



Universidade federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós graduação em Ciências e Engenharia de Materiais

Mestrado – Doutorado

DESENVOLVIMENTO DE FIXADORES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA PARA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS

Por

Josivan Silva da Paz

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

JOSIVAN SILVA DA PAZ

**DESENVOLVIMENTO DE FIXADORES COM EFEITO
MEMÓRIA DE FORMA PARA UNIÃO DE CHAPAS
METÁLICAS**

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. Rodinei Medeiros Gomes

João Pessoa – Paraíba

Abril - 2017

P348d Paz, Josivan Silva da.

Desenvolvimento de fixadores com efeito memória de forma para união de chapas metálicas / Josivan Silva da Paz. - João Pessoa, 2017.

55 f. : il.

Orientação: Rodinei Medeiros Gomes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia de materiais. 2. Fixadores - Desenvolvimento. 3. Memória de forma - Efeito. I. Gomes, Rodinei Medeiros. II. Título.

UFPB/BC

DESENVOLVIMENTO DE FIXADORES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA PARA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS

Por

JOSIVAN SILVA DA PAZ

Dissertação aprovada em 28 de abril de 2017



Prof. Dr. IEVERTON CAIANDRE ANDRADE BRITO - UFPB

(Examinador Externo)



Prof. Dr. DANNIEL FERREIRA DE OLIVEIRA- UFPB

(Examinador Interno)



Prof. Dr. RODINEI MEDEIROS GOMES - UFPB

(Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, aos meus pais, Francisco Belizário da Paz (In memoriam) e Vera Lúcia Silva da Paz, a minha linda esposa Karen Mikaelly Silva da Paz e a minha querida filha Maria Rosa Silva da Paz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Ao Senhor meu Deus que tem suprido todas as minhas necessidades e que eu possa habitar para sempre na sua casa, como fala o Salmo 23:1 e 6b.

Aos meus pais, agradecendo-lhes pelo empenho que tiveram em proporcionar a mim e meus irmãos sempre o melhor, bem como pelo exemplo de vida.

A minha esposa Karen Mikaelly, que suporta minha chatice e me dar aquele carinho que conforta e ajuda a seguir em frente.

A minha filha, que algumas vezes me dar conselhos sábios.

Aos meus irmãos, por sinal são muitos (10), em especial a Jailson Paz e Josemar Paz sempre se colocando a disposição para me ajudar.

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

Ao Prof. Rodinei Medeiros companheiro de trabalho, o qual faço minhas as palavras da minha mãe “esse homem é como um pai pra você”.

Ao Prof. Dannel Ferreira, amigo de longa data e que foi de grande importância na realização desse trabalho, transmitindo seus conhecimentos.

Ao Prof. Iverton Caiandre, pelo seu incentivo na execução deste trabalho.

Ao amigo de trabalho Romoaldo Gomes, pela sua imensa ajuda nos desenhos técnicos.

Aos amigos, André, Breno e Ricardo, pela ajuda na utilização dos equipamentos do LSR.

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

DESENVOLVIMENTO DE FIXADORES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA PARA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS

RESUMO

As ligas com memória de forma pertencem a uma classe de materiais metálicos capazes de recuperar deformações pseudoplásticas quando submetidas a tratamentos termomecânicos adequados. Essa recuperação de deformação pseudoplástica possibilita à utilização dessas ligas em diversas aplicações industriais, como por exemplo, elementos fixadores. Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de fixadores com memória de forma, fabricados a partir da liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni para união de chapas metálicas. A liga foi obtida por fundição convencional, tratada termicamente e caracterizada por microscopia óptica. Os fixadores foram confeccionados por usinagem via torneamento e eletroerosão a fio, sendo sua caracterização mecânica realizada através de ensaios de cisalhamento e arrancamento. Foram confeccionados três tipos de fixadores neste trabalho, os quais foram denominados de: tipo T, tipo Y e cabeça autotravante. A fixação das chapas foi obtida através das propriedades funcionais apresentadas pela liga em estudo - o efeito memória de forma (fixadores tipo Y e cabeça autotravante) e a superelasticidade (fixador tipo T). Após os ensaios de arrancamento das juntas, o fixador tipo T apresentou o maior valor de carga máxima em comparação com os demais fixadores, incluindo o rebite comercial também usado para comparação. Já para os ensaios de cisalhamento das juntas, o fixador tipo Y apresentou a maior carga. Diante dos resultados obtidos é possível dizer que os fixadores com memória de forma apresentam-se como uma alternativa viável para utilização como dispositivos de fixação de chapas metálicas, principalmente em situações onde a rebitagem convencional se torna inviável ou impraticável por motivos diversos.

Palavras chave: Fixadores com memória de forma, recuperação de forma, superelasticidade.

DEVELOPMENT OF FASTENERS ELEMENTS WITH SHAPE MEMORY EFFECT TO FIX METALLIC PLATES

ABSTRACT

The shape memory alloys belong to a class of metal materials capable of recovering pseudoplastic deformation when subjected to appropriate thermomechanical treatments. This recovery of pseudoplastic deformation allows the use of these alloys in various industrial applications, such as fastening elements. This work had as main objective the development of fasteners with shape memory, made from the alloy Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni for joining metallic plates. The alloy was obtained by conventional casting, heat treated and characterized by optical microscopy. The fasteners were made by turning and wire EDM process. The mechanical characterization was performed by shear and pullout tests. Three types of fasteners were made in this work, which were called: T type, Y type and self-locking head. The fixation of the plates was obtained through the functional properties presented by the alloy under study – the shape memory alloy (Y-type and self-locking head) and superelasticity (T type). After the tear-off tests, the T-type fastener had the highest maximum load value in comparison with the other fasteners, including the commercial rivet also used for comparison. For the joint shear tests, the Y-type fastener presented the highest load. In view of the results obtained, it is possible to say that shape memory fasteners are presented as a viable alternative for use as metal sheet fastening devices, especially in situations where conventional riveting becomes impractical or impracticable for various reasons.

Keywords: Fasteners with shape memory, shape recovery, superelasticity

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPITULO II	4
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1.1 COMPORTAMENTO PSEUDOELÁSTICO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	5
2.1.2 O EFEITO MEMÓRIA DE FORMA.....	6
2.1.3 EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS Cu-Al-Be COM MEMÓRIA DE FORMA.....	7
2.1.4 UNIÃO DE CHAPAS – REBITAGEM CONVENCIONAL.....	9
2.1.5 UNIÃO DE CHAPAS – REBITES COM MEMÓRIA DE FORMA.....	11
CAPÍTULO III	14
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1.1 ELABORAÇÃO DA LIGA.....	14
3.1.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS E USINAGEM DOS FIXADORES.....	15
3.1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA.....	15
3.1.4 ETAPA DE FIXAÇÃO DAS CHAPAS PARA OS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO E CISALHAMENTO EM TRAÇÃO.....	16
3.1.5 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DAS JUNTAS REBITADAS.....	22
3.1.6 ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM TRAÇÃO DAS JUNTAS REBITADAS.....	23
CAPÍTULO IV	25

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
4.1.1 ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA POR MICROSCOPIA ÓPTICA.....	25
4.1.2 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM JUNTAS REBITADAS.....	27
4.1.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM JUNTAS REBITADAS.....	32
CAPÍTULO V.....	37
5.1 CONCLUSÕES.....	37
CAPÍTULO VI.....	39
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	39
CAPÍTULO VII.....	40
7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Efeito superelástico (LECCE & CONCILIO, 2015).....	6
Figura 2.2 - Ensaio de quantificação do efeito memória de forma a temperatura de 223 K para liga contendo 0,6% de Be (OLIVEIRA et al., 2010).....	7
Figura 2.3 - Curva típica de tração - deformação para a liga Cu-11,8Al-0,6Be em T = 25°C (Oliveira, 2009).....	8
Figura 2.4 - Curva típica de tração - deformação para a liga Cu-11,8Al-0,6Be-0,5Nb-0,27Ni em T = 25°C (Oliveira, 2009).....	9
Figura 2.5 - Tipos básicos de juntas rebitadas (GOETSCH et al., 2005).	11
Figura 2.6 - Gráfico comparativo das curvas de cisalhamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma (SILVA, 2016).....	12
Figura 2.7 - Gráfico comparativo das curvas de arrancamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma (SILVA, 2016).....	13
Figura 3.1 - Molde para obtenção dos lingotes.	14
Figura 3.2 - Máquina de usinagem por eletroerosão a fio.	15
Figura 3.3 - Dimensões dos fixadores com memória de forma para união de chapas: (a) tipo T; (b) tipo Y; (c) cabeça autotravante.	17
Figura 3.4 - Montagem do rebite comercial de alumínio.	18
Figura 3.5 - (a) Dispositivo de introdução do fixador as chapas. (b) Sequência de inserção do fixador nas chapas, evidenciando o seu comportamento superelástico.	19
Figura 3.6 - Sequência da operação de inserção do fixador com memória de forma tipo Y.	20
Figura 3.7 - (a) Dispositivo usado para expandir o diâmetro do fixador autotravante. (b) Etapa de inserção do rebite de inox as chapas seguido do acoplamento da cabeça autotravante ao rebite.....	21
Figura 3.8 - Montagem das chapas unidas ao centro no dispositivo para realização dos ensaios de arrancamento.....	22
Figura 3.9 - Montagem do dispositivo a máquina de ensaio uniaxial	23
Figura 3.10 - Montagem da junta na máquina para realização do ensaio de cisalhamento excêntrico	25

Figura 4.1 - Lingotes bruto de fusão.....	25
Figura 4.2 - Presença da austenita na liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni. ...	26
Figura 4.3 - Fixadores com memória de forma para união de chapas: (a) tipo T; (b) tipo Y; (c) cabeça autotravante.	26
Figura 4.4 - Ensaio de arrancamento rebite maciço de alumínio tipo cabeça chata.	27
Figura 4.5 - Ensaio de arrancamento rebite com memória de forma tipo Y.	28
Figura 4.6 - Ensaio de arrancamento rebite com memória de forma tipo T.	29
Figura 4.7 - Chapa após o ensaio de arrancamento do rebite com memória de forma tipo T.	30
Figura 4.8 - Ensaio de arrancamento do fixador cabeça autotravante com memória de forma para fixação de rebites comerciais.	30
Figura 4.9 - Fratura do rebite comercial de alumínio durante o ensaio de arrancamento.	32
Figura 4.10 - Ensaio de cisalhamento rebite maciço de alumínio tipo cabeça chata.	33
Figura 4.11 - Ensaio de cisalhamento rebite com memória de forma tipo Y. ...	34
Figura 4.12 - Ensaio de cisalhamento rebite com memória de forma tipo T.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Denominações dos rebites (norma NBR 9580/2015).	10
Tabela 4.1 - Resultados de carga máxima e deslocamento máximo no ensaio de arrancamento.	31
Tabela 4.2 - Resultados de carga máxima no ensaio de cisalhamento.	36
Tabela 4.3 - Resultados de deslocamento máximo no ensaio de cisalhamento.	36

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem;
 A_f – Fim da transformação austenítica;
 A_i – Início da transformação austenítica;
Al – Alumínio;
Be – berílio;
C - Temperatura em Celsius;
Cr – Cromo;
Cu – cobre;
g – Grama;
GPa – Tensão em Giga Pascal;
K – Temperatura em kelvin;
kN – Quilo Newton;
LSR – Laboratório de Solidificação Rápida;
 M_f – Fim da transformação martensítica;
 M_i – Início da transformação martensítica;
min – Minuto;
mm – Milímetro;
 mm^2 - Milímetro Quadrado;
Mpa – Tensão em Mega Pascal;
N – Newton;
Nb – Nióbio;
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;
Ni – Níquel;
s – segundo;
Ti – Titânio;
Zn – Zinco;
 μm – Unidade Micrométrica;

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO.

As ligas com memória de forma pertencem a uma classe de materiais metálicos que, exibem a capacidade de recuperar deformações aparentemente permanentes, quando submetidas a tratamentos termomecânicos adequados.

As ligas com memória de forma apresentam duas propriedades funcionais únicas: a superelasticidade e o efeito memória de forma. A transformação martensítica termoelástica é a responsável pelas propriedades funcionais apresentadas pelas ligas com memória de forma (N. Suresh&U. Ramamurty, 2007).

A recuperação de forma desses materiais está intrinsecamente ligada a transformações de fases reversíveis, martensita–austenita, que ocorrem em função da temperatura ou das tensões aplicadas. As temperaturas de transformações em função da temperatura (ou da tensão) são: M_i e M_f , respectivamente início e fim da transformação martensítica, quando do resfriamento e A_i e A_f , respectivamente, início e fim da transformação austenítica, quando do aquecimento. Para observar o efeito memória de forma faz-se necessário resfriar o material em uma temperatura inferior a M_f , deformar o material nessa temperatura e em seguida aquecê-lo a uma temperatura superior a A_f e observar o retorno do material a sua geometria inicial.

Nas aplicações das ligas com memória de forma como dispositivos de união (rebites e luvas para união de tubulação) é imprescindível, que as transformações de fase ocorram em baixas temperaturas, M_i (início da

transformação martensita) $< 0^{\circ}\text{C}$. Para estas aplicações as ligas, além das baixas temperaturas de transformações, devem apresentar uma boa recuperação de forma, não inferior a 4%, boa ductilidade (superior a 10%) e boa resistência mecânica (ZAK et al., 1996).

As ligas Ni-Ti atendem perfeitamente estas características, porém têm um elevado custo de obtenção e processamento. As ligas a base de cobre aparecem como uma alternativa promissora, por apresentarem custo de obtenção e processamento mais atrativo que os das ligas Ni-Ti. Segundo OLIVEIRA (2009) as ligas Cu-Al-Be quando modificadas através da adição de Nb, apresentam excelentes características, tais como: boa ductilidade, recuperação de forma superior a 4%, boa resistência mecânica e temperaturas de transformações $M_i < 0^{\circ}\text{C}$, o que as credenciam a serem aplicadas como dispositivos de fixação em baixas temperaturas.

De acordo com Shishkin&Shishkin (2010) a atração do uso de rebites com o efeito da memória termomecânica é causada por fatores como, por exemplo, a alta produtividade do trabalho, a exclusão de equipamentos especiais para rebitagem, à simplicidade da montagem e a possibilidade de seu uso em lugares de difíceis acessos, uma baixa taxa de rejeição e uma alta qualidade das juntas devido à ausência de descarga e à uniformidade da distribuição do diagrama de tensão ao longo da espessura da pilha.

SILVA (2016) estudou a viabilidade da obtenção de rebites com memória de forma a partir da liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,3Cr. Os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento e cisalhamento das juntas fixadas com os rebites com memória de forma demonstram que, estes rebites são viáveis para o emprego de uniões de difícil acesso, bem como, na fixação de peças que necessitam de movimento em torno de um eixo.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar obtenção de fixadores fabricados a partir da liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni para união de chapas metálicas. Serão exploradas as propriedades de superelasticidade e/ou efeito memória de forma dos fixadores para promover a união das chapas.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 OBJETIVO GERAL.

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar obtenção de fixadores fabricados a partir da liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni para união de chapas metálicas. Serão exploradas as propriedades de superelasticidade e/ou efeito memória de forma dos fixadores para promover a união das chapas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Obter a liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni com efeito memória de forma;
- Desenvolver os fixadores a partir da liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni;
- Caracterizar a liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni por microscopia óptica;
- Determinação das propriedades mecânicas através dos ensaios de arrancamento e cisalhamento das juntas;
- Avaliar a viabilidade da utilização destes fixadores com memória de forma na união de chapas metálicas.

CAPITULO II

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

As ligas com memória de forma fazem parte de uma classe de materiais metálicos que, demonstram a capacidade de recuperar deformações aparentemente permanentes, quando submetidas a tratamentos termomecânicos adequados.

Segundo MORIN et al. (2010) esta habilidade de recuperação de forma é atribuída à sua capacidade de sofrer uma mudança de fase sólida-sólida reversível entre uma fase mãe chamada austenita e uma fase produto chamada martensita. A transição da austenita para a martensita é acompanhada por uma perda de simetria cristalográfica, que produz entropia e calor. A austenita normalmente se transforma em martensita quando a liga com memória de forma é submetida a uma tensão mecânica e, a deformação de transformação resultante pode ser recuperada após o descarregamento. Este comportamento aparentemente elástico, mas dissipativo é chamado de pseudoelasticidade.

De acordo com THAMBURAJA & NIKABDULLAH (2008) a fase austenita (fase de alta simetria) é estável sob baixas tensões e/ou altas temperaturas, enquanto a fase martensita (fase de baixa simetria) é estável sob altas tensões e/ou baixas temperaturas. Nas ligas com memória de forma, a transformação entre a fase austenítica e a fase martensítica ocorre de forma reversível e sem difusão.

Durante o resfriamento, a transformação da austenita em martensita inicia-se numa temperatura característica M_i e conclui-se a uma temperatura inferior, M_f . Se o material for então aquecido, ocorrerá a transformação reversa da martensita em austenita iniciado na temperatura A_i e concluindo em uma na temperatura superior, A_f (CISSE et al., 2015).

As ligas com memória de forma mais utilizadas são CuZnAl, NiTi e CuAlNi. No entanto, a adição de berílio nas ligas a base de CuAl permite a obtenção de temperaturas de transformação muito baixas. Além disso, o CuAlBe tem uma boa estabilidade a elevadas temperaturas (BARON, 1998).

2.1.1 COMPORTAMENTO PSEUDOELÁSTICO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.

Segundo LECCE & CONCILIO (2015) o efeito superelástico é de natureza isotérmica e envolve o armazenamento de energia potencial. Em particular, o comportamento superelástico das ligas com memória de forma está associado com a transformação martenística induzida por tensão que pode ser induzida a uma temperatura acima de A_f . De fato, a liga pode ser deformada elasticamente a níveis superiores aos normais aplicando uma carga na fase austenítica. A aplicação de carga induz a transformação da austenita em martensita demaclada. No descarregamento, a fase de martensita torna-se instável e transforma de volta para a fase austenita, resultando numa recuperação de deformação total após a remoção da carga. O efeito superelástico é representado no gráfico tensão-deformação, Figura 2.1.

A microestrutura do material é inicialmente austenítica (ponto 1). Durante o carregamento, a tensão crítica para a transição de fase é atingida (ponto 2) e o material transforma-se diretamente em martensita demaclada (platô 2-3). Uma vez que a transição de fase é completada, o carregamento adicional apenas provoca a deformação elástica da martensita demaclada (inclinação 3-4). A austenita é a única fase estável a alta temperatura e nenhuma tensão,

portanto, durante o descarregamento, a tensão crítica para a transição de fase reversa é atingida e a deformação macroscópica é recuperada (platô 5-6).

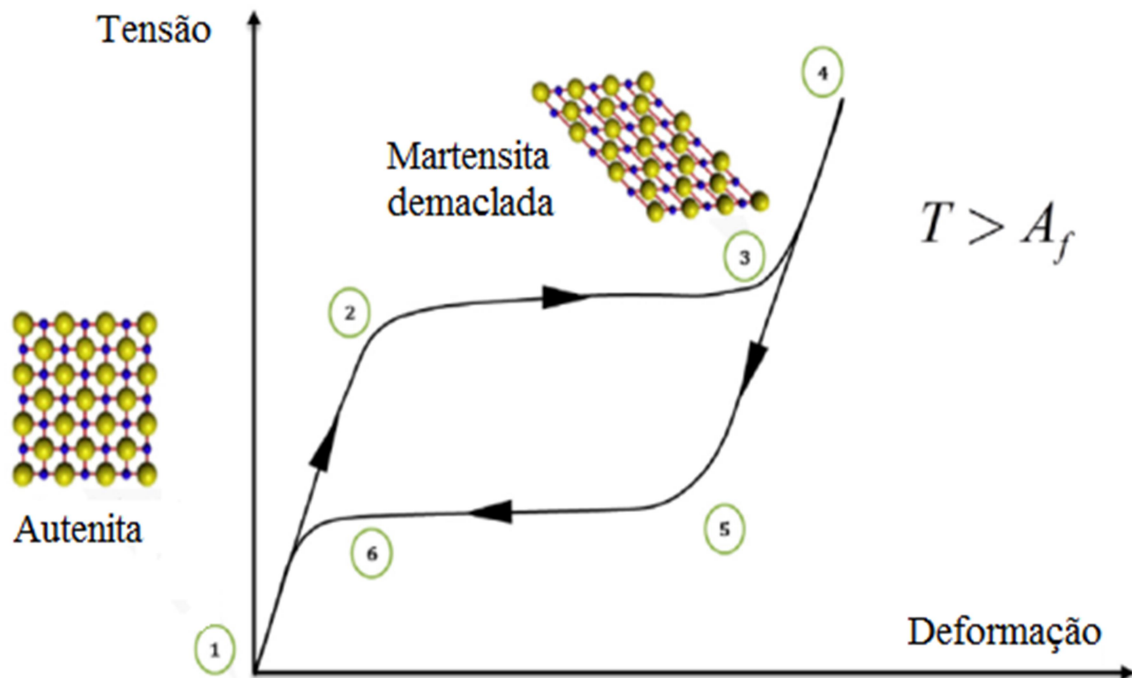


Figura 2.1 - Efeito superelástico (LECCE & CONCILIO, 2015).

2.1.2 O EFEITO MEMÓRIA DE FORMA.

O efeito memória de forma é observado quando deformamos o material em uma temperatura inferior a M_f e em seguida ao aquecê-lo a uma temperatura superior a A_f verificamos o retorno do material a sua geometria inicial.

OLIVEIRA et al. (2010) quantificou o efeito memória de forma em uma liga Cu-11,8Al-0,6Be. Os ensaios de carregamento-descarregamento foram realizados na temperatura de 223 K, com deformações máximas imposta de 1%, 2%, 3% e 4%, figura 2.2. Observou por exemplo para uma deformação máxima imposta de 4%, após a descarga uma deformação pseudoplástica de 2,8%. Após o aquecimento do material acima de A_f essa deformação pseudoplástica foi completamente recuperada, ou seja, o material recuperou

sua forma original. Essa recuperação após o aquecimento corresponde a 70% da deformação imposta, sendo que ocorreu uma recuperação elástica de 30% após o descarregamento.

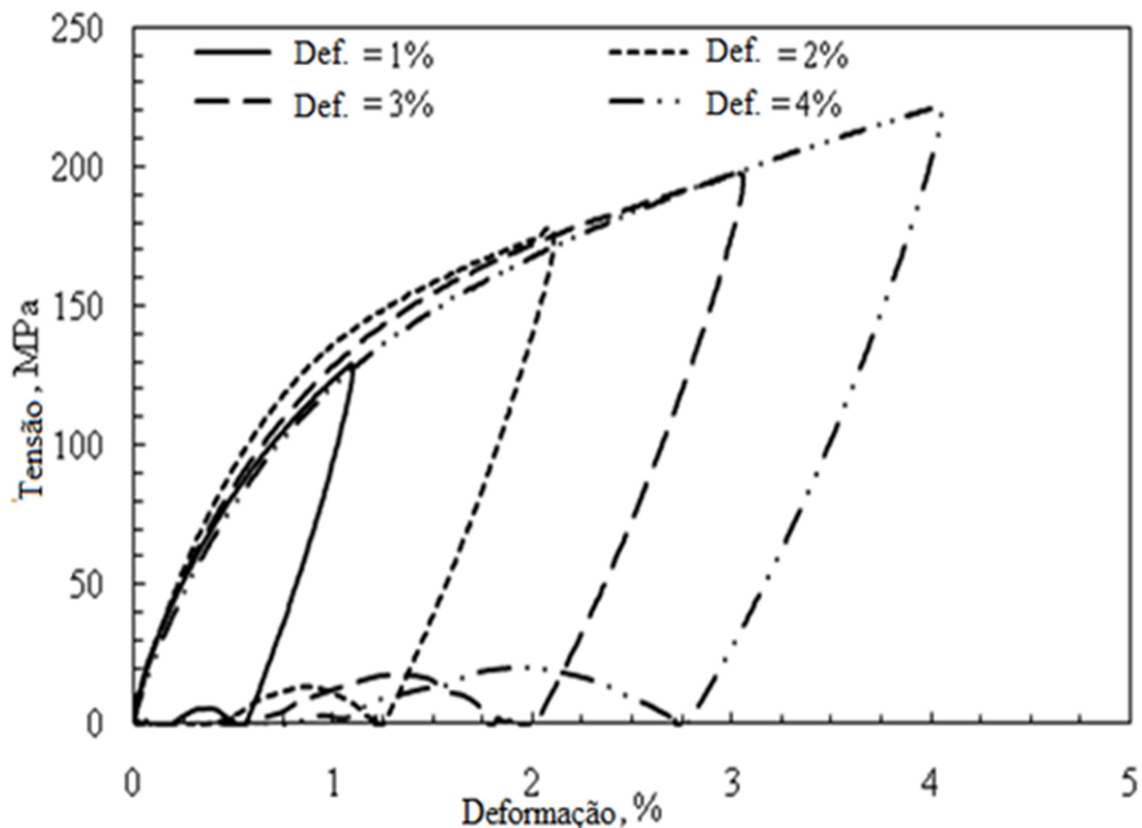


Figura 2.2 - Ensaio de quantificação do efeito memória de forma a temperatura de 223 K para liga contendo 0,6% de Be (OLIVEIRA et al., 2010).

2.1.3 EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS Cu-Al-Be COM MEMÓRIA DE FORMA.

Entre as várias ligas com memória de forma, as ligas à base de cobre têm a perspectiva de aplicação mais ampla além das ligas Ni-Ti devido ao seu baixo custo, boas propriedades de memória de forma, excelentes propriedades de amortecimento e altas condutividades elétricas e térmicas. Uma das formas de se conseguir melhoria nas propriedades termomecânicas das ligas a base de cobre é o processo de inoculação, ou seja, através do refino do grão.

O efeito do tamanho de grão sobre o comportamento pseudoelástico de uma liga Cu-11,4Al-0,5Be foi avaliado por MONTECINOS et al. (2008). Foi

observado no estudo que a tensão de indução, a inclinação de transformação e a histerese de tensão diminuem à medida que o tamanho de grão aumenta.

OLIVEIRA (2009) Investigou em seu estudo o efeito da adição do nióbio como refinador de grão para ligas Cu-Al-Be. O autor verificou, nesse estudo, que cerca de 0,5% Nb foi suficiente para reduzir o tamanho de grão da liga Cu-Al-Be, bem como, promover uma melhora significativa nas propriedades termomecânicas. Observamos através da Figura 2.3, que a liga sem Nb rompe em uma baixa tensão de aproximadamente 330 MPa com uma deformação à ruptura de aproximadamente 3,6%. As relativas baixas propriedades mecânicas desta liga, acentuadamente a sua pronunciada fragilidade indicam que a presença do Nb é essencial para reduzir o tamanho do grão e subsequentemente melhorar a ductilidade das ligas Cu-Al-Be. Podemos verificar na Figura 2.4, que a liga Cu-Al-Be, com a adição do nióbio como refinador do grão, apresentou uma deformação à ruptura de aproximadamente 10%.

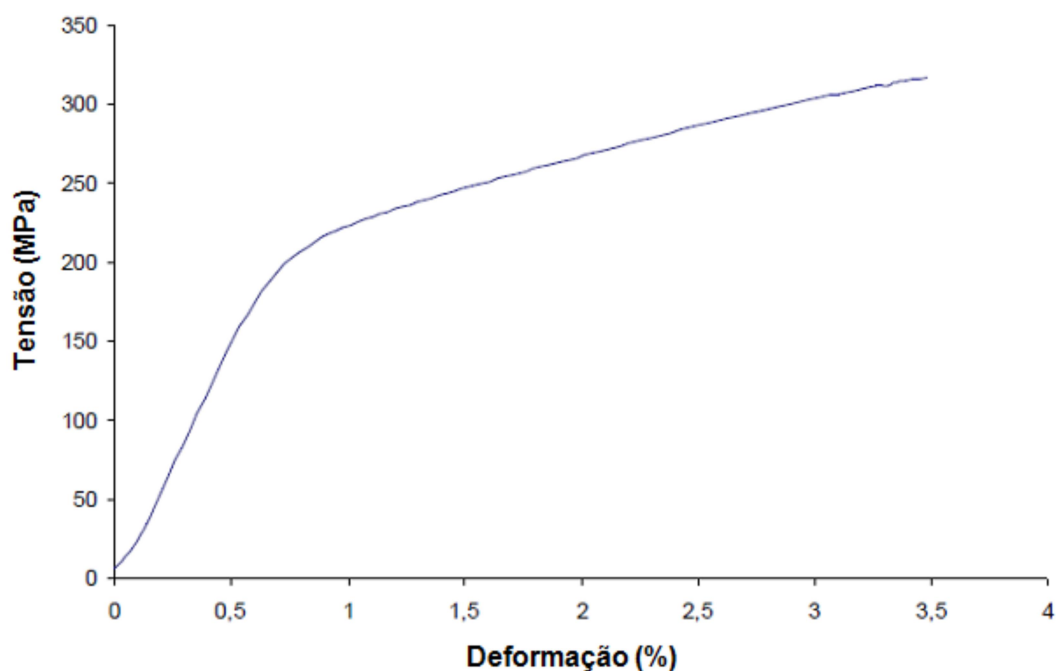


Figura 2.3 - Curva típica de tração - deformação para a liga Cu-11,8Al-0,6Be em T = 25°C (Oliveira, 2009).

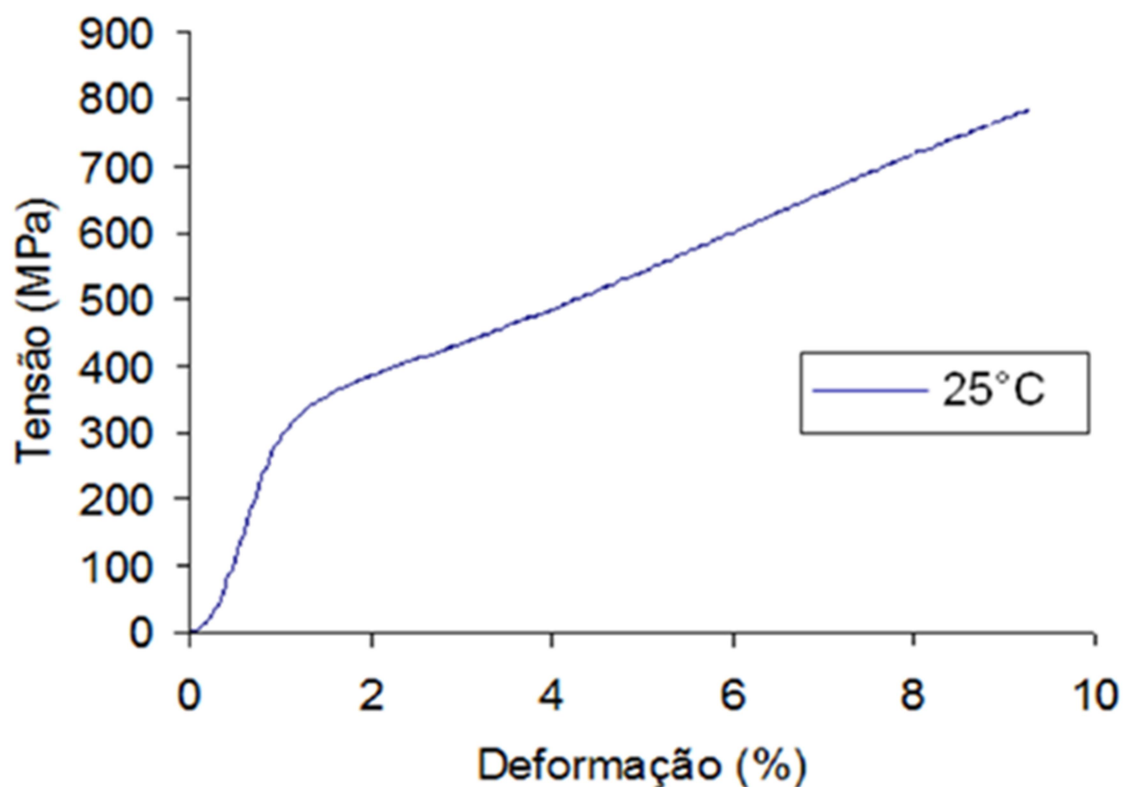


Figura 2.4 - Curva típica de tração - deformação para a liga Cu-11,8Al-0,6Be-0,5Nb-0,27Ni em T = 25°C (Oliveira, 2009).

ALBUQUERQUE et al. (2010) realizaram uma avaliação não-destrutiva do efeito do tamanho de grão sobre as propriedades mecânicas de uma liga com memória de forma Cu-Al-Be com e sem refinadores de grãos Nb-Ni. Através da análise das propriedades mecânicas por ultrassom foi possível mensurar, de forma não destrutiva, o módulo de elasticidade médio com valores de 50 GPa e 61 GPa para as ligas com e sem refinadores, respectivamente.

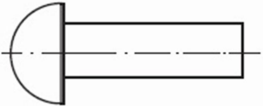
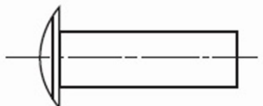
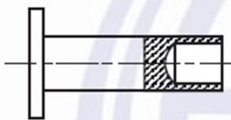
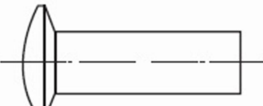
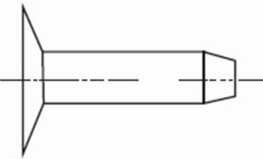
2.1.4 UNIÃO DE CHAPAS – REBITAGEM CONVENCIONAL.

Os rebites são elementos mecânicos utilizados para promover a união permanente de peças. Segundo BLACK (2004) o custo de rebiteagem é menor que o da maioria dos outros métodos de fixação, devido à ausência de arruelas

planas, arruelas de bloqueio, porcas ou pinos divididos; além disso, o uso de rebites autoperfurantes elimina a necessidade de pré-furos. Os rebites estão disponíveis em aço, latão, cobre e alumínio em uma variedade de tipos.

A tabela 2.1 apresenta a denominações dos rebites mais utilizados segundo a norma NBR 9580/2015.

Tabela 2.1 - Denominações dos rebites (norma NBR 9580/2015).

	Rebite com cabeça redonda
	Rebite com cabeça abaulada
	Rebite com cabeça cilíndrica
	Rebite com cabeça plana e haste semitubular
	Rebite com cabeça boleada plana e haste semitubular
	Rebite com cabeça escareada plana e haste semitubular
	Rebite com cabeça abaulada ou escareada
	Rebite com cabeça chata ou escareada e ponta da haste cônica (rebite para correias)

De acordo com GOETSCH et al. (2005) existem dois tipos básicos de juntas rebitadas: juntas por sobreposição e juntas de topo, conforme figura 2.5. Nas juntas por sobreposição, as peças são sobrepostas uma sobre a outra e são mantidas unidas por uma ou mais fileiras de rebites. Já nas juntas de topo, as duas chapas são colocadas uma ao lado da outra e são mantidas unidas por placas de cobertura que são rebitas em ambas as partes.

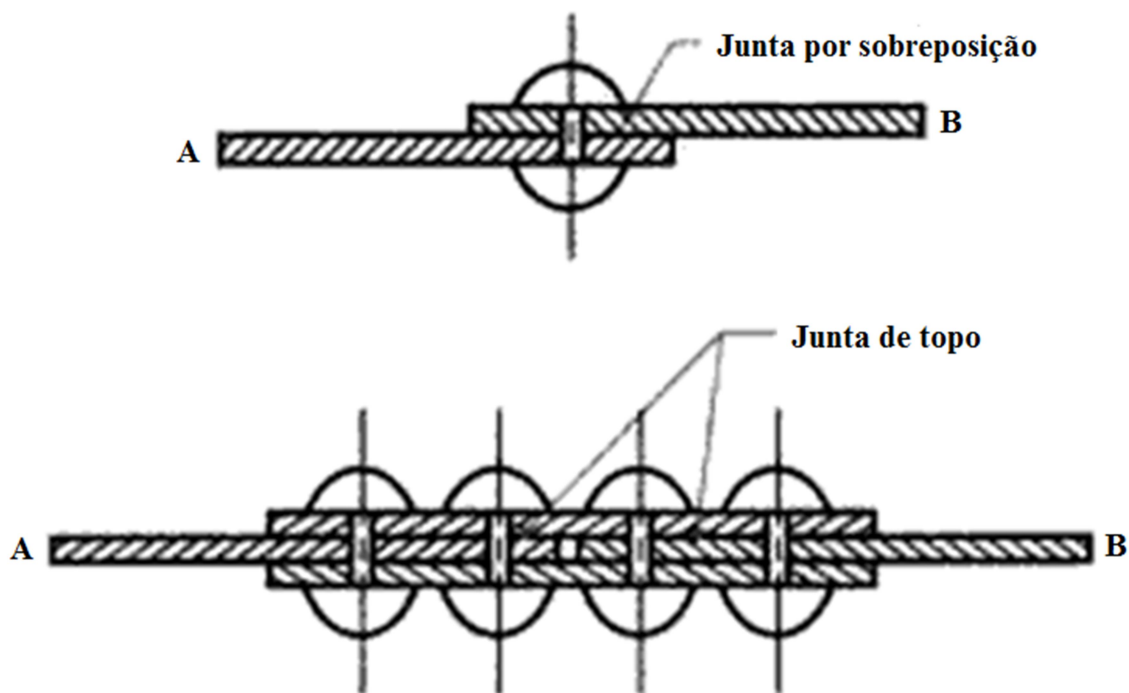


Figura 2.5 - Tipos básicos de juntas rebitadas (GOETSCH et al., 2005).

2.1.5 UNIÃO DE CHAPAS – REBITES COM MEMÓRIA DE FORMA.

Segundo Shishkin&Shishkin (2010) a atração do uso de rebites com o efeito da memória termomecânica é causada por fatores como, por exemplo, a alta produtividade do trabalho, a exclusão de equipamentos especiais para rebitagem, à simplicidade da montagem e a possibilidade de seu uso em lugares de difíceis acessos, uma baixa taxa de rejeição e uma alta qualidade das juntas devido à ausência de descarga e à uniformidade da distribuição do diagrama de tensão ao longo da espessura da pilha.

SILVA (2016) estudou a viabilidade da obtenção de rebites com memória de forma a partir de uma liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,3Cr. Durante os ensaios de cisalhamento das juntas foi observado que os rebites com memória de forma suportaram cargas maiores que os rebites de alumínio comercial do tipo repuxo. Já nos ensaios de arrancamento o rebite com memória de forma apresentou uma carga menor que a obtida pelo rebite comercial do tipo repuxo, mas não foi observado fratura no rebite com memória de forma durante o ensaio. As figuras 2.6 e 2.7 apresentam os resultados obtidos por Silva (2016) após os ensaios de cisalhamento e arrancamento das juntas.

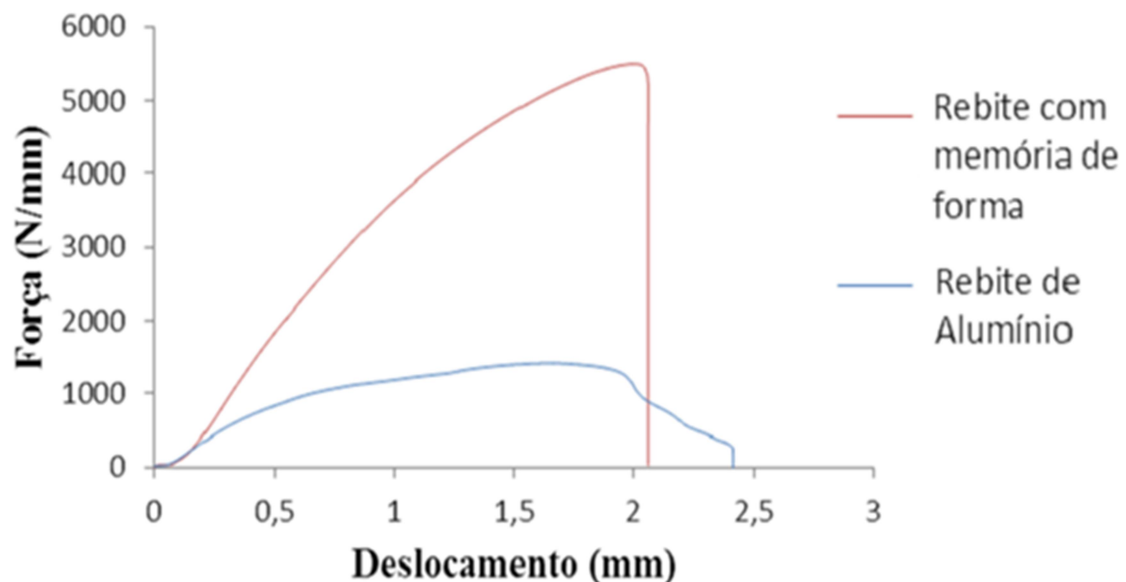


Figura 2.6 - Gráfico comparativo das curvas de cisalhamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma (SILVA, 2016).

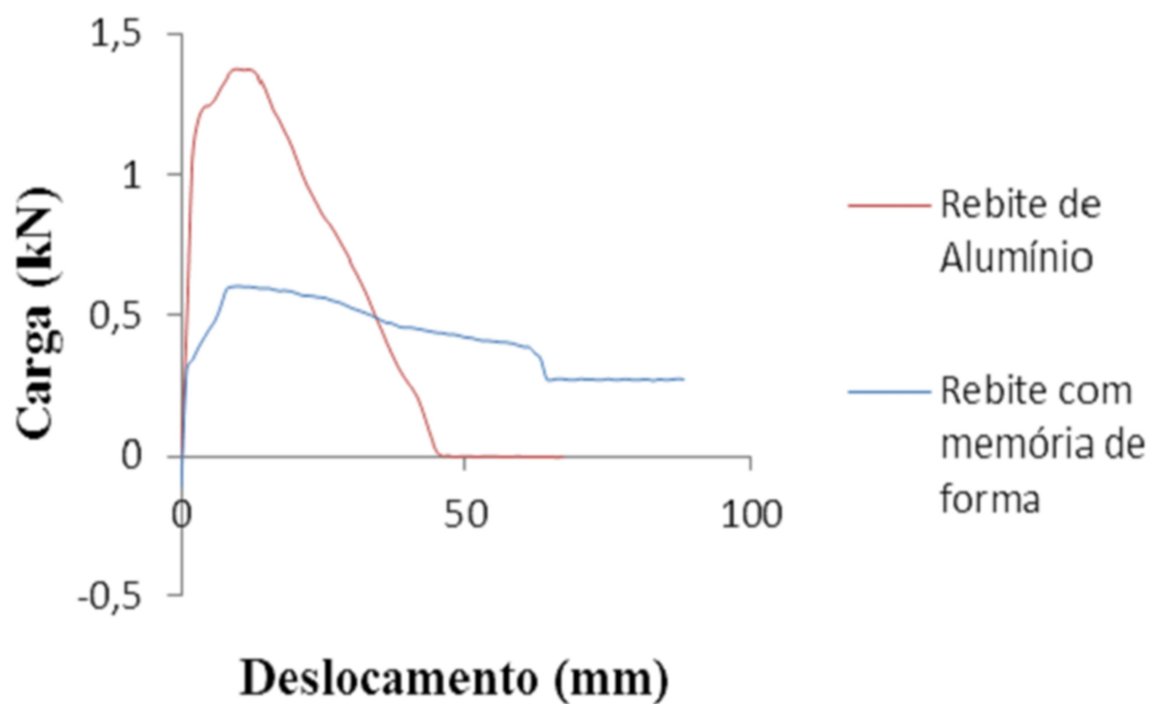


Figura 2.7 - Gráfico comparativo das curvas de arrancamento do rebite comercial e do rebite com memória de forma (SILVA, 2016).

CAPÍTULO III

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1.1 ELABORAÇÃO DA LIGA.

A liga Cu-Al-Be-Nb-Ni foi elaborada na seguinte composição nominal: Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni. A liga foi fundida em quantidade aproximadamente de 600g em atmosfera ambiente e aquecimento em forno de resistência do tipo MUFLA da JUNG em um cadinho de grafite partindo-se das ligas mães Cu-4Be e Nb-35,4Ni. Após fusão as ligas foram vazadas em um molde metálico com a seguinte forma: molde de aço quadrado de 50 mm com capacidade para cinco lingotes de forma cilíndrica com 12 mm de diâmetro e 110 mm de comprimento, como mostra a Figura 3.1, sendo o preenchimento do molde pela parte superior.



Figura 3.1 - Molde para obtenção dos lingotes.

3.1.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS E USINAGEM DOS FIXADORES.

A liga após o processo de fundição foi homogeneizada a 850°C durante 12 horas em um forno do tipo mufla, modelo 0912 da JUNG sem controle de atmosfera.

Posteriormente, ao processo de homogeneização dos lingotes, foram elaborados os dispositivos de fixação através da usinagem por torneamento seguido de abertura do rasgo nos dispositivos via eletroerosão a fio, num equipamento da BENER modelo electrocut AR1300, como mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Máquina de usinagem por eletroerosão a fio.

3.1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA.

A observação da morfologia das fases foi realizada a temperatura de 25°C com auxílio de um microscópio óptico fabricado pela OLYMPUS, modelo BX41M-LED. As ligas foram previamente lixadas com lixas de granulometrias variando de 380 até 1200 granos, em seguida polidas utilizando alumina com 1 e 0,3 μm e atacadas quimicamente com uma solução aquosa de cloreto de ferro durante um intervalo 10 s.

3.1.4 ETAPA DE FIXAÇÃO DAS CHAPAS PARA OS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO E CISALHAMENTO EM TRAÇÃO.

Para os ensaios de arrancamento e cisalhamento em tração, foram produzidas juntas sobrepostas a partir de duas chapas de aço 1045, ambas com dimensões 80 x 20 x 4,7 mm. Como fixadores com efeito memória de forma foram utilizados três configurações, com dimensões mostradas na Figura 3.3.

Para comparar os resultados obtidos com os fixadores com memória de forma nos ensaios de arrancamento e cisalhamento em tração, realizaram-se os mesmos ensaios com juntas sobrepostas fixadas com rebite comercial de rebater em alumínio de cabeça abaulada com diâmetro do corpo de 4,7 mm e comprimento de 16,5 mm.

A configuração apresentada na Figura 3.3 (c) foi usada para fixar um rebite fabricado em aço inoxidável usinado em torno mecânico (exclusivamente no ensaio de arrancamento, a fim de garantir uma ótima fixação da cabeça ao corpo do rebite, evitando dessa forma erros geométricos do rebite comercial) com as mesmas características do rebite comercial. Para o ensaio de cisalhamento considerou os resultados obtidos pelo rebite comercial de alumínio, já que a cabeça autotravante pode ser adaptada a esse tipo de rebite.

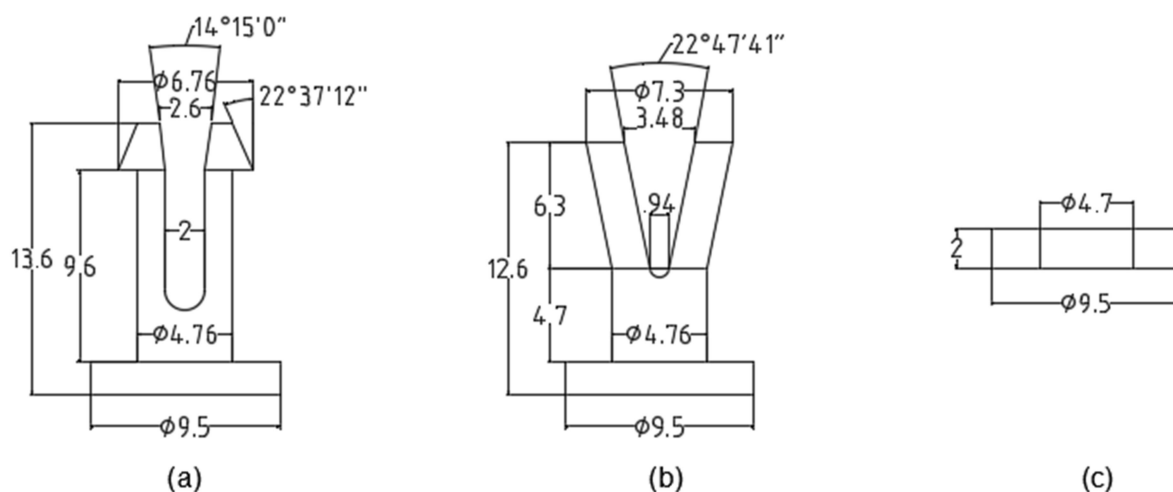


Figura 3.3 - Dimensões dos fixadores com memória de forma para união de chapas:
(a) tipo T; (b) tipo Y; (c) cabeça autotravante.

A preparação das chapas para os ensaios de arrancamento consistiu na realização três furos cilíndricos em cada chapa, um ao centro para a introdução dos fixadores (rebite de comercial, fixador com memória de forma tipo T e a cabeça autotravante) e os outros dois nas extremidades para a fixação das chapas ao dispositivo da máquina de ensaio. Para o fixador com memória de forma tipo Y foi feito em uma das chapas uma furação cônica no centro para adequar a geometria do furo com a do fixador, garantindo uma área de contato maior entre o fixador e a chapa.

Na etapa de preparação das chapas para os ensaios de cisalhamento em tração foi efetuado apenas um furo em uma das extremidades de cada chapa. A configuração dos furos foi à mesma apresentada para o ensaio de arrancamento, ou seja, furo cônico para o fixador com memória de forma tipo Y e furo cilíndrico para os demais fixadores.

Descreve-se a seguir a etapa de montagem das juntas para realização dos ensaios mecânicos (arrancamento e cisalhamento em tração).

Na Figura 3.4 apresenta-se a operação de rebiteagem manual para o rebite comercial de alumínio. Inicialmente foi usado um contra estampo para apoiar o conjunto e um repuxador para realizar a perfeita junção das chapas,

em seguida usamos um martelo tipo bola para uma pré-conformação e por fim realiza-se a operação de estampagem com o estampo.

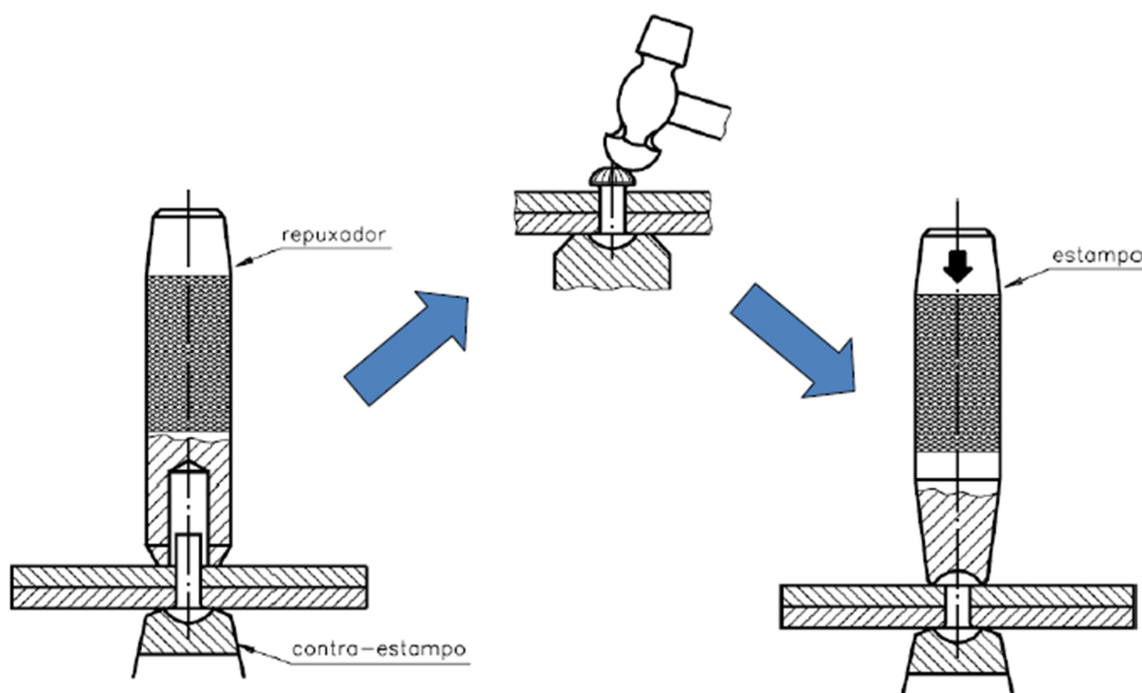


Figura 3.4 - Montagem do rebite comercial de alumínio.

Para o fixador com memória de forma tipo T fez necessário à confecção de um dispositivo auxiliar, com a finalidade de assegurar ao fixador uma rápida recuperação superelástica sem o risco de quebra, durante o processo de inserção nas chapas. O dispositivo auxiliar proporciona um perfeito perpendicularismo entre o fixador e as chapas, conforme se verifica na Figura 3.5 (a).

A entrada do fixador nas chapas dá-se pela aplicação de uma carga de impacto na cabeça do dispositivo, provocando desta forma uma rápida inserção do fixador nas chapas. Verifica-se na Figura 3.5 (b) que após a aplicação da carga e durante o movimento de entrada, o fixador deforma-se facilitando o processo de inserção. Ao final deste processo, ocorre uma completa recuperação da deformação promovendo a fixação da junta. Esta recuperação de deformação é possível graças ao comportamento superelástico apresentado pelo fixador, já que o processo de inserção ocorre à temperatura de 30°C (superior à temperatura A_f).

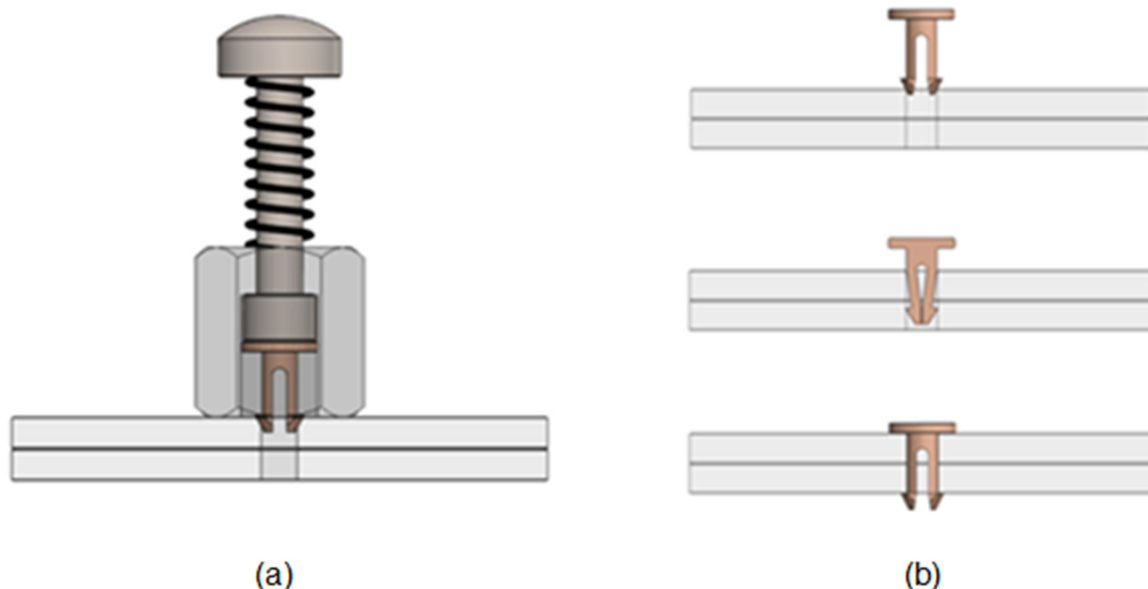


Figura 3.5 - (a) Dispositivo de introdução do fixador as chapas. (b) Sequência de inserção do fixador nas chapas, evidenciando o seu comportamento superelástico.

Para o fixador com memória de forma tipo Y utilizou-se a propriedade de efeito memória de forma para consolidar a fixação da junta. Para isso, o fixador foi colocado em um banho criogênico para reduzir sua temperatura a um valor inferior ao M_f , sendo em seguida deformado com o auxílio do alicate e introduzido ao furo das chapas, sendo que o furo da primeira chapa é cilíndrico e o da segunda cônico para uma melhor adaptação do fixador a parede da chapa. Após a etapa de inserção, o fixador é aquecido até a temperatura de 30°C (superior ao A_f) o que torna possível a recuperação da sua forma inicial, ocasionando desta forma a união das chapas. As etapas do processo de inserção do fixador tipo Y as chapas é representada na Figura 3.6.

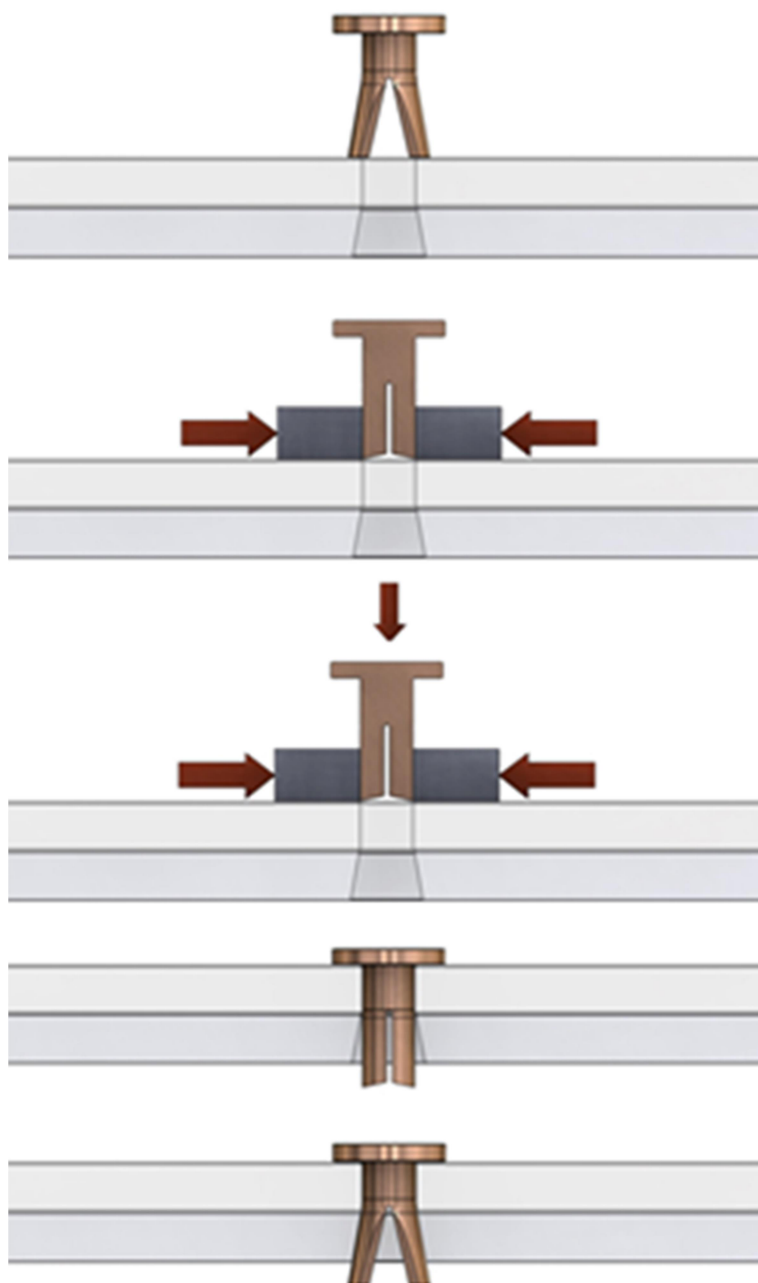


Figura 3.6 - Sequência da operação de inserção do fixador com memória de forma tipo Y.

O fixador tipo cabeça autotravante foi usado em conjunto com um rebite de inox no ensaio de arrancamento, onde seu travamento ao rebite ocorreu por meio da propriedade de efeito memória de forma apresentada pelo fixador. A cabeça autotravante é confeccionada com o diâmetro interno ligeiramente inferior ao diâmetro do corpo do rebite de inox. A etapa seguinte corresponde à expansão do diâmetro interno do fixador com o auxílio do dispositivo mostrado

na Figura 3.7 (a). Esta expansão ocorreu em meio criogênico e o diâmetro interno final do fixador é superior ao diâmetro do rebite. Após a etapa de expansão a cabeça autotravante é inserida ao rebite, e com o posterior aquecimento até a temperatura de 30°C (superior ao A_f), o fixador recupera a sua forma inicial, promovendo desta forma uma interferência ao corpo do rebite, e consequentemente a união das chapas. A sequência da operação de inserção do fixador cabeça autotravante ao rebite comercial é representada na Figura 3.7 (b).

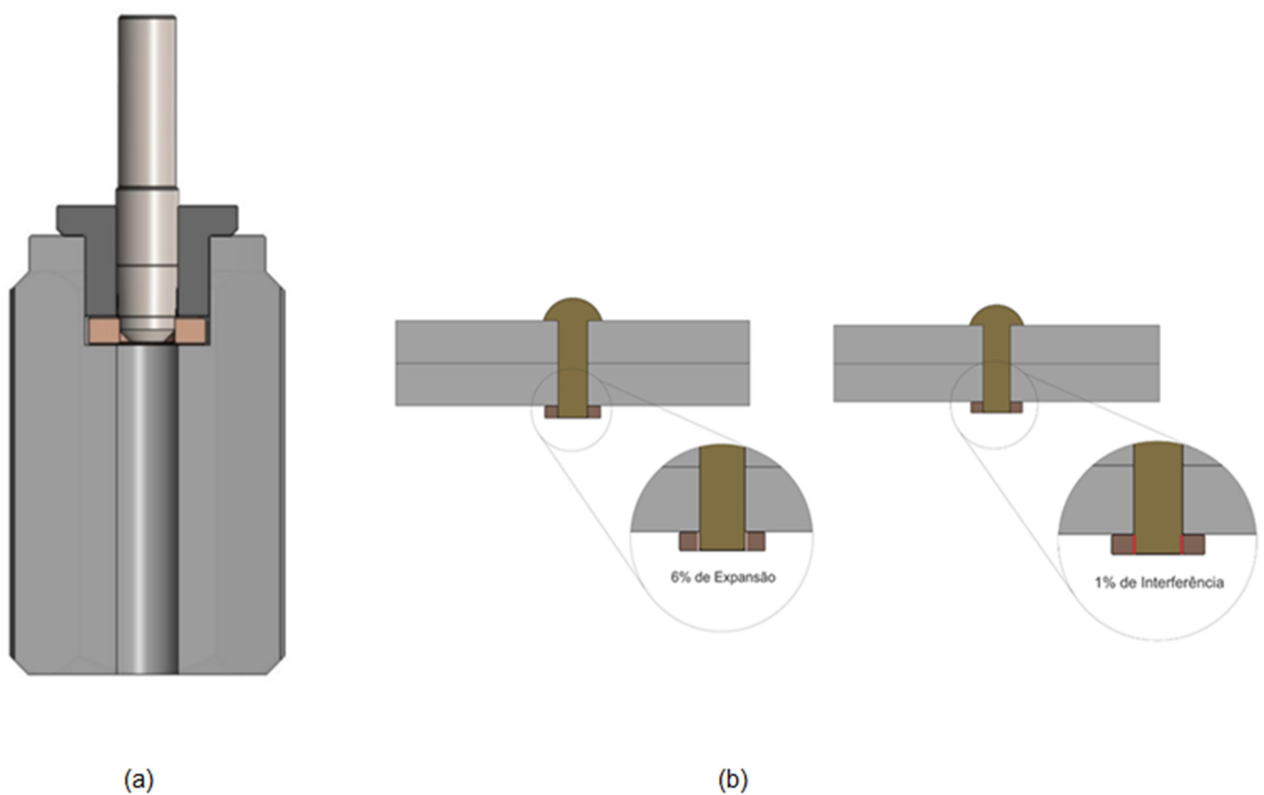


Figura 3.7 - (a) Dispositivo usado para expandir o diâmetro do fixador autotravante. (b) Etapa de inserção do rebite de inox as chapas seguido do acoplamento da cabeça autotravante ao rebite.

3.1.5 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DAS JUNTAS REBITADAS.

As chapas cruzadas unidas ao centro foram montadas no dispositivo para realização do ensaio de arrancamento, como ilustrado na Figura 3.8. Os ensaios de arrancamento foram realizados em uma máquina de tração estática modelo AUTOGRAPH AG-X 10 kN. A velocidade de arrancamento foi mantida constante em 0,5 mm/min. A Figura 3.9 mostra a montagem do dispositivo à máquina de ensaio uniaxial.



Figura 3.8 - Montagem das chapas unidas ao centro no dispositivo para realização dos ensaios de arrancamento.

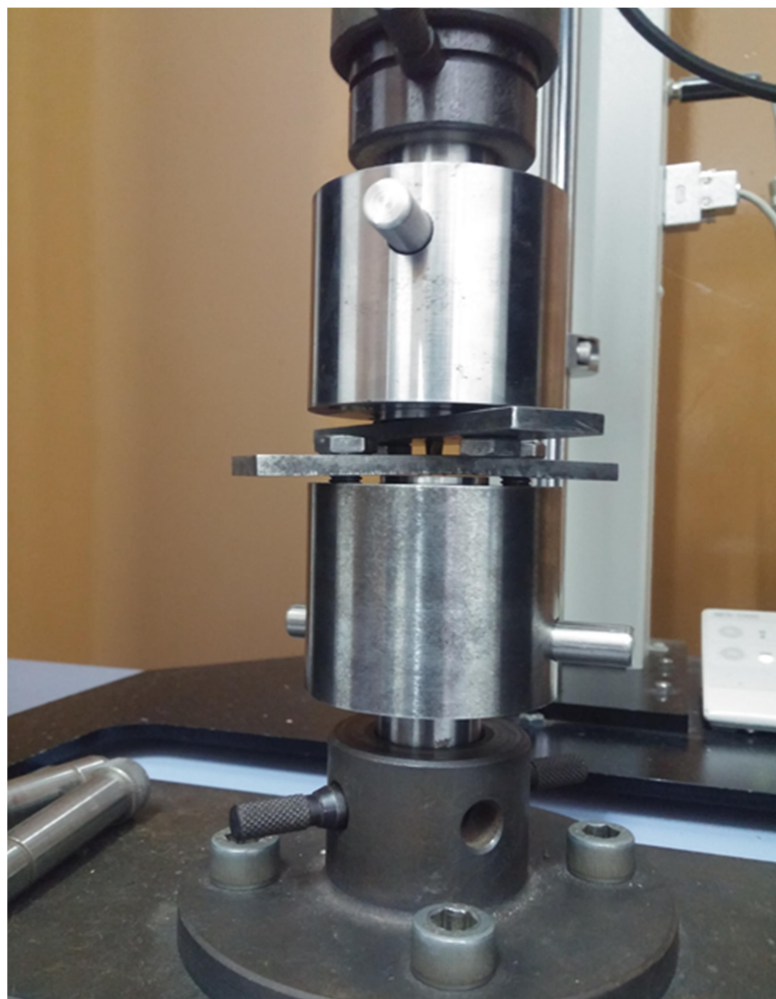


Figura 3.9 - Montagem do dispositivo a máquina de ensaio uniaxial.

3.1.6 ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM TRAÇÃO DAS JUNTAS REBITADAS.

Os ensaios de cisalhamento em tração das juntas rebitadas foram executados com velocidade de deslocamento do travessão da máquina de ensaio de 0,5 mm/min. Nossos ensaios de cisalhamento das juntas foram realizados sobre condições de carregamento excêntrico. Os resultados obtidos para os fixadores com memória de forma foram comparados com os obtidos para rebites de alumínio comercial do tipo cabeça abaulada de rebater. A Figura 3.10 ilustra a montagem das juntas rebitadas na máquina de tração, para realização do ensaio de cisalhamento das juntas.



Figura 3.10 - Montagem da junta na máquina para realização do ensaio de cisalhamento excêntrico.

CAPÍTULO IV

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

4.1.1 ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA POR MICROSCOPIA ÓPTICA.

Na Figura 4.1 são representados os lingotes obtidos a partir da fundição da liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni, com vazamento da liga fundida realizado no molde apresentado na Figura 3.1. Com o rápido resfriamento, propiciado pela lingoteira em aço, foi possível, mesmo após o tratamento de homogeneização e têmpera, a obtenção de uma granulometria média de 120 μm , como observamos na Figura 4.2. Além disso, observa-se a temperatura ambiente a presença da fase austenítica na liga.



Figura 4.1- Lingotes bruto de fusão.



Figura 4.2 - Presença da austenita na liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni.

Na figura 4.3 apresentamos as três configurações de fixadores com efeito memória de forma para união de chapas metálicas. Esses fixadores foram obtidos dos lingotes da figura 4.1, através dos processos de usinagem por torneamento para toda configurações e eletroerosão a fio na configuração em T e Y.

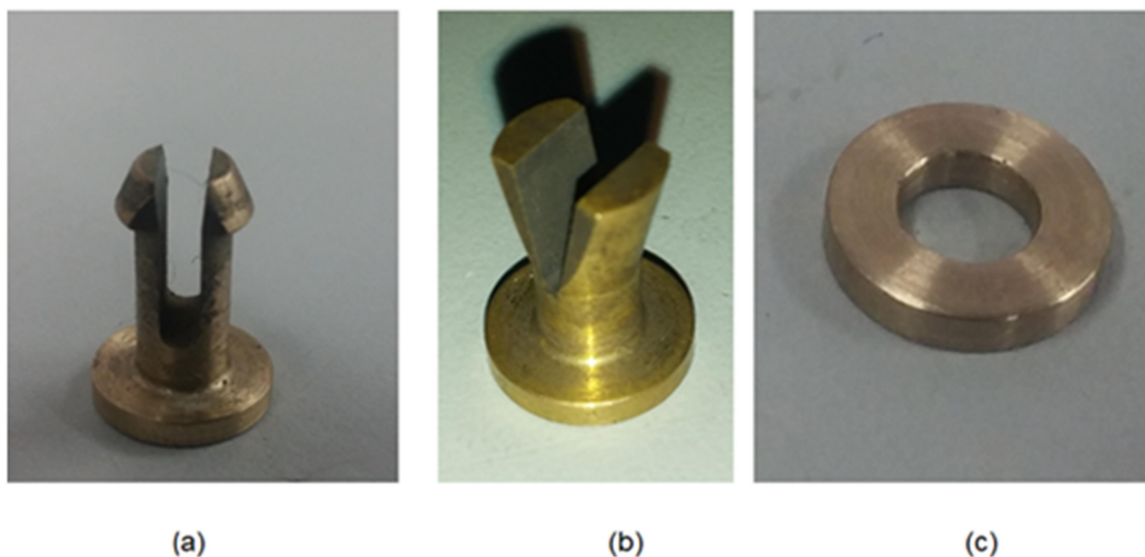


Figura 4.3 - Fixadores com memória de forma para união de chapas: (a) tipo T; (b) tipo Y; (c) cabeça autotravante.

4.1.2 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM JUNTAS REBITADAS.

Na Figura 4.4 são apresentados os ensaios de arrancamento em rebites comerciais de alumínio de cabeça chata de rebater. É possível observar, curvas típicas carga-deslocamento para os três rebites ensaiados. Verificamos que a carga aumenta linearmente na fase de deformação elástica da junta. Depois que a carga máxima é atingida, ocorre uma queda gradual da carga devido à deformação plástica do rebite, mas o deslocamento continua aumentando. Esse aumento no deslocamento corresponde ao afastamento das chapas, ou seja, processo de separação da junta, que prosseguiu até a ruptura do rebite, Figura 4.9.

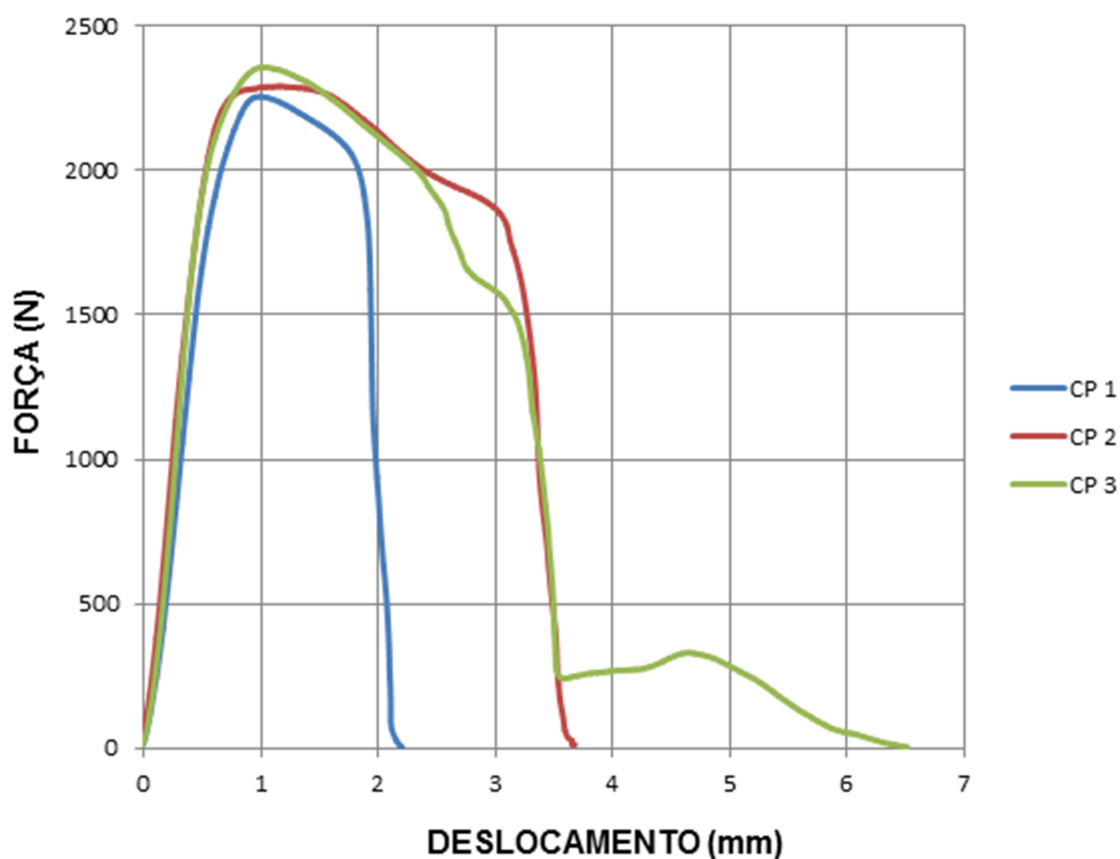


Figura 4.4 - Ensaio de arrancamento rebite maciço de alumínio tipo cabeça chata.

Os ensaios de arrancamento em rebites com memória de forma tipo Y são apresentados na Figura 4.5. De forma similar aos rebites comerciais de alumínio, os três rebites com memória de forma tipo Y, apresentaram após os

ensaios curvas típicas carga-deslocamento. Observamos que a carga aumenta linearmente na fase de deformação elástica da junta. Depois que a carga máxima é atingida, ocorre uma queda gradual da carga devido ao deslizamento do rebite no interior da chapa, que foi provocado pelo fechamento gradual das hastes do rebite, diminuindo a pressão exercida pelo rebite na chapa e consequentemente ocasionando a completa separação da junta. Vale ressaltar, que diferentemente do ocorrido com os rebites comerciais de alumínio no momento da separação, ou seja, ruptura do rebite, o rebite com memória de forma não sofreu ruptura durante o ensaio de arrancamento.

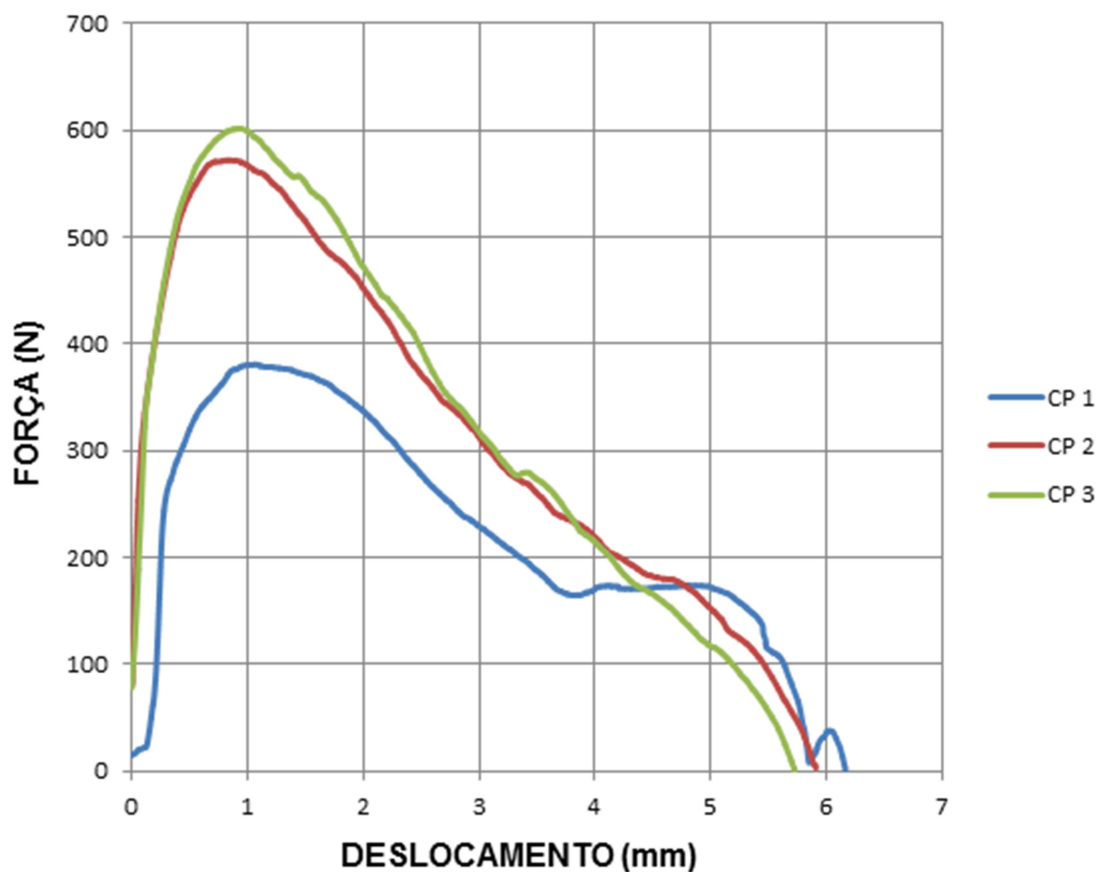


Figura 4.5- Ensaio de arrancamento rebite com memória de forma tipo Y.

Na figura 4.6 são apresentados os ensaios de arrancamento em rebites com memória de forma tipo T. Para esses rebites também observamos curvas típicas carga-deslocamento para os três rebites ensaiados. Verificamos que a carga aumenta linearmente na fase de deformação elástica da junta. Depois

que a carga máxima inicial é atingida, ocorre uma pequena queda repentina da carga devido à entrada do rebite na chapa. Essa entrada provoca uma deformação plástica na chapa, conforme observado na figura 4.7. Essa deformação plástica da chapa ocasiona um aumento gradual na carga axial da junta. Após atingir o valor máximo na carga axial provocado pela deformação plástica da chapa, ocorre uma queda brusca na carga ocasionando a separação completa da junta. De forma similar ao que aconteceu com o rebite tipo Y, os rebites em T não sofreram ruptura durante o processo de arrancamento da junta.

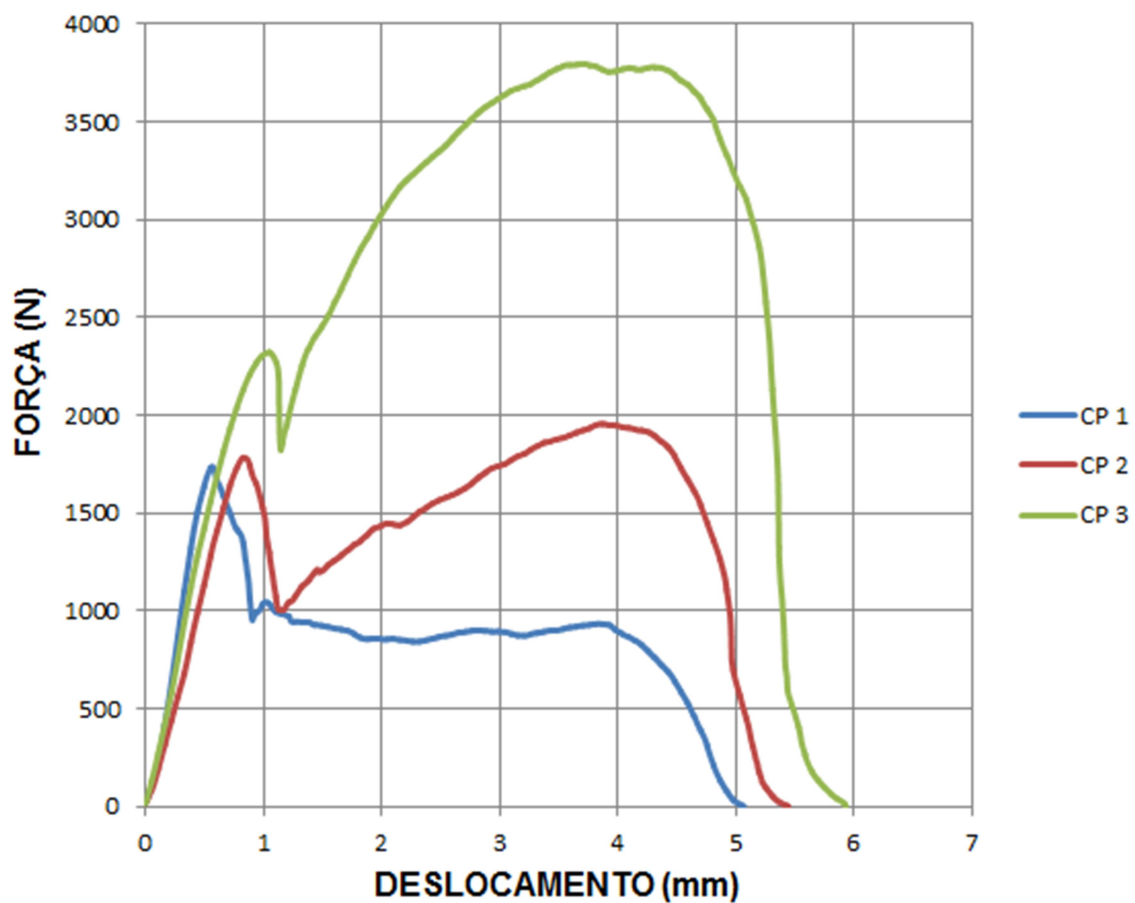


Figura 4.6 - Ensaio de arrancamento rebite com memória de forma tipo T.

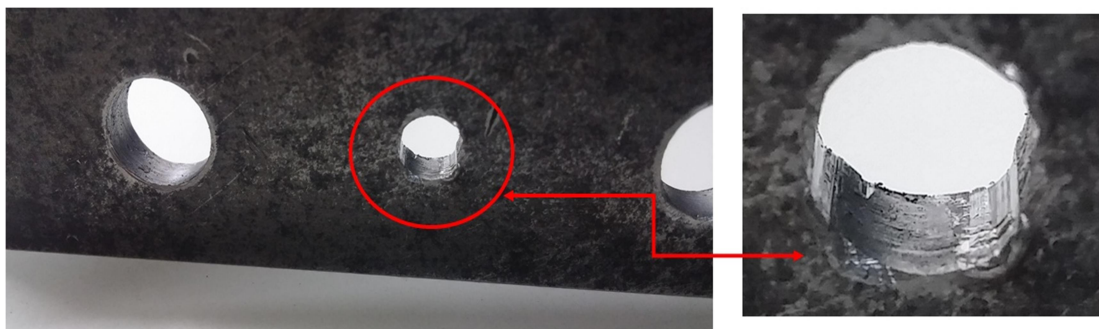


Figura 4.7 - Chapa após o ensaio de arrancamento do rebite com memória de forma tipo T.

O fixador do tipo cabeça autotravante com memória de forma para fixação de rebites convencionais apresentou um comportamento carga-deslocamento linear durante um ensaio de arrancamento, conforme verificamos na figura 4.8. A magnitude da carga axial aplicada aumentou linearmente até atingir um valor máximo. Nesse ponto, as superfícies começaram a deslizar umas sobre as outras, ocasionando uma queda linear da carga axial, até a completa separação da junta.

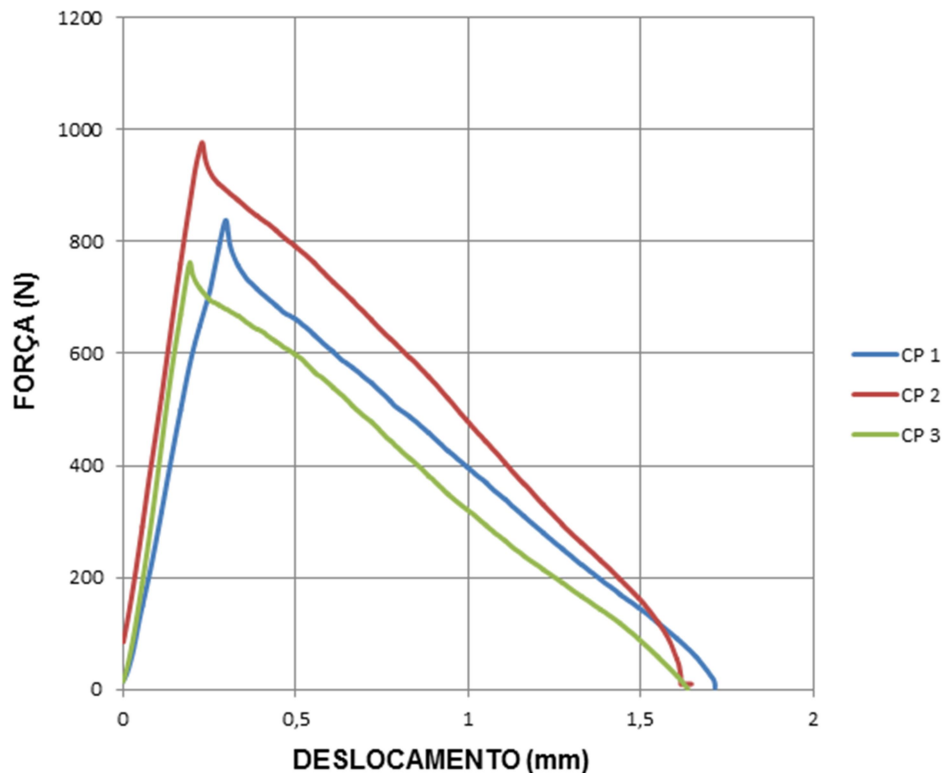


Figura 4.8 - Ensaio de arrancamento do fixador cabeça autotravante com memória de forma para fixação de rebites comerciais.

Na Tabela 4.1 apresentamos os resultados obtidos para a carga máxima e o deslocamento máximo nos ensaios de arrancamento. Podemos observar que o maior valor da carga máxima de arrancamento foi obtido pela fixador do tipo T, essa configuração também foi a que mais absorveu energia durante o ensaio. O rebite do comercial de alumínio apresentou uma carga máxima de arrancamento superior às apresentadas pelas configurações em Y e cabeça autotravante. Porém, após alcançar essa carga máxima, ocorreu uma queda gradual no esforço de tração para manter o deslocamento aumentando, até que, a carga de fratura foi atingida e a união das chapas foi desfeita. A fratura do rebite ocorreu na parte tubular superior próxima a cabeça do rebite, figura 4.9. Com relação ao deslocamento máximo, novamente a configuração em T apresentou o maior valor, e o menor valor foi apresentado pelo tipo cabeça autotravante. Este baixo valor se dar pela pouca área de contato entre a cabeça autotravante e o rebite comercial.

Podemos verificar ainda, que o rebite com memória de forma configuração em T apresentou a maior dispersão nos valores de carga máxima e deslocamento.

Tabela 4.1 – Resultados de carga máxima e deslocamento máximo no ensaio de arrancamento.

	Carga máxima (N).					Deslocamento máximo (mm).				
	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio
Comercial	2341	2318	2282	2313	29,8	0,91	1,33	0,93	1,05	0,24
Tipo T	3793	1932	1658	2461	1161	3,67	3,76	0,59	2,68	1,8
Tipo Y	600	580	377	519	123	0,9	0,64	0,91	0,81	0,15
Cabeça Autotravante	958	815	741	838	110	0,22	0,29	0,18	0,23	0,06



Figura 4.9 - Fratura do rebite comercial de alumínio durante o ensaio de arrancamento.

4.1.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM JUNTAS REBITADAS.

De acordo com KULAK et al. (2007) os ensaios de cisalhamento são divididos em dois grupos: cisalhamento axial e excêntrico. Se a linha de ação da carga aplicada passar através do centroide do grupo de fixadores, então os elementos de fixação são carregados em cisalhamento axial. Já no cisalhamento excêntrico, a carga aplicada não passa através do centroide do grupo de fixadores. Isto resulta num momento de torção no grupo de fixadores que aumenta as tensões de cisalhamento do elemento de fixação.

Nossos ensaios de cisalhamento das juntas foram realizados sob condições de carregamento excêntrico. Os resultados obtidos para os fixadores com memória de forma foram comparados com os obtidos para rebites de alumínio comercial do tipo cabeça chata de rebater.

A figura 4.10 apresenta os ensaios de cisalhamento das juntas fixadas com rebites de alumínio comercial. Verificamos que a maioria dos rebites falhou após a carga máxima ser atingida.

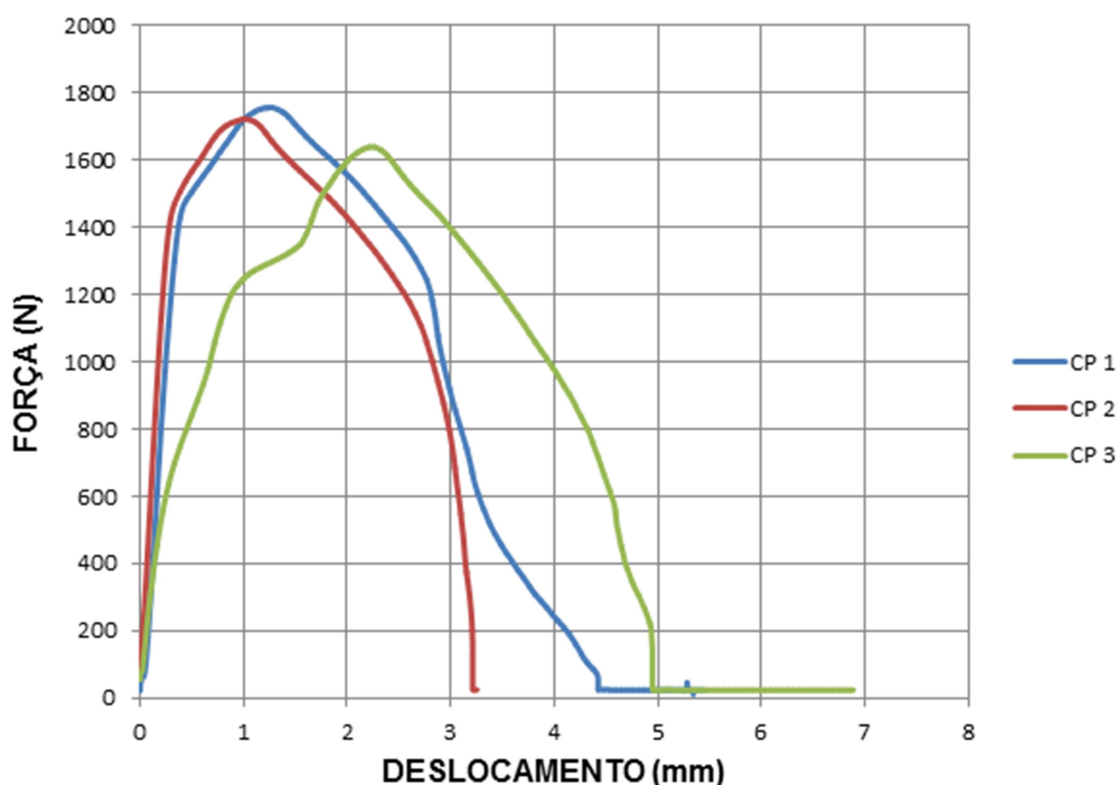


Figura 4.10 - Ensaio de cisalhamento rebite maciço de alumínio tipo cabeça chata.

As figuras 4.11 e 4.12 representam respectivamente os ensaios de cisalhamento do rebite com memória de forma configuração em Y e T. Observamos que as duas configurações apresentaram comportamento similar. Durante o ensaio de cisalhamento ocorreu um aumento linear da carga com o deslocamento. Após a carga máxima ser alcançada ocorreu a ruptura repentina do rebite.

Os rebites com memória de forma do tipo Y alcançaram valores de carga máxima superiores aos rebites com memória de forma do tipo T. Esse resultado é justificado pela diferença na seção resistente dos dois rebites. O rebite com memória de forma tipo Y apresenta uma seção resistente ao cisalhamento maior que a do rebite tipo T.

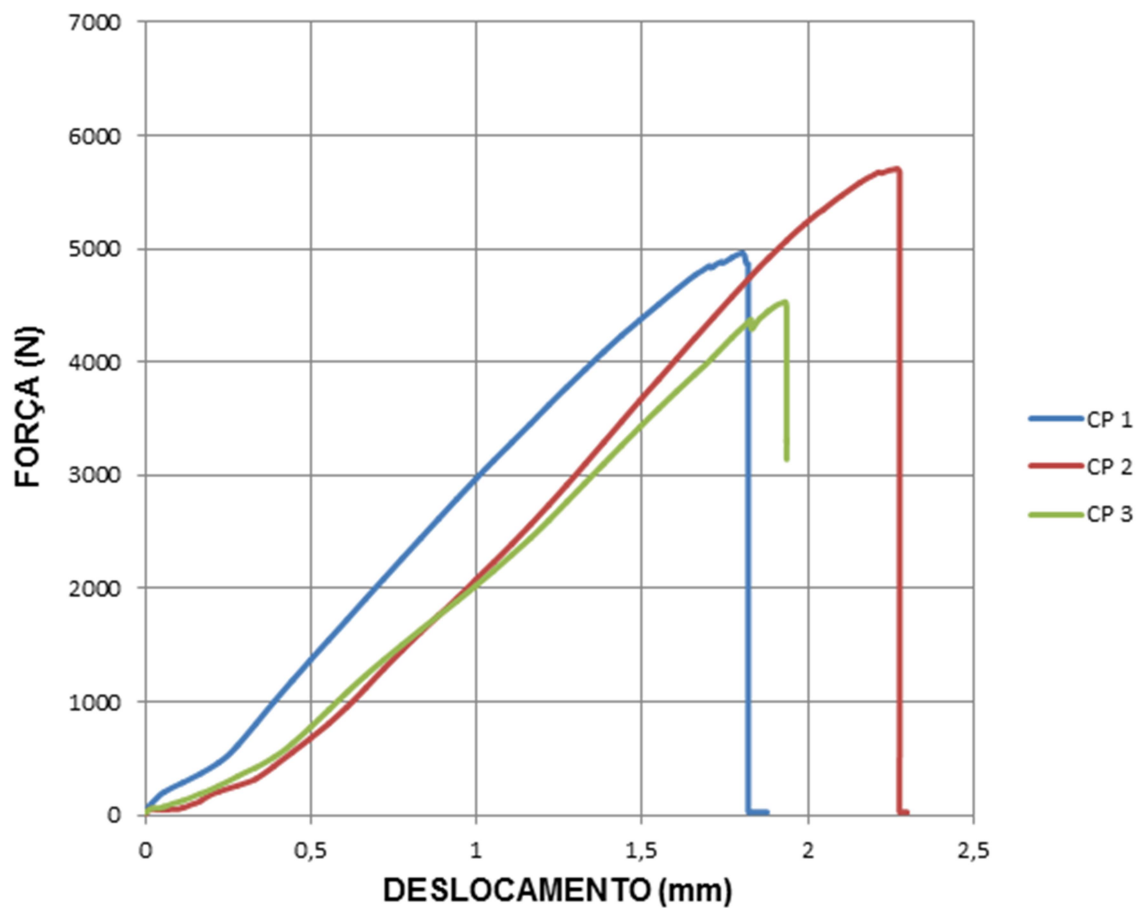


Figura 411 - Ensaio de cisalhamento rebite com memória de forma tipo Y.

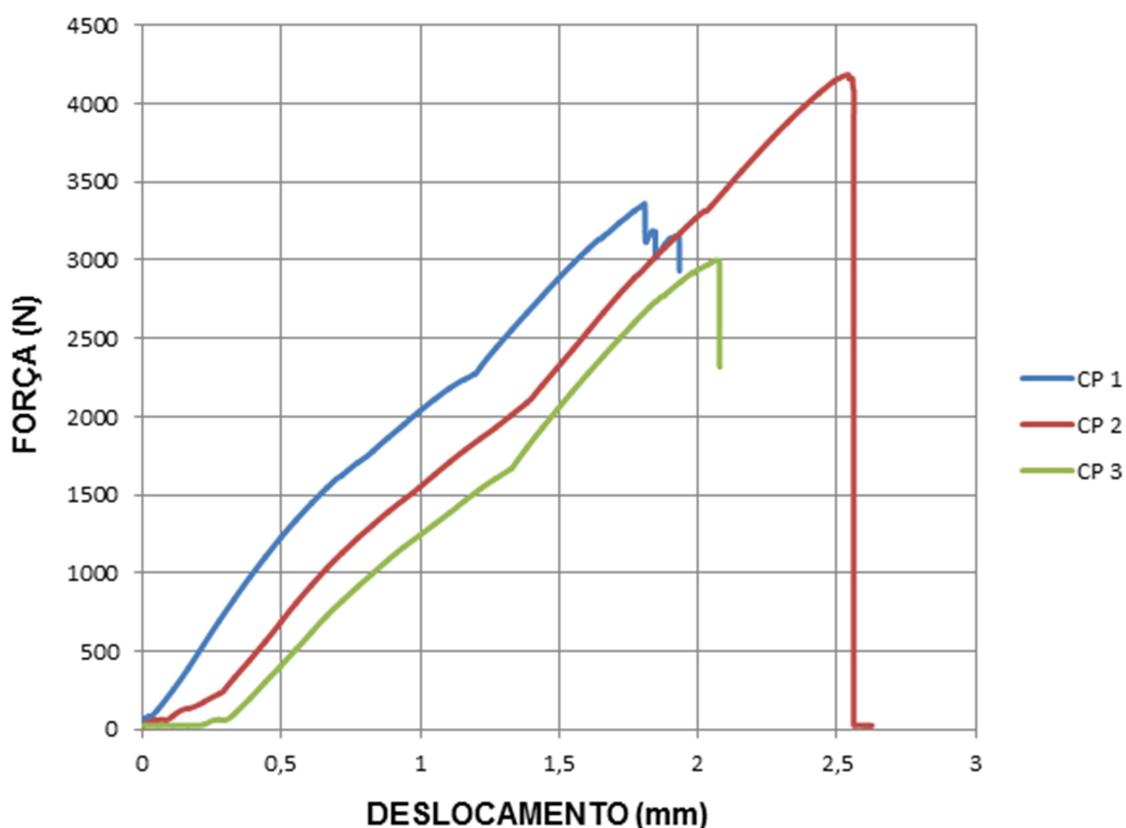


Figura 4.12 - Ensaio de cisalhamento rebite com memória de forma tipo T.

Para comparação do desempenho mecânico dos fixadores com memória de forma com os rebites de alumínio nos ensaios de cisalhamento, usamos a comparação direta dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento, conforme apresentado na tabela 4.2 e 4.3. Verificamos que os rebites de alumínio apresentaram a menor dispersão nos valores de carga máxima, enquanto os rebites com memória de forma tipo T e tipo Y apresentaram dispersões nos valores dos deslocamentos máximos similares. Conforme observamos na tabela 4.3, os rebites com memória de forma tipo Y exibiram uma força máxima no ensaio de cisalhamento de $5066 \pm 592,98$ N, um resultado 197% superior quando comparamos com os valores obtidos pelos rebites de alumínio.

Tabela 4.2 - Resultados de carga máxima no ensaio de cisalhamento.

	Área cisalhada (mm ²)	Carga máxima (N).				
		CP1	CP2	CP3	Média	Desvio
Comercial	17,80	1756	1721	1639	1705,3	60,1
Tipo T	8,56	3361	4185	2999	3515	607,8
Tipo Y	15,53	4965	5703	4530	5066	592,98

Tabela 4.3 - Resultados de deslocamento máximo no ensaio de cisalhamento.

	Área cisalhada (mm ²)	Deslocamento máximo (mm).				
		CP1	CP2	CP3	Média	Desvio
Comercial	17,80	1,2	1,0	2,2	1,4	0,64
Tipo T	8,56	1,8	2,2	2,0	2,0	0,2
Tipo Y	15,53	1,8	2,2	1,9	1,97	0,21

CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho uma liga Cu-11,8Al-0,58Be-0,5Nb-0,27Ni com memória de forma foi elaborada sob atmosfera ambiente e caracterizada por microscopia. Foram confeccionados três configurações de fixadores para união de chapas metálicas. Realizamos nas juntas fixadas com estas configurações de fixadores com memória de forma e com rebites de alumínio comercial do tipo cabeça chata, ensaios de cisalhamento e arrancamento. As conclusões são as seguintes:

- O fixador com memória de forma do tipo T obteve o maior valor de carga máxima durante o ensaio de arrancamento, porém, apresentou a maior dispersão nos valores de carga máxima em relação à média.
- Do ponto de vista de deslocamento máximo nos ensaios de arrancamento mais uma vez a configuração em T obteve o maior valor e a maior dispersão em relação à média.
- O fato de ter uma dispersão elevada esta ligada à deformação plástica ocorrida na chapa, visto que foi usado um único conjunto de chapas nos ensaios.

- Além disso, os fixadores do com memória de forma durante o ensaio de arrancamento não sofrerão ruptura, o que abre a possibilidade de serem reutilizados, diminuindo dessa forma o custo de operação.
- Nos ensaios de cisalhamento das juntas o fixador com memória de forma configuração em Y apresentou o maior valor de carga máxima que representou um valor 197% o obtido pelo rebite de alumínio comercial do tipo cabeça abaulada, mesmo sua área sendo ligeiramente menor que a do rebite comercial.
- Do ponto de vista de deslocamento máximo no ensaio de cisalhamento a configuração em T apresentou o maior valor com a menor dispersão em relação a média.
- Diante dos resultados apresentados verificamos que a obtenção de fixadores com memória de forma se mostrou viável e, representa uma alternativa competitiva em relação aos fixadores convencionais, principalmente para operações de fixação de chapas em locais de difícil acesso.

CAPÍTULO VI

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para a realização em trabalhos futuros:

- ✓ Obtenção de fixadores com memória de forma com outras configurações.
- ✓ Realização de ensaios de fadiga nas juntas.
- ✓ Modificação da interferência entre a arruela e o rebite comercial.
- ✓ Modificação da interferência entre rebite com memória de forma configuração em Y e o cone da chapa.

CAPÍTULO VII

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, V. H. C. D. Efeito da Adição de Nb e Ni em Propriedades Mecânicas de uma Liga com Efeito Memória de Forma CuAlBe. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, 2010.

BARON, MARIE-PIERRE. Microstructure ET comportement mecanique ET. Macroscopique des materiaux – genie des materiaux. Tese D. Sc., Materiaux de Lyon, France, 1998.

BLACK, B. J. Workshop Processes, Practices and Materials. Third Edition, Elsevier, 2004.

CISSE, C., ZAKI, W., ZINEB, T. B. A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys. International Journal of Plasticity, 2015.

GOETSCH, D. L., CHALK, W. S., NELSON, J. A., RICKMAN, R. L. Technical Drawing. Fifth Edition, Thomson Delmar Learning, 2005.

LECCE, L., CONCILIO, A. Shape Memory Alloy ENGINEERING for Aerospace, Structural and Biomedical Application. Elsevier, 2015.

MONTECINOS, S., CUNIBERTI, A., SEPÚLVEDA, A. "Grain size and pseudoelastic behaviour of a CuAlBe alloy." *Materials Characterization*, v. 59, n. 2, p. 117-123, 2008.

MORIN, C., MOUMNI, Z., ZAKI, W. A constitutive model for shape memory alloys accounting for thermo mechanical coupling. *International Journal of Plasticity*, 2010.

OLIVEIRA, D.F. Determinação das Propriedades Termomecânicas de Ligas Cu-Al-Ni e Cu-Al-Be, com efeito memória de forma para utilização como atuadores mecânicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, 2009.

OLIVEIRA, D. F., LIMA, S. J. G., BRITO, I. C. A., GOMES, R. M., MELO, T. A. A. "Mechanical strength evaluation of a CuAlBe shape memory alloy under different thermal conditions." *Materials Science Forum*, v. 643, p. 105-112, 2009.

SILVA, M. F. A. Obtenção de rebites com efeito memória de forma a partir da liga Cu-Al-Be-Cr. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, 2016.

SHISHKIN, S. V.; SHISHKIN, S. S. The Application of Rivets with Shape Memory in Aeronautical Engineering. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010.

SURESH, N., RAMAMURTY, U. Effect of aging on mechanical behavior of single Crystal Cu-Al-Ni shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, v. 454-455, n. 0, p. 492-499. 2007.

THAMBURAJA, P., NIKABDULLAH, N. A macroscopic constitutive model for shape-memory alloys: Theory and finite-element simulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008.

ZAK, G., KNEISSL, A.C., ZATULSKIJ, G. "Shape memory effect in cryogenic Cu-AlMn alloys". Scripta Materialia, Vol. 34, n° 3, pp. 363-367, 1996.