

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**ESTUDO PARA A FABRICAÇÃO DE ELETRODOS POR
METALURGIA DO PÓ E DESENVOLVIMENTO DE
PARÂMETROS DE ELETROEROSÃO COM LIGAS DE
COBRE-NIÓBIO**

Carlos Alexandre Wurzel

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

ESTUDO PARA A FABRICAÇÃO DE ELETRODOS POR
METALURGIA DO PÓ E DESENVOLVIMENTO DE
PARÂMETROS DE ELETROEROSÃO COM LIGAS DE COBRE-
NIÓBIO

Carlos Alexandre Wurzel
Tecnólogo em Fabricação Mecânica para Ferramentaria

Trabalho apresentado ao Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS
- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGEM, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de fabricação

Porto Alegre
2015

Orientador: Prof. Dr. Ing. LÍrio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng^o Eduardo Cristiano Milke – IFSUL

Prof. Dr. Eng^o José Carlos Krausede Verney– ULBRA

Prof. Dr. Eng^o José Lesina César– ULBRA

Prof^o. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico a minha esposa
Marta Herta Fassbinder Wurzel
E a meus filhos
Vinícius Matheus Wurzel
e Larissa Vanessa Wurzel

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem Ele nada é possível;

Ao professor Lírio Schaeffer, pela orientação dedicada e objetiva, pela confiança e grande ajuda em momentos de pouca disponibilidade de tempo, pelo trabalho sério e dinâmico e pelo estímulo à pesquisa de novas tecnologias, além do incentivo pessoal.

Ao meu grande amigo e colega Vinicius Martins, pelas sugestões e observações valiosas, pelo companheirismo e verdadeira amizade.

Aos funcionários do Centro de tecnologia da UFRGS, demais colegas e professores do programa de pós-graduação e todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o esforço da conclusão deste trabalho, o meu sincero e efusivo agradecimento.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mais precisamente representada pelo Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia, pela disponibilidade dos recursos materiais e tecnológicos.

Aos colegas, amigos e professores do IFSul – Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, campus Sapucaia do Sul, pelo incentivo e por disponibilizar equipamentos e laboratórios para realização de experimentos.

A empresa CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) que doou o nióbio utilizado nesta trabalho.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
LISTA DE SIMBOLOS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1. INTRODUÇÃO	17
1.2 Objetivos	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Definição de Usinagem	20
2.2 Histórico da eletroerosão	21
2.2.1 Princípio de Funcionamento do processo de eletroerosão.....	22
2.2.2 Processos e Aplicações.....	25
2.2.3 Parâmetros de Usinagem na Eletroerosão.....	26
2.3 Materiais Usados como Eletrodos	28
2.4 Fluidos Dielétricos	29
2.5 Metalurgia do Pó	30
2.5.1 Definição.....	30
2.5.2 Vantagens e Limitações do Processo.....	31
2.5.3 Pós Metálicos.....	31
2.5.3.1 Processos de Obtenção de Pós metálicos.....	32
2.5.4 Pureza e Composição Química.....	32
2.5.5 Porosidade.....	33
2.5.6 Mistura, Homogeneização e Lubrificação de Pós Metálicos.....	33
2.5.7 Compactação.....	34
2.5.8 Sinterização.....	35
2.6 Mercado dos Constituintes da Liga	39
2.6.1 Mercado do Cobre.....	39
2.6.2 Mercado do Nióbio.....	39
2.7 Características dos Materiais Constituintes da Liga	41
2.7.1 O Cobre.....	41
2.7.2 O Nióbio.....	42
2.8 Qualidade Superficial nos Processos de Usinagem	46
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	47
3.1 Densidade Aparente	48
3.2 Compactações dos Pós Metálicos	48
3.2.1 Prensagem.....	49
3.3 Sinterização	50
3.5 Metalografia	50
3.4 Corpo de Prova Utilizado na Eletroerosão	50
3.5 Haste de Fixação do Eletrodo na Máquina de Eletroerosão	52
3.5.1 Máquinas e Ferramentas Utilizadas na Confecção da haste de Fixação.....	52
3.6 Máquina de Eletroerosão Utilizada no Ensaio	53
3.7 Instrumentos de Medição Utilizados Durante os Ensaios em Eletroerosão	53
3.7.1 Balança Analítica.....	54
3.8 Experimentos em Eletroerosão	54

4. RESULTADOS	56
4.1 Caracterização das Matérias Primas	56
4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura do Cobre Puro	56
4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura do Nióbio Puro	56
4.3 Compactações dos Compostos Intermetálicos	57
4.3.1 Densidade Teórica do composto	57
4.3.2 Densidade Aparente do composto	58
4.3.3 Densidades	59
4.5.1 Metalografia sem Ataque Químico	62
4.4.2 Metalografia com Ataque Químico	71
4.5 Experimentos em Eletroerosão	80
4.5.1 Taxa de desgaste do Eletrodo	80
4.5.2 Taxa de Remoção de Material (Tr)	88
4.5.3 Rugosidade Superficial	92
5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	98
6. CONCLUSÕES	100
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Influência dos parâmetros no processo de eletroerosão.....	18
Figura 2. Etapas da elaboração do trabalho.....	18
Figura 3. Equipamento de eletroerosão por penetração.....	21
Figura 4. Eletrodo para gravação por eletroerosão.....	23
Figura 5. Funcionamento esquemático do processo de eletroerosão.....	23
Figura 6. Condutividade elétrica de vários materiais.....	29
Figura 7. Produção de Nióbio em toneladas/35/.....	40
Figura 8. Preço do Nióbio em US\$/tonelada/35/.....	41
Figura 9. Amostra de Niobita.....	43
Figura 10. Representação de modelo de rugosidade média.....	46
Figura 11. Matriz e punções utilizados na compactação.....	49
Figura 12. Corpo de prova utilizado na eletroerosão.....	51
Figura 13. Haste de fixação do eletrodo.....	52
Figura 14. Micrografia do cobre (500X).....	56
Figura 15. Micrografia do pó de nióbio depois de peneirado (3000X).....	57
Figura 16. Densidades da liga- 90% Cu 10% Nb.....	59
Figura 17. Densidades da liga- 80% Cu 20% Nb.....	60
Figura 18. Densidades da liga- 70% Cu 30% Nb.....	61
Figura 19. Densidades da liga- 60% Cu 40% Nb.....	61
Figura 20. Densidade a verde da liga- 50% Cu 50% Nb.....	62
Figura 21. Liga 90% Cu-10% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa.....	63
Figura 22. Liga 90% Cu-10% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa.....	64
Figura 23. Liga 90% Cu-10% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa.....	64
Figura 24. Liga 80% Cu-20% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa.....	65
Figura 25. Liga 80% Cu-20% Nb sem ataque químico; (E)- 500MPa; Partes (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa.....	66
Figura 26. Liga 80% Cu-20% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa.....	66

Figura 27. Liga 70% Cu-30% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	67
Figura 28. Liga 70% Cu-30% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	67
Figura 29. Liga 70% Cu-30% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	68
Figura 30. Liga 60% Cu-40% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	68
Figura 31. Liga 60% Cu-40% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	69
Figura 32. Liga 60% Cu-40% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	69
Figura 33. Liga 50% Cu-50% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	70
Figura 34. Liga 50% Cu-50% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	70
Figura 35. Liga 50% Cu-50% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	71
Figura 36. Liga 90% Cu-10% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	72
Figura 37. Liga 90% Cu-10% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	72
Figura 38. Liga 90% Cu-10% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	73
Figura 39. Liga 80% Cu-20% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	73
Figura 40. Liga 80% Cu-20% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	74
Figura 41. Liga 80% Cu-20% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	74
Figura 42. Liga 70% Cu-30% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	75
Figura 43. Liga 70% Cu-30% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	75

Figura 44. Liga 70% Cu-30% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	76
Figura 45. Liga 60% Cu-40% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	76
Figura 46. Liga 60% Cu-40% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	77
Figura 47. Liga 60% Cu-40% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa	77
Figura 48. Liga 50% Cu-50% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa	78
Figura 49. Liga 50% Cu-50% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa	79
Figura 50. Liga 50% Cu-50% Nb; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa.....	79
Figura 51. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento I.	81
Figura 52. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento II.....	82
Figura 53. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento III.	83
Figura 54. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento IV.	84
Figura 55. Taxa de desgaste do eletrodo para o experimento V.....	85
Figura 56. Taxa de desgaste do eletrodo para o experimento VI.	86
Figura 57. Taxa de desgaste do eletrodo para o experimento VIII.....	87
Figura 58. Taxa de remoção de material para o experimento I.	89
Figura 59. Taxa de remoção de material para o experimento II.....	89
Figura 60. Taxa de remoção de material para experimento III.	90
Figura 61. Taxa de remoção de material para experimento IV.	90
Figura 62. Taxa de remoção de material para o experimento V.....	91
Figura 63. Taxa de remoção de material para o experimento VII.....	91
Figura 64. Taxa de remoção de material para o experimento VII.....	92
Figura 65. Rugosidade superficial Ra para o experimento I.	93
Figura 66. Rugosidade superficial Ra para o experimento II.....	93
Figura 67. Rugosidade superficial Ra para o experimento III.....	94
Figura 68. Rugosidade superficial Ra para o experimento IV.	95
Figura 69. Rugosidade superficial Ra para o experimento V.....	95
Figura 70. Rugosidade superficial Ra para o experimento VI.	96
Figura 71. Rugosidade superficial Ra para o experimento VII.	96

Figura 72. Tempo de descarga eléctrica 2 μ s.	100
Figura 73. Tempo de descarga eléctrica 75 μ s.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas do nióbio.....	44
Tabela 2. Propriedades mecânicas do nióbio.....	44
Tabela 3. Quantidades de massas das amostras.....	47
Tabela 4. Quantidades de massas dos eletrodos.....	47
Tabela 5. Densidade aparente das ligas intermetálicas.....	55
Tabela 6. Parâmetros de usinagem utilizados na eletroerosão.....	58
Tabela 7. Massa dos eletrodos experimento I.....	81
Tabela 8. Massa dos eletrodos experimento II.....	82
Tabela 9. Massa dos eletrodos experimento III.....	83
Tabela 10. Massa dos eletrodos experimento IV.....	84
Tabela 11. Massa dos eletrodos experimento V.....	85
Tabela 12. Massa dos eletrodos experimento VI.....	86
Tabela 13. Massa dos eletrodos experimentos VII.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS

a.c -Antes de Cristo, referência histórica

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - *American Iron and Steel Institute*

EDM – eletroerosão (*electrical discharge machining*)

CNC - Comando Numérico Computadorizado (*Computer Numeric Control*)

GAP - Distância mínima para realização da erosão por descarga elétrica

Hc - Hidrocarbonetos

MIM – Moldagem de pós metálicos por injeção (*Metal Injection Molding*)

Nc – Controle numérico (*Numerical control*)

rpm - Rotações por minuto

RC - Resistor-capacitor

LISTA DE SIMBOLOS

- A – Ampere, unidade de medida de intensidade de corrente elétrica.
- DT – Correção automática permitida em parâmetros de usinagem EDM. - %
- d – Diferença entre a massa inicial e final dos eletrodos – g
- D – Desgaste percentual dos eletrodos - %
- mi – Massa inicial dos eletrodos – g
- mf – Massa final dos eletrodos - g
- P– Pressão - MPa
- Ra – Rugosidade média. - μm
- toff- Tempo de descarga elétrica desligada - μs
- ton-Tempo de descarga elétrica ligada – μs
- Tp – Tempo de processo - Minutos
- tr- Taxa de remoção – mm^3/min
- ts – Intensidade de corrente elétrica- A
- Z – Massa atômica – u.m.a.
- Zp – Distância entre o eixo X e o ponto mais alto dos picos do perfil. - μm
- Zv - Distância entre o eixo X e o ponto mais baixo dos vales do perfil. - μm

SIMBOLOS GREGOS

- κ – condutividade térmica – $\text{W}/(\text{m}^*\text{k})$
- ρ – Densidade – g/mm^3
- τ_{rup} – Tensão de ruptura – MPa
- τ_{tr} – Tensão de tração – MPa
- τ_{c} – Tensão de Cisalhamento – MPa
- Υ – Coeficiente de expansão térmica – $^{\circ}\text{C}^{-1}$

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo das propriedades da liga de cobre-nióbio, bem como a determinação de parâmetros de usinagem em máquina de eletroerosão por penetração. Foram desenvolvidas, por metalurgia do pó, ligas de cobre-nióbio com teores de 10, 20, 30, 40 e 50 % de nióbio. Os pós foram misturados e compactados em matriz fechada a dez níveis diferentes de pressão (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 MPa). Foi determinada, a densidade aparente, a curva de compressibilidade e a densidade a verde. Para conferir dureza e tenacidade à liga, as amostras foram sinterizadas a 950 °C em uma atmosfera de argônio. Após a sinterização, foi determinada a densidade do sinterizado. Também foi realizada a metalografia das amostras para determinar a dispersão do nióbio no cobre e visualizar a porosidade. Foram utilizadas sete combinações de parâmetros (tempo de descarga elétrica ligada, 2, 75 e 150 μ s; intensidade de corrente elétrica, 1, 2, 3 e 4 A; tempo de serviço 33, 86 e 91%) nos testes de usinagem. Observou-se nos resultados que, a baixos tempos de descarga elétrica, o nióbio reduz a taxa de desgaste do eletrodo em um valor médio de até 60%. Quando se aumenta o tempo de descarga, este valor se inverte, provocando elevado desgaste no eletrodo, com valores médios 200% maiores. Na taxa de remoção, o nióbio provoca uma redução significativa. Aumentos das quantidades de nióbio, quando aliados a um maior tempo de descarga elétrica provocam um decréscimo de até 80% na remoção de material. Este efeito pode ser creditado a um desvio de corrente e a um centelhamento que podem ocorrer nos poros e periferia dos grãos de nióbio. Comparando com os resultados do cobre eletrolítico, há uma melhora na qualidade da superfície usinada com a liga. A rugosidade do corpo de prova usinado apresentou um decréscimo acentuado nos testes com parâmetros de alta remoção. Foram obtidos valores médios 50% menores que os tabelados para estes parâmetros de usinagem. Conclui-se que as ligas estudadas podem ser uma alternativa quando se busca, através do processo de eletroerosão, uma boa qualidade superficial (valores de Rugosidade média de 4 a 10 μ s) porem com elevado desgaste do eletrodo e baixa taxa de remoção.

Palavras-chave: Cobre, Nióbio, Metalurgia do pó, Eletroerosão.

ABSTRACT

This work aims to study the properties of copper-niobium. And the determination of machining parameters on EDM machine for penetration. Were developed by powder metallurgy, copper-niobium alloys with contents 10, 20, 30, 40 and 50% niobium. The powders were mixed and compacted into the closed ten different pressure levels array (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 and 1000 MPa). It was determined, the bulk density, compressibility curve and the green density. To impart hardness and toughness alloy, the samples were sintered at 950 ° C in an atmosphere of argon. After the sintering it was determined sintered density. Also Metallography of the samples was performed to determine the dispersion of copper and niobium view porosity. Seven parameter combinations were used (electrical discharge time connected, 2, 75 and 150 μ s; Intensity of electric current, 1, 2, 3 and 4; Duty time 33, 86 and 91%) in machining testing. It was observed that the results, the low time of electric discharge, niobium reduces electrode wear rate an average of 60%. When increasing the discharge time, this value is reversed, causing increased wear on the electrode with 200% higher mean values. On removal rate, niobium causes a significant reduction. Increases in the amounts of niobium, when combined with a higher electrical discharge time causes a decrease of 80% in material removal. This effect can be credited to a current deviation and a sparking, which can occur in the pores and the periphery of niobium grains. Compared to the results of electrolytic copper, there is an improvement in the quality of machined surface with the league. The roughness of the machined specimen showed a marked decrease in the tests with high removal parameters. Average values obtained were 50% smaller than the tabulated for these machining parameters. It is concluded that the studied alloys may be an alternative when we search, through the process of electrical discharge machining, a good quality surface roughness values (mean of 4 10 μ s) but with high wear of the electrode and a low rate of removal.

Keywords: Copper. Niobium. Powder metallurgy. EDM.

1. INTRODUÇÃO

O atual nível de desenvolvimento e de competição entre os mercados faz com que o desenvolvimento de novos materiais e métodos de produção sejam pesquisados. A crescente industrialização e os tempos de fabricação cada vez mais reduzidos demandam matérias, ferramentas e métodos de fabricação mais eficazes. Neste contexto, o desenvolvimento de novas ferramentas, bem como o estudo de parâmetros de usinagem devem ser incentivados. Alguns materiais tradicionalmente usados como eletrodos, o cobre, por exemplo, estão ameaçados pela escassez. De acordo com matéria do jornal **Valor Econômico** (2012), já há falta de cobre no mercado, o que torna necessária a pesquisa de novas ligas e compostos intermetálicos com menores teores de cobre. Sendo o Nióbio abundante no Brasil e, em temperaturas criogênicas, um excelente condutor, buscou-se, neste trabalho, a possibilidade de formular uma composição que resultasse em um bom rendimento na usinagem por eletroerosão.

A eletroerosão é o processo de usinagem não convencional mais popular. Sendo muito eficaz na produção de ferramentas de conformação, moldes de injeção, matrizes de forjamento e componentes mecânicos em geral. É um processo térmico de fabricação. O processo de usinagem se dá pela remoção de material através das sucessões de descargas elétricas que ocorrem entre um eletrodo e uma peça (matriz, molde, etc). As descargas elétricas ocorrem através de um líquido dielétrico, que tem como funções isolar o centelhamento e refrigerar o processo.

Alta taxa de remoção de material, baixa taxa de desgaste do eletrodo e um bom acabamento superficial são objetivos conflitantes em usinagem por eletroerosão. Estes resultados não podem ser alcançados de forma simultânea com uma combinação de parâmetros de usinagem, como tempos de descarga elétrica e intensidade de corrente. Para obter os melhores resultados, as metas têm que ser atingidas separadamente em fases específicas do trabalho. Altas intensidades de corrente e tempo de descarga para fase de desbaste e, parâmetros de baixa intensidade e tempo na fase em que se busca a qualidade superficial. Na figura 1 pode ser visualizada a influência destes parâmetros sobre os resultados da usinagem.

	Aumento ton	Aumento ts	Aumento DT
Taxa de remoção (mm ³ /min)	↑	↑	↑
Taxa de desgaste (%)	↓	↑	↑
Rugosidade (Ra)	↓	↓	↑
Positiva ↑			
Negativa ↓			

Figura 1. Influência dos parâmetros no processo de eletroerosão.

Este trabalho se propõe a analisar o desempenho da liga de cobre-nióbio com diferentes composições de nióbio. As ligas foram confeccionadas por metalurgia do pó, com teores de nióbio de 10, 20, 30, 40 e 50 %, em peso. Para compactar os pós foram utilizadas pressões de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 MPa. Na sinterização utilizou-se temperatura de 950 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Para a proteção contra a oxidação, utilizou-se atmosfera de argônio. Após sinterizadas, as amostras foram testadas quanto ao seu desempenho no processo de eletroerosão por penetração. A Figura 2 demonstra as etapas deste trabalho.

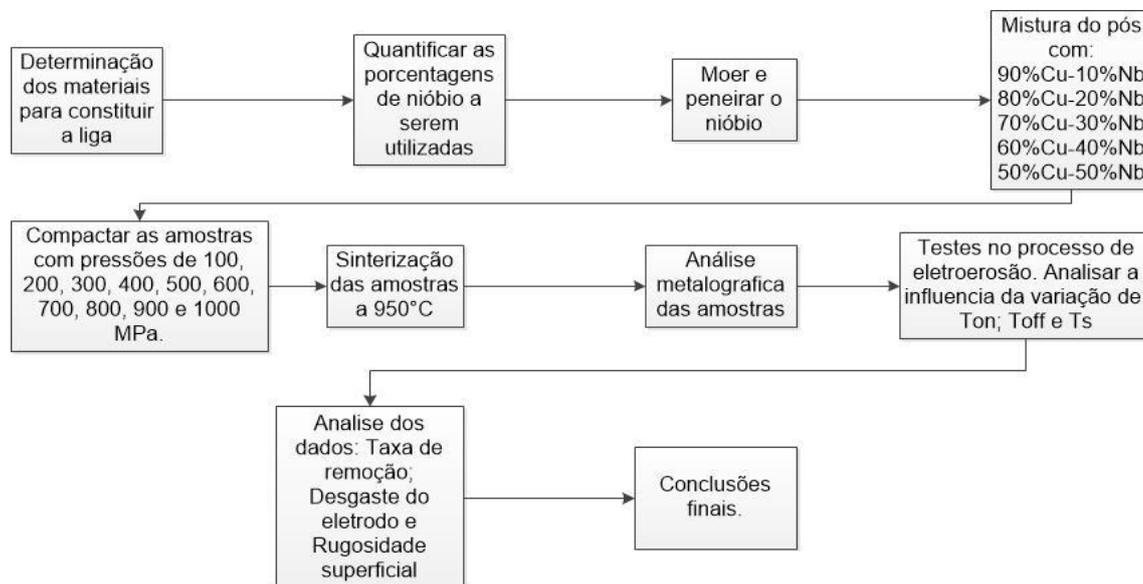


Figura 2. Etapas da elaboração do trabalho

Os parâmetros analisados na eletroerosão foram a taxa de desgaste do eletrodo, a remoção de material e a rugosidade superficial. Um bom material de eletrodo deve ter altas taxas de remoção de material, aliada a um baixo desgaste do eletrodo e um acabamento superficial de peça de trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da compactação e da sinterização sobre a porosidade em diferentes composições de cobre-nióbio. Analisar o desempenho das ligas de cobre-nióbio no processo de eletroerosão por penetração no aço AISI H13, comparando com o cobre eletrolítico.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o efeito do nióbio sobre a densidade das amostras.
- b) Avaliar o efeito da sinterização na porosidade das amostras com diferentes quantidades de nióbio.
- c) Determinar a taxa de remoção, no processo de usinagem por eletroerosão, utilizando eletrodos com diferentes quantidades de nióbio.
- d) Avaliar o desgaste dos eletrodos, variadas quantidades de nióbio, utilizando o processo de eletroerosão.
- e) Medir a rugosidade da amostra de aço AISI H13 usinado por eletroerosão nos regimes de trabalho de acabamento e desbaste.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Definição de Usinagem

Como operações de usinagem entende-se aquele processo que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, produzem cavaco /1/. Os processos de usinagem se dividem em: usinagem convencional e não convencional.

2.1.1 Usinagem Convencional

Entende-se por processo de usinagem convencional todo o procedimento que resulta na remoção de cavacos, sendo os mais difundidos: fresamento, torneamento, retificação e furação. Estes processos de usinagem geralmente são diferenciados pelo método que utilizam para conferir forma ao material (corte, abrasão), pelas características termodinâmicas de cada um (quantidade de calor gerado) e pelas propriedades do material a ser trabalhado /1/, /2/.

2.1.2 Usinagem Não Convencional

Por processo de usinagem não convencional, entende-se todo aquele que resulta na modificação de um material com a remoção de cavacos e sem o toque da ferramenta na peça /1/. Como, por exemplo, a remoção eletroquímica, usinagem iônica, eletroerosão entre outras.

A eletroerosão é o processo de usinagem não convencional mais popular, muito eficaz na produção de ferramentas de conformação, moldes de injeção, matrizes de forjamento e componentes mecânicos em geral /1/. É um processo térmico de fabricação caracterizado pela remoção de material através das sucessões de descargas elétricas que ocorrem entre um eletrodo e uma peça (matriz, molde, etc), através de um líquido dielétrico /2/.

Pode-se obter através da eletroerosão vários perfis (eixos, cruzetas,) e detalhes de alta complexidade, os quais seriam praticamente impossíveis de serem obtidos por outros métodos de usinagem. Os níveis de acabamento das superfícies erodidas são resultados da regulagem de parâmetros na máquina, tempo de descarga elétrica e

intensidade de corrente, podendo atingir valores bastante baixos de rugosidade, comparáveis aos obtidos no processo de retificação /3/.

O processo de eletroerosão é aplicado para confecção principalmente de matrizes das mais variadas áreas como, por exemplo, estampagem, automotiva, forjamento, eletrodomésticos, telecomunicações, máquinas, brinquedos, instrumentos e equipamentos da área médica /3/. A Figura 3 apresenta uma máquina de eletroerosão por penetração.



Figura 3. Equipamento de eletroerosão por penetração.
Fonte: <http://www.plastico.com.br/revista/pm332/interplast1.htm/>.

2.2 Histórico da eletroerosão

O método de usinagem por eletroerosão consiste basicamente na manipulação de descargas elétricas sobre determinada região do material /3/.

Em 1776, um químico inglês chamado Joseph Priestley, descobriu que as descargas elétricas causavam um efeito corrosivo e, por consequência, a remoção de material. O pesquisador realizou uma experiência que consistiu em aplicar a descarga elétrica de uma bateria em uma peça por meio de um eletrodo, a peça (cátodo) e o eletrodo não mantinham contato físico, mas ficaram próximos o suficiente para que

houvesse o centelhamento de descargas de eletricidade entre si. O resultado foi que no catodo uma cratera foi aberta em sua superfície, ocasionado pela fusão do material em função da temperatura gerada neste centelhamento /4/.

Durante a Segunda Guerra Mundial, o casal de cientistas russos, Boris R. Lazarenko e Natalya I. Lazarenko investigou o desgaste ocasionado pelas faíscas nos contatos em interruptores elétricos. Eles deduziram que era possível utilizar este fenômeno como método de usinagem para confecção de cavidades em materiais de difícil usinabilidade, na época, tal como o carboneto de tungstênio, por exemplo /4/.

Uma das conclusões do casal Lazarenko foi que, para o processo ter uma aplicação adequada, a centelha de energia deveria ser baixa e controlada. A partir desta conclusão, eles desenvolveram um sistema denominado RC (*resistor-capacitor*), que ficou conhecido pelo nome de circuito de Lazarenko /4/.

Atualmente o processo conta com o auxílio das novas tecnologias, os servomecanismos e os sistemas hidráulicos permitem controlar com exatidão o posicionamento do eletrodo, invertendo a direção, no caso de curto-circuito, na região das descargas elétricas /5/.

Na década de 1980, surgiu o interesse pelas aplicações em micro usinagem, o que despertou o interesse mundial na tecnologia do EDM (sigla do inglês *electric discharge machine*) e que levou na década seguinte o desenvolvimento do controle difuso de superfície de resposta de metodologias de redes neurais artificiais¹ /5/.

2.2.1 Princípio de Funcionamento do processo de eletroerosão

O princípio de funcionamento do processo de eletroerosão é a aplicação do efeito de erosão ocasionado pelas descargas elétricas, sobre a peça a ser trabalhada. A máquina que emite essas descargas elétricas realiza isso através de um componente

¹ Uma Rede Neural Artificial pode ser definida como uma estrutura computacional que tem como objetivo permitir a implementação de modelos matemáticos que representem, de forma simplificada, a forma como o cérebro humano processa as informações que adquire. Assim, Rede Neural Artificial pode ser interpretada como um esquema de processamento que é capaz de armazenar conhecimento baseado em aprendizagem (experiências) e disponibilizar este conhecimento para as aplicações desejadas /6/.

adaptado com o perfil desejado, chamado de eletrodo, que é o responsável por produzir a centelha, atingindo a peça que está sendo usinada /2/. Na Figura 4, pode ser visto um exemplo de eletrodo para matriz de forjamento.

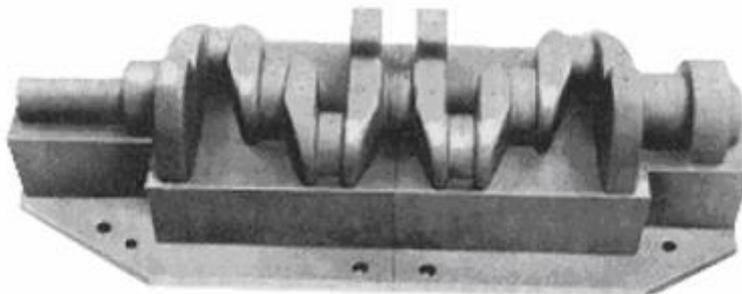


Figura 4. Eletrodo para gravação por eletroerosão.
Fonte: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/proeletroerosao.asp>

No processo de eletroerosão, a peça e o eletrodo ficam submersos em um fluido isolante, um óleo específico, conhecido como fluido dielétrico que tem também as funções de servir de ponte para centelha, além de refrigerar e promover a limpeza da área de usinagem /2/ /4/.

O valor da distância de início da ponte elétrica, canal de descarga que conduz as partículas eletricamente carregadas, formada entre o eletrodo e a peça varia de 5 a 100 μm , de acordo com as regulagens dos parâmetros do equipamento. Essa distância é denominada de *gap*, palavra do idioma inglês que significa folga /3/. Na Figura 5 pode ser visto o funcionamento esquemático do processo de eletroerosão.

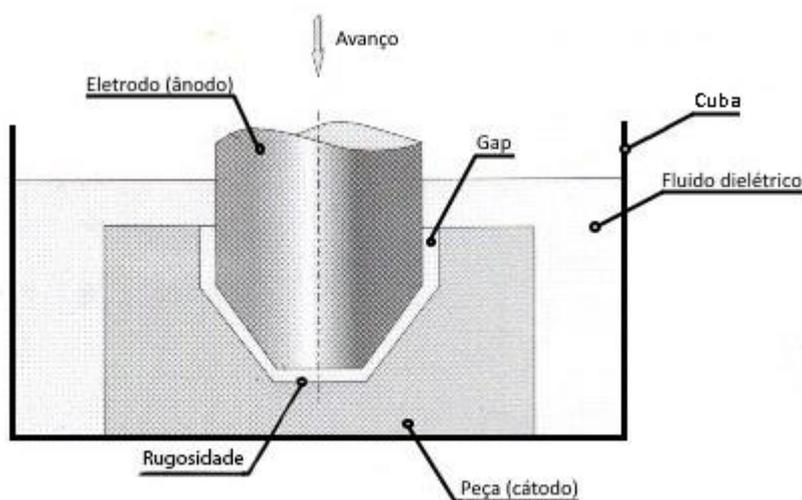


Figura 5. Funcionamento esquemático do processo de eletroerosão
Fonte: CEFET-RS – Fundamentos de projetos de ferramentas. Garcia. M.C.R.

Pode-se explicar a sequência do processo de usinagem por eletroerosão em quatro fases /3/:

- a) Primeira fase: ignição da faísca;
- b) Segunda fase: formação do canal de plasma;
- c) Terceira fase: fusão e evaporação de partículas dos materiais da peça e do eletrodo;
- d) Quarta fase: remoção do material fundido.

Os elétrons do ânodo são acelerados em direção ao cátodo em função do aumento do campo elétrico entre as superfícies do eletrodo e da peça. Ao longo do percurso, esses elétrons colidem com moléculas do fluido dielétrico, liberando ainda mais elétrons, formando partículas positivas. Este processo forma uma reação em cadeia, que é conhecida por ionização por impacto /3/.

Devido à velocidade das colisões dos elétrons com as moléculas do fluido dielétrico, durante a ionização por impacto, ocorre um superaquecimento do fluido dielétrico. Estes fatores dão origem à formação do canal de plasma. Os pontos mais próximos entre o eletrodo e a peça são onde ocorrem as primeiras descargas elétricas. O desgaste da peça aumenta esta distância, que é compensada pelo avanço do eletrodo, mantendo a folga programada /3/.

Na terceira fase, os elétrons e íons positivos, que foram liberados durante a ionização por impacto, estão fluindo em alta velocidade pelo canal de plasma e penetram de forma concentrada no ânodo e no cátodo. Neste instante, a energia cinética acumulada pela alta velocidade é convertida em energia térmica, fazendo com que altíssimas temperaturas sejam atingidas na região do canal de plasma. Estas temperaturas ultrapassam os 8000 °C, fundindo e vaporizando partículas da peça /3/.

Ao desligar a energia elétrica, o processo de formação do canal de plasma entra em colapso, lançando o material parcialmente líquido e vaporizado na folga. O material então é resfriado e removido em forma de minúsculos cavacos pelo fluido dielétrico /3/.

Este processo todo normalmente ocorre numa faixa de tempo situada entre 10 e 1000 μs e retira uma quantidade de material entre 10^{-6} e 10^{-4} mm^3 . Mas, por ser muito rápida, a quantidade de material removido é consideravelmente alta /3/.

2.2.2 Processos e Aplicações

Os processos de eletroerosão dividem-se em penetração e a fio.

2.2.2.1 Eletroerosão por Penetração

Eletroerosão por penetração é o processo mais comum de usinagem por descarga elétrica. Este processo é baseado pela penetração do eletrodo na peça /3/.

Tem-se como características do processo /3/:

- a) Transferir para a peça a imagem invertida do eletrodo;
- b) Poder furar ou gravar;
- c) Possibilitar movimento do eletrodo no eixo perpendicular ao plano da peça.

Tem-se como aplicações do processo /3/:

- a) Fabricação de peças automotivas;
- b) Gravação e estampagem;
- c) Usinagem de materiais condutores de alta dureza;
- d) Fabricação de peças com geometrias complexas;
- e) Fabricação de moldes e matrizes.

2.2.2.2 Eletroerosão a Fio

Os princípios básicos da eletroerosão a fio são iguais aos da por penetração. A diferença é que um fio eletricamente carregado atravessa a peça. O processo a fio também ocorre submerso em um fluido dielétrico, normalmente água deionizada. A grande vantagem deste processo é permitir o corte de perfis complexos com exatidão, pois normalmente o corte é programado por CNC (Comando Numérico Computadorizado) /3/.

2.2.3 Parâmetros de Usinagem na Eletroerosão

Como todo processo de usinagem, o controle dos parâmetros na eletroerosão também é fundamental para seu desempenho /5/.

2.2.3.1 Parâmetros Fixos de Usinagem por Eletroerosão

Os parâmetros fixos são invariáveis em função do processo de usinagem, sendo os mais importantes:

Material da peça: Quanto maior a condutividade elétrica do material, maior será a taxa de remoção dele e a rugosidade da superfície melhora diminuindo a relação de desgaste /2/ /5/.

Fluido dielétrico: Isola o processo contra descargas prematuras, limpa a área usinada removendo o resíduo gerado e refrigera a região solidificando materiais fundidos e vaporizados. A composição e a condição do fluido dielétrico influenciam a estabilidade do processo, alterando todo o resultado da usinagem como a taxa de remoção de material e a rugosidade final da peça /2/ /3/ /4/.

2.2.3.2 Principais Parâmetros Variáveis na Usinagem por Eletroerosão

Os parâmetros variáveis alteram-se em função do processo de usinagem, sendo os mais importantes:

Frequência de descarga elétrica: Determina o número de vezes que a corrente elétrica passa de ligada *ton* para desligada *toff* em um determinado tempo. *Ton* é o tempo em que o processo está eletricamente energizado. O valor deste parâmetro é diretamente inserido na máquina. *Toff* é o tempo em que o processo está eletricamente desenergizado. Este tempo é necessário para a estabilização das condições de processo na folga. No *toff* está incluído o tempo de explosão da bolha de gases, refrigeração das partículas e limpeza do canal de plasma que afeta diretamente a velocidade do processo, mas também é fundamental para que ocorra a estabilidade deste. Uma regulagem de

baixa frequência seria com um *ton* estendido, normalmente utilizado para obter altas taxas de remoção de material em operações de desbaste. Já nas operações de acabamento, a regulagem do *ton* é curta, obtendo-se vários ciclos por segundo, considerando-se uma regulagem de alta frequência. *Ton* elevado aumenta a taxa de remoção de material, piora a qualidade da superfície e a camada subsuperficial, porém reduz o desgaste do eletrodo /3/.

Intensidade de corrente: Quanto maior a área a ser usinada, maior a corrente elétrica a ser usada pela descarga. A corrente elétrica é o fator que mais influencia na textura da superfície da peça. Uma corrente mais alta aumenta a taxa de remoção dos materiais e o valor da rugosidade superficial /2/.

2.2.3.3 Principais Parâmetros de Desempenho

Taxa de remoção de material: É o volume de material removido da peça em uma determinada unidade de tempo. Depende da energia e da frequência empregada para um processo de EDM. É dependente também das propriedades do material da peça a ser usinada, como ponto de fusão, e das propriedades do material do eletrodo. Fatores geométricos, como forma e dimensões do eletrodo e da peça, também influenciam /2/ /3/.

Relação de desgaste entre eletrodo e peça: É a razão entre o volume de material removido da peça e o volume de material removido do eletrodo. Depende das propriedades físicas e químicas dos materiais. Ponto de fusão é a propriedade que mais afeta a taxa de desgaste do eletrodo. Outros fatores que também influenciam este parâmetro são taxa de remoção de material, área da seção transversal dos eletrodos, conformação do eletrodo e a complexidade da forma geométrica da peça que se deseja usinar /2/ /3/.

Sobre corte lateral: É a diferença entre os raios do furo usinado na peça e do eletrodo. A intensidade de energia elétrica, a frequência de descarga, o sistema de limpeza e o material da peça e do eletrodo influenciam mais fortemente este parâmetro /3/.

Rugosidade superficial é o parâmetro de qualidade de acabamento determinado pelo desempenho do processo /3/.

2.3 Materiais Usados como Eletrodos

A princípio, teoricamente, qualquer material que conduza eletricidade pode ser usado como eletrodo. Materiais com altos pontos de fusão e alta condutividade elétrica são os ideais para uso como eletrodo ferramenta para eletroerosão. Além disso, devem ser baratos e facilmente usináveis por processos convencionais /3/ /4/.

Uma grande lista de materiais poderia ser usada. No entanto, os mais usuais são o cobre e o grafite. O cobre com ponto de fusão em 1083°C e grafite 3200°C, além da condutividade elétrica elevada, o que é altamente desejável, diminui o desgaste do eletrodo. A escolha do material dependerá de uma série de fatores, como material da peça e acabamento desejado. Porém, o que mais pesa na decisão é a relação de desgaste com o material da peça /2/ /3/ /5/.

As propriedades mecânicas do eletrodo pouco influenciam no desempenho da eletroerosão, porém, propriedades termofísicas, como condutividade térmica e elétrica, expansão térmica e temperaturas de fusão e ebulição, influenciam diretamente o desempenho do processo. Aspectos como taxa de remoção de material, desgaste do eletrodo e integridade da superfície da peça são afetados diretamente por estas propriedades /4/.

Entre os materiais usados na fabricação de eletrodos podem-se citar os seguintes: bronze e ligas de cobre-tungstênio. Porém, os mais utilizados são o cobre eletrolítico ou puro e classes especiais de grafite /4/.

O cobre é amplamente utilizado para acabamentos precisos na superfície da peça. Além de possuir as principais características requeridas para um eletrodo, ele pode ser moldado pelos principais métodos convencionais de usinagem. Apresenta apenas alguma dificuldade quanto à usinagem convencional, mesmo assim, podem ser usadas ligas como a de 2% de telúrio-cobre, que apresenta melhor usinabilidade /4/.

Qualquer operação de eletroerosão realizada com cobre, como material do eletrodo, também poderá ser realizada com grafite. Mesmo com o resultado final sendo igual, os custos para obtê-lo podem ser muito diferentes. Nestes casos, fatores como as dimensões da ferramenta, os requisitos da peça, o tipo de máquina e os métodos de usinagem para fabricação dos eletrodos é que irá determinar qual o melhor material a ser usado (4). A Figura 6 mostra os materiais utilizados como eletrodos.

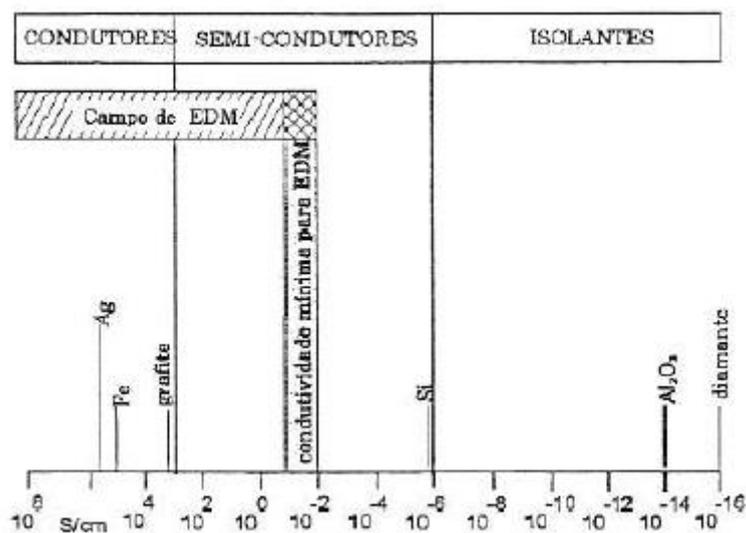


Figura 6. Condutividade elétrica de vários materiais.
<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/proeletroerosao.asp>

2.4 Fluidos Dielétricos

O fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo de eletroerosão, pois controla a potência de abertura da descarga elétrica. /4/.

Suas principais características são: possuir alta força dielétrica para permanecer eletricamente não condutor até que a voltagem de desequilíbrio seja alcançada; ionizar rapidamente tão logo aconteça a descarga elétrica; suportar a repetição das centelhas estabelecidas e possuir alta capacidade de refrigeração com baixa viscosidade /4/.

O fluido dielétrico precisa ser avaliado em relação aos seguintes fatores para desempenhar seu papel no processo de eletroerosão:

- ✓ Rigidez dielétrica – ou resistividade é a medida da capacidade do fluido resistir à formação do canal de plasma /5/.
- ✓ Tempo de deionização – é o tempo necessário para que íons e elétrons se recombinem depois de uma descarga. Quanto menor for este tempo, menor será o tempo de descarga elétrica desligada (*toff*) necessário entre os pulsos elétricos /4/.
- ✓ Viscosidade – é a medida da resistência do fluido ao escoamento. Este fator influencia na eficiência da limpeza e na remoção das partículas oriundas do processo /4/.
- ✓ Calor específico – quanto maior, mais acumula energia térmica sem aumento significativo na temperatura, que se muito alta aumenta a difusão de átomos da peça para o mesmo. Isto tende a causar alterações estruturais no material usinado, além de favorecer o surgimento de uma maior quantidade de micro trincas /4/.
- ✓ Condutividade térmica – quanto maior, menos tempo será necessário para refrigerar e solidificar os materiais fundidos e vaporizados na zona de erosão /4/.
- ✓ Ponto de ebulição – quanto maior, mais estabilidade é conferida ao fluido em temperaturas elevadas, sem que ele perca suas propriedades originais /4/.

O fluido é purificado por meios de filtros para extração das partículas removidas em seu circuito /4/.

2.5 Metalurgia do Pó

2.5.1 Definição

A metalurgia do pó é o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas, que se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelas seguintes características:

- Utilização de pós metálicos e não metálicos como matéria prima;
- Confecção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operações de usinagem posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento;
- Produção de componentes com características estruturais e físicas impossíveis de se obter por qualquer outro processo metalúrgico;
- Obtenção de peças em grandes séries, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais /7/.

2.5.2 Vantagens e Limitações do Processo

As vantagens podem ser assim resumidas a partir dos seguintes aspectos:

- Facilidade de produzir e conformar metais impossíveis ou muito difíceis de serem obtidos pelos meios metalúrgicos convencionais. Exemplo, metais refratários e metal duro /7/;
- Possibilidade de obtenção de características estruturais especiais, como porosidade controlada. Exemplo: filtros metálicos, materiais para mancais autolubrificantes /7/;
- Alternativa na obtenção de materiais caracterizados pela associação de metais com não metálicos /7/;
- Viabilidade de associarem-se metais diferentes para a obtenção de materiais em que fiquem mantidas as características específicas de cada componente /7/.
- Eliminação prática de rebarbas ou de qualquer excesso de material na forma de rebarbas /7/.

Os limitantes do processo resumem-se ao tamanho de série a ser produzida, ao peso da peça e a algumas geometrias especiais, como peças furadas e com roscas /8/.

Estas limitações são, na maioria das vezes, de ordem econômica, pois o maquinário e o ferramental envolvido têm um custo inicial elevado /8/.

2.5.3 Pós Metálicos

A matéria-prima, na metalurgia do pó, constitui um fator básico, principalmente no que se refere a sua uniformidade /7/. É imprescindível um rigoroso controle de sua fabricação, de modo que todas as suas características devem ser conhecidas, determinadas e controladas /8/.

A qualidade do pó metálico é função do seu processo de fabricação. Um mesmo pó metálico pode ser obtido por mais de um processo /7/.

2.5.3.1 Processos de Obtenção de Pós metálicos.

As reações químicas é o método mais comum neste grupo com a redução de óxidos metálicos, pelo emprego de um agente redutor gasoso ou sólido /7/. Os metais mais comumente produzidos por esse processo são o ferro, o cobre, o tungstênio e o molibdênio /7/.

A decomposição térmica ocorre quando um composto é exposto a temperaturas elevadas. Parte-se geralmente de compostos gasosos, resultando em partículas sólidas muito finas. Estes compostos são denominados carbonilas. Os principais pós metálicos obtidos por este processo são os de ferro e níquel /7/.

A atomização é o método que pode ser considerado o mais importante. Permite a fabricação de pós de praticamente qualquer metal ou liga metálica, cobre e latão, ferro e alumínio, bem como ligas de aço inoxidável e aços para ferramentas. O processo consiste em pulverizar um líquido metálico em partículas finas, geralmente inferior a 150 µm. Essa pulverização é feita forçando-se a passagem do metal líquido por um orifício na saída do qual a corrente líquida é desintegrada por um jato de água, gás ou ar. O metal solidifica pela ação combinada do jato e do resfriamento natural causado pela expansão do material ao deixar o orifício /7//9/.

A deposição eletrolítica é o processo que permite obter uma grande variedade de pós metálicos, sendo os mais comuns o ferro, o cobre e os metais preciosos /7/. O processo consiste basicamente de uma solução aquosa dos metais a serem produzidos. Vários cátodos e ânodos são inseridos na solução com uma corrente elétrica que é específica para cada material. O material adere aos cátodos que, após serem lavados, são moídos mecanicamente em moinhos de alta energia com atmosfera controlada. Este processo resulta em um pó de alta densidade ideal para peças que exigem tolerâncias dimensionais estreitas /7//8/.

2.5.4 Pureza e Composição Química

Partindo-se do pressuposto de que o pó metálico apresenta uma pureza acima de 99%, o principal objetivo de conhecer-se sua composição química ou pureza consiste

em determinar-se quais as impurezas metálicas ou não-metálicas presentes, visto que estas podem afetar as condições de compactação e de sinterização /7/.

Tamanho e forma das partículas são duas características que estão intimamente relacionadas e são, na realidade, as mais importantes nos pós metálicos /7/.

A forma esférica é aparentemente mais favorável do ponto de vista de compactação. Entretanto, a forma irregular tende a produzir peças compactadas com melhores características de sinterização, devido ao fato de haver uma interação dos contornos das várias partículas entre si /7/, /8/.

2.5.5 Porosidade

Quando presentes, os poros afetam não somente outros característicos dos pós, como a densidade aparente e a compressibilidade, como igualmente a porosidade da peça acabada. Devem-se distinguir dois tipos de porosidade: tipo esponjosa, caracterizada pela presença de poros que não estão interligados entre si e porosidade em que os poros estão interligados entre si. Neste caso e quando, além disso, os poros estiverem ligados com a superfície, verifica-se um aumento da superfície específica das partículas, além de ficar facilitada a absorção de gases durante o seu processamento /7/.

A importância do conhecimento da densidade aparente reside no fato de que a densidade determina o verdadeiro volume ocupado por uma massa de pó e, por consequência, determina a dimensão da cavidade da matriz e o curso da prensa necessário para a compactação /7/.

A resistência a verde é uma característica do pó compactado. A importância desta característica reside no fato de que sua determinação permite verificar a habilidade que um compactado tem de manter a forma e as dimensões antes da sinterização /7/.

2.5.6 Mistura, Homogeneização e Lubrificação de Pós Metálicos

A mistura é a operação em que dois ou mais pós de composição diferentes são intimamente misturados.

A homogeneização é a operação de misturar intimamente pós de idêntica composição nominal /7/.

A lubrificação tem a função de minimizar o desgaste, por redução do atrito entre a massa do pó em contato com as superfícies das ferramentas (matrizes, punções e machos metálicos), e por redução do atrito entre as partículas de pós. O lubrificante é adicionado a mistura dos pós em pequenas percentagens, usualmente da ordem dos 0,5 % a 1,0 % do peso total da mistura dos pós metálicos. Os lubrificantes mais utilizados têm por base os estearatos de zinco; os estearatos de lítio; os estearatos de cálcio; o ácido esteárico; a parafina; as ceras e o sulfureto de molibdênio /7/.

2.5.7 Compactação

Está é a primeira das operações de consolidação da metalurgia do pó. Seus objetivos são os seguintes /7/:

- Conformar o pó na forma projetada;
- Conferir as dimensões finais, ou aproximadamente finais, especificadas;
- Atribuir a adequada densidade verde ao compactado;
- Proporcionar a resistência mecânica necessária para o manuseio posterior.

Os processos mais importantes de compactação são os seguintes:

- Prensagem em matrizes rígidas;
- Compressão isostática;
- Compactação por laminação de pós, para a conformação de chapas e tiras;
- Extrusão de pós metálicos.

2.5.7.1 Princípios da compactação

Pode-se dividir o comportamento dos pós, quando submetidos à compressão, em três estágios: no primeiro estágio, as partículas são rearranjadas de modo a eliminar parcialmente a formação de vazios. No segundo estágio, ocorre a deformação plástica das partículas. Esta deformação depende da ductilidade do pó. No terceiro estágio, as

partículas de pó ficam frágeis devido ao encruamento dos estágios anteriores, quebram e formam fragmentos menores. Os três estágios normalmente se sobrepõem /7/,/8/.

2.5.8 Sinterização

Na metalurgia do pó, a sinterização pode ser definida como um processo de tratamento térmico para a ligação de partículas numa estrutura predominantemente sólida por transporte de massa e difusão, processo que ocorre normalmente em uma escala atômica. O princípio fundamental é que a sinterização envolve um processo de difusão no estado sólido, o qual permite que as partículas de pós compactadas se unam, sem se atingir um estado de fusão completo. As partículas dos pós, durante a sinterização, desenvolvem ligações metalúrgicas, e os pós densificam-se sob a ação do calor, o que conduz a uma melhor resistência mecânica e a uma baixa energia do sistema /8/.

Normalmente, a temperatura especificada de sinterização é da ordem de $2/3$ a $3/4$ da temperatura de fusão da liga considerada /7/.

A operação de sinterização deve ser efetuada em ambiente adequado para evitar que aconteçam fenômenos indesejáveis durante o processo. Para isso, empregam-se as chamadas atmosferas protetoras, cujos objetivos são em resumo /7/:

- Evitar ou minimizar qualquer reação química entre o compactado verde que, em geral, se caracteriza pela presença de porosidade, com o meio ambiente. A oxidação é a reação mais importante que uma atmosfera protetora evita;
- Remover impurezas presentes, principalmente películas de óxidos existentes não só na superfície como igualmente no interior do compactado;
- Fornecer, eventualmente, um ou mais elementos químicos para se ligarem com o metal do compactado.

Apesar de o processo de sinterização ter sido objeto de extensos trabalhos teóricos e experimentais, não existe uma teoria universalmente aceita que lhe seja

aplicável. Contudo, é correntemente aceita que a sinterização consiste, genericamente, em estágios distintos, não necessariamente sequenciais /7/,/8/:

1. Estágio de ligação inicial das partículas por adesão formação de um pescoço;
2. Estágio inicial de crescimento do pescoço e diminuição da área superficial;
3. Estágio intermédio de densificação e de encerramento dos poros e dos canais;
4. Estágio final de densificação e segregação seguida de coalescência dos poros.

É comum a presença de uma fase líquida durante a sinterização. Isso acontece /7/:

- Quando a composição da mistura é tal que, durante o aquecimento, um dos componentes se funde.
- Quando a fase sólida apresenta uma solubilidade limitada na fase líquida.
- Quando se aplica a operação de infiltração, quando se força a penetração e um metal no compactado poroso.

A sinterização em fase líquida é, na maioria dos casos, utilizada para obtenção de uma densidade máxima /7/.

2.5.9 Sinterização de Ligas de Cobre-nióbio.

A sinterização da liga Cu-Cr-Nb só foi possível com a utilização de temperaturas elevadas (1000 °C). Em temperaturas menores que 1000 °C o processo de sinterização não ocorre por haver uma diminuição no mecanismo de formação do pescoço e a densificação /10 apud 11/. As temperaturas de 700, 800, 850 e 900 °C foram testadas na sinterização de uma liga de cobre com 10% em peso de nióbio. Nas temperaturas abaixo de 900 °C o nióbio apresentou-se disperso na matriz de cobre com a formação de partículas de uma gama extremamente ampla de tamanhos /12/.

Na moagem, em moinho de bolas por 30h, é possível obter a completa dissolução do nióbio em cobre até uma composição de 10% Nb em peso. Com o aumento do teor de nióbio, ocorre uma diminuição das partículas de cobre durante a moagem. Há a formação de uma estrutura nanocristalina, apenas prejudicada pela presença de oxigênio que se liga ao nióbio não disperso, provocando o surgimento de óxido de nióbio /13/. Tratamentos térmicos nas ligas de cobre nióbio provocam alterações na estrutura nanocristalina. O aumento das quantidades de nióbio provoca a aceleração do crescimento das partículas de nióbio e a desaceleração do crescimento do cobre, devido a baixa afinidade entre os elementos /14/, /15/. As grandes diferenças nas temperaturas de sinterização entre o cobre e o nióbio pode levar a difusão das partículas de cobre para a superfície do grão /16/.

A diminuição dos parâmetros de rede da matriz de cobre, com o aumento da temperatura, indica uma precipitação contínua do nióbio dentro de uma gama de temperaturas entre 200 e 600 °C. Acima desta temperatura, o parâmetro de rede não muda mais e é igual ao cobre puro. Isso leva a suposição de que o nióbio que precipitou, a partir da solução sólida, reage com o oxigênio formando óxido de nióbio /17/, /18/, /19/.

Com altos tempos de moagem, acima de 50h, inicia a formação de grãos deformados. Estes grãos apresentam defeitos nas linhas de simetria da cadeia cristalina que ocasionam a ruptura da cadeia e a formação de partículas com tamanhos inferiores a 10 nm. Estes defeitos e as diferenças de orientação entre as partículas de cobre e nióbio reforçam o composto. As descontinuidades funcionam como uma barreira ao deslocamento cristalográfico. Este fator é mais evidente quando a microestrutura atinge valores nanométricos, mas provavelmente diminui a ductilidade /20/, /21/, /22/.

Ligas de cobre e nióbio também estão sendo obtidas por deformação plástica, na fabricação de fios mais resistentes, propiciando o uso em usinas nucleares. Altas deformações plásticas modificam a interface das partículas de cobre e nióbio, provocando a distorção da rede cristalina. Durante o processo de trefilação a quente, as partículas de nióbio sofrem pouca deformação, já quando o processo é executado a frio já estas partículas apresentam grande estiramento /23/, /24/, /25/. As distorções na rede cristalina provocam o aumento da resistividade elétrica e da dureza. É necessário, então, aplicar um tratamento térmico, entre 700 e 900 °C, para através da precipitação do nióbio corrigir as distorções na rede cristalina. Este tratamento permite alcançar uma resistência a tração de 1,2 GPa e uma condutividade elétrica de 47% do cobre puro, em

um fio de 2,07 mm de diâmetro e com 10 % de nióbio em peso na sua composição /24/,/26/.

J. A. Catterall e I. Willians /27/ em seu trabalho investigaram ligas de cobre com cargas de 20 e 40% de nióbio. Utilizaram 1000 °C na sinterização, fazendo surgir ilhas de nióbio dentro da matriz de cobre. Obtiveram com a amostra de 40% uma densidade de 8,46 g/cm³. Neste trabalho, com esta mesma porcentagem de nióbio, foi obtida uma densidade de 7,109 g/cm³, mas com uma melhor distribuição do nióbio dentro da matriz de cobre. Quando Catterall e Willians utilizaram 1200 °C, ocorreu a sinterização na fase líquida, o que ocasionou a perda de continuidade na rede de nióbio.

2.5.10 Aplicações da Metalurgia do Pó

Um dos campos em que a metalurgia do pó vem obtendo grande destaque é a injeção de pós metálicos. Moldagem por Injeção de Pós Metálicos (MIM – *Metal Injection Molding*) é um processo usado para fabricação em escala micrométrica e de pequenos componentes metálicos para uma ampla faixa de aplicação. Com o desenvolvimento deste, tornou-se possível a obtenção de um processo com alta produtividade, alta reprodutibilidade, produção em série e uniforme de peças metálicas, com geometrias complexas na ordem de micrômetros. O processo é baseado em uma modificação do processo convencional de moldagem por injeção de plásticos, na qual uma fração significativa do volume é substituída por um pó metálico fino /28/.

A metalurgia do pó também mostra-se promissora na substituição de processos convencionais de fabricação. Núcleos de motores elétricos, fabricados com chapas laminadas, podem ser substituídos por fabricados via metalurgia do pó. As perdas magnéticas das ligas fabricadas por metalurgia do pó são significativamente inferiores, com perdas até dez vezes menores que materiais laminados /29/. Em comparação com núcleos de motores de ferro puro, ocorre um aumento de dureza, a qual está relacionada com a formação de solução sólida juntamente a uma densificação da microestrutura. Para a utilização nas máquinas elétricas, o perfil de densidade e as propriedades mecânicas, são satisfatórias, em comparação com o material normalmente

utilizado no processo convencional para a fabricação de núcleos por meio de placas laminadas /30/.

A metalurgia do pó vem produzindo avanço também na área médica. Novas ligas metálicas estão sendo produzidas, com promissores resultados. A metalurgia do pó permite versatilidade nas composições das ligas buscando eficiência e compatibilidade biológica, que só é prejudicada quanto há impurezas presentes nos pós /31/, /32/.

2.6 Mercado dos Constituintes da Liga

Os mercados econômicos do cobre e do nióbio são norteados por transações que, no caso do nióbio, mantém o preço em sigilo /33/. O mercado do nióbio é basicamente brasileiro devido as suas enormes reservas.

2.6.1 Mercado do Cobre

Em pouco mais de cinco anos o mundo começará a viver uma constante escassez de cobre /34/. Fundamental para o desenvolvimento da infraestrutura dos países, a mercadoria traz consigo projeções que têm alertado os investidores e influenciado as estratégias das principais empresas de atuação global.

Segundo as projeções da CRU *International*, consultoria global do setor de mineração, com sede em Londres, a partir de 2017/2018, a demanda mundial de cobre vai superar de vez a oferta do metal /34/.

Dados do Grupo Internacional de Estudos do Cobre (ICSG, na sigla em inglês) mostram que a capacidade de produção no período de 2011 a 2014 deve crescer a uma taxa de 4,9% ao ano, mas a partir de 2014, a oferta volta a ficar apertada /34/.

2.6.2 Mercado do Nióbio

Elemento químico raro em todo mundo é abundante no Brasil /35/. O nióbio só é encontrado na natureza na forma de minerais como a columbita e o pirocloro.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), o Brasil concentra mais de 95% das reservas mundiais, embora outras fontes estimem em até 98% /35/. Em 2010, a

produção do concentrado do minério alcançou 63 mil toneladas, além de 53 mil toneladas de uma liga de ferro-nióbio, das quais 45 mil foram exportadas ao valor de US\$ 1,56 bilhão.

O Plano Nacional de Mineração 2030, que norteia as políticas de médio e longo prazo, estima um crescimento de 5,1% para o mercado interno e 3,8% para o mercado externo /36/. A Figura 7 demonstra a produção brasileira em relação à mundial.

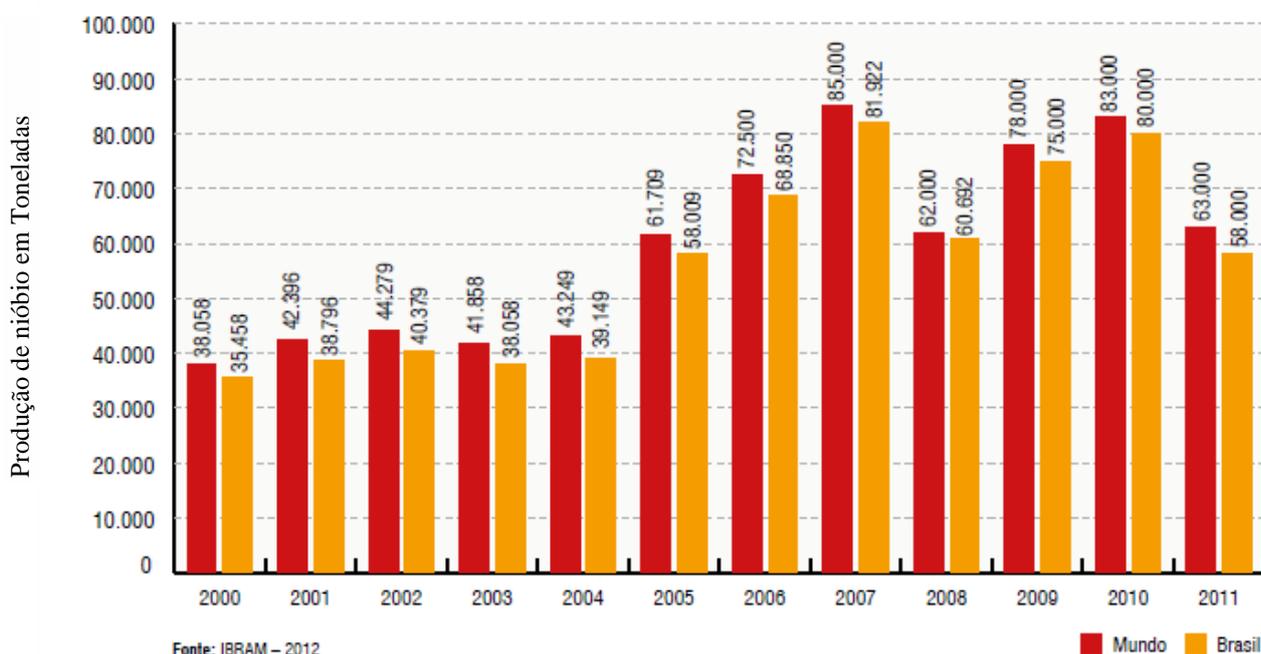


Figura 7. Produção de Nióbio em toneladas/35/.

O produto, que contém nióbio, mais exportado pelo Brasil é o ferro-nióbio, com mais de 90% das exportações /37/.

Em 2011, a exportação do ferro-nióbio gerou uma receita para o País de US\$ 1,8 bilhão /37/. Na figura 8 pode ser observada a variação anual do preço do ferro-nióbio.

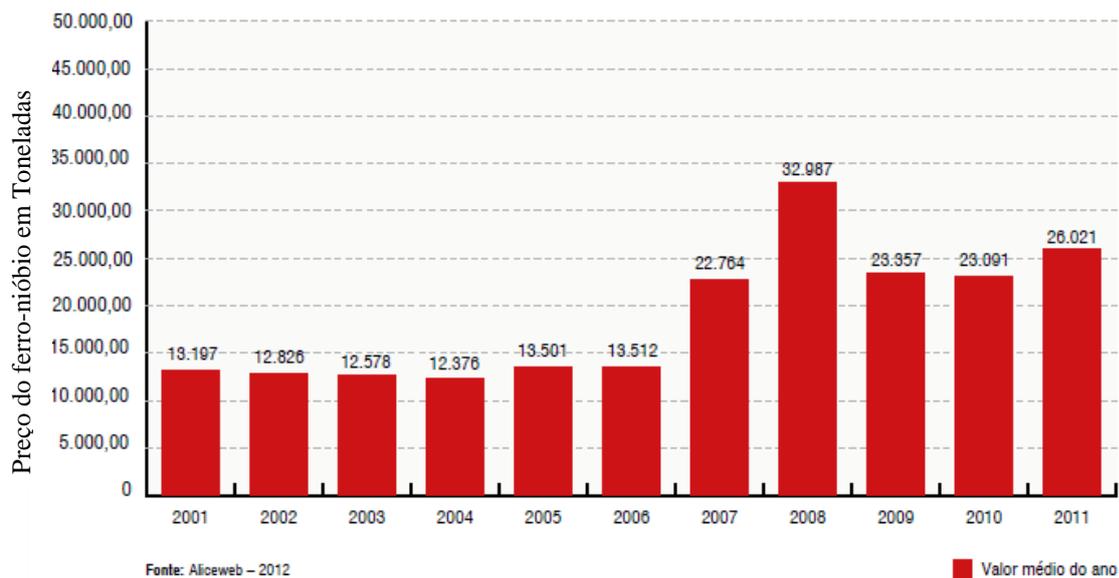


Figura 8. Preço do Nióbio em US\$/tonelada/35/.

O crescimento da demanda por matérias-primas mais eficientes está colocando os chamados “minerais raros” ou “estratégicos” em evidência /37/.

O Ferro-Nióbio pode, por exemplo, ajudar a produzir carros mais leves, que consomem menos combustíveis. Em obras grandes de infraestrutura, é possível usar um aço mais resistente e construir a mesma estrutura 60% mais leve /37/.

2.7 Características dos Materiais Constituintes da Liga

2.7.1 O Cobre

O cobre é um dos raros metais que se encontra na natureza em estado puro. Embora de menor valor que o ouro e a prata, era considerado precioso na Antiguidade. Antes do ano 4000 a.c, já era produzido em grande escala devido à simplicidade de seu tratamento metalúrgico. Este material foi sendo desvalorizado ao longo do tempo, principalmente com o descobrimento do aço, até que a telefonia e a eletricidade passaram a utilizá-lo em larga escala novamente, já no início do século XX /34/.

O cobre é um elemento metálico com número atômico 29 e peso atômico de 63,57. O seu símbolo químico é Cu, e suas valências são +1 e +2. Não é magnético e

pode ser utilizado puro ou em ligas com outros metais que lhe conferem excelentes propriedades químicas e físicas /38/.

Possui uma densidade de $8,96 \text{ g/cm}^3$ (20°C), ponto de fusão de 1083°C , ponto de ebulição de 2595°C . Não reage com o ar seco, mas quando o ar está úmido e contém dióxido de carbono, reage formando uma camada protetora esverdeada de carbonato básico (azinhavre) /38/.

O cobre é um excelente condutor de eletricidade, ficando logo depois da prata na fila de melhor condutividade elétrica. Possui elevada condutividade térmica, sendo matéria-prima preferencial para fabricação de cabos, fios e lâminas. É maleável e dúctil, podendo ser estirado sem quebrar. Aumenta sua dureza por meio de tratamentos metálicos /39/.

Como exemplo de compostos cuprosos, em que o cobre tem valência 1, cita-se o óxido Cu_2O , vermelho, usado para colorir vidros, e o cloreto CuCl , que em solução no amoníaco é o reativo do acetileno. Como exemplo de compostos cúpricos, em que o metal assume a valência 2, cita-se o óxido CuO , usado também para colorir vidros verdes, e o sulfato CuSO_4 , de cor azul, usado na galvanoplastia, em pinturas e até mesmo na agricultura /39/.

2.7.2 O Nióbio

O nióbio é um metal de alto ponto de fusão (2.468°C) do grupo dos metais ditos refratários, que se destaca pelas seguintes características: densidade pouco superior à do ferro, elevada resistência ao ataque por certos ácidos e metais líquidos, baixa resistência à oxidação e supercondutividade a temperaturas inferiores a -264°C /40/,/41/.

A liga ferro-nióbio é obtida através da aluminotermia, redução obtida através do alumínio fundido. É o produto final mais importante da cadeia do nióbio, sendo destinado à produção de alguns aços especiais, especialmente os microligados e os inoxidáveis. Nos aços, mesmo tendo um consumo específico pequeno (cerca de 400 g de FeNb por t de aço), o nióbio confere ao produto final características de resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade muito boas. Já para os aços inoxidáveis, o nióbio

atua neutralizando o efeito do carbono e do nitrogênio, diminuindo o risco de corrosão do produto /40/41/.

O óxido de nióbio (99% de Nb_2O_5), que representa 13% do mercado mundial de nióbio, é a matéria-prima para a fabricação de produtos especiais como: ferro nióbio de alta pureza, níquel-nióbio, óxidos especiais de nióbio (grau ótico e grau cristal) e nióbio metálico e suas ligas, os quais se destinam a uma série de usos mais sofisticados como as superligas aeronáuticas, os cerâmicos para optoeletrônica e os supercondutores /40/,/41/. Na Figura 9 pode ser vista uma amostra de niobita.



Figura 9. Amostra de Niobita.

Fonte: <http://www.cdcc.sc.usp.br/elementos/niobio.html>.

Nióbio é um metal dúctil que pode ser trabalhado a frio em até 90% sem a necessidade de recozimento. Pode ser endurecido pela adição de Zr, Ti e Hf /42/.

As suas propriedades físicas e mecânicas são influenciadas por sua pureza. As principais impurezas nos produtos a base de nióbio são o oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, molibdênio, carbono, ferro e tungstênio /43/. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas do nióbio.

Tabela 1 Propriedades físicas do nióbio /40/.

Propriedades	Valores
Massa atômica (u)(g)	92,9064
Densidade (ρ)(g/cm ³)	8,57
Ponto de fusão (°C)	2468
Ponto de ebulição (°C)	4927
Coefficiente de expansão térmica (γ)(°C)	$0,73 \times 10^{-5}$
Calor específico (c)(J/kg.K)	265
Condutividade térmica (κ) (W/m.K)	53,7
Estrutura cristalina	Cúbica de Corpo Centrado

Na Tabela 2 são apresentadas as principais propriedades mecânicas do nióbio.

Tabela 2 Propriedades mecânicas do nióbio /40/.

Recozimento	Tensão de tração. (τ_{tr})(MPa)	195
	Tensão de Ruptura (σ)(MPa)	105
	Alongamento (%)	30
	Redução de área (%)	90
Trabalho a frio	Alongamento (%)	5
Dureza	Recozido (HV)	60
	Trabalhado a frio (HV)	150
Módulo Elástico	Limite de elasticidade (GPa)	103
	Cisalhamento (τ_c) (GPa)	37,5
Temperatura de recristalização	(°C)	800 – 1100

O nióbio é um elemento de elevada afinidade para com carbono e forma um carboneto muito estável. Por conseguinte, é bem adequado como um elemento de liga para formar carboneto para a produção de aços para ferramentas e ligas de metal duro /44/.

O nióbio é um forte elemento de formação de carboneto quando utilizado em pequenos teores de 0,01 a no máximo 0,20 %, para a prevenção ou o retardamento do crescimento dos grãos austeníticos por carbonetos finos e estáveis de adição (como

microelemento de liga), ou, em concentrações mais altas, para a formação de carbonetos resistentes ao desgaste /44 apud 45/.

2.7.3 Obtenção do Nióbio em Pó

Uma das maneiras de obtenção do pó de nióbio é a redução sódica térmica, usando K_2NbF_7 (Potássio heptafluoroniobaite) como matéria prima e KCl (Cloreto de potássio) e KF (Fluoreto de Potássio) para diluir e Na (Sódio) como agente redutor. Utilizando uma câmara de vácuo, um excesso estequiométrico de 5 % de Na e na temperatura a de reação de 1820 °C, é possível obter pós de nióbio com tamanhos de 70 nm a 0,2 μ m, obtendo um rendimento de 82 % em peso e uma pureza de 99,5 % /46/.

Nióbio em pó também pode ser obtido por eletrólise em sal fundido. Nb_2O_5 (Óxido de nióbio) é introduzido, através de um cadinho, em uma solução fundida contendo 99,5 % de CaCl (Cloreto de cálcio) e 0,5 % de CaO (Óxido de cálcio). O cadinho é introduzido em um forno, com atmosfera de argônio, onde dois eletrodos de grafite são inseridos no sal fundido a 900 °C e fornecem uma tensão constante de 2,8 v. Durante a reação de redução é formado niobita de cálcio que gradualmente é eletroliticamente reduzido até formar pó de nióbio com oxigênio residual de 0,673 % em massa /47/.

O nióbio em pó, obtido a partir da redução calcotérmica, é sinterizado a uma temperatura de 1100 °C e apresenta-se como um substituto do tântalo na fabricação de capacitores eletrônicos, desde que os níveis de oxigênio residual sejam controlados /48/.

Outra maneira de se obter nióbio em pó é através da redução magnésio-térmica utilizando um reator tipo ciclone. Uma mistura de nióbio e óxido de magnésio (100 % em excesso estequiométrico) é alimentada no reator com uma proporção de $1,51 \times 10^{-4}$ Kg/s e para evitar a oxidação é utilizado argônio em um fluxo de $1,33 \times 10^{-3}$ m³/s. Devido a natureza exotérmica da reação, o argônio deve ser pré-aquecido para iniciar o processo, sendo após necessário estabilizar a temperatura em 1150 °C. Com este processo é possível atingir os pós com áreas de superfície específicas na magnitude de 20 m²/g e com um residual de oxigênio de menos que 5 % /49/.

2.8 Qualidade Superficial nos Processos de Usinagem

No Brasil a qualidade superficial é regida pela norma ABNT-NBR 4287 2002, que é responsável por especificar os parâmetros de rugosidade das superfícies /50/.

O parâmetro de rugosidade média R_a (do inglês *Roughness Average*) é bem conhecido e usado há décadas, servindo como modelo de medida. É um parâmetro conhecido e comprovado experimentalmente, fornecendo uma solução confiável, sendo o mais usado em usinagem /50/.

A rugosidade média R_a é calculada pela média aritmética dos valores absolutos de picos e vales conforme a Figura 10. Sendo Z_{t_i} a amplitude.

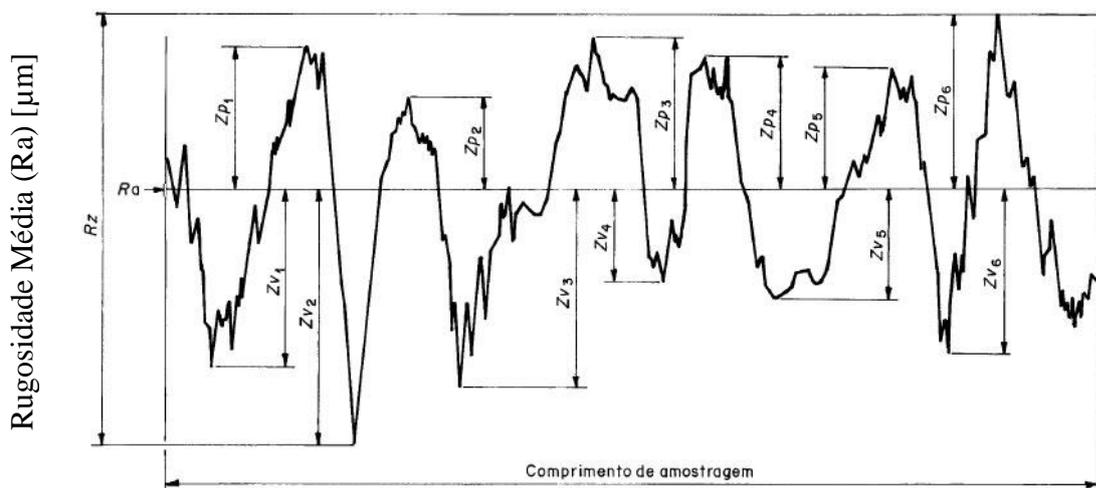


Figura 10. Representação de modelo de rugosidade média.
Fonte: ABNT-NBR 4287 2002.

Defeitos superficiais são indesejáveis sobre o aspecto estético do produto final, como podem afetar negativamente o tempo de vida de matrizes de forjamento e moldes. Pequenas fissuras que podem surgir durante a usinagem com eletroerosão afetam fortemente estes fatores /51/.

O refinamento da microestrutura, juntamente com a melhor qualidade superficial (tamanho inferior dos defeitos na superfície) compensa a influência negativa da porosidade, em relação ao comportamento da fadiga de alto ciclo /52/.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho foram usados pó de cobre eletrolítico com pureza de 99,5% e pó de nióbio, 99% puro. O nióbio foi fornecido pela empresa CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração). O cobre utilizado neste trabalho, que foi adquirido da empresa BRUT Metalúrgica, pelo laboratório de conformação mecânica (UFRGS), com pureza de 99,5 %. Decidiu-se usar as composições de 10, 20, 30 40, e 50 % de carga de nióbio no cobre. Para testes de compressão, sinterização e análise metalográfica foram confeccionadas dez amostras, de cada composição com diâmetro de 13 mm, espessura variável de acordo com as pressões de compactação, totalizando cinquenta peças.

A Tabela 3 apresenta as quantidades de massas das amostras.

Tabela 3 Quantidades de massas das amostras

Amostra	(Cu) (g)	(Nb) (g)	Lubrificante (Esterato de zinco) (g)	Total (g)
I	4,5	0,5	0,05	5,05
II	4,0	1,0	0,05	5,05
III	3,5	1,5	0,05	5,05
IV	3,0	2,0	0,05	5,05
V	2,5	2,5	0,05	5,05

Para os testes de usinagem em eletroerosão foram confeccionados duas peças (eletrodos) de cada composição. A Tabela 4 mostra as quantidades de materiais utilizadas nos eletrodos.

Tabela 4. Quantidades de massas dos eletrodos

Eletrodo	(Cu) (g)	(Nb) (g)	Lubrificante (Esterato de zinco) (g)	Total (g)
I	13,5	1,5	0,15	15,15
II	12,0	3,0	0,15	15,15
III	10,5	4,5	0,15	15,15
IV	9,0	6,0	0,15	15,15
V	7,5	7,5	0,15	15,15

Para determinar as massas de cada um dos materiais constituintes da liga, utilizou-se de uma balança da marca Marte, modelo AL 500, com precisão de 0,001 g.

3.1 Densidade Aparente

Define-se a densidade aparente (ρ) de um pó solto como a relação da massa para o volume em g/cm³. Neste trabalho, os valores de densidade aparente foram obtidos das dimensões da matriz utilizada, diâmetro de 13 mm e comprimento útil de 48 mm, obtendo um volume de 6,36 cm³ para uma área circular.

3.2 Compactações dos Pós Metálicos

A pressão de compactação foi definida através da curva de compressibilidade, traçada com base na norma ASTM B331. Essa norma define que a compressibilidade é a capacidade de certa quantidade de pó para densificar sob a ação de uma pressão de compactação. Para definir a curva aplicam-se várias pressões de compactação, nos quais resultaram diferentes densidades.

Para compactação dos pós metálicos, constituintes da liga estudada, foi utilizada uma matriz cilíndrica de aço temperado, com diâmetro interno (\emptyset) de 13 mm e 63 mm de altura (h) da cavidade, com o punção inferior de 15 mm de altura e o punção superior de 65 mm de altura e ambos com diâmetro de 12,99 mm. A Figura 11 mostra a matriz e os punções utilizados.

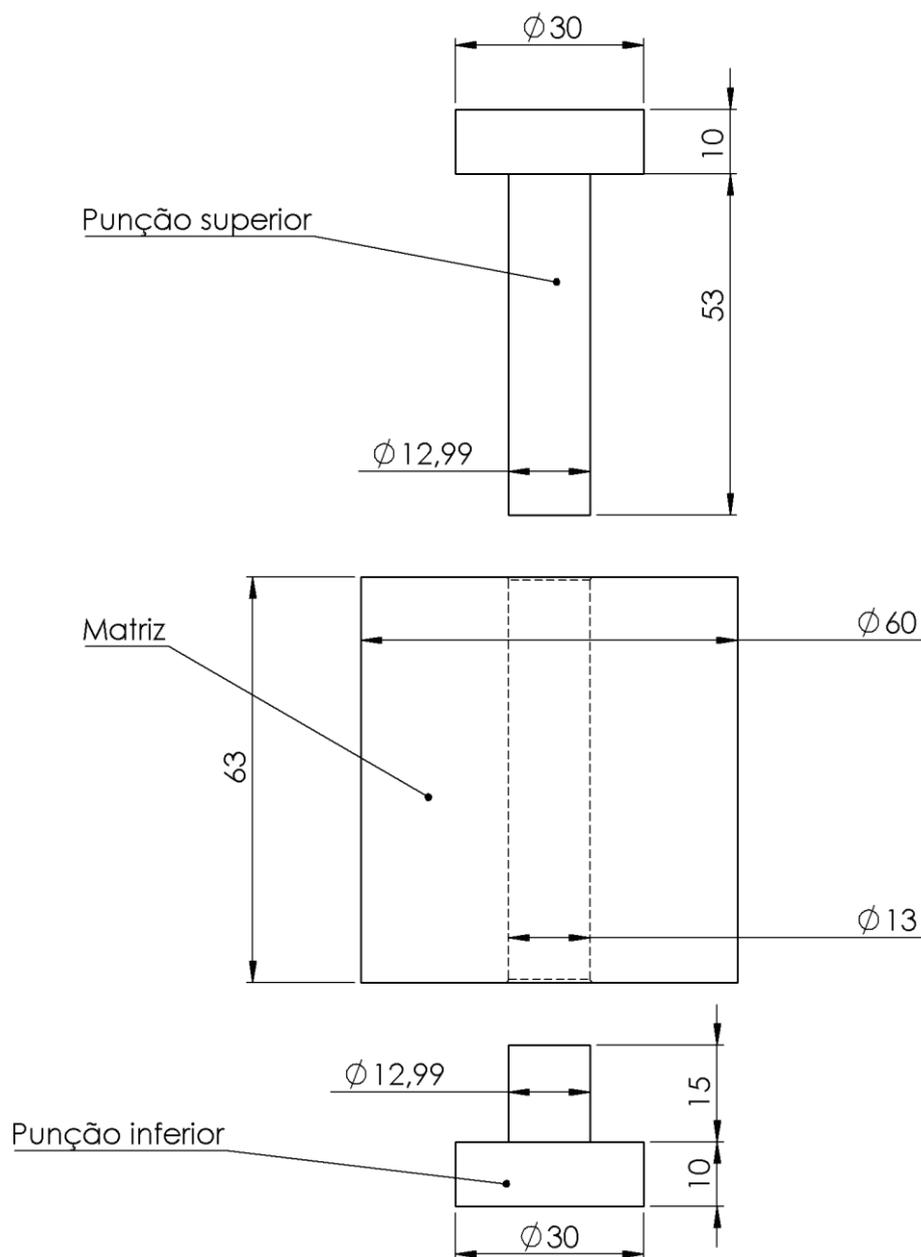


Figura 11. Matriz e punções utilizados na compactação.

3.2.1 Prensagem

Para a prensagem do pó, a fim de densificar e conferir uma forma aos pós constituintes da liga, foi utilizada uma prensa hidráulica da marca Bovenau modelo P30st, com capacidade máxima de 294,2 Kn e acionamento manual.

3.3 Sinterização

Para obter uma melhor resistência mecânica nos eletrodos foi feita a sinterização. Para isso, utilizou-se um forno da marca SANCHIS. A temperatura de sinterização utilizada foi de 950 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Devido à alta afinidade do nióbio com o oxigênio, foi utilizado gás argônio como atmosfera protetora.

3.5 Metalografia

As amostras foram preparadas manualmente através de uma sequência de lixas. Foi iniciado com lixa de granulção 200 e terminadas com 1200, sendo após polidas com pasta de alumina de granulometrias de 0,1 µm.

Na caracterização das amostras foi feita a metalografia, primeiramente sem ataque químico, para melhor visualizar a porosidade. Na segunda etapa, as amostras foram atacadas com uma solução de ácido nítrico com nitrato de prata a 2%.

3.4 Corpo de Prova Utilizado na Eletroerosão

O material utilizado como corpo de prova nos testes em eletroerosão foi o aço AISI H13, temperado. Um aço que apresenta boas propriedades de resistência mecânica em altas temperaturas. Este aço ferramenta está ligado ao cromo-molibdênio-vanádio, de alta tenacidade, alta temperabilidade, grande resistência ao amolecimento pelo calor e ao choque térmico. Apresenta boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas e ótima usinabilidade. Devido a estas características é um aço muito utilizado em trabalhos a quente. O AISI H13 possui composição química de Carbono (0,40 %), Silício (1,00 %) Magnésio (0,35 %), Cromo (5,15 %), Molibdênio (1,40 %) e Vanádio (1,00 %). O corpo de prova foi utilizado nos testes em eletroerosão. A geometria utilizada foi selecionada por garantir a planicidade, melhorando a distribuição da centelha durante a usinagem. Foi utilizada uma unidade deste material nas dimensões iniciais de 300 x 92 x 80 mm. A Figura 12 apresenta o desenho da geometria do corpo de prova utilizado no processo.

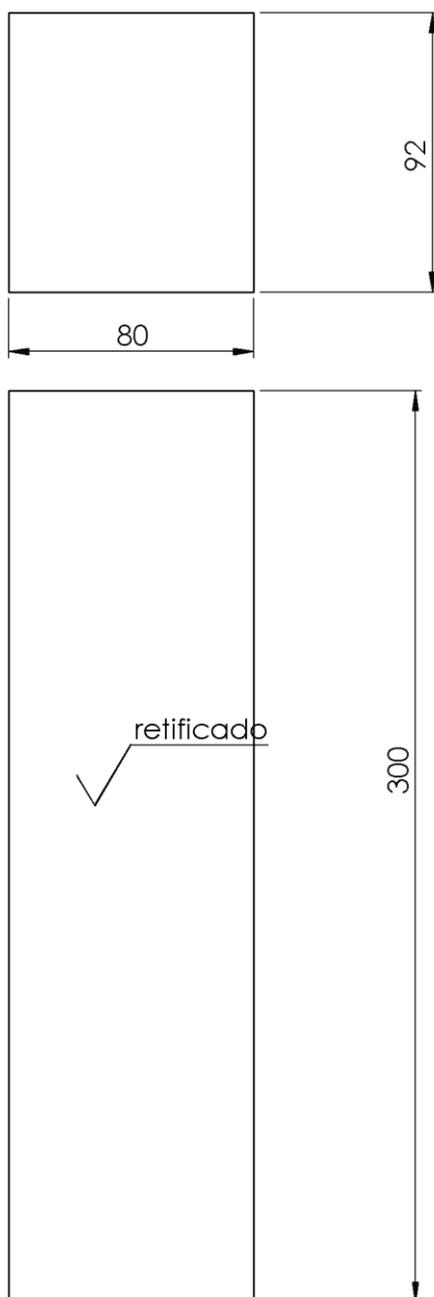


Figura 12. Corpo de prova utilizado na eletroerosão.

O corpo de prova foi retificado, em duas faces paralelas, a fim de garantir que o eletrodo tocasse integralmente, sem distorções de área. Para tanto, foi utilizada uma retifica marca Mello modelo P58, com capacidade longitudinal de 1020 mm, transversal de 600 mm e vertical de 410 mm. A ferramenta usada na retificação foi um rebolo com classificação C80M5V e dimensões de 350x40x127mm. Devido a estas características, foi possível utilizar uma rotação de 1600 RPM e uma velocidade de corte de 30 m/mm como parâmetros de usinagem.

3.5 Haste de Fixação do Eletrodo na Máquina de Eletroerosão

Para fixar o eletrodo na máquina de eletroerosão foi confeccionada uma haste de aço ABNT 1020. Este aço foi escolhido devido à baixa solicitação de esforços durante a usinagem por eletroerosão. As dimensões da barra de fixação são comprimento de 120 mm e diâmetro de 20 mm. Na parte superior, foi feito um rebaixo de 5 mm de profundidade, com 35 mm de comprimento para fixação no cabeçote da máquina de eletroerosão. Na parte inferior, foi feito um furo de diâmetro de 13,2 mm e profundidade de 8 mm para alojamento do eletrodo. Na lateral deste furo, foi feita uma rosca M4 para fixação do eletrodo através de um parafuso tipo sextavado interno sem cabeça. A haste de fixação pode ser vista na Figura 13.

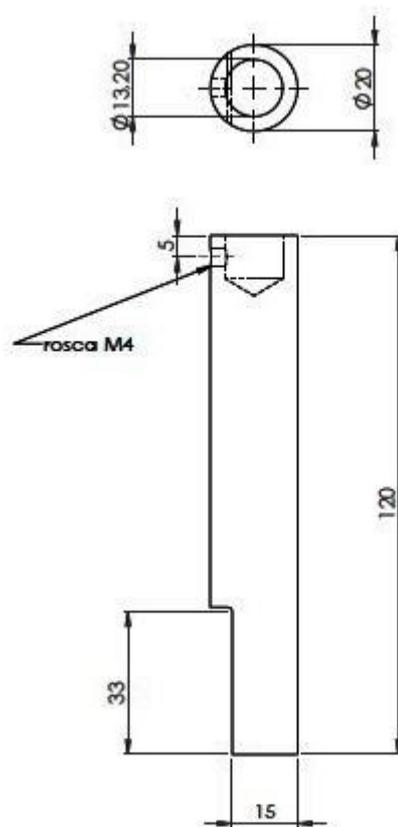


Figura 13. Haste de fixação do eletrodo.

3.5.1 Máquinas e Ferramentas Utilizadas na Confeção da haste de Fixação

Para confecção da haste foi utilizado um torno mecânico marca Nardini, modelo mascote.

As ferramentas utilizadas no processo de torneamento foram um suporte com pastilha de metal duro, uma broca de centro de aço rápido de diâmetro 2,5 x 5,3 mm, uma broca aço rápido com diâmetro de 3,2 mm, uma broca de aço rápido com diâmetro de 13 mm e um macho de aço rápido M4.

Em função das ferramentas selecionadas e do material que foi usinado, a haste, aço ABNT 1020, os parâmetros de usinagem aplicados foram a velocidade de corte para o desbaste: 60 m/mim, e para o acabamento: 90 m/mim. A rotação para estas operações foi de 1000 rpm para o desbaste e 1500 rpm para acabamento, a velocidade de corte para furação: 25 m/mim e a rotação de: 600 rpm.

Para confecção do rebaixo de 34 x 5 mm, necessário para fixação da haste na máquina de eletroerosão, foi utilizada uma fresadora SUNLIKE, modelo ferramenteira.

A ferramenta utilizada para confecção do rebaixo foi uma fresa de aço rápido com diâmetro de 20 mm e 4 facas de corte; os parâmetros utilizados foram velocidade de corte de 40 mm/min e rotação da ferramenta de 630 rpm.

3.6 Máquina de Eletroerosão Utilizada no Ensaio

Para realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de eletroerosão da marca Engemaq, modelo EDM 200 NC, com cursos de longitudinal, no eixo X, de 300 mm, transversal, no eixo Y, de 200 mm e vertical, no eixo Z, de 150 mm. As regulagens desta máquina permitem trabalhar com uma gama de 5 até 300 μ s ton e regulagem de toff de 1 até 18 μ s.

3.7 Instrumentos de Medição Utilizados Durante os Ensaios em Eletroerosão

Para medição dos eletrodos foi utilizado um paquímetro tridimensional, digital com capacidade de medição de 0 a 150 mm e resolução de 0,01 mm.

A fim de garantir um perfeito alinhamento entre a face do corpo de prova e a face do eletrodo, foi utilizado um relógio apalpador, com curso de medição de 0,8 mm e resolução de 0,01 mm. Para a fixação do relógio da máquina foi utilizada uma base magnética.

Na medição da profundidade da erosão no corpo de prova e para calcular o volume de material removido, foi utilizado um micrômetro de profundidade, com capacidade de medição de 0 a 25 mm e resolução de 0,01 mm.

Para medição do valor da rugosidade, resultante do processo, foi utilizado um rugosímetro portátil digital, modelo SJ 201. Esse modelo é apropriado para medição de rugosidade, forma e perfil, possui acionador de medição destacável, o que facilitou a análise das rugosidades após os ensaios. O parâmetro utilizado foi o de medição por Ra, o qual este equipamento possui capacidade de medição de até 25 μm , em função da geometria impressa e do espaço disponível para verificação de rugosidade o percurso selecionado foi de 0,8 mm com multiplicador de 5 vezes.

3.7.1 Balança Analítica

Após cada ensaio, os eletrodos foram pesados para determinar o percentual de perda de massa durante o processo. Para isso, foi utilizada uma balança analítica da marca Sartorius modelo BP 110S, capacidade de 150 g e precisão de 0,0001 g.

3.8 Experimentos em Eletroerosão

Os parâmetros que influenciam o desempenho na usinagem por eletroerosão são destacados a seguir: Taxa de remoção de material, desgaste do eletrodo e rugosidade média da superfície. Os parâmetros que determinam o desempenho do processo de eletroerosão podem ser diretamente inseridos na máquina, variando de acordo com os resultados esperados (Qualidade superficial, dimensional). Um dos principais parâmetros, regulados na máquina, é a frequência de descarga elétrica. Este parâmetro é que determina a quantidade de vezes que o sistema passa de descarga elétrica ligada, (*ton*) para descarga elétrica desligada (*toff*). Altos tempos de descarga elétrica (*ton*) minimizam o desgaste do eletrodo, por gerar um menor tempo de usinagem, mas geram uma rugosidade superficial maior. O tempo de descarga elétrica desligada (*toff*) é necessário para a estabilização do processo, promovendo a limpeza da zona de erosão e a refrigeração, *toff* tem grande influência no processo, sendo o responsável por evitar o acúmulo de material na zona erodida. Este acúmulo pode provocar a concentração de energia em um ponto, danificando o eletrodo e a peça de trabalho. Outro fator inserido

na máquina é o tempo de serviço (*dt* do inglês *duty time*) que é responsável por mater a relação entre *ton* e *toff*, de acordo com a equação 1.

$$dt = \frac{ton}{ton + toff} \times 100 (\%)$$

Eq. 1

Para determinar a Intensidade de Corrente Elétrica (A), em eletroerosão, utiliza-se o parâmetro *ts*. Um *ts* corresponde a 3,5 A. Como taxa de referência foi utilizada as tabelas do fabricante da máquina utilizada no ensaio (Engemaq) para o cobre eletrolítico. Os parâmetros utilizados na máquina de eletroerosão são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem utilizados na eletroerosão

Parâmetro	Tempo de descarga elétrica ligada <i>ton</i> (μs)	Intensidade de corrente elétrica. <i>ts</i> (A)	Correção automática de parâmetros <i>dt</i> (%)
I	2	1	33
II	2	2	33
III	2	3	33
IV	75	1	86
V	75	2	86
VI	75	3	86
VII	150	4	91

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização das Matérias Primas

4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura do Cobre Puro

A Figura 14 mostra o pó de cobre eletrolítico. Por apresentar uma granulometria baixa, e alto grau de pureza, o pó de cobre foi utilizado como fornecido.

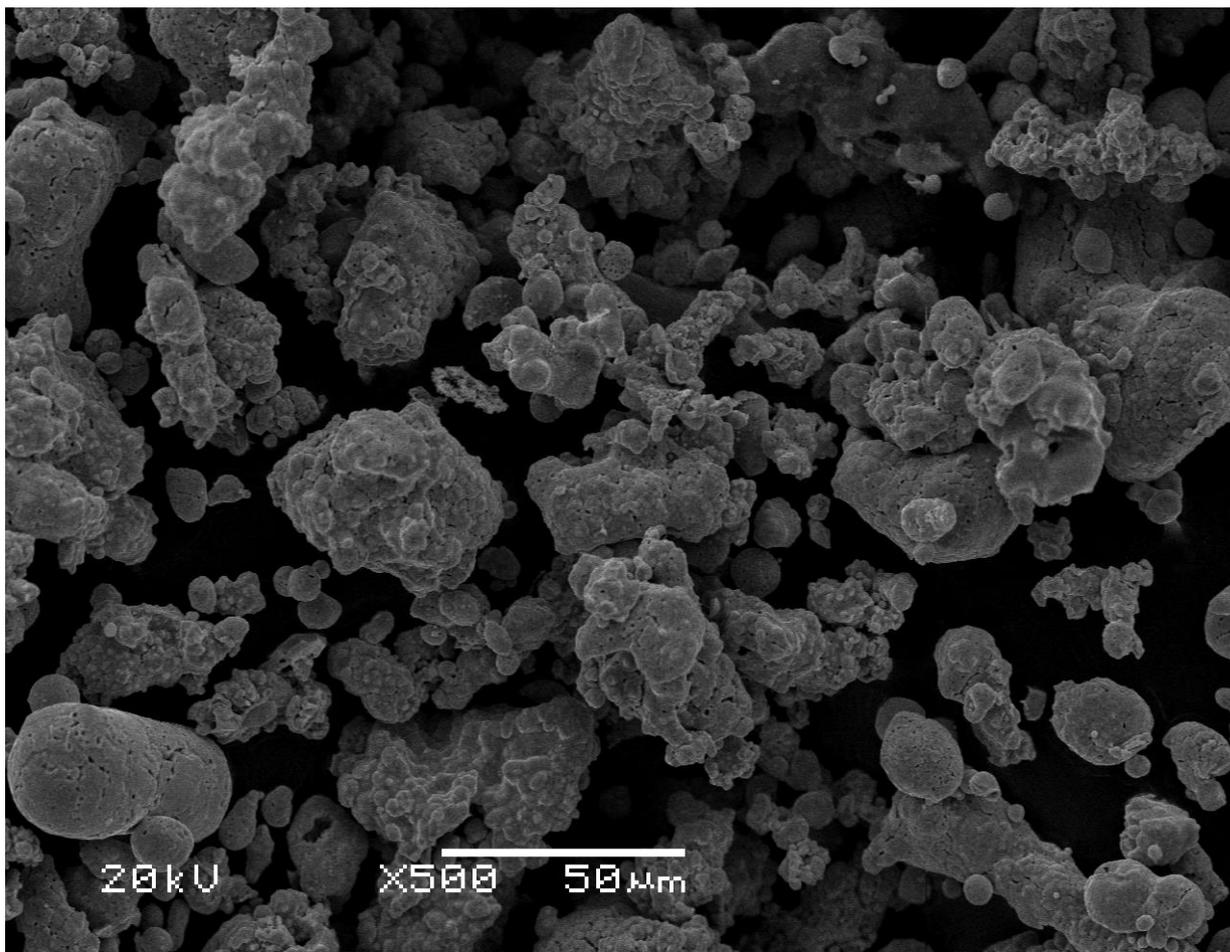


Figura 14. Micrografia do cobre (500X)

4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura do Nióbio Puro

Como pode ser visto na Figura 15, as partículas apresentam um tamanho incompatível com o cobre. Para este trabalho, o pó de nióbio foi moído, sendo, posteriormente, classificado por tamisamento, utilizando o sistema Tyler. Para

confeção das amostras e dos eletrodos foi utilizado o pó resultante da peneira com abertura de 0,077 mm.

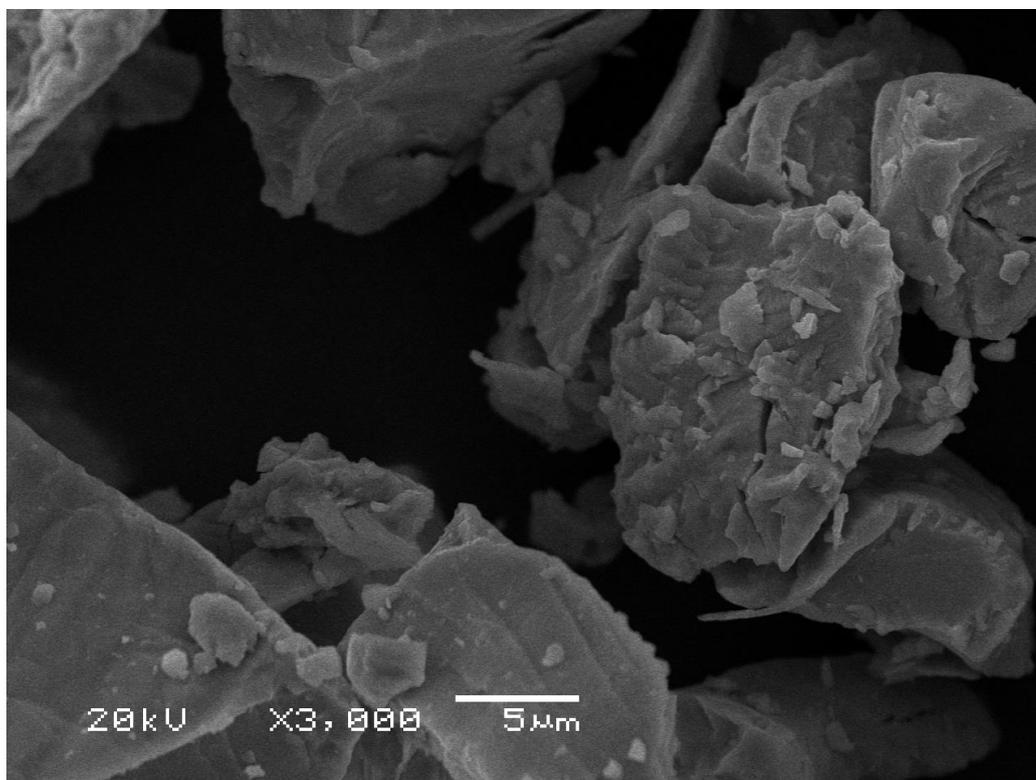


Figura 15. Micrografia do pó de nióbio depois de peneirado (3000X).

4.3 Compactações dos Compostos Intermetálicos

A compactação é necessária para dar forma e densificar os produtos obtidos por metalurgia do pó. Para confecção das amostras, utilizadas para determinar a sinterização e fazer a metalografia, foram utilizadas as amostras determinadas na tabela 3. Para a confecção dos eletrodos foram utilizadas as amostras da tabela 4. A maior quantidade de material nos eletrodos se faz necessária devido ao desgaste no processo de eletroerosão.

4.3.1 Densidade Teórica do composto

A densidade teórica pode ser calculada, segundo Chiaverini, pela proporção das densidades dos matérias constituintes de uma liga. Sendo a densidade do cobre de $8,93 \text{ g/cm}^3$ e a do nióbio $8,57 \text{ g/cm}^3$. As densidades teóricas das ligas estudadas são:

- 90 % Cu – 10 % Nb = 8,917 g/cm³;
- 80 % Cu – 20 % Nb = 8,883 g/cm³;
- 70 % Cu – 30 % Nb = 8,843 g/cm³;
- 60 % Cu – 40 % Nb = 8,804 g/cm³;
- 50 % Cu – 50 % Nb = 8,765 g/cm³.

4.3.2 Densidade Aparente do composto

A partir das ligas de cobre-nióbio, determinou-se a densidade média aparente dos compósitos. Os valores da densidade aparente foram obtidos utilizando o volume da cavidade da matriz utilizada na compactação. Na Tabela 5 têm-se os valores das densidades aparentes com 1% de lubrificante.

Tabela 6 - Densidade aparente das ligas intermetálicas

Amostras	Nióbio (Nb) (%)	Cobre (Cu) (%)	Lubrificante (Estereato de zinco) (%)	Densidade Aparente (ρ) (g/cm ³)
I	10	90	1	3,05
II	20	80	1	3,12
III	30	70	1	3,17
IV	40	60	1	3,1
V	50	50	1	3,25

4.3.3 Densidades

Na elaboração deste trabalho, foram medidas as massas dos corpos de provas, em uma balança analítica e mensurados com um micrômetro, os diâmetros e alturas para se calcular o volume. Utilizando-se a equação da densidade que relaciona o volume e a massa, foi obtida a densidade a verde do compactado. Para medir a densidade após a sinterização, foi utilizado o método de Arquimedes, que consiste em mergulhar as amostras em água e medir as massas com auxílio de uma balança analítica. Na Figura 16 é apresentado o resultado para a liga com 10% de nióbio. Como pode ser observado, há um rápido aumento na densidade até a pressão de 300 MPa. A partir de 500 MPa, a densidade tem um aumento pouco significativo variando de 6,524 g/cm³ até 7,096 g/cm³ com 1000 MPa variação de aproximadamente 8,7%. Após a sinterização não ocorreu uma mudança significativa na sinterização. Para esta liga houve um aumento médio de 2,12% na densidade.

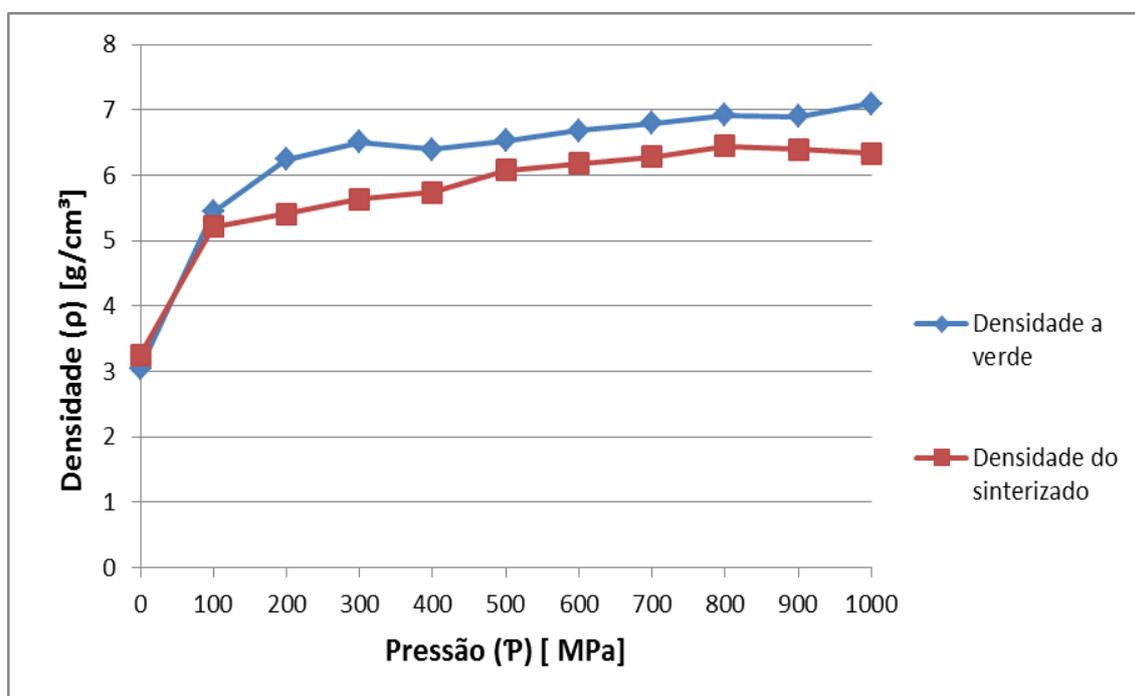


Figura 16. Densidades da liga- 90% Cu 10% Nb

A Figura 17 apresenta a compactação das amostras com 20% de nióbio. Pode ser visto, pelo gráfico, que a densificação ocorre sem variação, há uma rápida compactação

até os 300 MPa, partindo de uma densidade de 3,12 g/cm³ sem compactação, atingindo 6,23 g/cm³ em 300 MPa e culminando com 7,47 g/cm³ a 1000 MPa, uma variação de 19,9 %. Após a sinterização, a liga apresentou um aumento de densidade que, na média foi de 3,48 %, levemente maior do que a liga anterior. Comparando com o resultado da densidade a verde, pode-se observar que a curva manteve o mesmo padrão sem variações significativas.

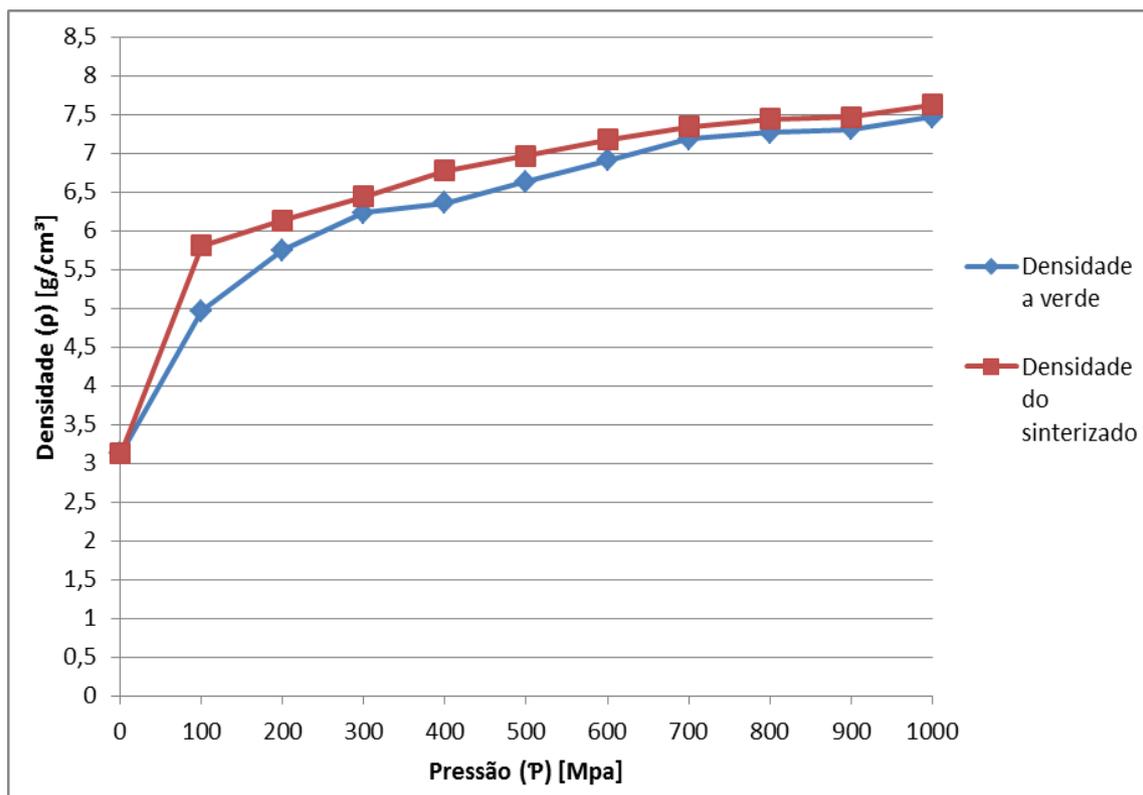


Figura 17. Densidades da liga- 80% Cu 20% Nb

Com a liga intermetálica de 70% cobre e 30% nióbio, o comportamento da curva de compactação foi similar a de 20% de nióbio. Como pode ser observado na Figura 18, a maior densificação foi com 900 MPa, que atingiu 7,58 g/cm³. As densidades imediatamente anterior e posterior foram de 7,26 g/cm³ e 7,45 g/cm³. Com a liga de 30% de nióbio, o aumento de densidade após a sinterização foi de 2,51% em média. Isso destaca que houve uma maior densificação nas amostras que evidenciavam uma porosidade maior a verde.

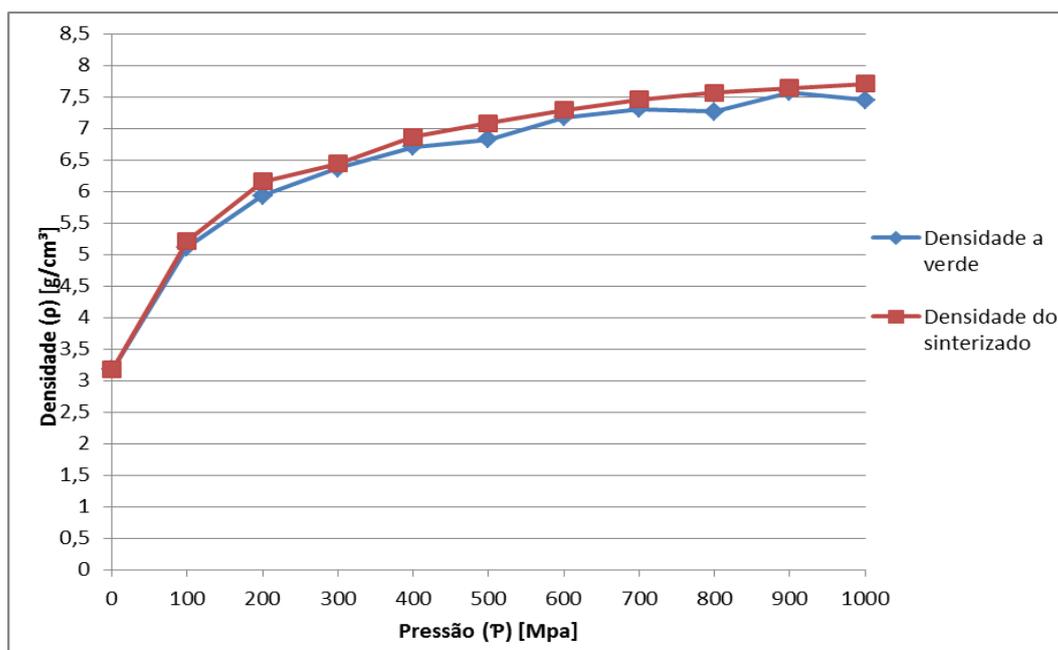


Figura 18. Densidades da liga- 70% Cu 30% Nb

A liga com 40% de nióbio foi a que se mostrou com uma densificação mais linear, o adensamento das amostras manteve uma curva de crescimento constante já a partir dos 100 MPa de pressão. A Figura 19 ilustra bem esta linearidade. O maior valor de densidade foi obtido com a pressão de 1000 MPa, 7,76 g/cm³. Após a sinterização a curva apresenta similaridade a da densidade a verde. Pode ser observado que há um declínio da densidade a partir de 600 MPa de pressão de compactação.

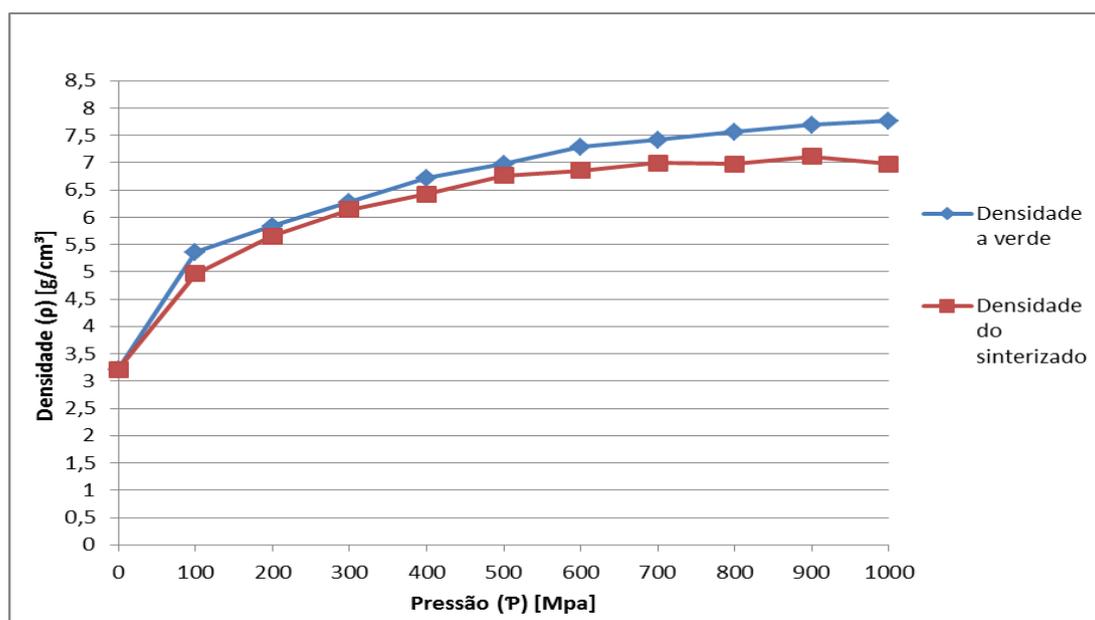


Figura 19. Densidades da liga- 60% Cu 40% Nb

Na Figura 20, pode ser notado que a densidade sofre variações havendo quedas nas pressões de 500 MPa e 900 MPa. Também pode ser observado que a densidade se mantém linear nas pressões de 600 a 1000 MPa. O valor máximo de densidade encontrado foi de 6,501 g/cm³ que, comparado aos resultados anteriores, mostra que quantidades maiores de nióbio na liga prejudicam a compactação resultando em eletrodos com uma porosidade maior. Com a liga de 50%, a curva de densidade que antes da sinterização se mostrava bastante irregular, após teve esta característica amenizada. As quedas de densidade que se apresentavam com 500 e 900 MPa foram diminuídas, evidenciando novamente uma diminuição da porosidade.

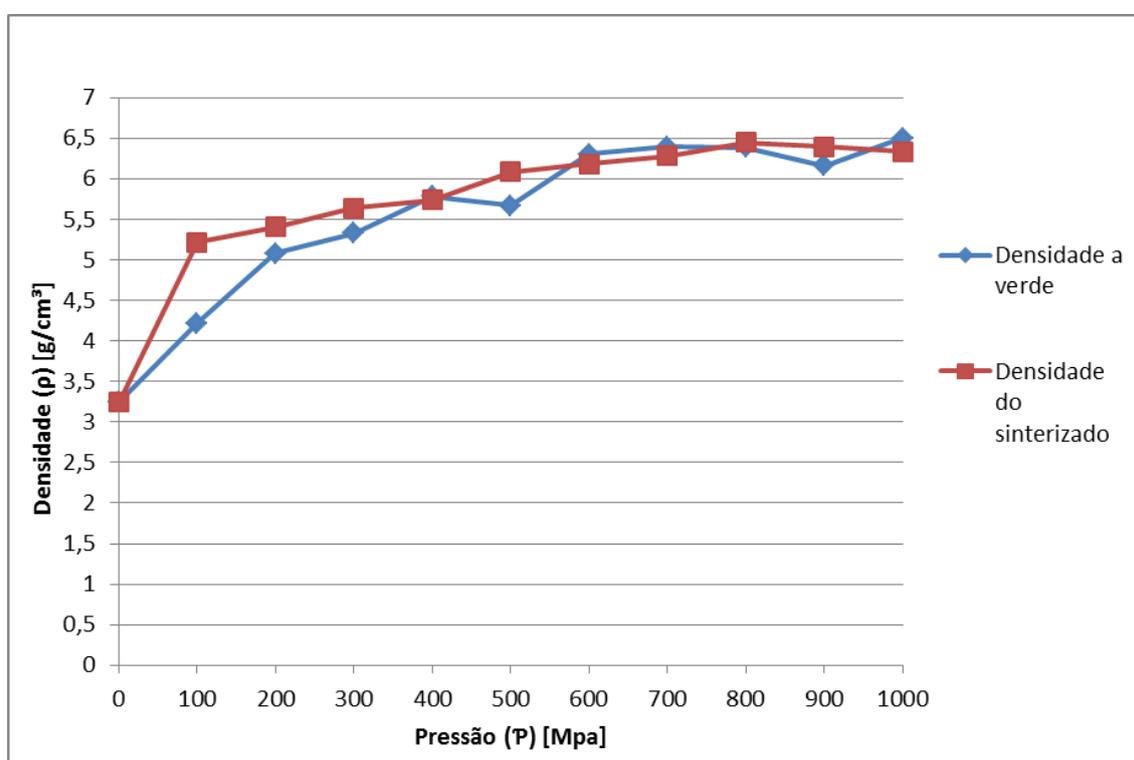


Figura 20. Densidade a verde da liga- 50% Cu 50% Nb

4.5 Caracterizações das Amostras de Cu+Nb

4.5.1 Metalografia sem Ataque Químico

Na Figura 21, 22 e 23 (90 % cobre – 10 % nióbio) é mostrado o resultado para as amostras com 10% Nb. Para melhor entendimento as figuras foram divididas em quatro partes, de acordo com as pressões utilizadas na compactação: 100 MPa (a), 200 MPa (b), 300 MPa (c) e 400 MPa (d). As setas brancas marcam os locais dos poros.

Pode-se notar que há um grande número de poros. Este fato é prejudicial à usinagem em eletroerosão, devido à má distribuição da corrente elétrica. Há um desprendimento de partículas que aumentam o desgaste e afetam ao rendimento. Zhao *et al* /52/ utilizando um eletrodo com uma estrutura de aço, obtido por sinterização seletiva a laser, e infiltrado com cobre chegaram às seguintes conclusões: As peças mais porosas e tempos de descarga (ton) maiores provocam uma taxa de desgaste maior, mas isso pode ser melhorado com uma maior intensidade de corrente (ts). Já Zaw *et al* /53/ testou um composto, obtido por metalurgia do pó, de cobre com ZrB_2 e $TiSi$ em várias composições e chegaram à conclusão de que com ZrB_2 há uma piora geral no rendimento devido a uma baixa ligação entre as partículas, o que pode ocasionar faíscas entre elas.

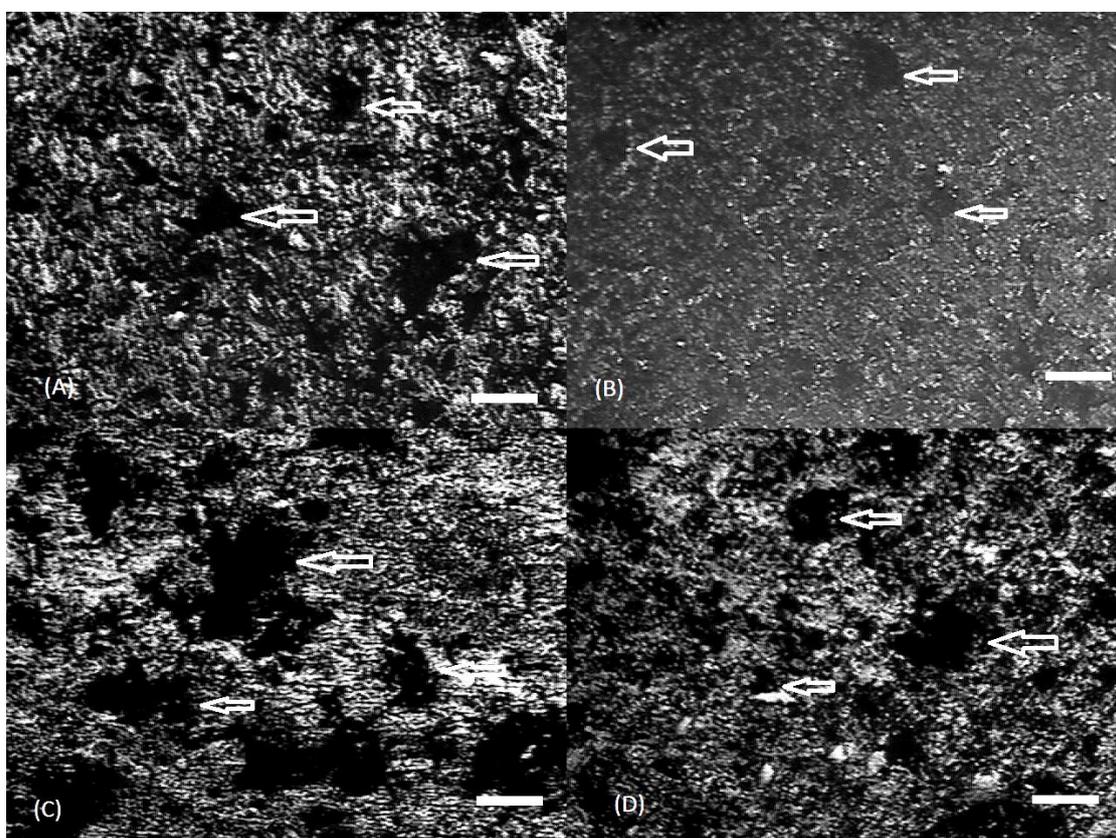


Figura 21. Liga 90% Cu-10% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

Na Figura 22 (90 % cobre - 10 % nióbio) pode ser observado que com aumento da pressão de compactação há a diminuição das dimensões e quantidades dos poros. A maior pressão favorece este resultado na medida em que aumenta a densidade.

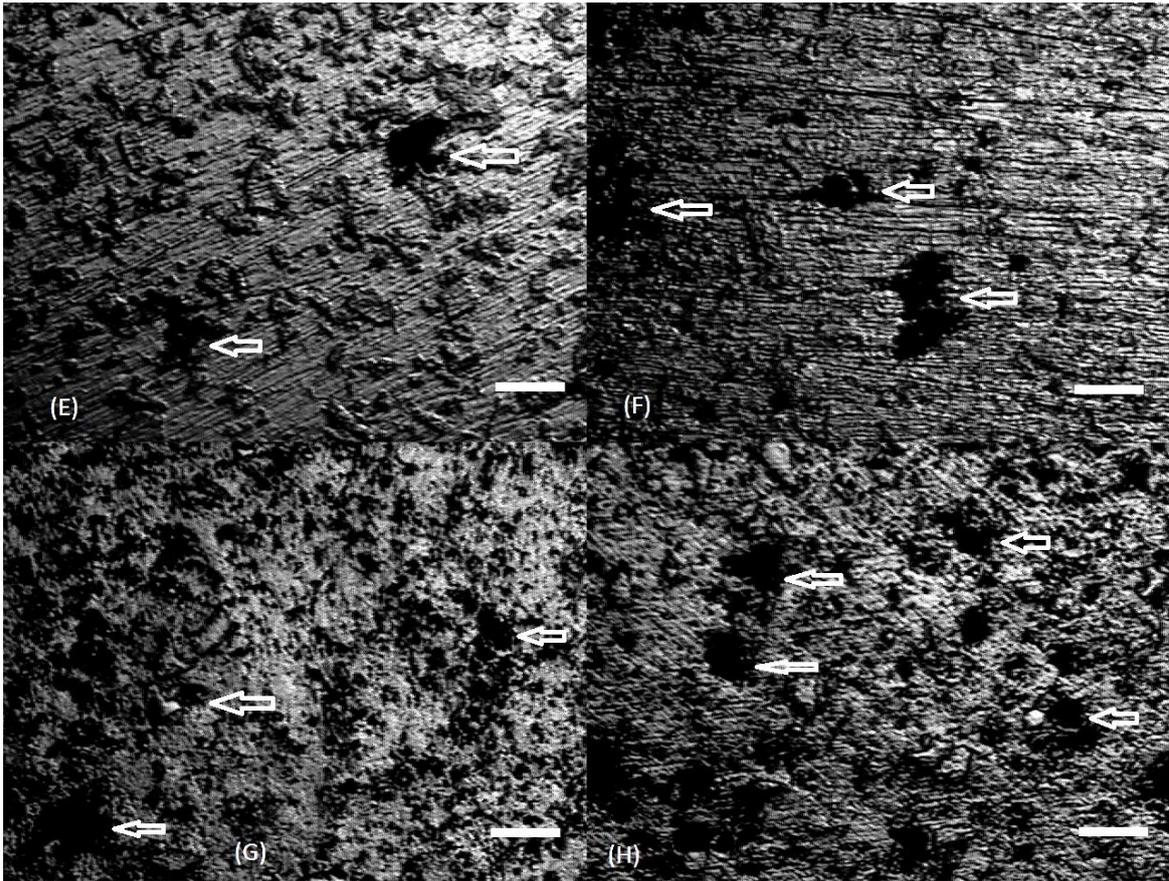


Figura 22. Liga 90% Cu-10% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 23, (pressão de 900 MPa-(I), 1000 MPa-(J)) observa-se que a quantidade, a distribuição e o tamanho dos poros se mantêm similares ao encontrado na amostra compactada com 700 MPa (Figura 34 (G)). Este resultado está de acordo com o encontrado na curva de densidade, que se apresenta sem variação, para estas amostras.

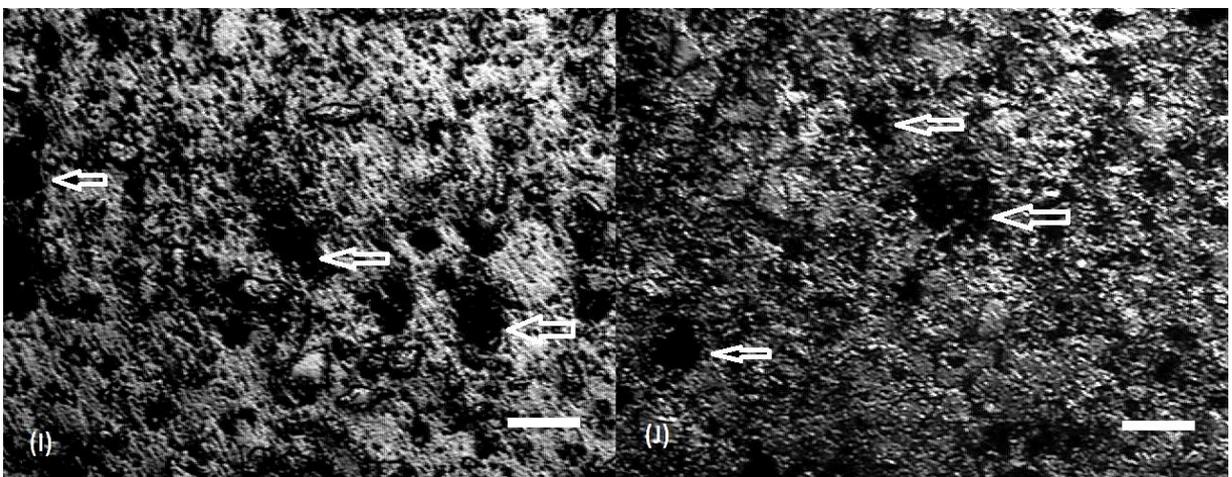


Figura 23. Liga 90% Cu-10% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

Nas Figuras 24, 25 e 26 são apresentadas as amostras com 80% Cu e 20% Nb. Observa-se que as baixas pressões de compactação favorecem o aumento das quantidades e tamanho dos poros.



Figura 24. Liga 80% Cu-20% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

Na Figura 25, pode ser observado que o aumento de pressão diminui a quantidade de poros favorecendo o aumento da densidade. Este fato não influenciou a curva de densidade que foi de $7,43 \text{ g/cm}^3$, valor este levemente maior que o anterior que foi de $7,34 \text{ g/cm}^3$. Como pode ser notado na imagem (H) em que foi utilizada a pressão de 800 MPa, a quantidade de poros diminui mas as suas dimensões maiores.

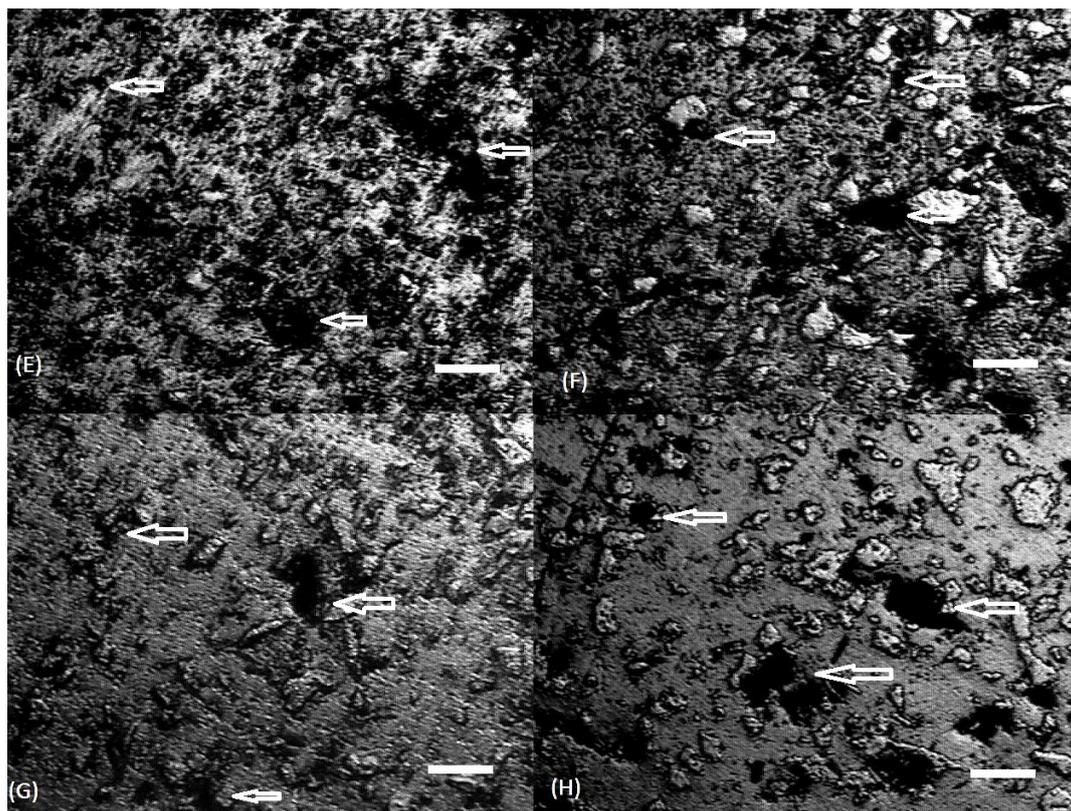


Figura 25. Liga 80% Cu-20% Nb sem ataque químico; (E)- 500MPa; Partes (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 26 podem ser observadas as amostras com as maiores pressões de compactação. Nota-se que, como indicam as setas brancas, o número e os tamanhos dos poros são significativamente menores, evidenciando a característica de maior densidade demonstrada na respectiva curva mostrada na Figura 23.

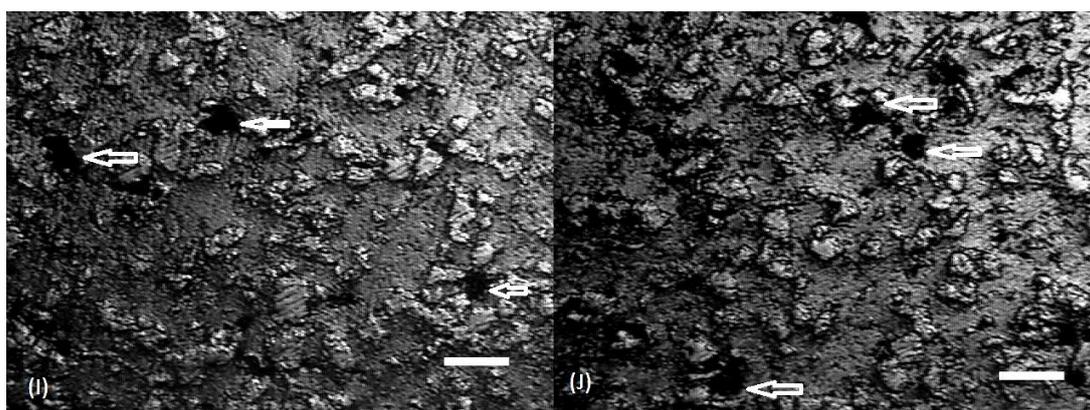


Figura 26. Liga 80% Cu-20% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

Nas ligas com 30% de nióbio a amostra com baixa densidade (A), mostrada nas Figuras 27, apresentou uma grande quantidade de poros, indicados pelas setas, o que causou problemas na sinterização, tornando-a quebradiça.

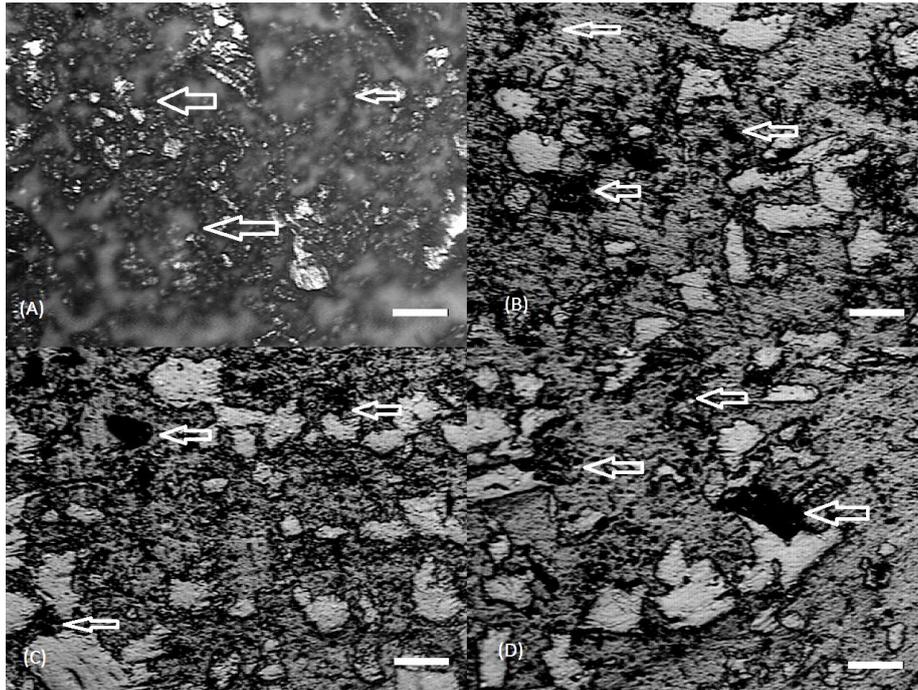


Figura 27. Liga 70% Cu-30% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

O fenômeno encontrado na amostra “a” não se repetiu nas demais amostras devido à maior densidade apresentada por elas. Na Figura 28, pode ser visto que uma maior compactação favorece a sinterização, devido à alta densidade obtida.

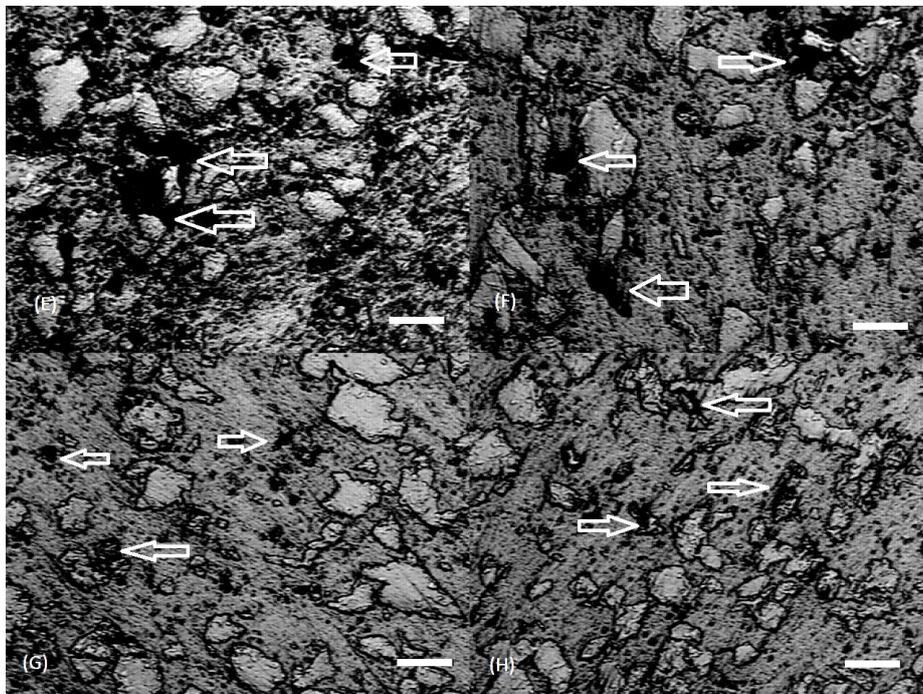


Figura 28. Liga 70% Cu-30% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Nas amostras de maior compactação, pressões de 900 e 1000 MPa, a presença de poros é mínima, estando distribuídas de forma uniforme, como observado na Figura 29.

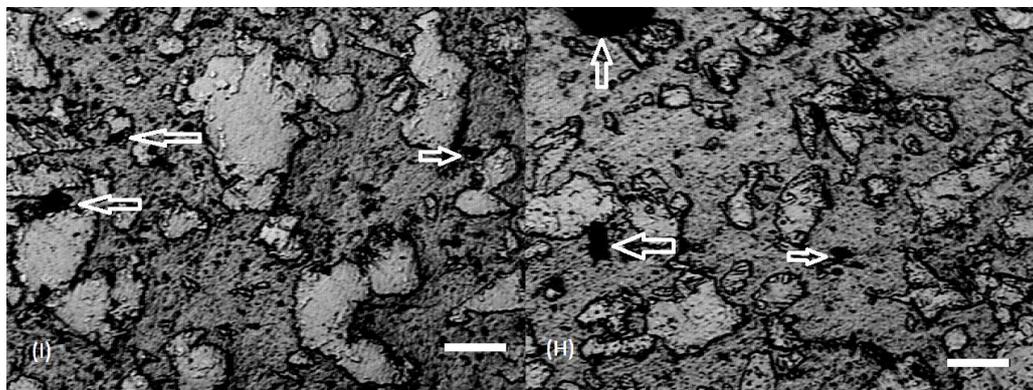


Figura 29. Liga 70% Cu-30% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

Utilizando 40% de nióbio, os problemas de compactação e sinterização ampliaram-se em relação às amostras com 30%. Como visto na Figura 30, partes (A); (B) e (C), a quantidade e os tamanhos dos poros foram significativos. Evidenciando-se, assim, a baixa compactação com o aumento das porcentagens de nióbio.

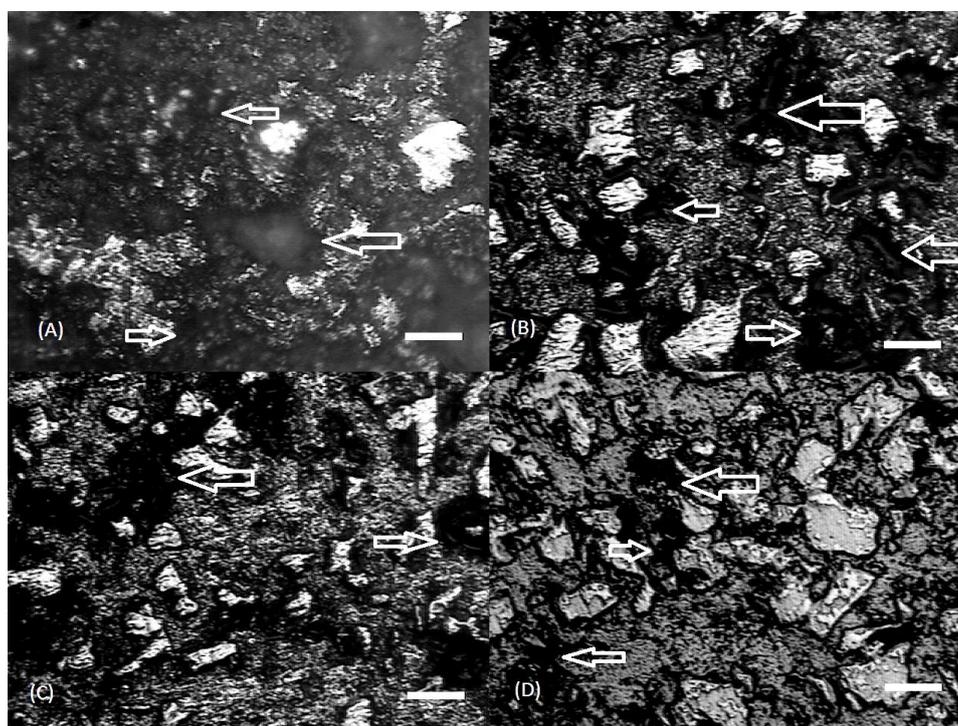


Figura 30. Liga 60% Cu-40% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

Na Figura 31, são mostrados os resultados com as taxas de compressão de 500 MPa (E), 600 MPa (F), 700 MPa (G) e 800 MPa (H). A quantidade de poros é

significativa, ficando de acordo com as curvas de densidade, que já demonstravam a relação entre o aumento da porcentagem de nióbio e a diminuição dos valores da densidade. Nota-se que os poros adquirem maiores valores nas regiões de contorno dos grãos de nióbio, provando a pouca afinidade de ligação.

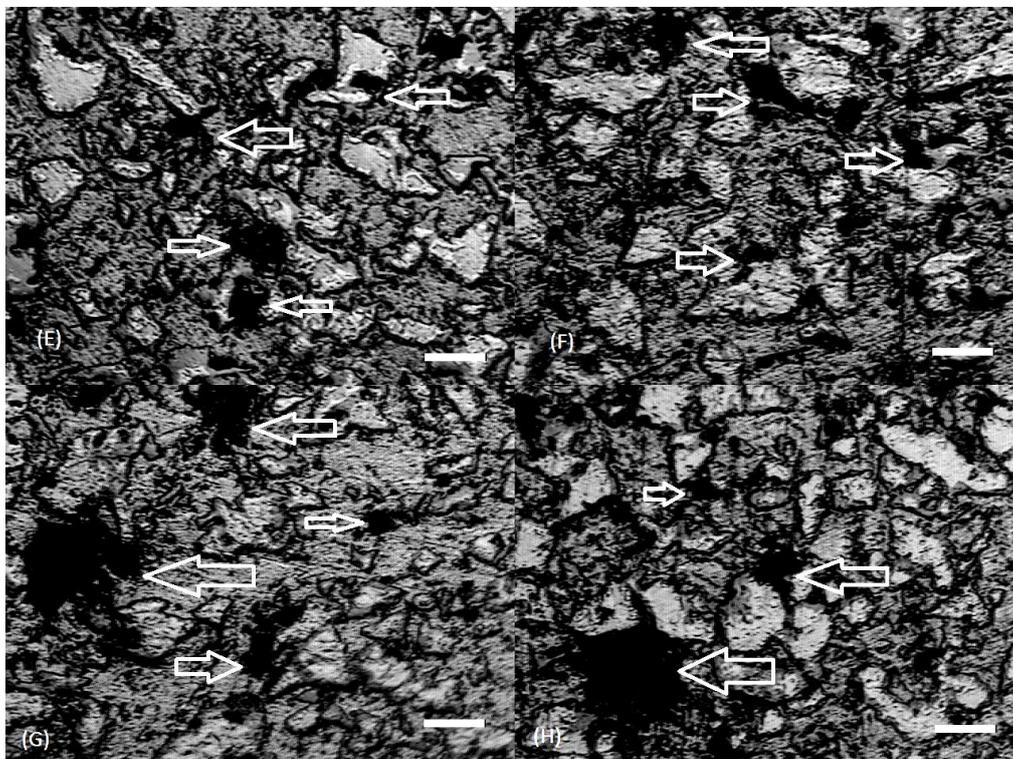


Figura 31. Liga 60% Cu-40% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

A diminuição da densidade com o aumento da quantidade de nióbio nas amostras fica mais evidenciada nos casos de grandes pressões de compactação, como o mostrado na Figura 32. A quantidade de poros e os tamanhos são significativos, marcados pelas setas brancas.

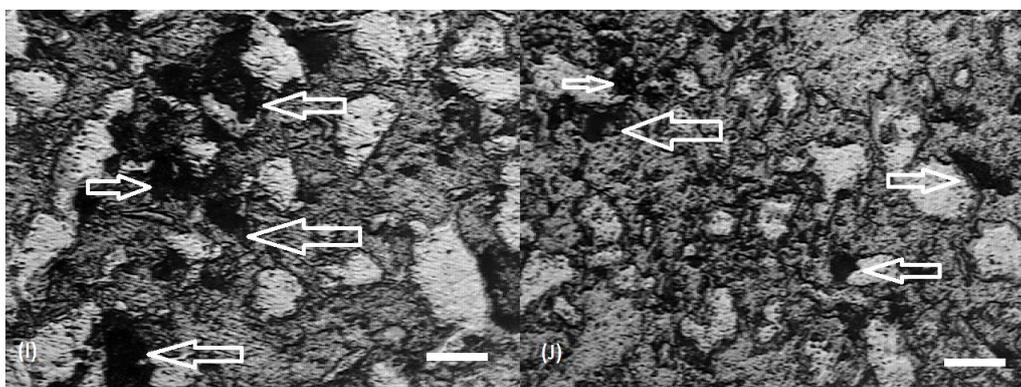


Figura 32. Liga 60% Cu-40% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

As amostras que obtiveram os piores resultados quanto à densidade foram as com 50% de nióbio, fato este evidenciado na Figura 33, onde pode ser observado que, mesmo com o aumento da pressão, a compactação é prejudicada.

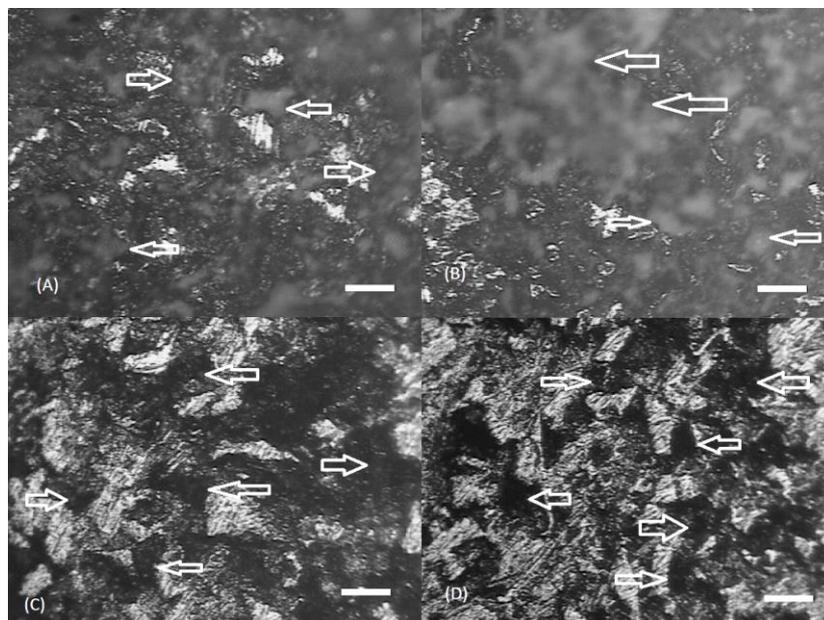


Figura 33. Liga 50% Cu-50% Nb sem ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

O fato de o nióbio prejudicar a densidade fica mais evidente na Figura 34, onde pode ser visto que a quantidade e o tamanho dos poros não sofrem uma diminuição significativa com o aumento da pressão de compactação, como ocorre nas ligas com 10 e 20% de nióbio.

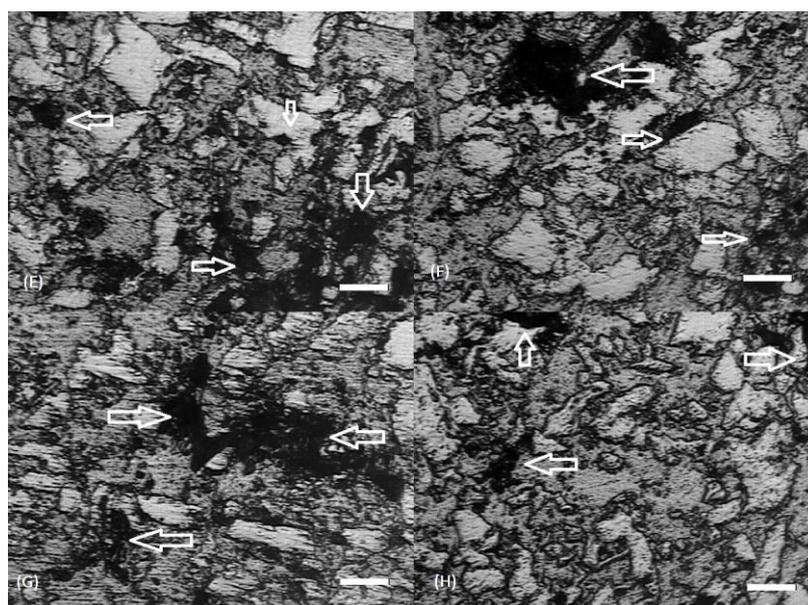


Figura 34. Liga 50% Cu-50% Nb sem ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 35, são mostrados os resultados quando foram utilizadas pressões de 900 MPa (I) e 1000 MPa (J). Observa-se, como evidenciado pelas setas brancas, que o número de poros ainda se mantém significativo. Este fato está em conformidade com o resultado da curva de densidade (Figura 26) em que as amostras com 50% de nióbio obtiveram os resultados mais baixos.

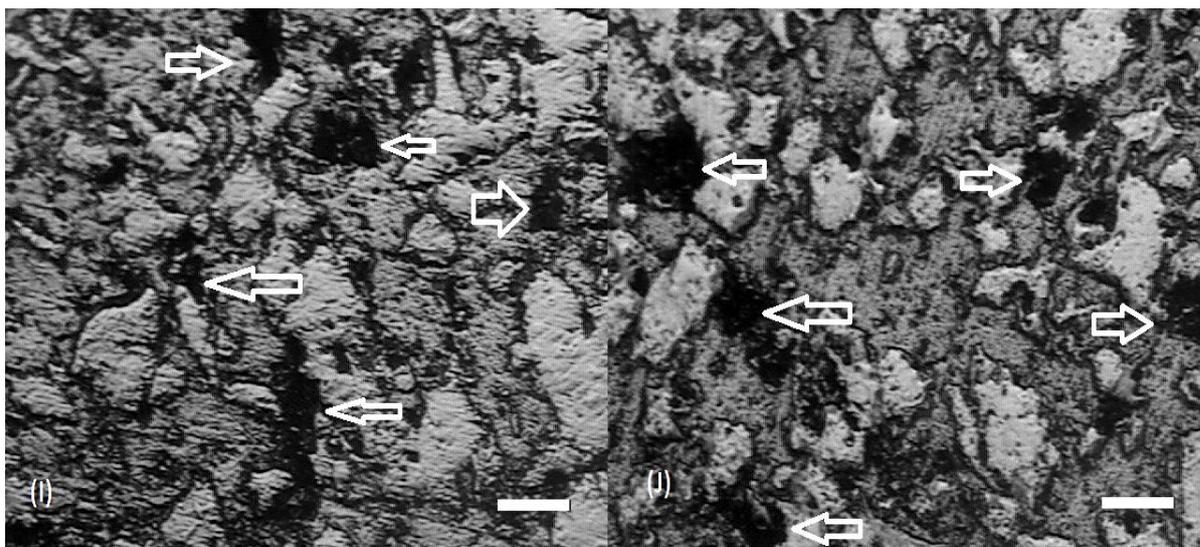


Figura 35. Liga 50% Cu-50% Nb sem ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

Os resultados demonstram que a maior quantidade de nióbio provoca um aumento na porosidade. Pode-se observar que, mesmo com uma pressão de compactação maior, os poros ainda se apresentam de maneira significativa.

4.4.2 Metalografia com Ataque Químico

4.4.2.1 Liga 90 % Cobre 10 % Nióbio

Para o ataque químico foi utilizada uma solução de ácido nítrico com 2% de nitrato de prata. Para melhor entendimento as figuras foram divididas em partes, de acordo com as pressões utilizadas na compactação: 100 MPa (a), 200 MPa (B), 300 MPa (C) e 400 MPa (D), 500 MPa (E), 600 MPa (F), 700 MPa (G), 800 MPa (H), 900 MPa (I) e 1000 MPa (J). Como pode ser observado na Figura 36, há uma boa

distribuição do nióbio, marcado pelas setas azuis. Também é possível ver alguns poros, marcados pelas setas brancas. Observa-se que o nióbio se encontra disperso no cobre.

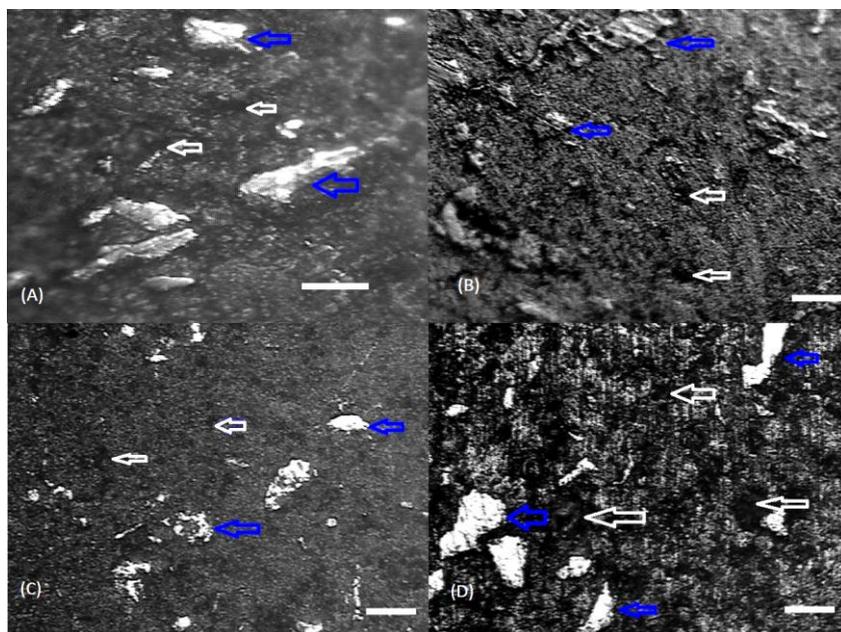


Figura 36. Liga 90% Cu-10% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

Com o aumento da pressão de compactação, mostrado na Figura 37, pode ser observado que há homogeneidade nas partículas de cobre e boa dispersão das de nióbio, mostrados pelas setas azuis. As setas brancas indicam que os poros localizam-se mais próximos às partículas de nióbio.

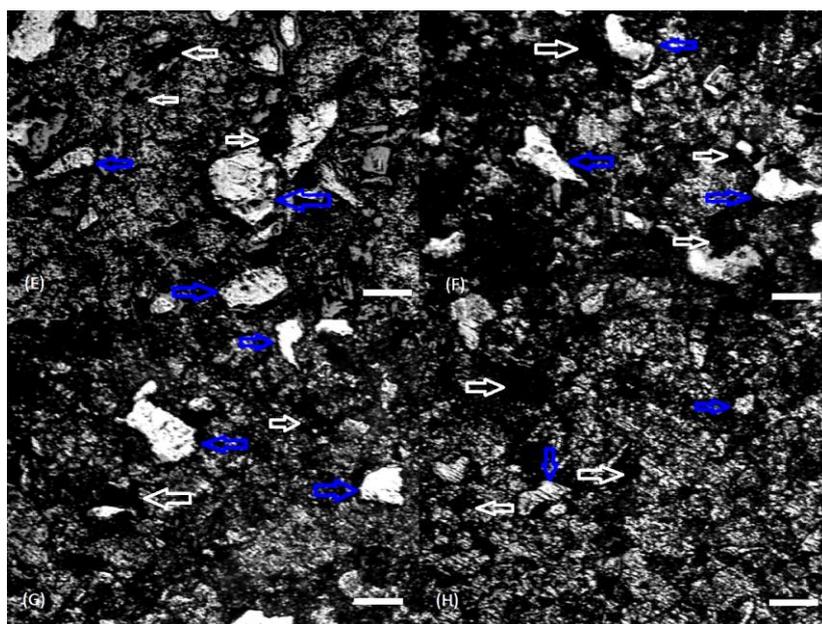


Figura 37. Liga 90% Cu-10% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 38, são apresentadas as amostras com pressões de compactação de 900 MPa e 1000 MPa. Pode ser observado que há uma boa distribuição do nióbio, marcado pelas setas azuis. Também pode ser visto que o número e tamanho dos poros mostra-se reduzido.

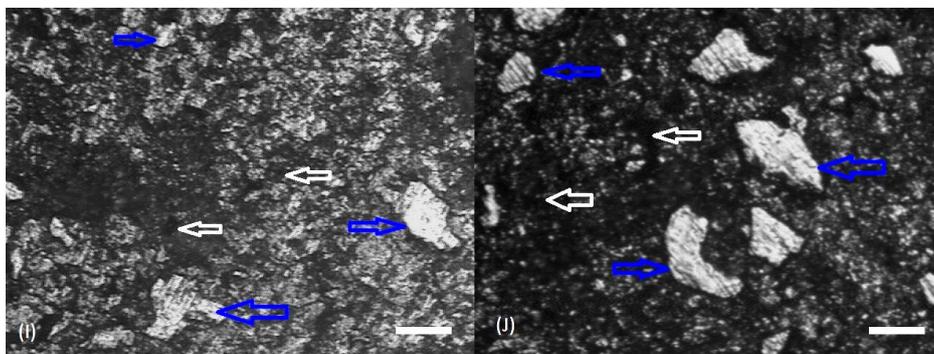


Figura 38. Liga 90% Cu-10% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

4.4.2.2 Liga 80 % Cobre 20 % Nióbio

Na Figura 39, são apresentadas as amostras com 20% de nióbio. Pode ser observado que permanece uma boa distribuição do nióbio, marcado pelas setas azuis. Nas partes (A) e (B) fica claro que, com baixas pressões de compactação, 100 e 200 MPa, há uma má formação da rede de cobre, ocasionando um grande número de poros.

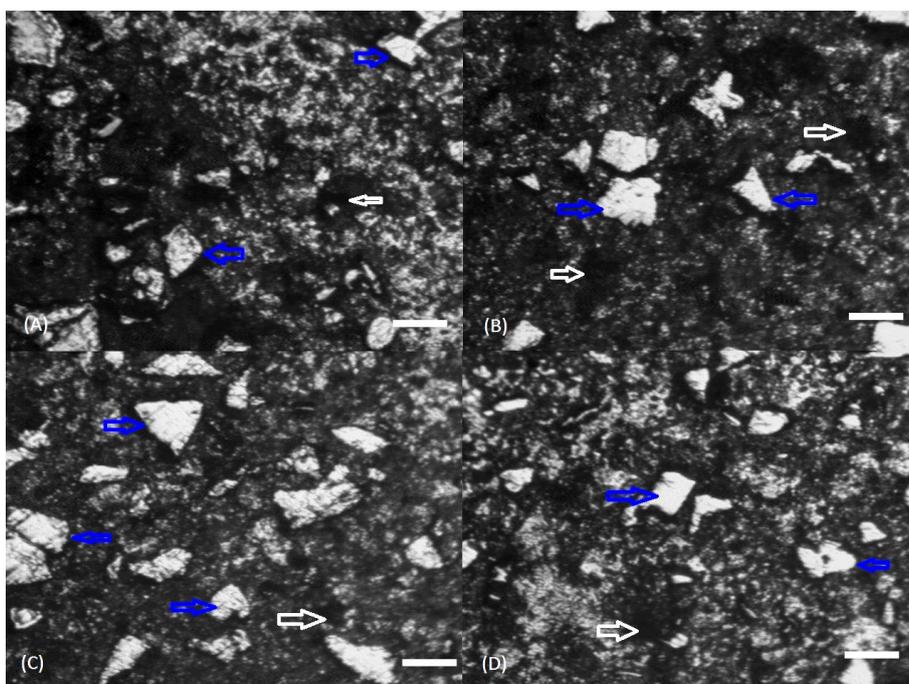


Figura 39. Liga 80% Cu-20% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

Nas amostras da Figura 40, aparecem partículas de nióbio que não estão perfeitamente unidas ao cobre, mostrado com a seta amarela. Há depressões ao redor das partículas de nióbio, demonstrando uma retração maior no cobre.

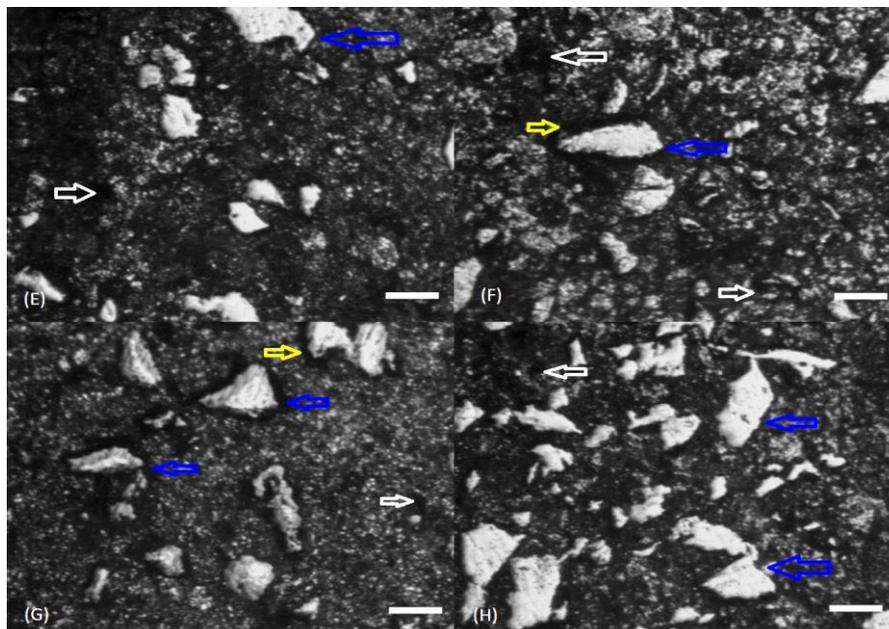


Figura 40. Liga 80% Cu-20% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 41, pode ser observado que a má ligação entre nióbio e cobre não voltou a ocorrer. A maior pressão de compactação, com conseqüente maior densidade, pode favorecer a ligação entre as partículas de cobre e nióbio.

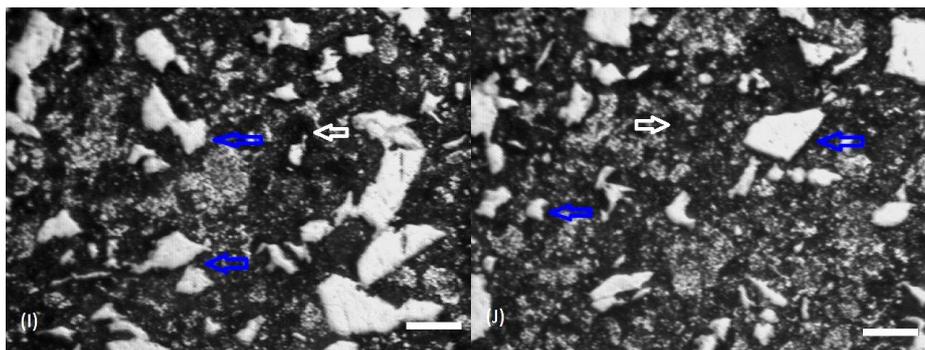


Figura 41. Liga 80% Cu-20% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

4.4.2.3 Liga 70 % Cobre 30 % Nióbio

Com o aumento da quantidade de nióbio para 30%, ocorrem defeitos na sinterização das amostras feitas com pressões de compactação de 100, 200 e 300 MPa, como pode ser visto na Figura 42, partes (A), (B) e (C). A seta amarela mostra traços de

má formação na estrutura do cobre. Na imagem (A), a porosidade atinge níveis altos que prejudicam a metalografia, ocasionando a ruptura da amostra durante a preparação.

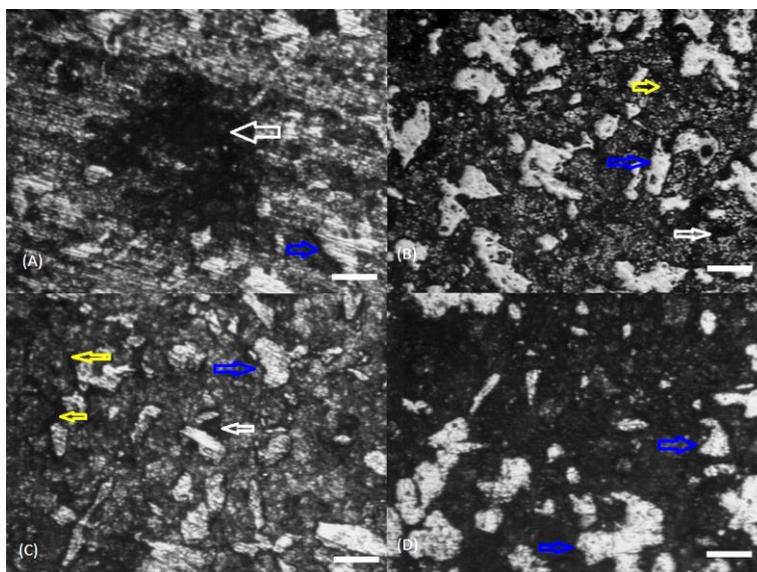


Figura 42 Liga 70% Cu-30% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

O nióbio, mostrado pelas setas azuis, tem uma boa distribuição dentro do cobre como pode ser visto na Figura 43. Na parte (E), que foi compactada a 500 MPa, ainda podem ser observados os traços de má formação no cobre, mostradas pela seta amarela. Fenômeno que não ocorre com pressões mais altas, imagens (F), (G) e (H), que apresentam uma estrutura homogênea com poucos poros, como os mostrados pelas setas brancas.

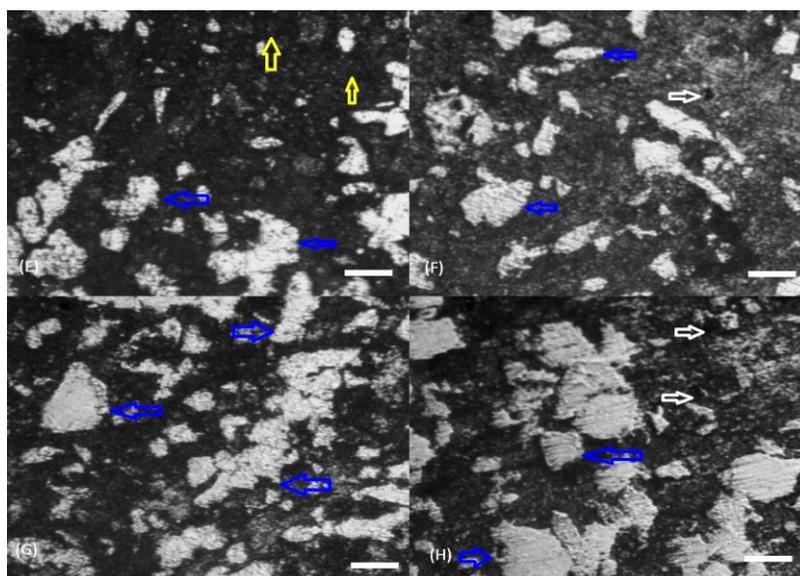


Figura 43. Liga 70% Cu-30% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 44, pode ser visto que a estrutura das amostras está homogênea com poucos poros. Pequenas falhas aparecem próximas às partículas de nióbio, mostradas pelas setas brancas.

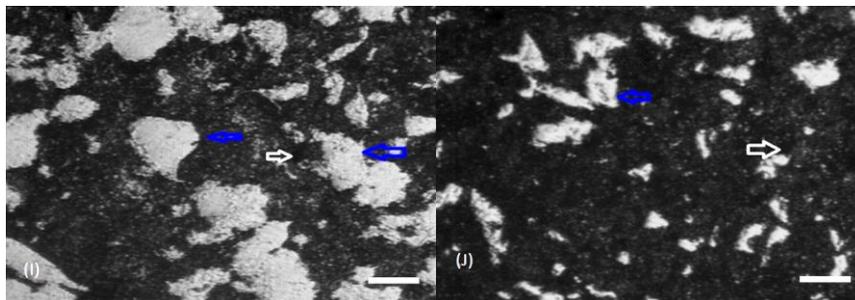


Figura 44. Liga 70% Cu-30% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

4.4.2.4 Liga 60 % Cobre 40 % Nióbio

Nas amostras com 40% de nióbio e baixas pressões de compactação, 100, 200, 300 MPa, ocorreu falhas na sinterização. Como pode ser observado na Figura 45, imagens (A) e (B), não ocorreu a união entre as partículas, devido à alta porosidade e consequente baixa densidade. Fenômeno que impediu a metalografia da amostra (A). No caso da amostra (B), pode ser visto que a baixa densidade provocou o aparecimento de marcas de possível sinterização fase líquida, marcadas pelas setas amarelas.

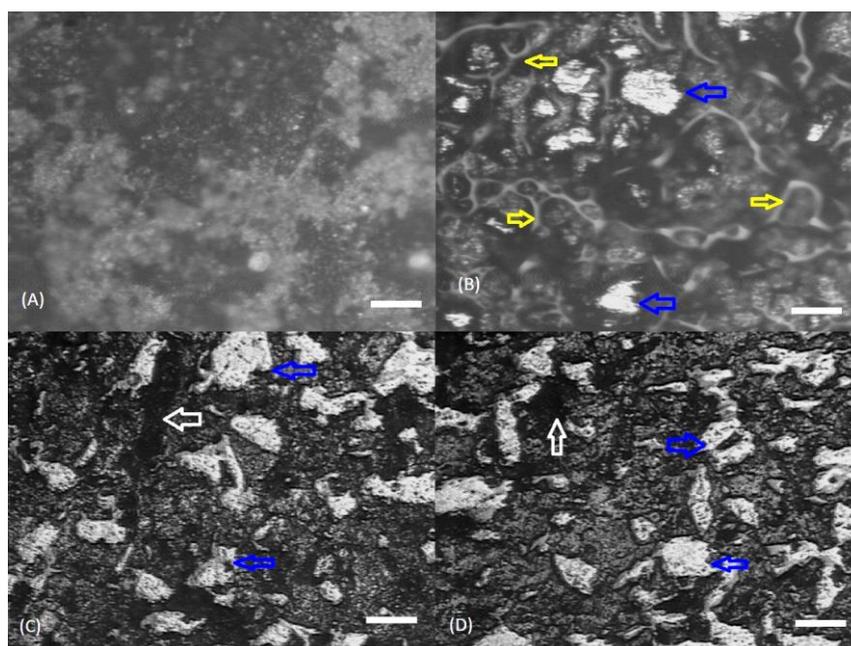


Figura 45. Liga 60% Cu-40% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

Com o aumento da pressão de compactação há uma melhora na integridade da estrutura das amostras. Na Figura 46, é mostrada esta condição. As setas brancas indicam que ocorrem poucas falhas como poros ou má ligação entre o nióbio, destacado pelas setas azuis, e o cobre. Observa-se também que há uma boa distribuição do nióbio dentro da matriz de cobre. A estrutura do cobre, parte cinza nas imagens, apresenta-se homogênea e coesa.

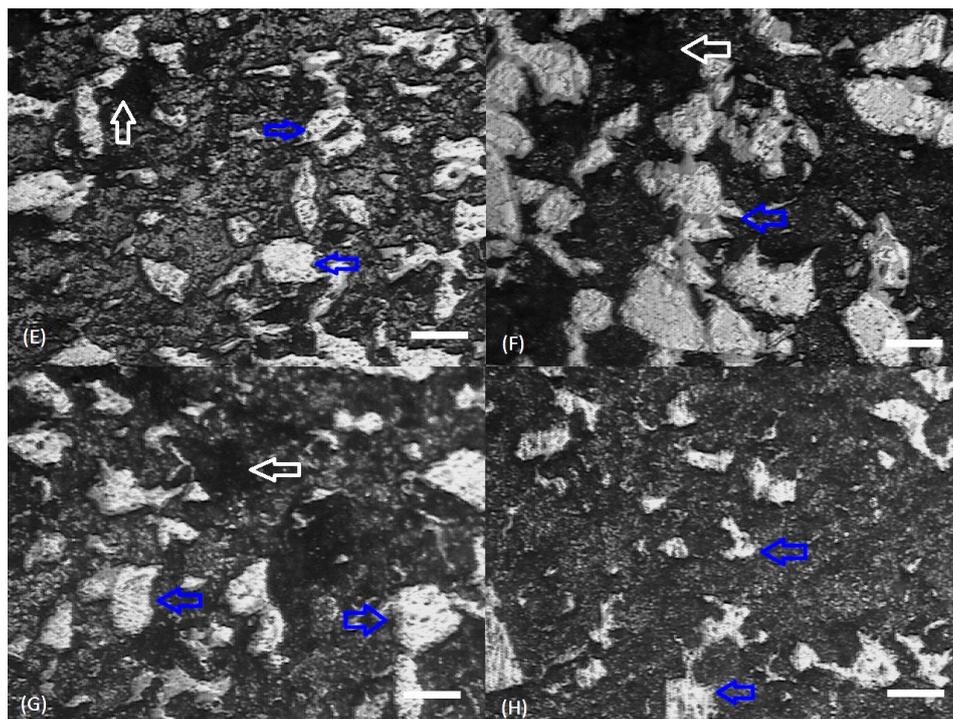


Figura 46. Liga 60% Cu-40% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 47, pode ser visto que a amostra compactada com 1000 MPa (J) apresentou vários poros; o que confirma o fato de ter uma queda na curva de densidade como pode ser observado na Figura 19.

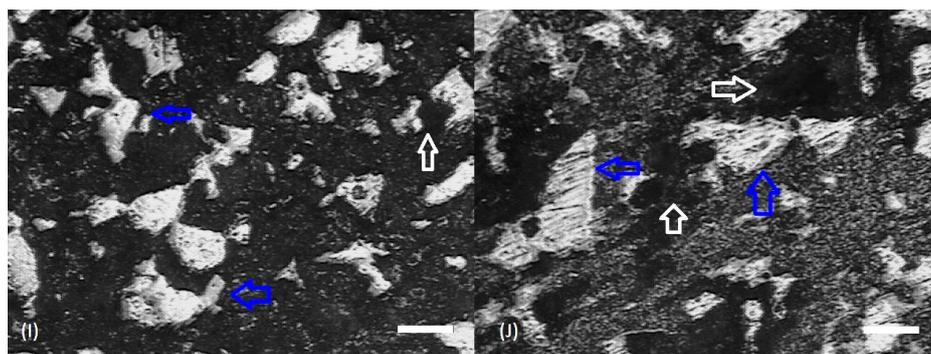


Figura 47. Liga 60% Cu-40% Nb com ataque químico; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

As amostras com 50% de nióbio foram as que apresentaram a maior dificuldade de sinterização. Como pode ser observado na Figura 48, as amostras que foram compactadas com pressões de 100 (A), 200 (B) e 300 MPa (C) não obtiveram uma sinterização completa. Este fato prejudicou a análise metalográfica pois as amostras se romperam durante a preparação. A baixa densidade destas amostras pode ter ocasionado estas falhas. As setas amarelas mostram algumas destas falhas.

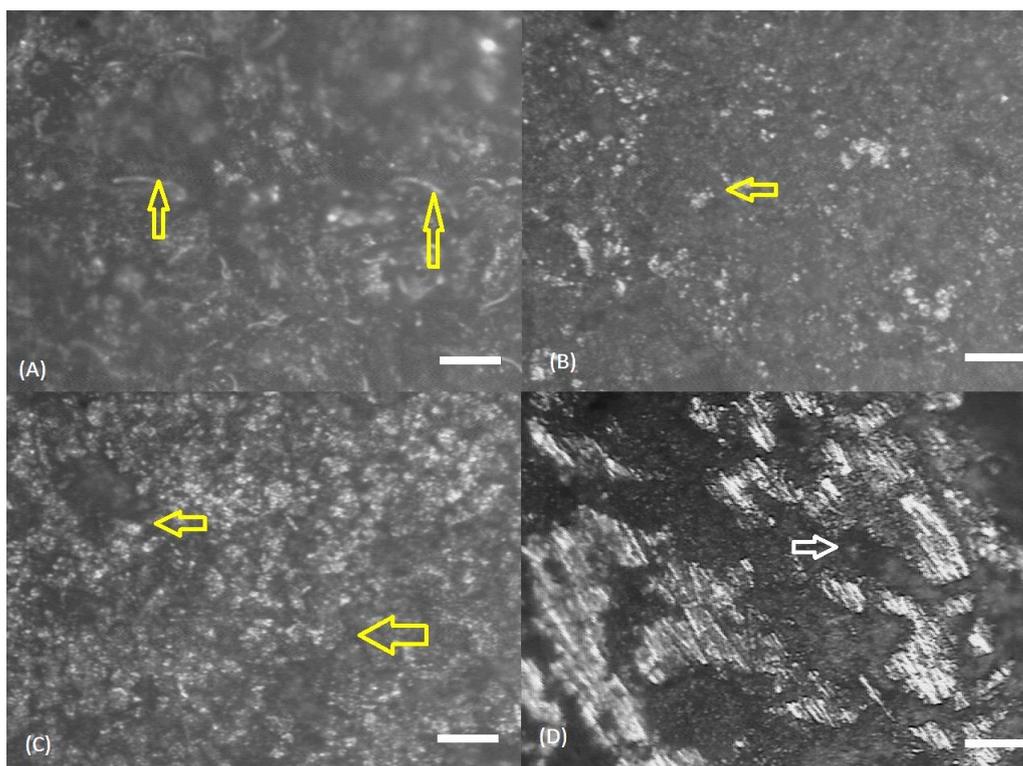


Figura 48. Liga 50% Cu-50% Nb com ataque químico; Partes (A)- 100 MPa; (B)- 200 MPa; (C)- 300 MPa; (D)- 400 MPa

A maior quantidade de nióbio provou ser prejudicial, inclusive quando utilizada pressão de compactação de 500 MPa. Na Figura 49, as setas amarelas mostram traços de falhas na sinterização, imagem (E). Estas falhas são creditadas a pouca molhabilidade do nióbio pelo cobre. Também pode ser visto que há uma boa distribuição do nióbio dentro do cobre, marcado pelas setas azuis.

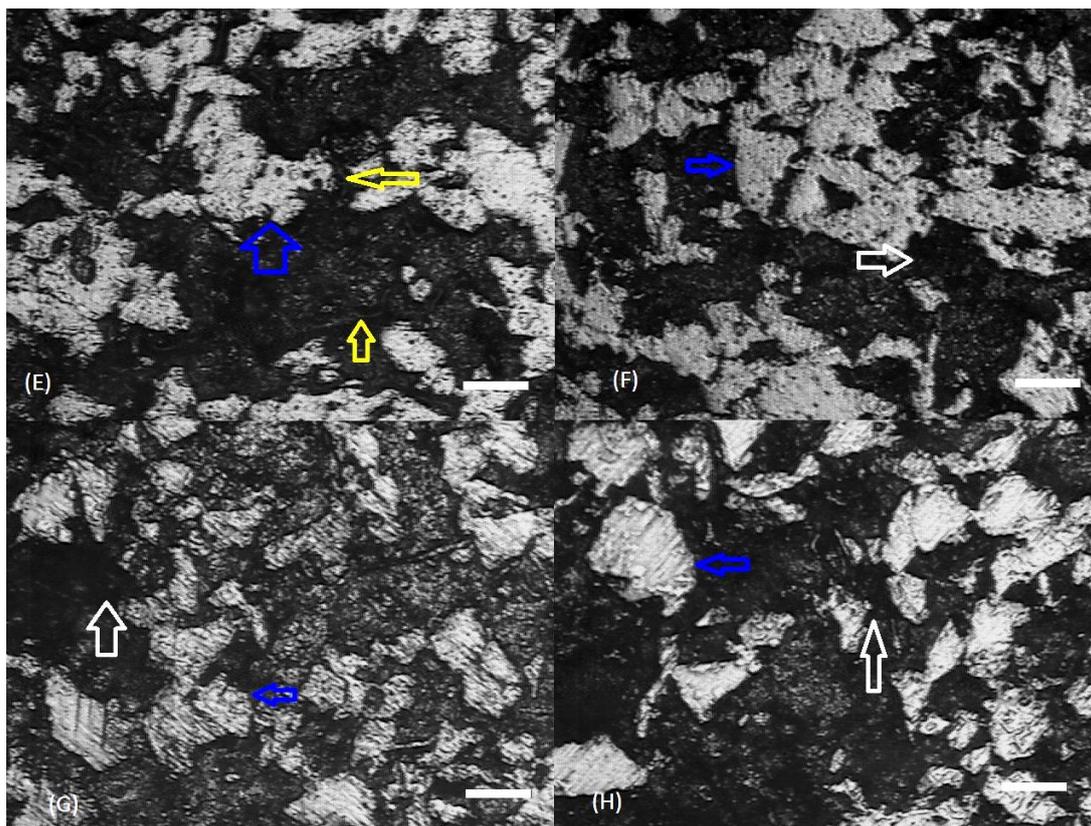


Figura 49. Liga 50% Cu-50% Nb com ataque químico; Partes (E)- 500 MPa; (F)- 600 MPa; (G)- 700 MPa; (H)- 800 MPa

Na Figura 50, pode ser observado que, mesmo com as pressões de 900 e 1000 MPa, há um número de poros bem significativo, marcados pelas setas brancas. Este fenômeno pode ser creditado à grande diferença de pontos de fusão existentes.

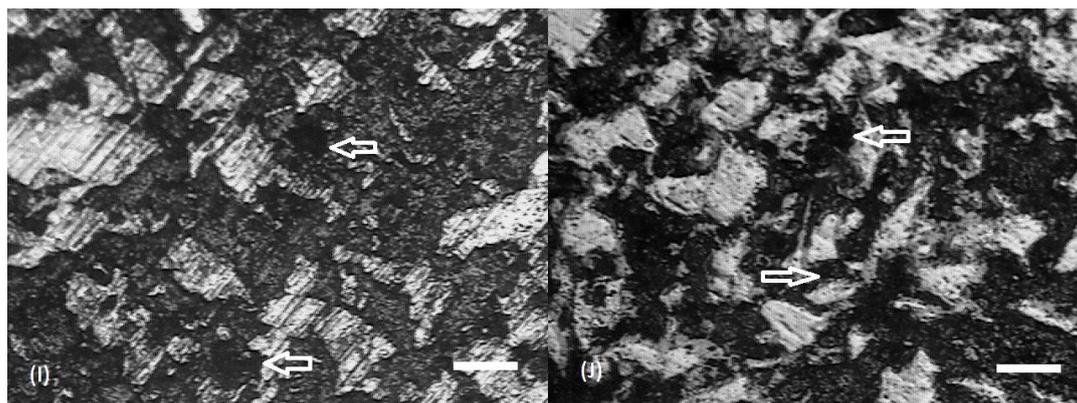


Figura 50. Liga 50% Cu-50% Nb; Partes (I)- 900 MPa; (J)- 1000 MPa

4.5 Experimentos em Eletroerosão

4.5.1 Taxa de desgaste do Eletrodo

Para obter-se um bom desempenho em usinagem por eletroerosão, a taxa de desgaste do eletrodo deve ser a menor possível. O desgaste do eletrodo forma cantos arredondados e deixa marcas indesejáveis, também aumenta os custos devido à necessidade de recuperar o eletrodo ou até mesmo a confecção de um novo. Para este trabalho foi utilizada a perda de massa do eletrodo com parâmetro de desgaste. Os eletrodos foram pesados, em balança analítica, antes e após a usinagem. Para determinar a perda de massa foi utilizada a equação 2.

$$m_i - m_f = d \text{ (g)} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: m_i (g) é a massa inicial do eletrodo;

m_f (g) é a massa após o processo de eletroerosão;

“d” (g) é a diferença entre as massas.

Para determinar a perda percentual de massa foi utilizada a equação 3.

$$\frac{m_i - m_f}{m_i} = D \text{ (\%)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: “D” é a perda de massa em valores percentuais.

Durante o processo de usinagem, os eletrodos absorvem fluido dielétrico pela porosidade. Devido a este fator, os eletrodos foram secados em forno a 80 °C por três horas antes da segunda pesagem. Após este processo, os eletrodos foram novamente polidos a fim de garantir o melhor acabamento superficial. A Tabela 7 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem, bem como os percentuais de perda

durante a usinagem. O experimento I consiste em fazer testes práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 2 μ s; ts 1 e dt 33 %.

Tabela 7- Massa dos eletrodos experimento I

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	14,854	14,947	15,026	15,003	15,041
Mf (g)	14,336	14,691	14,926	14,905	14,934
d (g)	0,518	0,256	0,100	0,098	0,107
D (%)	3,487	1,712	0,665	0,653	0,711

Na Figura 51, é mostrada a taxa de desgaste (D) obtida em uma configuração de baixa amperagem (1 ts) utilizada para acabamento.

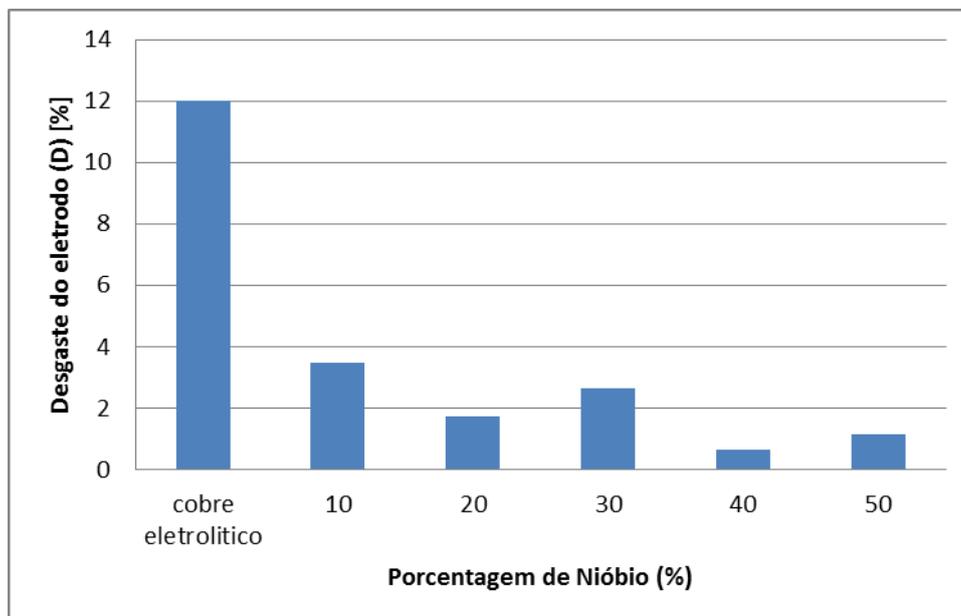


Figura 51. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento I.

Houve uma melhora significativa neste parâmetro, com a adição de nióbio ao cobre. Usando a taxa referencial do fabricante da máquina como referencial, a melhor taxa de desgaste foi com a adição de 40% de nióbio, que ficou em apenas 0,65% em peso do eletrodo, enquanto que o esperado seria 12 %. A Tabela 8 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem e os percentuais de perda durante a usinagem. O experimento II consiste em fazer testes práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 2 μ s; ts 2 e dt 33 %.

Tabela 8 - Massa dos eletrodos experimento II

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	13,703	14,066	14,543	14,027	14,770
Mf (g)	13,327	13,769	14,326	13,724	14,432
d (g)	0,376	0,297	0,217	0,303	0,338
D (%)	2,743	2,111	1,492	2,160	2,288

A Figura 52 mostra o resultado com o aumento da potência de descarga elétrica para ts 2, aproximadamente 7,3 A. O ganho em durabilidade do eletrodo também foi acentuado, sendo que o melhor resultado foi para o eletrodo de 30% de nióbio com uma taxa de desgaste de apenas 1,492%, enquanto que o maior desgaste foi no eletrodo de 10% com um valor de 2,743%, que se apresenta muito bem, frente a um desgaste tabelado pelo fabricante da máquina de 12%.

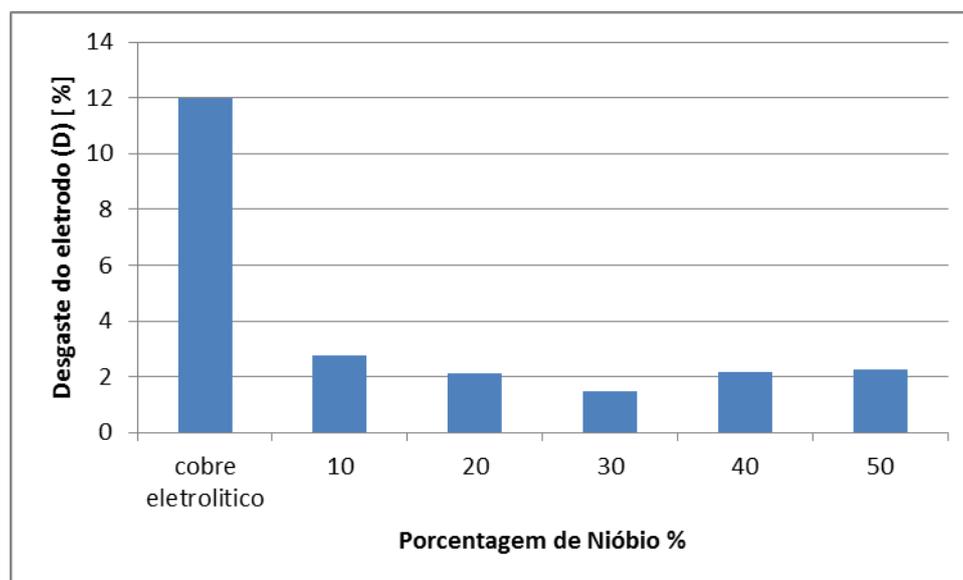


Figura 52. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento II.

O experimento III consiste em fazer testes práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 2 μ s; ts 3 e dt 33 %.

A Tabela 9 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem e os percentuais de perda durante a usinagem.

Tabela 9 - Massa dos eletrodos experimento III

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	11,998	13,463	14,171	13,572	14,233
Mf (g)	11,409	13,067	13,842	13,155	13,862
d (g)	0,589	0,396	0,329	0,417	0,371
D (%)	4,909	2,941	2,321	3,072	2,606

Na Figura 53, é mostrado o resultado quando se aumenta o da intensidade de corrente para ts3, aproximadamente 11 A. Para estes parâmetros o fabricante da máquina também indica um desgaste teórico de 12%. Nos experimentos foram encontrados valores que variam de 4,9 % para o eletrodo de 10% de nióbio ate 2,321% no de 30%.

Quando foi aumentado o tempo de descarga para 75 μ s e o fator de correção para 86%, o desgaste do eletrodo tornou-se acentuado, ao contrário do que vinha acontecendo com tempos de descarga baixos.

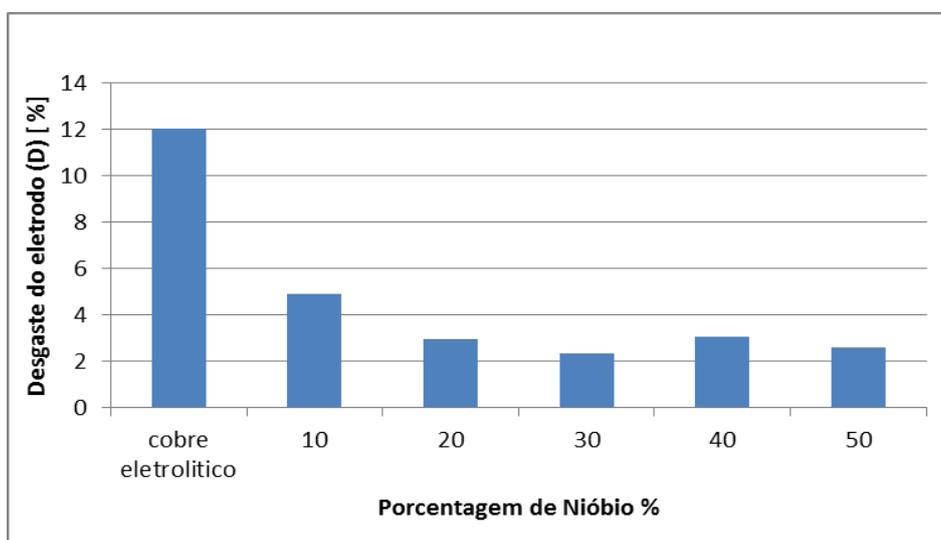


Figura 53. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento III.

A Tabela 10 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem e os percentuais de perda durante a usinagem. O experimento IV consiste em fazer testes práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 75 μ s; ts 1 e dt 86 %.

Tabela 10 - Massa dos eletrodos experimento IV

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	11,299	12,986	13,744	13,031	13,737
Mf (g)	10,666	12,384	12,972	12,212	12,747
d (g)	0,633	0,602	0,772	0,819	0,990
D (%)	5,602	4,635	5,616	6,285	7,206

Na Figura 54, pode ser observado que com o aumento do tempo de descarga, há um grande aumento na taxa de desgaste do eletrodo. Enquanto era esperada uma taxa de apenas 1,3% de desgaste foram obtidos valores que variam de 4,635% no eletrodo de 20% até 7,206% no de 50% de nióbio.

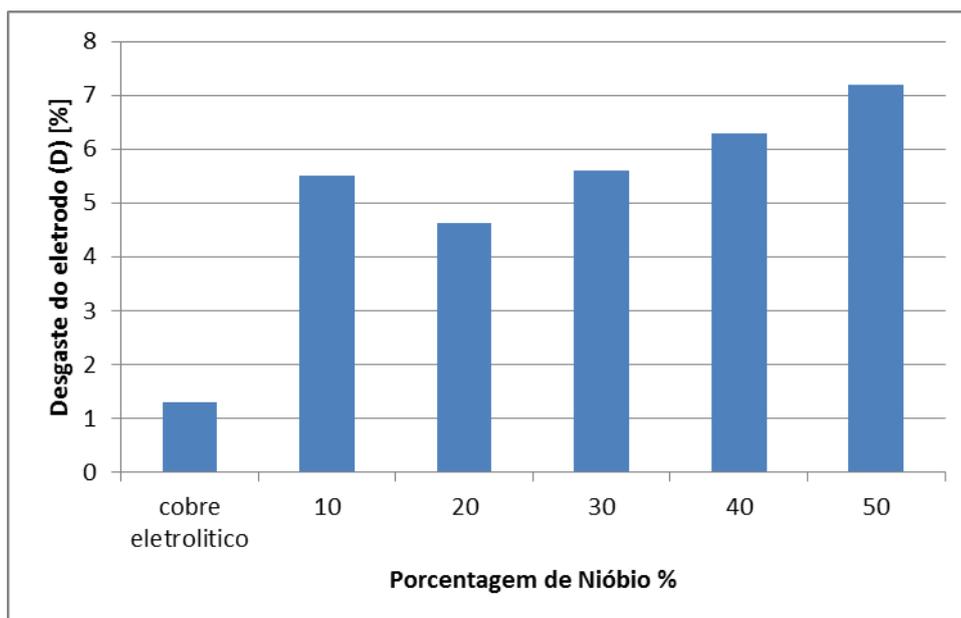


Figura 54. Taxa de desgaste do eletrodo para experimento IV.

A Tabela 11 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem e os percentuais de perda durante a usinagem no experimento V. O experimento V consiste em fazer testes práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 75 μ s; ts 2 e dt 86 %.

Tabela 11 - Massa dos eletrodos experimento V

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	10,486	12,150	12,831	12,042	12,633
Mf (g)	9,821	11,832	12,451	11,856	12,426
d (g)	0,665	0,318	0,380	0,186	0,207
D (%)	6,341	2,617	2,961	1,544	1,638

Quanto foi aumentada a intensidade de corrente para ts 2,(7,3 A) ocorreu uma ligeira melhora na taxa de desgaste que, ainda assim, se manteve acima da taxa tabelada para o cobre eletrolítico. Com porcentagens maiores de nióbio obteve-se um desgaste menor, como pode ser visto na Figura 55. Para estes parâmetro é esperada uma taxa de 1,5%. Nos experimentos, foi verificada no eletrodo de 10% uma taxa de 6,341%, que configura o pior resultado e de 1,544% na liga de 40% o que se iguala à tabelada.

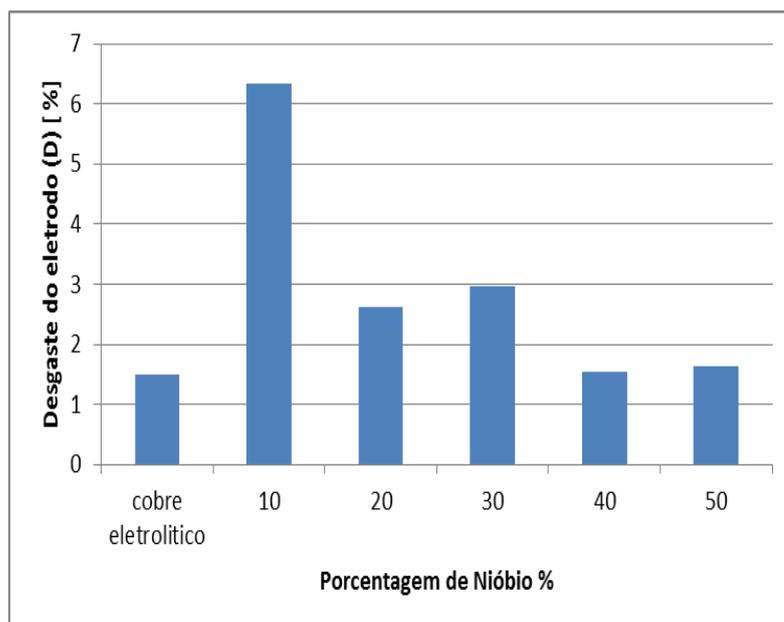


Figura 55. Taxa de desgaste do eletrodo para o experimento V.

A Tabela 12 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem e os percentuais de perda durante a usinagem no experimento VI. O experimento VI consiste em fazer testes práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 75 μ s; ts 3 e dt 86 %.

Tabela 12 - Massa dos eletrodos experimento VI

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	9,821	11,832	12,451	11,856	12,426
Mf (g)	9,538	11,634	12,238	11,629	12,079
d (g)	0,283	0,198	0,213	0,227	0,347
D (%)	2,881	1,673	1,710	1,914	2,792

Com o emprego de uma intensidade de corrente de ts 3, os eletrodos de maior e menor porcentagem de nióbio foram os que obtiveram as piores taxas de desgaste. Ficaram com um desgaste próximo ao dobro do tabelado para o cobre eletrolítico, como mostrado na Figura 56. Com esta configuração, o valor da tabela do fabricante da máquina é de 1,6% nos experimentos foram encontrados valores que variam de 2,881% no eletrodo de 10% de nióbio e de 1,673% no de 20%, que se pode configurar como dentro da margem de erro esperada. No eletrodo com 50% de nióbio, pode ter ocorrido o desprendimento das partículas, o que ocasionou o maior desgaste.

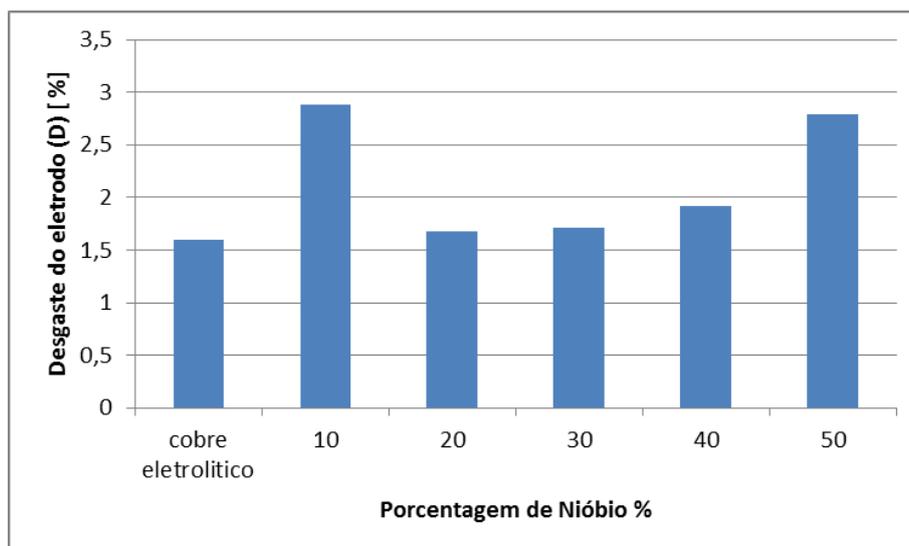


Figura 56. Taxa de desgaste do eletrodo para o experimento VI.

A Tabela 13 apresenta as massas dos eletrodos antes e após a usinagem e os percentuais de perda durante a usinagem. O experimento VIII consiste em fazer testes

práticos de usinagem em eletroerosão utilizando os seguintes parâmetros: ton 150 μ s; ts 4 e dt 91 %.

Tabela 13 - Perda de massa dos eletrodos experimento VII

Massa	Eletrodo I	Eletrodo II	Eletrodo III	Eletrodo IV	Eletrodo V
Mi (g)	9,471	11,505	12,159	11,559	12,010
Mf (g)	9,022	11,105	11,616	11,265	11,689
d (g)	0,449	0,400	0,543	0,294	0,321
D (%)	4,740	3,476	4,465	2,543	2,672

Quando foram utilizados os parâmetros de usinagem para taxas de desgaste rápido notou-se um grande aumento no desgaste do eletrodo. Nestes casos um desgaste menor é esperado por ter um tempo de usinagem relativamente pequeno. Mas como pode ser visto na Figura 57, o desgaste foi bem acentuado atingindo até três vezes mais do que o tabelado. Nesta configuração de parâmetros de usinagem, foram constatadas taxas de desgaste que variaram de 4,740% no eletrodo de 10% de nióbio a 2,543% na liga de 40%. Este fenômeno pode estar ocorrendo devido o nióbio provocar uma descontinuidade no faiscamento, provocando uma má distribuição da centelha, que resulta em desprendimento de partículas do eletrodo. Taxas de desgaste elevadas provocam erros dimensionais nas cavidades erodidas e este fator gera a necessidade do uso de mais de um eletrodo, elevando os custos de fabricação.

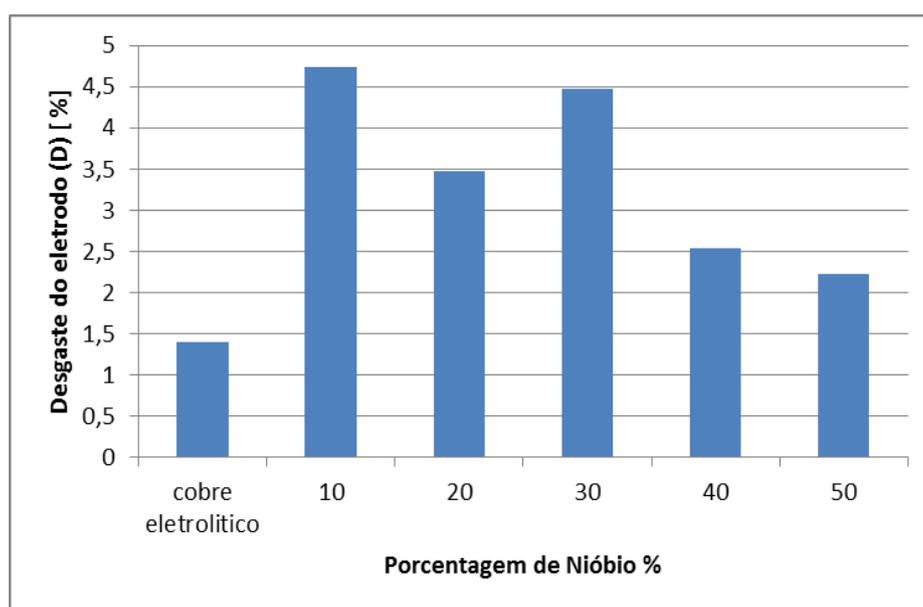


Figura 57. Taxa de desgaste do eletrodo para o experimento VIII.

Pode ser observado nos resultados demonstrados, que o aumento da quantidade de nióbio, e do tempo de descarga elétrica, afetam negativamente a taxa de desgaste do eletrodo. A causa deste fenômeno será discutida no capítulo adequado.

4.5.2 Taxa de Remoção de Material (Tr)

Ao contrário da taxa de desgaste de eletrodo, a remoção de material deve ser sempre a maior possível. Altas taxas de remoção de material influem no custo do processo de usinagem por eletroerosão, por diminuir os tempos de usinagem. Para determinar o comportamento da liga de cobre nióbio, utilizaram-se parâmetros que permitem comparar o desempenho em casos de alta, média e baixa remoção de material. A taxa de remoção de material foi calculada utilizando a equação 4:

$$Tr = \frac{\pi * r^2 * h}{T_p} \quad (\text{mm}^3 / \text{min}) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: $\pi * r^2$ é a área erodida (corresponde a área do eletrodo em mm),

h é a profundidade da erosão (mm),

T_p é o tempo de processo em eletroerosão (minutos),

Tr é a taxa de remoção (mm^3/min).

Na Figura 58, é mostrado o resultado para o parâmetro de baixa remoção. Como pode ser observado, o aumento da porcentagem de nióbio melhora a taxa de remoção que, mesmo sendo crescente, não atinge valores satisfatórios. Pela tabela do fabricante da máquina de eletroerosão, usando o cobre eletrolítico, é esperada uma taxa de 0,4 mm^3/min . Foram obtidas taxas de variaram entre 0,136 mm^3/min para o eletrodo de 10% até 0,245 mm^3/min no caso de 50%.

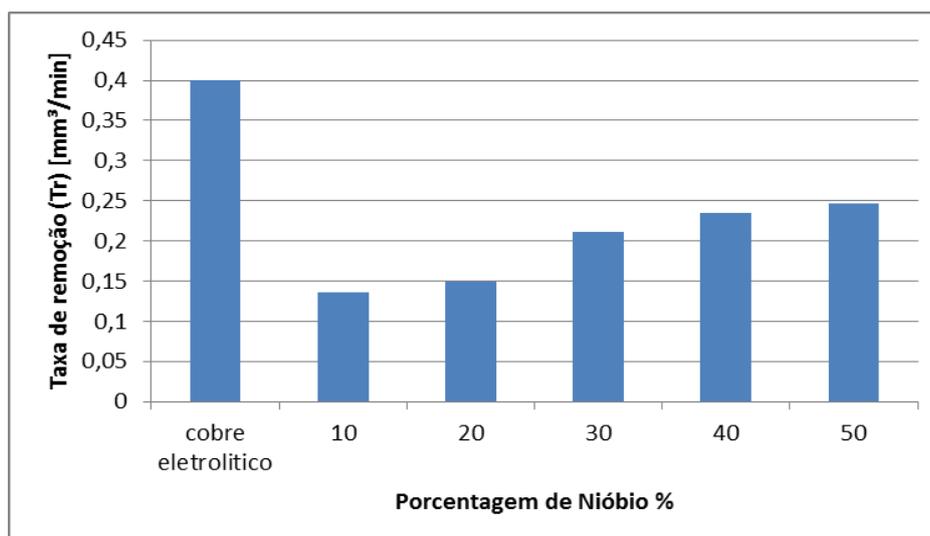


Figura 58. Taxa de remoção de material para o experimento I.

Com um valor de intensidade de corrente maior foram obtidos valores de taxa de remoção de material que variaram de 1,137 mm³/min como melhor resultado no eletrodo de 10% de nióbio. Com a liga de 30%, foi encontrado o valor mais baixo, 0,871 mm³/min, o informado na tabela é de 2 mm²/min. Como pode ser observado na Figura 59.

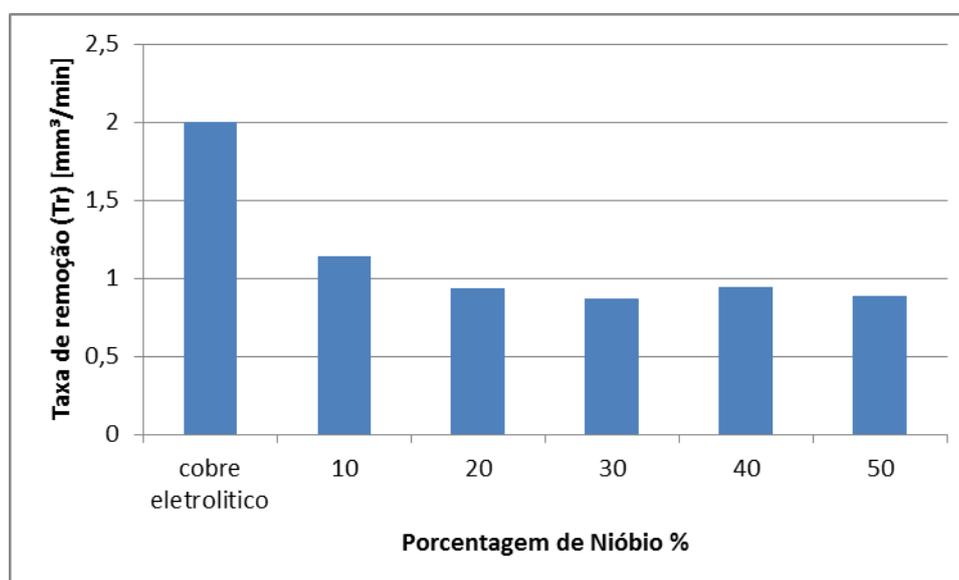


Figura 59. Taxa de remoção de material para o experimento II.

Para o próximo experimento foi aumentada a intensidade de corrente para ts 3 que, de acordo com a tabela do fabricante da máquina, tem uma taxa de remoção de material de 3mm³/min. Nos testes feitos foram encontrados os valores de 1,445 mm³/min no eletrodo de 10% de nióbio, e como melhor resultado 1,214 para 40%. Valores que, como podem ser vistos na Figura 60, estão muito abaixo do ideal.

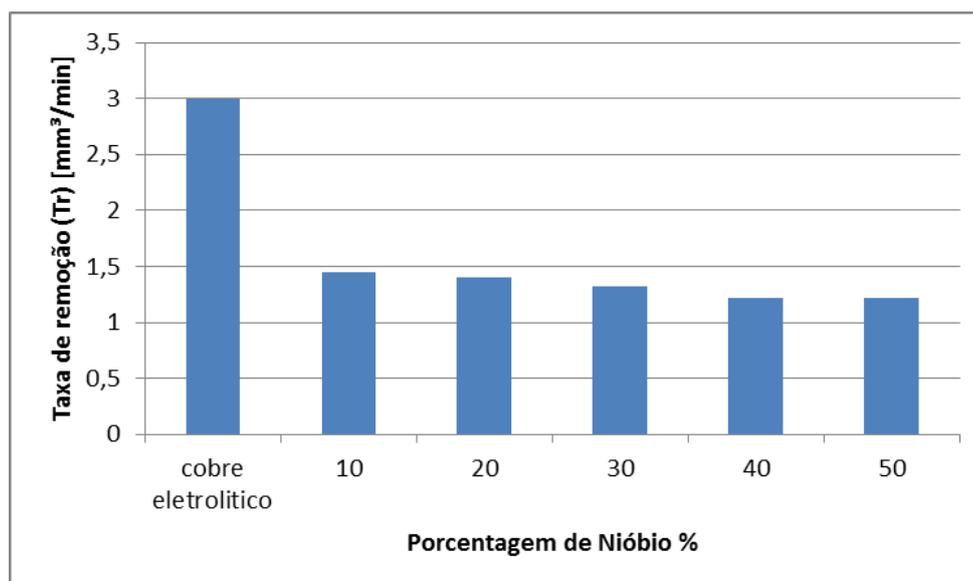


Figura 60. Taxa de remoção de material para experimento III.

A Figura 61 apresenta os resultados para valores de tempo de descarga e valor de correção maior. Nesta configuração de parâmetros ocorreu o único caso em que um eletrodo obteve um valor de remoção acima do tabelado. Para uma taxa esperada de $6,4 \text{ mm}^3/\text{min}$, o eletrodo de 20% de nióbio obteve $7,167 \text{ mm}^3/\text{min}$, o resultado mais baixo foi de $3,318 \text{ mm}^3/\text{min}$ na liga de 40%.

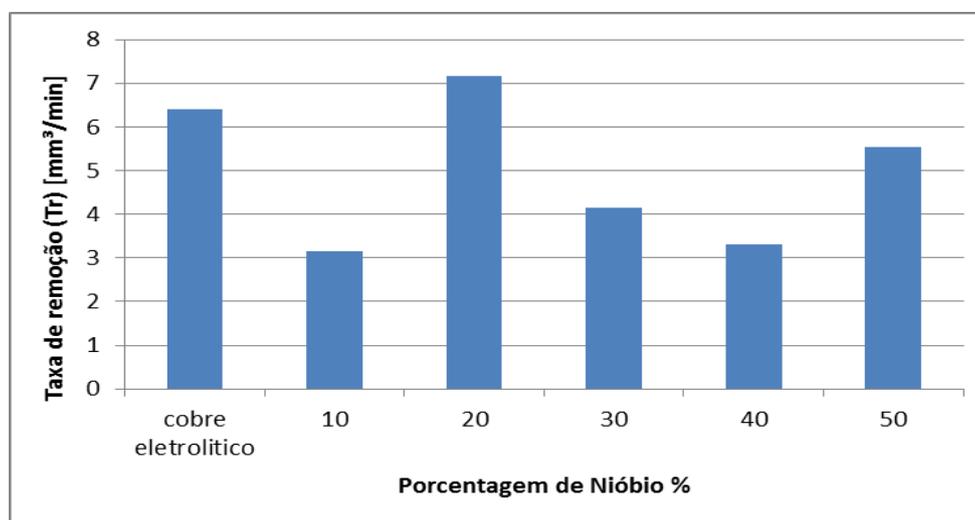


Figura 61. Taxa de remoção de material para experimento IV.

Aumentado o valor da intensidade de corrente e mantendo os demais parâmetros, é esperado uma taxa de remoção maior. Como observa-se na Figura 62, ocorreu o contrário. Com estes parâmetros foram encontradas as piores taxas de remoção. Enquanto o valor tabelado é de $18 \text{ mm}^3/\text{min}$, os valores obtidos variaram de $0,137 \text{ mm}^3/\text{min}$ para o eletrodo de 10% de nióbio e de $0,291 \text{ mm}^3/\text{min}$ para a liga de 50%. Estas taxas são economicamente

inviáveis, devido ao alto tempo de processamento, para processos de usinagem por eletroerosão.

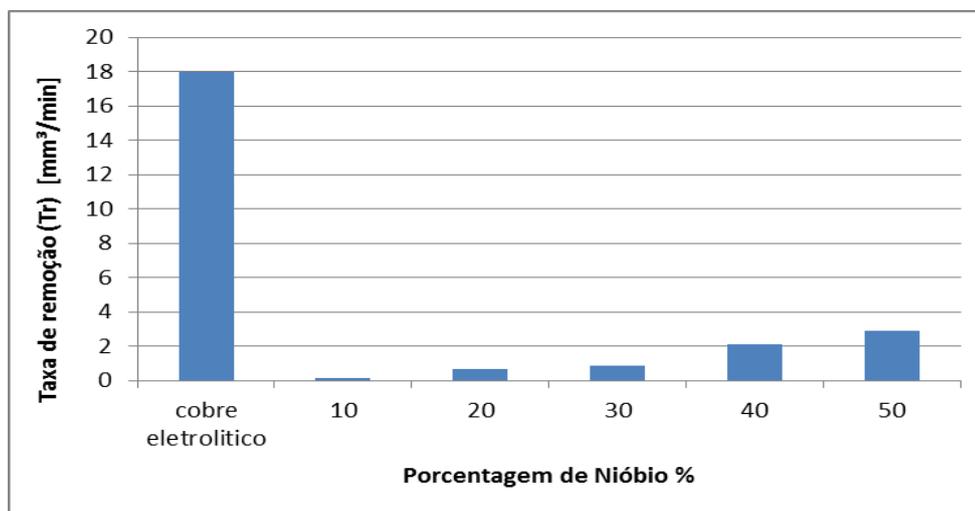


Figura 62. Taxa de remoção de material para o experimento V.

Com novo aumento na intensidade de corrente, houve ligeira melhora na taxa de remoção de material em relação aos parâmetros anteriores, mas estas continuam muito aquém do esperado. Como pode ser visto na Figura 63, o valor de tabela é de 27 mm³/min, enquanto os valores encontrados durante os experimentos foram de 3,808 mm³/min como melhor taxa para o eletrodo de 20% de nióbio. Os eletrodos de 40% e 50% obtiveram valores tecnicamente iguais de 2,322 mm³/min e 2,343 mm³/min, respectivamente.

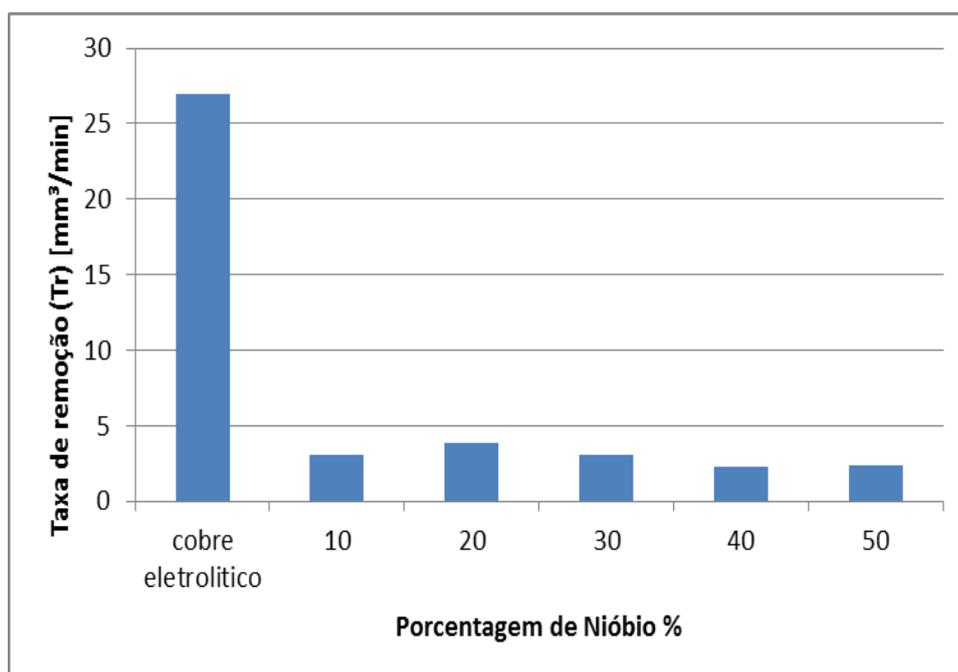


Figura 63. Taxa de remoção de material para o experimento VII.

Com os parâmetros de alta intensidade de corrente é desejada uma taxa de remoção de material igualmente elevada. A taxa tabelada é de 52 mm³/min, mas como pode ser visto na Figura 64 isso não ocorreu. A melhor taxa foi a do eletrodo de 20% de nióbio com 12,514 mm³/min e o resultado mais baixo foi de 4,108 mm³/min no de 30%. Com o aumento dos valores de corrente e tempos de descarga, ocorre a redução na taxa de remoção. Isto ocorre por o nióbio, juntamente com a porosidade, provocar um desvio da corrente elétrica e o centelhamento dentro dos poros.

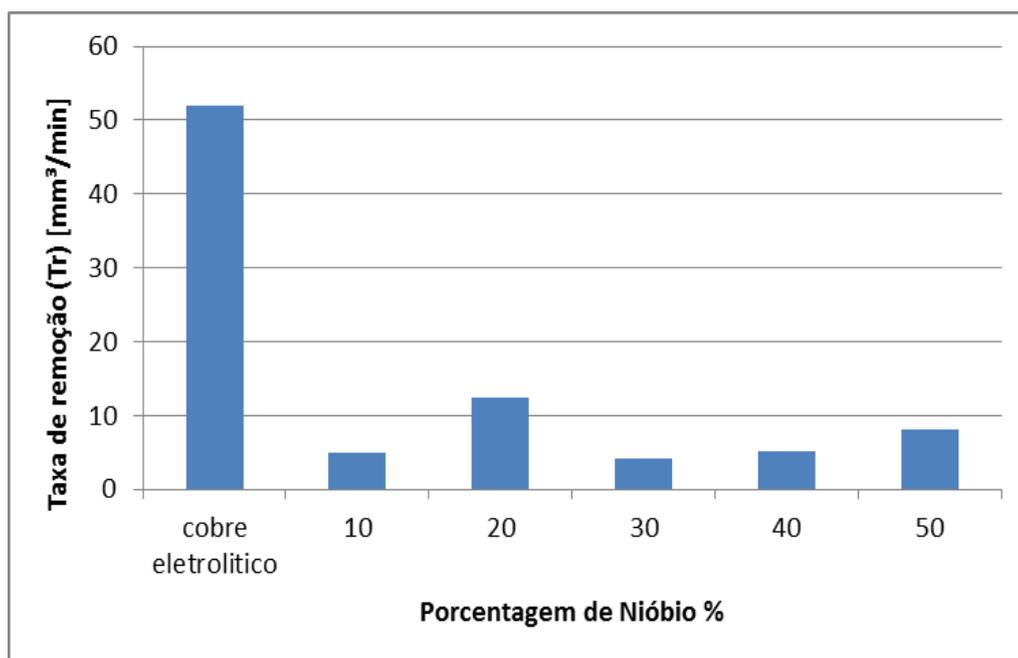


Figura 64. Taxa de remoção de material para o experimento VII.

Como pode ser observado nos resultados apresentados, a adição de nióbio ao cobre, afeta a remoção de material no processo de usinagem por eletroerosão. Em todas as variações de parâmetros propostas neste trabalho, houve redução na taxa de remoção de material. As causas deste fenômeno serão discutidas em capítulo apropriado.

4.5.3 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial no processo de usinagem por eletroerosão pode variar, conforme a necessidade de trabalho. Especialmente no caso de fabricação de moldes e matrizes, em que o processo é mais utilizado, podem ser obtidos valores variados. A usinagem por eletroerosão pode ser utilizada para acabamentos superficiais com baixa rugosidade para posterior polimento, ou para aplicação de texturas de alta rugosidade. Neste trabalho foram utilizados parâmetros que permitem verificar o comportamento da liga em

ambos os casos. Na Figura 65, pode ser observado que a qualidade superficial melhora com o aumento da quantidade de nióbio. Pelo valor da tabela é esperada uma rugosidade de 5,00 μm , nos experimentos foram obtidos valores que variam de 6,886 μm a 4,5 μm obtido com o eletrodo de 50% de nióbio.

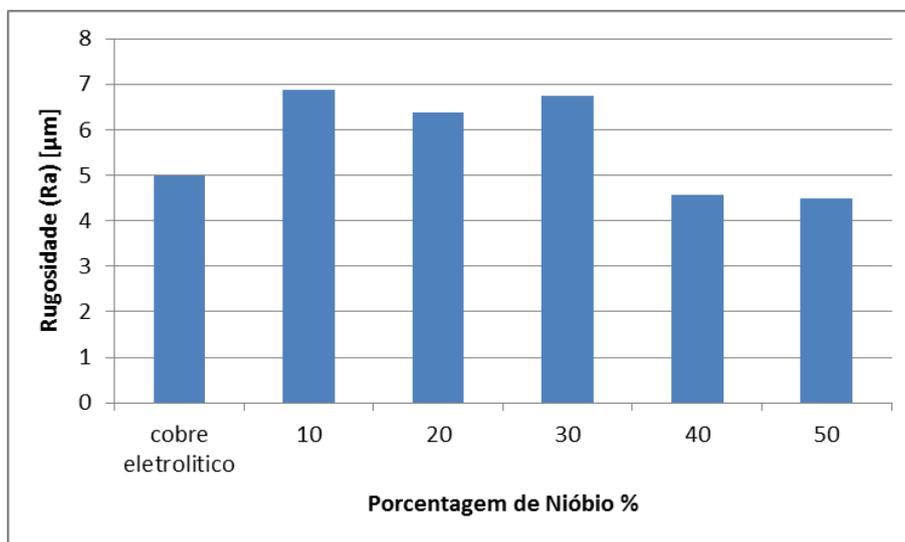


Figura 65. Rugosidade superficial Ra para o experimento I.

A Figura 66 mostra o resultado quando foi aumentada a intensidade da corrente, as maiores porcentagens de nióbio favorecem a qualidade superficial. Sendo que mesmo na menor quantidade, 10%, o resultado ainda se mantém abaixo do tabelado para estes parâmetros. Neste caso, o valor de referência é de 5,2 μm nos experimentos foram obtidas rugosidades que variaram entre 4,816 μm e 3,826 μm , valor novamente obtido com o eletrodo de 50% de nióbio.

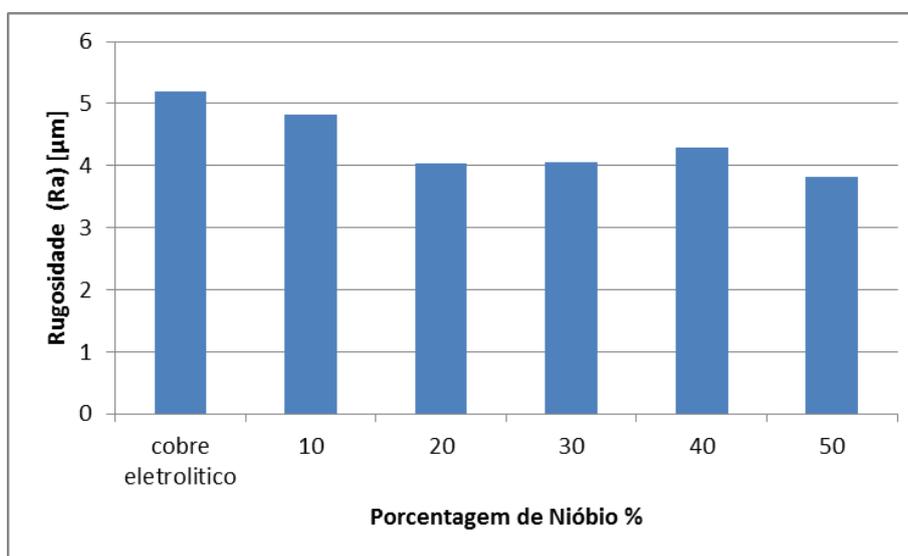


Figura 66. Rugosidade superficial Ra para o experimento II.

Na Figura 67 é mostrado o resultado para uma intensidade de corrente de ts 3. Quando é aumentada a intensidade de corrente, é esperado um valor de rugosidade mais alto, novamente a maior quantidade de nióbio favorece um melhor acabamento superficial, com diminuição significativa dos valores médios de rugosidade. Tendo um valor de referência de 6,00 μm , foram obtidos valores que variaram entre 5,193 μm e 3,596 μm , sendo que a menor rugosidade foi obtida com o eletrodo de 40%, 3,596 μm que é ligeiramente melhor do que o apresentado pelo eletrodo de 50% que tinha os melhores resultados nos casos anteriores.

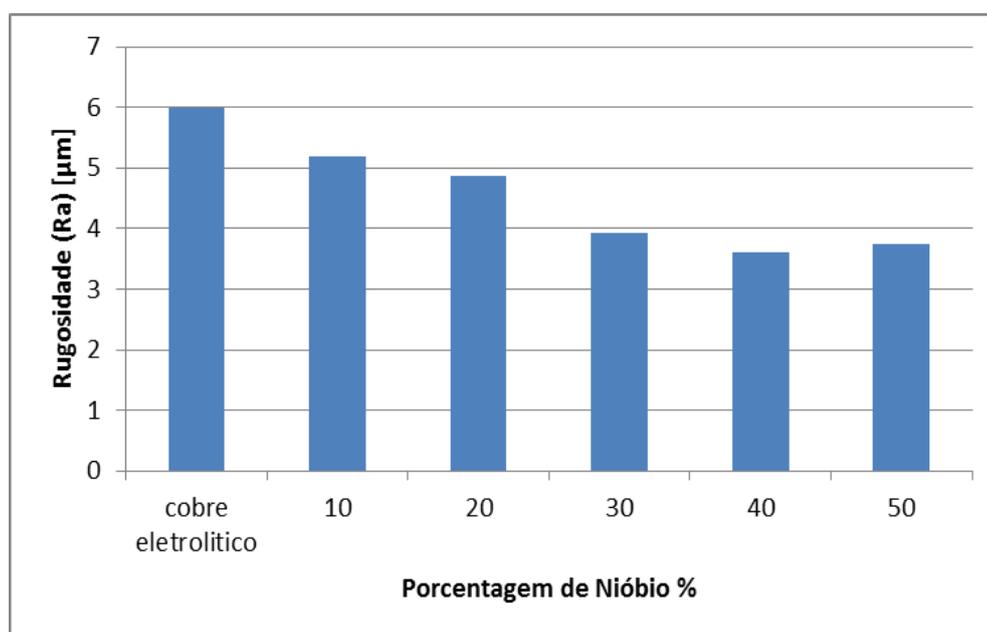


Figura 67. Rugosidade superficial Ra para o experimento III.

Com a mudança de parâmetros para um tempo maior de descarga elétrica e com um fator de correção também aumentado, o ganho em qualidade superficial foi significativo. Como pode ser visto na Figura 68, apenas o eletrodo com 40% de nióbio apresentou um valor acima do padrão de aumento da rugosidade, de acordo com o maior teor de nióbio na liga. Com o valor de referência de 11,00 μm foram apuradas rugosidades de 9,03 μm até 5,706 μm , valor obtido no eletrodo de 10% de nióbio que, apesar da pouca diferença, difere dos padrões apresentados anteriormente, dos melhores resultados serem nos eletrodos de maior percentual de nióbio.

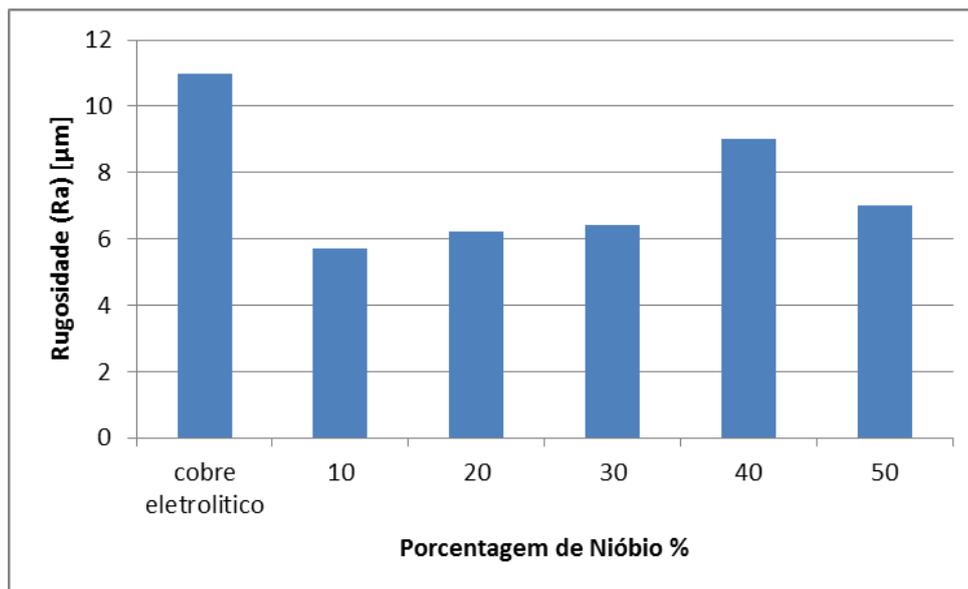


Figura 68. Rugosidade superficial Ra para o experimento IV.

Continuando com o padrão de aumento da intensidade da corrente, novamente foi obtido um perfil de rugosidade melhor que o tabelado. Na Figura 69, os resultados mostram-se muito bons, com um pequeno desvio no eletrodo com 20 % de nióbio. Na tabela era esperado um valor de 16 μm ; os valores variaram de 5,343 μm a 6,586 μm , com um pico de 8,340 μm no eletrodo de 20%, valor que é muito significativo quanto comparado ao esperado.

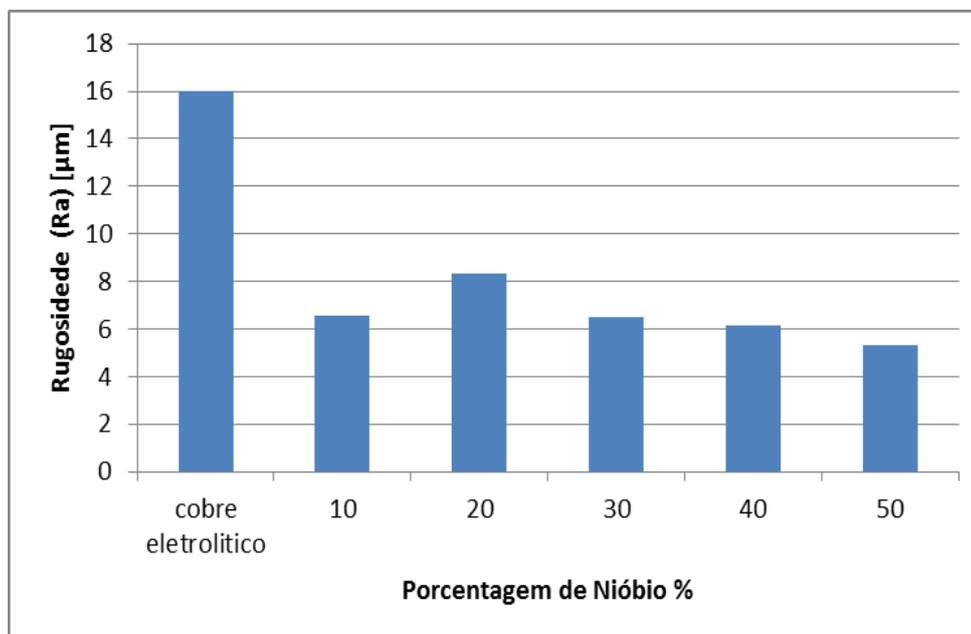


Figura 69. Rugosidade superficial Ra para o experimento V.

Na Figura 70 são apresentados os resultados para o aumento de intensidade de corrente em ts 3. Nota-se que o nióbio continua favorecendo valores baixos de rugosidade.

Enquanto o esperado pela tabela era um valor de 19 μm , os valores obtidos foram de 7,35 μm a 5,26 μm , sendo o menor valor para o eletrodo de 40 % de nióbio e o maior para 30 %.

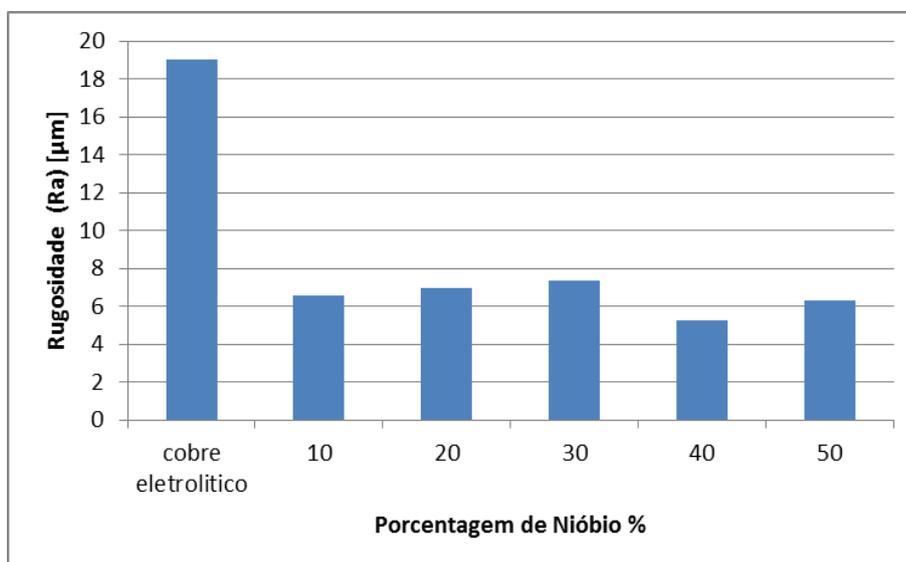


Figura 70. Rugosidade superficial Ra para o experimento VI.

Quando são utilizados parâmetros de usinagem de rendimento mais alto, típicos de operações de desbaste, não são esperados valores baixos de rugosidade.

Na Figura 71 são apresentados os valores obtidos para este caso. O valor informado pelo fabricante da máquina, para este caso, é de 27 μm . Nos experimentos foram obtidos valores de 6,05 μm para o eletrodo de 40 % até 9,07 μm para o de 30 %. Os valores baixos de rugosidade superficial também podem ter influência da baixa taxa de remoção, que é ocasionada pela dificuldade de condução da eletricidade pelo material.

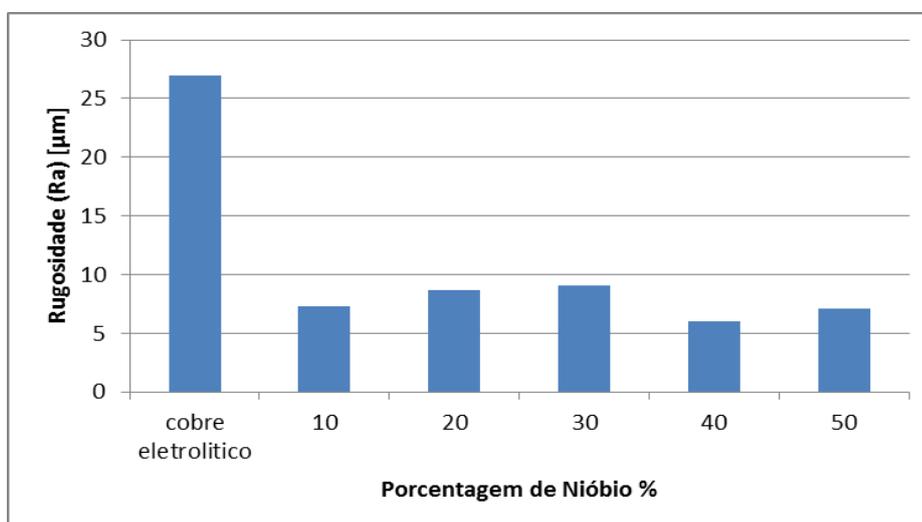


Figura 71. Rugosidade superficial Ra para o experimento VII.

Li et al /54/ testando o desempenho de uma liga de cobre com 5 a 45 % de TiC, chegaram à conclusão de que a fraca molhabilidade do cobre e do titânio prejudica a compactação e o rendimento quanto à taxa de remoção. A qualidade superficial foi melhorada com as menores porcentagens de TiC e piora com o aumento. No caso do nióbio, as maiores quantidades melhoram significativamente a qualidade superficial, os eletrodos com maiores porcentagens e maior pressão de compactação foram os com menor porosidade. Esta melhora também pode ser devido à grande dureza do nióbio, que garante melhor acabamento superficial do eletrodo.

Observando os resultados nota-se que as maiores quantidades de nióbio, menor as taxas de remoção. Já para a qualidade superficial a maior quantidade de nióbio se mostrou favorável em seis dos experimentos feitos na usinagem por eletroerosão.

5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Ligas de cobre com nióbio podem ser processadas por vários métodos, os mais usuais são por moagem e sinterização. Neste trabalho optou-se por processá-las por sinterização a 950 °C, em atmosfera de argônio.

Hussain *et al.* /56/ tentaram obter uma liga de cobre com 40% de nióbio e 10% de carbono somente por liga mecânica, mas não obtiveram sucesso. Esta liga foi então levada a um forno de sinterização a 900 °C sob uma atmosfera de argônio, resultando em uma estrutura porosa, a baixa molhabilidade do cobre com o nióbio e o carbono, pode ser a responsável por este efeito. Este mecanismo pode explicar a alta porosidade encontrada, neste trabalho, para as amostras com maiores porcentagens de nióbio, fato que veio a prejudicar o rendimento dos eletrodos. Marques *et al.* /57/ descobriram que uma matriz de cobre-nióbio-carbono, quando recozida a 600 °C, sofre um aumento na matriz de tamanho de grão. Este fato também pode estar ocorrendo neste trabalho, dificultando a união do cobre com o nióbio e provocando a queda na densidade. Samal *et al.* /58/ chegaram a conclusão de que somente por moagem não ocorre a formação de fase de cobre-carbono. Mas com sinterização a 900 °C ocorre uma boa distribuição do carbono dentro do cobre, mas há uma diminuição na densidade teórica. Locateli *et al.* /59/ não obtiveram bons resultados utilizando 800 °C na sinterização de cobre-bronze, as amostras mostram-se com uma alta porosidade e baixa dureza. Estes resultados justificam a temperatura escolhida, em que foi utilizado 950 °C na sinterização, e a pressão de compactação que teve os melhores resultados foi 900 MPa. Abu-Oqail *et al.* /60/ chegaram a conclusão, testando ligas de tungstênio-cobre, que as amostras com maiores quantidades de cobre são as que têm menor resistividade elétrica. Isso leva a concluir que os materiais ligados ao cobre causam uma descontinuidade da transmissão elétrica, assim como a porosidade. Samuel e Philip /61/, utilizando cobre sinterizado, chegaram a conclusão de que a porosidade afeta o rendimento dos eletrodos devido a má distribuição das faíscas. Há um desprendimento de partículas que aumentam o desgaste e afetam ao rendimento.

Alguns pesquisadores têm verificado a influência dos parâmetros no desempenho de eletroerosão. Singh *et al.* /62/ verificaram o comportamento de alguns materiais, cobre, cobre-tungstênio, latão e alumínio. O resultado de seu trabalho mostrou que o cobre ainda é o melhor material entre os pesquisados. Notou-se também que a taxa de

remoção é influenciada pelo tempo de descarga, tempos muito altos diminuem a remoção devido ao acúmulo de detritos na zona erodida.

Pesquisando o comportamento do cobre eletrolítico na usinagem de metal duro, Puertas *et al.* /63/ chegaram à conclusão de que os fatores que influenciam a rugosidade são a intensidade de corrente e o tempo de pulso. Uma corrente alta com um tempo de pulso pequeno geram superfícies com menor rugosidade. A taxa de remoção logicamente aumenta com a intensidade da corrente, mas decresce com o aumento do tempo de pulso, o que vem ao encontro do trabalho de Singh. Mesma conclusão a que chegaram Lee e Li /64/ na usinagem de carboneto de tungstênio, já quanto à qualidade superficial, concluíram que há um aumento da rugosidade com o aumento da intensidade de corrente.

No presente trabalho, o aumento da intensidade de corrente, com a manutenção dos tempos de descarga resultou em uma superfície usinada de baixa rugosidade. Isto pode ter ocorrido devido ao nióbio atuar com agente redutor de corrente, melhorando a qualidade superficial, mas reduzindo a taxa de remoção de material. Lee *et al.* /65/ creditam o fato de que o aumento da duração de pulso diminui a taxa de remoção devido ao aumento do canal de plasma elétrico, resultando em perda de energia térmica e dificuldade de retirada do material fundido da zona de erosão. Para os resultados de rugosidade de seu trabalho Lee chegou à mesma conclusão, a dissipação da energia no canal de plasma provoca a diminuição da intensidade de corrente, gerando crateras menores no material erodido.

6. CONCLUSÕES

Nos resultados obtidos pode ser observado que o desgaste do eletrodo é afetado positivamente. Há uma diminuição abrupta do desgaste, com uma pequena elevação com o aumento da intensidade de corrente (ts). Este comportamento é contrário ao indicado na tabela do fabricante, do equipamento de eletroerosão, para o eletrodo de cobre. Com o incremento da intensidade de corrente, ocorre o aumento da taxa de remoção de material, diminuindo o tempo de usinagem. O menor tempo é o responsável pela redução do desgaste do eletrodo. Na remoção de material ocorre uma redução com menores intensidades de corrente. O aumento deste parâmetro provoca uma melhora na remoção de material, este efeito é esperado, mas ainda se mantém abaixo do tabelado pelo fabricante do equipamento. Na Figura 72 podem ser observados os resultados médios, das ligas estudadas, para o tempo de descarga elétrica de 2 μ s.

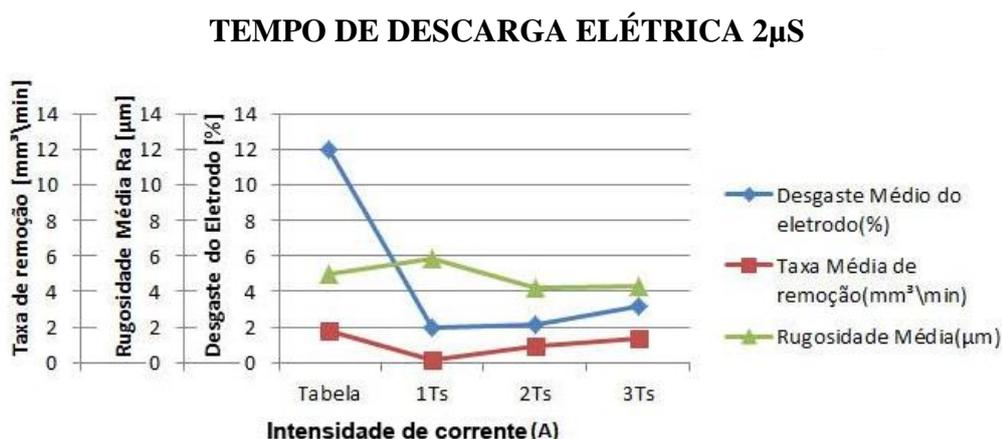


Figura 72. Tempo de descarga elétrica 2 μ s.

Com o aumento da intensidade de corrente ocorre uma diminuição no desgaste, fato este que também ocorre nos eletrodos de cobre eletrolítico. Este fenômeno está ligado ao menor tempo de processo com uma intensidade de corrente maior. As ligas testadas, novamente obtêm um mau desempenho na taxa de remoção de material. Este resultado leva à conclusão que a porosidade e o nióbio provocam uma diminuição no faiscamento do eletrodo junto à peça de trabalho. Já as rugosidades médias, obtidas em todas as proporções da liga estudada, foram de valores mais baixos que os tabelados. Este fator também pode ser creditado a um menor faiscamento. Na Figura 73 são apresentados os resultados médios, das ligas estudadas, para o tempo de descarga elétrica de 75 μ s.

TEMPO DE DESCARGA ELÉTRICA 75 μ S

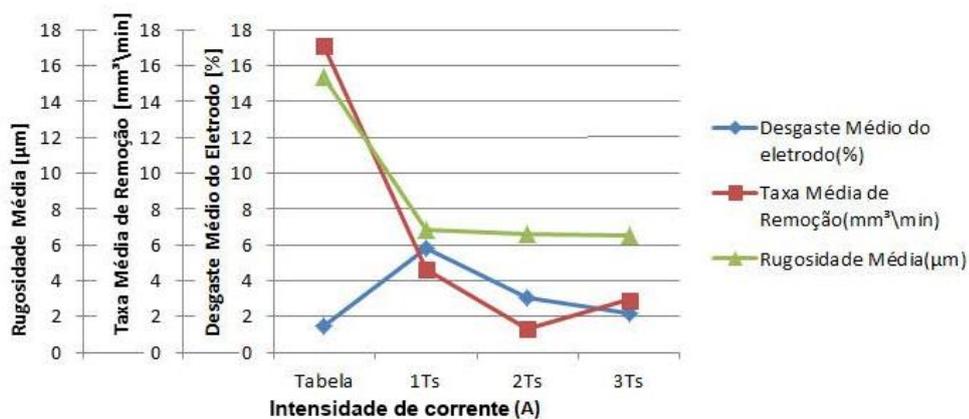


Figura 73. Tempo de descarga elétrica 75 μ s.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que as ligas estudadas se apresentam como uma opção viável, quando o objetivo do trabalho em eletroerosão é a obtenção de boa qualidade superficial com baixo desgaste do eletrodo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Estudos de ligas de cobre com quantidades de nióbio variando entre 1 a 9%;
- 2- Análise da inversão de polaridade no uso dos eletrodos de cobre-nióbio;
- 3- Pesquisar a influencia dos fluidos dielétricos no uso dos eletrodos cobre-nióbio;
- 4- Analisar o efeito do moinho atritor na formação das partículas;
- 5- Estudar em eletroerosão uma liga de cobre com porcentagens de nióbio variando entre 5 e 25% em peso e porcentagens de grafite entre 5 e 25% em peso.
- 6- Analisar a usinabilidade das ligas de cobre-nióbio.
- 7- Verificar o efeito do custo do pó de nióbio comparado com o do cobre puro.

REFERÊNCIAS

1. FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Edgard Blucher, 11º reimpressão 2003.
2. ALIARDI, J.S.; VARGAS, J.R.; ROCHA, P.R.B. *Estudo da Performance de Eletrodos de cobre e Grafite no Processo de EDM*. Trabalho de conclusão de Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal Sul-rio-grandense. Sapucaia do Sul. 2010.
3. SANTOS, I. *Análise dos Parâmetros de Entrada na Eletro erosão de Penetração da Liga de Titânio TI-6AL-4V*. Dissertação de Mestrado Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.
4. SILVA, E.R. *Comparação do Desempenho do Fluido Dielétrico Vegetal com Mineral Sintético e Querosene na Eletro erosão do Aço AISI H13*. Dissertação de Mestrado Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
5. SILVA, J.C. *Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletro erosão*. 2004 . 76p. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté, Taubaté.
6. SANTOS, CLAUDIA CRISTINA DOS. *Previsão de demanda de água na região metropolitana de São Paulo com redes neurais artificiais e condições socioambientais e meteorológicas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo. 2011 Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-25082011-155119/pt-br.php> Acesso em 05/10/2014
7. CHIAVERINI, VICENTE. *Metalurgia do pó: técnica e produtos*, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 4º.ed. São Paulo: 2001;
8. DIETER, G.E., *Metalurgia mecânica*. USA, 1981. Traduzido por Msc. Antônio Sérgio de Souza e Silva, Msc. Luiz Henrique de Almeida e Msc. Paulo Emílio Valadão de Miranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Segunda Edição.
9. GRUPO SETORIAL DA METALURGIA DO PO. *A METALURGIA DO PÓ: alternativa econômica com menor impacto ambiental*. 1ª Ed. São Paulo: 2009 Editora: METALLUM EVENTOS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS

10. SHUKLA, A.K. NARAYANA MURTY S.V.S., SURESH KUMAR, R. MONDAL K. *Densification behavior and mechanical properties of Cu–Cr–Nb alloy powders*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 551. 2012. pp. 241 – 24.
11. ASHBY, M.F. BAHK, S. BEVK, J. TURNBULL, D. *The influence of a dispersion of particles on the sintering of metal powders and wires*. Progress in Materials Science, Ed. Elsevier. Vol. 25. 1980. pp.1–34.
12. LEI; R, XU; S, WANG; M, WANG; H. *Microstructure and properties of nanocrystalline copper–niobium alloy with high strength and high conductivity*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 586 2013. pp. 367 – 373
13. E. BOTCHAROVA, M. HEILMAIER, J. FREUDENBERGER, G. DREW, D. KUDASHOW, U. MARTIN, L. SCHULTZ. *Supersaturated solid solution of niobium in copper by mechanical alloying*. Journal of Alloys and Compounds. Ed. Elsevier. Vol.351 2002. Pp. 119-125
14. A. BENGHALEM, D. G. MORRIS. *Microstructure and mechanical properties of concentrated copper-niobium alloys prepared by mechanical alloying*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol.161. 1992. pp. 255 – 266.
15. E. BOTCHAROVA, J. FREUDENBERGER, L. SCHULTZ, *Mechanical and electrical properties of mechanically alloyed nanocrystalline Cu–Nb alloys*. Acta Materialia Journals. Ed. Elsevier. Vol.54 2006. pp. 3333 – 3341.
16. K. EYMANN , T. RIEDL, A. BRAM, M. RUHNOW, R. BOUCHER, A. KIRCHNER, B. KIEBACK. *Consolidation of mechanically alloyed nanocrystalline Cu–Nb–ZrO₂ powder by spark plasma sintering*. Journal of Alloys and Compounds. Ed. Elsevier Vol. 535 2012 pp. 62-69.
17. E. BOTCHAROVA.; J. FREUDENBERGER.; L. SCHULTZ, *Cu–Nb alloys prepared by mechanical alloying and subsequent heat treatment*. Journal of Alloys and Compounds Ed. Elsevier. Vol.365. 2004. pp. 157–163.
18. M.D. ABAD.; S. PARKER.; D. KIENER.; M.-M. PRIMORAC.; P. HOSEMANN, *Microstructure and mechanical properties of Cu_xNb_{1-x} alloys prepared by ball milling and high pressure torsion compacting*. Journal of Alloys and Compounds. Ed. Elsevier. Vol.630 2014 pp. 17-125
19. LEI RUO-SHA, WANG MING-PU, GUO MING-XING, LI ZHOU, DONG QI-YI, *Microstructure evolution and thermal stability of nanocrystalline Cu-Nb alloys during heat treatment*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol.19 2009. pp. 272 – 276.

20. R.S. LEI, M.P. WANG, Z. LI, H.G. WEI. *Disclination dipoles observation and nanocrystallization mechanism in ball milled Cu–Nb powders*. Materials Letters. Ed. Elsevier. Vol. 65. 2011. Pp. 3044-3046
21. Y. LEPRINCE-WANG A, K. HAN B., Y. HUANG A, K. YU-ZHANG. *Microstructure in Cu-Nb microcomposites*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol 351. 2003. pp. 214 –223.
22. R.S. LEI; M.P. WANG; Z. LI, H.G. WEI; W.C. YANG; Y.L. JIA; S. Gong. *Structure evolution and solid solubility extension of copper–niobium powders during mechanical alloying*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 528. 2011. pp. 4475 – 4481.
23. LIPING DENG, KE HAN, KARL T. HARTWIG, THEO M. SIEGRIST, LIAN YANG DONG, ZEYUAN SUN, XIAO FANG YANG, QING LIU. *Hardness, electrical resistivity, and modeling of in situ Cu–Nb microcomposites*. Journal of Alloys and Compounds 602. Ed. Elsevier. Vol.625. 2014 pp. 331–338.
24. E. BOTCHAROVA; J. FREUDENBERGER; A. GAGANOV; K. KHLOPKOV; L. SCHULTZ. *Novel Cu–Nb-wires: Processing and characterization*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 416. 2005. pp. 261 – 268.
25. LINS, JEFFERSON FABRÍCIO CARDOSO; RODRIGUES, CARLOS ALBERTO; RODRIGUES JR., DURVAL, *Determinação da microtextura de um compósito nanoestruturado de Nb-Cu via EBSD*. 6º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 20 a 22 de agosto 2008, São Paulo,SP
Disponível em: [http:// www.scielo.br/pdfremv61n1a04v61n1.pdf/](http://www.scielo.br/pdfremv61n1a04v61n1.pdf) Acesso em 20/01/2015
26. CORRÊA, VIVIAN REIS. *Produção e Caracterização de Microcompósitos de Cu/NbTi* Tese de Doutorado, 2004, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil
Disponível em: [http:// www.ime.eb.br/arquivostesesesse4cmdissert_viviancorrea.pdf](http://www.ime.eb.br/arquivostesesesse4cmdissert_viviancorrea.pdf) / Acesso em 20/01/2014
27. CATTERALL, J. A.; WILLIAMS, I. *Magnetic investigations of the superconducting behaviour of sintered compacts of niobium and copper-niobium*. Journal of the Less-commomne Tals, Ed. Elsevier. Vol. 12. 1967. pp. 258 a 268.
28. E. K. KERSTNER.; L. SCHAEFFER.; M. S. DE LORENZI.; D. M. MERGUTTI.; C. C. ROSADO. *Aspectos reológicos do feedstock para utilização no processo MIM: revisão* Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Vol. 6.1 2011 pp.21-27
Disponível em: <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/> Acesso em 15/01/2015
29. BARBOZA, JULIANO SOARES. *Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas*.

Dissertação de mestrado. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/16209> Acesso em 15/01/2015

30. BARBOZA, JULIANO SOARES.; SCHAEFFER, LIRIO.; CERVA, LUCIANO LOHMANN.; LEWIS JR.; JORGE ALBERTO ESSWEIN.; DIAS, MOISÉS DE MATTOS. *Comparative study of the mechanical properties of sinterized magnetic alloys applied to electrical machines' core*. Powder Technology 192. Ed. Elsevier. Vol. 192 2008. pp 12-15

31. CASAGRANDE, JOECI. *Estudo das propriedades mecânica da liga Ti-Nb sinterizada para aplicação na área biomédica*. Dissertação de mestrado. 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/37399> Acesso em 15/01/2015

32. RODRIGUES, WILSON CORRÊA.; BROILO, LUIZ ROBERTO.; SCHAEFFER, LÍRIO.; KNÖRNSCHILD, GERHARD.; ESPINOZA, FIDEL ROMEL MALLQUI. *Powder metallurgical processing of Co-28%Cr-6%Mo for dental implants: Physical, mechanical and electrochemical properties*. Powder Technology. Ed. Elsevier Vol.206 2010 pp 233-238

33. Já falta cobre no mercado internacional. Jornal Valor econômico. Edição de 06/12/2011 Disponível em : <http://noticiasenegocios.com.br/2011/12/ja-falta-cobre-no-mercado-internacional/>Acesso em 18/01/2013

34. O nióbio é nosso? Disponível em:<http://www.redebrasilatual.com.br/revistas/74/ciencia> Acesso em 04/01/2013

35. Informações a Análise da economia Mineral Brasileira, Dezembro de 2012. Disponível em : <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf> . Acesso em 05/05/2013

36. PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO 2030 (PNM – 2030) CONSULTA PÚBLICA 10 de novembro a 09 de dezembro de 2010

Disponível em: http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/Plano_Nacional_de_Minerao_2030___Consulta_Publica_10_NOV.pdf Acesso em 05/05/2013

37. Informações a Análise da economia Mineral Brasileira, Dezembro de 2012. Disponível em : <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf> Acesso em 25/06/2013

38. CANATA JÚNIOR, C. L, *Cobre e suas Ligas*.

Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/CesarCanata.pdf> Acesso em 19/10/14

39. RIBEIRO, J. A. S. *Balanço Mineral Brasileiro 2001*

Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/>

cobre.pdf Acesso em 19/10/14

40. GRAHAM, RONALD A.; SUTHERLIN, RICHARD C. WAH CHANG. *Niobium and Niobium Alloys in Corrosive Applications*. Niobium International Symposium, Orlando, Florida, 2-5 de Dezembro, 2001 Niobium: Science & Technology, pp 337 – 355.TMS, 2001
41. ASM International. *Alloying: understanding the basics*. The Materials Informations Society. Ohio, 2001.
42. MARIANO, CAROLINA. *Obtenção de revestimentos de nióbio depositados por aspersão térmica para proteção à corrosão marinha*. Universidade Federal do Paraná. Dissertação de mestrado, Curitiba, 2008
43. GRILL, ROBERT. *Niobium for coins. TIC Tantalum - Niobium International Study Center*. Bulletin n.129, pp.6-8. Bruxelas, Bélgica, 2007.
44. JEGLITSCH, FRANZ . *Niobium in tool steels and cemented carbides*. Niobium 2001 International Symposium, Orlando, Florida, 2-5 de Dezembro, 2001 Niobium: Science & Technology, pp. 1001-1039
45. HULKA,K. AND GUIMARÃES, J.R.C. *The role and emerging use of niobium in tool steels*. CBMM Report, São Paulo (Brazil), 1993, pp.1-16.
46. JAE-SIK YOON. *The fabrication of niobium powder by sodiothermic reduction process*. Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. Vol 28 Ed. Elsevier. 2010 pp. 265-269.
47. ISAMU UEDA, MASAHIKO BABA, TATSUYA KIKUCHI, RYOSUKE O. SUZUKI *Formation of niobium powder by electrolysis in molten salt*. Electrochimica Acta. Ed. Elsevier. Vol. 100 2013 pp 269-274
48. STEFAN LUIDOLD , HELMUT ANTREKOWITSCH, ROBERT RESSEL. *Production of niobium powder by magnesiothermic reduction of niobium oxides in a cyclone reactor*. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. Ed. Elsevier. Vol. 25 2007. pp. 423–432.
49. MASAHIKO BABA, TATSUYA KIKUCHI , RYOSUKE O. SUZUKI. *Niobium powder synthesized by calciothermic reduction of niobium hydroxide for use in capacitors*. Journal of Physics and Chemistry of Solids. Ed. Elsevier. Vol. 78 2014 pp 101 – 109.
50. MARCHIORI, MARCELO MENNET. *Estudo de um sistema de medição a laser na análise da textura da superfície gerada por torneamento*. Dissertação de mestrado. 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

51. U. MARADIA, M. SCUDERI, R. KNAAK, M. BOCCADORO, I. BELTRAMI, J. STIRNIMANN, K. WEGENER. *Super-finished surfaces using meso-micro EDM*. Procedia CIRP 6. Vol. 6 2013. pp. 157 – 162.

52. O.M. FERRI, T. EBEL, R. BORMANN. *Influence of surface quality and porosity on fatigue behaviour of Ti–6Al–4V components processed by MIM*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 527 2010. pp. 1800 – 1805.

53. ZHAO,J.; LI, Y.; ZHANG, J.; YU, C.; ZHANG Y. *Analysis of the wear characteristics of an EDM electrode made by selective laser sintering*. Journal of Materials Processing Technology. Ed. Elsevier. Vol 138. 2003. pp. 475–478.

54. ZAW, H.M.; FUH, J.Y.H.; NEE, A.Y.C.; LU, L. *Formation of a new EDM electrode material using sintering techniques*. Journal of Materials Processing Technology. Ed. Elsevier. Vol. 89-90 1999. pp.182-186.

55. LI L. WONG, Y.S. FUH, J.Y.H. L. L. *EDM performance of TiC_copper-based sintered electrodes*. Materials and Design Ed. Elsevier. Vol. 22. 2001. pp. 669 – 678.

56. HUSSAIN, Z.; OTHMAN, R.; LONG, B. D.; UMEMOTO, M. *Synthesis of copper–niobium carbide composite poder by in situ processing*. Journal of Alloys and Compounds. Ed. Elsevier. Vol. 464. 2008 pp. 185–189.

57. MARQUES, M.T.; LIVRAMENTO, V.; CORREIA, J.B.; ALMEIDA, A.; VILAR, R. *Production of copper–niobium carbide nanocomposite powders via mechanical alloying*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 399. 2005 pp. 382–386.

58. SAMAL, C.P.; PARIHAR, J.S.; CHAIRA D. *The effect of milling and sintering techniques on mechanical properties of Cu–graphite metal matrix composite prepared by powder metallurgy route*. Journal of Alloys and Compounds. Ed. Elsevier. Vol. 569. 2013 pp. 95–101.

59. LOCATELI, C. C. BREMM, F. L. STAMM, J. G. SCHMITT, P. R. SOARES, T. S. DOS SANTOS, W. R. R.; GILAPA, G. M. *Estudo para desenvolvimento de ligas de cobre a partir do processo de sinterização*. Trabalho apresentado no XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia. Ijuí, RS 2006.

60. ABU-OQAIL, A.; GHANIM, M.; EL-SHEIKH, M.; EL-NIKHAILY, A. *Effects of processing parameters of tungsten–copper composites*. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Ed. Elsevier. Vol. 35. 2012. pp. 207–212.

61. SAMUEL, M. P.; PHILIP, P. K. *Power metallurgy tool electrodes for discharge machining*. International Journal of the Machine and Tools Manufacture. Ed. Elsevier. Vol. 37, No. 11, 1997. pp. 1625-1633.
62. SINGH, S.; MAHESHWARI, S.; PANDEY P.C. *Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials*. Journal of Materials Processing Technology. Ed. Elsevier. Vol.149. 2003. pp. 272 – 277.
63. PUERTAS, I.; LUIS, C.J.; ÁLVAREZ L. *Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-Co*. Journal of Materials Processing Technology Ed. Elsevier. Vol. 153–154. 2004. pp. 1026–1032.
64. LEE, S. H.; LI, X. P. *Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide*. Journal of Materials Processing Technology. Ed. Elsevier. Vol. 115. 2001. pp. 344 – 358.
65. LEE, HWA-TENG.; HSU, FU-CHUAN.; TAI, TZU-YAO. *Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode*. Materials Science and Engineering. Ed. Elsevier. Vol. 364. 2004. pp. 346–356.