



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MAXIMILIANO SIMON BORGES BOGADO

**AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DUREZA E IMPACTO DE UMA
LIGA DO SISTEMA AL-CU**

MARABÁ

2014

MAXIMILIANO SIMON BORGES BOGADO

**AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DUREZA E IMPACTO DE UMA
LIGA DO SISTEMA AL-CU**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade
Federal do Pará. Orientador: Prof. Carlos
Vinicius de Paes Santos.

MARABÁ

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Bogado, Maximiliano Simon Borges

Avaliação da microestrutura, dureza e impacto de uma liga do sistema AL-CU/ Maximiliano Simon Borges Bogado; orientador, Carlos Vinícius de Paes Santos. — 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2014.

1. Alumínio - Metalurgia. 2. Ligas de alumínio. 3. Microestrutura. I. Santos, Carlos Vinícius de Paes, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 669.722

MAXIMILIANO SIMON BORGES BOGADO

**AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DUREZA E IMPACTO DE UMA
LIGA DO SISTEMA AL-CU**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade
Federal do Pará. Orientador: Prof. Carlos
Vinicius de Paes Santos.

Data de aprovação:

Conceito:

Banca examinadora:

Prof. Eng. Carlos Vinicius de Paes Santos
ORIENTADOR – Unifesspa/FEMAT

. Prof. Dr. Elias Fagury Neto
EXAMINADOR – Unifesspa/FEMAT

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra
EXAMINADOR – Unifesspa/FEMAT

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha Mãe Maria Euzalet Borges Bogado e aos meus avôs Raimundo Feliciano Borges e Roque Bogado (*in memoriam*), que sonharam com esse momento e me apoiaram sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente que sem ele nada poderia ser feito.

A minha mãe, Maria Euzalet Borges Bogado, pelo carinho e princípios ensinados.

A minha namorada Camila Clemente de Souza, pela ajuda, amor e paciência em momentos difíceis.

Aos meus sogros João Batista Souza e Graciete Clemente de Souza pelo incentivo e apoio.

Aos meus “pais adotivos” Antônio Lopes Ferreira e Laurijane de Aguiar Ferreira pela amizade e carinho recebidos.

Aos meus amigos Frankmar dos Reis pelos conselhos, apoio e ajuda durante toda a graduação, Gilmar Ramos da Silva pelo incentivo para concluir a elaboração deste trabalho e Josivaldo da Silva Lopes pelo esforço e ajuda.

Aos amigos Mauro Ângelo Oliveira de Alfaia, Thiago Cunha, Rafael Monteiro, Wilson Pires da Cruz, Kerlon Klayo de Melo Sousa, Renan Mineiro Ferreira, pela convivência dentro e fora da universidade.

A minha tia Alice Leal pela torcida e apoio.

Ao Senhor Pedro Ailton Agostinho de Freitas pela ajuda em flexibilizar meu horário.

Ao meu orientador Prof. Carlos Vinicius de Paes Santos, pela orientação, apoio e compreensão.

A todos os professores do curso de Engenharia de Materiais (FEMAT).

E a todos, que de alguma forma contribuíram na minha caminhada.

EPÍGRAFE

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito”.

Isaac Newton

RESUMO

Por suas excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a alta condutibilidade térmica e elétrica e a infinita reciclagem, o alumínio apresenta uma ampla variedade de utilização que o torna o metal não ferroso mais utilizado no mundo. A resistência mecânica do alumínio não é elevada, contudo a adição de elementos de liga, como o cobre e o zinco, permite obter um material de utilização importante nas estruturas resistentes. O principal objetivo das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica, sem detrimento das outras propriedades, de forma que novas ligas têm sido desenvolvidas, cada uma com combinação apropriada de propriedades adequadas a uma aplicação específica. Além da escolha da liga, deve ser enfatizado que as propriedades mecânicas de um fundido são fortemente influenciadas pela microestrutura que é resultado do processo de fundição e das condições de resfriamento. Os microconstituintes variam de acordo com o tipo de liga analisada e de acordo com os tratamentos térmicos, tratamentos mecânicos, processos de fabricação e outros processos a que o material haja sido submetido. Com vista disso o presente trabalho visa à caracterização da liga Al-Cu confeccionada no Laboratório de Solidificação da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), através da microestrutura, dureza e impacto. Dessa forma, houve a necessidade de avaliar o lingote fazendo uso da metalografia como método para relacionar a estrutura íntima do material e através de ensaios destrutivos e não destrutivos, suas propriedades mecânicas. Os resultados encontrados foram confrontados com a literatura e certificam os estudos aqui apresentados.

Palavras-Chaves: Caracterização; Liga Al-Cu; Microestrutura; Não ferroso.

ABSTRACT

For its excellent physical and chemical properties, among which we highlight the low specific weight, corrosion resistance, high thermal conductivity and electrical and infinite recycling, aluminum features a wide range of use that makes the non-ferrous metal more used in the world. The mechanical strength of aluminum is not high, but the addition of alloying elements such as copper and zinc permits to obtain an important use of material in the resilient structure. The main objective of aluminum alloys is increasing the mechanical resistance without detriment to other properties, so that new alloys have been developed, each with appropriate combination of properties suitable for a particular application. Besides the choice of the alloy, it should be emphasized that the mechanical properties of a cast are strongly influenced by the microstructure which is the result of the casting process and the cooling conditions. The microconstituents vary according to the type of alloy and analyzed according to the thermal, mechanical treatments, manufacturing processes and other processes that the material has been referred. In order that this study aims to characterize the Al-Cu alloy made at the Laboratory of Solidification the Federal University of South and Southeast of Pará (Unifesspa) by microstructure, hardness and impact. Thus, it was necessary to evaluate the ingot making use of metallography as a method to relate the intimate structure of the material and through destructive and non-destructive testing, mechanical properties. The results were compared with literature and certify the studies presented here.

Key Words: characterization; Al-Cu alloy; microstructure; non-ferrous.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 - Principais elementos e classificação das ligas de alumínio | 19 |
| Figura 2 - Diagrama de Fases Al-Cu | 20 |
| Figura 3 - Fases de aplicação de carga em ensaio de dureza Rockwell | 24 |
| Figura 4 - Etapas da determinação da dureza Rockwell | 25 |
| Figura 5 - Equipamento para ensaio de impacto Charpy..... | 26 |
| Figura 6 – Fluxograma dos procedimentos realizados..... | 27 |
| Figura 7 - Lingote Al-Cu usado para a realização dos experimentos..... | 28 |
| Figura 8 – Sentido do corte realizado no lingote. Vista superior | 29 |
| Figura 9 – Esquema de cortes transversais feitos com o arco de serra, identificados conforme algarismos romano..... | 29 |
| Figura 10 – Peças embutidas para análise de dureza..... | 30 |
| Figura 11 – Amostras I, III, V, VIII e X após ataque químico. | 31 |
| Figura 12 – Peça de amostra identificando os sentidos analisados. | 31 |
| Figura 13 – Peças após ensaio de dureza realizado. Peças da esquerda para a direitas II, V, VIII e X | 33 |
| Figura 14 - Corpos de prova para ensaio de impacto..... | 34 |
| Figura 15 - Uma microestrutura típica de uma liga de alumínio - cobre (coarsened durante 10 min. a 553°C, ou 995 ° F) fez binário para diferenciar entre o dendrito rica em alumínio proeutetico e o eutético..... | 35 |
| Figura 16 - Micrografia transversal da peça X. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído. | 36 |
| Figura 17 - Imagem metalográfica: dendritas em forma de roseta em liga Al-15%Cu..... | 36 |
| Figura 18 - Micrografia transversal da peça III. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído. | 37 |
| Figura 19 - Imagens das amostras no sentido transversal (a) peça I (b) peça III (c) peça V (d) peça VIII (e) peça X. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído. | 38 |
| Figura 20 - Imagens sentido longitudinal (a) peça I (b) peça III (c) peça V (d) peça VIII (e) peça X. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído..... | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 - Características dos metais mais utilizados pela sociedade contemporânea..... | 16 |
| Tabela 2 - Escala de dureza Rockwell. | 33 |
| Tabela 3 – Tabela de resultados medidos em escala Rockwell. | 40 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|-----------|---|
| °c | Graus Celsius |
| Al | Alumínio |
| Cu | Cobre |
| Zn | Zinco |
| Mg | Magnésio |
| Mn | Manganês |
| Si | Silício |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnica |
| NBR | Norma Brasileira de Regulamentação |
| Kg | Quilograma |
| Kgf | Quilograma Força |
| FEMAT | Faculdade de Engenharia de Materiais |
| UNIFESSPA | Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará |
| HF | Ácido Fluorídrico |
| mm | Milímetro |
| °f | Graus Fahrenheit |
| HRB | Dureza Rockwell B |
| HRF | Dureza Rockwell F |
| HB | Dureza Brinell |
| J | Joules |
| AA2024 | Liga de Alumínio |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1- INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1- OBJETIVOS..... | 14 |
| 1.1.1- Objetivos Gerais | 14 |
| 1.1.2- Objetivos Específicos | 14 |
| 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1- ALUMÍNIO..... | 15 |
| 2.2- COBRE | 16 |
| 2.3- LIGAS NÃO FERROSAS | 17 |
| 2.3.1- Ligas de Alumínio | 18 |
| 2.3.1.1- Liga Binária Alumínio-Cobre..... | 19 |
| 2.4 – METALOGRAFIA | 21 |
| 2.4.1- Micrografia | 21 |
| 2.5 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS:..... | 22 |
| 2.5.1- Mecânicas | 22 |
| 2.5.1.1 - Dureza de Rockwell..... | 23 |
| 2.5.1.2 - Impacto Charpy | 25 |
| 3 - MATERIAIS E MÉTODOS | 27 |
| 3.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS..... | 27 |
| 3.1.1 – Ensaio Metalográfico | 31 |
| 3.1.2 – Ensaio de Dureza Rockwell | 32 |
| 3.1.3 - Ensaio de Impacto Charpy | 34 |
| 4 - RESULTADO E DISCUSSÕES | 35 |
| 4.1– CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 35 |
| 4.2 – MICROSCOPIA ÓTICA..... | 35 |
| 4.3 – PROPRIEDADES ANALISADAS | 40 |
| 4.3.1- Avaliação da Dureza | 40 |
| 4.3.2 – Ensaio de Resistencia ao Impacto | 41 |
| 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. | 42 |
| 5.1 - CONCLUSÃO | 42 |
| 5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 43 |
| REFERÊNCIAS | 44 |

1- INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal que se destaca pelo conjunto de suas propriedades, pois, além de seu apelo estético singular, apresenta baixa densidade, alta resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, boa tenacidade, alta resistência a baixas temperaturas e excelente conformabilidade. A adição de elementos de ligas ao alumínio permite o desenvolvimento de outras propriedades interessantes – como a alta resistência mecânica, por exemplo – que ampliam ainda mais o seu espectro de aplicação [1].

As ligas apresentam características diferentes daquelas apresentadas pelos seus metais constituintes, tais como dureza, ductilidade, condutividade, entre outras; além disso, as suas propriedades dependem fundamentalmente da composição, da microestrutura, do tratamento térmico ou mecânico [2].

Algumas ligas de alumínio podem superar a resistência de alguns aços estruturais, entretanto o alumínio puro e algumas ligas de alumínio exibem uma resistência mecânica relativamente baixa. Sua principal limitação é a baixa temperatura de fusão (660°C) o que restringe a sua aplicação a altas temperaturas [3].

Contudo, a fabricação de uma liga de alumínio (Al) com cobre (Cu) submetida a processos especiais de tratamento térmico, é capaz de produzir um material com uma resistência à tração equivalente e até maior que a de alguns aços.

Na busca pela melhor qualidade e produtividade do fundido de alumínio, inserem-se a correta especificação em relação às propriedades físicas, mecânicas e estéticas do produto. Tais fatores são diretamente dependentes das condições metalúrgicas do produto. Essas condições são resumidas na melhor distribuição, forma e homogeneização do tamanho dos grãos, na presença de elementos e compostos na estrutura da matriz, bem como a incidência de algum tipo de defeito [4].

Com vista disso como complemento ao estudo dessa área, o presente trabalho propõe-se a analisar uma liga de alumínio cobre fazendo uso da metalografia, de ensaios de dureza e de impacto como instrumento para se verificar as propriedades intrínsecas e mecânicas da liga, comparando com estudos bibliográficos os resultados obtidos.

1.1- OBJETIVOS

1.1.1- Objetivos Gerais

Caracterizar uma liga de Al- Cu de composição desconhecida fazendo uso da metalografia para analisar sua microestrutura, e através de ensaios específicos as propriedades mecânicas, tendo por finalidade identificar sua composição.

1.1.2- Objetivos Específicos

- Avaliar uma liga do sistema Al-Cu do ponto de vista estrutural, para identificar as fases da liga e o teor aproximado de sua composição.
- Avaliar a dureza da liga do sistema Al-Cu e medir a resistência à penetração aplicando o método de Dureza Rockwell, analisando através da detecção de pequenas diferenças de dureza mediante a pressão exercida.
- Medir a quantidade de energia absorvida pela liga durante os ensaios através do método de impacto Charpy.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- ALUMÍNIO

O alumínio é um dos metais não-ferrosos mais produzidos no mundo e sua utilização tornou-se possível e viável graças a sua disponibilidade, à evolução dos processos de fabricação e tratamentos térmicos [5].

O rápido crescimento da indústria do alumínio está atribuído unicamente a uma excepcional combinação de propriedades que fazem deste um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral. Suas características permitem que ele tenha uma diversa gama de aplicações.

O alumínio é um material leve, durável e bonito e mostra uma excelente performance e propriedades superiores na maioria das aplicações. Têm boa condutibilidade elétrica e térmica e alta refletividade a luz e ao calor. Têm alta resistência à corrosão sob as mais altas condições de trabalho e é não-tóxico [5].

Uma das vantagens mais importantes do alumínio é o fato de poder ser transformado com facilidade. O alumínio pode ser laminado em qualquer espessura e estruturado numa infinidade de perfis de seção transversal constante e grande comprimento. O metal pode ser também, forjado ou impactado. A facilidade e a velocidade com o qual o alumínio pode ser usinado é outro importante fator que contribui para difundir o uso desse material e que também aceita, praticamente, todos os métodos de união, tais como rebitagem, soldagem, brasagem e colagem [5].

O alumínio pode ser fundido e trabalhado em quase todas as formas e pode-se obter grande variedade de formas. Com todas estas propriedades apresentadas, não é surpresa que as ligas de alumínio vêm sendo de primordial importância para engenharia de materiais [6].

Tabela 1 - Características dos metais mais utilizados pela sociedade contemporânea

| Propriedades | Alumínio | Aço | Cobre |
|---|-----------------|------------|--------------|
| Densidade (g/cm³) | 2,70 | 7,86 | 8,96 |
| Temperatura de fusão (°C) | 660 | 1500 | 1083 |
| Módulo de elasticidade (MPa) | 70000 | 205000 | 110000 |
| Coeficiente de dilatação térmica (L/°C); | 23.10-6 | 11,7.10-6 | 16,5.10-6 |
| Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C) | 0,53 | 0,12 | 0,94 |
| Condutibilidade elétrica (%IACS) | 61 | 14,5 | 100 |

Fonte: [5]

A importância do alumínio para o setor industrial é principalmente caracterizada por uma ávida procura pela substituição de componentes automobilísticos produzidos com materiais ferrosos, objetivando-se um menor peso nos veículos e conseqüentemente um menor consumo de combustível [7].

2.2- COBRE

O cobre é um material que desde os primórdios das civilizações tem sua trabalhabilidade e durabilidade comprovada, contudo ao mesmo tempo é um material moderno que se adapta às necessidades cotidianas demandadas pelo mercado. A sua exploração e o seu uso são marcantes na economia e na sociedade atual.

O cobre é normalmente usado em sua forma pura, mas também pode ser combinado com outros metais para produzir uma enorme variedade de ligas. Cada elemento adicionado ao cobre permite obter ligas com diferentes características tais como: maior dureza, resistência à corrosão, resistência mecânica, usinabilidade ou até para obter uma cor especial para combinar com certas aplicações [8].

Essas ligas são tratáveis termicamente (teores menores que 5,65%) e após o tratamento, adquirem resistência semelhante às dos aços com baixo teor de carbono.

Elas possuem uma resistência à corrosão inferior as demais ligas, podendo apresentar uma corrosão intergranular [6].

2.3- LIGAS NÃO FERROSAS

Denominam-se metais não ferrosos, os metais em que não haja ferro ou em que o ferro está presente em pequenas quantidades, como elemento de liga. Os metais não ferrosos são mais caros e apresentam maior resistência à corrosão, menor resistência mecânica, pior resistência a temperaturas elevadas e melhor resistência em baixas temperaturas que o aço carbono.

Os metais não-ferrosos ocupam uma posição de destaque na indústria e representam um campo muito importante na engenharia, principalmente nos setores mecânicos, de transporte e elétricos. Na sua maioria podem ser utilizados no estado puro; contudo, sua importância crescente deve-se ao constante desenvolvimento de suas ligas com características físico-químicas e mecânicas de tal ordem que os tornam insubstituíveis em determinadas aplicações [9].

As ligas de alumínio com uma ampla gama de propriedades se utilizam em estruturas de engenharia. A seleção da liga para uma dada aplicação implica em considerações de sua resistência a tração, densidade, ductilidade, trabalhabilidade, soldabilidade, conformação e resistência a corrosão.

As ligas ferrosas, inclusive os aços inoxidáveis e as fundições utilizam tratamentos térmicos similares para controlar as microestruturas e as propriedades. Entre tanto, a estrutura e o comportamento das ligas não ferrosas têm diferenças enormes. As temperaturas de fusão, por exemplo, variam desde quase a temperatura ambiente para o gálio e até mais de 3000°C para o tungstênio. As resistências mecânicas variam desde os 1000psi até 200000psi. O alumínio, o magnésio e o berílio possuem densidades muito baixas em contra partida tem o chumbo e o tungstênio que possuem densidades excepcionalmente altas. Assim as ligas desses elementos tornam-se viáveis ou mesmo necessárias para a substituição do aço [10].

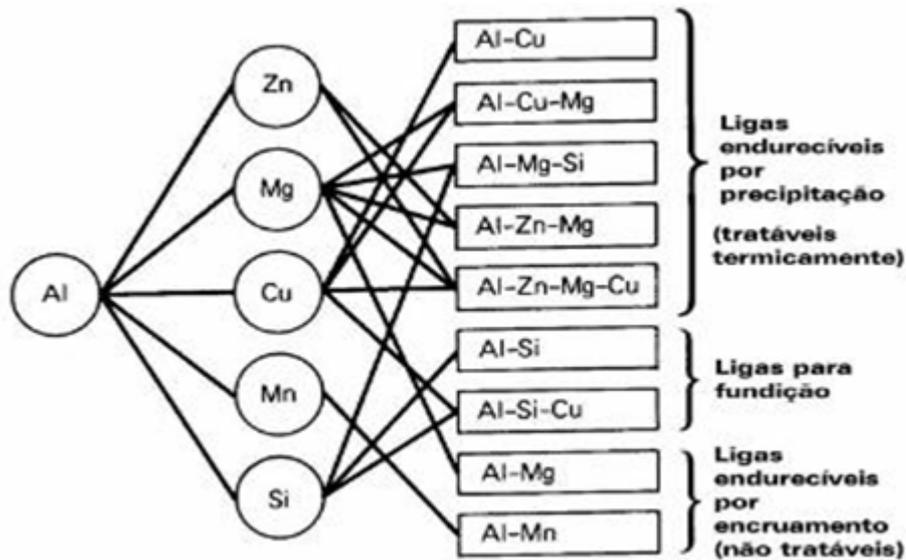
2.3.1- Ligas de Alumínio

O alumínio quando puro é muito frágil e maleável, todavia, suas ligas com pequenas quantidades de cobre, manganês, silício, entre outros, apresentam uma grande quantidade de características adequadas às mais diversas aplicações. Estas ligas fazem parte do principal material para a produção de muitos componentes de aviões e foguetes.

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato do alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga, formando ligas e a partir dessa combinação ser possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Naturalmente, uma só liga não pode combinar todas as propriedades ótimas para cada aplicação, sendo necessário se conhecer as vantagens e limitações de cada uma delas para que se possa fazer a melhor seleção [5].

A grande variedade de ligas comerciais de alumínio e de tratamentos térmicos fornece combinações específicas de resistência mecânica, tenacidade à fratura, resistência à fadiga, resistência à corrosão, soldabilidade etc. Estas características, aliadas a elevadas relações resistência/massa específica e ao fato de não apresentarem transição brusca dúctil-frágil no comportamento em fratura com o abaixamento da temperatura, tornam as ligas de alumínio materiais ideais para aplicações estruturais em diversas temperaturas e níveis de carregamento [6]. A figura 1 a seguir mostra os principais elementos e classificação das ligas de alumínio.

Figura 1 - Principais elementos e classificação das ligas de alumínio



Fonte: [29].

A composição química do alumínio e suas ligas é expressa em porcentagem, obedecendo à Norma ABNT NBR 6834 [28], que abrange o sistema de classificação e a densidade nominal das ligas trabalháveis de alumínio e o sistema de classificação das ligas de fundição e de alumínio primário em lingotes para refusão [5].

2.3.1.1- Liga Binária Alumínio-Cobre

A resistência mecânica do alumínio não é elevada, contudo a adição de elementos de liga como o cobre e o zinco, associada à aplicação de tratamento térmico, pode formar um grande aumento da resistência no material pela formação de precipitados [6].

As ligas alumínio-cobre são as mais empregadas. Possuem boa resistência mecânica e excelente usabilidade, suas resistências à corrosão e à oxidação são, contudo baixas [9].

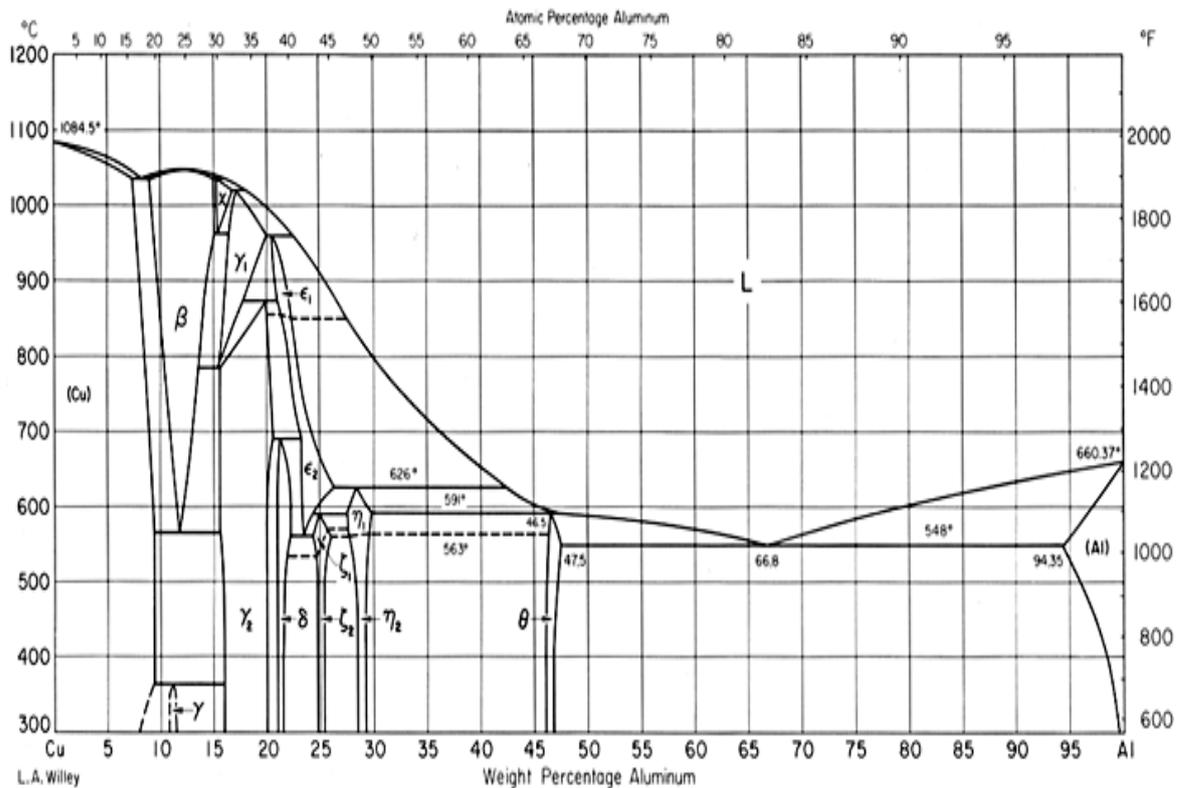
Nestas ligas algumas propriedades aumentam progressivamente com a adição de cobre, tais como a resistência mecânica e a dureza, porém somente até o percentual de 12% sendo que acima deste percentual a liga torna-se quebradiça [12].

Ligas contendo teores de cobre entre 4 a 6% respondem fortemente ao tratamento térmico. Porém, o elemento reduz a resistência à corrosão em geral sob

algumas condições específicas como a corrosão sob tensão. Adições de cobre também reduzem a resistência à trinca de contração e diminuem a fundibilidade [11].

Dessa forma além da escolha da liga, deve ser enfatizado que as propriedades mecânicas de um fundido são fortemente influenciadas pela microestrutura que é resultado do processo de fundição e das condições de resfriamento. A figura 2 a seguir representa o Diagrama de Fases de uma Liga Al-Cu.

Figura 2 - Diagrama de Fases Al-Cu



Fonte: [13]

Estes gráficos mostram constituintes de materiais em função da composição e temperatura, sendo, portanto, importantes fontes de consulta tanto para a fabricação de ligas como para o projeto e controle de tratamentos térmicos destas ligas. As microestruturas desenvolvidas estão relacionadas ao processo térmico utilizado.

2.4 – METALOGRAFIA

O exame metalográfico enfoca o metal ou liga metálica do ponto de vista de sua estrutura procurando relacioná-la às propriedades físicas à composição, ao processo de fabricação entre outros, de modo a poder prever-se o seu comportamento num determinado emprego [14].

A metalografia consiste na preparação de uma superfície plana e polida, devidamente atacada por um reativo adequado, observação e interpretação da estrutura e obtenção de um documento que reproduza os resultados obtidos no exame. A estrutura dos metais pode ser abordada em três níveis: estrutura cristalina, microestrutura e macroestrutura. A metalografia convencional estuda os metais no nível de suas microestruturas e macroestrutura, enquanto a metalografia moderna atua no nível das estruturas cristalina e sub-microscópica [15].

A técnica desenvolvida através da prática de vários anos define a preparação metalográfica manual como sendo um trabalho laborioso, técnico e altamente artesanal.

2.4.1- Micrografia

O conhecimento das propriedades de um metal se caracteriza pela determinação das fases que o compõe e o estudo da natureza, forma, distribuição e quantificação das mesmas.

Assim, a micrografia consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de fases, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões [17].

Sabendo-se então que as propriedades dos materiais estão intrinsecamente ligadas à natureza de sua microestrutura, ao se observar a microestrutura de um material, tem-se uma visão qualitativa dos diferentes microconstituintes e defeitos presentes, podendo assim induzir as possíveis propriedades do material [1].

Os microconstituintes variam de acordo com o tipo de liga analisada e de acordo com os tratamentos térmicos, tratamentos mecânicos, processos de fabricação e outros processos a que o material haja sido submetido [14].

A definição de microestrutura é dependente a escala à qual é observada. Portanto, é essencial diferenciar quando se está analisando uma estrutura macroscópica ou Microscópica.

2.5 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS:

2.5.1- Mecânicas

As propriedades mecânicas constituem as características mais importantes dos metais para sua aplicação no campo da engenharia, são determinadas por ensaios rotineiros de amostras selecionadas como sendo representativas do produto. Estes ensaios mecânicos são normalmente destrutivos de modo que não devem ser efetuados em produtos acabados, pois alteram suas condições de funcionalidade [18].

As propriedades mecânicas definem o comportamento de um material quando sujeito a esforços mecânicos e correspondem às propriedades que num determinado material indicam a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que se verifiquem deformações incontroláveis [19].

Os ensaios de peças fundidas são feitos em corpos-de-prova do mesmo vazamento do metal da peça fundida e elaborados ao mesmo tempo. Com as peças forjadas, os ensaios, geralmente, são feitos em pedaços cortados do mesmo metal da peça.

Esses esforços mecânicos são os mais variados. Eles podem significar a aplicação de uma carga de modo lento e gradual; neste caso a natureza do esforço é **estática**, como tração, compressão, dobramento, torção etc. A aplicação da carga pode ser feita de modo repentino como o choque, deste a natureza é **dinâmica**.

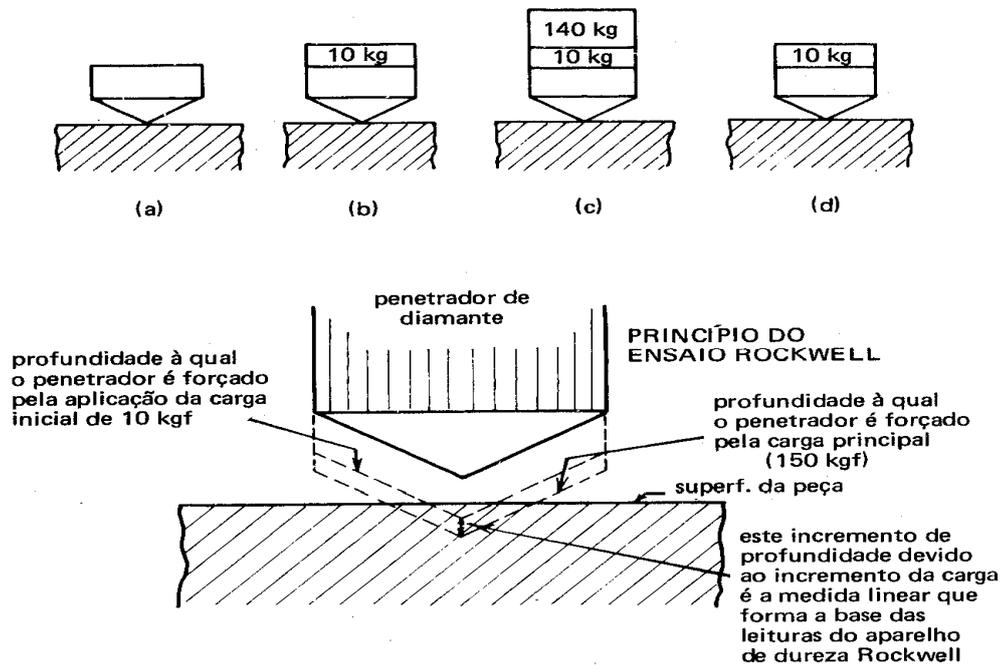
2.5.1.1 - Dureza de Rockwell

O ensaio Rockwell, que leva o nome do seu criador, é hoje o processo universal mais utilizado, devido à rapidez e à facilidade de execução, isenção de erros humanos, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão [19].

Este método permite avaliar a dureza de metais diversos desde os mais moles até os mais duros medindo a resistência de um metal à penetração. Para isso, utiliza-se um “penetrador”, na forma de esfera ou de pirâmide ou tronco de cone, confeccionado de aço temperado, “metal duro” ou diamante, o qual é forçado a penetrar no material cuja dureza se quer medir pela aplicação de uma carga de natureza estática [20].

Resulta uma deformação que provoca o aparecimento de uma “impressão” na superfície do material. As dimensões ou profundidades relativas dessa impressão constituem a base para a apuração de valores representativos da dureza [20]. Na Figura 3 a seguir podemos verificar as várias fases de aplicação de carga de dureza Rockwell.

Figura 3 - Fases de aplicação de carga em ensaio de dureza Rockwell



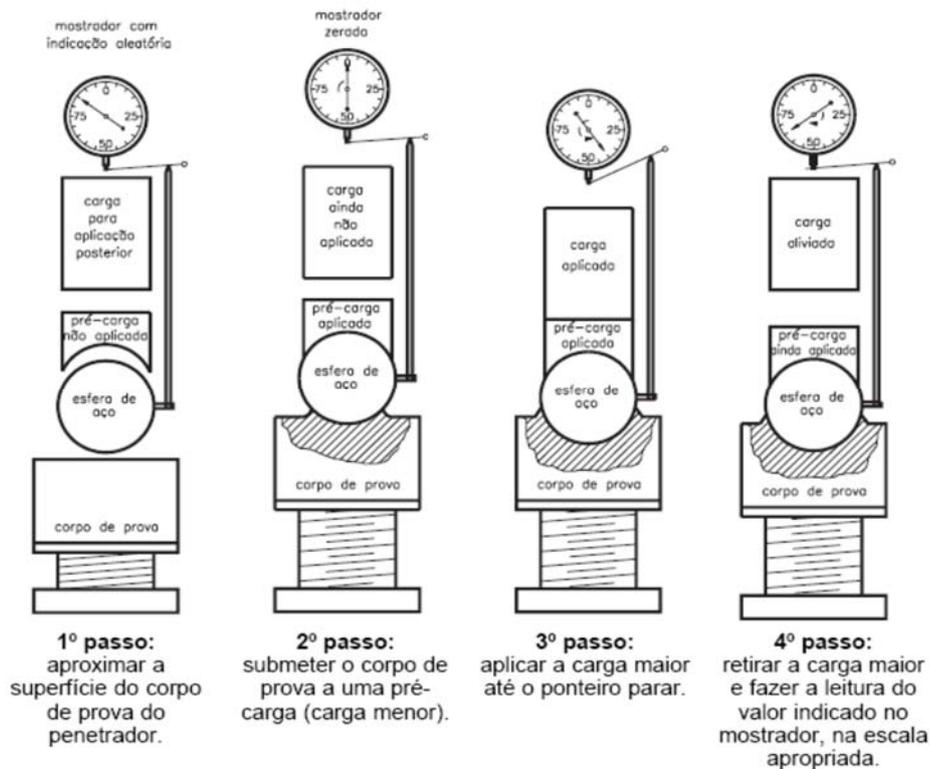
Fonte: [20]

- O penetrador é colocado em contato com a superfície da peça;
- A seguir aplica-se a carga inicial de 10kgf; coloca-se então o ponteiro do mostrador da máquina no ponto básico de referencia (100 para a escala C e A e 30 para escala B);
- Aplica-se, a seguir, a carga maior correspondente a escala adotada, de modo a ter-se a penetração desejada; a carga é mantida até o ponteiro do mostrador parar;
- A carga é então removida de modo a permitir-se a recuperação elástica, sendo mantida a carga inicial de 10 kgf.

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois se aplica a carga do ensaio propriamente dita, como visualizado na Figura 3.

A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, a qual corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga maior, e a profundidade decorrente da aplicação da pré-carga, avaliadas de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material [19]. A figura 4 mostra as etapas para a determinação da dureza Rockwell.

Figura 4 - Etapas da determinação da dureza Rockwell



Fonte: [20]

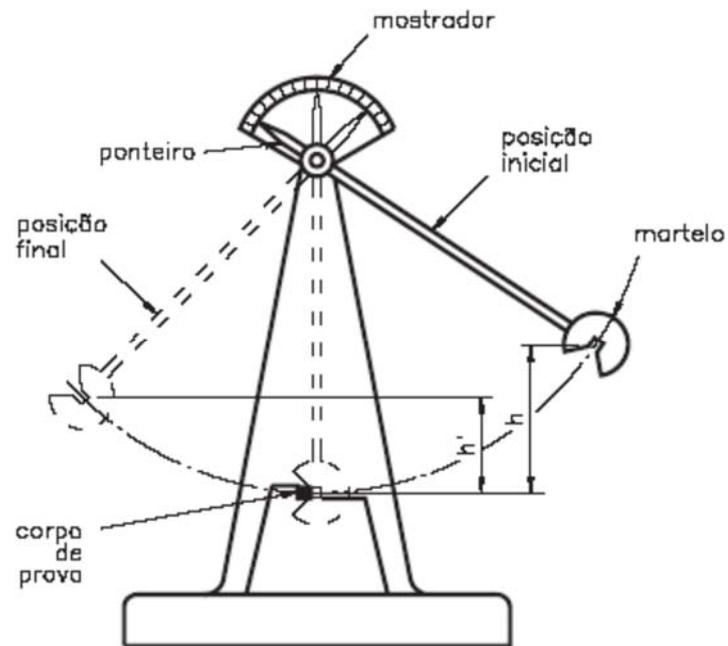
2.5.1.2 - Impacto Charpy

Os ensaios de impactos mais conhecidos são denominados Charpy e Izod, suas aplicações dependem da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo-de-prova na máquina. Estes são essenciais para garantir a segurança, confiabilidade e qualidade dos mais diversos materiais.

O teste Charpy é um dos métodos para determinar a resistência e sensibilidade dos materiais quando submetido a uma certa carga de impacto. O objetivo principal é medir a quantidade de energia absorvida pelo material durante a fratura [21].

O comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser mais amplamente caracterizado por estes ensaios. A carga é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martetele ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar [19]. Podemos observar a seguir na Figura 5.

Figura 5 - Equipamento para ensaio de impacto Charpy



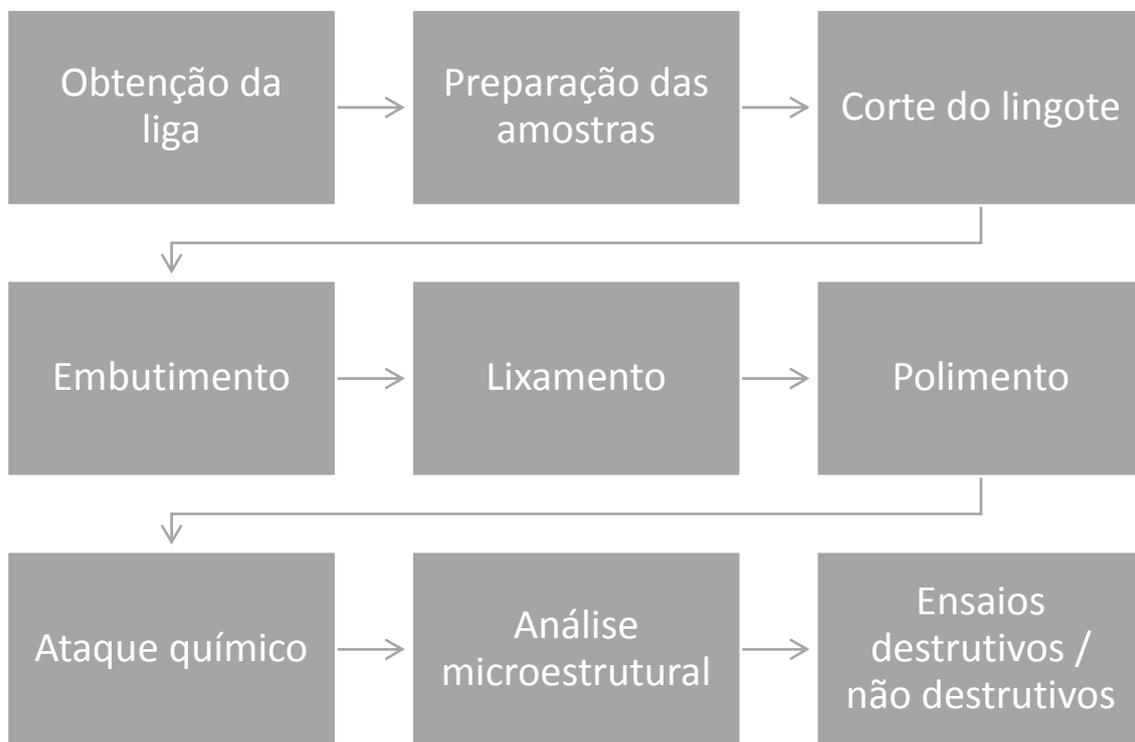
Fonte: [22]

Como resultado do ensaio, obtém-se a energia absorvida pelo material até a fratura. A principal aplicação desse ensaio refere-se à caracterização do comportamento dos materiais, na transição da propriedade dúctil para a frágil como função da temperatura, possibilitando a determinação da faixa de temperaturas entre elas.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A liga Al-Cu do estudo foi obtida no laboratório da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), a partir desta foi proposto analisar através de ensaios metalográficos a caracterização de suas microestruturas, e através de ensaios de dureza e impacto avaliar suas propriedades mecânicas. O fluxograma a seguir mostra os procedimentos realizados para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 6 – Fluxograma dos procedimentos realizados



Fonte: Autor

3.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os experimentos foram realizados no laboratório de preparação de amostras e metalografia da FEMAT/Unifesspa– Marabá, onde primeiramente o lingote de corpo cilíndrico foi cortado para a preparação das amostras. Os cortes ocorreram no sentido

vertical e horizontal, para análise dos grãos no sentido longitudinal e transversal. Sendo seccionado em quatro partes no sentido vertical e posteriormente um quarto do lingote for cortado transversalmente em pedaços menores para análise da microestrutura no início, meio e fim do corpo para conseguir uma visão geral da microestrutura do lingote. A seguir a Figura 7 mostra o lingote usado nos estudos.

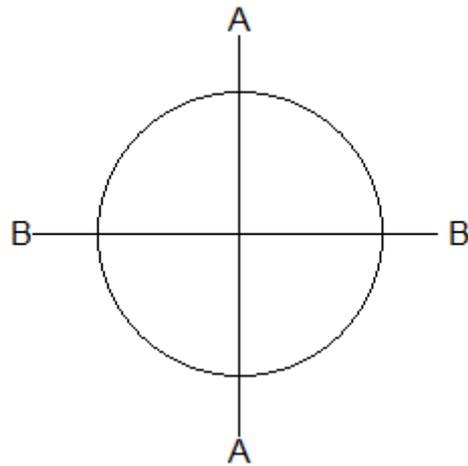
Figura 7 - Lingote Al-Cu usado para a realização dos experimentos.



Fonte: Autor

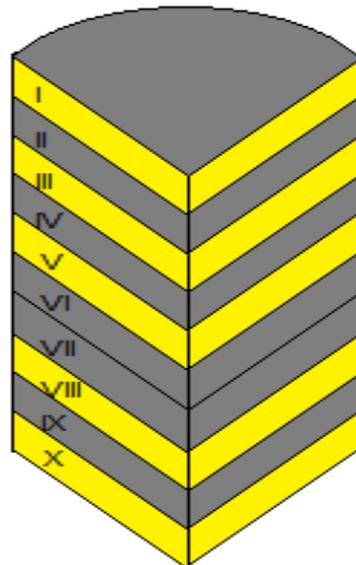
O lingote foi seccionado em uma máquina serra Policorte no sentido vertical, foram feitos dois cortes conforme Figura 8. Posteriormente utilizando uma morsa de mesa para prender a barra do lingote foi usada uma serra manual para fazer os cortes no sentido horizontal do lingote, conforme mostra a Figura 9. Dessa forma as peças em destaque foram escolhidas para a análise e procedimentos.

Figura 8 – Sentido do corte realizado no lingote. Vista superior



Fonte: Autor

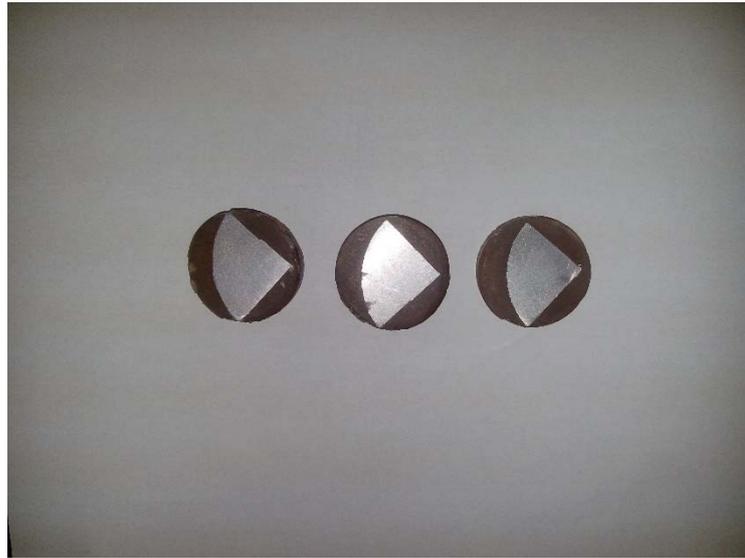
Figura 9 – Esquema de cortes transversais feitos com o arco de serra, identificados conforme algarismos romano.



Fonte: Autor

As peças de identificação V, VIII e X foram embutidas a frio, devido apresentarem irregularidade em sua forma e para facilitar o ensaio de dureza. Este embutimento foi feito com resinas auto polimerizáveis, que permitiu a formação de um líquido viscoso quando misturadas. Esta mistura foi vertida dentro de um molde plástico onde se encontrava a amostra e se obteve a polimerização após certo tempo. A Figura 10 a seguir mostra as peças embutidas conforme descrito.

Figura 10 – Peças embutidas para análise de dureza.



Fonte: Autor

Em seguida as peças foram lixadas na lixadeira SOLOTEST em uma sequência de lixas: 100 220 320 420 600 1000 1200 1500 MESH, para a preparação das amostras para o polimento, obedecendo a rotação de 90° conforme a literatura, obedecendo as técnicas de pressão e velocidade de acordo com a natureza da liga [17].

As peças passaram por polimento com pasta de diamante de 3 microns utilizando uma Politriz por aproximadamente 8 minutos. Este procedimento é feito de forma a segurar a peça sobre o disco fazendo uma leve pressão para assim obter o nivelamento da amostra.

Em sequência as peças foram atacadas quimicamente com uma solução de HF (ácido Fluorídrico) na proporção de 10% diluído em água destilada. A exposição durou 10 segundos em cada peça, para obter a revelação das microestruturas da amostra. A Figura 11 a seguir mostra as amostras que passaram por esse procedimento.

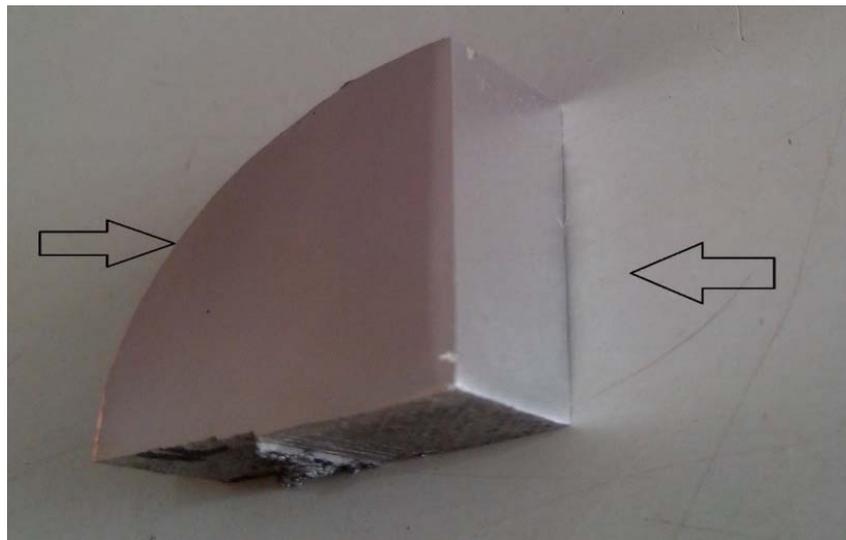
Figura 11 – Amostras I, III, V, VIII e X após ataque químico.



Fonte: Autor

Em todos os procedimentos para preparação das amostras foram preparadas duas faces de cada uma das peças para se poderem analisar as microestruturas no sentido longitudinal e transversal dos grãos, conforme mostra a Figura 12.

Figura 122 – Peça de amostra identificando os sentidos analisados.



Fonte: Autor

3.1.1 – Ensaio Metalográfico

Ao final de todo o procedimento de preparação e do ataque, as peças foram levadas para análise microscópica. O microscópio utilizado foi da marca OLYMPUS BX 51 com interface a um computador, utilizando uma placa de vídeo do tipo

WIA/S3G. Em seguida as imagens foram capturadas e analisadas através do Software Motic Plus.

3.1.2 – Ensaio de Dureza Rockwell

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaaios Mecânicos da FEMAT/Unifesspa – Marabá, onde foram escolhidas quatro peças de nº II, V, VIII e X para serem analisadas fazendo o uso de um durômetro da marca PANLEG, nas referências da escala de dureza Rockwell B e F conforme bibliografia de referência [20]. Foram feitos seis medições em cada peça, nas peças II e V utilizou-se a escala HRF pelo fato de ela possuir o mesmo penetrador que a escala HRB, e como elas firam fora de escala na HRB e a carga utilizada na HRF é menor conforme mostrado na Tabela 2. A seguir podemos visualizar na Figura 13 as peças usadas nos ensaios de dureza.

Tabela 2 - Escala de dureza Rockwell.

| Escala | Penetrador | Carga Kg | Material ensaiados |
|----------|-----------------|----------|---|
| A | Brale | 60 | Metal duro e outros materiais muito duros, como aço endurecido superficialmente com pequena espessura de camada. |
| B | Esfera de 1/16" | 100 | Aços moles, ligas não-ferrosas duras (de cobre e alumínio). |
| C | Brale | 150 | Aço de elevado limite de resistência à tração (acima de 60 Kgf/mm ²): aços endurecidos superficialmente com camada espessa. |
| D | Brale | 100 | Materiais com camada superficial endurecida media, tais como aços cementados; ferro maleável perlítico. |
| E | Esfera de 1/8" | 100 | Materiais moles, ligas de alumínio e magnésio; liga para mancais; ferro fundido. |
| F | Esfera de 1/16" | 60 | Ligas de cobre recozidas; chapas metálicas finas e moles. |
| G | Esfera de 1/16" | 150 | Bronze fosforoso; ligas Cu-B; ferro maleável |
| H | Esfera de 1/8" | 60 | Alumínio, chumbo, zinco. |

Fonte: [20]

Figura 13 – Peças após ensaio de dureza realizado. Peças da esquerda para a direitas II, V, VIII e X

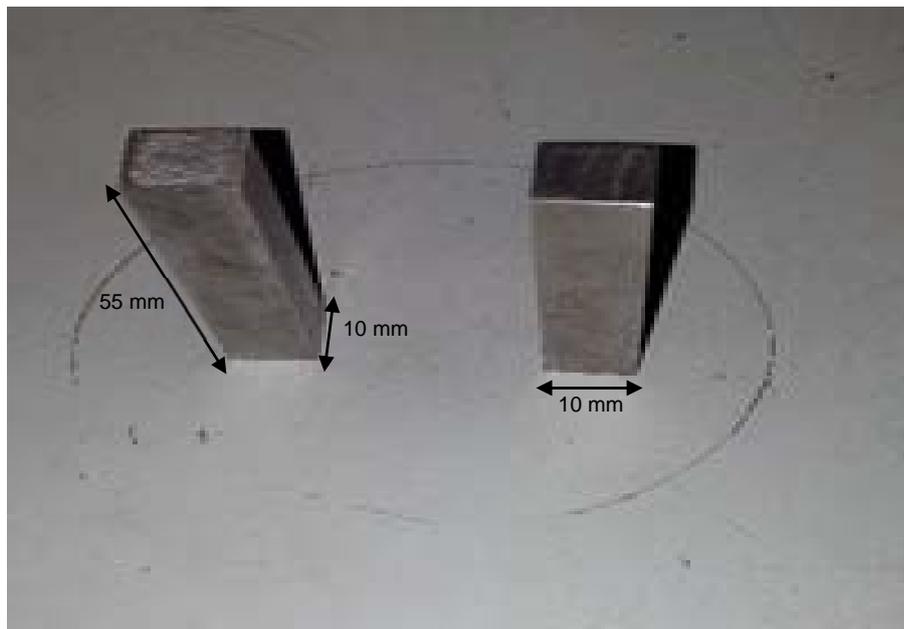


Fonte: Autor

3.1.3 - Ensaio de Impacto Charpy

Para a realização deste ensaio também se fez uso do Laboratório de Ensaio Mecânicos da FEMAT/Unifesspa – Marabá, onde com dois quartos do lingote foram confeccionados dois novos corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy, que seriam usados para determinação da energia absorvida. O corpo de prova foi confeccionado dentro das normas um prisma retangular de base quadrada 10 X 10 X 55 mm, sem necessidade do chanfro por ser um material dúctil [21]. A análise do impacto foi feita usando uma máquina pendular de impacto Charpy do modelo JB-300B. A seguir podemos ver os corpos de prova usados nos ensaios, Figura 14.

Figura 144 - Corpos de prova para ensaio de impacto.



Fonte: Autor

4 - RESULTADO E DISCUSSÕES

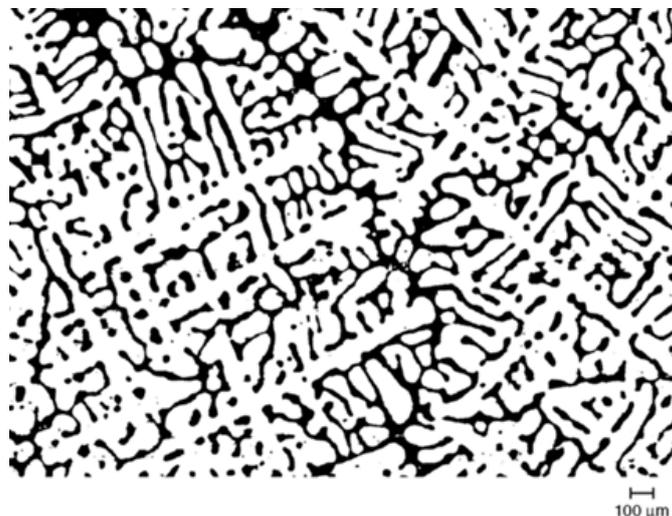
4.1– CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo da liga Al-Cu de composição desconhecida usado como base para o trabalho foi iniciado com a avaliação da microestrutura das amostras e caracterização segundo suas propriedades intrínsecas, em seguida se procedeu à avaliação dos graus de dureza nas peças amostrais, finalizando os estudos com o ensaio de impacto Charpy realizado em toda a extensão das amostras do lingote para tentar identificar a sua composição.

4.2 – MICROSCOPIA ÓTICA

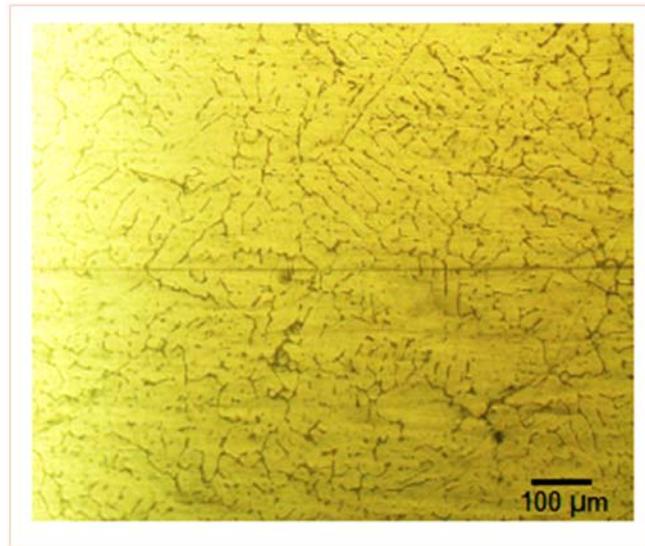
Através da metalografia microscópica, observou-se a formação de dendritas e crescimento de grãos isotrópicos. As imagens captadas pelo software Motic Plus comparadas com a literatura usada como base para o trabalho mostram que a liga Al-Cu utilizada neste trabalho tem semelhança a uma liga de composição eutética, conforme mostra a Figura 15 e comparada com a figura 16 a seguir.

Figura 15 - Uma microestrutura típica de uma liga de alumínio - cobre (coarsened durante 10 min. a 553°C, ou 995 ° F) fez binário para diferenciar entre o dendrito rica em alumínio proeutético e o eutético.



Fonte: [24]

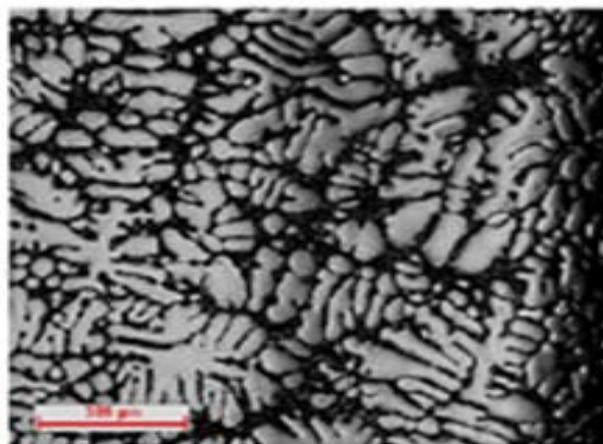
Figura 16 - Micrografia transversal da peça X. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído.



Fonte: Autor

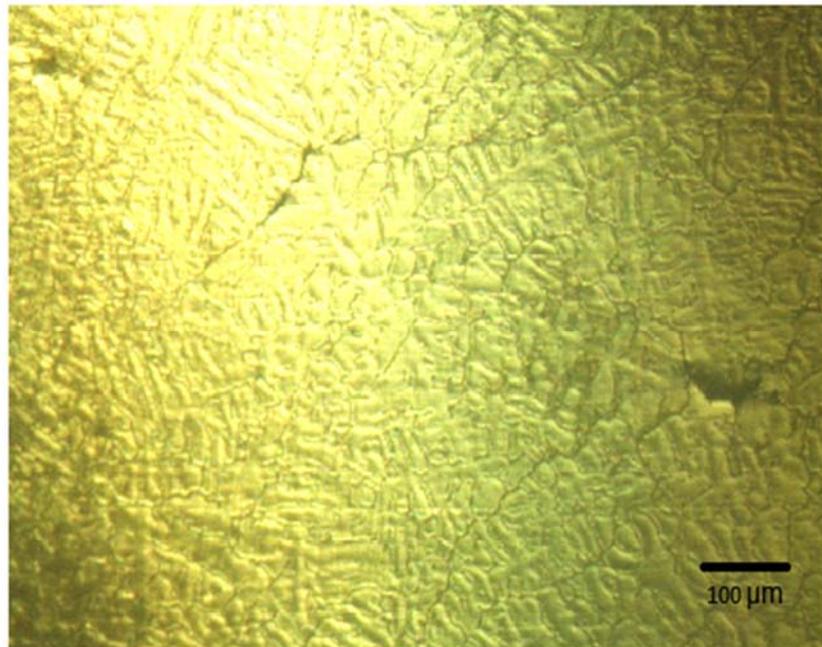
Analisando ainda as fotos obtidas foi possível observar similaridade com as imagens de captura transversal catalogadas na bibliografia de referência como mostra a figura 17 a seguir, e logo em seguida pode ser comparada com a Figura 18 que mostra a imagem transversal de uma das amostras fazendo comparação com os estudos.

Figura 17 - Imagem metalográfica: dendritas em forma de roseta em liga Al-15%Cu.



Fonte: [25]

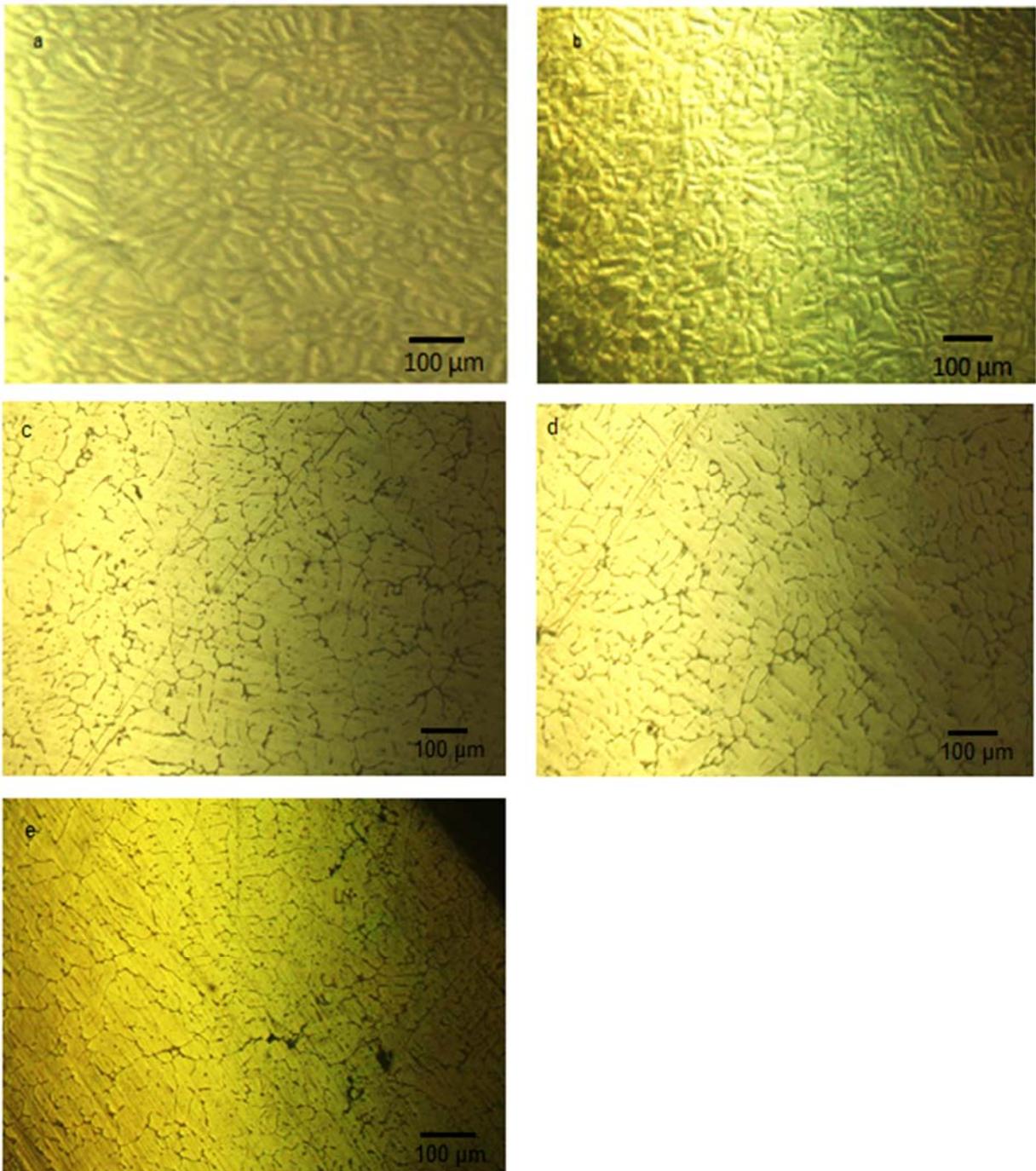
Figura 18 - Micrografia transversal da peça III. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído.



Fonte: Autor

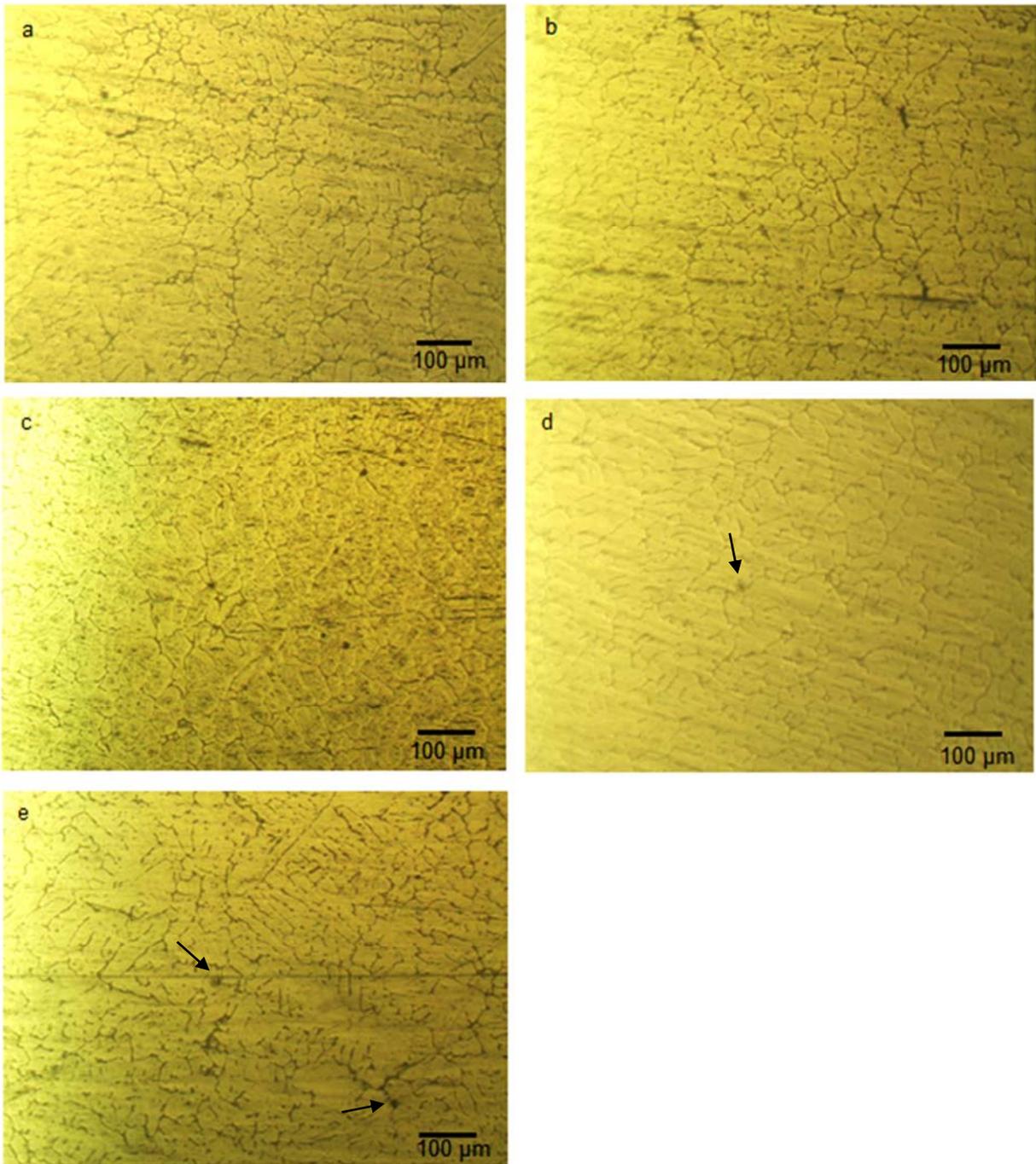
Da mesma forma as imagens a seguir mostram similaridade com a literatura conforme a figura 19 que mostra as imagens no sentido transversal de dendritas em uma liga Al-Cu, na figura 20 mostra a formação do grãos no sentido longitudinal mostrando precipitados de Al_2Cu .

Figura 19 - Imagens das amostras no sentido transversal (a) peça I (b) peça III (c) peça V (d) peça VIII (e) peça X. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído.



Fonte Autor

Figura 20 - Imagens sentido longitudinal (a) peça I (b) peça III (c) peça V (d) peça VIII (e) peça X. Aumento de 100x e atacadas com HF 10% diluído.



Fonte Autor

4.3 – PROPRIEDADES ANALISADAS

4.3.1- Avaliação da Dureza

Na realização desse ensaio procurou-se avaliar as amostras em seu ponto de vista estrutural avaliando através de ensaio mecânico o grau de dureza da liga em estudo. Com vista disso, através de um durômetro com escala em Rockwell foi possível avaliar as amostras em uma escala predeterminada na bibliografia como parâmetro para os estudos. Em posse dos resultados foi criada uma tabela (Tabela 3), onde foi necessário transformar a escala de dureza medida em Rockwell para uma escala de dureza em Brinell, visando a melhor comparação com a bibliografia de referência [23].

Tabela 3 – Tabela de resultados medidos em escala Rockwell.

| POSIÇÃO NO LINGOTE | PONTO 01 | PONTO 02 | PONTO 03 | PONTO 04 | PONTO 05 | PONTO 06 | Media HRB- HRF | Valor em HB |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|----------------|
| Peça II | 51,1 | 49,7 | 37,4 | 45,5 | 38,4 | 40,5 | 43,77 HRF | 43 |
| Peça V | 16,9 | 45,3 | 42,9 | 46,5 | 43,2 | 53,2 | 41,33 HRF | 38 |
| Peça VIII | 15,9 | 6,5 | 5,7 | 9,6 | 8,0 | 6,3 | 8,66 HRB | 56 |
| Peça X | 25,9 | 18,7 | 17,5 | 31,9 | 17,5 | 13,6 | 20,85HRB | 67 |

Fonte: Autor

Comparado com a literatura, a dureza de uma liga 2024, que passou por tratamento térmico “O” é 42 HB e a %Cu é 4 a 4,5. Logo, através desses resultados foi possível identificar que a liga trabalhada, originalmente de composição desconhecida, possui uma porcentagem maior de cobre para ter uma dureza semelhante ou superior em alguns pontos do lingote [26].

4.3.2 – Ensaio de Resistencia ao Impacto

Através dos ensaios realizados nos dois corpos de prova foi possível medir a energia absorvida, sendo respectivamente 10 e 12 Joules, com média 11,00 J. Em posse dos resultados buscou-se uma literatura onde se pudesse comparar como referência, com tudo a mais próxima encontrada foi à liga AA2024. Dessa forma não foi possível identificar a composição aproximada do lingote em estudo.

Com vista disso nota-se que o ensaio Charpy tem vantagens como o uso reduzido de corpos de prova e fácil execução do ensaio, mas em contra partida a ausência de uma medida direta da tenacidade à fratura aplicável reduz aplicação do ensaio [27].

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

5.1 - CONCLUSÃO

O alumínio e algumas de suas ligas podem ser considerados como sendo um dos metais mais difíceis de preparar para observação metalográfica. A baixa dureza e a tenacidade do alumínio o tornam muito susceptível à deformação durante a preparação, levando a um tempo de preparo manual entre lixamento e polimento extremamente longo, o que torna trabalhosa e cuidadosa a preparação destas ligas.

Neste trabalho foi possível observar através dos estudos metalográficos as fases constituintes e formação dos grãos da liga. Embora sabendo os constituintes da liga em estudo, não foi possível precisar a composição real da liga em porcentagem dos seus compostos, contudo as imagens micrográficas servem de parâmetros para os resultados estimados.

Nos ensaios mecânicos onde foi medida a dureza Rockwell foram analisadas as propriedades estruturais da liga e os resultados encontrados comparados a literatura, dessa forma observou-se que a composição da liga caracterizada nos estudos em uma comparação com uma liga de 4 a 4,5%Cu que possui dureza 42HB, apresentou uma variação muito significativa de dureza 38 – 67HB, o que significa que a liga deve possuir uma quantidade maior de cobre que a liga 2024-O.

Por sua vez os ensaios de impacto Charpy não tiveram resultados conclusivos, uma vez que os resultados encontrados não se pôde comparar com bibliografias que demonstrassem valores similares, levando a comparação com os resultados da liga 2024. Dessa forma, conforme especificado nos resultados e discussões a ausência de uma medida em estudos específicos sobre a tenacidade dos materiais tornam estes ensaios limitados e pouco exploráveis.

Assim, notamos que a liga não sofreu nenhum tratamento térmico, não foi solidificada unidirecionalmente, e da mesma forma, apresenta propriedades superiores e inferiores como mostrado na comparação com a liga 2024-O, e ainda por sua vez na metalografia identificamos dendritas do tipo rosetas comuns em uma liga eutética, podemos concluir que a liga estudada apresenta características estimadas de uma liga 15%Cu.

5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos mais aprofundados poderiam ser feitos e tornariam o trabalho mais conclusivo. Como complemento são sugeridos os seguintes estudos:

1. Realizar novos estudos acrescidos de uma análise química que daria a quantidade dos compostos da liga.
2. Fazer uma análise de difração de raio X para ter a certeza da composição.
3. Solidificar a liga unidirecionalmente para poder ter uma distribuição mais equilibrada dos elementos constituintes e uma homogeneidade das propriedades em toda a extensão do lingote, facilitando o estudo metalográfico.

REFERÊNCIAS

- [1] **Portal Metálica**. Informe técnico publicado pela White Martins. Disponível em: <www.metalica.com>. Acesso: 22/11/2014
- [2] CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. LTC. 5 ed. Rio de Janeiro, 2002.
- [3] CAYLESS, R.B.C. **Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys**. In: **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, v.2, ASM Handbook, ASM International, p.39-117, 1992.
- [4] CAMPBELL, John. **Castings: The New Metallurgy of Cast Metals**. 2.ed. United Kingdon: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [5] Associação Brasileira do Alumínio – ABAL. Disponível em: <www.abal.org.br>. Acesso: 22/11/2014
- [6] SMITH, Willian F. **Princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2Ed.Portugal: Mcgraw- Hill, 1998.
- [7] LEE, C.; SEE, D., “**Modeling Microporosity in Aluminium-Silicon Alloys: a review**”, *Journal of Light Metals*, V. 1, pp.15-30, 2001.
- [8] Instituto Brasileiro do Cobre – Procobre. Disponível em: <www.procobre.org>. Acesso: 22/11/2014
- [9] CHIAVERINI, V.**Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica** Volume III, 2ª Edição, 1986.
- [10] ASKELAND, Donald R. **Ciencia e Ingeniería de Los Materiales**, 3ª Edição, Ed. International Thomson Editors, S. A de C. V. 1998.
- [11] METALS HANDBOOK. **Casting**: [Handbook Committee, v. 15, ASM International](#), 1992.
- [12] SANTOS, E. R. **Estudo das variáveis térmicas na solidificação e difusividade de alumínio e ligas Al-Cu**, 2007. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- [13] METALS HANDBOOK; **Alloy phase diagrams**, v. 3. Ed. United States of America: ASM International, p. 238, 1992.
- [14] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª Ed. Revista e Atualizada, 1969.
- [15] BROOKS, J.A. **The Fundaments Study of The Beneficial Effects of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking**.WeldingJournal, 3, 1974. pp. 71-5, 83-5.

[16] BAPTÍSTA, A. L. B. - **O Ensaio metalográfico no Controle da Qualidade**, UFF/EEIMVR, 1998.

[17] COUTINHO, Telmo de Azevedo. **Metalografia de Não-Ferrosos**, Editora Edgard BlücherLtda, São Paulo, 1980.

[18] Telecurso 2000, **Apostila. Mecânica, Ensaios**. Editora Globo, 1995. Disponível em: <www.acervotecnico.com.br>. Acesso: 29/11/2014

[19] SOUZA, S. Augusto. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. Ed.EdgardBlutcher Ltda. 1982.

[20] CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**, 2ªEd. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR. NBRNM 281-1. **Materiais metálicos - Parte 1: Ensaio de impacto por pêndulo Charpy**.

[22] Garcia, A.; Spim, J. A. e Santos, C. A. dos. **Ensaios dos Materiais**, Editora LTC. 2000. Telecurso: Ensaio de Impacto.

[23] Disponível em: <www.engineersedge.com/hardness_conversion.htm>. acesso: 06/12/2014

[24] ASM HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. V.9, United States of America: ASM International, 2004.

[25] QUARESMA, J.; SANTOS C.A.; GARCIA A. Correlation between Unsteady-State Solidification Conductions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties of Al-Cu Alloy. **MetallurgicalandMaterialsTransactions A**, vol. 31A, 2000

[26] INCOMETAL. Disponível em: <www.incometal.com.br/ligas-extrusao.php> acesso: 06/12/2014

[27] Kobayashi, T; KIM H. J.; MORITA, S. **Progress and Development in the Instrumented CharpyImpac Test. Mat.** – Wiss U. Werkstoffech 32, 2001, p.525-531.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6834:2006. **Alumínio e suas ligas – classificação da composição química**

[29] ASM SPECIALTY HANDBOOK. **Alumimum and alumimum alloys**. United States of America ASM INTERNATIONAL 1993.