aplicou-se um filtro em preto e branco que serviu como base para a análise da porosidade e da circularidade das ligas de Ti-Cu. Os dados obtidos para ambos os tipos de processamento —

Manufatura Aditiva e Manufatura Tradicional — foram utilizados para elaborar os gráficos apresentados nas Figuras 6 e 7, por meio do aplicativo Excel. Esses gráficos representam, respectivamente, a porosidade e a circularidade, sendo as amostras classificadas entre níveis médio e alto de Cu, tanto para Manufatura Aditiva quanto para Fusão por Arco-voltaico (Manufatura Tradicional).

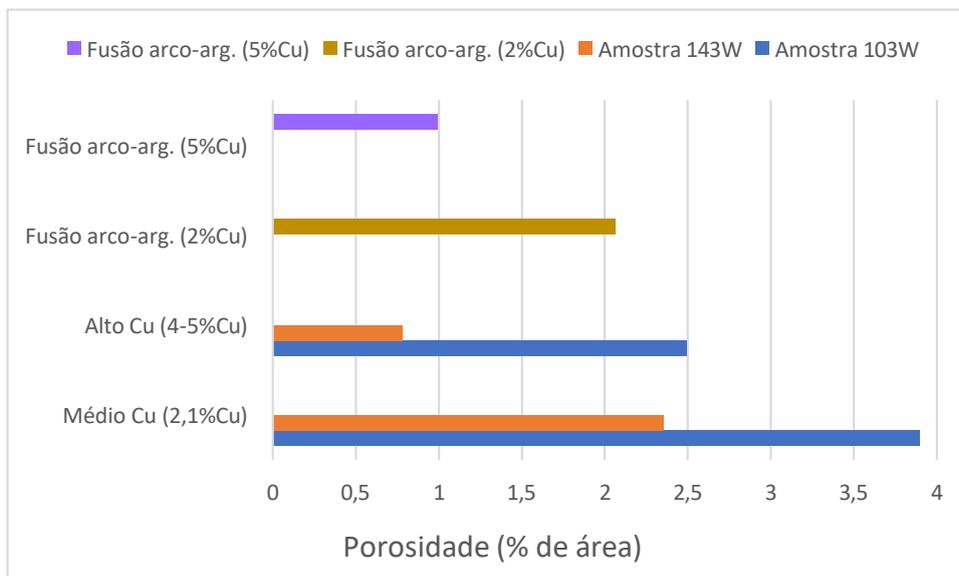


Figura 6. Gráfico comparativo a respeito da Porosidade por porcentagem de área das Ligas de Ti-Cu originadas por Manufatura Aditiva e Manufatura Tradicional. **Fonte:** Elaboração própria, 2025.

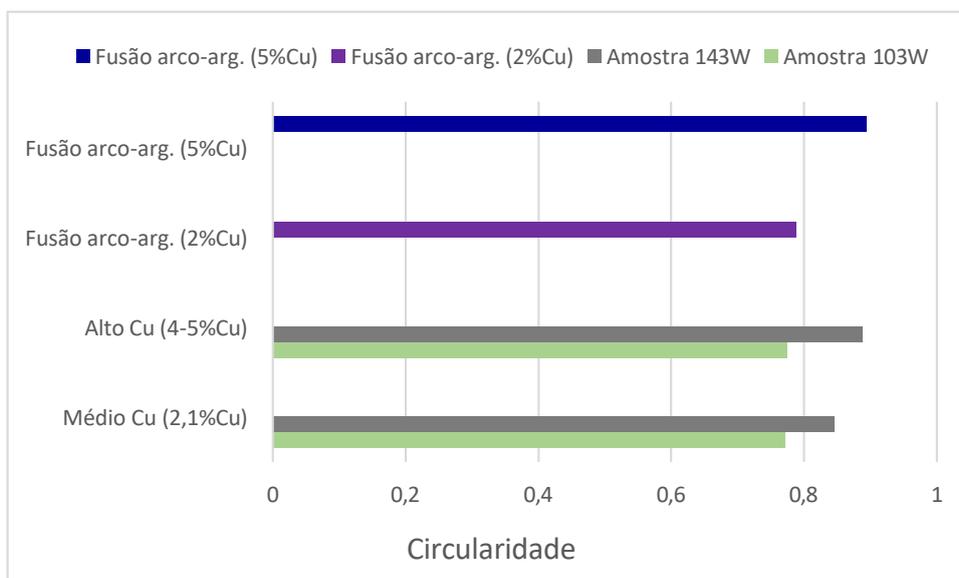


Figura 7. Gráfico comparativo a respeito da circularidade das Ligas de Ti-Cu originadas por Manufatura Aditiva e Manufatura Tradicional. **Fonte:** Elaboração própria, 2025.

Na Figura 6, observa-se que a amostra de 103 W com teor médio de Cu (2,1% Cu) apresentou a maior porosidade, com valor de aproximadamente 3,9%, enquanto a amostra de 143 W apresentou cerca de 2,6%. Já a liga produzida por fusão por arco-elétrico com 2% Cu apresentou porosidade consideravelmente menor, em torno de 0,8%. Ao comparar as amostras com alto teor de Cu (4-5% Cu) com a liga obtida por fusão por arco-voltaico com 5% Cu, nota-se que a amostra de 103 W apresenta porosidade próxima de 2,5% e a de 143 W cerca de 0,8%, enquanto a liga por fusão por arco-voltaico com 5% Cu apresenta aproximadamente 1,0%. Assim, observa-se que

o alto teor de Cu obtido por MT apresenta porosidade ligeiramente superior à da amostra de 143 W, embora ambas estejam em patamar significativamente inferior ao das amostras com teor médio de Cu em ambos os processos.

Em relação à circularidade (Figura 7), o nível médio de Cu apresentou valores próximos de 0,76 para a amostra de 103 W e 0,78 para a amostra de 143 W, resultados semelhantes aos obtidos pela fusão por arco - voltaico com 2% Cu, que apresentou circularidade de cerca de 0,78. Para o nível alto de Cu, a circularidade foi de aproximadamente 0,85 para 103 W e 0,88 para 143 W, valores ligeiramente inferiores ao obtido pela fusão por arco-voltaico com 5% Cu, que foi em torno de 0,90. Isso indica que, para altos teores de cobre, as amostras produzidas por MT apresentam poros ligeiramente mais arredondados e regulares em comparação às obtidas por MA. Para finalizar, em relação à dureza que ocorreu por ensaio de dureza Vickers com carga de 300 gf, para o nível médio Cu, para a potência de 102,5 W, obtém-se o valor de 336 HV, agora para a potência de 143,5 W, obtém-se um valor de dureza de aproximadamente 278 HV. Agora para a classificação de alto nível de Cu, para a potência de 102,5 W, obtém-se o valor de aproximadamente 313 HV, agora para a potência de 143,5 W, obtém-se o valor de dureza de aproximadamente 428 HV. No caso da Manufatura Tradicional (Fusão por arco-voltaico), para a liga de Ti-2%Cu obtém-se aproximadamente 217 HV e para a liga de Ti-5%Cu obtém-se aproximadamente 255 HV.

CONCLUSÕES:

Em conclusão, conclui-se que a manufatura tradicional mantém vantagens em homogeneidade microestrutural e baixa porosidade, sendo ideal para aplicações que demandam confiabilidade. Já a manufatura aditiva, quando otimizada (alto nível de cobre com alta potência de laser), oferece propriedades mecânicas superiores, como alta dureza, com potencial para implantes personalizados, de difícil geometria, além é claro de possibilitar gradientes de composição e conseqüentemente, de propriedades. A liga Ti-5Cu produzida por MA a 143,5 W destacou-se como a mais equilibrada, combinando dureza elevada e porosidade reduzida.

BIBLIOGRAFIA

DURÃES, J. M. P. S. Obtenção e Caracterização da Liga Ti-Cu com Gradiente de Composição Química Revestida com Nanotubos de TiO₂. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Manufatura) – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2025.

[Liu et al., 2014] Liu, J., Li, F., Liu, C., Wang, H., Ren, B., Yang, K., Zhang, E., Effect of Cu content on the antibacterial activity of titanium-copper sintered alloys, *Materials Science and Engineering C* 35 (2014) 392-400. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493113006413>. Acesso em: 01/08/2025.

[Pereira et al., 2019] Pereira, T., Kennedy, J. V., Potgieter, J., A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, *Procedia Manufacturing* 30 (2019) 11-18. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919300332>. Acesso em: 01/08/2025.

[Razzaq, 2025] Razzaq, M., Zaheer, M., Asghar, H., Aktas, O., Aycan, M., Mishra, Y., **Additive manufacturing for biomedical bone implants: Shaping the future of bones**, *Materials Science and Engineering: R: Reports* 163 (2025). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X25000087>. Acesso em: 01/08/2025.

[Yi et al., 2020] Yi, C., Ke, Z., Zhang, L., Tan, J., Jiang, Y., He, Z., Antibacterial Ti-Cu alloy with enhanced mechanical properties as implant applications, *Materials Research Express*, 7(10) (2020) 105404. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/abc371>. Acesso em: 01/08/2025.

[Zhang, 2020] Zhang, E., Liu, J., Qin, G., Wang, X., Wang, H., Influence of post deposition annealing on microstructure and properties of laser additively manufactured titanium copper alloys, *Additive Manufacturing*, 32 (2020). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860419315878>. Acesso em: 01/08/2025.