



Universidade federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós graduação em Ciências e Engenharia de Materiais

Mestrado – Doutorado

**OBTENÇÃO DE REBITES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA A
PARTIR DA LIGA Cu-Al-Be-Cr**

Por

Márcia de Fátima Almeida Silva

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre.*

MÁRCIA DE FÁTIMA ALMEIDA SILVA

**OBTENÇÃO DE REBITES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA A
PARTIR DA LIGA Cu-Al-Be-Cr**

Dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Dannel Ferreira de Oliveira

S586o Silva, Márcia de Fátima Almeida.
Obtenção de rebites com efeito memória de forma a partir de liga Cu-Al-Be-Cr / Márcia de Fátima Almeida Silva.- João Pessoa, 2016.
66f. : il.
Orientadores: Dannel Ferreira de Oliveira
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT
1. Engenharia de materiais. 2. Rebites. 3. Ligas de memória de forma. 4. Propriedades mecânicas.

UFPB/BC

CDU: 620.1(043)

OBTENÇÃO DE REBITES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA A PARTIR DA LIGA Cu-Al-Be-Cr

Autora

MÁRCIA DE FATIMA DE ALMEIDA SILVA

Dissertação aprovada em 31 de outubro de 2016

Período letivo 2016.2

Daniel Ferreira de Oliveira

Prof. Dr. Daniel Ferreira de Oliveira

Orientador

Danielle Guedes de Lima Cavalcanti

Profa. Dra. Danielle Guedes de Lima Cavalcanti

Examinadora interna

Rafael Evaristo Caluete

Prof. Dr. Rafael Evaristo Caluete

Examinador externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Braz de Araújo Silva e Maria José de Almeida Silva, ao meu filho Marcus Vinícius e meu esposo Diego, aos meus irmãos Michelle e Bráulio. Que seguraram minhas mãos e meus sonhos como se fossem seus, por sua presença e apoio de sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua infinita misericórdia em permitir-me o dom da vida, afim de melhorar-me em mais uma oportunidade.

Aos meus pais por todo amor e cuidado, pelo apoio e estímulo durante todos os meus planos e por cuidar do meu bem mais precioso enquanto estava longe de casa.

Ao meu filho Marcus Vinícius, que mesmo tão pequenino me ensina a cada dia os valores da vida e como amar imensuravelmente.

Ao meu esposo Diego, por me apoiar e aceitar minhas decisões e sermos essa família disposta a aprender sempre.

Aos meus irmãos Michelle e Bráulio, que mesmo distantes estão presentes em cada palavra de carinho, de incentivo e puxão de orelha.

A toda minha família que faz parte da minha história, meus tios e tias, meus primos e primas, meus vovôs (in memoriam) e minhas vovós.

Ao professor Danniell por todo ensinamento e dedicação, e aos professores Rafael, Tadeu por todo auxílio e aos demais professores.

As minhas amigas que foram um grande suporte para mim nestes dois anos distante de casa, Juliana Kelly, Jakeline e Priscila, obrigado por me acolherem em seus lares.

As meninas que dividimos os sufocos das disciplinas e as gracinhas e dificuldades de uma vida acadêmica, Nadié, Alessandra, Verônica e Mayanne.

Aos técnicos de laboratório Meyson, André e Breno, ao técnico da oficina Josivan, obrigada pela contribuição.

Aos integrantes da banca Prof. Dra. Danielle Guedes e o Prof. Dr. Rafael Caluête.

A Universidade Federal da Paraíba e a Capes.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente com o desenvolvimento deste trabalho.

OBTENÇÃO DE REBITES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA A PARTIR DA LIGA Cu-Al-Be-Cr

RESUMO

As ligas com efeito memória de forma são considerados materiais inteligentes que devido suas importantes características podem ser aplicada nas áreas: médica, ortodôntica e na engenharia. Com bases nas suas propriedades intrínsecas, este trabalho teve como um objetivo principal o desenvolvimento de rebites com memória de forma a partir da liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr para substituição dos rebites comerciais que são rebitados com grande dificuldade de acesso. A liga foi obtida por fundição, homogeneizadas, temperadas e caracterizadas por microscopia óptica, difração de raios X e Calorimetria diferencial de Varredura (DSC). Foram confeccionados os rebites por processo de usinagem via torneamento e eletroerosão a frio e realizada sua caracterização mecânica através de ensaios de dureza Rockwell, cisalhamento e arrancamento, e também a variação do módulo de elasticidade em relação a cargas aplicadas através do ensaio de ultramicrodureza. Observou-se o tamanho de grão médio de 200 μ m que proporciona boas propriedades mecânicas, confirmadas através da caracterização mecânica do rebite com memória de forma. Deste modo, a fabricação de rebites com memória de forma é atrativa e viável para o emprego em uniões de difícil acesso, na fixação de peças que necessitam de movimento em torno de um eixo e na substituição de rebites comerciais.

Palavras chave: Ligas de memória de forma, rebites, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

OBTAINING RIVETS SHAPE MEMORY EFFECT ALLOY FROM Cu-Al-Be-Cr

Alloys with shape memory effect are considered as intelligent materials that due to their important characteristics can be applied in the areas: medical, orthodontic and engineering. This work had as main objective the development of rivets shape memory alloy of the Cu-11.8% Al-0.58% Be-0.3% Cr to replace the commercial rivets that are riveted with great difficult access. The alloy was prepared by casting, homogenised, temperate and characterized by optical microscopy, X-ray diffraction and Differential Scanning Calorimetry (DSC). Rivets were made by machining process via turning and cold eletrocut, thus, it was performed its mechanical characterization by hardness testing Rockwell, shearing and tearing, and also the modulus changes elasticity by loads applied through test ultramicrodureza. It was observed the average grain size of 200 μ m to It provides good mechanical properties confirmed by mechanical characterization of the rivet shape memory. Thus, manufacturing rivets shape memory is an attractive and feasible for employment in unions of difficult access, in fixing parts that need movement about an axis and the replacement commercial rivets.

Keywords: Shape memory alloy, rivets, mechanical properties.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE GRÁFICOS	13
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE EQUAÇÕES	15
LISTA DE SÍMBOLOS	16
M_f – Temperatura final da transformação de austenita em martensita;	16
CAPÍTULO I.....	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivo Específico	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
CAPÍTULO II.....	21
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA	21
2.2 TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS	23
2.3 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA NAS LIGAS CU-AL	24
2.4 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	25
2.5 REBITES	26
2.5.1 Rebitagem	29
2.5.2 Junções	30
2.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS NAS LIGAS METÁLICAS	Erro! Indicador não definido.
2.7 ENSAIO DE NANOIDENTAÇÃO	31

CAPÍTULO III	36
MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO	36
3.2 FUNDIÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO	37
3.3 USINAGEM DAS AMOSTRAS E ABERTURA DAS HASTES	37
3.4 ANÁLISE TÉRMICA: CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) 39	
3.5 TAMANHO DE GRÃO: MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)	39
3.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	40
3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	40
3.7.1 Ensaio de Dureza Rockwell	41
3.7.2 Ensaio de Cisalhamento	41
3.7.3 Ensaio de Arrancamento	42
CAPÍTULO IV	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 REBITES: USINAGEM E ABERTURA DAS HASTES	45
4.2 ANÁLISE TÉRMICA: CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) 46	
4.3 VERIFICAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO	47
4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	48
4.5 OBTENÇÕES DA DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE NOS ENSAIOS DE CARGA-DESCARGA SEM CICLAGEM COM USO DE PENETRADOR VICKERS	49
4.6 OBTENÇÃO DA DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE NOS ENSAIOS DE CARGA E DESCARGA COM CICLAGEM COM USO DE PENETRADOR VICKERS	54
4.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA: DUREZA ROCKWELL, CISALHAMENTO E ARRANCAMENTO	57
4.6.1 Ensaio de Dureza Rockwell	57
4.6.2 Cisalhamento	58
4.6.3 Arrancamento	60
CAPÍTULO V	62

CONCLUSÕES	62
CAPÍTULO VI	63
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
CAPÍTULO VII	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Gráfico de transformação nas ligas com memória de forma. Martensita deformada, martensita não deformada e austenita.....	21
Figura 2.2: Ilustração plano de mudança entre austenita (γ) e martensita (α)	23
Figura 2.3: Rebitagem por recobrimento.....	29
Figura 2.4: Representação esquemática da geometria da amostra.....	30
Figura 2.5: Ilustração da indentação de um penetrador cônico em um sólido elástico	32
Figura 2.6: Curva carga-descarga obtida em um ensaio dinâmico de dureza	33
Figura 3.1: Lingote da liga Cu-Al-Be-Cr	36
Figura 3.2: Torno mecânico Romi 20S.....	37
Figura 3.3: Projeto mecânico do rebite maciço a ser obtido	37
Figura 3.4: Projeto mecânico do rebite para corte na eletroerosão a ser obtido	37
Figura 3.5: Fotografia das amostras de Cu Al Be Cr após tratamento metalografico	38
Figura 3.6: Inserção do rebite com memória de forma na primeira chapa	39
Figura 3.7: a) Rebite fixado na chapa para ensaio de cisalhamento; 3. b) Cabeça do rebite fixado na chapa; 3. c) Haste do rebite fixado nas chapa antes do ensaio	40
Figura 3.8: Ensaio de cisalhamento do rebite com memória de forma	41
Figura 3.9: Garra para ensaio de arrancamento	41
Figura 3.10: Chapas rebitada com rebite de alumínio, para ensaio de arrancamento	42
Figura 3.11: Chapas rebitada encaixada em uma das partes da garra	42
Figura 3.12: Ensaio de arrancamento	43
Figura 4.1: Rebite maciço após o torneamento do lingote	44
Figura 4.2: Peça para abertura da haste, sem o complemento	44
Figura 4.3: Peça para abertura da haste com complemento	44
Figura 4.4: Rebite após o corte por eletroerosão	44
Figura 4.5: Rebite após a abertura da haste para posterior tempera	45
Figura 4.6: Fotomicrografia da liga Cu Al Be Cr (% em peso), com aumento de 5000x.....	46
Figura 4.7: Fotomicrografia da liga Cu Al Be Cr (% em peso), com aumento de 10000x.....	47
Figura 4.8: Fotomicroscopia das amostras submetidas a carga de 100mN	53
Figura 4.9: Fotomicroscopia das amostras submetidas a carga de 2000mN.....	53
Figura 4.10: Após o ensaio de arrancamento	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Fotografia das amostras de Cu Al Be Cr após tratamento metalográfico.....	45
Gráfico 4.2: Difratoograma da liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr.....	47
Gráfico 4.3: Curvas carga-descarga sem ciclagem.....	48
Gráfico 4.4: Variação do módulo de elasticidade em função da carga.....	48
Gráfico 4.5: Variação da dureza em função da carga.....	49
Gráfico 4.6: Variação do módulo de elasticidade em função da profundidade.....	49
Gráfico 4.7: Variação da dureza em função da profundidade.....	50
Gráfico 4.8: Curvas carga e descarga sem ciclagem com velocidade de indentação 10 vezes menor	51
Gráfico 4.9: Curvas carga e descarga sem ciclagem com velocidade de indentação 5 vezes maior.....	51
Gráfico 4.10: Variação da velocidade de indentação, profundidade versos carga.....	52
Gráfico 4.11: Curva obtida através do ensaio de ultramicrodureza carga-descarga com ciclagem.....	54
Gráfico 4.12: Intervalo inicial da Curva de descarregamento para a curva carga-descarga com ciclagem.....	54
Gráfico 4.13: Gráfico de cisalhamento amostra 1, rebite comercial.....	57
Gráfico 4.14: Gráfico de cisalhamento amostra 1, rebite com memória de forma.....	57
Gráfico 4.15: Gráfico comparativo das curvas de cisalhamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma.....	58
Gráfico 4.16: Gráfico comparativo das curvas de cisalhamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tipos, denominações e aplicações dos rebites.....	26
Tabela 2.2: Classes e tipos de rebites especiais.....	28
Tabela 2.3: Comparação entre o uso de junção por rebite e por solda.....	29
Tabela 3.1: Escala de Dureza Rockwell utilizada no ensaio.....	40
Tabela 4.1: Temperatura de transformação de fase da liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr.....	46
Tabela 4.2: Curvas carga e descarga sem ciclagem com velocidade de indentação 5 vezes maior.....	52
Tabela 4.3: Valores médios obtidos para o módulo de elasticidade (GPa) a partir dos ensaios de ultramicrodureza tipo carga-descarga com ciclagem.....	55
Tabela 4.4: Valores do módulo de elasticidade a partir da aplicação da carga no ensaio sem ciclagem.....	55
Tabela 4.5: Gráfico de cisalhamento amostra 2, rebite comercial.....	57
Tabela 4.6: Gráfico de cisalhamento amostra 2, rebite comercial.....	57
Tabela 4.7: Valores do ensaio de arrancamento.....	58

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1.....	26
Equação 2.2.....	29
Equação 2.3.....	32
Equação 2.4.....	32
Equação 2.5.....	32
Equação 2.6.....	32
Equação 2.7.....	33
Equação 2.8.....	33
Equação 2.9.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i – Temperatura inicial da transformação de martensita em austenita;

A_f – Temperatura final da transformação de martensita em austenita;

M_i – Temperatura inicial da transformação de austenita em martensita;

M_f – Temperatura final da transformação de austenita em martensita;

E – Módulo de elasticidade

h_c – Profundidade de contato;

$h_{m\acute{a}x}$ – Profundidade da superfície na situação de carregamento máximo;

h_r – Profundidade de impressão residual;

h_e – Deslocamento elástico durante processo de descarregamento;

P – carga de recuo;

h - Deslocamento do penetrador;

h_f – deslocamento final do penetrador;

A – área projetada do indentador;

S – Rigidez no descarregamento;

$f(d)$ – função da forma;

E_{eff} – Módulo elástico efetivo;

ν – coeficiente de Poisson da amostra;

DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura;

EFM – Efeito Memória de Forma.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das ligas com efeito memória de forma têm contribuído com o avanço da ciência dos materiais, nos mais diversos campos de aplicação, mecânico, biomédico, ortodôntico e aviação. Além dos avanços tecnológicos as melhorias nos equipamentos de ensaio e caracterização de materiais, tem contribuído pontualmente com o estudo da ciência dos materiais nas três áreas de abrangência, em especial os estudos sobre as ligas com efeito memória de forma que tem se destacado em número de pesquisas e nas descobertas de suas aplicações e propriedades, entre estas propriedades estão além do efeito memória de forma, a superelasticidade e a pseudoelasticidade (LAGOUDAS, 2008; BELTRAN et. al., 2011). Dentre as aplicações podemos citar a medicina, ortodontia e engenharia, devido as propriedades termomecânicas exclusivas destas ligas.

As ligas com efeito memória de forma possuem essencialmente duas fases, austenita e martensita. Quanto a sua estabilidade a austenita é mais estável a altas temperaturas e baixas tensões, enquanto a martensita a baixas temperaturas e altas tensões (BELTRAN et. al., 2011). Estas ligas, variam sua estrutura, sem que ocorra difusão (ERGEN et. al., 2013), diferente do que ocorre nas transformações polimórficas em ligas convencionais, via difusão, nas ligas com efeito memória de forma, estas transformações quando sujeitas a determinadas temperaturas e tensões e podem retornar a forma original quando retirada a sollicitação. Os mecanismos que estão ligados a estas propriedades são a temperatura induzida por tensão e as transições de fase entre austenita e a martensita (deformada e não deformada) (ZHU et. al., 2016). Quatro temperaturas definem as transformações de fases das ligas EMF: M_s martensita inicial, M_f martensita final, A_s austenita inicial e A_f austenita final.

Estas ligas podem exibir a característica de pseudoelasticidade nas transformações martensíticas de fase β , tanto por arrefecimento quanto por tensões mecânicas, esta transformação através de tensão ocorre apenas em condições adequadas. A curva representativa da carga-deslocamento apresentada nos ensaios de ultramicrodureza, exibe inicialmente um comportamento linear que corresponde a deformação elástica quando inicia a transformação martensítica a linearidade é interrompida passando a ser quase linear, quando a

carga é retirada forma-se uma curva semelhante a de histerese que demonstra o comportamento pseudoelástico das ligas com efeito memória de forma, a exemplo Cu-Al-Be (MONTECINOS et. al., 2012).

As ligas de Cu-Al são bastante estudadas para substituição, onde se aplica, das ligas Ni-Ti devido seu elevado custo. As ligas Ni-Ti, são demasiadamente aplicadas como materiais inteligentes, por seu peso, pelas boas propriedades termomecânicas e de amortecimento. Estas propriedades ocorrem em função de suas transformações no estado sólido. Nestas a fase austenita apresenta elevada simetria, enquanto a martensita baixa simetria (TADAYYON et. al., 2016).

Dentre as ligas com EFM, temos as Cu-Al que têm sido utilizadas frequentemente, em substituição as ligas Ni-Ti (LOPEZ-FERREÑO et. al., 2016), devido suas propriedades mecânicas e a larga faixa de transformação de temperatura. Com a finalidade de atribuir ou melhorar algumas características, são adicionados elementos ternários e quartenários, que podem servir como refinadores de grão promove a redução de temperatura de transformação e melhora propriedades mecânicas, como exemplo o Be e Cr (ERGEN et. al., 2013).

A adição de Nb para modificação das ligas Cu-Al-Be atribui a estas características relevantes, como: boa ductilidade, recuperação de forma superior a 4% e boa resistência mecânica (OLIVEIRA, 2009).

Com base em estudos da morfologia da liga Cu-Al-Be-Cr de estudos anteriores, decidiu-se verificar as suas propriedades mecânicas em possíveis aplicações, por exemplo, em elementos de máquinas como fixadores. Estes podem ser de fixação móvel ou permanente, como exemplo o uso de parafusos, solda e rebites (FRANCESCHI & ANTONELLO, 2014).

Para escolha dos elementos de fixação, são necessários além do projeto e das propriedades que se deseja, a acessibilidade na montagem e desmontagem das peças. Muitos elementos fixadores apresentam dificuldade no momento da inserção, como exemplo os rebites. Que apresenta-se como elemento fixador permanente, mas através de alterações no material da fabricação e de um ovo modelo proposto pode proporcionar a retirada do mesmo sem danos as peças ou ao rebite.

Deste modo, a motivação deste trabalho foi a obtenção de rebites com memória de forma e a viabilidade de fabricação, além de suas propriedades mecânicas como dureza e módulo de elasticidade da liga utilizada Cu-Al-Be-Cr. Para isto, a liga foi obtida em forna tipo mufla, em seguida homogeneizada, usinada por torneamento e eletroerosão a fio, para

obtenção dos rebites. Os rebites foram ensaiados através de ultramicrodureza, dureza Rockwell, cisalhamento e arrancamento.

Através dos resultados pode-se verificar a viabilidade de produção dos rebites com memória de forma e suas vantagens em relação ao rebite comercial de alumínio, como a possibilidade de retirada do rebite após a inserção sem que seja inutilizado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver rebites com memória de forma a partir da liga Cu-Al-Be-Cr, realizar a caracterização mecânica e a viabilidade de fabricação de rebites com memória de forma.

1.2.2 Objetivo Específico

- Obter a liga Cu-Al-Be-Cr com efeito memória de forma;
- Desenvolver rebite com memória de forma;
- Caracterizar a liga Cu-Al-Be-Cr através das técnicas morfológicas, mecânicas e DSC;
- Analisar as propriedades mecânicas da liga;
- Avaliar a dureza e módulo de elasticidade através do método de nanoindentação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado em sete capítulos, discriminados como a seguir:

O capítulo I contém uma abordagem inicial sobre as ligas de memória de forma, os tipos de ligas e a sua importância, os objetivos geral e específico e a organização do trabalho.

O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica sobre as ligas com memória de forma, as transformações martensíticas e a realização de projetos mecânicos e os elementos de fixação e as propriedades elásticas da liga em estudo.

O capítulo III retrata a descrição dos materiais e métodos utilizados na obtenção do rebite e suas caracterizações.

O capítulo IV expõe os resultados atingidos e discussões.

O capítulo V exhibe as conclusões do trabalho.

O capítulo VI trabalhos futuros.

O capítulo VII mostra as referências bibliográficas utilizadas como embasamento teórico neste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Desde a descoberta da fase martensítica nos aços, por volta do ano de 1890 por Adolf Martens, as transformações martensíticas passaram a ser bastante estudadas nos anos seguintes. Inicialmente acreditava-se em uma fase permanente, com base no sistema Fe-C, em seguida surgiu o conceito de transformação martensítica termoelástica o que explica a transformação martensítica reversível nas ligas de CuZn e CuAl. Porém, apenas em 1963 com a descoberta da liga NiTi que as ligas passaram a ter aplicação tecnológica, inicialmente, por apresentar além das características de transformação a resistência térmica. Devido o Ti apresentar excelentes propriedades mecânicas, além de certa característica de retorno a forma original. A liga “Nitinol”, como ficou conhecida, determinou o termo Efeito de memória de forma (EFM) em consequência da sua capacidade de retorno a forma original e foi o metalurgista e pesquisador William F. Buehler, no laboratório de artilharia naval da marinha americana (Naval Ordnance Laboratory) que desenvolveu esta liga em 1965 (LAGOUDAS, 2008).

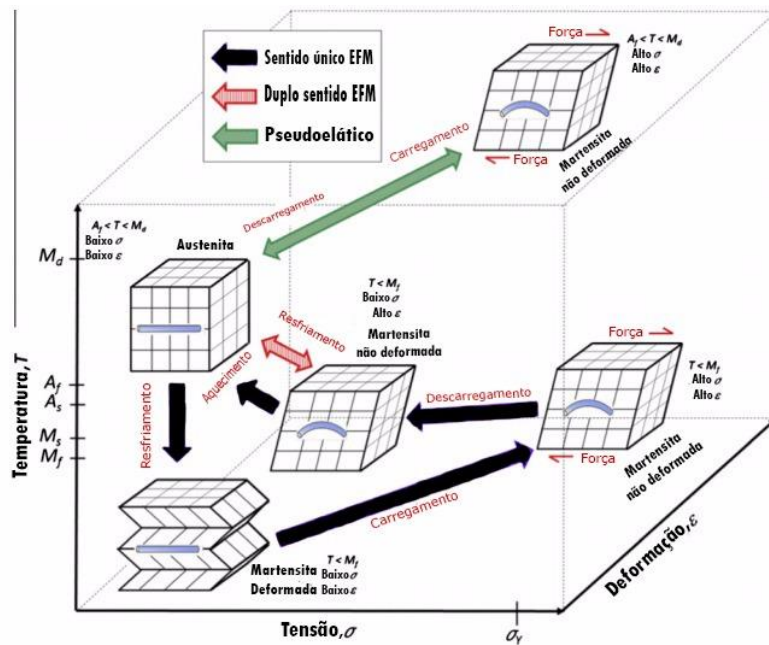
O efeito de memória de forma é uma das características mais estudadas nas ligas com memória de forma, essa capacidade de um material regressar a sua forma inicial após ter sido deformada plasticamente em temperatura abaixo da temperatura final martensítica M_f e com o aquecimento da liga em temperatura acima da temperatura final da transformação austenítica A_f caracteriza o EMF. Esse efeito ocorre em razão de transformações na estrutura cristalina do material, de martensita para austenita, por processos térmicos (PINA, 2006), sem que haja difusão (YOO et al., 2015).

O aumento da temperatura pode resultar na restauração da forma original, independente de elevadas cargas externas aplicadas, sob condições específicas as ligas com efeito memória de forma podem absorver ou dissipar energia mecânica devido a mudança nas curvas de histerese quando aplicadas cargas mecânicas cíclicas (LAGOUDAS, 2008).

Além da sua transformação por alterações de temperatura, sejam estas internas (efeito Joule) ou externas, podem ocorrer transformações oriundas de forças externas e do mesmo

modo uma força de mesma intensidade e oposta pode provocar o retorno a forma original, no caso da pseudoelasticidade e da superelasticidade (BELTRAN et. al., 2011). Entre outros estímulos importantes como um campo magnético (JANI, et.al. 2014). Verifica-se na figura 2.1 as duas fases das ligas com efeito memória de forma com as três diferentes estruturas cristalinas: martensita deformada, martensita não deformada e austenita, e as suas possibilidades de transformação (SUN & HUANG, 2009).

Figura 2.1: Gráfico de transformação nas ligas com memória de forma. Martensita deformada, martensita não deformada e austenita.



Fonte: Modificada de JANI et. al., 2014.

A estrutura austenita é estável a altas temperaturas, enquanto a martensita é estável a baixas temperaturas. A temperatura A_s é a temperatura onde inicia a transformação austenítica e A_f é a temperatura onde finaliza a transformação para recuperar a forma. Quando ocorre o resfriamento começa o processo reverso de transformação da martensita (M_s), esta transformação estará completa quando atinge a temperatura M_f (JANI, et.al., 2014).

As ligas com efeito memória de forma destacam-se por serem considerados materiais inteligentes, decorrentes de suas propriedades características como o EMF; que apresenta após o carregamento e descarregamento uma elevada tensão residual, podendo recuperar-se

através do aquecimento, e a super elasticidade (SE); caracteriza-se por apresentar uma elevada tensão após o carregamento e recuperando-se através do ciclo de histerese quando ocorre o descarregamento (YOO et al., 2015).

Existem ainda as ligas ferromagnéticas com memória de forma que têm chamado atenção, devido ao bom comportamento da sua memória de forma ativada através da mudança do campo magnético ou da temperatura, porém dificulta suas aplicações por apresentarem baixas propriedades mecânicas (WU et. al., 2015).

Dentre as ligas com excelentes propriedades mecânicas, estão as ligas de Ni-Ti, estas tem sido bastante utilizadas em articulações e como elementos de fixação para indústria aeroespacial. Uma das desvantagens que podem ser abordadas é sua densidade que é relativamente alta, e a indústria aeroespacial tem elevado interesse na por ligas de peso leve, entre a classe das ligas de peso leve podemos citar Ti-Al-V e também a Ti-V-Al. Estudos recentes com as ligas Ti-V-Al indicam que com a redução da temperatura da transformação martensítica destas ligas, que dependendo de sua concentração podem chegar a 350°C sem perda da qualidade do efeito memória de forma e podem ser utilizadas em articulações e elementos de fixação (YANG et. al., 2016).

2.2 TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS

O termo martensita era utilizado originalmente para especificar microconstituintes encontrados nos aços temperados. A martensita é ainda a característica mais importante encontrada nos aços, podendo conferir a estes excelentes combinações de resistência e força. Muitos materiais além do aço apresentam esta fase devido a transformações no estado sólido (BHADESHIA, 2002). Estas transformações de fase tornaram possíveis o desenvolvimento de ligas que apresentam efeito memória de forma.

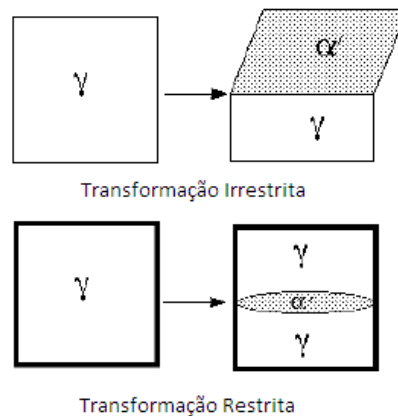
O EMF é uma propriedade exclusiva apresentada por determinadas ligas através das transformações martensíticas. Estas ligas são deformadas a baixa temperatura de fase e apesar disso recuperam a memória original pela transformação reversa, através do aquecimento acima de sua temperatura crítica, conhecida como temperatura de transformação reversa. Enquanto outras ligas possuem a propriedade superelasticidade a temperaturas mais altas (OTSUKA, 1937).

As transformações martensítica e a reversa ocorrem devido à mudança do reticulado cristalino e deformações resultantes dos movimentos atômicos. Esta transformação é causada substancialmente devido a diferença de energia livre entre as fases, a energia química livre da fase martensítica deve ser menor do que a fase austenítica para que ocorra a transformação. Do mesmo modo para que ocorra a transformação reversa a diferença de energia entre os planos deve permanecer em equilíbrio para retornar a estrutura inicial (HUANG, 1998).

A martensita pode ocorrer a baixas temperaturas, mas isso não indica necessariamente que ocorra. A temperatura de transformação será distinta para cada material. Deste modo a M_i , temperatura inicial da transformação austenita em martensita, e a M_f , temperatura final da transformação austenita em martensita, serão diferentes para cada tipo de material.

Podemos verificar os planos de interface entre austenita e martensita conforme apresentado na Figura 2.2. Para a transformação irrestrita o plano de interface é completo, já para a transformação restrita fica limitada por seus arredores, o plano de mudança é o mesmo para ambos os casos (BHADESHIA, 2002).

Figura 2.2: Ilustração plano de mudança entre austenita (γ) e martensita (α).



Fonte: (Modificado BHADESHIA, 2002).

2.3 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA NAS LIGAS CU-AL

Sabe-se que as transformações martensíticas são responsáveis pelas propriedades termomecânicas das ligas EMF, e que as ligas mais utilizadas são as ligas a base de Ni-Ti, porém as ligas a base de Cu têm sido bastante usadas como alternativa para ligas com efeito memória de forma, por apresentar uma larga faixa de transformações de temperatura, cerca de

200°C, além de um grande espaço de superelasticidade e uma baixa histerese térmica. Dentre as principais ligas estão o sistema binário Cu-Al, a qual são adicionados outros elementos afim de reduzir as elevadas transformações de temperaturas e controlar as propriedades termomecânicas. É possível, assim, trabalhar com sistemas ternários que apresentam maior estabilidade (LOPEZ-FERREÑO et. al., 2013).

Devido a larga faixa de temperatura para trabalhabilidade das ligas, e alcançar as mesmas propriedades mecânicas com os mesmos tratamentos térmicos repetidas vezes, apresenta grande dificuldade de definir propriedades mecânicas para estas ligas com uma aplicação efetiva. Porém, têm-se encontrado em alguns estudos que cabos que exigem esforço através de cargas axiais apresentam resultados otimistas, e que as ligas CuAlBe exibe características promissoras para aplicações que exigem força e resistência significativas (BELTRAN et. al., 2011).

Para redução da temperatura de transformação de fase, reduzir o tamanho de grão e em alguns casos estabilizar a fase β , podem ser adicionados elementos de liga, elementos ternários, nos sistemas binários Cu-Al, tais como Ni, Zn, Be, Mn e Cr, além do emprego de técnicas de solidificação rápida (ERGEN et. al., 2013). Sabendo-se que alguns destes elementos podem afetar o comportamento das ligas EMF e a sua pseudoelasticidade (ZELLER & GNAUK, 2006).

2.4 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Qualquer que seja o projeto mecânico ou de construção civil, é indispensável unir peças. A engenharia mecânica oferece o estudo dos elementos de máquina, de modo a possibilitar o conhecimento do material indicado para a força que será exercida sobre a peça até sua forma final.

Os elementos de fixação têm como função unir duas ou mais peças de forma fixa ou móvel nos projetos mecânicos. Cada elemento é destinado a uma aplicação e função distinta, seja este a fixação permanente ou a possibilidade de rotação em torno de um eixo.

Os elementos de fixação móvel, podem ser inseridos e retirados sem que haja prejuízo na peça, como exemplo os parafusos. Já os elementos de fixação permanente após fixados não terão uso posterior, pois após a sua retirada perdem a função inicial, como exemplo os rebites.

Dentre os principais tipos de junções ou uniões podemos citar: soldas, rebites, parafusos, pinos, cavilhas, porcas, arruelas, chavetas, entre outros (FRANCESCHI & ANTONELLO, 2014).

2.5 REBITES

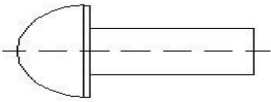
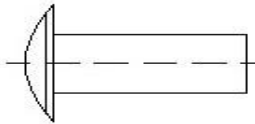
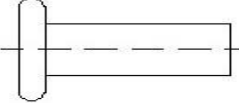
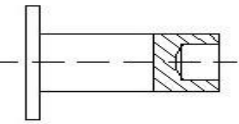
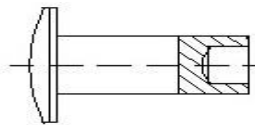
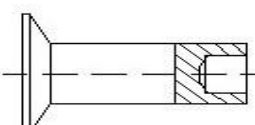
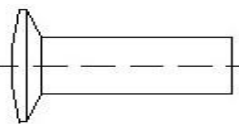
Rebites são peças ou pinos metálicos de corpo cilíndrico, que possuem uma cabeça usinada na fabricação, podendo variar seu formato de acordo com a aplicação, o diâmetro da cabeça é maior que o do corpo e é conhecida como cabeça de fábrica. A outra cabeça é formada no momento da rebitagem, que ocorre de forma manual ou mecanizada (SUZANO, 2011; ALBUQUERQUE, 1980).

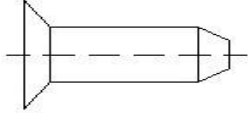
A norma ABNT NBR 9580 normaliza as condições para fabricação e ensaios que devem ser realizados para os rebites, além dos tipos e modelos. Os utilizados na aviação obedecem as especificações da AN (Army, Navy) ou a MS (Military Specification) (SUZANO, 2011).

Os rebites são usualmente indicados pelo formato da cabeça, e especificado pela medida do diâmetro, pelo comprimento do corpo e também pelo tipo de cabeça. Podem ser divididos também, como rebites sólidos e tubulares, os últimos são indicados a aplicações em junções de difícil acesso, para isto a cabeça abaulada é normalmente adquirida por expansão da ferramenta (PIRES et. al, 1980). Na tabela 2.1 podemos verificar os tipos mais utilizados segundo a norma ABNT NBR 9580.

Indica-se na maioria dos casos, escolher o material para fabricação do rebite com base no material a ser rebitado com a motivação de se obter a mesma resistência mecânica e evitar corrosão (SUZANO, 2011). Como característica principal para os materiais empregados na fabricação do rebite é a maleabilidade, podemos citar: aço ao carbono, cobre e o alumínio e suas ligas (ALBUQUERQUE, 1980).

Tabela 2.1: Tipos, denominações e aplicações dos rebites.

Modelo Rebite	Nomenclatura	Aplicação
	Rebite com cabeça redonda	Construções de recipientes de pressão e juntas estanques. Sujeitas a esforços axiais nos rebites.
	Rebite com cabeça abaulada	Estruturas metálicas em geral, não sujeitas a esforços axiais nos rebites.
	Rebite com cabeça cilíndrica	Estruturas metálicas em geral.
	Rebite com cabeça plana e haste semitubular	Estruturas metálicas em geral.
	Rebite com cabeça boleada plana e haste semitubular	Geralmente são estanques e possuem menor resistência ao cisalhamento.
	Rebite com cabeça escareada plana e haste semitubular	Geralmente são estanques e possuem menor resistência ao cisalhamento
	Rebite com cabeça abaulada ou escareada	Construção naval e aeronáutica. Sensibiliza as chapas que uni.

	Rebite com cabeça chata ou escareada e ponta da haste cônica	Construção naval e aeronáutica. Sensibiliza as chapas que uni.
---	--	--

Fonte: Modificado ABNT NBR 9580; ALBUQUERQUE, 1980.

O diâmetro d e o comprimento l são as dimensões principais dos rebites. O diâmetro é obtido através de fórmulas, porém o diâmetro obtido é o rebite após a rebitagem e este preenche todo o furo da peça pelo efeito de recalque resultante do rebitamento. Este efeito gera um erro, devido o furo das peças possuírem 1mm a mais que o diâmetro do rebite afim de facilitar a sua introdução. Enquanto que o comprimento é calculado baseando-se na espessura das peças, além de um comprimento restante para formar a segunda cabeça (PARETO, 2003). Para o cálculo do comprimento necessário, têm-se:

$$l = \Sigma_e + yd \quad \text{Equação 2.1}$$

Σ_e : soma das espessuras das peças

d : o diâmetro do rebite

y : constante determinada pelo formato da cabeça do rebite

Devido as dificuldades de acesso aos dois lados da estrutura a ser rebitado, existem rebites especiais que auxiliam na rebitagem dos mesmos. Entre as principais dificuldades podemos citar: o lacre de revestimentos, partes de aeronaves, entre outros que impedem o uso de rebites sólidos e para estes casos usam-se os rebites cegos, que permitem a fixação por um só lado e não necessitam de marteladas (SUZANO, 2011). Na tabela 2.2 podemos verificar as duas classes de rebites cravados mecanicamente os não estruturais: rebites de autocravação e rebites Pull-Thru, e os estruturais: rebites de autocravação com quebra da haste, de acordo com SUZANO em 2011.

Tabela 2.2: Classes e tipos de rebites especiais.

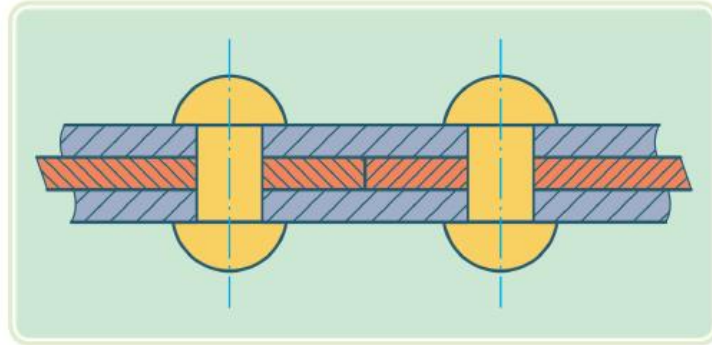
Classes dos Rebites	Nomes dos rebites	Característica
Travados por atrito	Rebite de Autocravação (Cherry)	Composição deve ser a mesmo do material a ser rebitado.
	Rebite Pull-Thru	Cego (oco), expandido mecanicamente.
	Rebite Rivnut (porca)	Com rosca na parte interna.
	Rebites Explosivos	Haste oco preenchida com explosivo e fechada com um composto plástico.
Rebites travados mecanicamente	Rebite Cherry Lock	São fabricados e em três partes
	Rebite Hi-Shear	Não são do tipo cego, necessitam de pino para fixação.
	Rebite Huck-Lock Bolt	Presente na classe dos prendedores, tipo pio com porca travante.
	Rebite Huck-Lock Bolt (cego)	Prendedores cegos tipo porca trava.
	Rebite Hi-Lock (Boeing)	Prendedor na forma de parafuso.
	Prendedores	Podem ser de uso temporário.

Fonte: SUZANO, 2011.

2.5.1 Rebitagem

Os processos de rebitagem podem ser manuais ou mecânicos, a quente ou a frio. As formas usuais de rebitagem são de três formas: por recobrimento como na figura 2.3, recobrimento simples ou duplo (FRANCESCHI & ANTONELLO, 2014).

Figura 2.3: Rebitagem por recobrimento.



Fonte: (FRANCESCHI & ANTONELLO, 2014).

2.5.2 Junções

Os tipos de junções descritas a seguir podem ser feitas por meio de rebite ou de solda:

- 1) Junções de elevada resistência para estruturas de aço;
- 2) Junções estanques de elevada resistência para caldeiraria;
- 3) Junções estanques;
- 4) Junções de responsabilidade de chapas de revestimento.

Para escolha do método é importante avaliar os pontos favoráveis e desfavoráveis de ambos. Na tabela 2.3 apresentamos a relação de cada parte.

Tabela 2.3: Comparação entre o uso de junção por rebite e por solda.

Rebites	Solda
<ul style="list-style-type: none"> • São mais simples; • Apresentam menor custo; • Possibilitam um controle de qualidade mais simples; • Podem ser desfeitas através do corte da cabeça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Junções mais leves; • Largo campo de aplicação; • Redução da resistência do material rebitado é de 10% a 40%, enquanto que para os rebites é de 13% a 42%.

Fonte: NIEMANN, 2006.

2.6 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

O comportamento mecânico de um material é resultante de uma carga aplicada e a deformação que este apresenta a esta aplicação. As propriedades mecânicas são avaliadas por meio de ensaios previamente planejado e que se aproximam ao máximo das forças que este estará submetido quando em uso.

As normas de execução podem ser regidas pela ASTM – American Society for testing and materials ou ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. As principais formas de aplicação deste ensaio são: tração, compressão e cisalhamento (CALLISTER, 2006).

As propriedades mecânicas que podem ser verificadas a partir do ensaio de tração são: módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão máxima, alongamento percentual até a fratura e a porcentagem da redução da área da fratura.

Por módulo de elasticidade entende-se a parte inicial do ensaio de tração, nos metais que se deformam elasticamente, ou seja, após retirada a carga o material retorna ao comprimento anterior a aplicação da carga (SMITH, 2012).

$$E = \frac{\sigma \text{ (tensão)}}{\epsilon \text{ (deformação)}} = \text{GPa} \quad \text{Equação 2.2}$$

E: módulo de elasticidade ou módulo de Young

O estudo da dureza e do módulo de elasticidade pode ser previsto através do ensaio de nanoindentação.

2.7 ENSAIO DE NANOIDENTAÇÃO

O método de medição da dureza e módulo elástico através da nanoindentação foi utilizado inicialmente em 1992, sendo proposto por Oliver-Pharr, e têm sido bastante usado para avaliação do comportamento mecânico dos materiais em pequenas escalas (OLIVER & PHARR, 2003), tornando-se o ensaio padrão para determinar estas características, através das curvas geradas com a impressão de carga e deslocamento. A área de contato é projetada entre o tipo de indentador e o material a ser analisado e estimada com a utilização de equações para

o carregamento e descarregamento do indentedor na área escolhida, de forma uniforme e simétrica (SNEDDON, 1965 apud LI & VLASSAK, 2009).

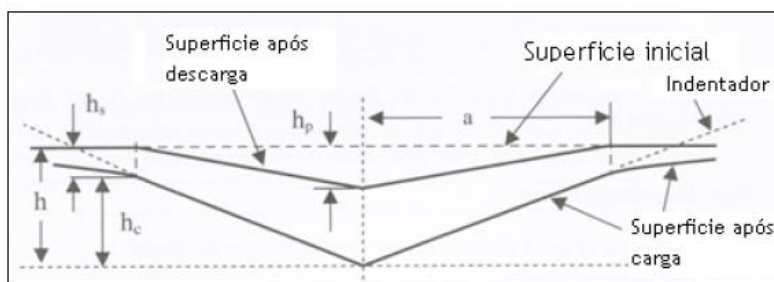
Os ensaios de dureza realizados com equipamentos dinâmicos que permitem sua medição e deslocamento paralelamente, apresenta um grande avanço para determinação das propriedades deste ensaio, além de medir profundidades de indentação de alguns nanômetros. Através destas medições é possível construir curvas de carga-descarga (LOUBET et. al., 1984).

Devido a facilidade na obtenção das propriedades mecânicas por meio de medição da carga e do deslocamento, não havendo necessidade de imagem para análises, este método tem se tornado promissor. O equipamento possui alta resolução e a escala do micrômetro é de 3-5 nanômetros.

O penetrador foi inicialmente projetado para ser afiado e na forma de um cônico de Berkovich, depois criou-se também um penetrador esférico, possui um comportamento inicial puramente elástico, que pode ser usado por uma maior variedade de geometrias (OLIVER & PHARR, 2003), além destes existe também o indentador Vickers, este por sua vez exibe um pequeno desvia geométrico na ponta conhecido como offset, por este motivo exige calibração (ANTUNES, 2006).

Quando a carga é aplicada sobre o material, sob essa amostra a geometria gerada é de acordo com indentador utilizado. A figura 2.4 evidencia os parâmetros e a geometria atingidos com o ensaio.

Figura 2.4: Representação esquemática da geometria da amostra.



Fonte: ANTUNES, 2006.

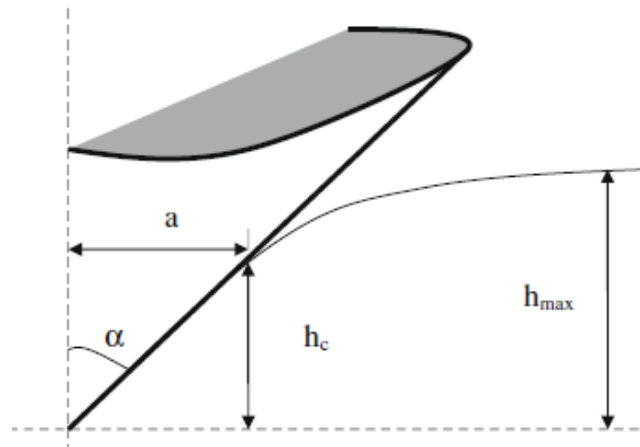
Onde:

- h_c : Profundidade de contato;
- h ou $h_{m\acute{a}x}$: Profundidade da superfície no momento do carregamento;

- h_p : Profundidade da impressão residual.

Na figura 2.5 podemos verificar um esquema do conjunto de dados tipicamente obtidos com um penetrador Berkovich, sem a representação da curva. Onde h é o deslocamento relativo a superfície inicialmente não deformada, e também os três valores mais significativos que são medidos através das curvas P-h: a carga máxima P_{\max} , o deslocamento máximo H_{\max} e o descarregamento elástico S dP/DH .

Figura 2.5: Ilustração da indentação de um penetrador cônico em um sólido elástico.

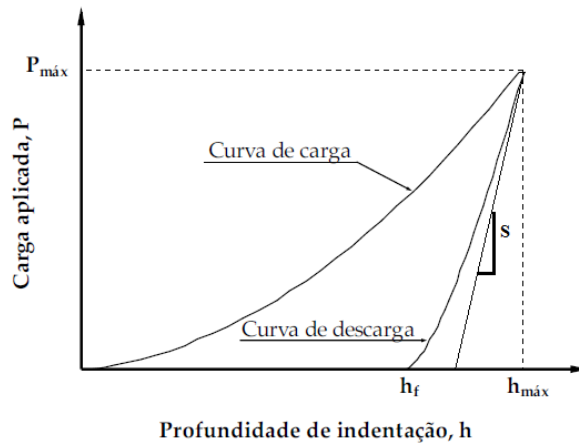


Fonte: POON et. al., 2008

O ensaio se baseia na aplicação de uma determinada carga (P) até que se atinja o valor máximo (P_{\max}), este valor pré estabelecido nas variáveis do programa, essa carga permanece por um tempo até sua acomodação, após esse tempo a carga é retirada a posição inicial do penetrador antes da aplicação da carga (FRANÇA, 2013), uma marca é deixada na superfície da amostra (CHARLEUX et. al., 2014).

Este ensaio permite determinar não apenas a dureza, mas também prever o módulo de elasticidade E , este valor é relacionado diretamente com a capacidade a deformação plástica relativa a carga aplicada. Na figura 2.6 podemos identificar um exemplo da curva carga-descarga.

Figura 2.6: Curva carga-descarga obtida em um ensaio dinâmico de dureza.



Fonte: Modificado de ANTUNES, 2006.

Para o carregamento, carga P , verifica-se tanto a deformação elástica quanto a plástica. Já para o descarregamento apenas a deformação elástica é recuperada, este ensaio não é indicado para materiais que invertem sua plasticidade durante o descarregamento. OLIVER-PHARR (2003) propões a análise de dados do ensaio de ultramicrodureza, onde inicialmente faz-se o ajuste da curva de descarregamento, através da equação que segue:

$$P = \alpha (h - h_f)^m \tag{Equação 2.3}$$

- P – carga de recuo;
- α e m – parâmetros determinados empiricamente;
- h – deslocamento do penetrador;
- h_f - deslocamento final do penetrador.

A partir da curva de carga-descarga, podemos obter a rigidez do descarregamento a uma profundidade máxima $h_{máx} = h$.

$$S = \frac{dP}{dH}(h=h_{máx}) = m\alpha (h_{máx} - h_f)^{m-1} \tag{Equação 2.4}$$

Com os valores de carga deslocamento pode-se calcular a profundidade de contato, com a relação:

$$h_c = h_{máx} - \frac{\epsilon P_{máx}}{S} \tag{Equação 2.5}$$

$P_{\text{máx}}$: carga máxima do ensaio;

ε : constante que se refere ao tipo de indentador (indentador Vickers 0,72)

A área projetada é apresentada em função da profundidade de contato h_c :

$$A = f(h_c) \quad \text{Equação 2.6}$$

Esta função relaciona a área da seção transversal do penetrador à distância, d , da sua ponta. A dureza H e o módulo de elástico efetivo E_{eff} podem ser calculados através de relações apresentadas por PHARR (1998):

$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \frac{2}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 2.8}$$

β : constante que depende da geometria do penetrador

O módulo efetivo refere-se ao fato de que a deformação elástica acontece na amostra e no penetrador (CALUÊTE, 2016), assim:

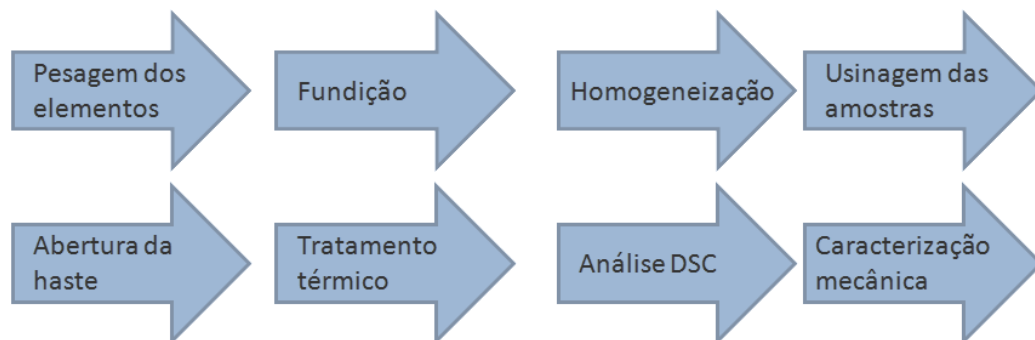
$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad \text{Equação 2.9}$$

Os termos ν e ν_i se referem ao coeficiente de Poisson da amostra e do indentador, respectivamente, enquanto o E_i é o módulo de Young do indentador.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO



Inicialmente foi escolhida a liga a ser trabalhada, com base em trabalhos anteriores. Em seguida os elementos foram pesados e fundidos em um forno de indução com cadinho de grafite. Os lingotes resultantes da fundição foram homogeneizados em forno tipo MUFLA da JUNG à 850°C por 12 horas. Uma amostra foi submetida ao tratamento térmico de têmpera, que baseia-se no aquecimento da liga até a temperatura de 850°C, por 30 min, e resfriamento brusco em água a temperatura ambiente para adquirir o efeito memória de forma. Posteriormente, realizou-se análise varredura, DSC, na amostra, para verificação das temperaturas de transformação de fase.

Logo após a homogeneização, foram confeccionados os rebites através da usinagem do lingote por torneamento, em torno ROMI 20s, e eletro-erosão. Foi confeccionada uma peça para abertura das hastes dos rebites. Após a usinagem dos rebites, estes foram aquecidos juntamente com a peça, um de cada vez, para que suas hastes fossem abertas no ângulo de 8,5° desejado a sua memória de forma. Após o aquecimento a peça foi retirada do forno e colocada sobre a morsa ou torno de bancada, com o auxílio de uma alicate, em seguida foram aplicados com o auxílio de uma peça sólida de aço batidas para encaixe da peça, após a abertura das hastes os rebites foram temperados. Porém, devido ao tamanho da peça e dos rebites surgiram algumas dificuldades que levaram a abrir as hastes de forma manual com o uso da força. Foram analisados por DSC.

Com o rebite memória de forma pronto, estes foram resfriados com Nitrogênio líquido e as hastes fechadas com alicate para inserção do rebite nas chapas. Em seguida, foram realizadas as caracterização mecânicas convenientes na cabeça do rebite: ultramicrodureza e dureza Rockwell, e no rebite inserido nas chapas: cisalhamento e arrancamento.

Para comparação foram realizados ensaios de cisalhamento e arrancamento em rebites de alumínio de modelo repuxo com mesmo diâmetro do rebite com memória de forma.

3.2 FUNDIÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO

Para a fundição, os elementos foram pesados e em seguida foram fundidos em cadinho de grafite no forno tipo mufla a 1250°C, até que todos seus elementos fossem fundidos.

No processo de fundição, podem ser adicionados elementos de liga no metal líquido com a finalidade de obter ligas com diferentes composições. Após o metal está completamente líquido, são removidas as impurezas e o metal líquido é vazado em um molde com a forma do produto final, posteriormente sendo necessário operações de usinagem para obtenção do produto final. Após a fundição a liga foi homogeneizada por 12h a 850°C em forno tipo MUFLA. Na figura 3.1 a seguir visualizamos um exemplo de lingote após a fundição.

Figura 3.1: Lingote da liga Cu-Al-Be-Cr.



3.3 USINAGEM DAS AMOSTRAS E ABERTURA DAS HASTES

A usinagem trata-se de operações utilizadas com o intuito de conferir a peça a forma, as dimensões ou o acabamento desejado. O lingote foi usinado através de processo mecânico

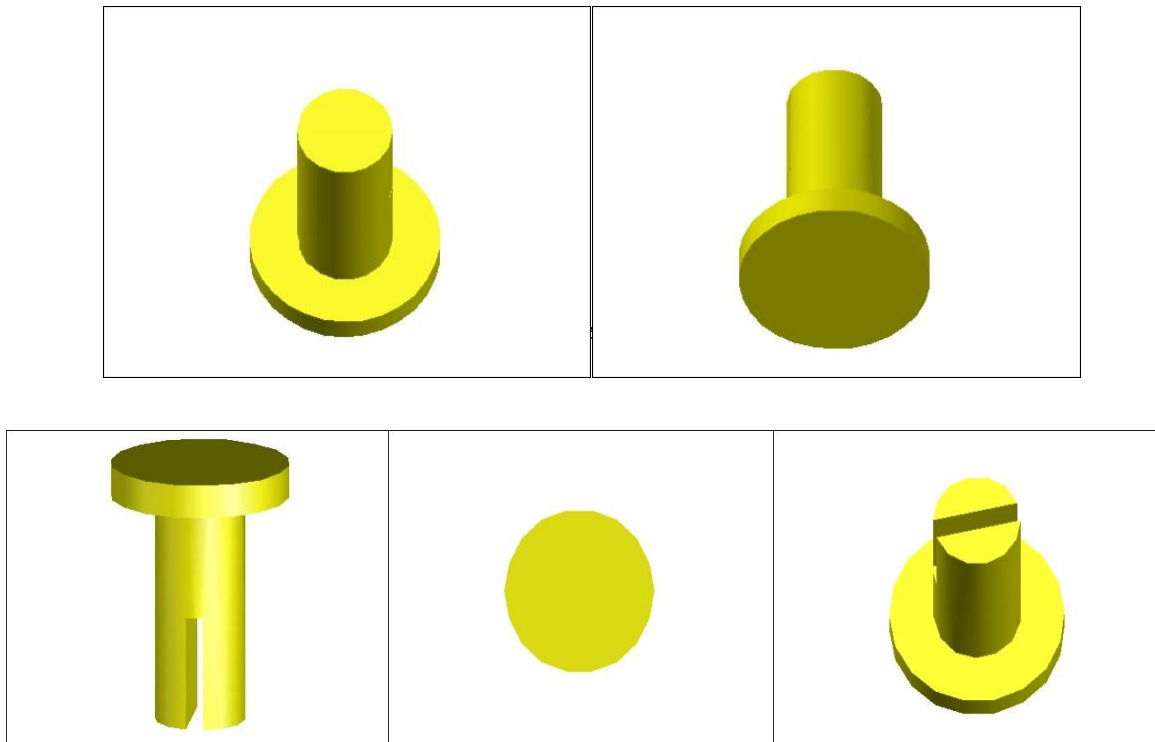
em um torno mecânico na máquina Romi 20S, onde foram ajustadas o tamanho preciso de cada curva do rebite. Podemos visualizar na Figura 3.2 a máquina Romi 20S.

Figura 3.2: Torno mecânico Romi 20S.



Nas 3.3 e 3.4 temos a imagem do projeto inicial do rebite, confeccionado por meio do software específico para projeto AutoCad. O corte da haste do rebite, como podemos visualizar, foi feita através de outro processo descrito logo mais, o torneamento nos forneceu um rebite maciço.

Figura 3.3: Projeto mecânico do rebite maciço a ser obtido.



Para a abertura das hastes, foi desenvolvida uma peça específica na oficina da própria instituição, com as medidas do rebite pronto, afim de que o mesmo após usinado fosse colocado na peça para posterior rebitagem. O corte da haste foi realizada através da do processo de usinagem de eletro-erosão a fio, em uma máquina de corte do modelo ELETROCUT AR 1300.

3.4 ANÁLISE TÉRMICA: CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

As temperaturas de transformação de fase foi estabelecida por meio da Calorimetria Diferencial de Varredura, utilizando o equipamento DSC 60 da SHIMADZU e com o reforço do software TA-60. Foi retirado uma amostra da região central do lingote e utilizada uma taxa de 10°C/min. Ensaio realizado sob atmosfera de nitrogênio.

3.5 TAMANHO DE GRÃO: MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)

Devido suas variáveis para análise serem de manejo fácil e preciso, é necessário atenção na preparação das amostras para que estas não causem prejuízo as imagens. Dentre os cuidados na preparação podemos citar a planicidade da amostra, o arredondamento dos cantos e a superfície da amostra no polimento. Como verifica-se na figura 3.5 o exemplo da amostra de Cu-11,8%-Al-0,58%-Be-0,3%-Cr, a amostra utilizada foi a cabeça do rebite após a quebra da haste, embutida com resina baquelite, lixada com o auxílio de lixas (150, 280,320, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 2000), polida e após sofrer ataque químico com uma solução aquosa de Cloreto de Ferro a 10% para visualização dos contornos de grão. Durante o ataque a amostra foi submersa durante 5s.

Figura 3.5: Fotografia das amostras de Cu Al Be Cr após tratamento metalográfico.



3.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

As fases foram identificadas por difração de raios X, através do difratômetro SIEMENS D5000. Utilizou-se uma radiação Cu-K α com comprimento de onda de $\lambda=1,54184$ Å. A faixa de análise foi de $25^\circ < 2\theta < 90^\circ$, com a taxa de aquisição de dados de $0,02^\circ/4s$.

3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A inserção do rebite foi feita manualmente através do resfriamento com nitrogênio líquido. Foi colocado em um recipiente com aproximadamente 200mL de nitrogênio líquido, em seguida adicionamos o rebite no recipiente, após o resfriamento com o auxílio de um alicate as hastes foram fechadas e o rebite inserido nas chapas, uma depois outra, para realização dos ensaios de cisalhamento e arrancamento. Nas figuras 3.6 e 3.7 podemos visualizar a inserção do rebite.

Figura 3.6: Inserção do rebite com memória de forma na primeira chapa.

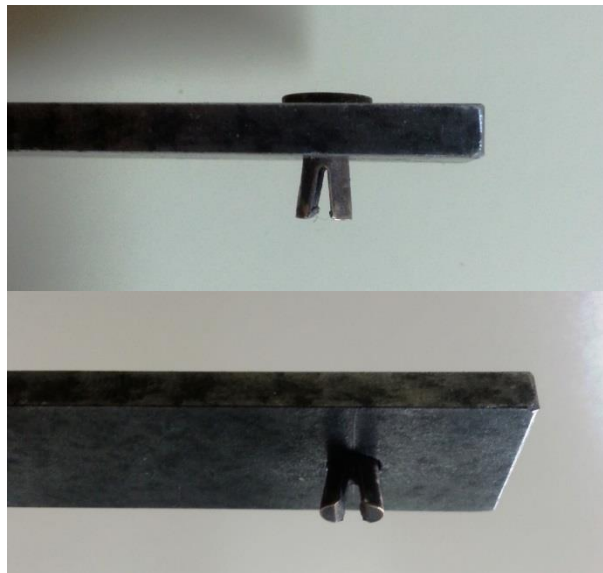
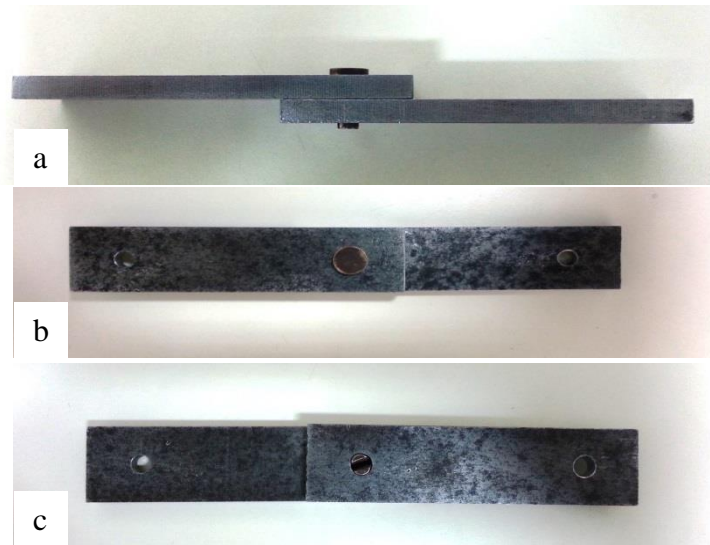


Figura 3.7: a) Rebite fixado na chapa para ensaio de cisalhamento; 3. b) Cabeça do rebite fixado na chapa; 3. c) Haste do rebite fixado nas chapa antes do ensaio.



3.7.1 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio baseia-se na profundidade de penetração do indentador, reduzindo a recuperação elástica ocasionada com a retirada da carga maior e da penetração da carga menor. Utilizamos o penetrador tipo cone de diamante com 120° de conicidade. O resultado obtido do ensaio gera um valor adimensional. Escala utilizada na tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Escala de Dureza Rockwell utilizada no ensaio.

Símbolo da escala	Penetrador	Carga maior (kgf)	Cor da escala
A	Diamante	60	Preta

3.7.2 Ensaio de Cisalhamento

A avaliação da resistência mecânica do rebite foi realizada através do ensaio de cisalhamento. O ensaio foi realizado na máquina de tração universal na e em triplicata, obtendo-se deste modo a resistência ao cisalhamento média dos rebites comerciais de alumínio e o rebite desenvolvido. A taxa de carregamento utilizada foi de 0,5mm/min. A norma determina que seja realizado o ensaio de cisalhamento nos rebites, mas não normatiza

o método de realização do ensaio. Na figura 3.8 visualiza-se o ensaio de cisalhamento realizado no rebite com memória de forma.

Figura 3.8: Ensaio de cisalhamento do rebite com memória de forma.



3.7.3 Ensaio de Arrancamento

Na figura 3.9 visualizamos as garras adaptadas para ensaio de arrancamento, na figura 3.10 as chapas rebitadas para encaixe nas garras e em 3.12 a garra após montagem na máquina do ensaio.

Figura 3.9: Garra para ensaio de arrancamento.



Figura 3.10: Chapas rebitada com rebite de alumínio, para ensaio de arrancamento.



Figura 3.11: Chapas rebitada encaixada em uma das partes da garra.

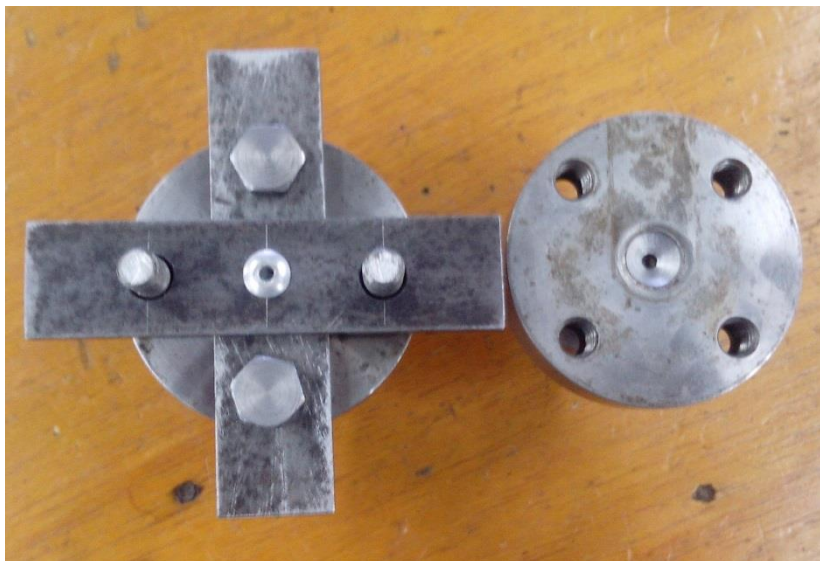


Figura 3.12: Ensaio de arrancamento.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REBITES: USINAGEM E ABERTURA DAS HASTES

Nas imagens a seguir, podemos verificar o rebite maciço após usinagem na figura 4.1, a peça para abertura da haste sem o complemento na figura 4.2, a peça para abertura da haste com o complemento na figura 4.3, rebite após o corte na figura 4.4 e o rebite com as hastes abertas 4.5.

Figura 4.1: Rebite maciço após o torneamento do lingote.



Figura 4.2: Peça para abertura da haste, sem o complemento.



Figura 4.3: Peça para abertura da haste com complemento.



Figura 4.4: Rebite após o corte por eletroerosão.



Figura 4.5: Rebite após a abertura da haste para posterior tempera.



4.2 ANÁLISE TÉRMICA: CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

No gráfico 4.1 e tabela 4.1, a seguir verifica-se as temperaturas de transformação de fases da liga Cu Al Be Cr.

Gráfico 4.1: Fotografia das amostras de Cu Al Be Cr após tratamento metalográfico.

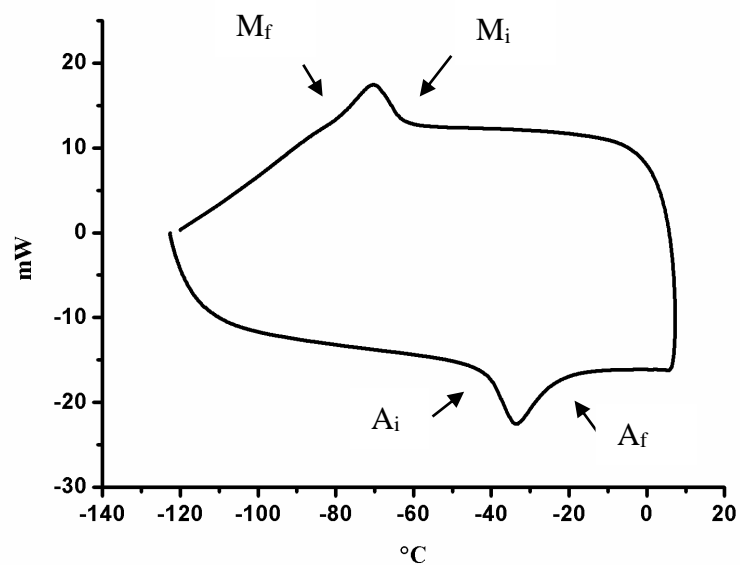


Tabela 4.1: Temperatura de transformação de fase da liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr.

Liga	Ai	Af	Mi	Mf
Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr	-41,5°C	-20°C	-77,8°C	-62,3°C

4.3 VERIFICAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO

As figuras 4.6 e 4.7 a seguir, apresentam a caracterização microestrutural por microscopia ótica para medição do tamanho de grão da liga Cu Al Be Cr.

Figura 4.6: Fotomicrografia da liga Cu Al Be Cr (% em peso), com aumento de 5000x.

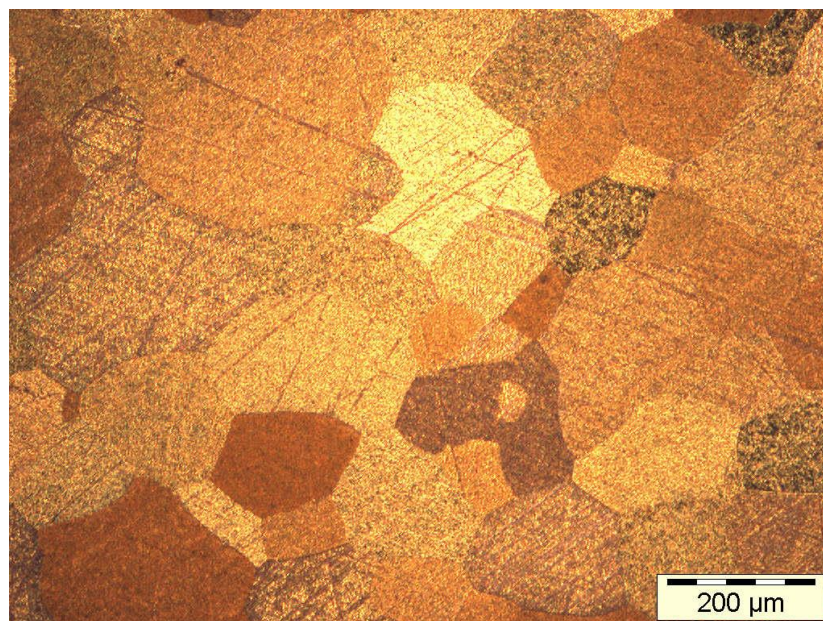
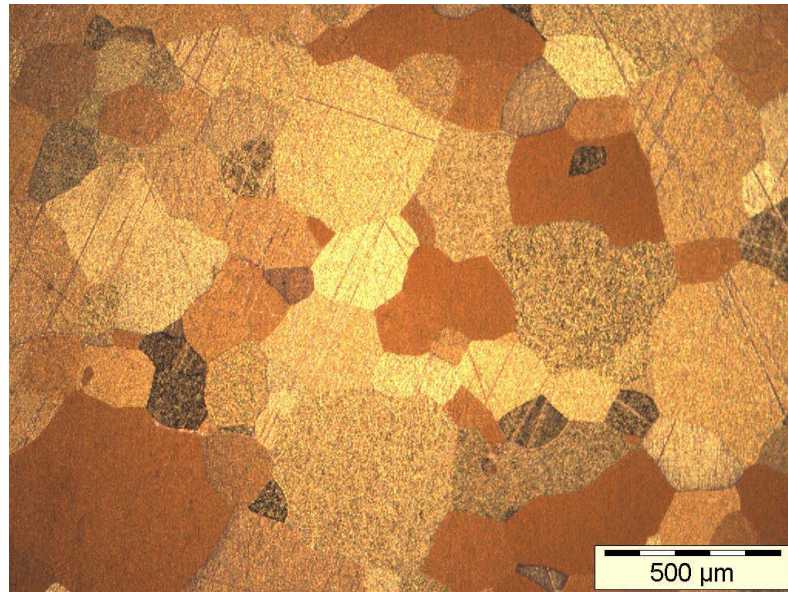


Figura 4.7: Fotomicrografia da liga Cu Al Be Cr (% em peso), com aumento de 10000x.

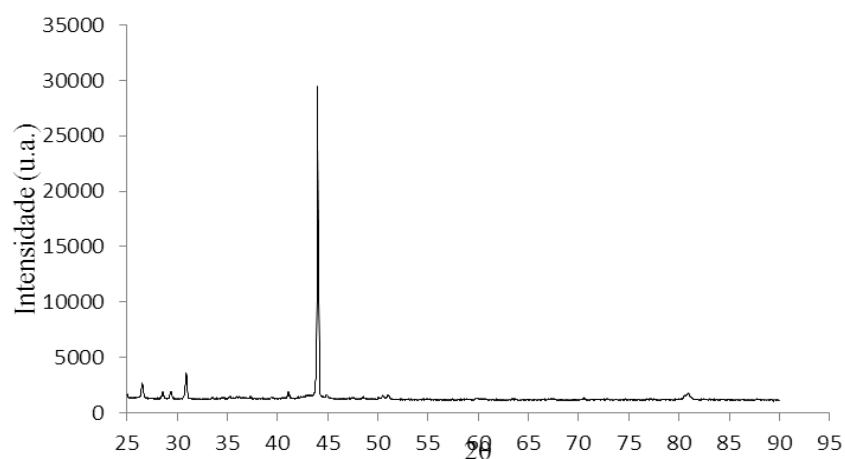


O resultado da análise evidenciou um tamanho médio de grão de 200 μm , porém este resultado apresentou um tamanho de grão maior que em estudos anteriores que apresentavam fase martensítica a temperatura ambiente como CÂNDIDO em 2010, enquanto esta liga apresenta fase austenítica a temperatura ambiente.

4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

No gráfico 4.2 verificamos o difratograma da liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr que é semelhante aos difratogramas obtidos por RODRIGUEZ et. al. em 2006, que exibe os picos característicos da fase β da austenítica.

Gráfico 4.2: Difratograma da liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr.



4.5 OBTENÇÕES DA DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE NOS ENSAIOS DE CARGA-DESCARGA SEM CICLAGEM COM USO DE PENETRADOR VICKERS

Para cada carga foram realizadas 5 indentações, nos gráficos 4.3 e 4.4 podemos visualizar as curvas para o ensaio de carga e descarga sem ciclagem, para as cargas de 100mN, 250mN, 500mN, 750mN, 1000mN e 2000mN, e a variação do módulo de elasticidade em função da carga.

Gráfico 4.3: Curvas carga-descarga sem ciclagem.

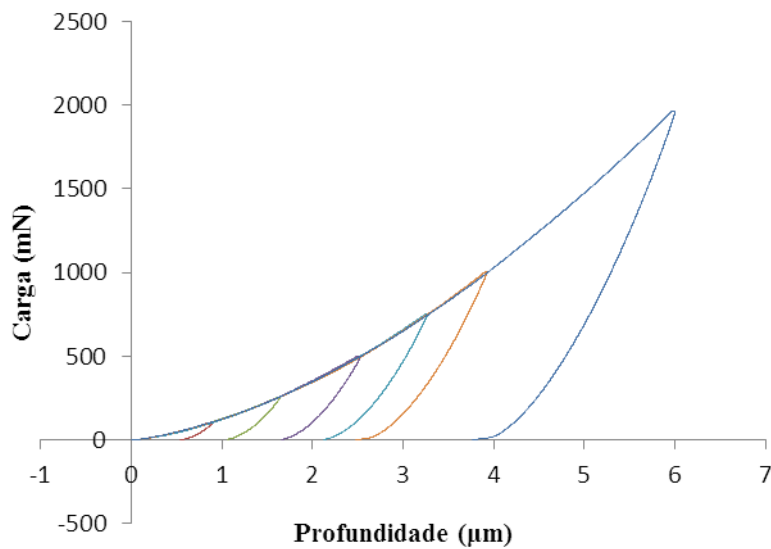
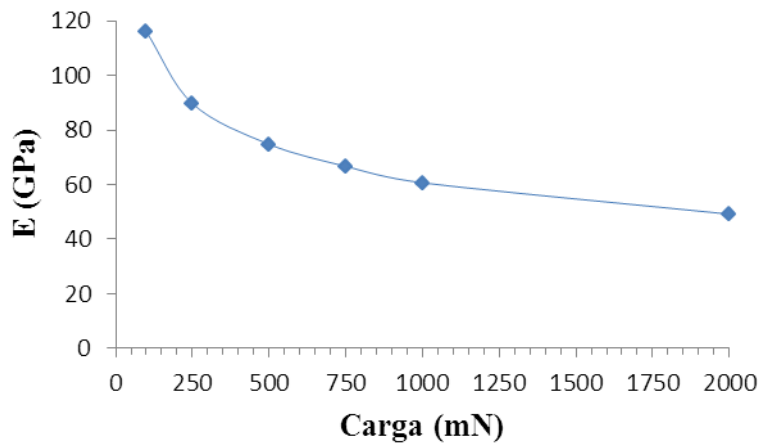


Gráfico 4.4: Variação do módulo de elasticidade em função da carga.



A partir destes gráficos foi possível verificar a variação do módulo de elasticidade do material em função da carga aplicada, e que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da carga. O módulo de elasticidade está associado a transformação martensítica, pois o aumento da carga induz a formação de martensita, de forma que os valores do módulo tendem a reduzir e o módulo de elasticidade é maior para a fase austenítica. Percebe-se também que entre as cargas de 1000mN e 2000mN a variação do valor do módulo de elasticidade é pequena, indicando assim que o resultado obtido é da martensita totalmente induzida por tensão.

Para a liga em estudo analisou-se também a variação da dureza em função das cargas aplicadas como visto no gráfico 4.5, e a variação do módulo de elasticidade em função da profundidade no gráfico 4.6.

Gráfico 4.5: Variação da dureza em função da carga.

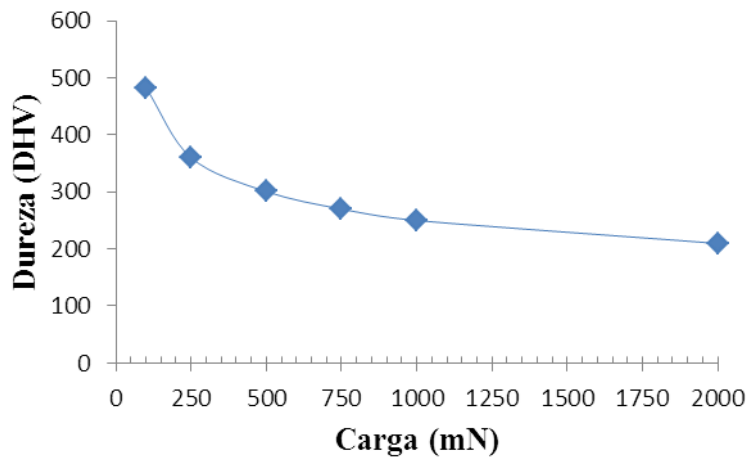
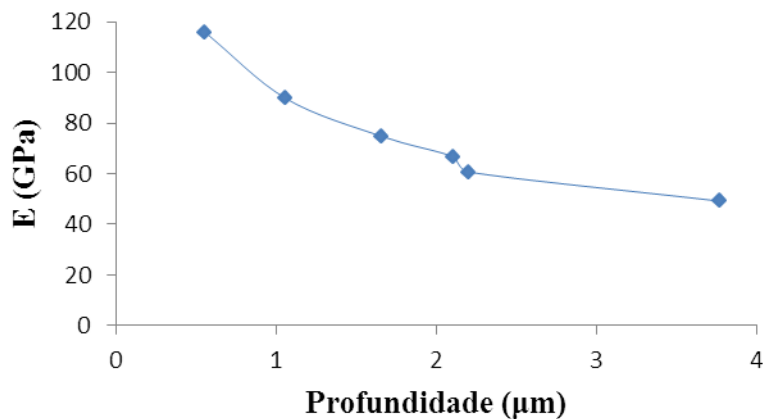


Gráfico 4.6: Variação do módulo de elasticidade em função da profundidade.

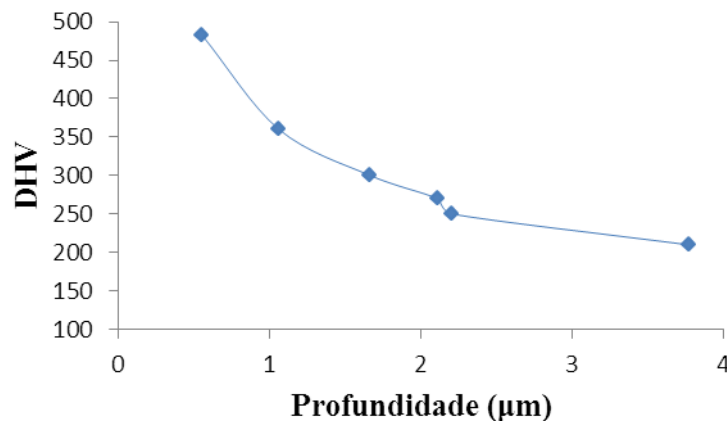


Com o aumento da carga aplicada reduz o valor da dureza, gráfico 4.5, e uma pequena variação dos valores de dureza referentes as cargas de 1000mN e 2000mN, conforme o módulo de elasticidade, indicando que o valor encontrado refere-se a fase martensítica resultante da transformação por deformação da fase austenítica, assim como FRANÇA em 2013.

Verifica-se também que a austenita possui módulo de elasticidade maior que o da martensita, deste modo a martensita aponta uma maior profundidade de penetração se comparada a fase austenítica (CALUÊTE, 2016). Entende-se assim, que a fase austenítica apresenta resistência a deformação plástica maior do que a fase martensítica.

Similarmente no gráfico 4.7, analisa-se a profundidade obtida na indentação em função da dureza.

Gráfico 4.7: Variação da dureza em função da profundidade.



Nos valores de dureza maior, onde indica-se a presença da fase austenítica a profundidade de indentação atinge valores menores, e aumentam com o aumento da carga aplicada e o aparecimento da fase martensita induzida por tensão.

Após as indentações realizadas na velocidade de 13,1mN/sec para o ensaio de carga e descarga sem ciclagem, foram realizadas novas indentações para o ensaio carga descarga com velocidades 10 vezes menor (1,31mN/sec) e 5 vezes maior (71,3mN/sec), o planejamento seria aplicar a velocidade 10 vezes maior, porém o menor speed (degrau preenchido para designação da velocidade) permitido é 1 e com este obtivemos a velocidade de 70,07mN/sec. Para a velocidade 10 vezes menor foram realizadas cinco indentações para cada carga de 100mN, 250 mN, 500 mN, 750 mN, 1000 mN e 2000 mN, enquanto que na velocidade 5

vezes maior não foi possível realizar a indentação com a carga de 100mN, devido as condições de aplicação do teste. Verifiquemos os gráficos 4.7 e 4.8 de carga e descarga com variação das velocidades de indentação.

Gráfico 4.8: Curvas carga e descarga sem ciclagem com velocidade de indentação 10 vezes menor.

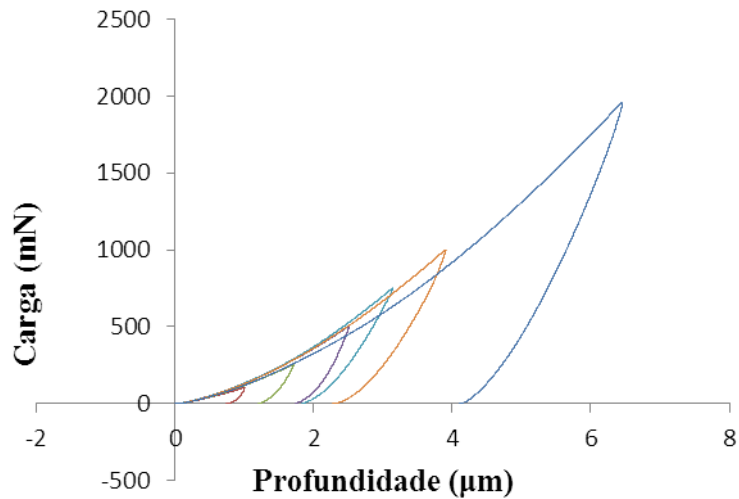
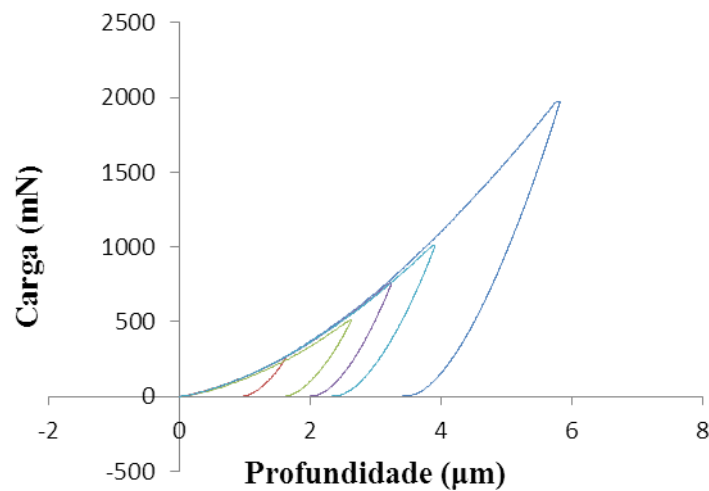


Gráfico 4.9: Curvas carga e descarga sem ciclagem com velocidade de indentação 5 vezes maior.

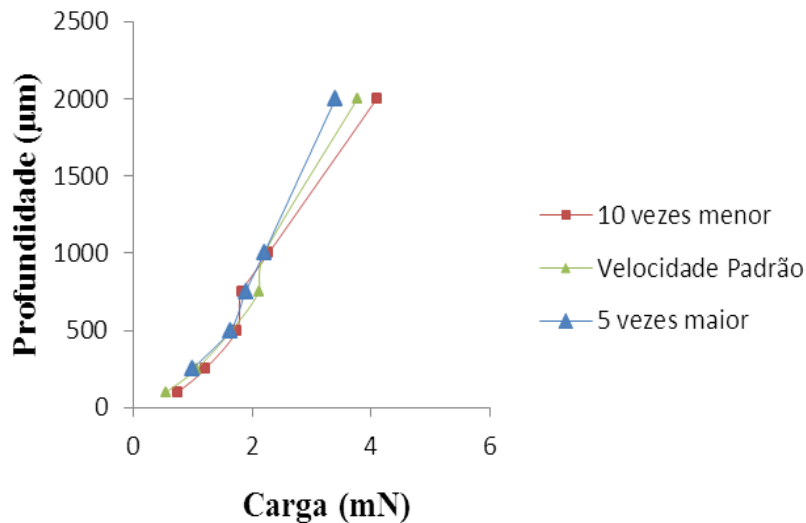


Na tabela 4.2 estão distribuídos o h_f para cada carga nas condições de velocidade descritas anteriormente, em seguida o gráfico 4.10 com as curvas das profundidades com variação de velocidade de indentação em função da carga aplicada.

Tabela 4.2: Curvas carga e descarga sem ciclagem com velocidade de indentação 5 vezes maior.

Carga \ hf	Velocidade 10x menor	Velocidade Padrão	Velocidade 5x maior
100	0,7523	0,5571	_____
250	1,2092	1,0634	0,9901
500	1,7424	1,6534	1,6334
750	1,8231	2,1100	1,8900
1000	2,2787	2,207	2,2010
2000	4,0985	3,7717	3,4046

Gráfico 4.10: Variação da velocidade de indentação, profundidade versus carga.



Verifica-se através dos três gráficos uma sensível diminuição do h_f com o aumento da velocidade, enquanto que com a redução da velocidade obtivemos um h_f maior.

As variações de velocidade de indentações apresentaram uma pequena variação na profundidade. Percebendo-se que com a diminuição da velocidade a profundidade de indentação foi sensivelmente maior que com a velocidade de indentação maior, entendendo-se que a redução da velocidade pode provocar a formação de martensita induzida por tensão, visto que quanto maior a profundidade maior a presença de martensita.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 é possível verificar a o detalhe da indentação das cargas de 100mN e 2000mN respectivamente, ambas obtidas através do microscópio ótico.

Figura 4.8: Fotomicroscopia das amostras submetidas a carga de 100mN.

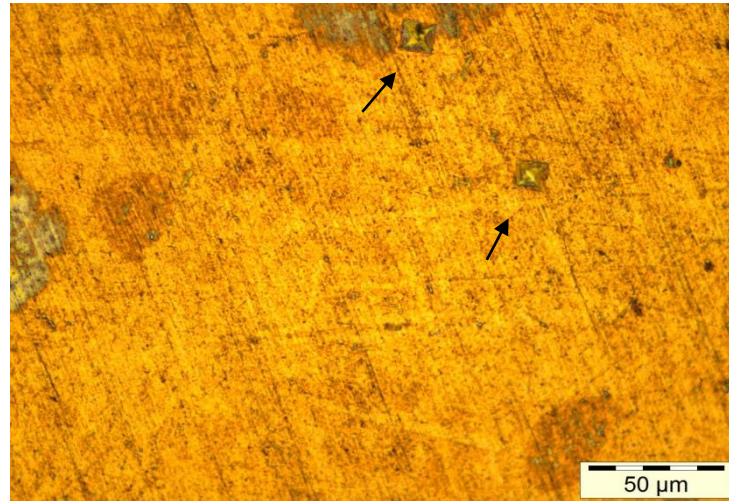
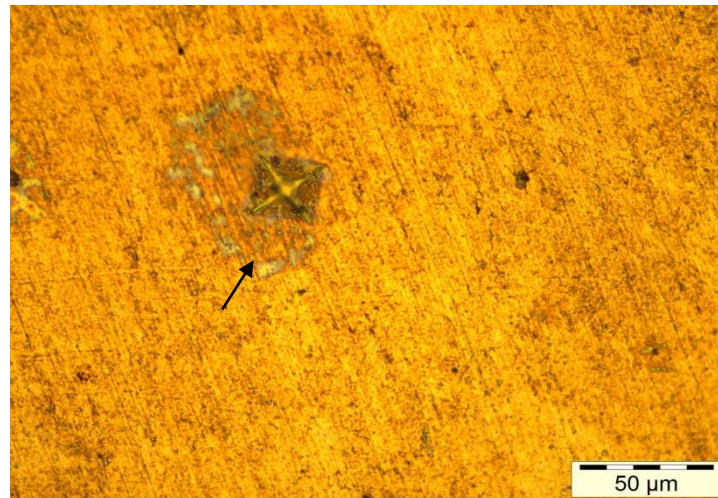


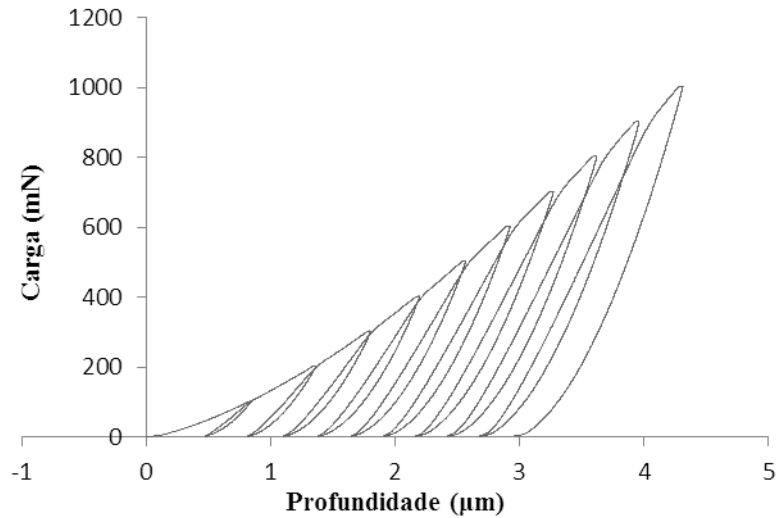
Figura 4.9: Fotomicroscopia das amostras submetidas a carga de 2000mN.



4.6 OBTENÇÃO DA DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE NOS ENSAIOS DE CARGA E DESCARGA COM CICLAGEM COM USO DE PENETRADOR VICKERS

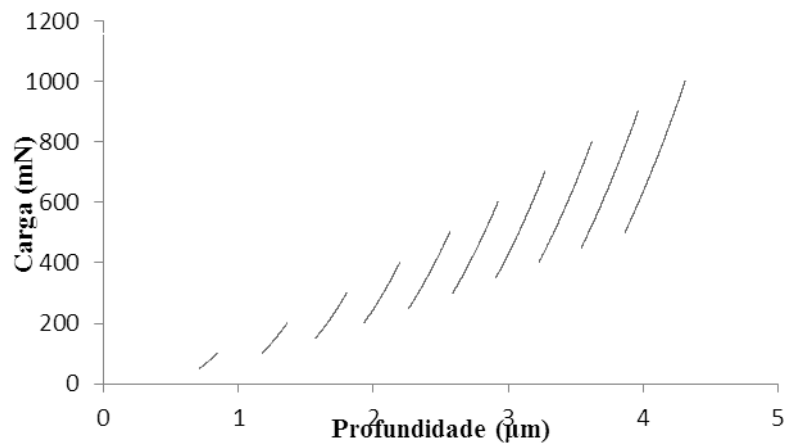
Corpos de prova foram submetidos a ciclagem carga-descarga com o intuito de obter o módulo de elasticidade da liga Cu-Al-Be-Cr. O gráfico 4.11 é um modelo da curva obtida no ensaio. Cada ciclo representa a carga e descarga com step de 100 mN.

Gráfico 4.11: Curva obtida através do ensaio de ultramicrodureza carga-descarga com ciclagem.



De acordo com a referência do método realizado por OLIVER & PHARR (1992), as curvas de descarregamento foram analisadas em todos os ciclos com todos os steps aplicados a cada nova indentação. O gráfico 4.12 evidencia o intervalo da curva de descarregamento para o a curva carga-descarga.

Gráfico 4.12: Intervalo inicial da Curva de descarregamento para a curva carga-descarga com ciclagem.



Com a plotagem dos gráficos e visualização das curvas de descarregamento, determinamos o módulo de elasticidade da liga Cu-Al-Be-Cr. Para obtenção dos valores

foram realizadas 5 indentações por amostra, cada indentação gerou milhares de dados que foram organizados em planilhas e através destas obteve-se o valor médio para E(GPa), como detalhado na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3: Valores médios obtidos para o módulo de elasticidade (GPa) a partir dos ensaios de ultramicrodureza tipo carga-descarga com ciclagem.

Carga	Valor Médio da Elasticidade (GPa)
100	123,8912
200	100,1467
300	89,50294
400	82,81779
500	77,44411
600	73,80592
700	70,54539
800	66,78458
900	64,09519
1000	61,07763

A nível de comparação, podemos verificar os valores das cargas aplicadas e o módulo de elasticidade resultante no ensaio de ultramicrodureza carga-descarga sem ciclagem na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores do módulo de elasticidade a partir da aplicação da carga no ensaio sem ciclagem.

Carga	Módulo de Elasticidade (GPa)
100	116,4
250	89,7
500	74,8
750	66,7
1000	60,7
2000	49,2

A diferença efetiva entre os valores resultantes do módulo de elasticidade nos ensaios de carga–descarga com ciclagem e carga-descarga sem ciclagem, é que para o ensaio sem ciclagem, a cada carga é gerado no final da indentação o valor do módulo de elasticidade, enquanto que para o ensaio de carga-descarga com ciclagem são gerados valores aos quais através de uma planilha de dados calcula-se o valor médio do módulo de elasticidade. Os valores descritos nas tabelas 4.2 e 4.3 é possível verificar que mesmo com a alteração das cargas os valores dos módulos de elasticidade são bastante próximos.

Nos ensaios de ultramicrodureza com indentador Vickers, observou-se que os valores das cargas apresentam influência nos valores de dureza, assim nos valores de 100mN obtivemos os maiores valores para a dureza e com a carga maior um menor valor de dureza, comprovando a perspectiva de MONTECINOS et. al. em 2012. Desta forma, como a fase austenítica apresenta um valor de dureza maior que a martensítica, a dureza da liga a temperatura ambiente é de 4,88GPa. Já para a martensita que é induzida através do aumento da carga, na maior carga aplicada de 2000mN a dureza é de 2,45GPa.

O módulo de elasticidade para austenita foi de 116 GPa.

Para os ensaios de carga descarga com ciclagem a dureza apresenta um pequena mudança devido todas as cargas serem aplicadas no mesmo ponto induzindo a formação de martensita.

4.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA: DUREZA ROCKWELL, CISALHAMENTO E ARRANCAMENTO

4.6.1 Ensaio de Dureza Rockwell

Foram realizadas 12 medições para cada amostra e a dureza foi obtida através da média resultante.

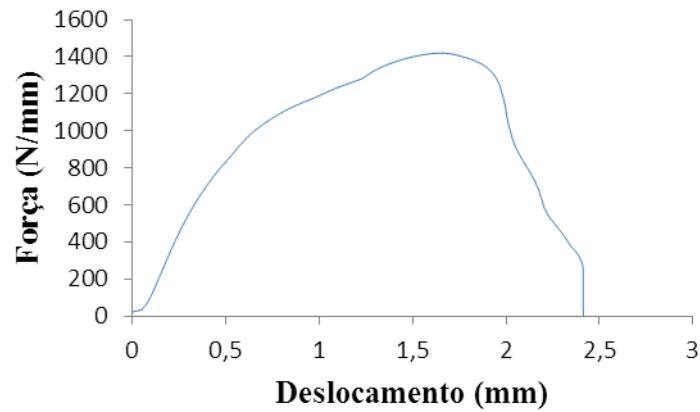
Lingote da liga	Dureza Rockwell (HRA)
Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr	58,1

O ensaio de dureza Rockwell confirma que com a aplicação de cargas maiores resulta em martensita induzida por tensão com valor de 2,36 GPa.

4.6.2 Cisalhamento

Foram realizados três ensaios de cisalhamento para o rebite comercial de alumínio e três repetições para o rebite obtido. Podemos verificar no gráfico 4.13 as curvas para rebite comercial e a tabela 4.5 com valores representativos da força máxima.

Gráfico 4.13: Gráfico de cisalhamento amostra 1, rebite comercial.



Amostras	Carga máx (N/mm)	Tensão de ruptura
Amostra 1	1376,64	217,896
Amostra 2	1291,91	82,08
Amostra 3	1419,63	256,89

Para o rebite com memória de forma segue o gráfico 4.14 e a tabela 4.6 com os valores representativos do ensaio de cisalhamento.

Gráfico 4.14: Gráfico de cisalhamento amostra 1, rebite com memória de forma.

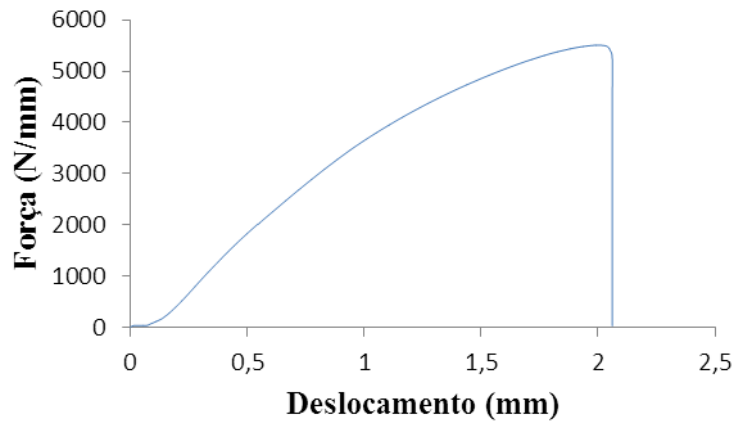
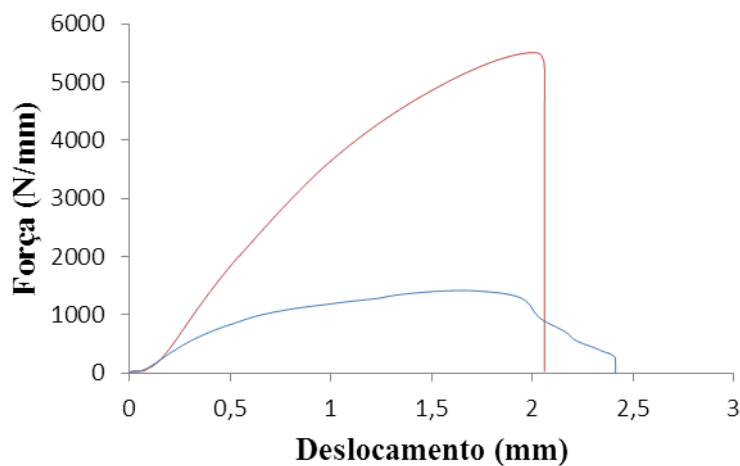


Tabela 4.6: Gráfico de cisalhamento amostra 2, rebite comercial.

Amostras	Carga máx (N/mm)	Tensão de ruptura
Rebite 1	5505,304	5298,65

Comparando-se os dois gráficos e valores da força máxima suportada para cada tipo de rebite, comercial e o rebite fabricado, podemos verificar que o rebite comercial apresenta elevada deformação e suporta uma menor carga em relação ao rebite com memória de forma. No gráfico 4.15 podemos verificar a comparação de ambas as curvas.

Gráfico 4.15: Gráfico comparativo das curvas de cisalhamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma.



Para os ensaios de cisalhamento verificamos que o rebite com memória de forma apresenta uma resistência maior que o rebite de alumínio, enquanto o rebite com memória suportou carga máxima de 5505,3 N/mm e o rebite de alumínio de 1376,6 Nmm.

4.6.3 Arrancamento

Podemos verificar através do gráfico 4.16 as curvas do ensaio de arrancamento nos rebites de alumínio e no rebite com memória de forma, e na tabela 4.5 os valores discriminados de carga máxima suportada.

Gráfico 4.16: Gráfico comparativo das curvas de cisalhamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma.

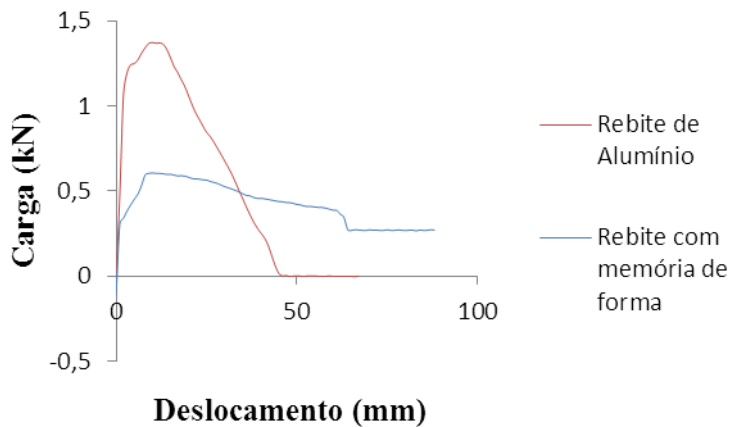
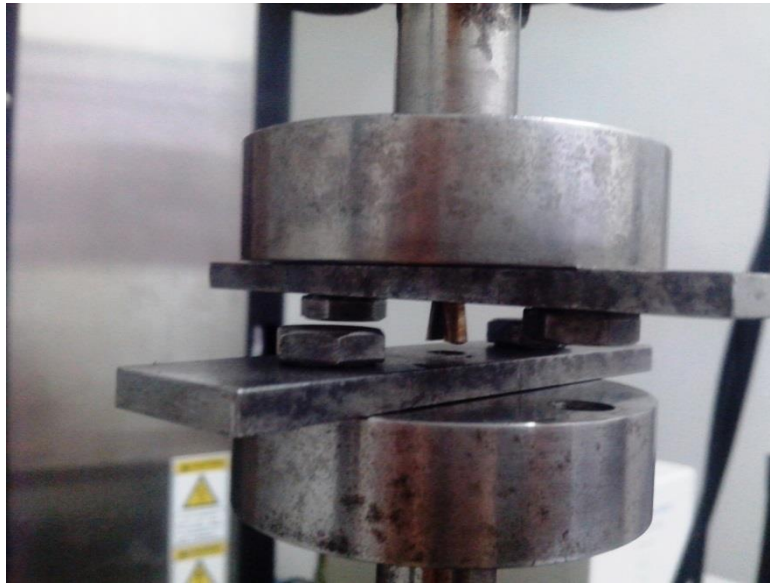


Tabela 4.7: Valores do ensaio de arrancamento.

Amostras	Carga máx (N)
Rebite de alumínio	1372
Rebite com memória de forma	606,12

Na figura 4.10 podemos verificar o rebite com memória de forma logo após a retirada do rebite da segunda chapa.

Figura 4.10: Após o ensaio de arrancamento.



Após o ensaio de arrancamento, verificamos que o rebite não quebrou, o mesmo fechou as hastes e escorregou através da segunda haste, após a retirada da tensão as hastes retornaram a sua posição real na fase austenítica.

Nos ensaios de arrancamento, o rebite de alumínio apresentou uma resistência maior que o rebite com memória de forma, 1372 N e 606,12 N respectivamente. Porém o rebite de alumínio rompeu e a cabeça de oficina foi arrancada, enquanto que o rebite com memória de forma foi retirado e permaneceu intacto, o que é satisfatório tendo em vista que a fase austenítica apresenta resistência a deformação plástica. Deste modo, entende-se que com ajuste do ângulo de abertura das hastes e maior comprimento provavelmente resultarão em uma maior resistência ao arrancamento.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

- A análise DSC demonstra que a liga Cu-11,8% Al-0,58% Be-0,3% Cr encontra-se na fase austenítica a temperatura ambiente;
- Os ensaios de ultramicrodureza com indentador Vickers, apresentou influência nos valores de dureza com a variação de carga aplicada. Resultando em valores maiores de dureza para fase austenítica;
- Observou-se também a influência do ensaio de ultramicrodureza com ciclagem e sem ciclagem, devido a indução de martensita, o que também pôde ser verificado com as variações de velocidade de indentação, e com o ensaio de dureza Rockwell;
- No ensaio de arrancamento verificou-se a excelente resistência ao cisalhamento em relação aos rebites comerciais de alumínio, para o ensaio de arrancamento é necessário o ajuste do ângulo de abertura das hastes do rebite para uma melhor resistência ao arrancamento;
- Através das propriedades mecânicas relevantes apresentada com a caracterização mecânica, do seu comportamento elástico, podemos dizer que a fabricação de rebites com memória de forma é viável e possível para substituição de rebites comerciais, principalmente quando em projetos que apresentam dificuldade de acesso para inserção e a possibilidade de retirada do rebite sem a sua inutilização.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de outros modelos de rebites com memória de forma com base na liga Cu-Al-Be-Cr;
- Desenvolvimento de outros modelos de rebites com memória de forma com substituição do refinador de grão;
- Estudo das curvas de histerese destes rebites.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LAGOUDAS, D. C. Shape Memory Alloys: Modeling and engineering Applications. Ed. Springer. 2008. Texas.

BELTRAN, J. F.; CRUZ, C.; HERRERA, R.; MORONI, O. Shape memory alloys CuAlBe strands subjected to cyclic axial loads. *Engineering Structures*, v. 33, p. 2910-2918, 2011.

ERGEN, S.; UZUN, O.; YILMAZ, F.; KILIÇASLAN, F. M. Shape memory properties and microstructural evolution of rapidly solidified CuAlBe alloys. *Materials Characterization*, v. 80, p. 92-97, 2013.

ZHU, P.; FENG, P.; SUN, Q. P.; WANG, J.; DAI, H. H. Determining the up-Down-up response through tension tests of a pre-twisted shape memory alloy tube. *International Journal of Plasticity*, v. 85, p. 52-76, 2016.

BHADESHIA, H. K. D. H. Martensite in steels. *Materials Science & Metalurgy*, 2002.

MONTECINOS, S.; CUNIDERTI, A.; SIMISON, S. Instrumented indentation of transforming and no-transforming phases in Cu-Al-Be shape-memory alloys. *Intermetallics*, v. 28, p. 58-64, 2012.

TADAYYON, G.; MAZINANI, M.; GUO, Y.; ZEBARJAD, S. M.; TOFAIL, S. A. M.; BIGGS, M.J. The effect of annealing on the mechanical properties and microstructural evolution of Ti-rich NiTi shape memory alloy. *Materials Science & Engineering A*, v. A662, p. 564-577, 2016.

LOPEZ-FERREÑO, I.; BRECZEWSKI, T.; LÓPEZ, G. A.; NÓ, M. L.; JUAN, J. S. Stresse-assisted atomic diffusion in metastable austenite DO₃ phase of Cu-Al-Be shape memory alloys. *Scripta Materialia*, v.124, p. 155-159, 2016.

LOPEZ-FERREÑO, I.; BRECZEWSKI, T.; RUIZ-LARREA. I; LOPEZ-ECHARRIA, A.; NÓ, M. T.; JUAN, J.S. Thermal treatments and transformation behavior of Cu–Al–Be shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier. p. 463-467. 2013.

OLIVEIRA, Dannel. Ferreira. . Determinação das Propriedades Termomecânicas de Ligas Cu-Al-Ni e Cu-Al-Be com Efeito Memória de Forma para Utilização como Atuadores Mecânicos Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

FRANCESCHI, A.; ANTONELLO, M. G. Elementos de máquinas. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial, UFSM, 2014. p. 15-24.

PINA, E. A. C. Estudo da Evolução Microestrutural da Liga Cu-14Al-4Ni com Efeito Memória de Forma. Dissertação Mestrado – UFPE. 2006.

YOO, Y. I.; KIM, Y. J.; SHIN, D. K.; LEE, J. J. Development of martensite transformation kinetics of NiTi shape memory alloys under compression. *International journal of solids and Structures*, v. 64-65, p. 51-61, 2015.

JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, v. 56, p. 1078-1113, 2014.

WU, Y.; WANG, J.; JIANG, C.; XU, H. Martensitic transformation, shape memory effect and mechanical properties of dual-phase $Ni_{50-x}Tb_x Mn_{30}Ga_{20(x=0-1)}$ alloys. *Materials Science & Engineering A*, v. 646, p. 288-293, 2015.

YANG, Z. Y.; ZHENG, X. H.; WU, Y.; CAI, W. Martensitic transformation and shape memory behavior of Ti-V-Al-Fe lightweight shape memory alloys. *Journal of Alloys and compounds*, v. 680, p. 462-466, 2016.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. Shape memory alloys. New York: Cambridge University Press. P. 36-45, 1937.

HUANG, W. Shape Memory alloys and their Application to actuators for Deployable Structures. Peterhouse. University of Cambridge Department of Engineering. 1998.

ZELLER, S.; GNAUK, J. Shape memory behavior of Cu-Al wires produced by horizontal in-rotating-liquid-spinning. *Materials Science and Engineering A*, v. 481-482, p. 562-566, 2008.

SUZANO, M. A. Conhecimentos Gerais de Aeronaves. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 23-39.

ALBUQUERQUE, O. A. L. P. Elementos de Máquinas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A, 1980. p. 144-158.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9580: Rebites especificação. Rio de Janeiro. 2015.
- PARETO, L. Formulário Técnico: Elementos de máquinas. Barcelona: Hemus. 2003. p. 12-25.
- NIEMANN, G. Elementos de Máquinas. São Paulo: Blucher, 2006. 1V. p. 22.
- CALLISTER, W. D. J. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2006.
- SMITH, W. F.; HASHEMI, J. Fundamentos de Engenharia e Ciências dos Materiais. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2003.
- SNEDDON, I.N., The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, p. 47, 1965.
- LOUBET, J. L.; GEORGES, J. M.; MARCHESINI, O.; MEILLE, G. Vickers indentation curves of magnesium Oxide (MgO). *J. Lubr. Technol*, v. 106, p. 43-48, 1984.
- ANTUNES, J. M. A. A Indentação de Materiais maciços e filmes finos: Modelação e análise inversa. Tese de Doutorado - Universidade de Coimbra. Coimbra, p. 8-13. 2006.
- POON, B.; RITTEL, D.; RAVICHANDRAN, G. An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids. *International Journal of Solids and Structures*, v. 45, p. 6018-6033, 2008.
- FRANÇA, F. J. C. Propriedades termomecânicas de ligas CuAlBe com adição de elemento refinador de grão. João Pessoa. UFPB. 2013.
- CHARLEUX, L.; KERYVIN, V.; NIVARD, M.; GUIN, J. P.; SANGIEBOEUF, J. C.; YOKOYAMA, Y. A method for measuring the contact area in instrumented indentation testing by tip scanning probe microscopy imaging. *Materials researche*. 2014
- CALUÊTE, R. E.; Influência de inoculantes e do processo de solidificação direcional sobre propriedades mecânicas de ligas Cu-Al-Mn passíveis de memória de forma. João Pessoa. UFPB. 2016.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. Rio de Janeiro: Blucher. 1969.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. P. 67-78.

SOUZA, S. A. Ensaio mecânicos dos materiais metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos. 5.ed. São Paulo: Blucher, 1984. p. 116-128.

CÂNDIDO, G. V. M. Efeito da adição de cromo sobre a microestrutura e propriedades termomecânicas em ligas Cu-Al-Be com efeito memória de forma. João Pessoa. UFPB.2010.

RODRIGUEZ, G. A. L.; GONZALEZ, G.; ZÚNIGA, H. F.; PEREZ, J.C. The effect of rapid solidification and grain size on the transformation temperatures of Cu-Al-Be melt spin alloys. 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos Materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.