

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECANICA
TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECANICA

LEONARDO FERREIRA DE MELLO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE BRASAGEM POR
INDUÇÃO E BRASAGEM MANUAL VIA ENSAIOS MECANICOS**

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

PONTA GROSSA

2017

LEONARDO FERREIRA DE MELLO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE BRASAGEM POR
INDUÇÃO E BRASAGEM MANUAL VIA ENSAIOS MECANICOS**

Trabalho de Diplomação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ana Caroline Dzulinski
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo
Marenda Pukasiewicz

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE BRASAGEM POR INDUÇÃO E BRASAGEM MANUAL VIA ENSAIOS MECANICOS

por

Leonardo Ferreira de Mello

Este Trabalho de Diplomação foi apresentado em 05/12/2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Ma. Ana Caroline Dzulinski

Coorientador Dr. Anderson Geraldo
Marenda Pukasiewicz

Prof. Orientador

Responsável pelos Trabalhos Diplomação

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Membro titular

Prof. Dr. Oscar Regis Junior
Membro titular

Prof. Dr. Oscar Regis Junior
Coordenador do Curso
UTFPR - Campus Ponta Grossa

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

Eu dedico este trabalho a minha família e
a meus amigos que me deram apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma passaram em minha vida nesta fase acadêmica, aos colegas de estudo e professores que me instruíram e ensinaram me dando novos horizontes.

Agradeço a minha orientadora Ana Caroline Dzulinski e ao meu co-orientador Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, pelo tempo e compartilhamento de seu conhecimento na ajuda da realização deste trabalho.

Agradeço principalmente ao apoio e a fé depositada em mim pelos meus pais Luiz Carlos Ferreira de Mello e Suzana de Fátima Ferreira de Mello, pelo incentivo e ajuda nos momentos difíceis e as inúmeras vezes durante esta trajetória respeitando o afastamento necessário para que eu pudesse cumprir com as obrigações propostas do decorrer da vida acadêmica.

Gostaria de agradecer de forma geral a todos que direta ou indiretamente me ajudaram de alguma forma.

RESUMO

MELLO, Leonardo Ferreira de. **Análise comparativa dos processos de brasagem por indução e brasagem manual via ensaios mecânicos**. 2017. 60 f. Trabalho de Diplomação Tecnologia em Fabricação Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O desenvolvimento tecnológico e a competitividade de mercado obrigaram as indústrias a renovarem seus produtos e minimizarem seus custos. Com este objetivo, pensou-se no desenvolvimento de um processo de brasagem automatizado para tubos de alumínio antes produzidos de forma manual. Brasagem é a união das peças (de mesma liga ou de materiais dissimilares) sem que as partes a serem unidas entrem em fusão e onde apenas o metal de adição irá fundir e percorrer pela folga entre as peças por umectação, após o preenchimento da região ocorre a difusão molecular com o material base, esta ação proporciona no resfriamento uma união intermetálica. Este trabalho visa efetuar uma análise via ensaios mecânicos para comparar aspectos dos resultados de amostras submetidas nos dois processos de brasagem mostrar a viabilidade da inclusão do processo de brasagem por indução.

Palavras-chave: Brasagem. Indução. Ensaios mecânicos.

ABSTRACT

MELLO, Leonardo Ferreira de. **Comparative analysis of brazing processes by induction and manual brazing using mechanical tests**. 2017. 60 p. Work of Conclusion Course technology in mechanical manufacturing - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Technological development and market competitiveness have forced industries to renew their products and minimize their costs. To this end, it was thought to develop an automated brazing process for aluminum tubes previously produced by hand. Brazing is the joining of the parts (of the same alloy or dissimilar materials) without the parts to be joined to melt and where only the addition metal will melt and go through the gap between the pieces by wetting, after filling the region occurs to the molecular diffusion with the base material, this action provides in the cooling an intermetallic union. This work aims to perform an analysis through mechanical tests to compare aspects of the results of samples submitted in the two brazing processes to show the feasibility of including brazing process by induction.

Keywords: Brazing. Induction. Mechanical test

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Comparação entre a brasagem e alguns processos de união de metais. O sentido da flecha indica o crescimento da propriedade.....	17
Quadro 2 – Constantes ou graus de carga de alguns materiais.....	38
Figura 1 – Comparação entre junta brasada (1) e soldabrasada (2).....	18
Figura 2 – Metal de adição espalhando no metal base	20
Figura 3 – Representação do fluxo de proteção.....	25
Figura 4 - Formatos de bobina: (a) circular; (b) quadrada; (c) elíptica; (d) plana; (e) circular helicoidal; (f) circular interna	27
Figura 5 – Gráfico Tensão - deformação.....	29
Figura 6 – Gráfico limite de resistência a tração.	30
Figura 7 – Limite de escoamento	31
Figura 8 – Modulo de resiliência.....	32
Figura 9 – Representação gráfica do modulo de tenacidade	33
Figura 10 – Representação ensaio de torque	34
Figura 11 – Diagrama de tensão de cisalhamento	35
Figura 12 – Representação esquemática do ensaio de dureza Brinell	37
Figura 13 – Imagem representativa do equipamento	41
Figura 14 – Resultado de ensaio de tração.....	54
Figura 15 – Resultado de ensaio de tração.....	56
Figura 16 – Resultado de ensaio de tração.....	58
Fluxograma 1 – Criação das amostras.....	42
Fluxograma 2 – Brasagem manual	44
Fluxograma 3 – Brasagem por indução	47
Fotografia 1 – Amostras imersas para processo de limpeza.....	43
Fotografia 2 – Operação de brasagem manual	46
Fotografia 3 – Região de brasagem manual	46
Fotografia 4 – Painel de receita.....	48
Fotografia 5 – Processo de brasagem indutivo	49
Fotografia 6 – Operação de brasagem indução	50
Fotografia 7 – Região de brasagem indução	50
Fotografia 8 – Operação de brasagem indução	52
Fotografia 9 – Região de brasagem indução	52
Fotografia 10 – Região de brasagem indução.....	53
Fotografia 11 – Resultado de ensaio de tração.....	55
Fotografia 12 – Resultado de ensaio de torque em brasagem manual	56
Fotografia 13 – Resultado de ensaio de torque em brasagem por indução	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gamas de fusão e índice de brasagem para ligas comuns de alumínio. .	18
Tabela 2 – Metais de adição para ligas de alumínio.	21
Tabela 3 – Cargas recomendadas para diferentes esferas e constantes	38
Tabela 4 - Quantidade de amostras a serem realizadas por teste	51
Tabela 5 – Resultado gerais.....	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 PROCESSO DE BRASAGEM	16
2.1.1 Preparação da junta.....	19
2.1.2 Umectação.....	20
2.1.3 Difusão atômica	22
2.1.4 Capilaridade.....	22
2.1.5 Soldabilidade	22
2.1.6 Brasagem a maçarico manual	23
2.1.7 Brasagem por indução.....	26
2.2 ENSAIOS MECANICOS	28
2.2.1 Ensaio de tração	28
2.2.1.1 Limite de resistência a tração	29
2.2.1.2 Limite de escoamento	30
2.2.1.3 Limite de elasticidade.....	31
2.2.1.4 Modulo de resiliência	32
2.2.1.5 Modulo de tenacidade.....	32
2.2.2 Ensaio de torque.....	33
2.2.2.1 Limite de escoamento ao cisalhamento	34
2.2.2.2 Limite de resistência ao cisalhamento	35
2.2.2.3 Modulo de elasticidade transversal	35
2.2.3 Ensaio de dureza.....	36
2.2.3.1 Dureza Brinell.....	36
3 DESENVOLVIMENTO.....	40
3.1 MATERIAIS E METODOS	40
3.1.1 Produção das amostras	41
3.1.2 Ensaio mecânicos	51
3.1.2.1 Ensaio de tração	51
3.1.2.2 Ensaio de torque	52
3.1.2.3 Ensaio de dureza	53
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	54
4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	54
4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE TORQUE.....	55
4.3 RESULTADOS DE DUREZA.....	57

5 CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A - Tabelas de resultados	61

1 INTRODUÇÃO

A técnica de união por brasagem é, provavelmente, a mais antiga forma de unir os materiais, sem considerar os meios mecânicos. Além de ser uma técnica de união sabiamente antiga, a brasagem é até hoje amplamente utilizada em inúmeras aplicações, devido a capacidade de unir materiais de natureza muito distinta e com pequenas seções transversais, utilizadas em autopeças, refrigeradores, trocadores de calor, entre outros. Tem ainda a grande vantagem de permitir a união de materiais de difícil execução por outras técnicas de união. (ALCAN, 1993).

Existem diversas definições de brasagem, A AWS (*American Welding Society* – Sociedade Americana de Solda), define a brasagem como “processo de união de materiais com adequado aquecimento, sendo utilizados um metal de adição cuja temperatura de fusão é superior a 450° e inferior a temperatura de início de fusão (*Tsolidus*) dos materiais base. O metal de adição preenche a folga entre os materiais por efeito capilar”

Já a norma DIN 8505 define brasagem como “um processo térmico para preenchimento de juntas e revestimentos de materiais, onde ocorre uma fase fluida, obtida pela fusão de um metal de adição (brasagem por fusão) ou por difusão na superfície de união (brasagem por difusão). A *Tsolidus* dos materiais base não é atingida”.

Para a brasagem de alumínio os métodos empregados pela indústria são a brasagem manual por maçarico e a brasagem por forno, sendo a brasagem por indução uma nova tecnologia e capaz de derivar inúmeras oportunidades de novos estudos. Com isso em mente e a necessidade de uma maior produtividade no processo de brasagem de tubos, foram implementadas máquinas de indução para suprir esta necessidade e aliviar a carga dos processos de brasagem manuais realizada por maçaricos, porém, mantendo as especificações de qualidade.

Para este trabalho, propõe-se um estudo comparativo via ensaios mecânicos de dois processos de brasagem, usando os processos de brasagem manual, onde utiliza-se o calor de um ou mais maçaricos para brasagem, e brasagem por indução, onde o calor para a brasagem é obtido por uma corrente elétrica alternada induzida nas peças a serem brasadas. O intuito fundamenta-se na análise comparativa entre os dois processos, verificando-se se são mantidas as mesmas qualidades e especificações desejadas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a eficiência do processo de brasagem manual com o processo realizado por máquina de indução elétrica.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Levantar teoricamente as principais características do processo de brasagem manual e realizado por máquinas de indução;
- Selecionar a amostra a ser submetida aos processos;
- Executar os processos de brasagem;
- Submeter as amostras aos testes para extração de dados;
- Analisar os dados e comparar os processos;

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está delimitada a somente dois processos de brasagem por maçarico manual e por indução, pois tem a intenção de mostrar que dois processos distintos podem replicar as mesmas características mecânicas de seus produtos. Foram considerados estes dois processos pois as características dimensionais dos produtos requeriam gabaritos específicos para cada e o processo de brasagem por indução possui maior facilidade de ajuste para os mesmos.

Os fatores de geometria da peça e características dos suportes para brasagem não são analisados, tendo como premissa de que foram projetados corretamente e de acordo com especificações técnicas.

Os testes ocorreram no parque fabril de uma empresa conceituada da região dos Campos Gerais com atuação em diversos segmentos do mercado automotivo.

1.4 JUSTIFICATIVA

Por motivos de desempenho do processo produtivo e almejando a redução de refugo, o desenvolvimento deste trabalho originou-se de um estudo de caso em uma empresa multinacional da região dos Campos Gerais onde houve a

necessidade de um processo mais robusto de produção, com maior produtividade, porém, mantendo os mesmos padrões de qualidade oriundos do processo tradicional utilizado pela empresa.

Para que a pesquisa pudesse ser detalhada os seguintes temas em relação ao processo de brasagem: preparação da junta, umectação, difusão atômica, capilaridade, soldabilidade, material de adição e fluxo de brasagem foram abrangidos neste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSO DE BRASAGEM

Para uniões entre metais, temos dois grupos de processo, sendo eles: a união intermetálica e a união mecânica. Os processos de união intermetálica são os processos onde se faz o uso de parafusos, pinos, rebites, sendo sua principal característica há necessidade de montagem e desmontagem dos elementos.

O processo de união mecânica consiste geralmente onde um material preenche uma fenda entre as partes, unindo umas a outra.

A soldagem em alumínio, que é o material utilizado neste trabalho, consolidada nos anos 40 nos Estados Unidos e Europa, esteve praticamente desconhecida no Brasil durante muitos anos. A ideia de que não era possível soldar alumínio permaneceu por longos anos em nosso meio industrial (ALCAN,1993).

Até meados da década de 70 a soldagem em alumínio e suas ligas era, no Brasil, uma pratica de poucos iniciados. Sua maior aplicação ocorreu a partir deste período devido ao incentivo de centros de usinagens e industrias do setor metal mecânico.

Soldagem é a união de peças por aquecimento, onde as partes a serem unidas estão separadas por uma fenda, e a região próxima a fenda será aquecida até a temperatura de fusão do material a ser soldado. Quando o material fundido de ambas as partes entrarem em contato um com o outro e, após o resfriamento destes materiais irá formar uma junção entre eles, essa junção é conhecida como solda. Em grande parte dos processos de soldagem é inserido um material de adição nesta região.

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo (BRANDI, 2004)

Dentre os processos de soldagem, o que será utilizado neste trabalho, é o processo de brasagem. Brasagem é um processo de união de metais em que um material de adição, possuindo ponto de fusão inferior a $T_{solidus}$ do material dos componentes (porem acima de 449°C, para ligas de aluminio), é aquecida juntamente com o metal base até se fundir e por efeito de capilaridade, este material

de adição fundido preenche o vazio da junta a ser constituída. Os métodos mais usados na indústria de brasagem são: brasagem em forno; brasagem por imersão em banho de sal; Brasagem a vácuo; brasagem a chama automática; brasagem a maçarico. Com exceção da brasagem por vácuo, todos os outros processos de brasagem requerem o uso de um fluxo que torna a brasagem entre dois componentes mais fácil (ALCAN,1993).

O quadro 01 mostra uma relação das características do processo de brasagem em relação a outros processos de união de metais.

Quadro 1 – Comparação entre a brasagem e alguns processos de união de metais. O sentido da flecha indica o crescimento da propriedade.

Possibilidade de junção de peças de diferentes metais	W → S,B → M
Resistencia mecânica	S → B → W → M
Resistencia a temperatura elevada	S → B → W,M
Possibilidade de evitar distorções	W → B → S → M
Possibilidade de desmontagem da união	M
Selagem dos recipientes	S,B
Consumo de energia para a operação	S → B → W
Possibilidade de união de peças grandes e espessas	S → B → W → M
Observações: B – brasagem; M – União mecânica; S – Soldagem branda; W – Soldagem por fusão	

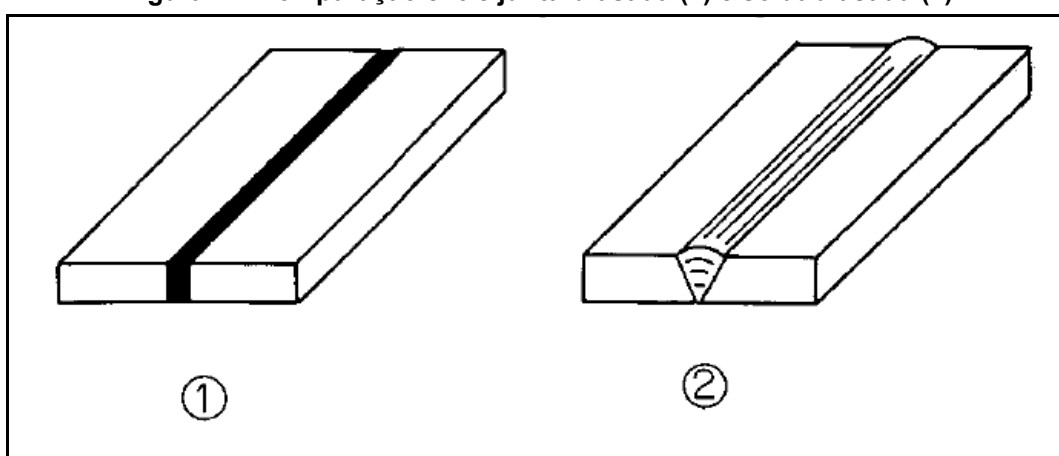
Fonte: Wainer, 2004.

Os processos de brasagem podem ser divididos em três tipos: Brasagem propriamente dita, soldabrasagem e soldagem branda. Como o metal de adição é fundido, ele deve ter a temperatura de fusão mais baixa que a do metal base. A partir deste conceito, pode-se melhor definir a brasagem e a soldagem branda. Sendo assim, segundo:

- Brasagem é o processo de soldagem onde o metal de adição tem sua temperatura de fusão compreendida entre as temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal base e acima de, aproximadamente, 400°C. (INFOSOLDA,1997)
- Soldagem branda é o processo de soldagem onde o metal de adição tem temperatura de fusão compreendida entre as temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal de base e também abaixo de, aproximadamente, 400°C. (WAINER, 2004)

- Soldabrasagem ou soldabrasada utiliza um metal de adição com temperatura acima de 450°C, porem abaixo do ponto de fusão do metal de base; o metal de adição não se distribui por capilaridade, mas é adicionado na junta por meio de vareta ou por arco elétrico; o metal de base não se funde, somente o metal de adição. O projeto de juntas e o equipamento para a soldabrasagem são os mesmos utilizados na soldagem oxicom bustível.

Figura 1 – Comparação entre junta brasada (1) e soldabrasada (2)



Fonte: Wainer, 2004.

Grande parte das ligas de alumínio podem ser brasadas, as ligas não-tratadas termicamente são geralmente as mais utilizadas, desde que seu teor de magnésio não ultrapasse 2,0%, que as torna mais difíceis de brasar devido a sua tenacidade.

Tabela 1 - Gamas de fusão e índice de brasagem para ligas comuns de alumínio.

Liga	Intervalo de fusão		Índice de brasagem
	°C	°F	
Ligas não tratáveis pelo calor			
1350	646-657	1195-1215	A
1100	643-657	1190-1215	A
3003	643-654	1190-1210	A
3004	629-652	1165-1205	B
5005	632-652	1170-1205	B
5050	627-652	1160-1205	B
5052	593-649	1100-1200	C

Liga	Intervalo de fusão		Índice de brasagem
	°C	°F	
Ligas tratáveis pelo calor			
6053	593-652	1100-1205	A
6061	593-649	1100-1200	A
6063	616-654	1140-1210	A
6951	616-654	1140-1210	A
7005	607-649	1125-1200	B
Ligas de Fundição			
443.0	574-632	1065-1170	B
356.0	557-613	1035-1135	B
A – Fácil para brasar			
B – Difícil, mas possível de soldar			
C – Impraticável de soldar			

Fonte: ASW, 1986.

Em um processo de brasagem, além de uma boa técnica deve-se entender os passos de preparação da junta, umectação, difusão atômica, capilaridade, soldabilidade, material de adição e fluxo de brasagem para uma boa execução de processo.

2.1.1 Preparação da junta

Deve-se preparar a junta para permitir que a brasagem ocorra por penetração do metal de adição por capilaridade entre os materiais a serem unidos. Na preparação deve-se remover todo tipo de ranhuras, marcas, impurezas e rebarbas na superfície da peça. Quanto mais lisa a superfície, melhor será o resultado do processo. A limpeza das partes brasadas é um fator de grande influência no resultado do processo de brasagem, pois a sujeira dificulta o processo de umectação, como consequência disto temos: porosidade, baixa penetração do metal de adição, inclusão de impurezas e formação de camadas intermetálicas.

O processo de limpeza pode ser:

- Processo mecânico: Existem dois tipos – manual e automático. O processo manual pode ser através de ferramentas como lixas,

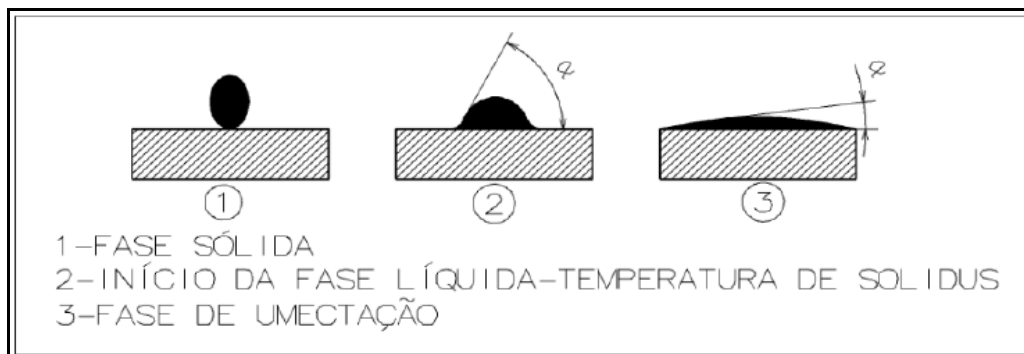
rasquetes, limas, onde a camada da superfície é levemente atacada sem deixar marcas ou ranhuras. Após o uso destas ferramentas deve-se limpar a região atacada com produtos não agressivos, como detergentes, álcool através de um pano umedecido. O processo automático pode ser através de equipamentos como tamboreadores, centrifugas e vibradores, junto de produtos especiais para limpeza.

- Processo químico: Processo realizado através do uso de solventes orgânicos, onde as partes a serem brasadas são imersas em um tanque com estes produtos ou realizado por vapor. Este processo é comumente utilizado quando as peças a serem brasadas são frágeis ou danificadas facilmente. Em casos onde a superfície da peça está oxidada, é realizado anteriormente um processo de decapagem por ácido clorídrico e posteriormente lavagem em água e neutralização alcalina (BRANDI, 2004).

2.1.2 Umectação

Umectação é o processo de quando o metal de adição no estado líquido se espalha sob o metal base no estado sólido molhando a mesma e aumentando a sua superfície.

Figura 2 – Metal de adição espalhando no metal base



Fonte: Adaptação manual Infosolda, 1997.

Como no processo de brasagem somente o metal de adição se funde, recomenda-se uma diferença mínima de 100°C entre os pontos de fusão do material base com a temperatura de fusão (*T_{liquidus}*) do metal de adição. A seleção do metal

de adição depende de três fatores basicamente: natureza do metal; forma da junta e método de montagem; e método de aquecimento. (Wainer, 2004).

Tabela 2 – Metais de adição para ligas de alumínio.

AWS Classe (a)	Liga	Composição Nominal % (b)		Intervalo de Fusão (°C)	Intervalo de Brasagem (°C)	Formas (c)	Aplicações Processos (d)
		Si	Mg				
BAISi -2	4343	7,5		577-613	599-621	C,S	D,F
BAISi-3(e)	4145	10		521-585	571-604	R,S	D,F,T
I3AISi-4	4047	12		577-582	582-604	PA,P,R,S	D,F,T
BAISi -5(f)	4045	10		577-591	588-604	C,S	D,F
BAISi -6(g)		7,5		559-607	599-621	C	VF
BAISi -7(g)	4004	10	1,5	559-596	588-604	C	VF
BAISi -8(g)		12	1,5	559-579	582-604	C	VF
BAISi -10(g)		11	2,5	559-586	582-604	R	VF
BAISi -11(g,h)		10	1,5	559-596	588-604	C	VF
-	4004	8,5		577-602	592-613	C	D,F

(a) AWS A5.8-8.1. Especificação para metal de adição de brasagem;

(b) Restante Al;

(c) C – chapa “CLAD”, P – Pó, R – Vareta ou arame, S – chapa, PA – Pasta;

(d) D – Imersão, F – forno, T – tocha, VF – forno a vácuo;

(e) Também contém 4% Cu;

(f) Também contém 0,2% Ti;

(g) Intervalo de fusão na atmosfera ambiente. Ponto de fusão no vácuo é diferente;

(h) Também contém 0,1% Bi.

Fonte: Alcan, 1993.

Para juntas de melhor qualidade, deve-se empregar metal de adição que, além de possuir baixa temperatura da linha *Tliquidus*, deve se solidificar em estreita faixa de temperatura. A melhor qualidade é obtida quando a peça é aquecida a uma temperatura baixa em tempo curto, reduzindo o risco de alteração das propriedades do metal de adição no material de base e o risco de solidificação antes do preenchimento da junta (AWS, 1986).

2.1.3 Difusão atômica

Processo espontâneo de transporte de átomos do sistema cristalino de um material para outro. Acontece em duas fases. A primeira chamada de ancoragem, onde com o aquecimento, os grãos do material base se distanciam o metal de adição no estado líquido penetra entre estes grãos. No resfriamento os grãos se atraem, contraindo o metal de adição, gerando o aprisionamento do metal de adição entre os grãos do material base. A segunda fase é a difusão dos átomos, onde com a energia térmica do metal de adição e do material base, e a diferença de energia física entre o metal de adição e o material base, na forma líquida e sólida, respectivamente, o átomo de metal de adição é diluído com o átomo com o material base, formando um nova estrutura cristalina do material base, que não se consegue mais se remover, dando origem a uma camada intermetálica, que quando verificada através de uma micrografia, apresenta-se como uma fina linha escurecida entre o metal de adição e o material base. (INFOSOLDA,1997).

2.1.4 Capilaridade

Fenômenos físicos responsáveis pela atuação do metal de adição no estado *Tliquidus* é forçado a descer e preencher as superfícies a serem brasadas.

A folga estabelecida, densidade e viscosidade do líquido fundido e a energia na superfície são fatores que influenciam na penetração por capilaridade (INFOSOLDA,1997)..

2.1.5 Soldabilidade

A AWS, 1986, define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Assim, se tem 3 propriedades principais:

- Compatibilidade entre materiais: umectação do metal de adição no material base.

- Confiabilidade construtiva: garantir a qualidade da solda com as características desejadas.
- Índice de brasagem: o processo produtivo serial não irá agregar valores altos para atingir o resultado esperado.

As vantagens da brasagem variam de acordo com o método de aquecimento empregado, mas, em geral, apresentam:

- Baixo custo, pois consome menos energia devido ao menor tempo de execução;
- Menor tensão de resfriamento, modificação da estrutura do metal e menor deformação;
- União de materiais diferentes.

Porém, como todo processo, o processo de brasagem também apresenta desvantagens em relação a solda, tais como:

- Menor resistência quando exposta a maiores temperaturas
- Exige mais preparação dos materiais;
- Maior necessidade de fluxos de adição;
- Custo superior do metal de adição (ALCAN,1993).

2.1.6 Brasagem a maçarico manual

A brasagem a maçarico, é uma das mais utilizadas tanto manualmente como por meios automatizados devido a sua simplicidade de execução e o mais aprimorado para fazer junções em conjuntos em que todas as partes são razoavelmente acessíveis a chama, de modo que o operador possa aquecer todas as regiões da junta uniformemente até a temperatura de brasagem. A técnica é de fácil assimilação, e qualquer operador que saiba usar uma chama oxiacetilênica pode ser instruído de como fazer juntas brasadas sem defeitos. Os custos são relativamente baixos, além da área necessária para realizar o trabalho ser pequena. Portanto, em muitas aplicações, a brasagem a maçarico pode ser uma boa alternativa para a soldagem por fusão, especialmente em espessuras de metal até 3,0 mm. (ALCAN,1993)

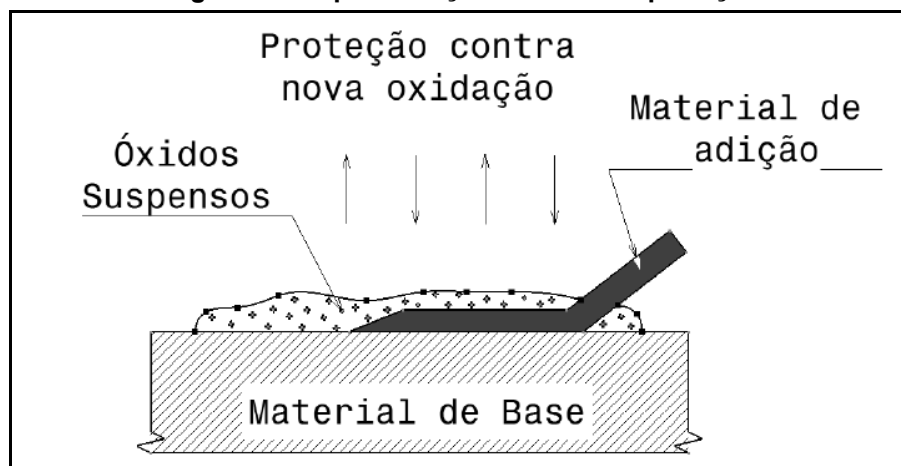
Esses procedimentos podem ser divididos em seis etapas, segundo Wainer (2004):

1° etapa: Estabelecimento da folga entre as peças – A penetração do metal de adição se dá por capilaridade, sendo importante manter folga, dentro dos limites determinados, entre as peças a serem unidas. Os limites são determinados através de experiências, usualmente, a folga permanecerá na faixa de 0,02 a 0,08mm. Deve-se considerar também a dilatação térmica, devido as temperaturas obtidas no processo de brasagem, o cálculo de dilatação térmica deve ser feito considerando as dimensões e a forma das peças na região da junta aquecida e os coeficientes de dilatação térmica dos metais da peça.

2° etapa: Limpeza das peças – O metal de adição somente irá fluir pela superfície das peças se as mesmas estiverem limpas, isentas de qualquer tipo de sujeira. Óleos, graxas, resíduos ou qualquer espécie de sujeira impedem o contato com o metal base, criando dificuldades para realização do processo. Dependendo do nível de sujeira na superfície, várias formas de limpeza podem ser utilizadas, desde solventes orgânicos ou soluções alcalinas para remoção de sujeiras leves até decapagem, jato de areia, lixamento, dentre outros, para remoção de maiores dificuldades. Após os processos de limpeza, as peças devem ser lavadas e secadas para evitar a corrosão.

3° etapa: Fluxagem da peça – Os fluxos são agentes químicos que removem resíduos de óxidos deixados pelo processo de limpeza e, principalmente, os óxidos formados durante o processo de brasagem, também criam uma proteção ao oxigênio na atmosfera ambiente na região da junção. Os fluxos podem ser aplicados na forma de pastas, líquidas ou por imersão das peças e sua seleção depende do tipo do metal base a ser brasado, podendo ser a base de cloreto, a base de fluoretos ou fluxo não corrosivo.

Figura 3 – Representação do fluxo de proteção



Fonte: Adaptação Manual Infosolda, 1997.

Para a escolha do fluxo, recomenda-se que o mesmo tenha início de atuação há, aproximadamente, 50°C abaixo da temperatura *Tliquidus* do metal de adição.

4° Etapa: Montagem das peças – As peças a serem unidas devem ser alocadas de forma a manter a folga estabelecida durante todo o processo de brasagem. Para que isso ocorra, se faz o uso de dispositivos, gabaritos e ferramentas de fixação para garantir esta folga entre as peças, em caso de produção contínua, esses gabaritos devem ser projetados para apresentar facilidade de manejo das peças. Os dispositivos devem ser construídos de materiais de baixa condutibilidade térmica.

5° Etapa: Brasagem das peças – Deve-se aquecer a região das peças a serem unidas com o uso de um maçarico a chama de gás, sendo o gás mais comum a ser utilizado o oxiacetileno. Este aquecimento deve ser dado de forma uniforme em ambas as peças. O metal de adição é pré-colocado antes de iniciar-se o aquecimento, recomenda-se que o metal de adição tenha o ponto da linha *Tliquidus* a mais baixa possível em relação ao material de base, para que não ocorra a fusão acidental entre os dois. Em qualquer situação, contudo, o metal de adição deve ser compatível com o metal de base para permitir a formação de uma interface aderente, de junta resistente a esforços mecânicos e à corrosão. A capacidade do metal de adição “melhorar” o metal de base é indispensável, como é também fundamental que o metal de adição tenha suficiente fluidez para penetrar por

capilaridade em todos os cantos da junta. (BRESCIANI, 1974). O aspecto do fluxo é um bom indicador de que a temperatura e o tempo de processos estão corretos.

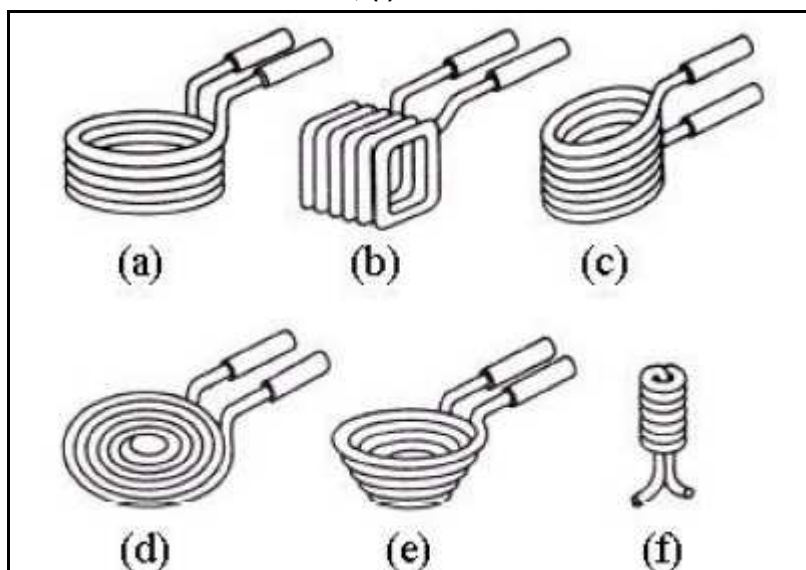
6° Etapa: Limpeza da junta brasada – Durante o processo de resfriamento da peça brasada, já se inicia o processo de, sendo que o mesmo jato de água utilizado para resfriar a peça acaba limpando a junta brasada. Após esta limpeza inicial, se faz a limpeza por imersão, utilizando água e soluções ácidas para remoção de excessos de fluxos, sujeiras superficiais devido ao superaquecimento durante o processo de brasagem. A lavagem e a secagem das peças é necessária para evitar a corrosão nas áreas brasadas.

2.1.7 Brasagem por indução

A brasagem por indução é um processo que utiliza um campo magnético gerado por um conjunto de bobina ou indutor para união de ligas de metais base e adição. Este campo magnético dissipa calor devido as correntes elétricas e aquece a peça a ser brasada. Porém, temos um aquecimento limitado a somente uma pequena área da peça, o calor se propaga as áreas restantes por condução ou pelo deslocamento da peça em relação a bobina.

Com o formato de bobina adequado para o material a ser brasado, pode-se obter um processo mais rápido em relação ao tempo de execução. Materiais não magnético, tais como alumínio e cobre, necessitam de um tempo maior de execução em relação a materiais magnéticos. Devido a isso, deve -se levar em consideração no projeto da uma bobina várias características do transformador a ser utilizado para geração do campo magnético e o material a ser brasado, outras características a serem consideradas são qualidade e produtividade do processo.

Figura 4 - Formatos de bobina: (a) circular; (b) quadrada; (c) elíptica; (d) plana; (e) circular helicoidal; (f) circular interna



Fonte: AWS, 1986.

Para este procedimento pode-se considerar as etapas 1, 2, 3 e 4 do processo de brasagem manual por maçarico. Assim:

5º Etapa: Brasagem das peças – Deve-se aquecer a região das peças a serem unidas, descendo a bobina do indutor até a região ser brasada, o indutor gerará um campo magnético e este campo magnético por sua vez aquecerá a região de brasagem. Este aquecimento deve ser de forma uniforme, o formato da bobina é fundamental para que isso ocorra. O metal de adição é pré-colocado antes de iniciar-se o aquecimento, recomenda-se que o metal de adição tenha o ponto de fusão o mais baixo possível em relação ao material de base, para que não ocorra a fusão acidental entre os dois. Em qualquer situação, contudo, o metal de adição deve ser compatível com o metal de base para permitir a formação de uma interface aderente, de junta resistente a esforços mecânicos e à corrosão. A capacidade do metal de adição “melhorar” o metal de base é indispensável, como é também fundamental que o metal de adição tenha suficiente fluidez para penetrar por capilaridade em todos os cantos da junta. (BRESCIANI, 1974). O aspecto do fluxo é um bom indicador de que a temperatura e o tempo de processos estão corretos.

6º Etapa: Limpeza da junta brasada – Durante o processo de resfriamento da peça brasada, já se inicia o processo de limpeza, sendo que o mesmo jato de água utilizado para resfriar a peça acaba limpando a junta brasada. Após esta limpeza

inicial, se faz a limpeza por imersão, utilizando água e soluções ácidas para remoção de excessos de fluxos, sujeiras superficiais devido ao superaquecimento durante o processo de brasagem. A lavagem e a secagem das peças são necessárias para evitar a corrosão nas áreas brasadas.

2.2 ENSAIOS MECANICOS

É a determinação das propriedades mecânicas de um material metálico onde são realizados vários ensaios. Esses ensaios geralmente são destrutíveis, pois fazem com que o corpo de prova tenha sua completa ruptura ou a sua inutilização. A escolha do ensaio mecânico mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material (corpo de prova), vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir (SOUZA, 1982).

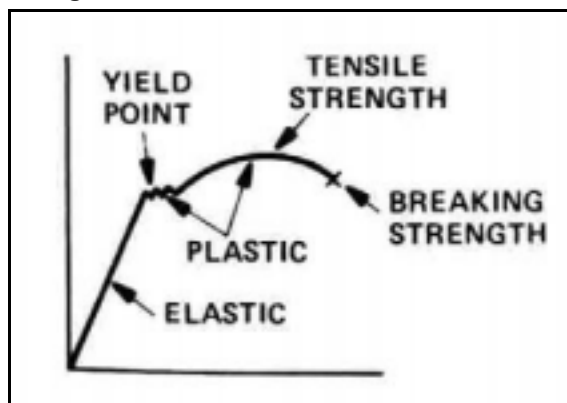
2.2.1 Ensaio de tração

Consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede-se a variação no comprimento (l) como a função da carga aplicada (p), e após o tratamento adequado dos resultados obtém-se uma curva tensão (σ) *versus* a deformação (e) do corpo de prova. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria, devido a vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Dentre os principais destacam-se: limite de resistência à tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de elasticidade (E), módulo de resiliência (U_r), módulo de tenacidade (U_t), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k) e parâmetros relativos a ductilidade (estricção – φ e alongamento Δl). Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas, bem como as condições ambientais (GARCIA, 2000).

Este tipo de ensaio utiliza corpos de prova preparados segundo as normas técnicas convencionais, a norma técnica utilizada para materiais metálicos a temperatura ambiente é a NBR ISO 6892:2002, da Associação Brasileira de Normas

Técnicas – ABNT, o levantamento da curva de tensão pela deformação sofrida pelo corpo consiste no resultado do teste de tração.

Figura 5 – Gráfico Tensão - deformação



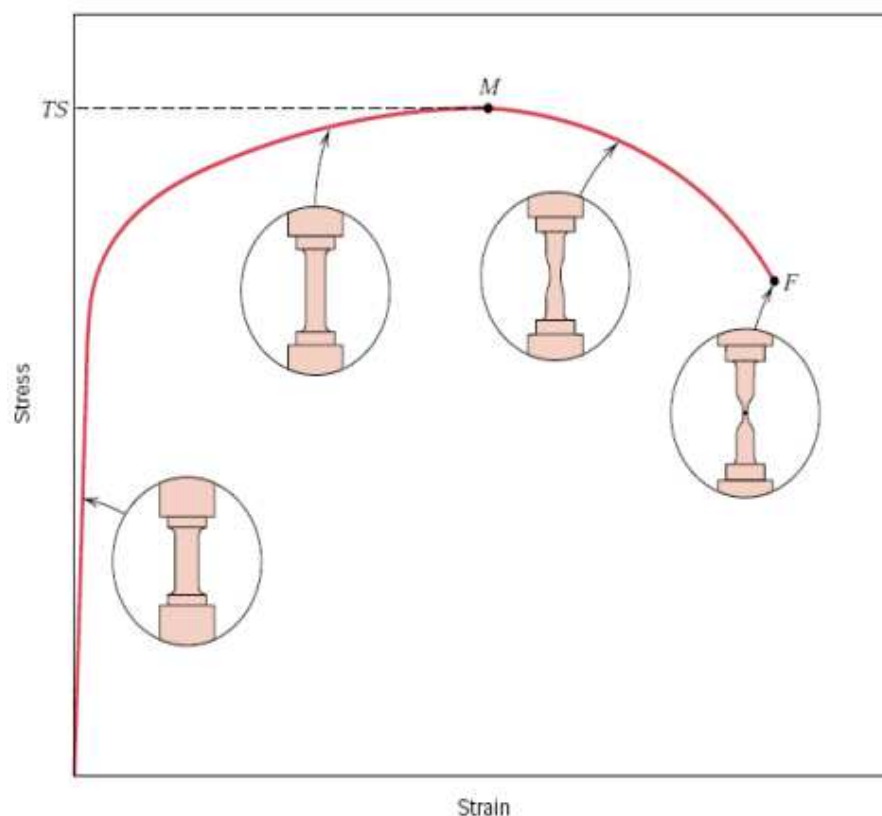
Fonte: Callister, 2000.

As vantagens do ensaio podem ser resumidas:

- Na grande facilidade de sua aplicação;
- Na extensa flexibilidade do método;
- Na amplitude de informações fornecidas pelo ensaio quanto a caracterização dos materiais, podendo ser utilizado em praticamente todos os materiais de aplicação em engenharia.

2.2.1.1 Limite de resistência a tração

Corresponde ao estresse máximo que a estrutura pode sustentar correspondente a tensão aplicada, se esta tensão for mantida, resultará na ruptura do corpo de prova nesta região. Toda deformação até este ponto é uniforme, no entanto, neste estresse máximo, uma pequena constricção começa a se formar em algum ponto, deformando o corpo de prova (CALLISTER, 2000).

Figura 6 – Gráfico limite de resistência a tração.

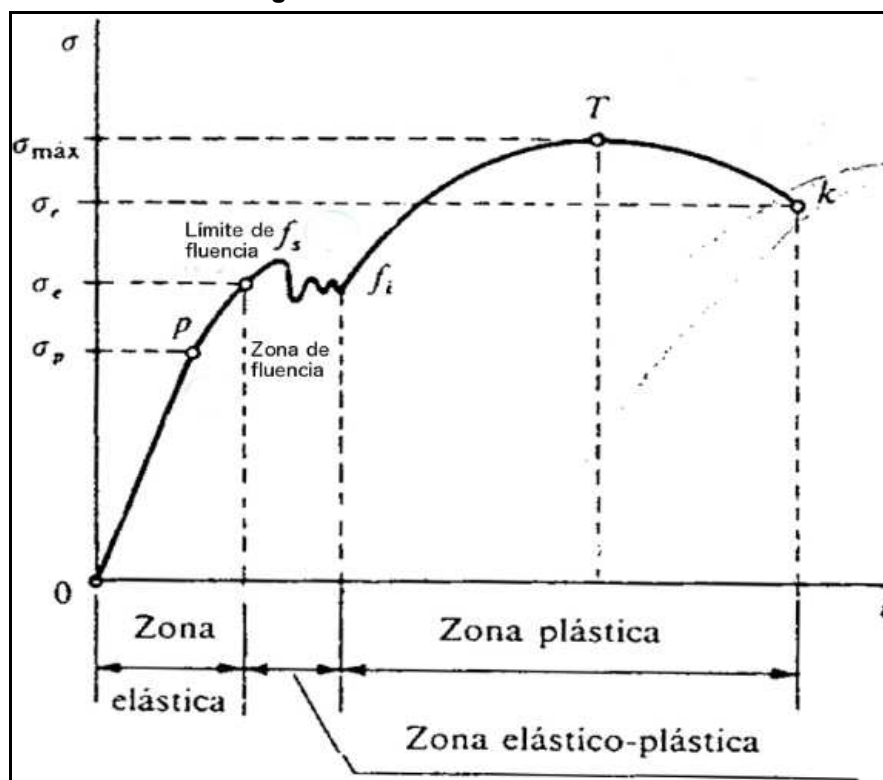
Fonte: Callister, 2000.

2.2.1.2 Limite de escoamento

Representa o nível máximo entre a tensão de aplicada e a deformação resultante, existe uma relação linear cujo coeficiente é o módulo de elasticidade. Após o limite de escoamento, os materiais ainda poderão apresentar uma pequena quantidade de deformação elástica, mas não de caráter linear, e logo após essa pequena deformação o material deve iniciar estagio de escoamento, produzindo assim uma deformação permanente ou plástica.

Nas curvas de tensão-deformação, o ponto limite de escoamento pode ser nítido ou imperceptível.

Figura 7 – Limite de escoamento



Fonte: Garcia, 2000.

2.2.1.3 Limite de elasticidade

É uma grandeza proporcional à rigidez de um material quando este é submetido a uma tensão externa de tração ou compressão. Basicamente, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo, quando o comportamento é linear, como mostra a equação:

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (1)$$

Onde:

E = Modulo de elasticidade (Pascal)

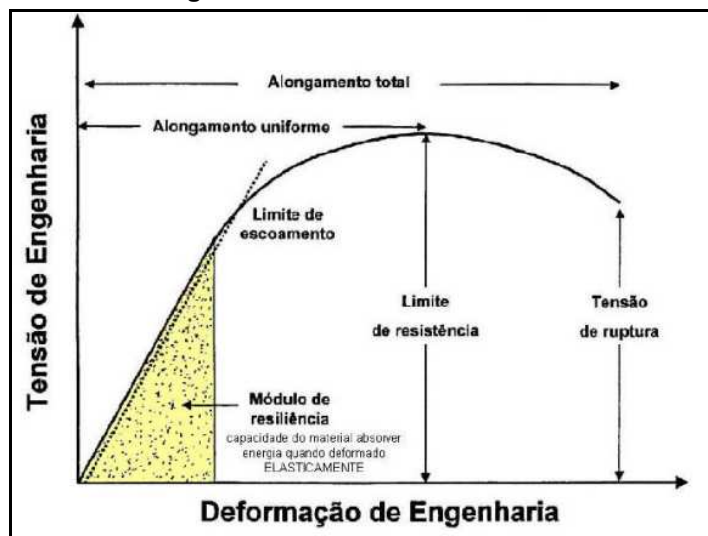
δ = Tensão aplicada (Pascal)

ε = Deformação elástica longitudinal do corpo de prova (adimensional).

2.2.1.4 Modulo de resiliência

Corresponde a capacidade de o material absorver energia quando esta é deformado elasticamente. Materiais resilientes são aqueles que tem alto limite de elasticidade e baixo modulo de elasticidade.

Figura 8 – Modulo de resiliência

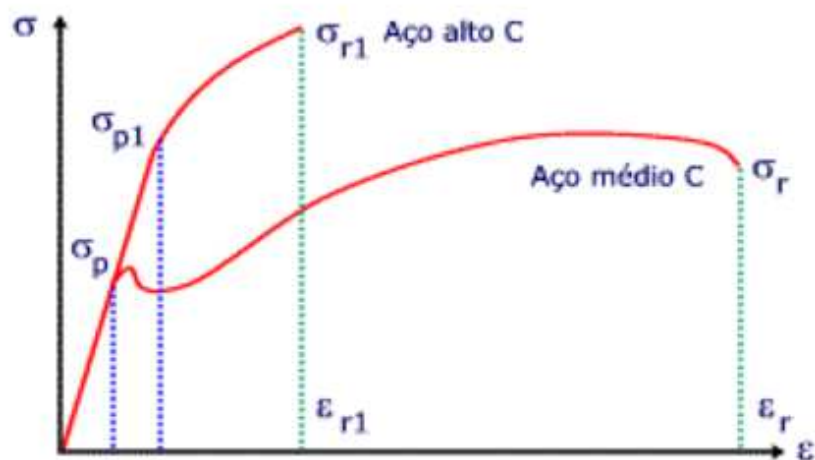


Fonte: Garcia, 2012

2.2.1.5 Modulo de tenacidade

É a capacidade de o material absorver energia devido à deformação até a ruptura. É uma propriedade desejável para casos de peças sujeitas a choques e impactos, como engrenagens, correntes, etc. Em geral, não é definida numericamente. Pode-se considerar, de forma similar ao módulo de resiliência, a área total abaixo da curva (ut).

Figura 9 – Representação gráfica do módulo de tenacidade



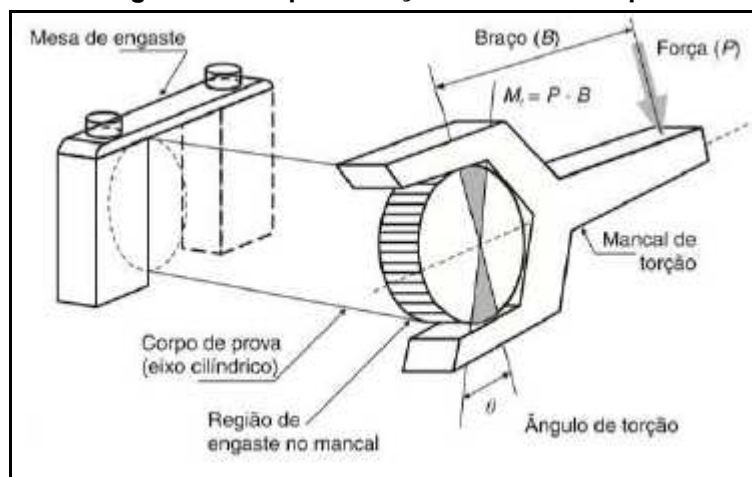
Fonte: Adaptação MPSC, 2008.

2.2.2 Ensaio de torque

Consiste na aplicação de carga rotativa em um corpo de prova geralmente de geometria cilíndrica. Mede-se ângulo de deformação (θ) como função do momento de torção aplicado (M_0). Dentre os principais resultados do ensaio destacam-se: limite de escoamento ao cisalhamento (T_e), limite de resistência ao cisalhamento (T_u), módulo de elasticidade transversal (G), módulo de resiliência a torção (U_{rt}), e o módulo de tenacidade a torção (U_{tt}).

O ensaio de torção pode ser executado a partir de corpos de prova feitos do material o qual o componente será fabricado, ou por meio da própria peça, desde que suas dimensões sejam compatíveis com a máquina de ensaio.

Figura 10 – Representação ensaio de torque

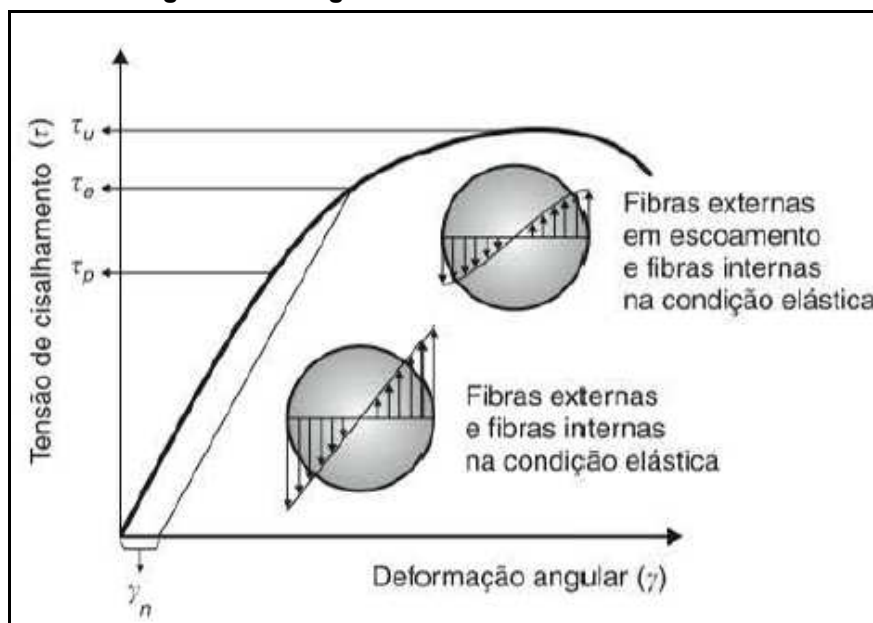


Fonte: Garcia, 2012.

2.2.2.1 Limite de escoamento ao cisalhamento

Determinado no final da linearidade entre tensão de cisalhamento e deformação angular. Caracteriza o início da zona plástica, é de difícil determinação em uma barra sólida, já que as fibras superficiais são impedidas de escoar pelas fibras mais internas que são submetidas a menores níveis de tensão. Dessa forma é mais apropriada a utilização de corpos de prova tubulares, em que o efeito é minimizado, já que o gradiente de tensões é praticamente eliminado, resultante em uma distribuição mais uniforme de tensões. Um fator importante a ser observado na torção é a utilização das relações entre o comprimento e os diâmetros dos corpos de prova para evitar o efeito de cambagem (GARCIA,2000).

Figura 11 – Diagrama de tensão de cisalhamento



Fonte: Garcia, 2000.

2.2.2.2 Limite de resistência ao cisalhamento

Após o início do escoamento, ao atingir-se o regime plástico a distribuição de tensões não é mais linear, e as equações para determinação da máxima tensão de cisalhamento não são mais aplicáveis. Esse limite é obtido pela substituição do momento de torção aplicado no ensaio antes da ruptura, para o caso de eixos maciços e tubulares, respectivamente:

Para eixos maciços:

$$Tu = \frac{16 \times M_{\text{max}}}{\pi \times D^3} \quad (2)$$

Para tubos:

$$Tu = \frac{16 \times D_{\text{ext}} \times M_{\text{max}}}{\pi \times (D_{\text{ext}}^4 - D_{\text{int}}^4)} \quad (3)$$

2.2.2.3 Modulo de elasticidade transversal

A tensão de cisalhamento é proporcional à deformação angular, de maneira análoga ao modulo de elasticidade que caracteriza a relação entre tensão normal e

deformação para o ensaio de tração. Pela lei de Hooke, a tensão de cisalhamento em qualquer ponto no interior de um eixo maciço é dada por:

$$T = y \cdot G \quad (4)$$

Onde:

T = Tensão de cisalhamento;

Y = Deformação angular;

G = Modulo de elasticidade transversal.

2.2.3 Ensaio de dureza

Não é possível encontrar uma definição única de dureza que englobe todos os conceitos, tendo em vista que esse conceito diverge muito dependendo da aplicação e de cada experiência com este assunto. Porém, o de ensaio de dureza pode ser dividido em três tipos, sendo eles: por penetração, por choque e por risco.

Os dois primeiros tipos de dureza são mais usados no ramo da metalurgia e mecânica, sendo que a dureza por penetração é a mais largamente utilizada e citada nas especificações técnicas (SOUZA, 1982).

2.2.3.1 Dureza Brinell

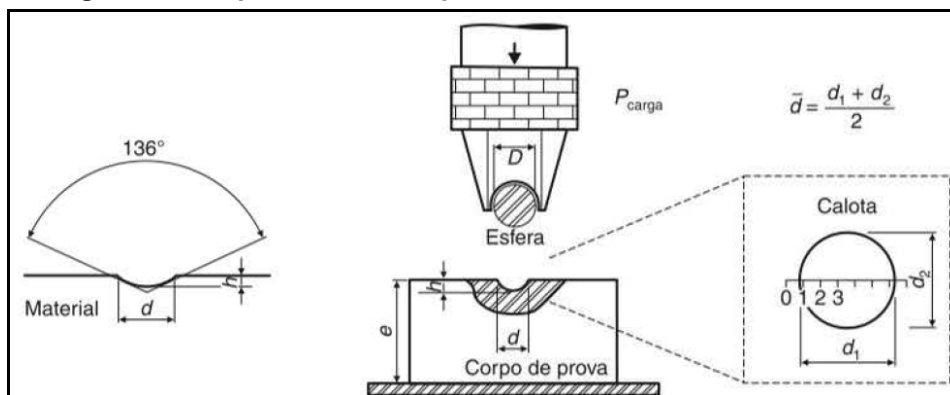
Este ensaio foi inicialmente proposto por James A. Brinell em 1900, e foi o primeiro ensaio de penetração padronizado e reconhecido industrialmente. Consiste em comprimir uma esfera metálica padronizada na superfície do material ensaiado, gerando uma calota esférica. A dureza Brinell é o quociente da carga normal aplicada pela área da superfície côncava (calota esférica) após a retirada da força, dada por:

$$Dureza = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Em que:

- Dureza – expressa em termos de tensão (Pa);
- P – Carga de impressão (N);
- S – Área da calota esférica impressa (mm²).

Figura 12 – Representação esquemática do ensaio de dureza Brinell



Fonte: Adaptação manual Infosolda, 1997.

Na utilização do ensaio, existem tabelas preparadas para fornecer o valor da dureza Brinell a partir do diâmetro médio da impressão formada:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6)$$

Sendo d_1 e d_2 os diâmetros medidos a 90° entre si, e da carga empregada.

Embora a dureza Brinell expresse unidades de carga / área, é de prática usual a utilização apenas do número representativo da dureza, seguido do símbolo HB. No caso de utilizar esfera de aço, utiliza-se a notação HBS e HBW na utilização de esferas de carboneto de tungstênio (NBR NM-187-1).

Tanto o diâmetro da esfera quanto a carga aplicada dependerão do material a ser ensaiado, tais parâmetros devem se adequar ao tamanho, a espessura e a estrutura interna do corpo de prova.

Quadro 2 – Constantes ou graus de carga de alguns materiais

Constante ou grau de carga	Materiais	Exemplos
30	Metais ferrosos e não ferrosos resistentes	Aços, ferros fundidos, níquel e ligas, cobalto e ligas, ligas de titânio
15	Somente para carga de 3000 kgf	Titânio e ligas, bem como materiais não tão duros e ligas leves
10	Metais ferrosos dúcteis e maioria dos não ferrosos	Ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de cobre
5	Metais não ferrosos moles	Metais puros alumínio, magnésio, cobre, zinco
2,5	Metais moles	Ligas de estanho, chumbo, antimônio, berílio, lítio
1,25	Metais mais moles	Metais puros berílio e lítio ou metais moles
1	Metais muito moles	Metais puros estanho, chumbo, antimônio

Fonte: Garcia, 2012.

Tabela 3 – Cargas recomendadas para diferentes esferas e constantes

Esfera D (mm)	Constante ou graus de carga (ABNT e ASTM)						
	30	15	10	5	2,5	1,25	1
	Cargas (kgf)						
10	3000	1500	1000	500	250	125	100
5	750	-	250	125	62,5	31,25	25
2,5	187,5	-	62,5	31,25	15,625	7,812	6,25
2	120	-	40	20	10	5	4
1	30	-	10	5	2,5	1,25	1

Fonte: Garcia, 2012.

Quando é aplicada a carga na superfície do metal, há sempre uma recuperação elástica, de modo que o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal, havendo um aumento do raio da curvatura de impressão. Essa recuperação será tanto maior quanto mais duro for o metal, porque os metais muito duros possuem zona plástica reduzida, tendo pouca deformação plástica. Portanto, a recuperação elástica é uma fonte de erros na determinação da dureza (Souza, 1982).

Como a impressão de dureza Brinell abrange uma área de contato maior que os outros tipos de dureza, ela é a única utilizada e aceita para metais que

tenham uma estrutura interna não-uniforme, como é o caso dos ferros fundidos cinzentos.

O baixo custo dos aparelhos para medida de dureza Brinell favorece o largo emprego desse tipo de dureza nos laboratórios e indústrias.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 MATERIAIS E METODOS

Os principais componentes deste trabalho foram os tubos, o ventil, o metal de adição, o fluxo. O tubo utilizado é liga de alumínio 3000 com 600 mm de comprimento, com diâmetro de 12 mm externo e parede de 1 mm. Os furos foram realizados com brocas de 8 mm para alojamento do ventil no meio do tubo de todas as amostras.

Para a brasagem por maçarico foi utilizado um sistema de brasagem de tubos de alumínio em duas estações onde durante o processo em uma das estações, na outra estará sendo retirada e montada a produção para a próxima etapa, esse sistema consiste em posicionar os tubos sobre os gabaritos, construídos de acordo com as características dos tubos, de aço inoxidável, duas tochas para brasagem das peças e sistema de resfriamento por sistema de duchas de água.

Para a brasagem por indução foi utilizado o Aquecedor Indutivo JAMO modelo JMMF 30kW, que foi desenvolvido especialmente para brasagem de conexões. Composto de dois geradores de frequência de 15kW, dois transformadores isoladores de saída com movimentação pneumática vertical com curso de 150 mm e painel de comando com CLP e IHM para programar até 100 rotinas diferentes de aquecimento. Possui sistema de refrigeração água/ar em circuito fechado para o equipamento e sistema de ducha de resfriamento para a peça após o processo de brasagem. Acompanham o aquecedor 2 (dois) indutores de aquecimento com conexão tipo “rabo de andorinha” ou plana, conforme exemplo “d” da figura 04, e 2 (dois) gabaritos em aço inox para posicionamento das peças a serem brasadas.

Conta com sistema de duchas para resfriamento da peça à temperatura de manipulação pelos operadores e cortina de luz que interrompe o aquecimento e a movimentação dos indutores quando seu limite é invadido.

Figura 13 – Imagem representativa do equipamento



Fonte: Adaptação do manual do fabricante

O sistema de aplicação de fluxo de solda e montagem de material de adição (arame ou anel) foi montada de forma manual pelo operador tanto no processo por maçarico quanto no processo por indução.

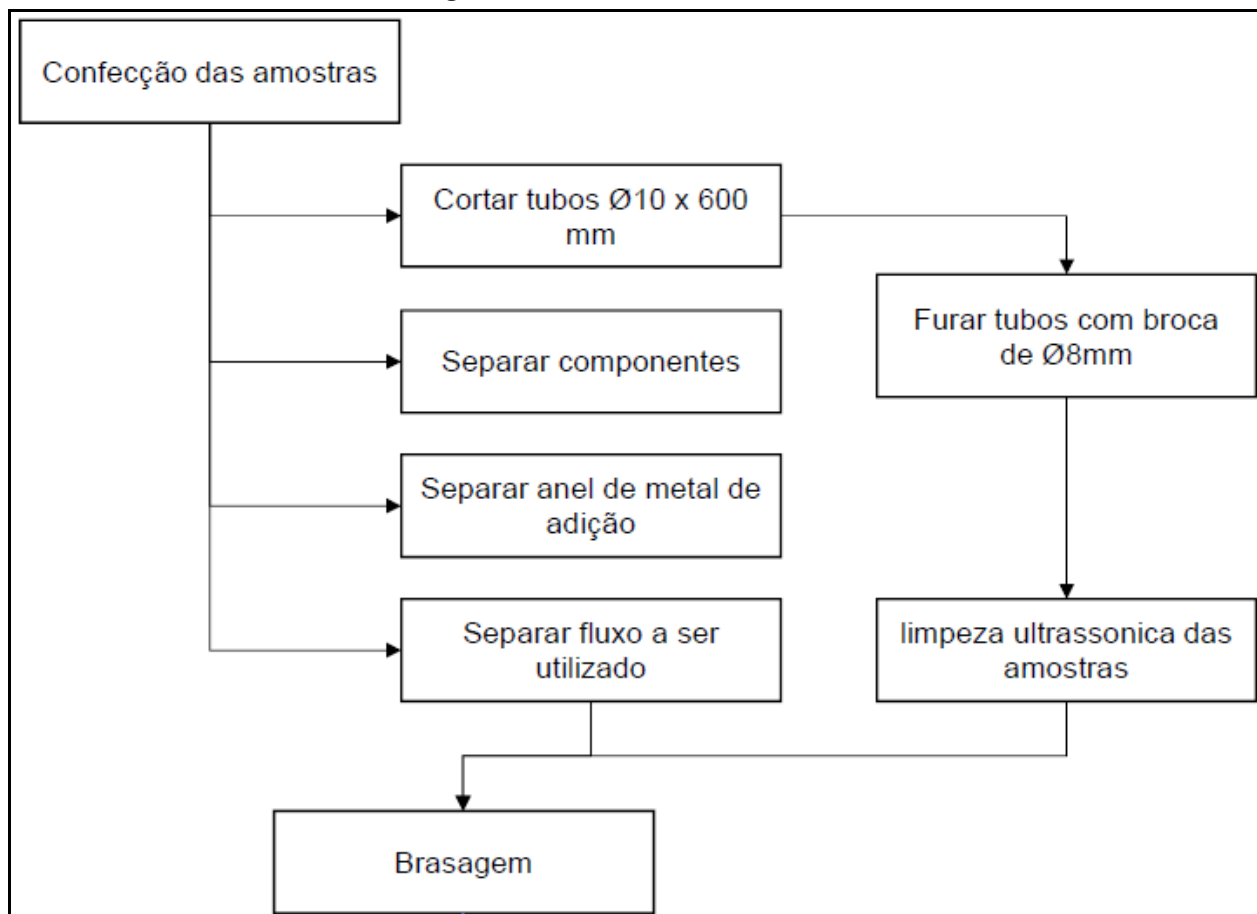
3.1.1 Produção das amostras

O processo de elaboração das amostras, assim como os processos produtivos e os ensaios ao quais as amostras foram submetidas, foram executados com os mesmos procedimentos com o intuito de efetuar uma análise comparativa.

A confecção das amostras foi realizada de forma manual e isolada, sendo criada uma por vez e tiveram o acompanhamento do aluno envolvido e da equipe técnica da empresa que concedeu seu espaço para realização deste trabalho. Como o intuito deste trabalho é igualar os processos de brasagem levando em consideração as características mecânicas dos tubos utilizados em ambos os processos, sendo considerado a substituição do processo de brasagem manual pela brasagem por indução. Foram confeccionadas 210 amostras, utilizando 105 para o processo de brasagem manual e 105 para o processo de brasagem por indução.

A criação destas amostras segue conforme fluxograma 1:

Fluxograma 1 – Criação das amostras



Fonte: Autoria própria.

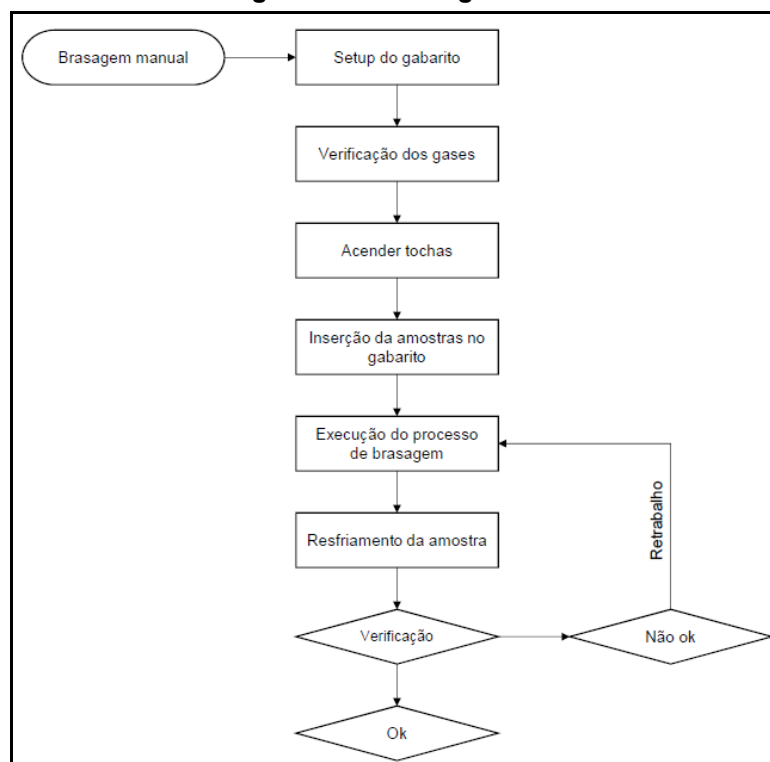
Inicialmente foram cortados transversalmente da barra de tubo de alumínio com diâmetro 10 mm em segmentos de 600 mm. Após o corte as extremidades foram rebarbadas e foram realizados os furos nas barras com broca de diâmetro 8 mm para alojamento do componente, ventil, logo após o corte e a furação as amostras foram enviadas para lavagem ultrassônica, pois como já visto, é fundamental as peças estarem limpas para o processo de brasagem.

Fotografia 1 – Amostras imersas para processo de limpeza



Fonte: Autoria própria.

A confecção das amostras do processo de brasagem manual, foi realizada conforme a produção habitual da mesma, utilizando todos os procedimentos, roteiros e fluxograma já adotado pela empresa, tendo em vista que o processo é validado e fornecido ao cliente nestas condições. O fluxograma 2 mostra a sequencia seguida para o processo de brasagem manual.

Fluxograma 2 – Brasagem manual

Fonte: Autoria própria.

O processo a qual as amostras foram submetidas é o de brasagem por maçarico manual, com as amostras a serem brasadas isentas de sujeira e sempre com o cuidado para não serem tocadas na região a ser brasada, as mesmas são levadas até uma cabine de brasagem onde as mesmas são montadas em um gabarito de inox, projetado para produção das amostras conforme gabarito similar já utilizado em linha de produção. O acendimento das tochas é realizado de forma manual, onde a máquina faz o controle de gás oxiacetileno automaticamente. Para esta junção foi definido que as peças deveriam ter folga entre elas de 0,1mm com tolerância de $\pm 0,5$ mm na região de contato, em função de processos de brasagem permitirem folgas máximas de 0,2mm. Após a montagem é inserido o ventil junto com o metal de adição, este em forma de anel, o mesmo é fixado com o auxílio de uma trava em forma de copo para alojamento do ventil. O metal de adição escolhido é o com composição de liga BAISi3, conforme tabela 2, metais de adição para brasagem em alumínio. Após fixado, o conjunto a ser brasado recebe o fluxo de brasagem, este fluxo é em forma de pasta, indicado para brasagem de ligas de alumínio, sendo sua aplicação feita por bisnaga e de forma manual.

Após a amostra estar fixada e realizada a adição do fluxo, ela está pronta para ser brasada. A peça é aquecida pela chama até que o fluxo de proteção entre em fusão, a temperatura neste ponto está próxima aos 300°C, e protegendo a região dos óxidos. Como a temperatura está elevada, o metal de adição começa a se fundir com os componentes e o material irá umectar a fenda na região de brasagem. As chamas são dispostas em volta da região a ser brasada, devido a isso, o metal conseguiu preencher toda a área da fenda de brasagem. Logo após isso, não se aquece mais a região a ser brasada, deixando o metal de adição resfriar formando a região brasada. A fotografia 2 mostra a operação de brasagem e a fotografia 3 mostra a aparência da região brasada.

Fotografia 2 – Operação de brasagem manual



Fonte: Autoria própria.

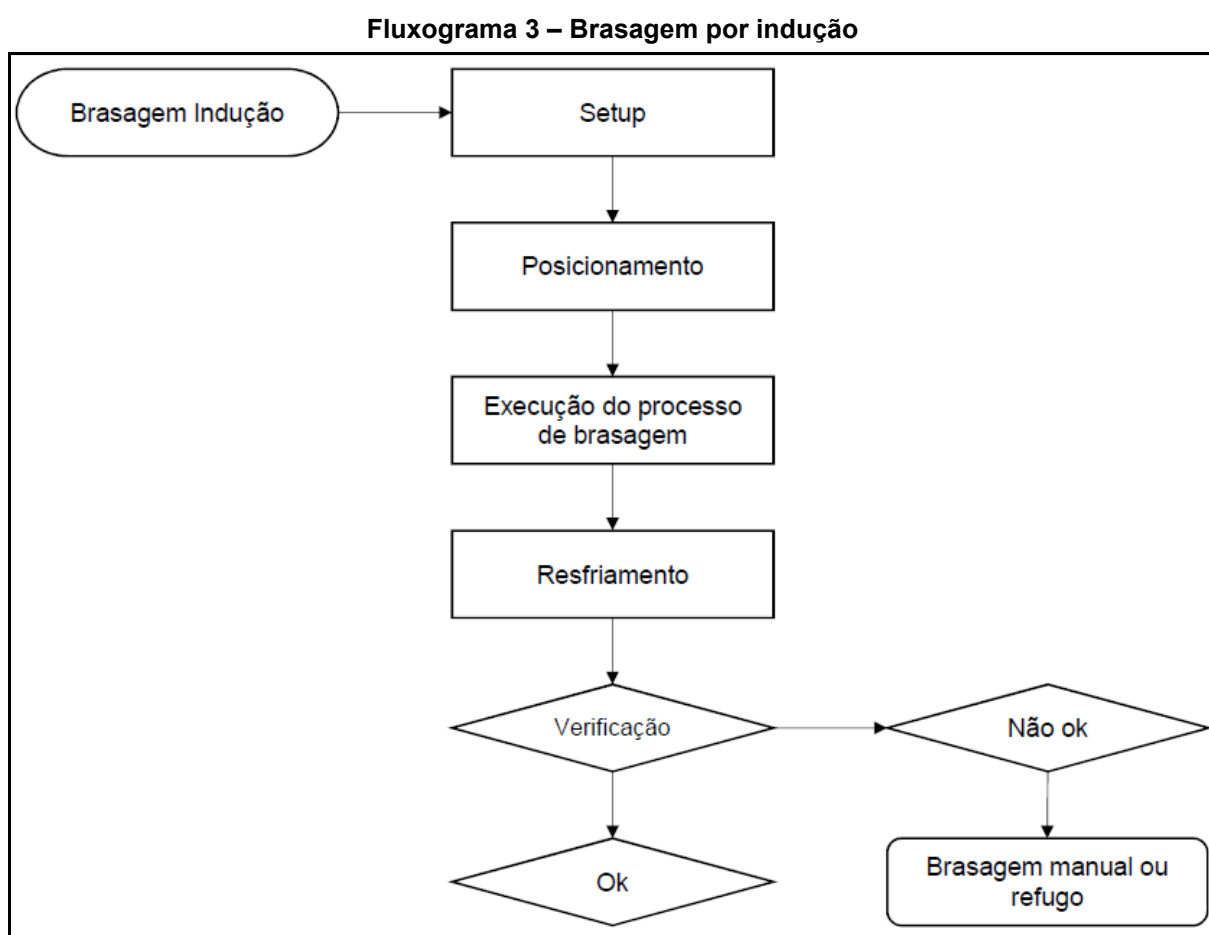
Fotografia 3 – Região de brasagem manual



Fonte: Autoria própria.

Após a brasagem, as amostras são enviadas novamente para o processo de limpeza, para retirada dos óxidos externos da região de brasagem. O processo de limpeza é igual ao citado anteriormente, porém, por normativa da empresa, seu tempo de execução é menor.

A confecção das amostras do processo de brasagem indutivo, tendo em vista que este trabalho tem o intuito de validar este processo perante ensaios mecânicos junto ao processo de brasagem manual, foi realizado conforme fluxograma 3:



Fonte: Autoria própria.

O processo a qual as amostras foram submetidas é o processo de brasagem por indução, assim como no processo de brasagem manual as amostras a serem brasadas devem ser isentas de sujeira e sempre com o cuidado para não serem tocadas na região a ser brasada. As amostras são levadas a cabine onde está o equipamento de aquecimento por indução, o equipamento possui três modos de

operação, sendo eles: automático; setup e manual. Para confecção das amostras foi trabalhado com o equipamento em modo manual, modo onde através da tela específica de Interface homem máquina (HIM) de operação é possível operar todos os dispositivos da máquina, tendo em vista que o processo é novo em quesito de operação e deve ser regulada para que tenha resultado similar aos do processo de brasagem manual.

Fotografia 4 – Painel de receita



The image shows a control panel titled 'RECEITA GERADOR A'. It features a list of six parameters, each with a corresponding green digital display showing the value '000' or '000.0'. The parameters are: POTÊNCIA AQUECIMENTO (%), POTÊNCIA RETENÇÃO (%), TEMPO AQUECIMENTO (s), TEMPO RETENÇÃO (s), TEMPO PAUSA (s), and TEMPO DUCHA (s). A black arrow on the left points to the left, indicating a back function.

Parameter	Value
POTÊNCIA AQUECIMENTO (%)	000
POTÊNCIA RETENÇÃO (%)	000
TEMPO AQUECIMENTO (s)	000.0
TEMPO RETENÇÃO (s)	000.0
TEMPO PAUSA (s)	000.0
TEMPO DUCHA (s)	000.0

Fonte: Autoria própria.

Após as execuções e alterações necessárias na receita dos geradores, que contemplam a potência de aquecimento, potência de retenção, tempos de aquecimento, retenção, pausa e ducha, podemos iniciar a produção das amostras.

Com o equipamento ligado e em modo manual, foi posicionado o tubo no suporte e utilizado uma trava para fixá-lo, após o tubo estar fixo é preparado o ventil com o metal de adição e fluxo de brasagem, sendo o mesmo posicionado na furação realizada anteriormente no tubo, é utilizado uma trava de posição para realização da brasagem.

Fotografia 5 – Processo de brasagem indutivo



Fonte: Autoria própria.

Também é feita a regulagem da ducha de refrigeração, direcionado para o local de aquecimento. Após todos ajustes na peça ser brasada realizados, é realizado os seguintes passos:

1. Liberado o botão de emergência;
2. Pressionado o botão de reset para liberação da máquina;
3. Na tela do IHM é selecionado o modo manual;
4. Avança o indutor até aproximar-se da área a ser brasada, nesta etapa deve se tomar o cuidado para que não haja colisão do indutor com a peça,
5. Quando o indutor estiver próximo, é utilizado o sistema de ajuste fino para regular a altura do indutor.
6. Após realizados os ajustes necessários, pressiona-se o botão Liga para o indutor retomar ao ponto zero.
7. Ao pressionar o botão Liga Aquecimento com o indutor recuado, o ciclo será iniciado e desligará automaticamente seguindo a receita programada.

As fotografias 6 e 7 demonstram o processo de brasagem e o resultado da brasagem por indução, respectivamente.

Fotografia 6 – Operação de brasagem indução



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 7 – Região de brasagem indução



Fonte: Autoria própria.

Após o término do processo, as amostras são enviadas novamente para a limpeza para remoção de óxidos externos.

Com as amostras prontas, parte-se para as análises através de ensaios de tração, torque e dureza.

3.1.2 Ensaios mecânicos

Todos os ensaios realizados tiveram o acompanhamento do aluno envolvido e sendo ministrados e executados pela equipe técnica laboratorial da empresa concedente do espaço para realização dos mesmos.

Para todos os ensaios, foram planejados a quantidade mínima de 35 amostras, sendo que em casos especiais ou que apresentassem anomalias em relação ao processo e de resultado, seriam analisadas outras amostras somadas as 35 mínimas.

Assim, teremos a quantidade 210 amostras divididas em 6 grupos:

Tabela 4 - Quantidade de amostras a serem realizadas por teste

Ensaio mecânico	Brasagem Maçarico	Brasagem Indução
Ensaio de tração	35 amostras	35 amostras
Ensaio de torque	35 amostras	35 amostras
Ensaio de dureza	35 amostras	35 amostras

Fonte: Autoria própria.

3.1.2.1 Ensaio de tração

A máquina utilizada para as análises foi a Máquina Universal de Ensaios da marca EMIC modelo DL2000, com carga máxima de 20 toneladas/força (não sendo exigida a carga máxima) com sensor de deslocamento interno. Tanto os ensaios nas amostras de indução quanto na brasagem manual foram efetuados com velocidades de 5mm/min. As amostras foram inseridas na vertical e fixadas pelos mordentes, para foi utilizado um tarugo para a tração da base do ventil para que se pudesse realizar o teste. Todas as amostras foram ensaiadas até serem rompidas, afim de saber qual seria o limite máximo que a região brasada suportava.

Fotografia 8 – Operação de brasagem indução

Fonte: Autoria própria.

3.1.2.2 Ensaio de torque

Para o teste de torque foi utilizado o torquímetro digital da marca Tohnichi, modelo CTB2-G. O ensaio foi realizado de forma manual, onde as amostras foram fixadas pelo tubo em uma morsa enquanto o torque era aplicado no ventilil até sua quebra, o intuito do teste era ver a limite de força de torque aplicada até a ruptura da região brasada ou do tubo.

Fotografia 9 – Região de brasagem indução

Fonte: Autoria própria.

3.1.2.3 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado em durometro da Marca Wolpert HT.HB com esfera de 2,56mm e carga de 31,25 Kgf, o padrão de dureza utilizado foi o Mitutoyo 3566/03. As amostras foram cortadas em região transversal da solda e alocadas na base do equipamento, com o tamanho da esfera e a carga definida foi realizado o ensaio, sendo que as amostras de brasagem manual foram as primeiras a serem testadas e em seguida as de brasagem por indução, seguindo os mesmos parâmetros.

O método baseado para a realização do ensaio foi a norma ABNT NBR NM ISO 6506-1 onde se coloca o penetrador em contato com a superfície de ensaio e aplica-se a força de ensaio em uma direção perpendicular, sem choque, vibração ou excesso de velocidade, até que a força aplicada atinja o valor especificado, o tempo de aplicação da carga é de 10 a 15 segundos, após a aplicação da carga o resultado da dureza Brinell é mostrado em um relógio analógico na parte superior do equipamento.

Fotografia 10 – Região de brasagem indução



Fonte: Adaptação do site do fabricante.

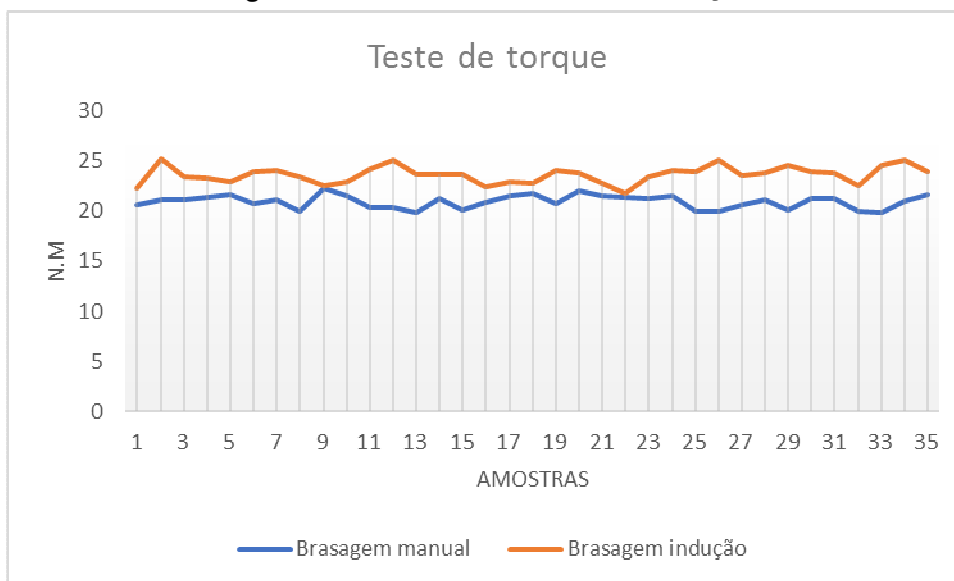
4 RESULTADOS OBTIDOS

Conforme análises feitas e já descritas, os resultados das análises de cada grupo de amostras seguem abaixo.

4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

As análises feitas das 35 amostras do processo de brasagem manual e por indução mostraram os resultados conforme gráfico abaixo, os valores obtidos de cada amostra estão demonstrados em tabelas anexas no apêndice A.

Figura 14 – Resultado de ensaio de tração



Fotografia 11 – Resultado de ensaio de tração

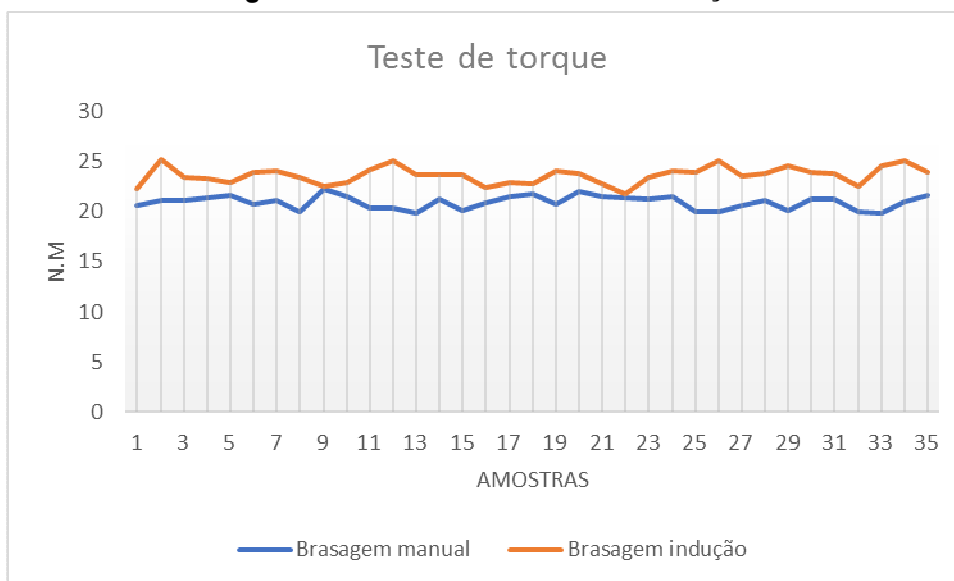


Fonte: Autoria própria.

Conclui-se que quando as amostras submetidas ao processo de tração, o processo de brasagem manual apresenta resultados inferiores ao processo de brasagem por indução. Os resultados do teste de tração foram próximos quando comparado o processo de brasagem por indução com o processo manual de brasagem, nota-se um pequeno aumento nas forças de tração das amostras soldadas pela indução, porém como todas as amostras apresentaram rompimento no tubo e não na solda, esta diferença de valores nos resultados não é significativa. É importante frisar que as amostras apresentaram resultados nos dois processos, evidenciando o mesmo nível de qualidade da brasagem.

4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE TORQUE

As análises feitas das 35 amostras do processo de brasagem manual e por indução mostraram os resultados conforme gráfico abaixo, os valores obtidos de cada amostra estão demonstrados em tabelas anexas no apêndice A.

Figura 15 – Resultado de ensaio de tração

Fonte: Autoria própria.

Fotografia 12 – Resultado de ensaio de torque em brasagem manual

Fonte: Autoria própria.

Fotografia 13 – Resultado de ensaio de torque em brasagem por indução

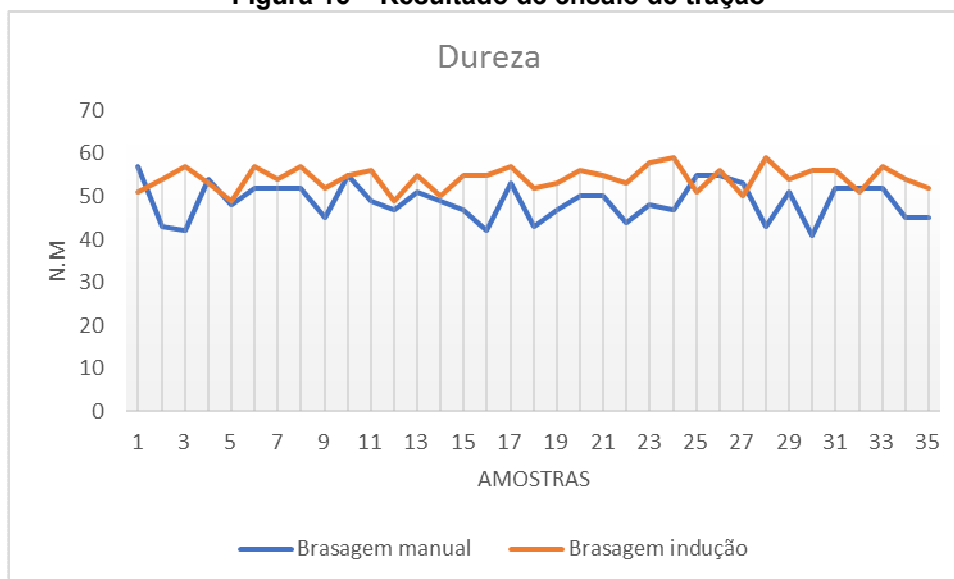


Fonte: Autoria própria.

Com relação ao teste de torque, é possível perceber que os resultados do teste de resistência da solda ao toque foram semelhantes quando comparados os dois processos de brasagem (manual e indução), a análise visual da região de rompimento também foi semelhante nos dois casos, todas as amostras apresentaram o rompimento no tubo de alumínio e não na região brasada, evidenciando que a brasagem é mais resistente que o tubo de alumínio.

4.3 RESULTADOS DE DUREZA

Os resultados obtidos das 70 amostras submetidas ao teste de dureza mostraram os seguintes resultados abaixo, os valores obtidos de cada amostra estão demonstrados em tabela anexa no apêndice A.

Figura 16 – Resultado de ensaio de tração

Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que os resultados obtidos nas amostras de brasagem por indução obtiveram um resultado maior que as brasadas no processo manual, a influência do tempo de espera de espera de resfriamento é um grande influente para que isso ocorra. Porém, conforme análises das amostras nos outros testes realizados, apesar da dureza maior significar uma peça mais frágil, foi possível notar que o tubo acabava rompendo próximo a região brasada e não a brasagem.

5 CONCLUSÃO

Conforme execução das amostras e ensaios sob mesma condição foram extraídos dados específicos de cada processo de brasagem. Com o intuito de comparar os processos os resultados específicos de análise média estão descritos conforme tabela 10.

Tabela 5 – Resultado gerais

Ensaio	Brasagem manual	Brasagem Indução
Tração	466N / 23mm	564N / 12mm
Torque	20,9 Nm	23,6 Nm
Dureza	48,8 HB	54,2 HB

Fonte: Autoria própria.

Em geral, pode-se dizer que em caso de melhoria de processo, o processo de brasagem por indução obteve resultados acima de satisfatórios para realização da mudança de processo., pois seus resultados demonstraram características mecânicas acima do processo atual e acima do solicitado em norma pelas empresas cliente deste processo.

Além destes resultados, outro tema que não foi discutido neste trabalho, mas é um assunto a realçar, foi o tempo de processo para a realização do trabalho, onde teve um ganho de produtividade significativo, onde obteve-se um ganho de 79,64% em relação ao processo de brasagem por indução sobre o processo manual. O índice de refugo para o processo por indução também obteve uma baixa de 1,5% relacionado ao processo atual.

Este conjunto de resultados obtidos demonstrou que o processo de brasagem por indução é viável para substituição do processo atual, tanto em ganhos de qualidade mecânica do material quanto em produtividade. Passando assim a ser um processo fixo e expansível para outras características de tubos que passam por processo de brasagem para toda a unidade da empresa

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de tração. 2013

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 187-1**: Materiais metálicos – Dureza Brinell. 1999.

ALCAN ALUMINIO DO BRASIL S/A. **Manual de soldagem**. 1993. Disponível em: <<http://mkmouse.com.br/livros/soldaemaluminiomanual-Alcan.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

AWS International. **Handbook Volume 6** Welding brazing and soldering, Manual, EUA, 1986

BRESCIANI FILHO, E. **Propriedades e ensaios industriais dos materiais**. São Paulo: Escola Técnica da USP, 1974.

CALLISTER, JUNIOR, W.D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

DIN (Deutsches Institut für Normung). **DIN 8505**: Soldering and brazing; general, terms. Alemanha, 1979

GARCIA, A.; SPIM, A. J.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

MANUAL INFOSOLDA. **Brasagem**: Características do processo. 1997. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/198-brasagem-caracteristicas-do-processo.html>>. Acesso em: 02 out, 2017.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: E. Blucher, 1982.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, D. H. **Soldagem**: Processo e metalurgia. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

APÊNDICE A - Tabelas de resultados

Resultados de tração para brasagem manual

Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)
1	487	8	484	15	473	22	462	29	482
2	474	9	459	16	492	23	481	30	472
3	440	10	482	17	438	24	468	31	435
4	456	11	446	18	454	25	478	32	444
5	473	12	460	19	492	26	449	33	483
6	470	13	469	20	480	27	461	34	476
7	475	14	437	21	490	28	475	35	442

Resultados de tração para brasagem por indução

Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)	Amostra	Força Max (N)
1	526	8	545	15	543	22	548	29	535
2	574	9	560	16	566	23	576	30	566
3	599	10	555	17	542	24	542	31	581
4	574	11	584	18	597	25	569	32	559
5	532	12	538	19	601	26	547	33	550
6	601	13	565	20	544	27	547	34	602
7	577	14	559	21	585	28	570	35	588

Resultados de torque para brasagem manual

Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque
1	20,6	8	19,9	15	20,1	22	21,3	29	20,1
2	21,1	9	22,3	16	20,8	23	21,2	30	21,2
3	21,1	10	21,5	17	21,5	24	21,5	31	21,2
4	21,4	11	20,4	18	21,8	25	19,9	32	20,0
5	21,6	12	20,3	19	20,7	26	20,0	33	19,8
6	20,7	13	19,8	20	22,0	27	20,6	34	21,0
7	21,1	14	21,2	21	21,5	28	21,1	35	21,6

Resultados de torque para brasagem por indução

Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque
1	22,3	8	23,4	15	23,6	22	21,8	29	24,5
2	25,2	9	22,5	16	22,4	23	23,4	30	23,9
3	23,4	10	22,9	17	22,9	24	24,1	31	23,8
4	23,3	11	24,2	18	22,8	25	23,9	32	22,5
5	22,9	12	25,1	19	24,0	26	25,0	33	24,6

Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque	Amostra	Torque
6	23,9	13	23,6	20	23,8	27	23,5	34	25,1
7	24,1	14	23,7	21	22,7	28	23,8	35	23,9

Resultados do ensaio de dureza

Amostra	Brasagem manual (HB)	Brasagem Indução (HB)	Amostra	Brasagem manual (HB)	Brasagem Indução (HB)
1	57	51	21	50	55
2	43	54	22	44	53
3	42	57	23	48	58
4	54	53	24	47	59
5	48	49	25	55	51
6	52	57	26	55	56
7	52	54	27	53	50
8	52	57	28	43	59
9	45	52	29	51	54
10	55	55	30	41	56
11	49	56	31	52	56
12	47	49	32	52	51
13	51	55	33	52	57
14	49	50	34	45	54
15	47	55	35	45	52
16	42	55			
17	53	57			
18	43	52			
19	47	53			
20	50	56			