

O483a

Oliveira, Luiz Gustavo Guimarães de.

Análise Microestrutural da liga bronze de alumínio soldada nos processos GTAW e FW / Luiz Gustavo Guimarães de Oliveira / FATEC Pindamonhangaba, 2019. 54f.: il.

Orientador Professor Dr. Emerson Augusto Raymundo  
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba. 2019

1. Soldagem por fricção. 2. GTAW. 3. FRW. 4. Torneamento. 4. Bronze de alumínio. 5. Cavacos. I. Oliveira, Luiz Gustavo Guimarães de. II. Raymundo, Emerson Augusto. III. Título.

CDD 621.7

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA LIGA  
BRONZE DE ALUMÍNIO SOLDADA NOS  
PROCESSOS GTAW E FW**

**LUIZ GUSTAVO GUIMARÃES DE OLIVEIRA**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
TECNOLOGIA EM MECÂNICA -  
PROCESSOS DE SOLDAGEM.

Comissão Examinadora

*Esito*

Orientador – Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo

*Marcelo B. de Carvalho*

Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho

*Glauber Ontiveros*

Membro - Sr. Glauber Augusto Matheus Ontiveros

**Pindamonhangaba, 17 de Dezembro de 2019.**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA LIGA  
BRONZE DE ALUMÍNIO SOLDADA NOS  
PROCESSOS GTAW E FW**

**Luiz Gustavo Guimarães de Oliveira**

**Pindamonhangaba - SP  
2019**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

# **ANÁLISE MICROESTRUTURAL DA LIGA BRONZE DE ALUMÍNIO SOLDADA NOS PROCESSOS GTAW E FW**

**Luiz Gustavo Guimarães de Oliveira**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba para  
graduação, no Curso Superior de Tecnologia em  
Mecânica – Processos em Soldagem.

Área de Concentração: Metalurgia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo

**Pindamonhangaba – SP  
2019**

*Dedico aos professores, amigos e familiares, de modo especial, à minha namorada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Agradeço a minha família, a base de tudo.

Agradeço a minha namorada, pela cumplicidade e companheirismo.

Agradeço aos amigos, pelo o apoio e carinho.

Agradeço a todos os professores pois eles foram fundamentais por eu estar aqui hoje.

Agradeço o meu orientador Emerson Augusto Raymundo por todo suporte e compreensão na montagem deste trabalho.

Agradeço aos técnicos da Faculdade.

Agradeço aos monitores dos laboratórios utilizados, por toda ajuda na preparação dos ensaios.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

*José de Alencar*

OLIVEIRA, G. G. L.; **Análise Microestrutural da Liga Bronze de Alumínio Soldada nos Processos GTAW e FRW**. Trabalho de graduação. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2019.

## RESUMO

A procura por soldagem que não apresente tanto problema na zona termicamente afetada (ZTA) é propósito de qualquer processo de soldagem, neste sentido a soldagem por fricção apresenta um caminho para diminuir esses efeitos. O objetivo do trabalho foi desenvolver por meio de análises metalográficas e propriedades mecânicas um comparativo entre dois processos de soldagem, fricção e TIG e também por meio do processo de usinagem por torneamento observar a geometria dos cavacos removidos de ambos os processos. Para o estudo foi utilizado uma liga de cobre chamado de bronze de alumínio e níquel. A soldagem por TIG foi utilizado um eletrodo de cobre e para soldagem por fricção foi utilizado da mesma barra. Para certificar o melhor processo foi proposto um estudo de cavacos gerados pelo processo de torneamento. Foi observada ausência da ZTA no processo por fricção (FRW) e de forma geral não apresentou descontinuidades no processo GTAW. Foi observado mudanças na morfologia dos cavacos que segundo a teoria pode mudar conforme a dureza dos materiais envolvidos quando são formados nos processos de usinagem. Para verificar as diferenças nos processos foi analisada também as durezas do material como recebido e dos processos propostos, conclui-se que o processo FRW apresentou pouca variação e que no processo TIG apresentou picos e vales acentuados na relação gráfica, o metal de base de forma geral não apresentou diferenças. Assim foi possível concluir que o processo FRW dessa liga é um processo a ser melhor utilizado e que por meio de análises de usinagem e micrografias podem auxiliar na certificação destes processos.

**Palavras-chaves:** Soldagem por fricção. GTAW. FRW. Torneamento. Bronze de alumínio. Cavacos.



OLIVEIRA, G. G. L.; **Microstructural analyses of welded aluminum bronze alloy in GTAW and FW processes.** Graduation work. Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2019.

### **ABSTRACT**

The search for welding that does not present as much problem in the thermally affected zone (ZTA) is the purpose of any welding process, in this sense friction welding presents a way to reduce these effects. The objective of this work was to develop, through metallographic analysis and mechanical properties, a comparative between two welding processes, friction and TIG and through the turning machining process to observe the geometry of the chips removed from both processes. For the study a copper alloy called aluminum bronze and nickel was used. TIG welding was used with a copper electrode and for friction welding was used from the same bar. To certify the best process, a study of chips generated by the turning process was proposed. Absence of ZTA in the friction process (FRW) was observed and in general there was no discontinuity in the GTAW process. Changes in chip morphology have been observed which according to theory can change according to the hardness of the materials involved when they are formed in the machining processes. To verify the differences in the processes it was also analyzed the hardness of the material as received and the proposed processes, it can be concluded that the FRW process showed little variation and that in the TIG process presented sharp peaks and valleys in the graphical relationship, the base metal of overall showed no differences. Thus it was concluded that the FRW process of this alloy is a process to be better used and that through machining analysis and micrographs can assist in the certification of these processes.

**Keywords:** Friction welding. GTAW. FRW. Turning. Aluminum bronze. Chip.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência básica de soldagem por fricção.....	24
Figura 2 - Esquema microscópico das superfícies em atrito. ....	25
Figura 3 - Equipamento básico para soldagem por fricção.....	26
Figura 4 - Representação esquemática do processo TIG. ....	28
Figura 5 - Diagrama das principais partes componentes de um torno e seus movimentos. .	33
Figura 6 - Principais operações de torneamento.....	34
Figura 7 - Torneamento cilíndrico externo. ....	34
Figura 8 – Distribuição do material da peça durante a formação do cavaco .....	35
Figura 9 – Esquema da formação do cavaco mostrando o plano de cisalhamento .....	36
Figura 10 – Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco .....	37
Figura 11 – Formação das zonas de cisalhamento .....	38
Figura 12 – Tipos de cavacos de usinagem .....	39
Figura 13 – Formas de cavaco .....	40
Figura 14 – Material bronze de alumínio níquel utilizado para soldagem dos processos fricção e TIG. ....	41
Figura 15 – Imagem da máquina utilizada para o processo de fricção.....	41
Figura 16 – Imagens dos corpos de provas para os ensaios de soldagem po TIG e fricção respectivamente .....	42
Figura 17 – Imagens do código do eletrodo, do equipamento de solda TIG e de gás oxiacetileno.....	42
Figura 18 - Imagens das temperaturas de pré-aquecimento e temperatura soldagem medidas pelo pirômetro. ....	43
Figura 19 - Imagem da temperatura de soldagem por fricção pelo instrumento.....	44
Figura 20 - Imagens do torno e da pastilha utilizados no torneamento .....	44
Figura 21 - Corpo de prova com processo de soldagem TIG finalizado .....	45
Figura 22 - Corpo de prova com processo de solda por fricção finalizado .....	45
Figura 23 - Imagens reveladas da amostra da barra como recebida, ataque com cloreto férrico .....	46
Figura 24 - Microconstituintes possíveis de uma liga típica de bronze de alumínio.....	47
Figura 25 - Diagrama de equilíbrio da liga de Cu-Al-5Ni-5Fe .....	47
Figura 26 - Micrografias das regiões próxima e da região soldada pelo processo de fricção radial.....	48
Figura 27 - Imagens da amostra soldada pelo processo TIG, imagem (a) região interna da amostra não afetada pelo calor, (b) região de transição da região afetada para a ZTA.....	49
Figura 28 - Imagens de exemplo da morfologia Widmanstätten e alotriomórfica.....	50

Figura 29 - Imagens da amostra soldada pelo processo TIG, imagem (c) região ZTA, (d) região zona fundida .....	51
Figura 30 - Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das regiões soldada por fricção e não afetada .....	53
Figura 31 - Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das região ZTA pelo processo de fricção .....	54
Figura 32 - Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das regiões soldada por TIG não afetada termicamente e zona fundida .....	55
Figura 33 - Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das regiões soldada por TIG afetada termicamente .....	56
Figura 34 - Gráficos de medida de dureza das amostras (a) Soldagem por fricção (b) soldagem pelo processo TIG e (c) do metal de base .....	57

## **LISTA DE TABELAS E QUADROS**

Tabela 1 – Propriedades do bronze de alumínio da série C63000. ....	22
Quadro 1 – Possibilidade da aplicação da soldagem por atrito para alguns materiais .....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GTAW - Gas-Shielded Tungsten Arc Welding  
FW – Friction Welding  
TIG – Tungsten Inert Gas  
SMAW - Shielded Metal Arc Welding  
GMAW - Gas Metal Arc Welding  
MIG – Metal Inert Gas  
Cu - Cobre  
Al - Alumínio  
Fe - Ferro  
Mn - Manganês  
Ni - Níquel  
Si - Silício  
m – Metro  
mm - Milímetro  
a – Amperes  
RPM – Rotação Por Minuto  
MPa – Megapascal  
ZTA – Zona Termicamente Afetada  
CFC – Cubica de Face Centrada  
CNC - Computer Numeric Control  
CDP – Corpo de Prova  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
C° - Grau Celsius  
 $\alpha$  – Fase alfa  
 $\beta$  – Fase beta  
 $\beta'$  – Fase beta linha

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	20
2.1 COBRE.....	20
2.1.1 Cobre ligados .....	21
2.1.2 Ligados de cobre.....	21
2.1.3 Bronze de alumínio.....	21
2.2 SOLDAGEM DO BRONZE DE ALUMÍNIO .....	22
2.3 PROCESSO FW .....	24
2.3.1 Metodologia do processo FW .....	25
2.3.2 Equipamentos do processo FW .....	25
2.3.3 Materiais soldáveis no processo FW .....	26
2.3.4 Propriedades mecânicas do processo FW.....	27
2.3.5 Qualidade da solda do processo FW.....	27
2.3.6 Aplicações do processo FW.....	27
2.4 PROCESSO GTAW.....	27
2.4.1 Princípios de operação do processo TIG .....	28
2.4.2 Variáveis do processo TIG.....	28
2.4.3 Gases de proteção .....	30
2.4.4 Metais de adição .....	31
2.4.5 Vantagens do processo TIG .....	31
2.4.6 Limitações e potenciais problemas do processo TIG .....	31
2.5 USINAGEM.....	32
2.5.1 Torneamento .....	32
2.5.2 Mecanismo de formação de cavacos .....	35
2.5.3 Tipos de cavacos.....	37
3 MATERIAIS E METODOS .....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5 CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho em estudo é a análise microestrutural da liga bronze de alumínio soldado nos processos GTAW e FW, sabendo que aplicação dos materiais metálicos a preocupação sempre é sua relação com o meio ambiente, que neste caso pode em condições não favoráveis corroer algumas ligas metálicas, então a busca de materiais mais resistentes à corrosão é alvo dos metalurgistas. As ligas não ferrosas são em sua grande maioria resistentes à corrosão, como por exemplo, as ligas de cobre são aplicadas para diversas situações em uma delas em específico as de bronze de alumínio tem em sua aplicação a condições severas de ataque corrosivos. As ligas de bronze de alumínio estão no nível de resistência ao inoxidável, essas ligas também possuem alta resistência mecânica superior à de muitos aços. Além disso, mantem suas qualidades em altas e baixas temperaturas principalmente sua ductibilidade fazendo dele aplicáveis em partes de junções de turbinas, tais como parafusos de pás de turbina.

Nas indústrias aeronáuticas devido suas exigências é crescente a aplicação de ligas não ferrosas acelerando com isso o conhecimento e pesquisas de ligas tais como a de alumínio e cobre, pois necessita-se de matéria cada vez mais leve, resistente e com tolerâncias e ajuste apertados. Então, um dos processos de fabricação mais importante ligados a esses ramos de atividades é o setor de usinagem.

Outro processo de fabricação que envolve a liga bronze de alumínio é o processo de soldagem, que são feitos em componentes específicos em aplicações críticas. Por meio de suas características de aplicação de ser resistente a corrosão o processo de soldagem passa a ser também importante, pois ele tem que garantir ou manter suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. São muitos os relatos de problemas com relação à soldagem dessas ligas devido a sua soldabilidade, que às vezes procede de materiais não especificados e de procedimento inadequados.

Uma das situações inerentes do processo de soldagem seria por conta da presença do alumínio e do próprio cobre, com relação aos alumínio tende a formar camadas de óxidos elevando a temperatura para a própria fusão, somando a grande expansão térmica e dilatação da peça durante a soldagem. Quando se solda esse tipo de liga ocorre na extensão da solda, ou seja, na zona fundida e zona termicamente afetada mudanças de fases. Essas variações das fases durante todo o processo podem prejudicar a resistência à corrosão do material principalmente na zona termicamente afetada.

O processo de soldagem por fricção é um processo em amplo crescimento, pois em sua grande maioria não apresenta a zona termicamente afetada e a rapidez de seu processo diminui a expansão térmica dos componentes envolvidos. Atualmente a indústria aeronáutica está em ampla utilização principalmente em ligas de alumínio. Os processos de

fricção podem ser divididos em fricção horizontal utilizando de máquinas similares como máquinas ferramenta de torno e por fricção por estiramento também parecido com uma ferramenta de processo de fresamento, neste caso se limita a peças mais finas.

Um processo tecnológico que conduz os materiais a comportamentos diferentes perante a corrosão e resistência mecânica é o processo de usinagem. Uma das maneiras de se entender o processo de usinagem é o estudo da morfologia dos cavacos, já que ele pode revelar se os parâmetros e a escolha da ferramenta estão corretos ou não. O cavaco é material removido pela ação de uma ferramenta de corte. Os mecanismos de construção não são tão óbvios e fáceis de explicar, pois a interação entre peça e ferramenta não é um simples fato de corte onde o mais duro corta ou risca o mais mole. O estudo experimental da usinagem é de essencial importância, pois a teoria da plasticidade não permite explicar satisfatoriamente os fenômenos observados.

A metodologia a ser desenvolvida baseia-se na soldagem por fricção e TIG das ligas de bronze de alumínio, serão disponibilizados três corpos de prova para realizar cada processo. Será feito um chanfro em X das barras cilíndricas na soldagem em TIG. Já na soldagem por fricção não serão feitos chanfros, serão soldadas de topo através da adaptação em um torno convencional. Depois de soldados por meio dos dois processos serão usinados dois corpos de prova de cada. Com relação a um corpo de prova restante de cada processo, serão destinados a análises das três regiões da soldagem por meio da metalografia, medida de dureza, composição química, microscopia ótica e de varredura.

Por consequência serão relacionadas às microestruturas dos cavacos do bronze de alumínio dos dois processos com os parâmetros de usinagem utilizados em torneamento por duas pastilhas de metal duro. Contudo as micrografias geradas poderão revelar as condições do processo. Os cavacos em sua maioria apresentaram morfologia peculiar de um material cisalhante. Além disso, regiões de alta deformação caracterizada por bandas de cisalhamento nos contornos dos segmentos de uma porção para outra. Tais aspectos são específicos na deformação plástica dos processos de conformação e que em processos de usinagens também ocorrem, porém, de forma rápida e dinâmica. As pastilhas utilizadas para o processo de torneamento serão de metal duro do tipo alisadora. As variáveis de controle de processos serão velocidade de corte, avanço e a geometria da ferramenta e no caso a variável de controle o estudo dos cavacos.

As diferentes etapas do trabalho de usinagem serão divididas então em escolha dos cavacos em prévia avaliação na busca da identificação pelo tipo e forma do cavaco para análise em microscopia, será analisada a morfologia dos cavacos e a estereologia dos grãos, as regiões de bandas de deformação serão identificadas e medidas, os valores serão relacionados com a velocidade de corte e avanço utilizados nos processos. Para as análises da morfologia dos grãos será utilizado um software de processamento análise de imagem de



domínio público.

Por meio dos resultados das análises dos contornos de grãos, das durezas, da composição química das fases obtidas, das regiões de soldagem pelos dois processos, dos cavacos, da superfície usinada, das ferramentas de corte utilizadas poderão obter relações, comparações entre os dois processos, entre os valores das variáveis de entrada da usinagem do processo de usinagem sem soldagem. E também por meio desse projeto proposto discriminar e viabilizar as variáveis escolhidas. Espera-se que o comportamento do processo de soldagem por fricção se comporte de forma mais satisfatória com relação à zona termicamente afetada já que é considerado um processo autógeno, com a morfologia dos cavacos e com a superfície usinada.

O tema foi escolhido visto que havia uma ausência nesse tipo de pesquisa envolvendo a melhor soldagem e usinagem do bronze de alumínio com relação a suas propriedades mecânicas e químicas, já que diariamente são utilizados em indústrias químicas, petroquímicas, marinha, geração de energia, aeronaves, engenharia automotiva, ferroviária entre outras.

## JUSTIFICATIVA

Os processos de soldagem em sua maioria geram zonas termicamente afetadas, esse fenômeno normalmente é evidente em processos que envolvem fusão dos componentes. Muitas empresas têm buscado soluções para diminuir as zonas afetadas termicamente, porém este desafio acaba aumentando a complexidade do processo e as vezes encarecendo. Muitos outros processos vêm sendo utilizados e pesquisados em determinadas possibilidades.

Devido principalmente a esses fatos a soldagem por fricção vem tomando espaço nas indústrias e também objeto de pesquisa. Atualmente vem sendo desenvolvido equipamentos para os processos de soldagem radial e por estiramento, além disso algumas máquinas também estão sendo adaptadas para soldagem destes processos.

Com relação ao alcance dos processos e pesquisa da soldagem por fricção estão sendo pesquisados soldagem autógena e por materiais dissimilares, quanto estes podem se diversificar tanto na natureza dos materiais envolvidos quanto na geometria, ou seja, podendo soldar, por exemplo, por diâmetros diferentes.

Algumas empresas estão investindo muito na soldagem por fricção tanto a radial quanto por estiramento, empresas por exemplo da área de aviação onde a exigência é muito maior com relação a propriedades mecânicas tais como, resistência à fadiga. Essa propriedade é muito importante pois ela está ligada a estrutura interna e acabamento das peças, visto que a maioria das trincas se iniciam na superfície. Neste sentido relacionar a usinagem com a soldagem passa a ser um fator importante, já que o comportamento do material perante a ferramenta de corte pode variar tanto ao longo da peça quanto a região da solda, como isso já foi evidenciado em trabalhos científicos pelo próprio autor.

Portanto, estudar a soldagem da fricção sob o aspecto metalúrgico e da usinagem pode trazer uma contribuição muito grande para os processos de soldagem e da usinagem. Sendo assim aspectos, propriedades tanto mecânicas, tecnológicas e físico-químicos, tais como, zona termicamente afetada, dureza, difusão, fenômeno do atrito, esforços, composição química, tratamento térmico, geometrias, usinabilidade, cavacos, ferramentas de corte, controle de resfriamento e aquecimento tanto na usinagem quanto na soldagem, resistência à fadiga, tração e impacto podem trazer soluções e novos desenvolvimentos na soldagem de fricção de vários materiais.

## **OBJETIVO GERAL**

Desenvolver um trabalho que buscase o desenvolvimento da soldagem de materiais por fricção radial relacionando a metalografia e a usinabilidade para futuras certificações.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Soldar materiais por fricção radial autógena e por TIG para efetivas comparações.
- Analisar metalurgicamente a soldagem por fricção por meio de análises metalográficas, ensaio destrutível por dureza.
- Analisar por meio da usinagem, ou seja, pela geração dos cavacos para verificar suas mudanças perante as regiões de soldagem.
- Verificar as fases e as inclusões no material com auxílio de pesquisas de outros autores para explicar o compartimento deles no trabalho proposto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COBRE

A procura por materiais constituídos de elementos que pudessem resistir a esforços mecânicos e possuísem a capacidade de transmitir calor de forma eficiente e fossem fáceis de trabalhar foi um desafio para a engenharia. O bronze é marcado pela substituição de artefatos fabricados em pedra, por outros, construídos a partir do metal que combina o cobre com o estanho. Tal fato desencadeou um grande desenvolvimento tecnológico na época, uma vez que implicou em uma maior produção e rentabilidade. Após o descobrimento de suas excelentes propriedades, na era industrial, o cobre passou a ser requisitado em setores que exigiam elevada condutibilidade elétrica, resistência à corrosão e diversificada gama de processos de fabricação (AMANCIO, 2013).

Segundo Derek (1990) apud Amâncio (2013), o cobre e suas ligas constituem um grupo de materiais metálicos das mais antigas e diversificadas utilizações. Esses materiais reúnem um conjunto de características que justificam o amplo espectro de uso, tais como: elevada condutividade elétrica e térmica, elevada resistência à corrosão, moderada resistência mecânica e facilidade de serem submetidos aos diversos processos de fabricação, como fundição, conformação plástica, soldagem, usinagem com acabamento superficial. A elevada condutividade elétrica permite o emprego do cobre de forma intensa nas instalações de condução de energia elétrica (na forma de fios de cobre) e nos equipamentos geradores e motores de diversas dimensões e potências. Os equipamentos eletrônicos, incluindo os dispositivos de microeletrônica, também utilizam o cobre como material condutor de sinais.

Segundo Amâncio (2013), a elevada resistência à corrosão facilita a sua aplicação em todas as áreas, mas é de particular interesse para o emprego em sistemas de condução e processamento de determinados produtos na forma líquida ou gasosa. Quando a necessidade de elevada condutibilidade térmica está presente, como ocorre nos equipamentos de transferência de calor, o cobre e muitas de suas ligas são especificados. As diversas cores naturais do cobre e suas ligas nas tonalidades avermelhadas, amareladas, douradas e prateadas são importantes para as aplicações onde os aspectos de aparência devem ser considerados. Existem três categorias que classificam este metal: cobres, cobres ligados e ligas de cobre. A designação, segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), é a seguinte:

- Cobres (incluindo o cobre ligado com prata) - série: 10100 a 13000
- Cobres ligados-série: 14000 a 16000
- Ligas de cobre – série: 17000 a 70000

### **2.1.1 Cobre Ligados**

Segundo Benedetti (2003) apud Amâncio (2013), os cures ligados são aqueles que contêm uma porcentagem inferior a 3% de algum elemento adicionado para melhorar alguma das características do cobre como a usinabilidade (facilidade de usinagem), resistência mecânica e outras, conservando a alta condutibilidade elétrica e térmica do cobre. Os elementos utilizados são estanho, cádmio, ferro, telúrio, zircônio, cromo e berílio. Outras ligas de cobre importantes são latões (zinco), bronzes (estanho), cuproalúminios (alumínio), cuproníqueis (níquel), cuprosilícios (silício) e alpacas (níquel-zinco).

### **2.1.2 Ligados de Cobre**

Segundo Benedetti (2003) apud Amâncio (2013), considera-se como cobre, comumente, o metal que contém 99,3% ou mais desse elemento (incluindo o teor de prata), ao qual não foi adicionado outro elemento, exceto para fins de desoxidação. Os diversos tipos de cobre dúctil – eletrolítico tenaz, desoxidado com fósforo e isento de oxigênio – apresentam um teor mínimo que varia de 99,80 a 99,99%; os teores dos elementos residuais dependem do tipo de cobre, ou seja, do tipo de processamento de refino ou desoxidação a que o metal foi previamente submetido. Para muitas aplicações um fator importante de controle é a condutibilidade elétrica. Combinação do cobre com outros elementos em teor considerável. Tal fato aumenta a resistência do material e dispensa outro mecanismo de endurecimento, como a conformação plástica. A resistência mecânica, apesar de elevada, é limitada pela temperatura de 300°C devido à fácil fundibilidade. À baixas temperaturas, no entanto, não há limitações, já que o cobre possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Exemplos dessa categoria são: cobre e zinco (latão), cobre e estanho (bronze), cobre e níquel (cupro-níqueis), cobre e alumínio (bronzes de alumínio) e cobre e silício (bronze de silício).

### **2.1.3 Bronze Alumínio**

Segundo ASTM (2008), apud Amâncio (2013), o integrante da categoria "Ligas de cobre", o bronze de alumínio apresenta até 14% de alumínio (Al), que constitui o principal elemento de liga. A elevada resistência à corrosão sob tensão, em virtude da presença de uma película refratária de óxido, possibilita uma ampla gama de aplicações na engenharia, principalmente quando diz respeito à indústria naval e aeronáutica. A escolha deste material nos setores industriais mencionados acima é decorrente do fato de sua resistência mecânica ser superior à de muitos aços, além de sua resistência à corrosão ser do nível dos aços inoxidáveis. Outros elementos também são frequentemente adicionados com o intuito de otimizar a qualidade do material. O ferro (Fe) é responsável pelo aumento da resistência

mecânica por ser um refinador de grão, o manganês (Mn) contribui para uma maior soldabilidade e o níquel (Ni) melhora a resistência à corrosão.

Segundo Amâncio (2013), uma das características do bronze de alumínio é a capacidade de manter a resistência mecânica a temperaturas relativamente altas e ter um pequeno ganho na mesma quando a temperatura diminui, sem perder a excelente ductilidade. Os parafusos de pás de turbinas, que constantemente são sujeitos a temperaturas elevadas, possuem partes compostas deste material que possibilita o enfrentamento não só do efeito do calor, mas também da erosão por cavitação, um dos fatores responsáveis pela corrosão. A resistência à erosão por cavitação nesta liga é maior que a de aços inoxidáveis das séries 300 e 400 e, até mesmo, da de algumas superligas de níquel. Com isso, o ataque de bolhas de gás e o consequente impingimento pode ser evitado com sua utilização. Apesar de todas as qualidades, o elevado preço restringe sua utilização a eventos que exijam a necessidade das características que lhes são próprias. As aplicações numerosas e variadas para ligas de alumínio bronze, refletem plenamente a sua versatilidade como material de engenharia. Os bronzes de alumínio estão encontrando crescente uso na indústria química, petroquímica e usina de dessalinização, marinha, geração de energia, aeronaves, engenharia automotiva e ferroviária, ferro e aço, fabricação elétrica e construção de indústrias.

A tabela 1 exhibe as propriedades do bronze de alumínio da série C63000.

Tabela 1 - Propriedades do bronze de alumínio da série C63000

<b>Propriedades das Ligas de Bronze de Alumínio (Série C 63000)</b>	
<b>Composição Química: Al~10%, Fe~3,0%, Ni~5%, Cu~balanceado</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Densidade	7,58x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	121 GPa
Coefficiente de Expansão Térmica	16,2x10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Condutividade Térmica	39,1 W/(mK)
Coefficiente de Elasticidade	689 MPa
Coefficiente de Cisalhamento	427 MPa
Tensão de Fadiga	248 MPa
Dureza	95 HB

Fonte: ASTM (2008)

## 2.2 SOLDAGEM DO BRONZE DE ALUMÍNIO

Até cerca de 7 % de alumínio essas ligas Cu-Al são monofásicas, porém acima desse teor e até 11 % as ligas desse sistema são bifásicas. A soldagem afeta a microestrutura destas ligas (6 a 8 % de alumínio e 2 a 3,5 % de ferro), geralmente

utilizadas em trocadores de calor e que podem sofrer fragilização na raiz no caso de soldagem multipasse autógena. Essa fragilização provavelmente é causada pela decomposição da fase b retida em fase frágil  $g_2$  durante o reaquecimento do metal de solda, o qual é rapidamente resfriado após o passe na raiz. O problema de trincamento na raiz da solda é geralmente resolvido pelo uso de metal de adição com composição química diferente da liga bifásica (INFOMET, s.d).

A fase b do metal de adição bifásico pode, sob determinadas condições, sofrer um tipo de corrosão conhecido como desaluminificação, podendo ser necessário depositar um revestimento final de metal de solda com composição química semelhante à do metal de base para evitar esse tipo de corrosão eletroquímica. O fenômeno amplamente divulgado de trincamento no metal de base pode ser evitado pelo controle cuidadoso dos procedimentos de laminação e reaquecimento durante a fabricação das chapas (INFOMET, s.d).

Em comum com outros tipos de ligas de cobre os bronzes de alumínio apresentam perda de ductilidade num certo intervalo de temperaturas particularmente crítico durante a soldagem, dificultando este processo. Devido aos problemas de soldagem apresentados pelas ligas Cu-Al foram desenvolvidas as novas ligas Cu-Al-Si, contendo cerca de 6 % de alumínio e 2 % de silício, que mostraram ser alternativas bastante viáveis às aplicações tradicionais do bronze de alumínio, tanto como metal base quanto como metal de adição nas aplicações em que média resistência mecânica é solicitada. Outro grupo de ligas que deve ser considerado é o do sistema Cu-Al-Mn, que contêm até cerca de 9 % de alumínio, 12 % de manganês e adições de ferro e níquel, sendo que essas ligas são destinadas basicamente à produção de peças fundidas. São ligas que apresentam excelente soldabilidade e não sofrem fragilização em temperaturas intermediárias, embora necessitem de tratamento térmico pós-soldagem para restaurar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão (INFOMET, s.d).

Todos os bronzes de alumínio, mesmo com a melhor proteção gasosa possível, formam o óxido refratário alumina ( $Al_2O_3$ ) devido à oxidação da poça de fusão. De modo a se obter boa fluidez na poça e evitar o aprisionamento de inclusões de óxidos, essas camadas de óxidos devem ser dispersas, o que obriga ao uso de corrente alternada na soldagem TIG, de modo a se aproveitar a ação de limpeza proporcionada pelo uso da corrente alternada. Argônio é o gás normalmente, usado como proteção. Na soldagem MIG é possível se obter uma ação de limpeza contínua do arco através do uso de polaridade positiva. Em ambos os processos TIG e MIG o fluxo de gás deve ocorrer a uma taxa que seja suficiente para evitar oxidação excessiva da zona de soldagem e evitar defeitos de falta de fusão e de aprisionamento de inclusões de óxidos. A proteção gasosa com hélio na

soldagem TIG também é vantajosa, pois a corrente contínua com polaridade negativa proporciona satisfatória ação de limpeza da poça de fusão. O uso de hélio também proporciona melhor penetração e mais altas velocidades de soldagem (INFOMET, s.d).

O pré-aquecimento deve ser evitado sempre que possível e as temperaturas interpasse devem ser mantidas num valor mínimo, e modo a evitar um superaquecimento que poderia causar perda de ductilidade e problemas de trincamento. É essencial a limpeza com escovas após a deposição de cada passe de soldagem para se obter boa qualidade na junta soldada (INFOMET, s.d).

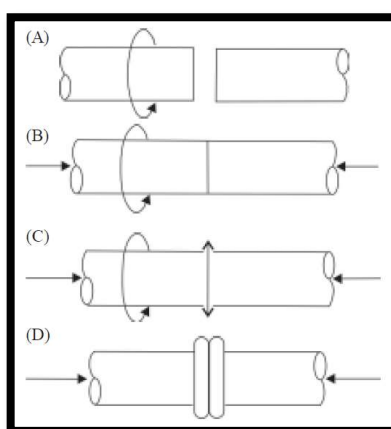
### 2.3 PROCESSO FW

A soldagem por atrito é um processo de união no estado sólido, no qual a coalescência entre as peças metálicas é obtida por aquecimento, através do atrito (FARIA, BRACARENSE, 2003).

O processo é descrito abaixo e mostrado na figura 1 a sequência básica de soldagem por fricção.

- (A) Disposição inicial das peças a serem soldadas, peça a direita com velocidade constante e à esquerda parada.
- (B) Contato inicial entre as peças, através das forças aplicadas no sentido axial. Este contato gera calor aquecendo as superfícies devido ao atrito.
- (C) Deformação plástica devido ao aumento da força axial e do aquecimento.
- (D) Caldeamento e forjamento da junta soldada.

Figura 1 – Sequência básica de soldagem por fricção.

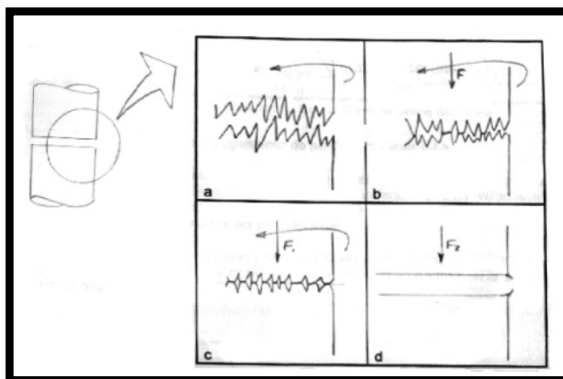


Fonte: FARIA, BRACARENSE (2003)



Segundo Silva, Gimenez (2012), com esta aproximação das superfícies há um aquecimento localizado que a princípio ocorre somente nas partes salientes destas superfícies, onde há atrito e conseqüentemente nestes pontos que estão a uma temperatura elevada há fusão e no instante seguinte são cisalhados devido ao movimento da peça, conforme pode se observar na figura 2, esquema microscópico das superfícies em atrito.

Figura 2 – Esquema microscópico das superfícies em atrito.



Fonte: INFOSOLDA (2012)

A solda é feita em poucos segundos, tem alta resistência e a zona termicamente afetada (ZTA) é estreita. Este processo é aplicável a diversos materiais, similares ou não (FARIA, BRACARENSE, 2003).

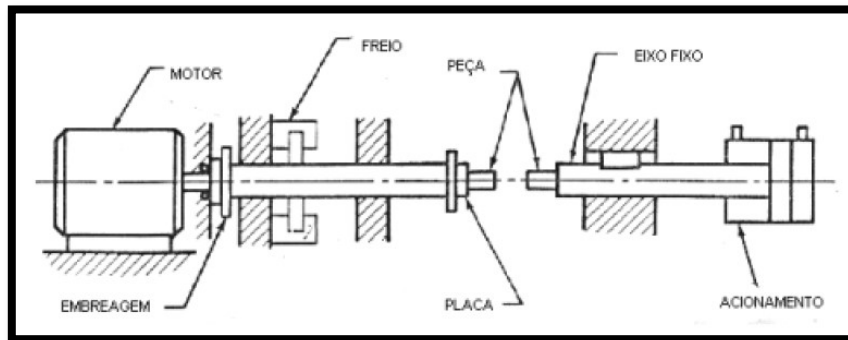
### 2.3.1 Metodologia do processo FW

As peças a serem soldadas são fixadas nas garras da máquina de soldar. Uma das peças é acelerada até atingir a velocidade de soldagem pré-determinada por intermédio de uma unidade motora. A outra peça que está parada é deslocada por uma força axial de atrito até tocar a peça que está girando. Este contato provoca o aquecimento das superfícies devido o atrito. Quando as superfícies em contato atingem a temperatura de forjamento dos materiais, a unidade motora é desacoplada da peça que está em rotação e a força axial é aumentada, atingindo a força axial de forjamento. Esta é mantida até que as juntas estejam soldadas (FARIA, BRACARENSE, 2003).

### 2.3.2 Equipamentos do processo FW

O equipamento básico para a soldagem por atrito consiste de cabeçote de fixação das peças (garras), sistemas para movimento de rotação e sistema para aplicação de forças axiais (pressão) (FARIA, BRACARENSE, 2003). Na figura 3 a seguir pode-se observar o equipamento básico para soldagem por fricção.

Figura 3 – Equipamento básico para soldagem por fricção



Fonte: FARIA, BRACARENSE (2003)

### 2.3.3 Materiais soldáveis no processo FW

A maioria dos metais pode ser soldado por atrito, com exceção para o ferro fundido, porque o grafite age como lubrificante. Certas ligas que possuem baixo coeficiente de atrito, como bronze e latão com mais de 0,3 Pb. Certos aços com inclusão de sulfetos de manganês também não podem ser soldados devido à formação das fases frágeis na solda (FARIA, BRACARENSE, 2003). O quadro 01 apresenta as principais possibilidades dos materiais soldáveis por fricção.

Quadro1 – Possibilidade da aplicação da soldagem por atrito para alguns materiais.

	Al	Bronze	Cu	Cu-Ni	Mg	Monel	Ni	Aço Baixa Liga	Aço C	Aço Usinagem Fácil	Aço Inox	Aço Ferramenta	Ti	W	Materiais Válvulas
Al	■														
Bronze		■													
Cu			■												
Cu-Ni				■											
Mg					■										
Monel						■									
Ni							■								
Aço Baixa Liga								■							
Aço C									■						
Aço Usinagem Fácil										■					
Aço Inox											■				
Aço Ferramenta												■			
Ti													■		
W														■	
Materiais Válvulas															■

■ Boa Soldabilidade  
 ■■■■ Dificil Soldabilidade  
 Não soldável

Fonte: INFOSOLDA (2012)

### **2.3.4 Propriedades mecânicas do processo FW**

Como não há fusão do material a ser soldado, nem material de adição, gás de proteção e escória, as propriedades mecânicas da solda são próximas à do metal de base. A variação de dureza ao longo da zona termicamente afetada (ZTA) é muito pequena. A resistência à fadiga também não é muito afetada, principalmente quando o material for temperado e revenido após a soldagem (FARIA, BRACARENSE, 2003).

### **2.3.5 Qualidade da solda do processo FW**

A qualidade da solda depende da escolha correta das variáveis de processo. Por ser um tipo de soldagem no estado sólido e por não necessitar de metal de adição ou mesmo fluxos, praticamente não ocorrem defeitos como: poros devido a gases, inclusões de escória e fase frágeis. Os defeitos mais comuns são: cisalhamento na zona afetada pelo calor (baixa velocidade inicial ou volante superdimensionado) e defeitos centrais causados por pequenos orifícios no centro uma das peças (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Os tipos de exame mais utilizados são: a inspeção visual e a medida do comprimento da peça. Os ensaios de tração, flexão, impacto e fadiga podem ser utilizados para controle de qualidade (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Geralmente faz-se também uma metalografia da junta soldada, bem como medidas de dureza ao longo da zona afetada pelo calor (FARIA, BRACARENSE, 2003).

### **2.3.6 Aplicação do processo FW**

A soldagem por fricção é aplicada em diversas indústrias:

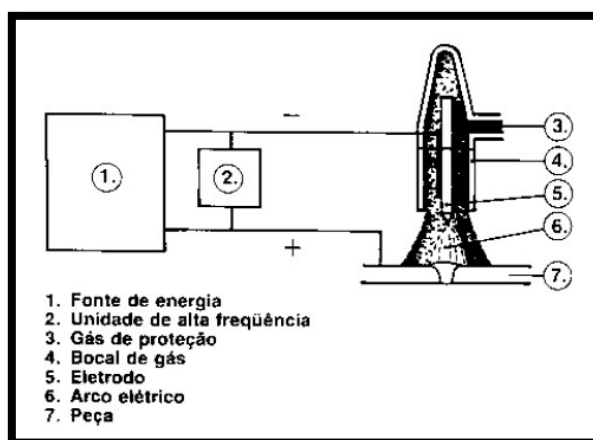
- Aviação
- Metal mecânica
- Petrolífera
- Militar
- Agrícola
- Automobilística

## **2.4 PROCESSO GTAW**

O processo de soldagem TIG ou Gás Tungsten Arc Welding (GTAW), como é mais conhecido atualmente, é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Conforme pode-se notar pela figura abaixo, a poça de soldagem, o eletrodo e parte do cordão são protegidos através do gás de proteção que é soprado pelo bocal da tocha. No processo, pode-se utilizar adição

ou não (solda autógena), e seu grande desenvolvimento deveu-se à necessidade de disponibilidade de processos eficientes de soldagem para matérias difíceis, como alumínio e magnésio, notadamente na indústria da aviação no começo da segunda grande guerra mundial. Assim, como o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e relativo baixo custo, de uso em aplicações diversas, com inúmeras vantagens (BRACARENSE, 2000). A figura 4 abaixo demonstra a representação esquemática do processo TIG.

Figura 4 – Representação esquemática do processo TIG.



Fonte: BRACARENSE (2000)

#### 2.4.1 Princípios de operação processo TIG

O GTAW funciona através do eletrodo de tungstênio (ou liga de tungstênio) preso a uma tocha. Por essa mesma tocha é alimentado o gás que irá proteger a soldagem contra a contaminação da atmosfera. O arco elétrico é criado pela passagem de corrente elétrica pelo gás de proteção ionizado, estabelecendo-se o arco entre a ponta do eletrodo e a peça (BRACARENSE, 2000).

Em termos básicos, os componentes do GTAW são;

1. Tocha;
2. Eletrodo;
3. Fonte de Potência;
4. Gás de Proteção;

#### 2.4.2 Variáveis do processo TIG

As variáveis que determinam basicamente o processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que

as variáveis não agem especificamente de forma independente, havendo forte interação entre elas (BRACARENSE, 2000).

No caso do gás de proteção, ao utilizar-se o Hélio é possível obter uma solda com maior penetração, devido ao maior potencial de ionização deste gás. Em relação à corrente de soldagem pode-se considerar, de forma geral, que ela controla a penetração da solda, com efeito diretamente proporcional. Ainda assim, a corrente afeta também a tensão do arco, sendo que para um mesmo comprimento de arco, um aumento na corrente causará um aumento na tensão do arco. As soldagens com corrente contínua em eletrodo no polo negativo oferecem elevada penetração e maiores velocidades de soldagem, enquanto a corrente alternada é especialmente eficaz quando na soldagem de materiais com óxidos refratários, como alumínio e magnésio, pois pode-se realizar a chamada limpeza catódica, quando o eletrodo se encontra no polo positivo. A terceira opção, de corrente alternada com eletrodo no polo positivo, é pouco utilizada devido ao superaquecimento do eletrodo (BRACARENSE, 2000).

A tensão do arco, designação dada para a tensão entre o eletrodo e a peça, é fortemente influenciada por diversos fatores, a saber (BRACARENSE, 2000).

1. Corrente do arco;
2. Perfil da ponta do eletrodo;
3. Distância entre o eletrodo e a peça (comprimento do arco);
4. Tipo de gás de proteção;

Como existe uma relação direta entre a tensão e o comprimento do arco, a tensão é usada para controlar o processo, pois uma vez fixados diversos outros parâmetros, a tensão do arco possibilita o controle do comprimento do arco, que é difícil de monitorar. Por sua vez, o comprimento do arco afeta diretamente a largura da poça. Apesar disso, na maioria dos processos com chapas, o comprimento do arco desejado é o menor possível. Este controle do comprimento do arco pela tensão, entretanto, deve ser feito de maneira cuidadosa, observando-se outros parâmetros que também afetam a tensão como contaminação do eletrodo e do gás de proteção, alimentação imprópria do material de adição, mudanças de temperatura no eletrodo e erosão do eletrodo (BRACARENSE, 2000).

A velocidade de avanço afeta a penetração e a largura no processo, sendo esta última, porém, muito mais afetada. Sua grande importância reside no fato dela determinar o custo do processo por estar intimamente ligada à velocidade do processo. Entretanto, muitas vezes, a velocidade torna-se apenas uma consequência a partir da definição de padrões de qualidade e uniformidade (BRACARENSE, 2000).

A forma de alimentação do material de adição é outro parâmetro importante. Em processos manuais, a maneira como o material é adicionado influencia no número de

passes e na aparência da solda acabada. Já no caso de soldas mecanizadas e automatizadas, a variação na velocidade irá significar variação na quantidade de adição por unidade de comprimento. Aumentando-se a velocidade de alimentação do arame produz-se soldas com menor penetração e perfis convexos diminuindo-se a velocidade e aumenta-se a penetração e tem-se perfis mais achatados. A redução da velocidade tem um limite, entretanto, pois pode levar a fissuras e falta de material (BRACARENSE, 2000).

### **2.4.3 Gases de proteção**

Os gases de proteção são direcionados pela tocha para o arco e a poça de fusão para proteger o eletrodo e o material metálico fundido da contaminação atmosférica. Eles também podem ser utilizados como “back-up” para proteção do lado contrário da solda da oxidação durante a soldagem (BRACARENSE, 2000).

Os tipos mais comuns de gases são o argônio e o hélio e as misturas entre estes, utilizadas em aplicações especiais, além de misturas com hidrogênio e nitrogênio. O argônio utilizado em processos de soldagem normalmente possui uma pureza de 99,95 %, sendo aceitável para a maioria dos metais, excetuando-se aqueles reativos ou refratários. O argônio é mais utilizado que o hélio no processo devido às seguintes características (BRACARENSE, 2000).

- Possibilita arco mais suave
- Penetração reduzida
- Ação de limpeza quando da soldagem de alumínio ou magnésio
- Baixo custo e alta disponibilidade
- Boa proteção com baixos fluxos
- Maior resistência a ventos cruzados
- Melhor partida do arco

A menor penetração é particularmente útil na soldagem de materiais finos ou soldagens verticais ou sobre cabeça (BRACARENSE, 2000).

Como vimos acima, o Hélio transmite maior calor para uma mesma corrente e tensão que o argônio e, portanto, é particularmente importante na soldagem de peças espessas ou materiais com alta condutividade térmica como o cobre. Características intermediárias podem ser obtidas através da mistura dos dois gases. A principal característica envolvida no processo de proteção, é a densidade dos gases. Neste aspecto, o argônio, por ter uma densidade aproximadamente dez vezes maior que a do hélio, forma uma camada sobre a área de solda após deixar o bocal, ao contrário do hélio que, por ser extremamente leve,

tende a subir em torno do bocal ao deixá-lo. Assim, para prover a mesma eficiência de proteção, a vazão de hélio deverá ser de 2 a 3 vezes maior que a vazão de argônio (BRACARENSE, 2000).

#### **2.4.4 Metais de adição**

Os metais de adição em GTAW, quando utilizados, devem ser similares ao metal e base, mas não necessariamente idênticos. Sua produção é realizada sob controle mais rígido da composição química, pureza e qualidade que o metal de base. Algumas modificações são feitas para permitir uma melhor resposta para tratamentos térmicos posteriores à solda. A escolha do metal de adição para qualquer aplicação é um compromisso que envolve compatibilidade metalúrgica, características corretas para o serviço solicitado e custos (BRACARENSE, 2000).

Os arames podem estar dispostos em rolos ou arames cortados de 1 m e esforços devem ser empreendidos para evitar a contaminação destes materiais na sua estocagem e uso. Mais importante ainda é a manutenção da extremidade do arame na proteção do gás durante o processo de soldagem (BRACARENSE, 2000).

#### **2.4.5 Vantagens do processo TIG**

Conforme Bracarense (2000)

1. Produz soldas de qualidade superior, geralmente livres de defeitos;
2. Está livre dos respingos que ocorrem em outros processos a arco;
3. Pode ser utilizado com ou sem adição;
4. Permite excelente controle na penetração de passes de raiz;
5. Pode produzir excelentes soldagem autógenas (sem adição) a altas velocidades;
6. Utiliza-se de fontes de energia de baixo custo;
7. Permite um controle preciso das variáveis da soldagem;
8. Pode ser usado em quase todos os metais, inclusive metais dissimilares;
9. Permite um controle independente da fonte de calor e do material de adição;

#### **2.4.6 Limitações e potenciais problemas do processo TIG**

Segundo Bracarense (2000)

1. Taxas de deposição inferiores com processos de eletrodos consumíveis;
2. Há necessidade de maior destreza e coordenação do operador em relação ao SMAW e GMAW;
3. É menos econômico que os processos de eletrodos consumíveis para espessuras a 10 mm;

4. Há dificuldade de manter a proteção em ambientes turbulentos;
5. Pode haver inclusões de Tungstênio, no caso de haver contato do mesmo com a poça de soldagem;
6. Pode haver contaminação da solda se o metal de adição não for adequadamente protegido;
7. Há baixa tolerância a contaminantes no material de base ou adição;
8. Vazamento no sistema de refrigeração pode causar contaminação ou porosidade Sopro ou deflexão do arco, como em outros processos;

## 2.5 USINAGEM

Como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à forma, ou dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Definimos cavaco, a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Além desta característica, estão envolvidos no mecanismo da formação do cavaco alguns fenômenos particulares, tais como o recalque, a aresta postiça de corte, a craterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica do cavaco (dentro de determinado campo de variação da velocidade de corte (FERRARESI, 1970).

O número de operações de usinagem é muito grande, assim como é grande a variedade de máquinas operatrizes e ferramentas de corte. No entanto será abordado no presente trabalho apenas o processo a ser utilizado, o processo de torneamento.

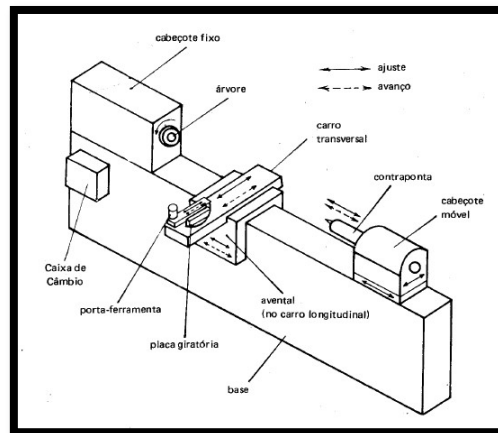
### 2.5.1 Torneamento

Processo mecânico da usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1970).

Conforme Chiaverini (1986), a figura 5 representa um diagrama das principais partes componentes de um torno e seus movimentos.



Figura 5 - Diagrama das principais partes componentes de um torno e seus movimentos.



Fonte: CHIAVERINI (1986)

O torno representado é chamado torno mecânico, torno paralelo ou torno universal. É o tipo mais generalizado e presta-se a um grande número de operações de usinagem. Basicamente, o torno mecânico é constituído de uma base maciça e rígida, para resistir a deformações e apresentar suficiente capacidade de amortecimento das vibrações resultantes das operações de usinagem. A peça a ser usinada é fixada numa placa de castanhas, suportada pela árvore principal que faz parte do cabeçote fixo. A árvore principal é dotada de um movimento de rotação contínuo que se transfere a peça, que, por sua vez, é submetida à ação de uma ou várias ferramentas, de modo a ter material arrancado. A árvore deve ser capaz de girar com velocidades periféricas diferentes, as quais são estabelecidas em função do diâmetro das peças sob usinagem, do tipo de acabamento desejado, do tipo de operação planejada (desbaste, acabamento etc.) do tipo de material etc (CHIAVERINI, 1986).

Uma caixa de engrenagens (ou de câmbio), convenientemente localizada, permite a mudança de velocidade da árvore (CHIAVERINI, 1986).

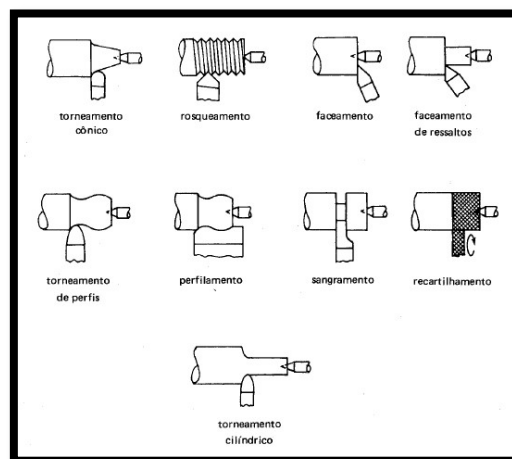
Na parte central está situado o *carro porta-ferramentas*, montado sobre *avental*. O conjunto – carro porta-ferramentas e avental – é projetado de modo a ser dotado de movimentos longitudinal e transversal; assim, a ferramenta pode deslizar, se necessário, segundo uma linha oblíqua, ou seja, uma linha resultante dos movimentos longitudinal e transversal. O *avanço* da ferramenta pode ser realizado manualmente ou automaticamente. No conjunto carro porta-ferramentas e avental, situa-se, ainda, uma placa giratória, que gira e torno de um eixo vertical, de modo a ser colocada em qualquer ângulo em relação ao eixo da peça sob usinagem (CHIAVERINI, 1986).

Na outra extremidade do torno situa-se o *cabeço móvel*, cujo objetivo é suportar as

peças que giram. Compõe-se de um suporte fundido, de uma *contraponta* e de dispositivos diversos como *mangote*, *volante* e outros. O mangote não gira; porem pode deslocar-se alguns centímetros no sentido longitudinal e ser travado na posição desejada. O cabeçote móvel é oco e possui um cone interno onde podem ser fixadas diversas ferramentas, como brocas helicoidais, alargadores, machos de roscamento, além das contra-pontas, os quais são avançados de encontro às peças (CHIAVERINI, 1986).

Os tornos possuem uma série de acessórios – que contribuem para torna-los extremamente versáteis -, tais como placa universal, placa de castanhas independentes, luneta fixa e luneta acompanhadora, aparelho conificador, pinças etc (CHIAVERINI, 1986). Conforme Chiaverini (1986), a figura 6 apresenta esquematicamente as principais operações de torneamento.

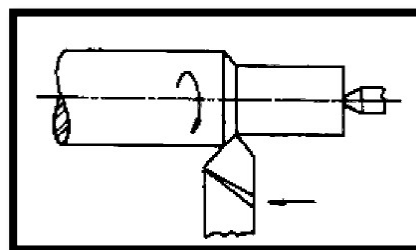
Figura 6 – Principais operações de torneamento.



Fonte: CHIAVERINI (1986)

O torneamento utilizado no presente trabalho será o torneamento cilíndrico externo, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina, conforme pode observar na figura 7, torneamento cilíndrico externo.

Figura 7 – Torneamento cilíndrico externo.



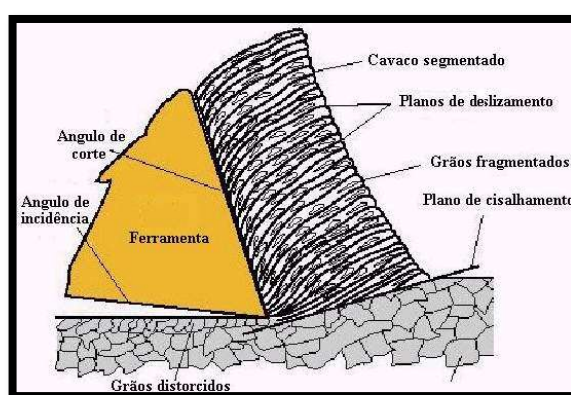
Fonte: FERRARESI (1970)

### 2.5.2. Mecanismo de Formação de Cavaco

Segundo Ferraresi (1977), já definia com muita clareza que o cavaco representa uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, em operação de usinagem, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

O cavaco em geral pode ser formado por um mecanismo de deformação plástica, onde os cristais do metal são alongados através de escorregamento ou cisalhamento, como pode se observar na figura 8, distribuição do material da peça durante a formação do cavaco (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 1999).

Figura 8 - Distribuição do material da peça durante a formação do cavaco.



Fonte: DINIZ (1999)

A formação de cavaco pode revelar diversos fatores ligados a usinagem dos materiais, tais como desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc. Assim, estão envolvidos no processo de formação de cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina-ferramenta, etc (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 1999).

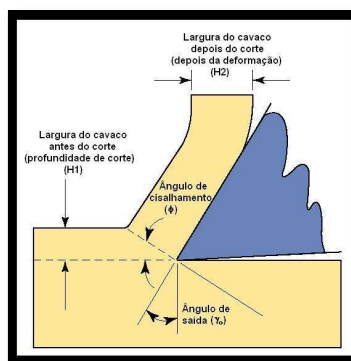
O corte dos metais, pode envolver o cisalhamento concentrado ao longo de um plano chamado de plano de cisalhamento (zona primária de cisalhamento). O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é chamado de ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ) (Figura 9). Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores são os esforços de corte. Esta influência é marcante na usinagem de materiais de alta deformação, como o alumínio (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 1999).

Na maioria dos casos, a formação de cavaco, pode processar da seguinte forma (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 1999).

- a) No início, o material devido ao avanço da ferramenta contra peça forma um plano de deslizamento de sentido contrário. Devido à penetração, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalçada contra a superfície de saída da ferramenta.
- b) O material recalçado sofre uma deformação plástica instantânea, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento sob o plano de cisalhamento dos cristais da porção de material recalçada (sem que haja com isso uma perda de coesão) entre a porção de material recalçado e a peça. Durante a usinagem, os planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento.
- c) Continuando o avanço da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento. Esse fato pode estar relacionado aos defeitos lineares dos materiais e as condições de usinagem, visto que alguns materiais que apresentam resistência ao movimento das discordâncias podem apresentar baixas taxas de encruamento provocando assim essas rupturas.
- d) Com o movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, uma outra porção desse material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

Esse fenômeno pode ser mais bem observado em cavacos de morfologia segmentada, traduzida pelas separações de suas porções, conforme demonstrado na figura 9, esquema da formação do cavaco mostrando o plano de cisalhamento.

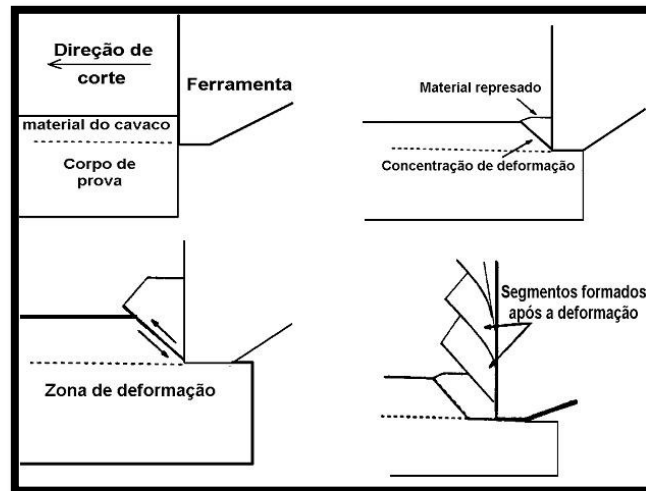
Figura 9 - Esquema da formação do cavaco mostrando o plano de cisalhamento



Fonte: SCHNEIDER (2001)

A sequência do processo de formação do cavaco pode ser observada através da Figura 10. Esse esquema não pode ser totalmente representativo para todos materiais, porém pode ser considerada uma forma generalizada e comparativa.

Figura 10 - Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco



Fonte: SIEMERS (2001)

Do exposto conclui-se que, o fenômeno da formação do cavaco obedecendo às propriedades mecânicas de cada material pode ser considerado um fenômeno periódico. Tem-se em geral, alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido.

### 2.5.3 Tipos de Cavacos

Os cavacos podem ser classificados de diversas maneiras. Existem maneiras detalhadas de se classificar os tipos e formas dos cavacos, como por exemplo, a classificação que a norma ISO 3685 apresenta. Uma maneira didática de se classificar os cavacos seria pela classificação em tipos e formas.

Com relação aos tipos de cavacos podemos classificá-los conforme aos seus resultados, ou seja, a interação entre suas propriedades mecânicas e a operação de corte:

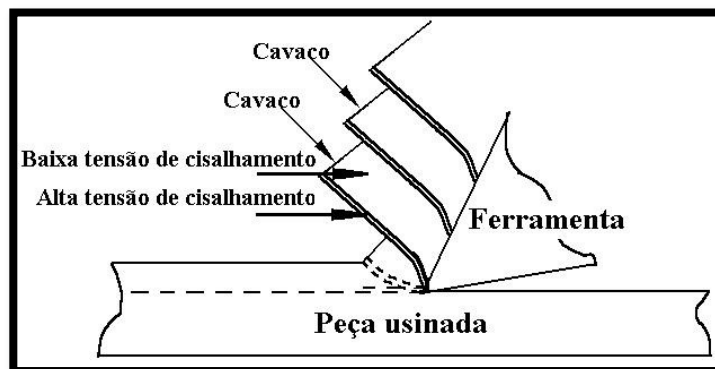
- Cavaco contínuo;
- Cavaco de cisalhamento;
- Cavaco de ruptura.

O cavaco contínuo apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. No cavaco contínuo, a distinção entre estes grupos lamelares não é tão nítida, como nos outros tipos de cavaco; há apenas um deslizamento destes elementos de cavacos. Este deslizamento é, porém, nitidamente observado através da variação da força de usinagem. O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, onde o ângulo de saída da ferramenta deve assumir valores elevados.

O Cavaco de cisalhamento apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos o que dá ao material um formato de dente de serra, aspecto que confere um certo grau de segmentação ao cavaco. Forma-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento da deformação, a heterogeneidades da estrutura metalográfica, ou a vibrações externas que conduzem às variações da espessura de cavaco.

Já os Cavacos de ruptura apresentam-se constituídos de fragmentos arrancados da peça usinada. Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento), os quais permanecem separados. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão. Através da figura 11 pode-se observar à formação das zonas de cisalhamento.

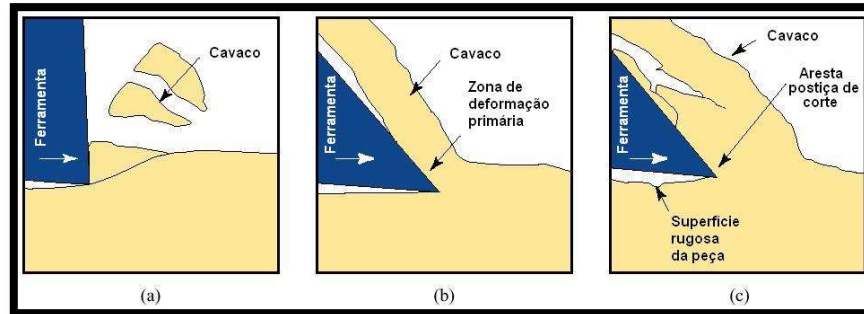
Figura 11 - Formação das zonas de cisalhamento



Fonte: SCHNEIDER (2001)

Através da figura 12, também pode-se observar alguns tipos de cavacos formados na usinagem.

Figura 12 - Tipos de cavacos de usinagem:



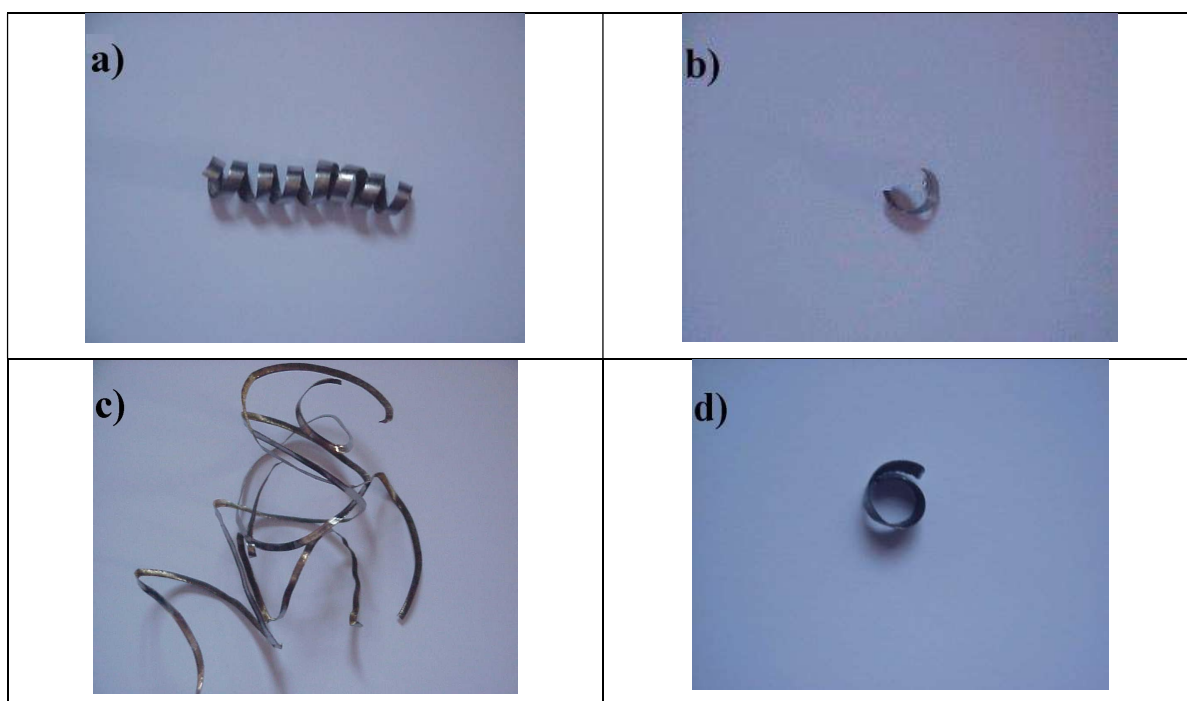
Fonte: SCHNEIDER (2001)

- (a) Descontínuo (de ruptura).
- (b) Contínuo.
- (c) Contínuo com aresta postiza de corte.

Não há uma distinção muito nítida entre os cavacos contínuos e de cisalhamento. Conforme as condições de usinagem e a geometria da ferramenta, se estas impuserem uma deformação maior ao cavaco, pode-se passar do contínuo ao de cisalhamento, mas o principal fator determinante do tipo de cavaco é o material da peça usinada. Em geral materiais dúcteis (aços, alumínio) formam cavacos contínuos ou de cisalhamento e materiais frágeis (ferros fundidos) formam cavacos de ruptura.

Segundo Moreira (2002), além dos três tipos de cavaco, pode-se diferenciá-los quanto à sua forma. Quatro tipos de formas de cavacos podem ser considerados, conforme podemos observar através da Figura 13, formas de cavaco.

Figura 13 - Formas de cavaco



Fonte: MOREIRA (2002)

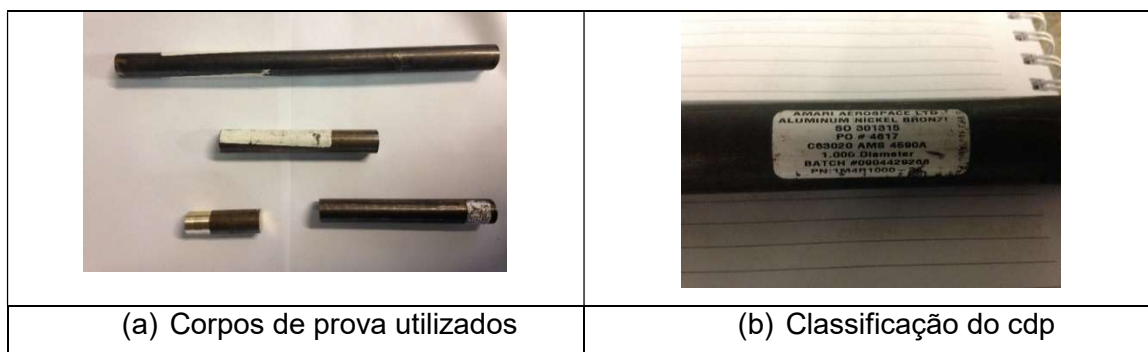
- (a) Cavaco em helicoidal.
- (b) Cavaco em lascas ou pedaços.
- (c) Cavaco em fita.
- (d) Cavaco em espiral.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado no trabalho é uma liga de bronze de alumínio níquel de classificação C 63020 TQ 50. A geometria pertinente aos testes propostos se trata de barras cilíndricas de diâmetro de 1 polegada. A figura 14 representa as imagens do material bronze de alumínio níquel utilizado para soldagem dos processos fricção e TIG.

Figura 14 - Material bronze de alumínio níquel utilizado para soldagem dos processos fricção e TIG.



Fonte: Próprio autor

O material foi usinado para beneficiamento dos ensaios, projetado então seis corpos de provas, sendo 3 corpos de prova para o processo TIG e 3 corpos de prova para o processo fricção radial. A máquina utilizada para os ensaios foi o torno IMOR representado pela imagem da figura 15.

Figura 15 - Imagem da máquina utilizada para o processo de fricção.

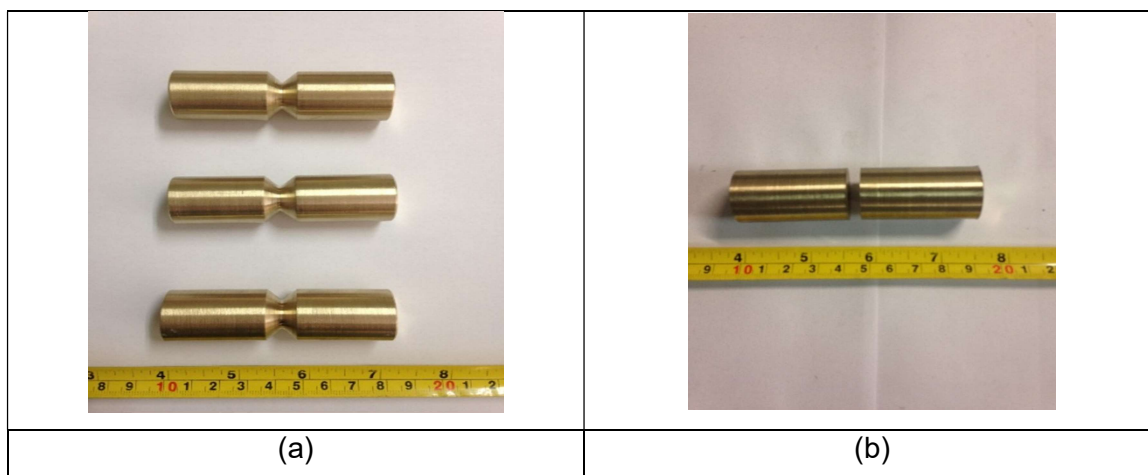


Fonte: Próprio autor

Como proposto no trabalho foram feitos corpos de prova para o processo TIG e fricção com o objetivo de verificar qual seria melhor em termos de análise microestrutural. Para tanto, o corpo de prova TIG foi usinado um chanfro em "V" de 12 mm de largura e

profundidade de 6 mm, o resultado pós usinagem foi uma geometria de diâmetro 25 mm x 80 mm de comprimento. A figura 16 representa as imagens dos corpos de provas, para os ensaios de GTAW imagem (a) e para os ensaios de fricção radial imagem (b) com dimensões de duas partes iguais de 25 mm diâmetro por 40 mm comprimento.

Figura 16. Imagens dos corpos de provas para os ensaios de soldagem por TIG e fricção respectivamente.



Fonte: Próprio autor

O consumível utilizado para o processo de GTAW foi por meio de uma bobina de arame para soldagem MIG-MAG cortado em pedaços de 300 mm, onde o código do arame era WIM285 – CuSnC e o gás utilizado para o processo foi o argônio. Por meio das imagens da figura 17 pode ser visualizado o consumível, máquina de solda TIG Eutectic máster NT 2000 AC/DC e o equipamento de gás respectivamente. Com objetivo de melhorar o processo TIG, foi proposto uma pré-aquecimento utilizando gás oxigênio e acetileno.

Figura 17 - Imagens do código do eletrodo, do equipamento de solda TIG e de gás oxiacetileno.



Fonte: Próprio autor

As imagens da figura 18 a seguir mostra o processo de soldagem TIG onde o pré-aquecimento chegou a 287.5 °C, com amperagem da máquina; 120 A, o tempo de soldagem pode volta de 12 min atingindo a temperatura máxima de 550 °C de soldagem conforme a imagem da direita da figura 18.

Figura 18. Imagens das temperaturas de pré-aquecimento e temperatura soldagem medidas pelo pirômetro.



Fonte: Próprio autor

Com relação ao processo de soldagem por fricção tomou-se o cuidado primeiramente com a limpeza nos corpos de prova removeu-se tais produtos como óleo, graxa ou qualquer componente que pudesse diminuir o atrito entre as partes na hora da soldagem.

Os corpos de provas para o processo de soldagem foram fixados no torno, onde um deles na placa para o movimento giratório e a outra peça no contra-ponto, considerando como a parte não giratória ou fixa tendo apenas o movimento na horizontal.

O alinhamento dos CP's entre si é muito importante, pois evita uma soldagem desalinhada e o excesso de vibração, algo que pode dificultar no momento da soldagem e por consequência não obter uma solda de qualidade. Foi utilizada uma rotação de 810 rpm para realizar a soldagem que durou aproximadamente 4 minutos no total, os primeiros 30 segundos foram observados o tempo de atrito, momento em que os dois materiais estavam em contato e os 3 minutos e 30 segundos restantes foi o momento de pressão por forjamento, momento este em que o torno já se encontrava desligado e os materiais em linha de forjamento, isto é necessário até que a região da solda se esfriasse.

O processo de soldagem chegou-se a uma temperatura máxima de 106° °C observado pelo pirômetro como pode ser observado pela imagem da figura 19.

Figura 19 - Imagem da temperatura de soldagem por fricção pelo instrumento.



Fonte: Próprio autor

Depois de realizar os processos de soldagem TIG e fricção foi realizado o processo de usinagem para cada corpo de prova como o objetivo de analisar diferentes áreas dos materiais e ver se sofreram alguma alteração. Para isso foi recolhido cavacos para análises metalográficas. As regiões posteriores para as análises foram a região zona fundida onde sofreu maior concentração de calor, a região da ZTA região da zona termicamente afetada, pois é uma região próxima à zona fundida e a região não afetada região que não sofreu muita concentração de calor.

A máquina utilizada para o processo de usinagem com características de acabamento foi o torno Nardini Nodus, como pode ser observado pela imagem da figura 20. A ferramenta utilizada para o processo de torneamento foi pastilha triangular LAMINA TNUX 160404 R, também pode ser observado por meio da imagem consecutiva da figura 20.

Figura 20 - Imagens do torno e da pastilha utilizados no torneamento.



Fonte: Próprio autor

Com relação aos parâmetros utilizados nos processos de soldagem, foi baseado em catálogos que exprimem usinagem de ligas não ferrosas, a rotação foi de 1000 RPM, a velocidade de corte de 90 (m/min), o avanço de 0,25 (mm/volta), a profundidade de usinagem de 1,5 mm.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado para discussão será o processo de soldagem por TIG, a imagem da figura 21 adiante demonstra o resultado deste processo. Apesar de ser considerado um processo importante em questão de qualidade perante aos processos de fusão por arco elétrico, se demonstrou não tanto eficiente para esta liga em específico, mostrando algumas descontinuidades aparente tais como poros.

Figura 21 - Corpo de prova com processo de soldagem TIG finalizado.



Fonte: Próprio autor

Com relação ao processo por fricção radial pode ser visualizado o resultado de um dos corpos de provas, pode ser observado a qualidade da junção, pelo pesquisado aparentemente ou visualmente foi considerado satisfatório o processo, formou-se a chamada “aba” de junção, demonstrando de certa forma o sucesso da operação. Pela imagem da figura 22 pode ser visualizado o corpo de prova soldado pelo processo por fricção proposto.

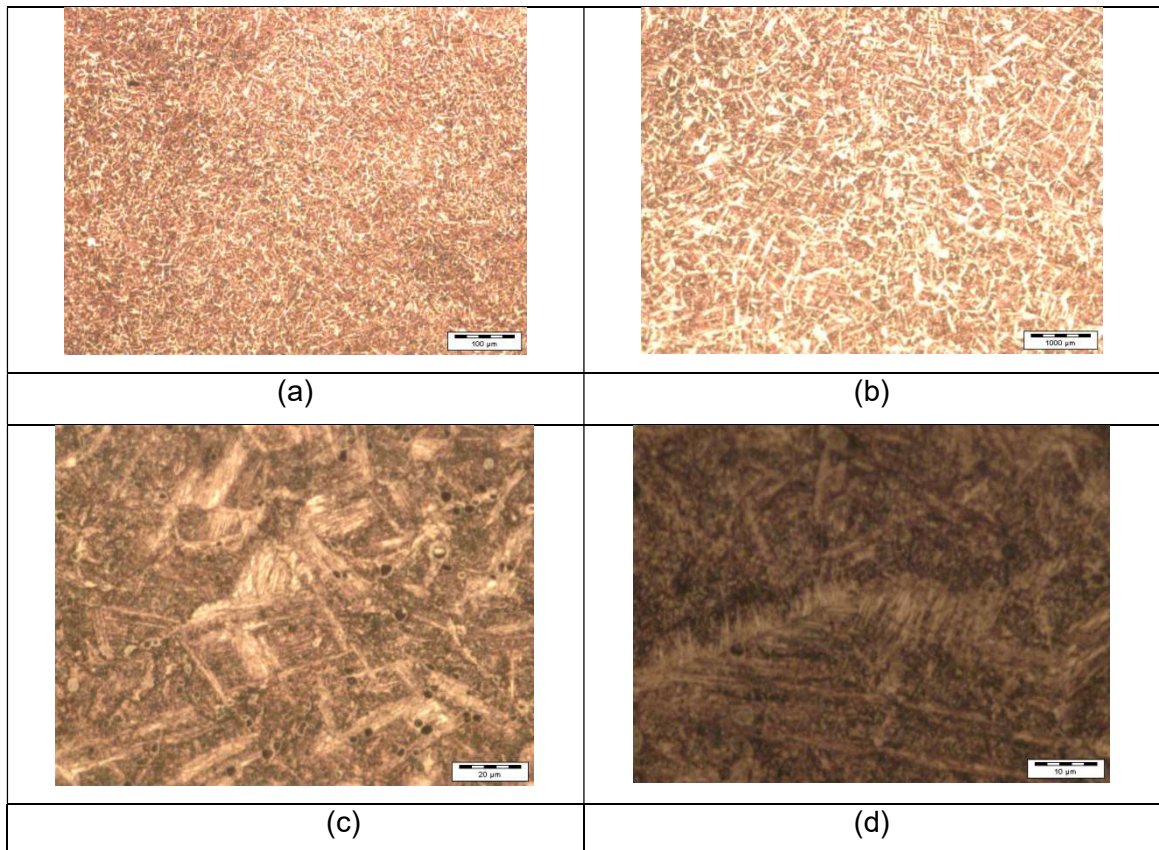
Figura 22. Corpo de prova com processo de solda por fricção finalizado.



Fonte: Próprio autor

As imagens da figura 23 representam o material como recebido, conforme discutido no materiais e métodos, todo processo metalográfico foi estudado e discutido, pois se tratava de um material de difícil lixamento e polimento, o reagente utilizado foi o tetracloreto férrico.

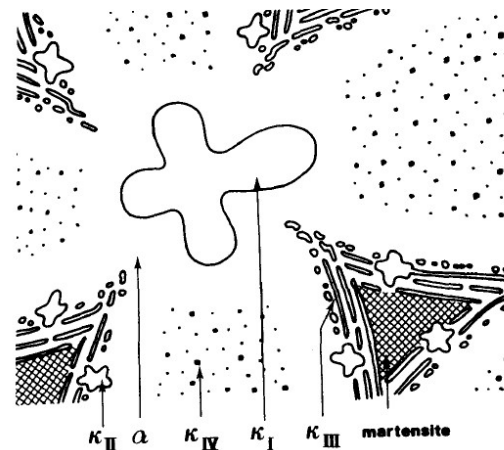
Figura 23 - Imagens reveladas da amostra da barra como recebida, ataque com cloreto férrico.



Fonte: Próprio autor

Para ajudar as discussões das imagens de todas as regiões a imagem da figura 24 pode ajudar nas identificações das microestruturas. Segundo o autor essas são os possíveis componentes em uma liga típica de bronze de alumínio.

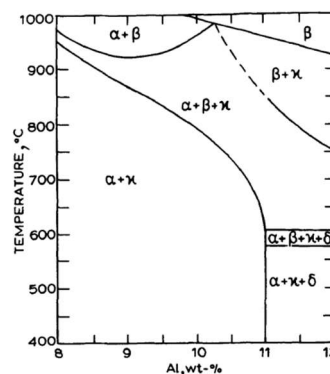
Figura 24. Microconstituintes possíveis de uma liga típica de bronze de alumínio.



Fonte: HASAN (1982).

A imagem (a) da figura 23, representa uma ampliação de 100x pelo microscópio ótico, pode se observar uma estrutura típica de ligas de bronze de alumínio, as imagens seguintes são as ampliações posteriores. Ao analisar as imagens (c) e (d) pode fazer uma análoga comparação com a imagem da figura 24, pode ser observado as fases  $\alpha$  (região mais clara) e  $\beta$  (região mais escura), apresenta também regiões martensíticas ou fase  $\beta'$ . É visível também os precipitados tipo  $\kappa_{IV}$ . A fase  $\alpha$  pode ser constituída de apenas Cu-Al, para menos de 10% de alumínio, se tratando então da fase mais dúctil da liga. Pelo próprio resfriamento verificado pelo diagrama de fase da liga (figura 25) a fase beta pode ser transformada na fase martensítica, que deve acontecer nesta liga fundida. Os precipitados encontrados da fase tipo  $\kappa_{IV}$  são segundo Cook, et al. (1952), de  $Fe_3Al$ , com parâmetro de rede em torno de  $5,77 \pm 0,06$  ângstrom e também uma morfologia equiaxial ou romboédrica, não foi analisado aqui as orientações dos precipitados, porém pelo fato de se equiaxial pode ajudar no processo de conformação do próprio material e automaticamente influencia no processo de soldagem por fricção.

Figura 25. Diagrama de equilíbrio da liga de Cu-Al-5Ni-5Fe.

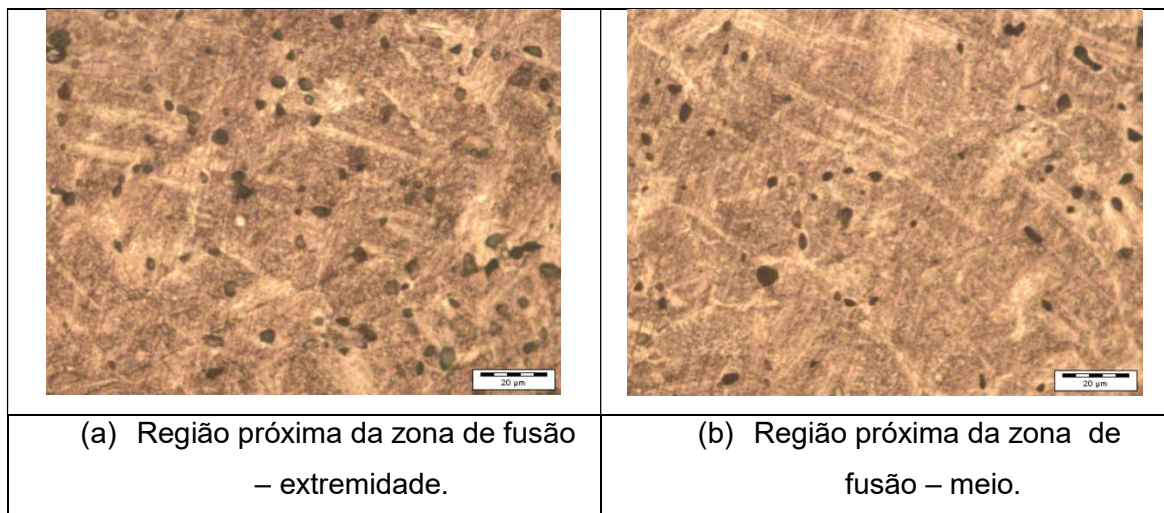


Fonte: COOK (1952)

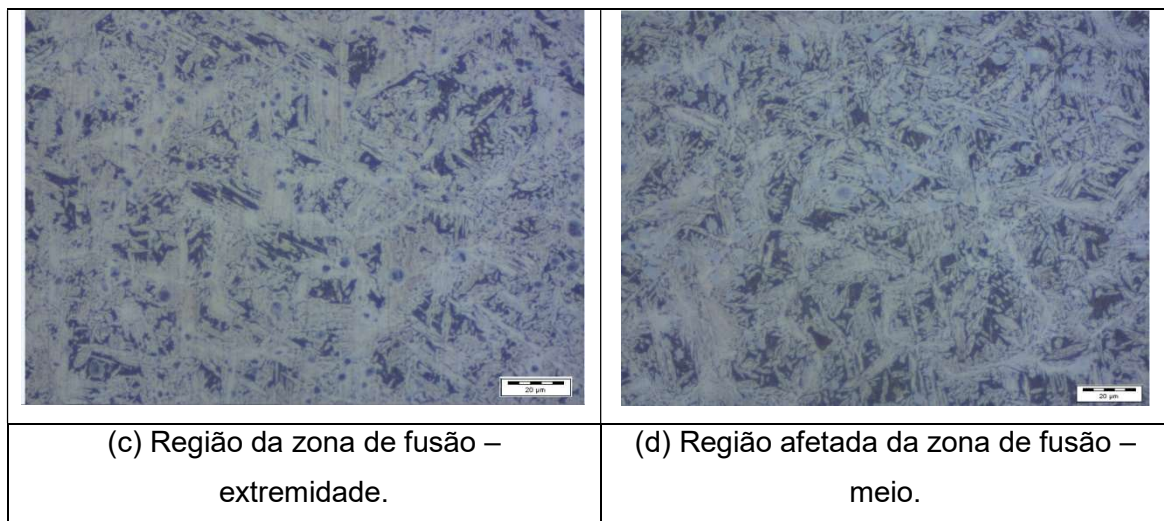
As micrografias da figura 26, mostram as regiões próximas da zona de fricção onde, a imagem (a) representa próximo das bordas da amostra e a imagem (b) no meio da amostra radial, pode observar que não houveram mudanças significativas perante as imagens mostradas na figura 23, porém pode ser salientado que a presença de precipitados foi mais intensa principalmente nas regiões mais próxima das bordas do corpo de prova. Os precipitados observados nestas regiões seguem também a proximidade morfológica perante as análises das imagens da figura 24.

Segundo Cook, et al. (1952), os precipitados tipo  $\kappa_{II}$  e  $\kappa_{IV}$  são similares na composição substancial, porém se diferem na geometria principalmente pelo tamanho, nas imagens apresentadas podem ser visualizadas alguns precipitados tipo  $\kappa_{II}$ , principalmente na imagem (b). Esses precipitados são responsáveis pelo endurecimento da liga, ajudam na resistência ao desgaste, teoricamente aumenta o fator atrito por serem componentes intermetálicos. Apesar de não estarem em contato direto com outra parte na fricção suas orientações  $[x \text{ y } z]_{\kappa}$  paralelas com a orientação da matriz  $[x \text{ y } z]_{\alpha}$ , refletem na deformação ou no movimento dos planos de discordâncias provocada pela ação do torque na hora da soldagem próxima a zona de fusão.

Figura 26. Micrografias das regiões próxima e da região soldada pelo processo de fricção radial.





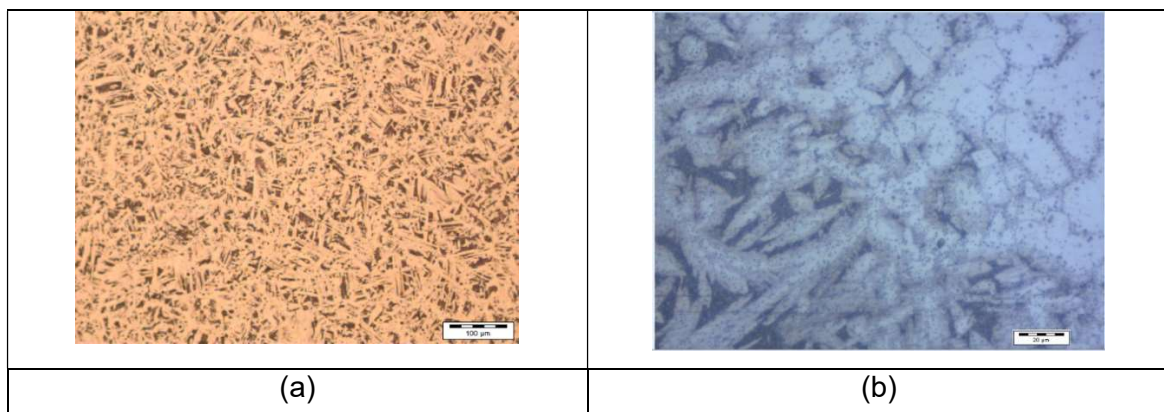


Fonte: Próprio autor

Com relação as imagens (c) e (d) da figura 26 pode ser visualizado as mudanças significativas perante a imagem da figura 24 e das imagens (a) e (b) da mesma figura. Pode-se observar uma estrutura martensítica  $\beta'$  marcante, a essa estrutura resulta segundo do esfriamento rápido do material prendendo de certo modo a fase  $\beta$ , pois esta fase só aparece quando o material atinge temperatura acima de 600 graus e que dependendo da temperatura somente revela acima de 11% de alumínio conforme o diagrama apresentado por meio da imagem da figura 25. O alumínio é para essa liga um elemento alfacênico assim como o níquel. O ferro ajuda a revelar na microestrutura os precipitados. Nesta liga em particular possui o níquel e ferro então por isso as características que seguem como comentado.

Com relação ao processo TIG proposto as imagens das figuras 27 e 28 foram obtidas das regiões do metal de base, zona de transição, zona fundida e ZTA.

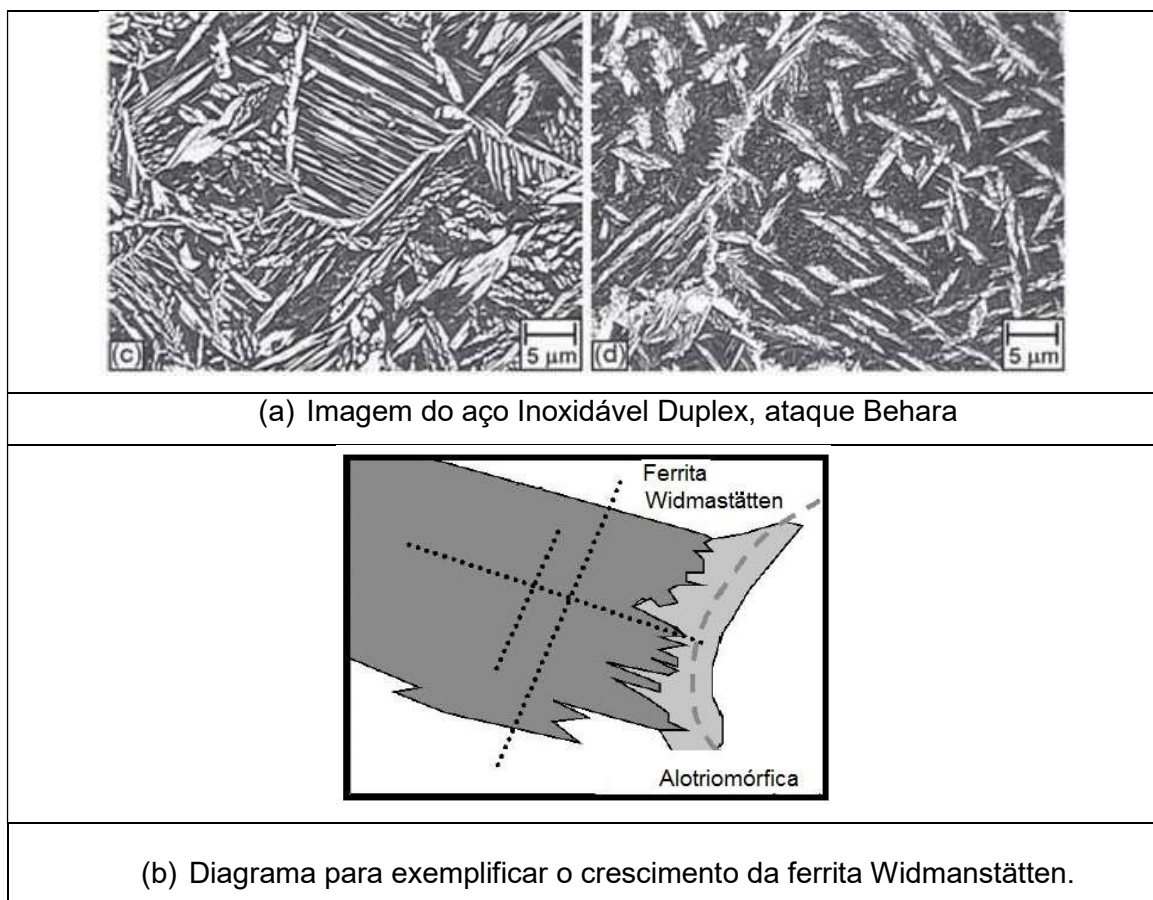
Figura 27. Imagens da amostra soldada pelo processo TIG, imagem (a) região interna da amostra não afetada pelo calor, (b) região de transição da região afetada para a ZTA.



Fonte: Próprio autor

A imagem (a) da figura 27 representa o metal de base do material, pode se observar as fases  $\alpha$  Widmanstätten que neste caso é um produto da transformação da fase  $\beta$  em planos cristalográficos provenientes do resfriamento, fase  $\kappa$  que são as regiões mais escuras e seus precipitados. Com relação a fase  $\alpha$  Widmanstätten são provenientes das fases  $\alpha$  alotriomórfica pré-existente, que neste caso também é observado na matriz. Para que isso seja comprovado as imagens da figura 28 pode ser relacionado, porém essas imagens são de um outro material, mas a morfologia pode ser correlacionada além de um diagrama também de outro trabalho.

Figura 28. Imagens de exemplo da morfologia Widmanstätten e alotriomórfica.



Fonte: (a) VASCONCELLOS (2010), (b) PHELAN, DIPPENAAR (2004).

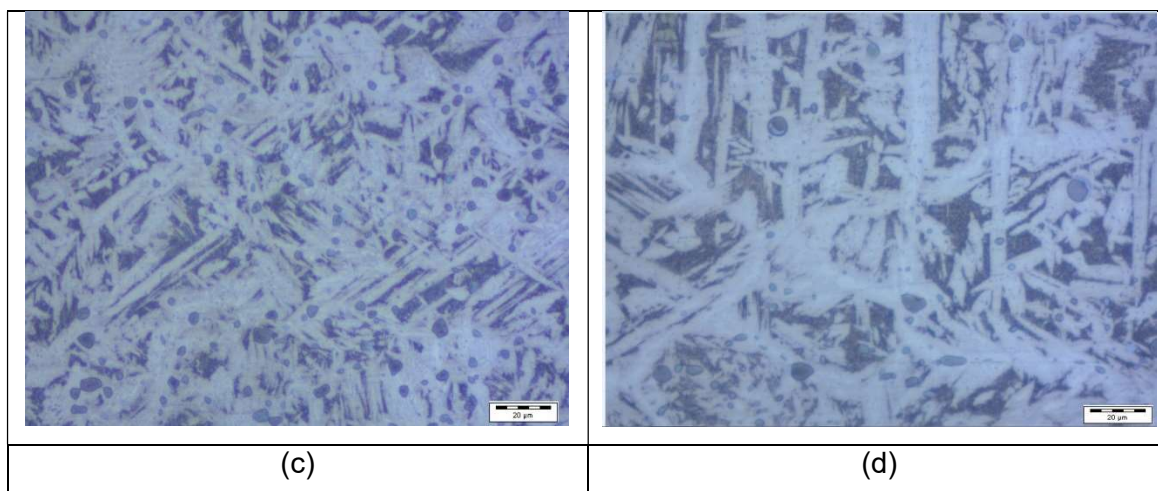
Seguindo o mesmo raciocínio a imagem (b) da figura 27 mostra uma certa similaridade com as imagens da figura 28. Porém, cabe ressaltar uma observação na mesma imagem uma região de separação visível da mudança da morfologia da zona não afetada para a ZTA, observa-se contornos de grãos equiaxiais nas regiões superior direita proveniente do metal de base, a partir disso, ou seja, a região inferior esquerda mostra a ZTA e suas características de grãos idiomórficos, alotriomórficos e Widmanstätten.

Seguindo a mesma linha analítica morfológica as imagens da figura 29 representam

(c) a ZTA e a imagem (d) zona fundida. A imagem (c) revela uma estrutura morfológica quase totalmente fase  $\alpha$  Widmanstätten, apresenta-se também pequenos grãos idiomórficos da fase  $\alpha$ , podem ser visualizados também grãos martensíticos ou fase  $\beta^I$ , talvez pelo de resfriamento mais rápido do processo de soldagem. Com relação aos precipitados em sua maioria  $\kappa_{IV}$  apresentou-se em grande quantidade, talvez pela presença do aumento de elementos migratórios para o metal de base, pois o eletrodo era composto de elementos tais como o estanho e carbono. Quando há um aumento da fase  $\kappa$ , possivelmente a estrutura fica mais dura ou resistente, pois essa fase absorve alumínio da solução sólida  $\alpha$  que previne a formação da fase frágil  $\beta$ .

O carbono proveniente do arame pode reagir com os possíveis oxigênios no processo, apesar do ambiente inerte argônio. O estanho no eletrodo se encontra em torno de 8% nas fases ( $\alpha + \epsilon$ ) onde a fase  $\epsilon$  representa muito pouco no conjunto das duas fases, além disso a fase  $\alpha$  é uma solução sólida rica em cobre. Pois então o estanho ficaria como elemento residual ou precipitado metálico nos contornos dependendo das energias térmicas no sistema.

Figura 29. Imagens da amostra soldada pelo processo TIG, imagem (c) região ZTA, (d) região zona fundida.



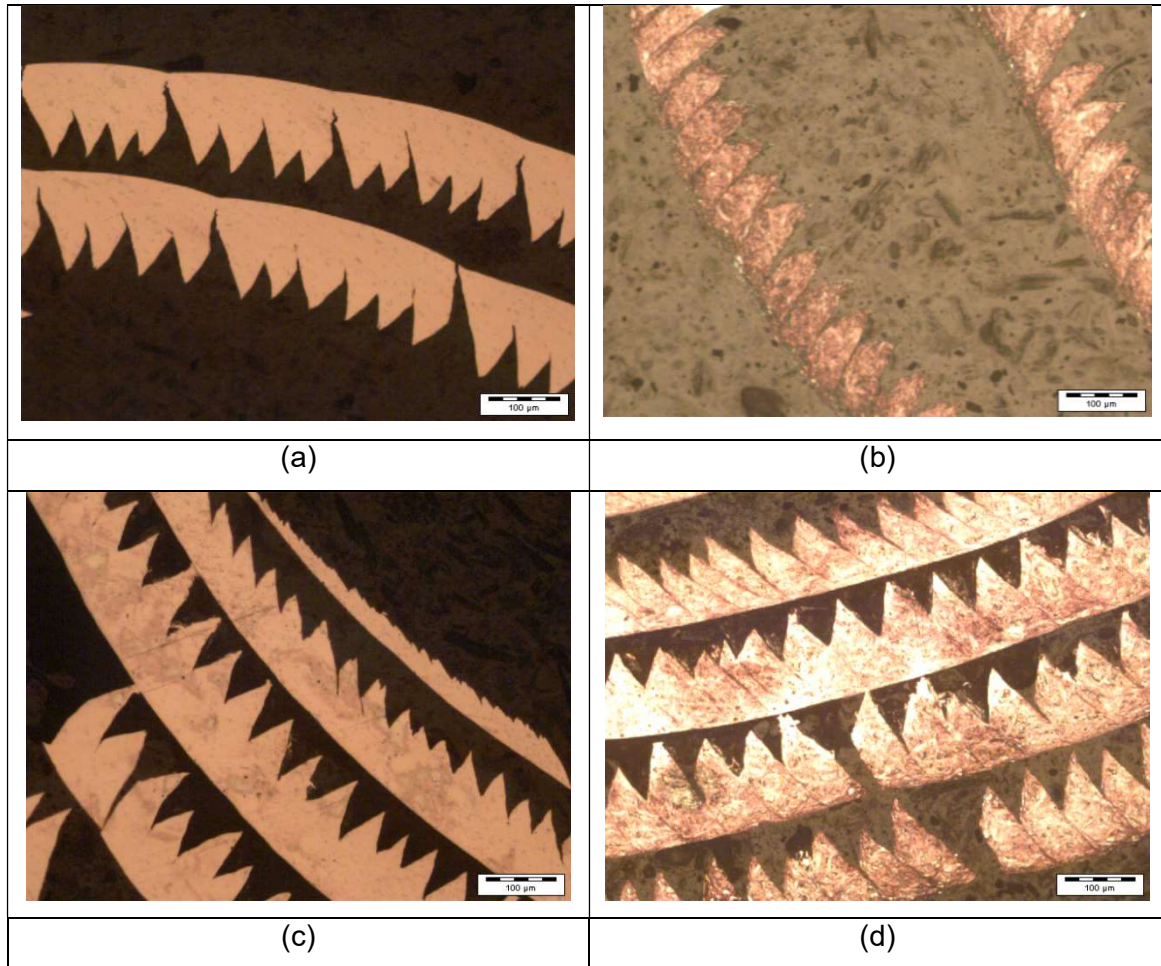
Fonte: Próprio autor

Com relação a zona fundida, imagem (d) da figura 29, revelou-se uma microestrutura em forma de ripas ou dendríticas provocado pelo resfriamento mais rápido, situação normal de soldagem por processo de fusão. Por se tratar de um eletrodo de bronze com alta concentração de cobre e pouca de estanho a micrografia revela pouca quantidade de precipitados. Isto para a liga de bronze não é uma situação desejável pois a liga do eletrodo possui um limite de resistência em torno de 280 MPa e dureza de 85 a 100 Brinell, já uma liga de bronze de alumínio limite de resistência em torno de 470 MPa e dureza entre 120 a

130 Brinell. Apesar disto a formação de ripas ou colunares pode deixar o material resistente pois dificulta os processos de deformação mecânica. Uma outra observação é difusão da fase  $\alpha$  (parte escura) na matriz de cobre podendo diminuir esse efeito negativo das propriedades mecânicas

Como proposto pelo trabalho, as análises dos cavacos pode ser um item de entendimento dos processos, as imagens das figuras adiante revelam as mesmas situações das análises anteriores. As imagens da figura 30 revelam os cavacos do processo por fricção, a imagem (a) mostra os cavacos apenas polido para que se possa verificar o tipo e a forma do torneamento, estes tipos de cavacos são da forma intermediária, ou seja, entre o contínuo e frágil, essa forma intermediária revela a dureza também propriedade intermediária entre os materiais dúcteis como o alumínio e cobre puros para com materiais frágeis como o ferro fundido. A forma serrilhada dos cavacos segue à risca os tipos de cavacos cisalhantes. A imagem (a) da figura 30 provém da região não soldada, ou seja, do material como chegou, esse tipo característico segue semelhante a cavacos gerados das ligas de cobre. A imagem (b) representa a mesma região da imagem (a), porém foi feito o ataque com o mesmo reagente para os cavacos, ou seja, com tetracloreto férrico, pode-se observar com relação as fases a mesma morfologia da amostra do material, porém com uma observação a destacar, que na região lisa do cavaco onde se encontra a zona de fluxo ou de contato com a superfície de saída ferramenta uma concentração maior da fase  $\kappa$  e  $\beta^I$ , tornando uma região provavelmente mais dura ajudando o processo da quebra do cavaco, ideal para qualquer processo de usinagem. Essa aglomeração desta fase está presente nas regiões de contorno das lamelas dos cavacos em relação ao plano de cisalhamento do mecanismo de formação do cavaco.

Figura 30. Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das regiões soldada por fricção e não afetada.

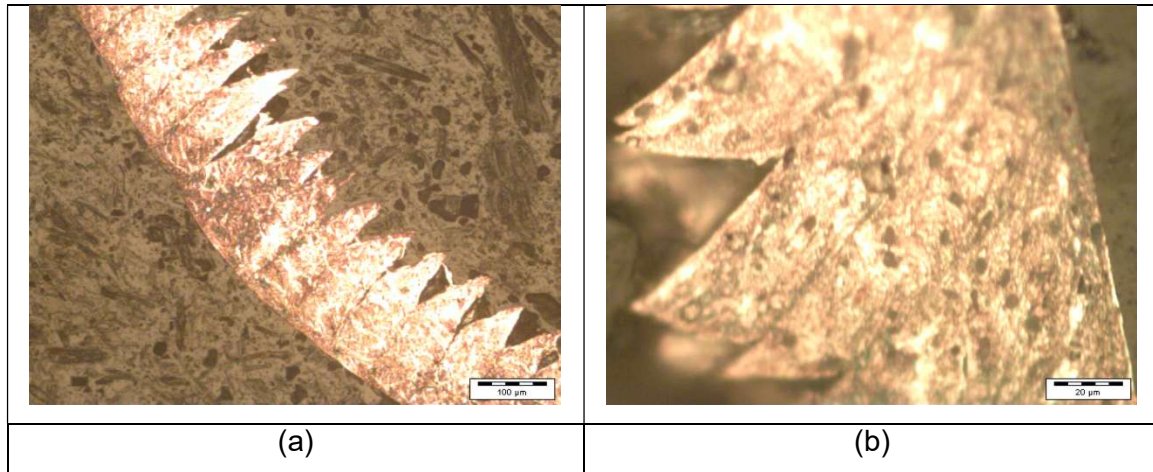


Fonte: Próprio autor

As imagens (c) e (d) representam a região de fricção, visualmente não houve mudanças significativas na forma e tipo de cavaco para com a região não soldada. Porém cabe observar que de certa forma os cavacos, neste caso parecem visualmente ter um comportamento mais parecido com materiais dúcteis, ou seja, não está tão fragmentado, isto poderia ser comprovado por meio dos testes de dureza nas regiões. Com relação as fases seguem a mesma discussão feita perante a usinagem das regiões não soldadas.

A imagens (a) e (b) da figura 31 são da região da possível transição da soldagem por fricção. Pode observar com relação ao tipo de cavaco segue o mesmo padrão das análises anteriores, no entanto por se tratar de uma região de transição suas propriedades mecânicas também são transitórias, assim visualmente observando verifica que os serrilhados estão mais em processo de separação perante as outras regiões, tendendo mais para o comportamento de materiais frágeis.

Figura 31. Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento da região ZTA pelo processo de fricção.

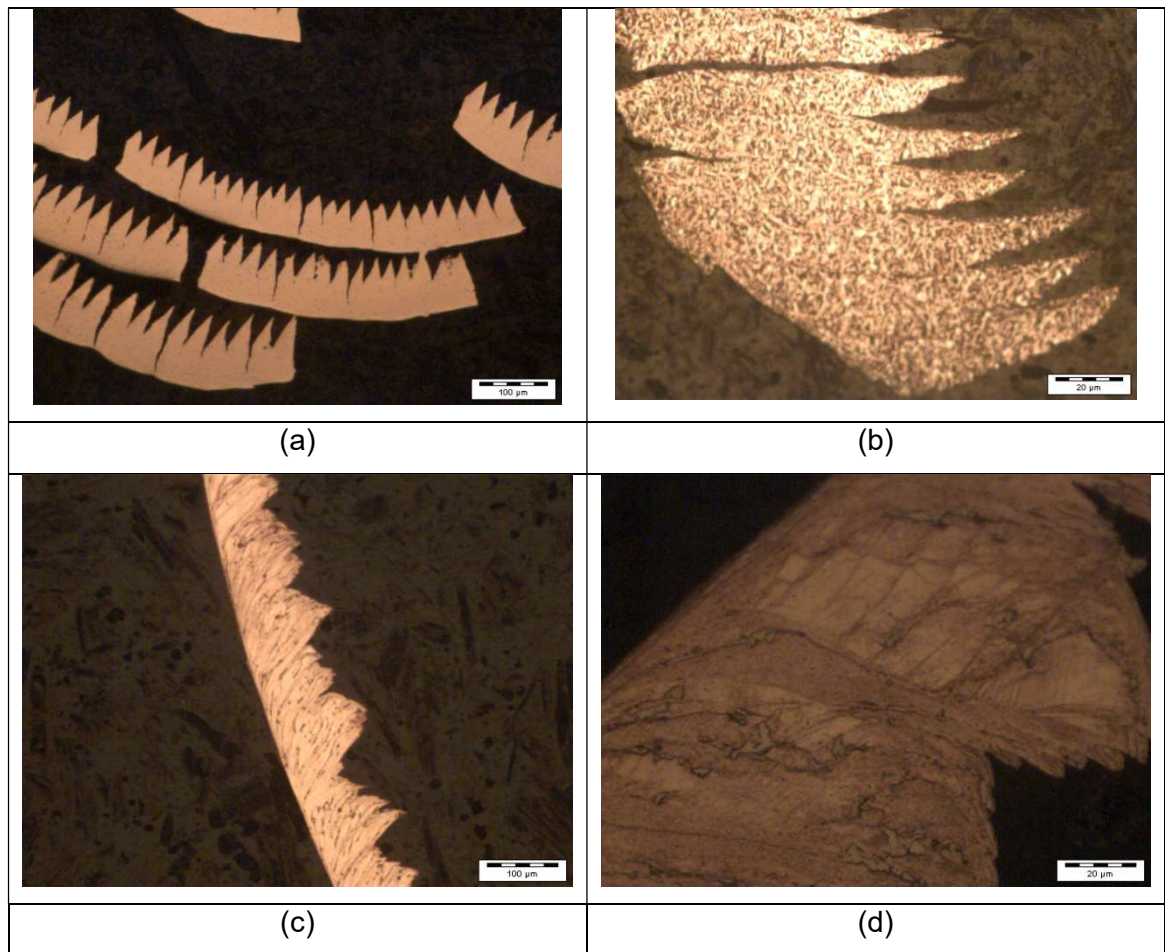


Fonte: Próprio autor

Com relação as fases apresentadas nas micrografias da figura 31, pode ser observado, quase o mesmo comportamento também das análises anteriores, entretanto na imagem da figura (a) as fases não estão bem distribuídas nas lamelas cisalhantes dos cavacos, percebeu-se que nos segmentos onde a concentração maior das fases  $\kappa$  levou a ruptura desses elementos, talvez pelo elevar da dureza provocado pelos precipitados. Nas regiões de cisalhamento dos cavacos foi observado de forma contínua essas fases que levam a fragilização destas regiões podendo levar a separação entres essas lamelas, para efeito de comparação poderia em outro trabalho medir a dureza e verificar por EDS a composição destas regiões.

As imagens da figura 32 se trata do corpo de prova passado pelo processo TIG é torneado com os mesmos parâmetros do outro processo proposto. A imagem da figura (a) e (b) se trata da região não soldada, segue-se semelhante ao da mesma amostra do processo de fricção, ou seja, forma cisalhada para conforme materiais com durezas intermediárias. As imagens (c) e (d), pertence a região da zona fundida. A imagem (b) foi atacada com o mesmo reagente do proposto, sua microestrutura resultante do cavaco revela uma distribuição normal das fases, talvez pela orientação dos precipitados fez que as fases não se movimentam apesar da carga excessiva da ferramenta contra a peça.

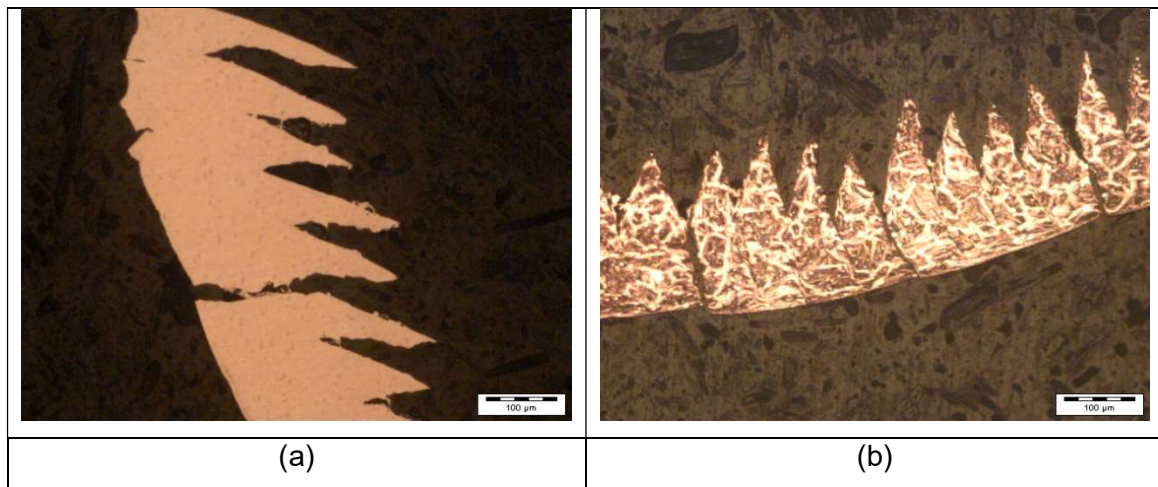
Figura 32. Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das regiões soldada por TIG não afetada termicamente e zona fundida.



Fonte: Próprio autor

As imagens (c) e (d) se tratam da zona fundida da solda TIG, por se tratar de uma liga rica em cobre esperava-se um tipo contínuo e talvez espiral, helicoidal ou até em fita dependendo dos parâmetros de usinagem escolhidos. Realmente foi o que se resultou apresentou como pode ser observado na imagem (c) a forma contínua típica de materiais dúcteis e a forma foi helicoidal com alguns cavacos em espiral. Pode se observar também que uma das fases da liga que continha estanho ficaram concentradas nas regiões de cisalhamento do cavaco, talvez uma forma de acomodação do próprio material em migrar ou transformar nessa fase. Não foi possível fazer as análises de composição química para verificar se era a fase  $\alpha$  ou  $\beta$ , talvez medidas de microdureza ajudaria identificar essas fases, já que a fase  $\alpha$  é uma solução sólida de estanho em cobre e a fase  $\beta$  a fase com mais estanho possivelmente essa seria mais dura.

Figura 33. Imagens dos cavacos gerados pelo processo de torneamento das regiões soldada por TIG afetada termicamente.



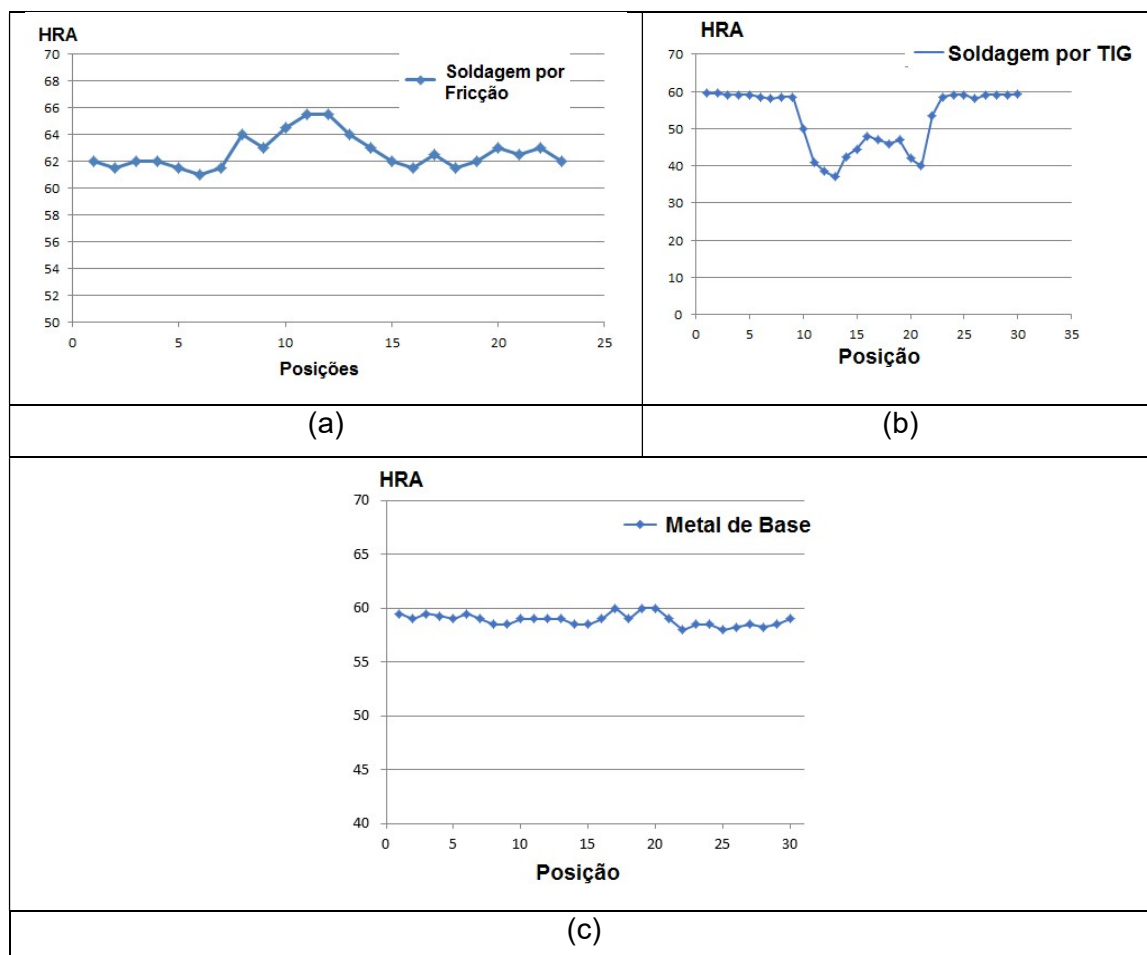
Fonte: Próprio autor

As imagens (a) e (b) da figura 33 representam os cavacos da região afetada termicamente, por se tratar de uma região de transição, seria com certeza diferente dos cavacos analisados anteriormente e realmente foi o que ocorreu, com relação ao tipo de cavaco se apresentou um comportamento perto de um material frágil, ou seja, fragmentado a forma foi de cavaco mais curto. O serrilhado apresentou-se a relação maior entre pico e vales, relação típicas de cavacos de materiais com dureza mais acentuada. Com relação a fases apresentadas ou sua morfologia também se mostrou diferenciado, pode se observar um entrelaçamento das fases  $\alpha$  nas fases martensíticas conforme a figura 24 por meio de um segmento curvado, este tipo de morfologia não foi encontrado em nenhum outro material para que pudesse efetivamente comparar, situação atípico das morfologias dos materiais. Esse desenho geométrico original pode ter alterado as propriedades mecânica dos cavacos. Pode ser observado também na zona de fluxo entre a ferramenta e a parte lisa dos cavacos em que a fratura dos cavacos ocorreram em região com maior concentração das fases  $\alpha$ , sendo ela mais dura e menos resistente a deformação cisalhante.

Como proposto para trabalho para ajudar no processo de certificação do trabalho foram medidas a dureza das amostras, pelo processo de fricção (a), pelo processo TIG (b) e do metal de base (c). As imagens a seguir da figura 34 se trata do gráfico das medidas de dureza destes processos.



Figura 34. Gráficos de medida de dureza das amostras (a) Soldagem por fricção (b) soldagem pelo processo TIG e (c) do metal de base.



Fonte: Próprio autor

Pode se observar no gráfico do ensaio de fricção que houve uma pequena diferença na região de solda, ou seja, um certo endurecimento, isto pode estar atrelado a combinação dos processos entre as forças de arraste e das forças resistente ao movimento radial. A imagem (c) revela a média constante quase não variando com dureza em torno de 55 a 60 Rockwell A, já o gráfico (b) revela as medidas de dureza do processo TIG, pode observar a variação em torno da ZTA e zona fundida, nesta região a dureza ficou abaixo pois foi soldado com um eletrodo de cobre e estanho, pois a sugestão de se soldar com esse eletrodo foi por conta da dificuldade de se encontrar um eletrodo próximo da liga, por conta da condutibilidade elétrica e térmica próximas um do outro.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho pode contribuir para o melhor entendimento dos processos de soldagem por fricção radial, pois com os devidos procedimentos adotados pode se chegar a uma soldagem próxima do ideal, com zona termicamente quase inexistente e completa difusão entre as duas amostras. Por meio das análises micrográficas das peças soldadas e dos cavacos gerados pode observar que tanto a morfologia e as fases ficaram diferentes. O processo por fricção autógeno se mostrou com poucas variações na homogeneidade das fases e da geometria do cavaco.

No processo GTAW foi possível executar o processo de soldagem e a análise metalográfica, apesar da dificuldade de se conseguir um eletrodo próximo à liga, porém como todo processo de soldagem por fusão apresentou uma zona termicamente afetada e seguiu a mesma tendência no estudo do cavaco.

Por meio das análises de dureza nos corpos de provas FRW, TIG e no metal como recebido pode concluir que houve pouca variação no processo de soldagem por fricção, já o processo TIG pela presença maior da zona termicamente afetada maior variação da dureza, com picos e vales acentuados, o metal de base avaliado foi observado na média dureza praticamente constante, mostrando homogeneidade de fabricação.

## REFERÊNCIAS

- AMANCIO, A. A. **Torneamento de acabamento da superliga bronze de alumínio utilizando ferramenta de metal duro com geometria alisadora**. Dissertação. UNIFEI. Itajubá. 2013.
- BRACARENSE, A. Q. **Processos de soldagem TIG (GTAW)**. Artigo. UFMG. Belo Horizonte. 2000.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DINIZ, E. A.; MARCONDES, C. F.; COPPINI, L. N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1ª ed. São Paulo: MM Editora, 1999.
- F. Hasan, A. Jahanafrooz, G. W. Lorimer, and N. Ridley; **Metallurgical Transactions A**; v. 13a; August 1982; p. 1337-1345.
- FARIA, P. E.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem por fricção**. Artigo. INFOSOLDA. São Paulo. 2003.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 1970.
- INFOMET. **Ligas de Cobre**. Disponível em <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=70> Acesso em 18 set 2019.
- M. Cook, W. P. Fentiman; and E. Davis: **J. Inst. M 80, Metals**; 1952; vol. 80; pp. 419-429.
- MOREIRA, M. V. **Estudo da usinagem da liga Ti-6Al-4V**. Dissertação. FAENQUIL. Lorena. 2002.
- Phelan, D. & Dippenaar, R. (2004); **Widmanstätten ferrite plate formation in low-carbon steels; Metallurgical and Materials Transactions A - Physical Metallurgy and Materials Science**; 35 (12); 3701-3706.
- SCHNEIDER, Jr. G. **Cutting tool Applications**. Nelson Publishing Inc. 2001.
- Siemers, C., Mukherji, D., Bäker, M., Rösler, J. “**Deformation and Microstructure of Titanium Chips and Workpiece**”, Z. Metallkd March/2001.
- SILVA, F. L.; GIMENEZ, L. J. **Soldagem por fricção**. Artigo. INFOSOLDA. São Paulo. 2012.
- VASCONCELLOS, G. I. P.; ROSENTHAL, R.; PARANHOS, R. P. R. **Estudo da soldagem de tubos de aço inoxidável dúplex e superduplex na posição 5G**. Artigo. NUCLEP. São Paulo. 2010.