

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Daniel Kagan Mendes
Leonardo Ribeiro da Silva
Rodrigo Macedo Lima

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALUMINETOS DE FERRO DO TIPO Fe_3Al
ATRAVÉS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso

SÃO PAULO
2022

Daniel Kagan Mendes
Leonardo Ribeiro da Silva
Rodrigo Macedo Lima

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALUMINETOS DE FERRO DO TIPO Fe_3Al
ATRAVÉS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Banca Examinadora da Universidade São
Judas Tadeu, como parte dos requisitos ne-
cessários para obtenção do título de Gradua-
ção em Engenharia Mecânica.

Orientador: Igor Colado Porto Martins

SÃO PAULO
2022

Dedica-se este trabalho aos nossos colegas de curso, que assim como nós, encerraram uma difícil etapa da vida acadêmica. Ao nosso orientador, sem o qual não teríamos conseguido concluir esta difícil tarefa. A conclusão deste trabalho resume-se em dedicação, a todos os momentos em que tivemos ao longo dos anos nesta universidade e em cada um dos professores deste curso, a quem nos ensinaram e passaram conhecimentos fundamentais para a vida.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Ao nosso orientador, Igor Colado Porto Martins, pela ajuda e empenho dedicados à elaboração deste trabalho. Aos Professores, Dimas Alan Strauss Rambo e Renan Pícolo Salvador, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de nossa formação, o nosso muito obrigado.

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

RESUMO

Através dos grandes desenvolvimentos tecnológicos voltados para a comunidade científica, foram se intensificando as relações de interesse nos compostos intermetálicos ordenados, mais especificamente, os aluminetos de ferro. Fatos determinantes para os estudos destes compostos estão voltados as relações de comportamentos estáveis a altas temperaturas, que se somam às suas estabilidades químicas, voltados para diversas aplicações, como fontes confiáveis para sua utilização. Este presente trabalho tem como objetivo a caracterização microestrutural de aluminetos de ferro das bases Fe_3Al e Fe_3AlCr , como fonte para evoluções e melhorias em sua microestrutura e propriedades mecânicas, através dos processos de tratamentos térmicos de Solubilização e Envelhecimento dos compostos. As relações dos ensaios de dureza e de metalografia indicaram condições adversas quanto ao aumento da dureza e diminuição dos precipitados. A solubilização apresentou resultados contrários ao objetivo, no entanto, o processo de envelhecimento apresentou um resultado satisfatório na redução de dureza. A relação de tempo de tratamento térmico em função de trincas parece escalar também, prova da influência dos tratamentos térmicos em relação ao comportamento dos materiais durante um maior período, que mesmo envelhecido, teve um aumento em sua dureza.

Palavras-chave: Compostos intermetálicos, Aluminetos de Ferro, caracterização mecânica, metalografia, comportamento de grão.

ABSTRACT

Through the great technological developments aimed at the scientific community, the relationships of interest in ordered intermetallic compounds, more specifically, iron aluminides, were intensified. Determining facts for the studies of these compounds are focused on stable behavior relationships at high temperatures, which add to their chemical stability, aimed at various applications, as reliable sources for their use. This present work aims at the microstructural characterization of iron aluminides based on Fe₃Al and Fe₃AlCr, as a source for evolutions and improvements in their microstructure and mechanical properties, through the processes of thermal treatments of Solubilization and Aging of the compounds. The relationships of the hardness and metallography tests indicated adverse conditions regarding the increase in hardness and decrease in precipitates. The solubilization presented results contrary to the objective, however, the aging process presented a satisfactory result in the reduction of hardness. The heat treatment time ratio as a function of cracks also seems to increase, proof of the influence of heat treatments in relation to the behavior of materials over a longer period, which, even with age, had an increase in its hardness.

Keywords: Intermetallic compounds, Iron Aluminides, mechanical characterization, metallography, grain behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aplicações para as Ligas Metálicas.	16
Figura 2 – Estrutura das Ligas Metálicas.	17
Figura 3 – Estruturas Cristalinas.	18
Figura 4 – Diagrama de Fases do Sistema Fe-Al.	19
Figura 5 – Diagrama de Processos das Ligas FeAl e FeAlCr.	24
Figura 6 – Retirada do material após a Solubilização.	25
Figura 7 – Processo de Têmpera dos materiais pós-Solubilização.	26
Figura 8 – Micrômetro Hardness tester.	28
Figura 9 – Amostra base A (Fe_{28}Al) - A) Resolução 25x.	31
Figura 10 – Amostra base A (Fe_{28}Al) - B) Resolução 50x.	31
Figura 11 – Amostra base A (Fe_{28}Al) - C) Resolução 200x.	32
Figura 12 – Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) - A) Resolução 25X.	32
Figura 13 – Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) - B) Resolução 50X.	33
Figura 14 – Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) - C) Resolução 200X.	33
Figura 15 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1A}$) - A) Resolução 25X.	34
Figura 16 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1A}$) - B) Resolução 50X.	34
Figura 17 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1A}$) - C) Resolução 200X.	35
Figura 18 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$) - A) Resolução 25X.	35
Figura 19 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$) - B) Resolução 50X.	36
Figura 20 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$) - C) Resolução 200X.	36
Figura 21 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$) - A) Resolução 25X.	37
Figura 22 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$) - B) Resolução 50X.	37
Figura 23 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$) - C) Resolução 200X.	38
Figura 24 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$) - A) Resolução 25X.	38
Figura 25 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$) - B) Resolução 50X.	39
Figura 26 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$) - C) Resolução 200X.	39
Figura 27 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E1A}$) - A) Resolução 25X.	40
Figura 28 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E1A}$) - B) Resolução 50X.	40
Figura 29 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E1A}$) - C) Resolução 200X.	41
Figura 30 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2A}$) - A) Resolução 25X.	41
Figura 31 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2A}$) - B) Resolução 50X.	42
Figura 32 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2A}$) - C) Resolução 200X.	42
Figura 33 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2B}$) - A) Resolução 25X.	43
Figura 34 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2B}$) - B) Resolução 50X.	43
Figura 35 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1C}$) - A) Resolução 25X.	44
Figura 36 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1C}$) - B) Resolução 50X.	44
Figura 37 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2C}$) - Resolução 50X.	45

Figura 38 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E1D) - A) Resolução 25X.	45
Figura 39 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E1D) - B) Resolução 50X.	46
Figura 40 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E1D) - C) Resolução 200X.	46
Figura 41 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E2D) - A) Resolução 25X.	47
Figura 42 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E2D) - B) Resolução 50X.	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de análise de Solubilização.	29
Gráfico 2 – Gráfico de Envelhecimento - Material A (Fe_{28}Al).	30
Gráfico 3 – Gráfico de Envelhecimento - Material C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$).	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – textbfEtapas de Polimento dos Materiais	27
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos Gerais	13
1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Ligas Metálicas e suas aplicações	15
2.2	Estrutura das Ligas Metálicas	16
2.3	Intermetálicos do Sistema Fe-Al	17
2.4	Tratamentos Térmicos	20
2.4.1	<i>Solubilização</i>	20
2.4.2	<i>Envelhecimento</i>	21
2.5	Metalografia	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Procedimentos Experimentais	25
3.1.1	<i>Embutimento</i>	26
3.1.2	<i>Lixamento</i>	27
3.1.3	<i>Metalografia</i>	28
3.1.4	<i>Ensaio de dureza</i>	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Ensaio de Dureza	29
4.1.1	<i>Solubilização</i>	29
4.1.2	<i>Envelhecimento</i>	29
4.2	Análise de Metalografia	30
4.2.1	<i>Amostra base A (Fe₂₈Al)</i>	31
4.2.2	<i>Amostra base C (Fe₂₈Al₆Cr)</i>	32
4.2.3	<i>Amostra A, solubilizada por uma hora (Fe₂₈Al S1A)</i>	33
4.2.4	<i>Amostra A, solubilizada por duas horas (Fe₂₈Al S1B)</i>	35
4.2.5	<i>Amostra C, solubilizada por uma hora (Fe₂₈Al₆Cr S1C)</i>	36
4.2.6	<i>Amostra C, solubilizada por duas horas (Fe₂₈Al₆Cr S1D)</i>	38
4.2.7	<i>Amostra A, envelhecida e solubilizada por uma hora (Fe₂₈Al E1A)</i>	39
4.2.8	<i>Amostra A, solubilizada por uma hora e envelhecida por duas horas (Fe₂₈Al E2A)</i>	41
4.2.9	<i>Amostra A, solubilizada e envelhecida por duas horas (Fe₂₈Al E2B)</i>	42
4.2.10	<i>Amostra C, solubilizada e envelhecida por uma hora (Fe₂₈Al₆Cr E1C)</i>	43

4.2.11	<i>Amostra C, solubilizada por uma hora e envelhecida por duas horas</i> <i>(Fe₂₈Al₆Cr E2C)</i>	44
4.2.12	<i>Amostra C, solubilizada por duas horas e envelhecida por uma hora</i> <i>(Fe₂₈Al₆Cr E1D)</i>	45
4.2.13	<i>Amostra C, solubilizada e envelhecida por duas horas (Fe₂₈Al₆Cr E2D)</i> .	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Com o advento dos anos 50, houve um crescimento exponencial por parte da comunidade científica, no que se refere a procura de materiais metálicos e derivados. Sob tal perspectiva, foi possível concluir que propriedades como elevada resistência mecânica, baixa densidade e de comportamento não convencional em situações de alta temperatura e alta corrosividade, conseguem apresentar soluções tecnológicas e de baixo custo de produção. Além disso, no que diz respeito ao desenvolvimento de materiais para aplicações já consagradas no mercado como, por exemplo, alguns aços inoxidáveis, ligas de cobre (Cu), de Titânio (Ti) e de Níquel (Ni), entre outros, caracterizam-se como eventuais substitutos para criação dos chamados aluminetos de ferro (BORGES, 2010; RAMIREZ, 2019; CALIXTO, 2010).

Os aluminetos de ferro, das bases Fe_3Al e FeAl , são materiais da classe dos intermetálicos ordenados, cujos compostos ou ligas de fases são formadas por dois, ou mais elementos metálicos. Tais elementos metálicos com átomos de uma fase que ocupam pontos específicos da rede cristalina de outra fase (CALIXTO, 2010). Eles possuem propriedades únicas com potenciais de desenvolvimento de novos materiais para uso estrutural, nos quais estão relacionadas à capacidade dos aluminetos de ferro formarem escalas de proteção de óxido de alumínio em ambientes oxidantes a temperaturas elevadas (ZWILSKY; LANGER, 1992).

Além da excelente resistência à corrosão, os aluminetos oferecem baixo custo de material, baixa densidade e conservação de elementos estratégicos. Entretanto, os principais inconvenientes destes intermetálicos estão relacionados a sua baixa ductilidade e resistência à fratura à temperatura ambiente, além de sua baixa resistência a temperaturas acima de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1110\text{ }^{\circ}\text{F}$) (ZWILSKY; LANGER, 1992).

Recentemente, esforços consideráveis têm sido dedicados para compreender e melhorar suas propriedades mecânicas através do controle da estrutura de grãos, adições de ligas e processamento de materiais. Sobre este contexto, é necessário analisar a evolução destas ligas através das metodologias de tratamentos térmicos e de ensaios de dureza do material antes e pós o processo, o que leva aos objetivos deste trabalho.

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste estudo consiste na realização de uma caracterização microestrutural de duas ligas de aluminetos de ferros com as bases Fe_{28}Al e $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$. Neste caso, deverá ser realizado o estudo de tratamentos térmicos a fim de compreender e estudar possíveis evoluções de acordo com suas características mecânicas, além da possibilidade de redução de custos em sua produção. A base deste estudo consiste na representação da microestrutura e análise de durezas dos materiais para validação e compreensão dos

resultados.

Serão testados os processos térmicos em diferentes corpos de prova, para verificar através das medições de dureza e metalografia do material, a eficácia dos tratamentos térmicos determinados. Através destes testes, será possível compreender seus comportamentos em relação a melhorias de suas condições estruturais, além também de possíveis reduções de sua fragilidade e de sua usinabilidade. Obtendo soluções positivas a respeito, será praticável obter uma liga com boas propriedades e com baixo custo, o que é muito visado pelo mercado. Sob tal ótica, foram definidos a seguir os objetivos específicos para realização deste trabalho.

1.2 Objetivos Específicos

Através dos materiais e equipamentos disponíveis na Universidade São Judas Tadeu (USJT) e no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN-SP), será possível realizar os testes necessários, com base nos estudos prévios a serem realizados sobre o tema de ligas intermetálicas.

Sendo assim, serão estudadas as características mecânicas da liga, aplicando as técnicas de tratamentos térmicos previamente estudados (solubilização e envelhecimento), além da realização dos ensaios de dureza, para avaliar a resistência de penetração. Após estes processos, será feita a análise microestrutural do material, através da metalografia, realizando o diagnóstico da liga. Por fim, realizar o comparativo entre os resultados iniciais e com os pós-tratamentos térmicos, para avaliar se houve evolução nos materiais e em suas características mecânicas na microestrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligas Metálicas e suas aplicações

A primeira liga metálica foi desenvolvida por volta de cinco mil anos atrás, conhecida historicamente como a Idade do Bronze. Na ocasião, foi desenvolvida inicialmente uma liga de bronze, constituída de cobre (Cu) e estanho (Sn) onde as civilizações desta época utilizavam para fabricação de diversos utensílios com esta mistura metálica. A liga de bronze era muito comum em questões de utilização devido às características de resistência mecânica e ductilidade (GULHÁEU, 1977; FULCO; BISPO; SANCHEZ, 2015).

As ligas metálicas podem ser definidas como uma mistura de dois ou mais elementos, dos quais um deles obrigatoriamente necessita ser um metal. Elas são desenvolvidas por meio do aquecimento de seus elementos, chegando até seus pontos de fusão, formando então uma mistura homogênea, sendo posteriormente resfriada até sua solidificação (FULCO; BISPO; SANCHEZ, 2015; MAGALHÃES, 2022).

Estas ligas apresentam características essenciais para a indústria tais como, resistência a corrosão, condutividade térmica, resistência mecânica. Estas características são usadas para diversas aplicações e objetos variados, nos quais estão presentes desde um objeto simples, como uma torneira de bronze, e até em peças de alta complexidade, como uma turbina de avião, fabricada com ligas de titânio (Ti) (MAGALHÃES, 2022). Elas possuem ampla aplicação na indústria, utilizadas em larga escala para diversos processos industriais onde a alta utilização dessas ligas se deve as suas propriedades singulares (GULHÁEU, 1977).

Existem diversos processos industriais para obtenção de uma liga metálica como, por exemplo, a compressão, cujos elementos que possuem altos pontos de fusão, são submetidos a altas pressões, facilitando sua fundição. Neste processo, os elementos químicos são adicionados em um forno ou caldeira, nos quais a temperatura é elevada até o ponto de fusão desses materiais (GULHÁEU, 1977; MAGALHÃES, 2022).

Pode-se citar alguns exemplos para estas aplicações como, por exemplo, o uso do latão para a fabricação de diversos instrumentos musicais, tubos e torneiras, devido sua alta maleabilidade. Há também o aço inoxidável, utilizado em diversas estruturas com características de proteção contra corrosões. A amálgama, amplamente usada em obturações dentárias. O bronze usado na produção de estátuas, sinos, moedas entre outros, devido à alta resistência ao desgaste por fricção. O aço usado em diversas construções e estruturas, pois resiste a alta força de tração, característica essencial para diversos projetos e construções, como pontes, prédios, andaimes, entre outros (GULHÁEU, 1977; FULCO; BISPO; SANCHEZ, 2015; UFPR, 2017).

Figura 1 – Aplicações para as Ligas Metálicas.



Fonte: (FOGAÇA, 2022)

2.2 Estrutura das Ligas Metálicas

Estas aplicações fazem parte da estrutura das ligas metálicas indicadas na figura 2, nos quais possuem diversas ramificações, definidas de acordo suas composições. Estas ramificações se iniciam com os compostos ferrosos e não ferrosos.

As Ligas Metálicas ferrosas são materiais cujo elemento Ferro (Fe) é o principal elemento químico. Normalmente são produzidas em maior quantidade, pois apresentam muita variedade de propriedades mecânicas e físicas, obtendo assim, uma versatilidade em seu uso. Apesar disso, elas apresentam também uma grande facilidade para corrosão. Já as Ligas Metálicas não ferrosas, como próprio nome diz, não possuem o Ferro (Fe) em sua composição. Neste caso, elas apresentam melhor resistência a corrosão, resistência ao desgaste, condução térmica, além de um peso reduzido para determinadas ligas (MAGALHAES, 2021; UFPR, 2017).

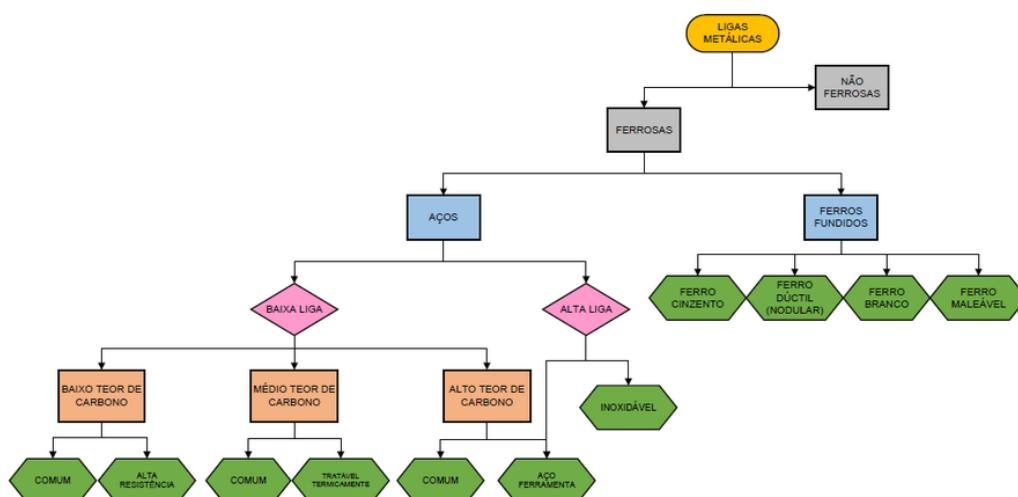
Dentre os compostos ferrosos, utilizam-se os aços, geralmente mais resistentes e rígidos, conforme o nível das ligas além dos fundidos, mais dúcteis e maleáveis para diversas aplicações. Para os níveis de aço, são divididos em duas ramificações: os aços de alta e de baixa liga (ZEEMANN, 2016).

Os aços de baixa liga trabalham com pequenas quantidades de elementos de liga, utilizados para alterar a curva de transformação. Normalmente sofrem transformações de fase, embora suas temperaturas não sejam afetadas (ZEEMANN, 2016). As relações dos tratamentos térmicos e termomecânicos são muito importantes devido à necessidade de acompanhamento dos processos de fabricação especiais, voltados a adição de elementos de liga, além das questões de alta resistência (COLPAERT; SILVA, 2008a).

Esta ramificação está dividida em três grupos, em função do teor de carbono em sua composição. Aços com baixa concentração de Carbono (C), chegando até 0,25% em sua composição, produzem ligas dúcteis e com alta capacidade de soldagem. Aços com média de concentração de carbono entre 0,25% e 0,60% possuem resistência mecânica elevada e resistência a abrasão e tenacidade. Por fim, aços com alta concentração de carbono, chegando a níveis de 0,60% até 1,40% trazem uma liga resistente, porém mais frágil dentre os demais grupos (SAMUELS, 1999).

Já os aços de alta liga trabalham com uma alta porcentagem de elementos de liga, ultrapassando os 12%. Ele é comum na utilização dos inoxidáveis e aços ferramenta, com a utilização de cromo em sua composição. Além de serem muito caros, eles são utilizados em condições ambientais severas, pela sua capacidade de resistência à corrosão, desgaste, calor e a temperaturas criogênicas (ZEEMANN, 2016; COLPAERT; SILVA, 2008a).

Figura 2 – Estrutura das Ligas Metálicas.



2.3 Intermetálicos do Sistema Fe-Al

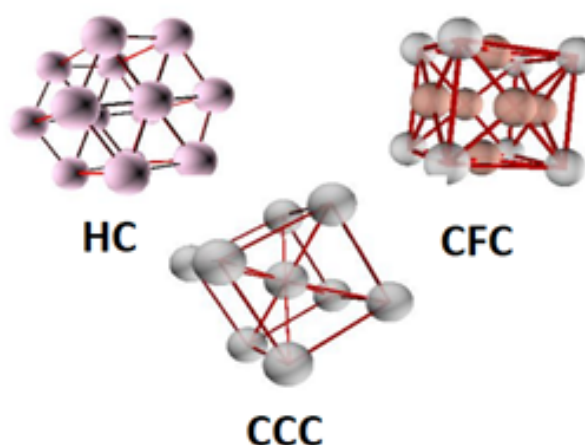
Os intermetálicos ordenados são compostos formados de ligas constituídas por dois ou mais elementos metálicos, resultando em ligações metálicas ou covalentes, que possuem fortes ligações de átomos e relações bem definidas através da sua menor mobilidade atômica e de uma maior resistência à deformação plástica a elevadas temperaturas (RAMIREZ, 2019; CALIXTO, 2010; BORGES, 2010).

Essas ligações podem sofrer influências conforme modificações do sistema, resultando em variações microestruturais nas suas características de tenacidade e ductilidade. Compostos com baixa densidade e boa resistência mecânica, corrosão e oxidação, são de grande procura para as indústrias, aumentando a vida útil e reduzindo custos de manutenção de vários sistemas, principalmente em ambientes específicos de corrosão (CALIXTO, 2010).

A relação das microestruturas dos compostos intermetálicos está definida pela estrutura cristalina, nos quais são compostas pelos ordenamentos de longo alcance, ocupando posições específicas e únicas nesta estrutura. A força de ligações de átomos diferentes com mesma composição e seu ordenamento pode variar no intervalo da temperatura de fusão até temperaturas mais baixas (ADEVA, 1999).

Grande parte dos metais da tabela periódica se cristalizam em estruturas CFC (Cúbicas de Faces Centradas), CCC (Cúbicas de Corpo Centrado) ou HC (Hexagonal Compactas). Sendo assim, é possível formar estruturas com diversas propriedades físicas, a fim de serem utilizadas nas mais modernas aplicações, substituindo os aços, latões entre outras ligas na indústria (PÖTTGEN; JOHRENDT, 2014).

Figura 3 – Estruturas Cristalinas.



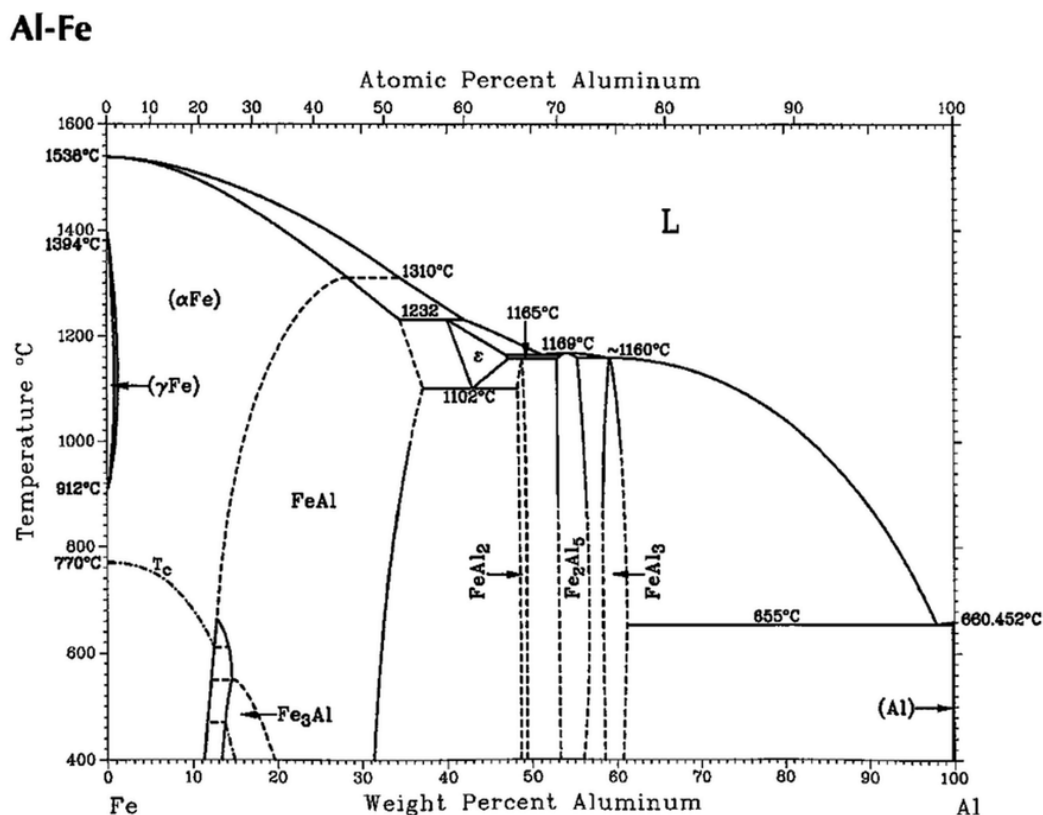
Fonte: (ASM HANDBOOK, 2000)

Através de estudos de novos materiais estruturais e resistentes às altas temperaturas, estimulou-se o interesse nos intermetálicos ordenados, entre eles nos aluminetos de Ferro das bases FeAl e Fe₃Al. Estes aluminetos de ferro são considerados como materiais candidatos a aplicações estruturais em elevadas temperaturas, assim como ocorre com outras ligas com base em elementos estratégicos como níquel, cobalto e cromo. No entanto, eles provêm de elementos mais abundantes na natureza, reduzindo assim o custo relativo à matéria-prima (CALIXTO, 2010; BORGES, 2010; RAMIREZ, 2019).

O diagrama de fases relaciona a composição química do material, temperatura, pressão e quantidade de fases. Existe uma correlação importante entre a propriedade mecânica e microestrutura com o diagrama de fases. A microestrutura de uma liga está diretamente associada às características do seu diagrama de fases, pois, oferece diversos dados, tais como, ponto de fusão e fundição, cristalização, pressão, composição química, entre outros. Estas características estão correlacionadas à forma da microestrutura do

material.

Figura 4 – Diagrama de Fases do Sistema Fe-Al.



Fonte: ASM HANDBOOK, 1992

As ligas FeAl fazem parte da família com solução sólida ordenada em baixas temperaturas e desordenada em temperaturas elevadas. A figura 4 relaciona os aluminetos em função de sua temperatura crítica de ordenação e temperatura de fusão. Ademais, essa liga perde o ordenamento em temperaturas baixas além de passar por duas estruturas ordenadas (DO3 e B2) antes da perda de seu ordenamento cristalino (BAZZI; OLIVEIRA; MECÂNICA, 2012, bazzi).

A Figura 4 apresenta o diagrama de equilíbrio da liga FeAl em que suas proporções de são dadas em percentuais atômicos (a) e em percentuais de pesos (b). Observa-se cinco fases intermetálicas estáveis, nas quais, FeAl₂, Fe₂Al₅ e FeAl₃ mais ricos em alumínio e FeAl e Fe₃Al mais ricos em ferro, base deste presente trabalho (BAZZI; OLIVEIRA; MECÂNICA, 2012).

Conforme o diagrama de fases desta liga elas apresentam uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) na faixa de composição de 20 a 50% em função do Alumínio (Al). Sob tal perspectiva, elas exibem sua transição de ordenamento conforme indicado na figura 4. Observa-se também que o composto Fe₃Al apresenta uma transição da estrutura de ordenamento DO3 para a B2 na faixa de 540 °C e outra transição da estrutura B2 para o estado de desordenamento cristalino na faixa de 760 °C. Já a liga FeAl perde sua

estrutura ordenada B2 e passa a ser desordenada na faixa de 1250 °C (PALM, 2004; BAZZI; OLIVEIRA; MECÂNICA, 2012).

As propriedades mecânicas dos aluminetos são caracterizadas em função da temperatura da composição da liga. Elas possuem comportamentos uniformes em temperaturas de até 600 °C, evitando perdas de resistência mecânicas significativas. No entanto, quando ultrapassadas essas faixas de temperatura, é possível analisar uma queda acentuada ligada diretamente a estrutura de grão do material. Além disso, questões de resistência a corrosão, resistência alta a oxidação e sulfetação em temperaturas elevadas derivam da capacidade do alumineto de formar escalas altamente protetoras (BAZZI; OLIVEIRA; MECÂNICA, 2012).

2.4 Tratamentos Térmicos

O tratamento térmico pode ser definido como uma série de procedimentos de aquecimento ou resfriamento, em aços ou ligas metálicas. O tratamento térmico geralmente, é aplicado em um metal ou liga metálica, com o objetivo de alterar alguma propriedade do material metálico, como por exemplo: remoção de tensões, modificar a dureza (possibilitando melhorias durante a usinagem), alterar as propriedades mecânicas (resistência, ductilidade, entre outras), microestrutura definida, entre outros (SILVA, 2020).

Esses tratamentos podem ser influenciados por diversos fatores, entre eles, na velocidade de resfriamento, temperatura atmosférica, modelo de forno utilizado, entre outros. Com o tratamento térmico, pode-se remover tensões, modificar a dureza (possibilitando melhorias durante a usinagem), alterar as propriedades mecânicas (resistência, ductilidade, entre outras), microestrutura definida, entre outros.

Existem diversas categorias de tratamentos térmicos para as ligas metálicas, dentre os mais comuns: o recozimento, solubilização, envelhecimento, normalização, austêmpera, martêmpera, têmpera, revenimento, cementação, carbonitreção e nitreção (S.C.DEEVI; V.K.SIKKA, 1996).

2.4.1 Solubilização

A solubilização é um tratamento térmico geralmente realizado em ligas de alumínio, este tratamento térmico tem como objetivos, diminuir a dureza do material e solubilizar segundas fases que apresentam efeitos indesejáveis no material (SILVA *et al.*, 2022).

A solubilização é realizada quando a liga é submetida a temperaturas elevadas, próximo ao ponto de fusão da liga, tornando possível a migração de átomos, e consequentemente isto proporcionará a dissolução completa depois de um certo tempo de permanência no forno nesta temperatura elevada, eliminando as fases secundárias presentes antes do tratamento térmico. Ele pode ser definido como o aquecimento da liga a uma temperatura

elevada, com o objetivo da dissolução dos precipitados endurecedores. Para realizar este tratamento térmico a temperatura máxima não pode ultrapassar o ponto de fusão do metal, ou liga metálica, pois isto pode comprometer a integridade estrutural do material e seu acabamento, logo tornando o material inapropriado para alguns usos específicos (SILVA *et al.*, 2022).

Neste tipo de tratamento o alumínio é solubilizado em temperaturas em torno de 700 °C, durante o processo onde alguns elementos de liga são redissolvidos para produzir uma solução sólida rica em soluto. O objetivo deste processo é maximizar a concentração de elementos de endurecimento. A concentração e a taxa de dissolução desses elementos cresce conforme a temperatura aumenta. Como consequência as temperaturas para a solubilização são geralmente próximas à temperatura de fusão da liga (SILVA *et al.*, 2022).

A partir do instante em que os elementos de liga ocupam as posições do reticulado do alumínio na solução sólida supersaturada, haverá um período em que essa situação se manterá, antes que os elementos de liga comecem a ser rejeitados, com base na cinética de movimentação dos átomos, em temperaturas baixas. Em geral, esse período de incubação dura de algumas horas a alguns dias, dependendo da quantidade e do tipo do elemento de liga dissolvido. A temperatura aplicada para cada tipo de liga que esteja sendo trabalhada e diferente, logo o feito um resfriamento por meio da água, para que se possa prevenir temporariamente a precipitação dos elementos da liga. Importante também é o tempo de transferência do meio de aquecimento para o resfriamento; caso seja demorado, pode ocorrer uma solubilização incompleta, que refletirá num resultado insatisfatório (SILVA *et al.*, 2022).

O propósito do resfriamento é evitar a formação da fase de equilíbrio durante o resfriamento e a obtenção da maior quantidade possível destes elementos em solução sólida em baixa temperatura. A obtenção de alta resistência é dependente das altas taxas de extração de calor. Entretanto, a taxa de resfriamento não deve ser muito elevada. A fim de evitar distorções e tensões residuais nos componentes tratados (RODRIGUES, 2015).

2.4.2 Envelhecimento

O tratamento térmico de envelhecimento, visa, o endurecimento do material por meio da precipitação. Os requisitos principais para ocorrer o endurecimento são, o precipitado formado deve ser coerente com a matriz; a liga não pode sofrer trincas durante o processo de resfriamento na solubilização; a solubilidade sólida decrescente de uma fase com a queda de temperatura e ter uma matriz dúctil (SILVA *et al.*, 2022).

Após o processo de envelhecimento, a liga está fora de equilíbrio, isto é, a solução sólida obtida está supersaturada com o soluto e apresenta força motriz para gerar a precipitação de outras fases durante o processo de envelhecimento. O primeiro precipitado a ser nucleado no processo de envelhecimento é chamado de zona de Guinier e Preston

(GP), coerente com a matriz, portanto, possui baixa energia de interface. Este precipitado minimiza a energia de deformação, adquirindo a forma de disco (LIMA, 2012).

O endurecimento por envelhecimento ocorre, pois existe interação entre os campos de tensão associados às discordâncias e aos precipitados (assim como existe uma atração magnética entre um ímã e uma peça de aço). Garantidamente existe uma “neutralização” dos efeitos dos campos de tensão entre discordância e precipitado, diminuindo a energia interna do sistema (LIMA, 2012).

O início do envelhecimento ocorre a migração progressiva dos elementos de liga em solução sólida para zonas GP e para os precipitados. A fração volumétrica de precipitados aumenta com o tempo de tratamento e, quanto mais “carregada” a liga, maior a quantidade de precipitados formados (LIMA, 2012).

Uma vez que quase todo o elemento de liga está fora da solução sólida, a fração volumétrica de precipitados permanece constante, após isso os precipitados menores irão se dissolver, “alimentando” os maiores. Isso diminui a quantidade de precipitados por unidade de volume e aumenta a distância entre eles (LIMA, 2012).

Durante o auge de dureza em diante ocorre a formação de precipitados não coerentes em função da dissolução dos coerentes. Nesse ponto passa a predominar o mecanismo em que as discordâncias passam a se “curvar” entre dois precipitados e passar por eles, com a formação de um anel de discordância ao redor dos precipitados. Esse mecanismo passa a ser predominante e, como nesse estágio do tratamento a distância entre precipitados aumenta progressivamente, ocorre o amolecimento do material, causado pelo sobre envelhecimento (RODRIGUES, 2015).

2.5 Metalografia

A Metalografia é o estudo do micro e macroestrutura, e suas técnicas nos permite realizar análises da morfologia e estrutura dos metais e avaliar se um dado material vai segurar um comportamento integro em operação, ou analisar materiais pós-falha. A preparação metalográfica consiste no polimento e ataque químico das amostras, previamente preparadas para o processo e embutidos ou não dependendo de suas dimensões. Os ensaios macrográficos são exames que variam até 50x, com ele podemos avaliar a homogeneidade do material, impurezas e falhas na fabricação e profundidade de tratamentos térmicos. Já os processos de macrográficos consistem em auxílio de microscópios com zoom acima de 50x que nos possibilita o estudo de granulação dos materiais, teor de carbono, natureza e formas da liga. Por ser uma técnica de análise microscópica as técnicas metalográficas devem ser muito bem executados para a extração de dados satisfatórios para análise (COLPAERT; SILVA, 2008b).

O ataque químico é usado para revelar a estrutura do material o reagente causa uma corrosão na superfície do material e permitir a visualização das diferentes fases do contorno

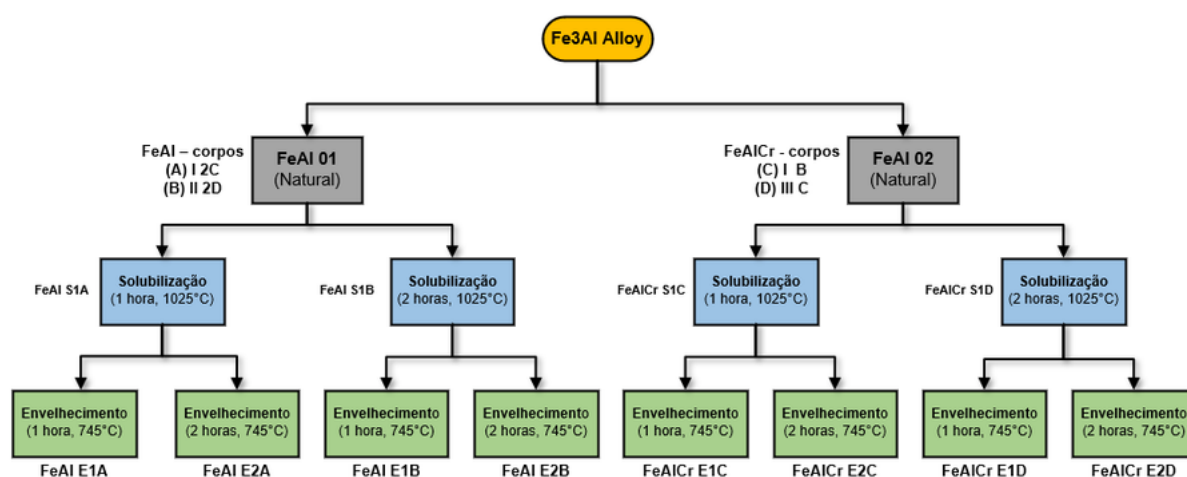
de grão. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macro-estruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica microscópica (COLPAERT; HUBERTUS, 1974).

3 METODOLOGIA

Neste presente trabalho, foi criado um plano de atuação para a utilização de dois intermetálicos: o Fe_{28}Al (1) e $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ (2), ambos em seus estados naturais de pós-fundição, realizados por (RAMIREZ, 2019). O plano para o tratamento térmico dessas ligas, consiste em duas fases de aquecimento.

No primeiro momento, foi realizado a exposição dos compostos base à temperaturas de 1025 °C, por períodos diferentes, através do processo de solubilização. Após isso, foi aplicado o processo de envelhecimento desses materiais, abaixo da temperatura de formação (cerca de 745 °C), e por períodos distintos. Por fim, foram retiradas amostras de cada material, de acordo com sua forma de trabalho, a fim de parametrizar e analisar a evolução das ligas após os tratamentos térmicos, através dos estudos de metalografia e ensaios de dureza dos compostos, como indicados na imagem a seguir.

Figura 5 – Diagrama de Processos das Ligas FeAl e FeAlCr.

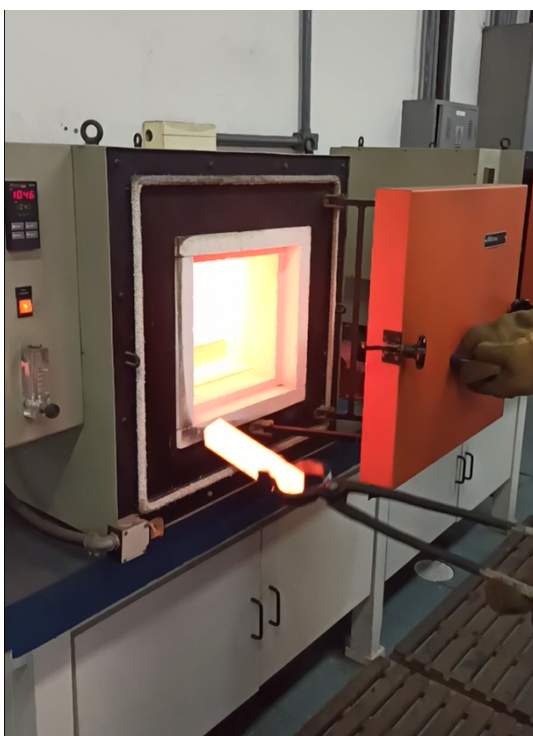


As amostras Fe_{28}Al e $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ obtidas anteriormente através do processo de fundição foram tratadas termicamente com a utilização de um forno elétrico de indução da empresa MetalTrend, com uma curva de aquecimento de 8 °C / min. Para o corte das amostras, foi utilizado a máquina policorte da empresa Panambra e por fim, a tipagem do material realizada em uma bigorna simples. O estudo para melhoria do material parte dos tratamentos térmicos nas ligas, buscando analisar a estrutura de grão quanto ao seu refino, além das diferentes tensões internas, por se tratar de um material bruto (RAMIREZ, 2019).

Foi efetuado o tratamento térmico de solubilização, com objetivo de agitar de forma desordenada os átomos do material seguido de uma têmpera a óleo para resfriamento uniforme do mesmo, a fim de evitar uma queda acentuada de temperatura e reorganizar a estrutura dos grãos, sendo assim, reduzindo a rigidez, deixando as ligações mais homogêneas (BORGES, 2010; RAMIREZ, 2019). A figura 6 ilustra a solubilização do material, com base na temperatura de 1050 °C, com objetivo de analisar sua microestrutura. E em

seguida, foi realizado o resfriamento através de uma Têmpera a óleo.

Figura 6 – Retirada do material após a Solubilização.



3.1 Procedimentos Experimentais

Foi realizado inicialmente uma curva de temperatura do forno para melhor adequar suas oscilações, devido à abertura do forno. No início do experimento, foi exposto os quatro materiais à temperatura de 1070 °C, definida através da curva de calor do forno, em relação à variação de temperatura do termostato e, principalmente pela temperatura de solubilização definida previamente, com variação de 70 a 80% da temperatura de fusão do material.

Antes da realização do tratamento térmico de solubilização, foi retirado de cada corpo (material A e C) uma amostra, com cerca de 0,4 mm de espessura, para utilização de comparativos para as análises de dureza e microestrutura.

No primeiro passo, os corpos de prova A e C foram expostos à temperatura de solubilização durante uma e duas horas, respectivamente, como indicados anteriormente na figura 5. Após este procedimento, foram inseridos em uma Têmpera a óleo, para obtenção da curva de resfriamento do material menos agressiva para posteriormente, realizar a separação dos corpos na policorte.

Figura 7 – Processo de Têmpera dos materiais pós-Solubilização.

O segundo passo do experimento foi realizar o envelhecimento dos materiais a temperatura de 745 °C para os corpos A e C por mais uma e duas horas respectivamente. Após concluído o procedimento, as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente e então, preparadas para separação com a policorte e posteriormente o embutimento de cada um.

3.1.1 *Embutimento*

Apos a realização do tratamento térmico de solubilização, foi retirado de cada material uma amostra com cerca de 0,4 mm de espessura. Estas amostras serão utilizadas para a realização do embutimento.

O embutimento das amostras visa facilitar o manuseio das peças e facilitar o polimento das amostras evitando arestas que podem acabar cortando as lixas. O embutimento foi realizado em cada amostra, posicionadas na prensa de embutimento com a face do corte longitudinal para baixo, então é adicionado a resina de polimerização rápida (baquelite), e então prensado para obter as peças embutidas (SILVA; ROHDE, 2010).

Após o embutimento de todas as peças, foi necessário o desbaste dos cantos das peças embutidas para melhor aproveitamento do lixamento e evitar risco de rasgar as lixas durante o processo.

3.1.2 Lixamento

Após a conclusão do processo de embutimento, as amostras foram separadas conforme o diagrama de processos das ligas (figura 5), para preparação do processo de lixamento e polimento das amostras. A etapa de preparação metalográfica foi dirigida no laboratório de metalografia do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN-SP).

As amostras foram niveladas e firmadas no Holster para os passes, realizado em uma politriz semiautomática da marca Buehler, modelo Ecomet 3. Foram realizados três passes com lixas de 240 a 1200 citados na tabela 1, por um período de três minutos por passe (SILVA; ROHDE, 2010).

Tabela 1 – Etapas de Polimento dos Materiais

Passos	Abrasivo	Gramas (μm)	Tempo (seg)	Pressão (lbf)	RPM	Lubrificante
1.º	240	80	540	12	200	Água
2.º	360	35	540	12	200	Água
3.º	400	22	540	12	200	Água
4.º	600	15	540	12	200	Água
5.º	1200	8	540	12	200	Água
6.º	Pasta de Diamante	1	720	3	10	Detergente Neutro
7.º	Sílica Coloidal	0,02	720	3	10	

Fonte: (RAMIREZ, 2019)

A etapa de polimento metalográfico realizada primeiramente com pano White label - marca Allied Tech, utilizável na faixa de polimento de 1 μm , com suspensão monocristal de diamante (1 μm) - Marca Metadi II, e uma segunda etapa de polimento com pano Polishing Cloth Zeta – Marca ATM, com faixa de polimento de 0,25 μm e uma mistura de sílica (0,02 μm). Entre cada etapa de lixamento e polimento as amostras foram lavadas com detergente neutro e secas com álcool etílico e ar quente. Para preparação das amostras foram utilizadas a sequência de lixas abaixo (SILVA; ROHDE, 2010).

Após o lixamento e polimento, as amostras foram preparadas para realização do estudo metalográfico, através da solução de um ataque químico, composto por 25 mL de ácido acético, 15 mL de HNO_3 , 15 mL de HCl e 5 mL de água.

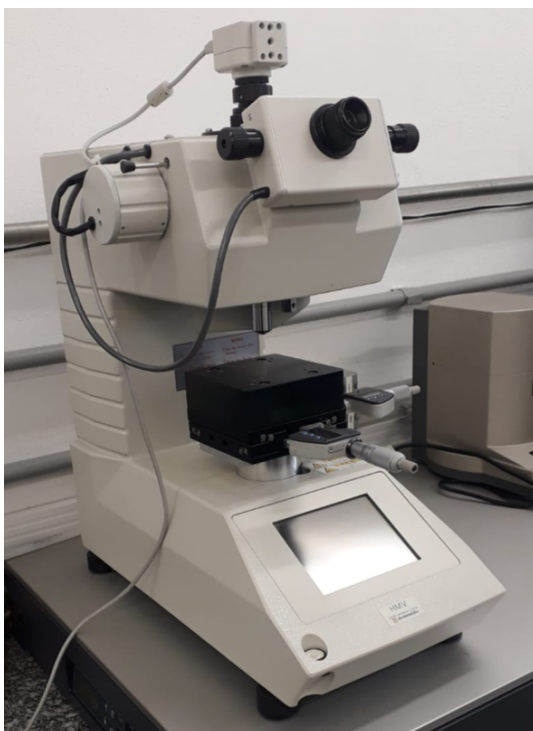
3.1.3 Metalografia

A metalografia foi realizada em um microscópio de varredura eletrônica (MEV) convencional (XL-30 da Phillips) disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. Com auxílio do equipamento foram reveladas as imagens dos materiais macroscópicos em 25x e 50x e microscópicos em 200x para a análise da morfologia da superfície do material (SILVA; ROHDE, 2010).

3.1.4 Ensaios de dureza

O ensaio de dureza Vickers foi realizado nas amostras, utilizando o equipamento Micro Hardness Tester (realizado no laboratório de microscopia eletrônica e de força atômico, coordenado pelo Prof.Dr. André Paulo Tsehiptsechin). Durante a realização do teste, foi aplicada uma carga 0,5 kgf (quilograma-força) durante 15 segundos. Os corpos de prova foram submetidos a cinco medições com o cetro do corpo uniforme ao feixe na máquina.

Figura 8 – Micrômetro Hardness tester.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Dureza

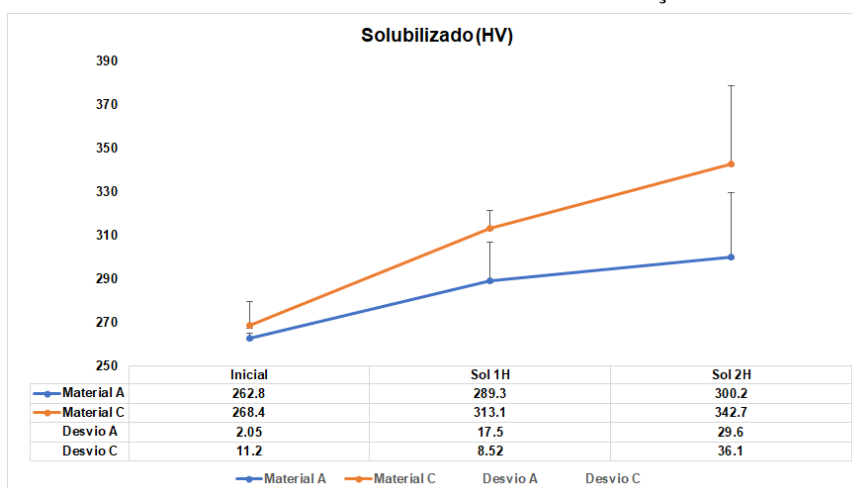
Os ensaios de dureza demonstraram um aumento de dureza dos compostos tratados termicamente em relação ao material base, conforme o gráfico 1. Observou-se que o aumento de tempo durante o tratamento térmico de solubilização promoveu um aumento da dureza do material.

Após os tratamentos térmicos realizados nos compostos solubilizados e posteriormente envelhecidos, os resultados dos ensaios de dureza Vickers apresentaram relações diferentes de dureza pós a etapa de envelhecimento, indicando reduções de tenacidade em suas composições, trazendo de princípio mais ductilidade ao material. Os gráficos 2 e 3 indicam um comportamento diferente dos compostos em relação ao gráfico 1, conforme o material base, em função dos tempos de solubilização e envelhecimentos aplicados.

4.1.1 Solubilização

No gráfico 1, o material base A indica um aumento de dureza de cerca de 10% após a solubilização de uma hora, e de cerca de 14% após a solubilização de duas horas. Ou seja, enquanto o material for permanecendo exposto ao tratamento térmico de solubilização, mais a dureza irá se elevar, devido às relações de temperatura e do tempo de exposição ao tratamento. A mesma coisa ocorre para o material C, com um aumento de dureza de cerca de 17% após uma hora de solubilização e de 28% após às duas horas de solubilização.

Gráfico 1 – Gráfico de análise de Solubilização.

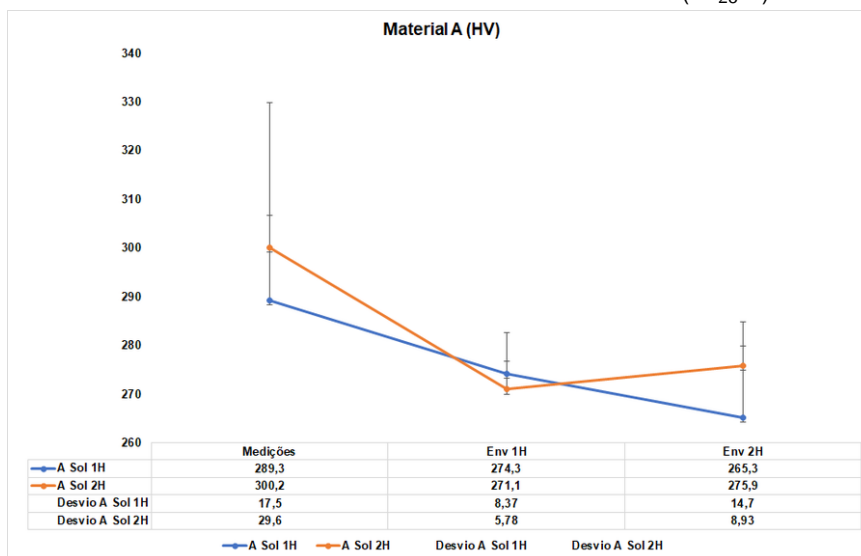


4.1.2 Envelhecimento

O gráfico 2, é apresentado as relações de dureza após os tratamentos de envelhecimento do material A, em função dos tempos de exposição ao forno, conforme indicados

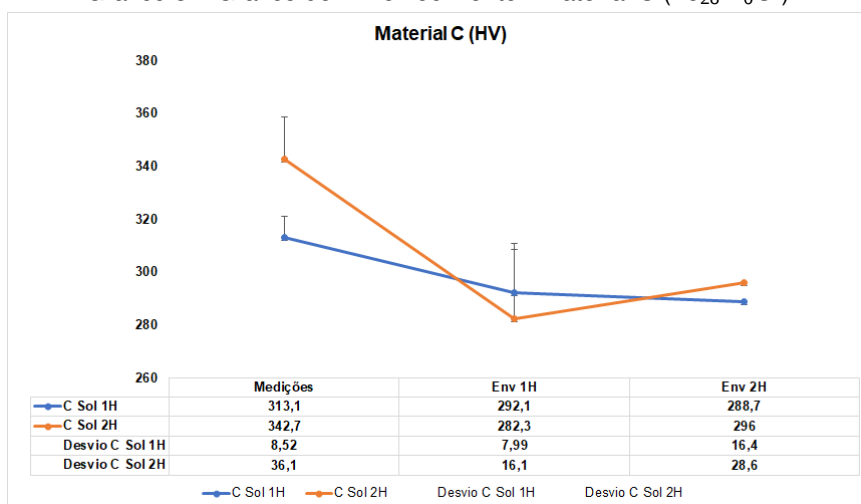
abaixo. A amostra A, inicialmente solubilizada, apresenta uma redução acentuada de cerca de 5% de dureza durante o período de uma hora e de 8% duas horas de envelhecimento.

Gráfico 2 – Gráfico de Envelhecimento - Material A (Fe_{28}Al).



Já para o gráfico 3, a amostra C apresenta um comportamento de dureza semelhante à amostra A, com uma queda acentuada de dureza de cerca de 10% durante uma hora de envelhecimento. Entretanto, pode-se observar um novo aumento de dureza no material, de cerca de 2% após às duas horas de envelhecimento, devido ao ataque excessivo do tratamento ao material solubilizado em função dos seus compostos.

Gráfico 3 – Gráfico de Envelhecimento - Material C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$).



4.2 Análise de Metalografia

A análise metalográfica auxilia no estudo da micro e macro estrutura superficial do material. Esta técnica permite observar e caracterizar os aspectos físicos do material em função do contorno de grão, alterações de precipitado e origem de trincas.

4.2.1 Amostra base A (Fe_{28}Al)

As figuras 11, 12 e 13 apresentam as imagens obtidas pela microscopia óptica da liga base A (Fe_{28}Al), submetidas as condições de pós-fundição da amostra, antes dos processos de tratamentos térmicos. A figura 11 apresenta o registro fotográfico a uma resolução de 25X, com a presença de trincas intragranulares, enquanto as figuras 12 e 13 apresentam tais condições as respectivas resoluções de 50X e 200X. Nesta amostra, é identificada grande presença de poros e precipitados na região de grãos, devido ao acúmulo de sujeira durante o processo de lixamento (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 9 – Amostra base A (Fe_{28}Al) - A) Resolução 25x.

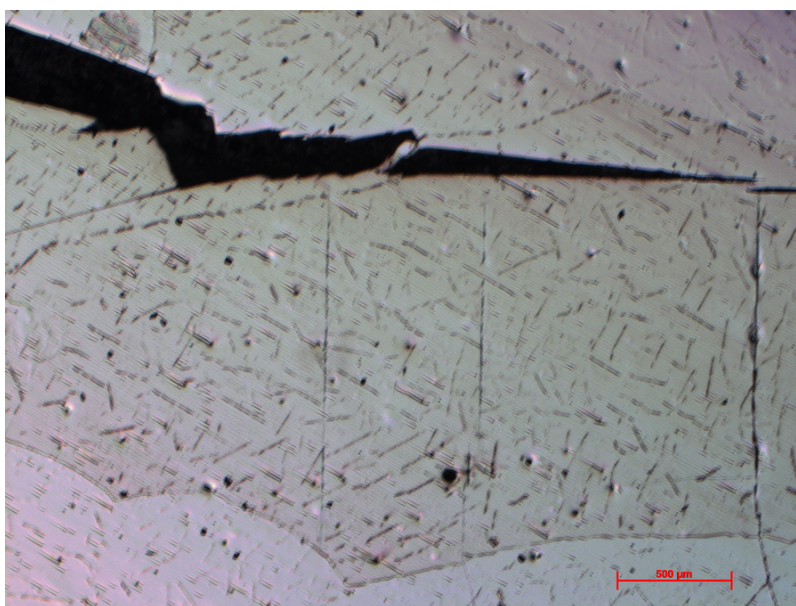


Figura 10 – Amostra base A (Fe_{28}Al) - B) Resolução 50x.

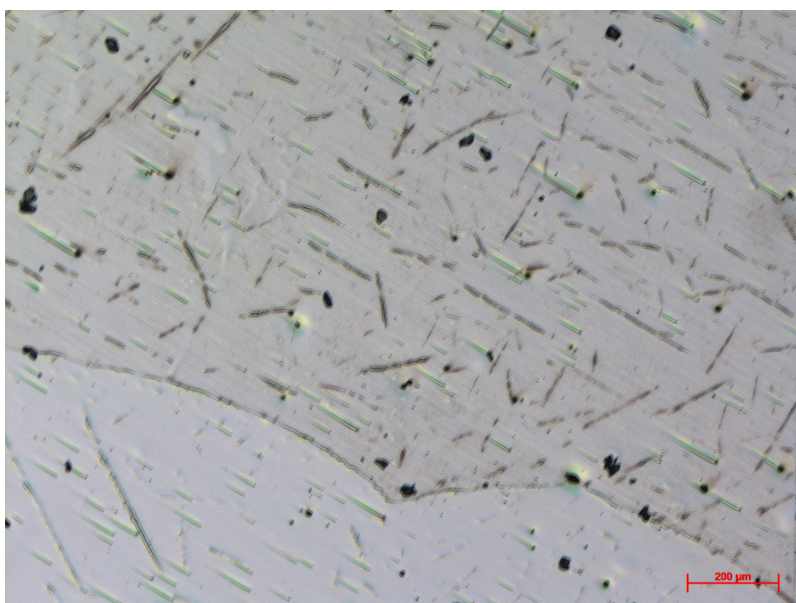
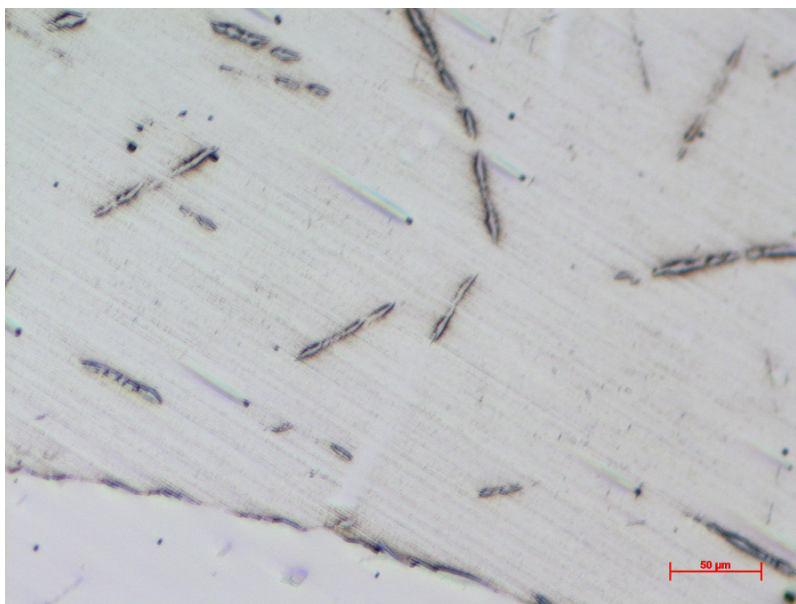


Figura 11 – Amostra base A (Fe_{28}Al) - C) Resolução 200x.

4.2.2 Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$)

A liga base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) apresenta o aumento da presença de precipitados e, poros em abundância na sua região de grãos. No entanto, o contorno de grão inicial é menor em relação à amostra A, onde reflete na diminuição do mesmo e também em um pequeno aumento em sua dureza. A mostra apresenta trincas transgranulares. (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

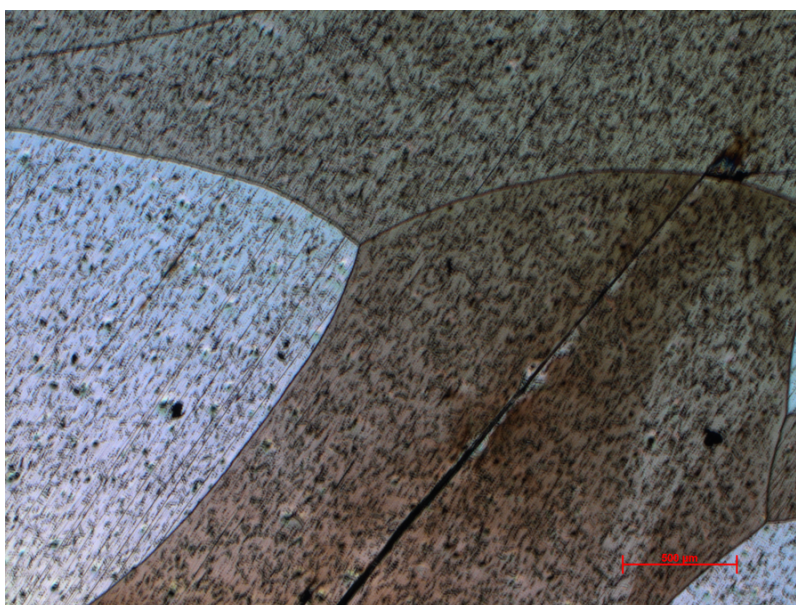
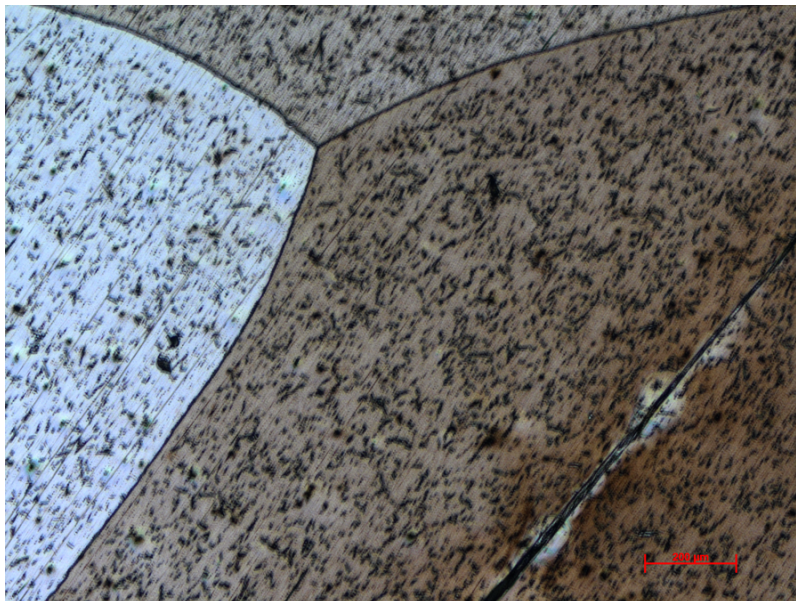
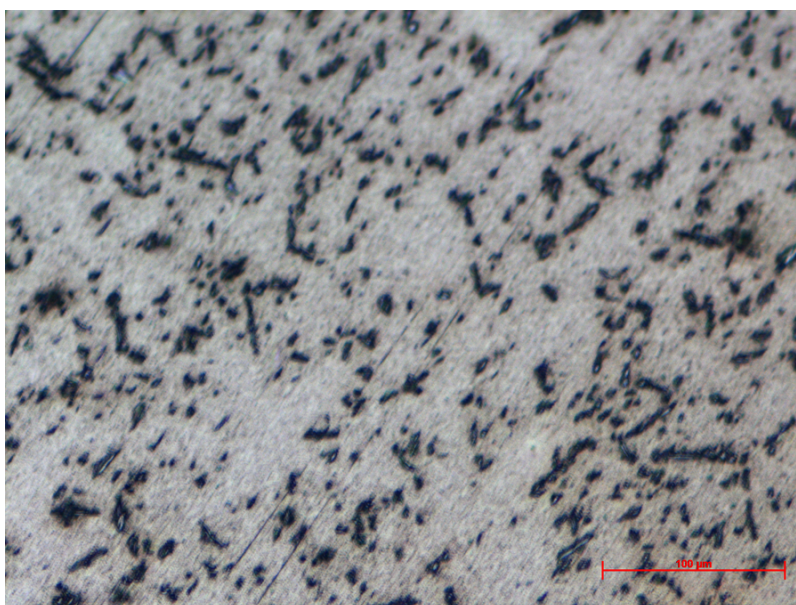
Figura 12 – Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) - A) Resolução 25X.

Figura 13 – Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) - B) Resolução 50X.**Figura 14 – Amostra base C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$) - C) Resolução 200X.**

4.2.3 Amostra A, solubilizada por uma hora (Fe_{28}Al S1A)

Após o processo de solubilização de uma hora, observa-se que a amostra apresenta trincas intergranulares, além disso, houve melhora quanto aos aspectos de polimento realizados para a metalografia e possui uma redução de precipitado. É possível verificar o aumento no contorno de grão conforme a figura 17 e também é possível observar quatro pontos de carbonetos, conforme indicados na figura 19 (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 15 – Amostra A (Fe_{28}Al S1A) - A) Resolução 25X.

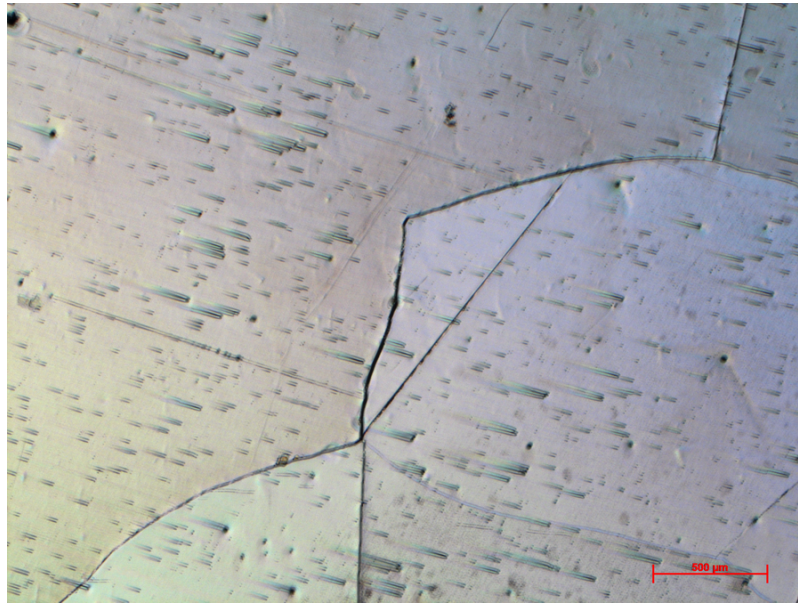


Figura 16 – Amostra A (Fe_{28}Al S1A) - B) Resolução 50X.

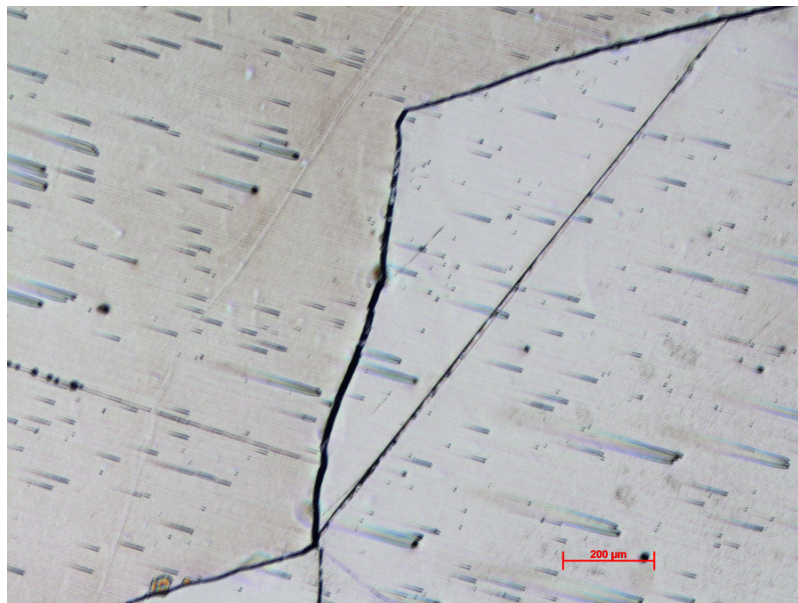
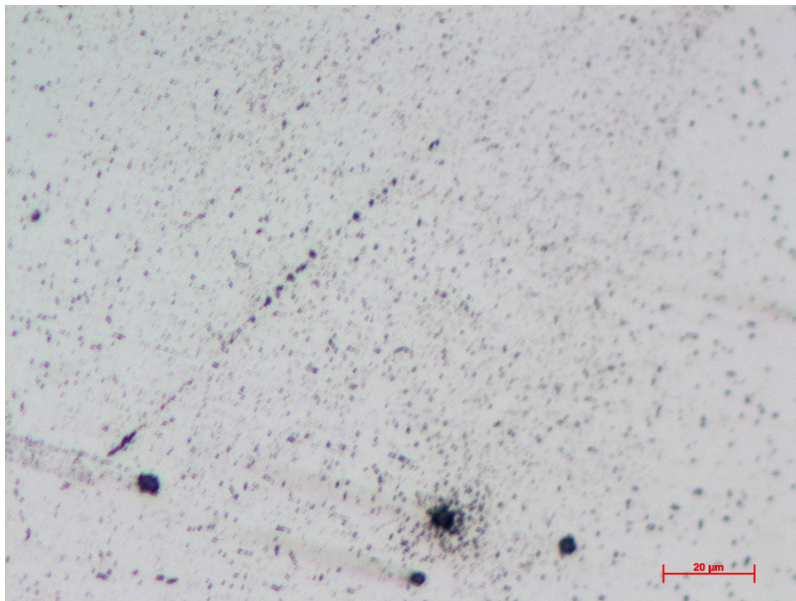


Figura 17 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1A}$) - C) Resolução 200X.

4.2.4 Amostra A, solubilizada por duas horas ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$)

O processo de tratamento térmico de solubilização, durante duas horas, a amostra apresenta trincas transgranulares devido à quantidade de alumínio utilizado em relação à sua temperatura com isto o material pode sofrer compressão ou dilatação. Diante destes dados, pode se perceber que o aumento do grão, porem a amostra apresentou redução no precipitado com aumento da porosidade (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

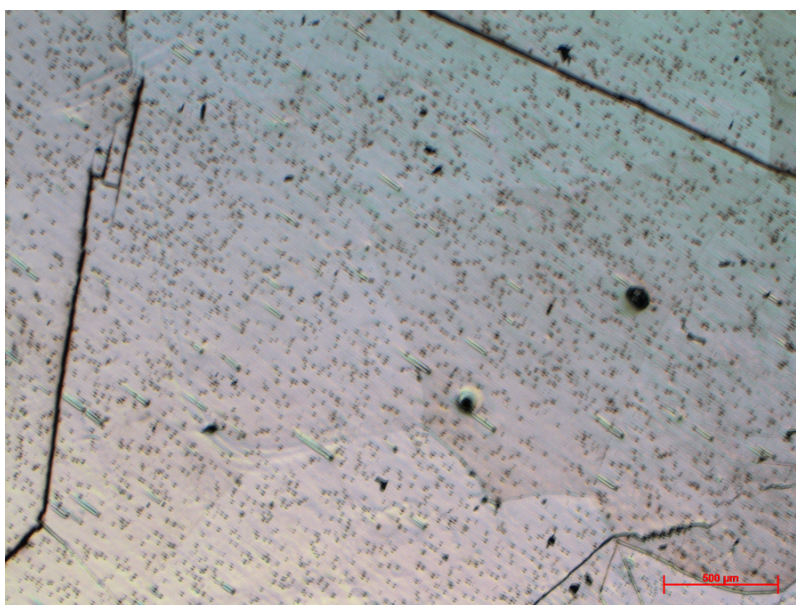
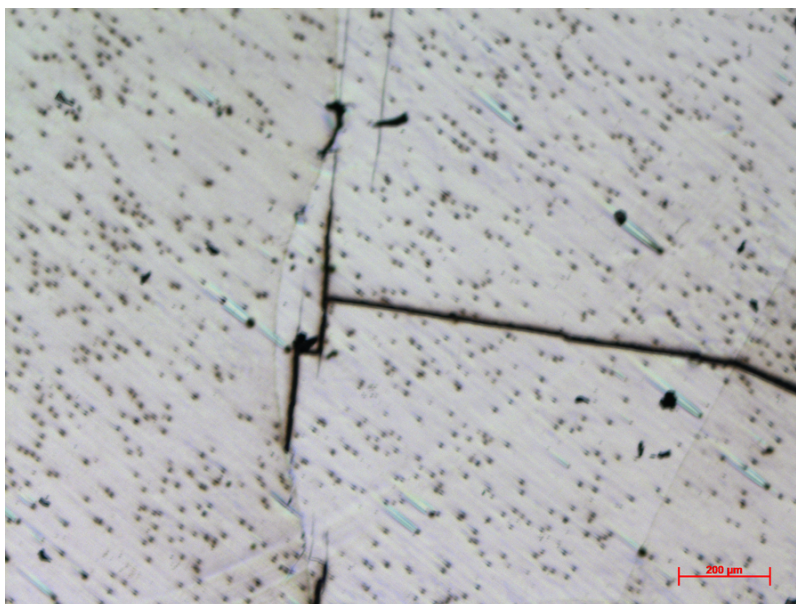
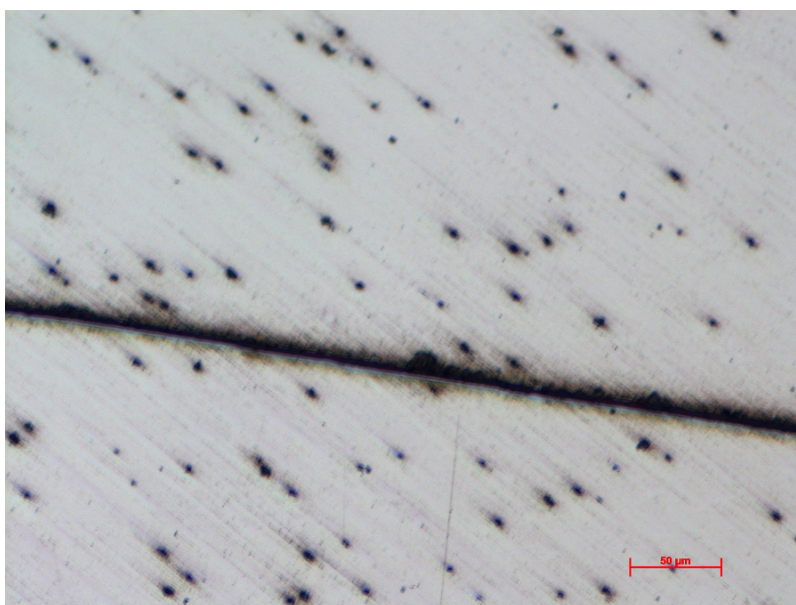
Figura 18 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$) - A) Resolução 25X.

Figura 19 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$) - B) Resolução 50X.**Figura 20 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al S1B}$) - C) Resolução 200X.**

4.2.5 Amostra C, solubilizada por uma hora ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$)

A amostra $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ foi submetida ao tratamento térmico de solubilização durante uma hora, observou-se o aumento grão com trincas intragranulares. O material apresentou redução do precipitado. Como observado no gráfico a amostra aumentou sua dureza (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 21 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$) - A) Resolução 25X.

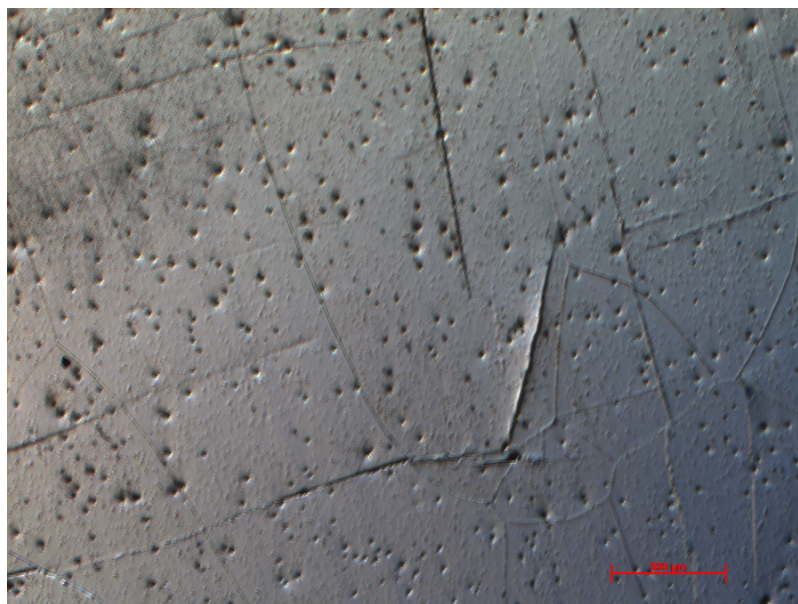


Figura 22 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$) - B) Resolução 50X.

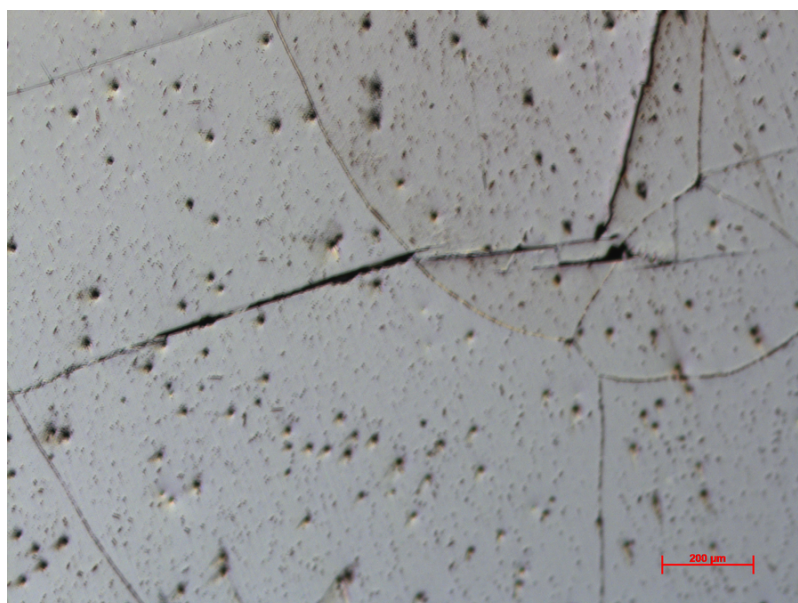
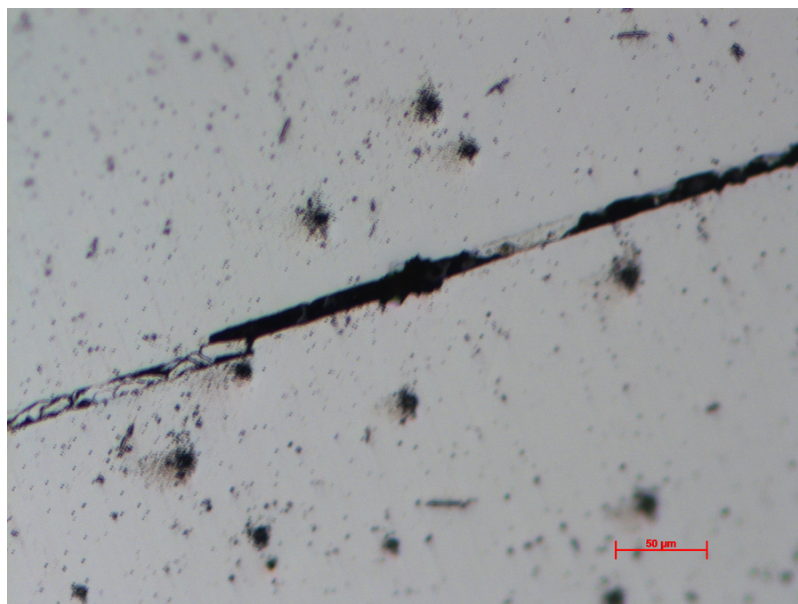


Figura 23 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1C}$) - C) Resolução 200X.

4.2.6 Amostra C, solubilizada por duas horas ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$)

A amostra $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ com adição de cromo solubilizado por duas horas podemos observar trincas intragranulares de fadiga com marcas de deslizamentos provenientes de tensões geradas durante o processo de tratamentos térmico no processo, houve alongamento do precipitado e redução da quantidade do precipitado (BROEK, 1982; MARAZANI; MADYIRA; AKINLABI, 2016; SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

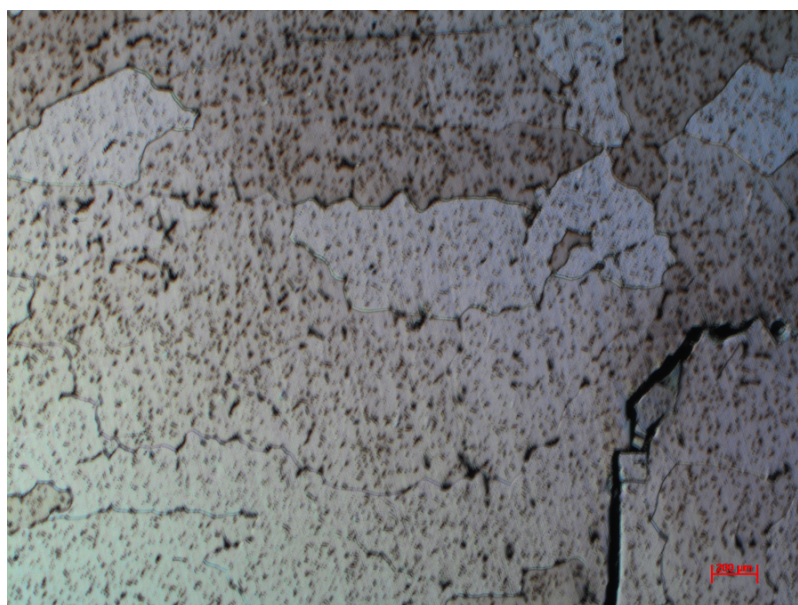
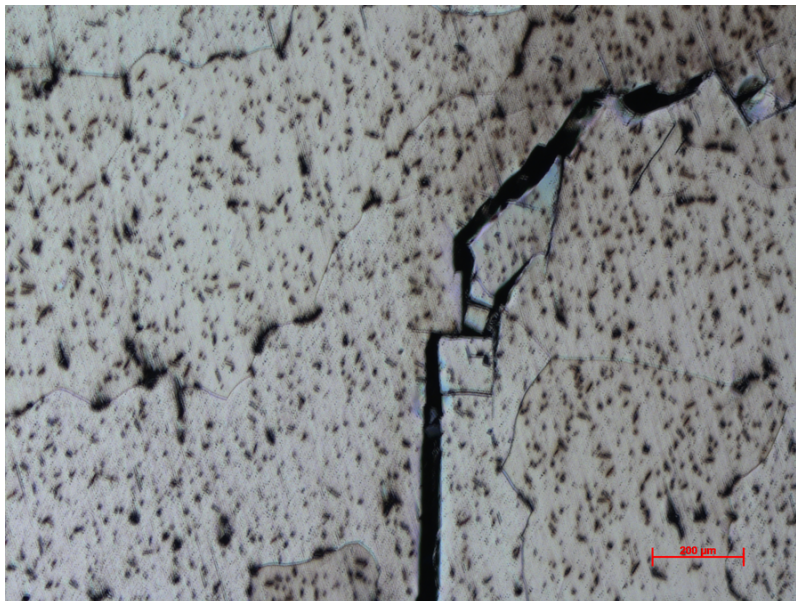
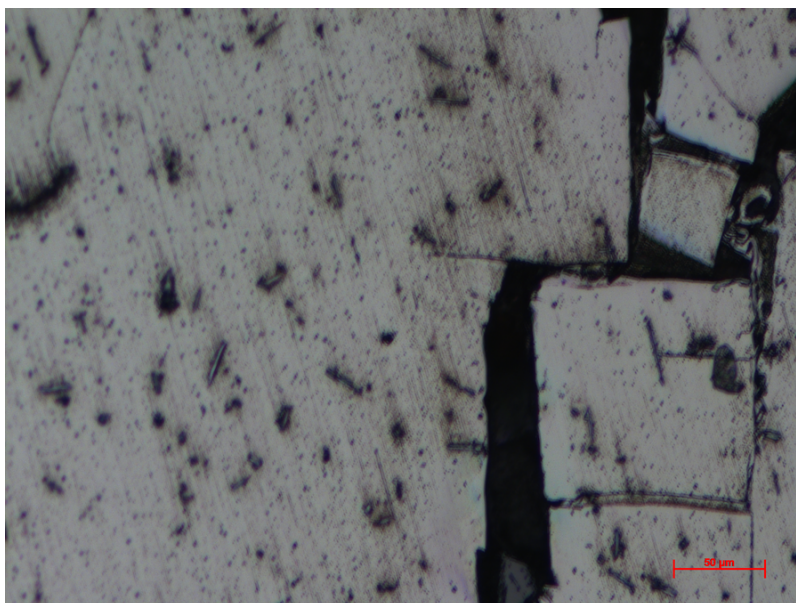
Figura 24 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$) - A) Resolução 25X.

Figura 25 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$) - B) Resolução 50X.**Figura 26 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr S1D}$) - C) Resolução 200X.**

4.2.7 Amostra A, envelhecida e solubilizada por uma hora ($\text{Fe}_{28}\text{Al E1A}$)

O material $\text{Fe}_{28}\text{Al E1A}$ submetido ao tratamento térmico de envelhecido por uma hora, pode-se observar o contorno de grão definido, aumento do tamanho precipitado. Este material não apresentou trincas em sua superfície. O material apresentou redução de dureza em relação à amostra solubilizada (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 27 – Amostra A (Fe_{28}Al E1A) - A) Resolução 25X.

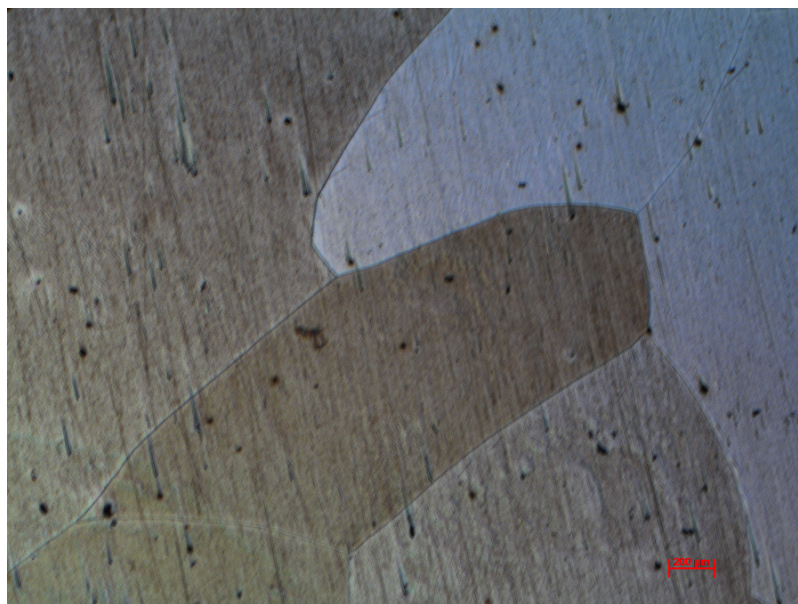


Figura 28 – Amostra A (Fe_{28}Al E1A) - B) Resolução 50X.

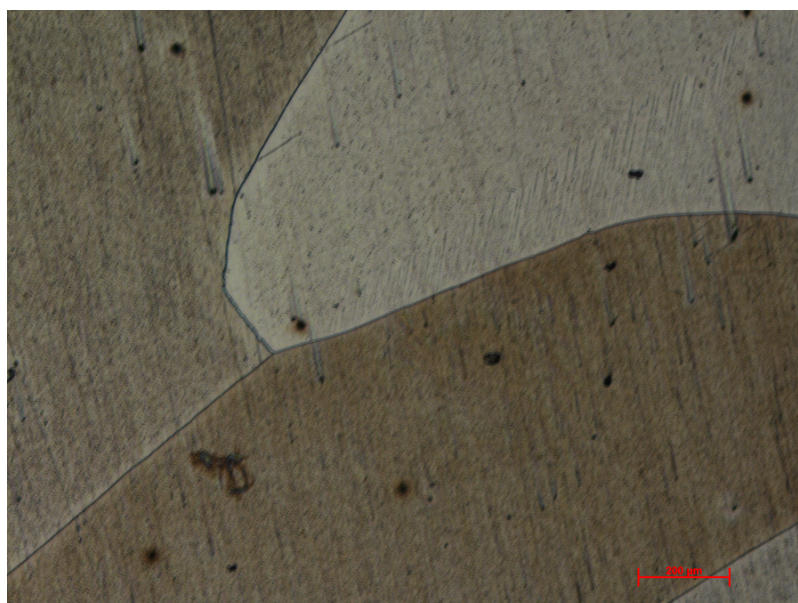
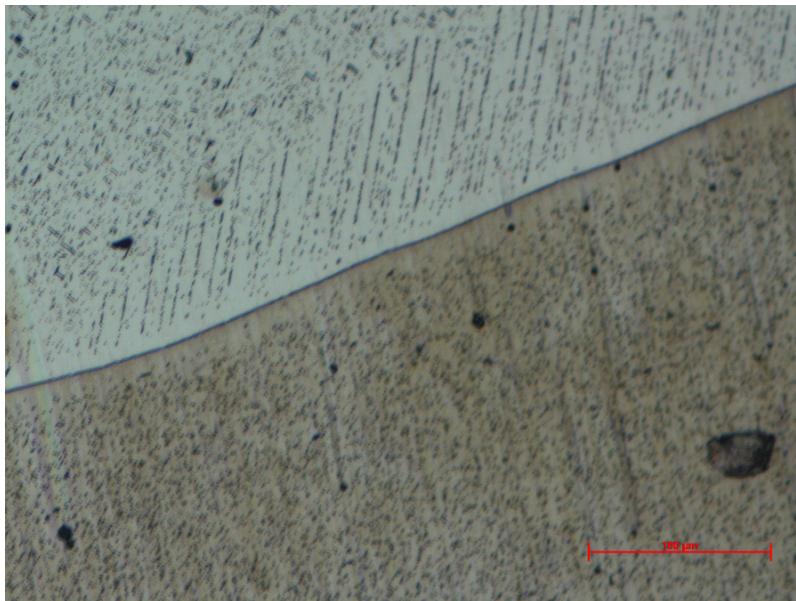
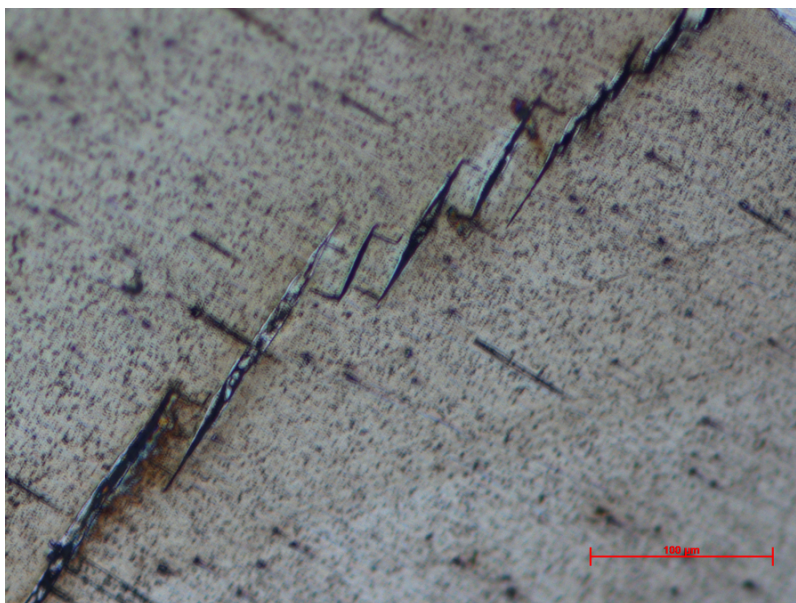


Figura 29 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E1A}$) - C) Resolução 200X.

4.2.8 Amostra A, solubilizada por uma hora e envelhecida por duas horas ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2A}$)

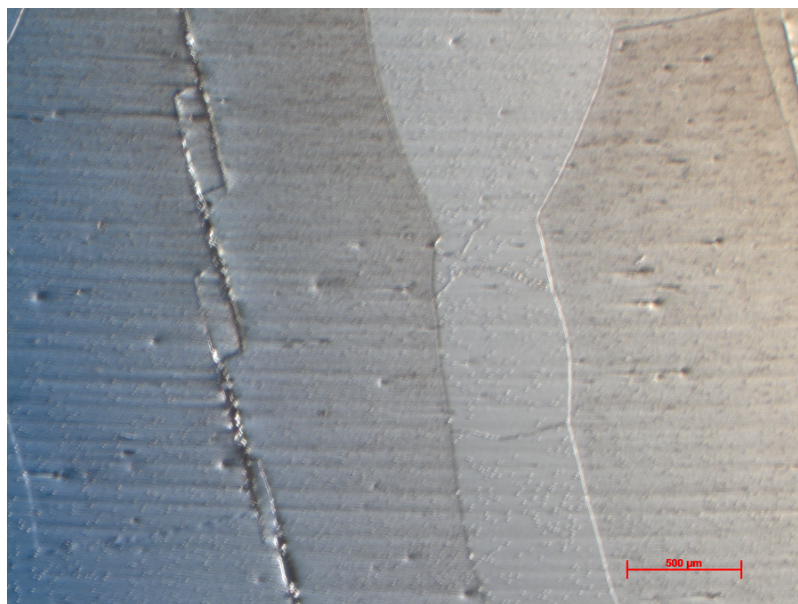
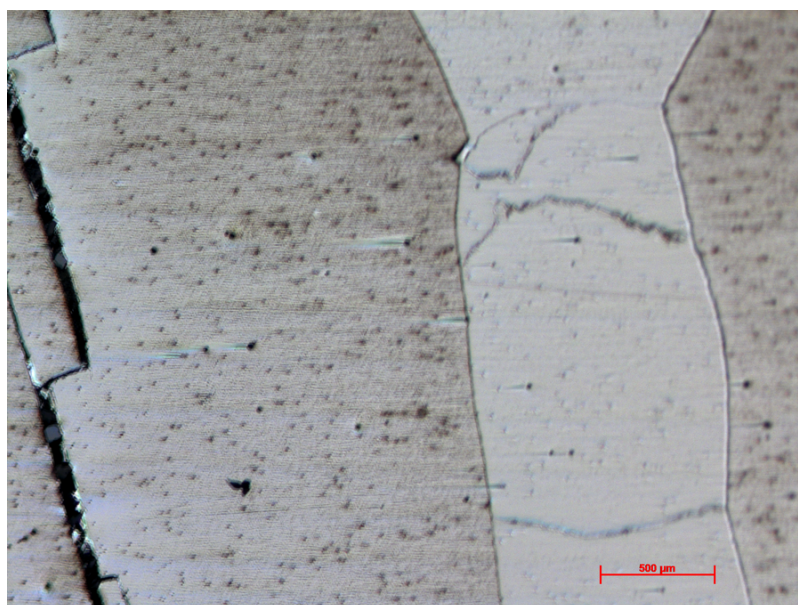
O material $\text{Fe}_{28}\text{Al E2A}$ submetido ao tratamento térmico de envelhecimento durante duas horas, observa-se trincas transgranulares. O grão se mostra maior, com menos pontos evidentes de precipitado. A amostra apresentou menor dureza se comparado ao material envelhecido durante uma hora conforme o gráfico de dureza (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 30 – Amostra A ($\text{Fe}_{28}\text{Al E2A}$) - A) Resolução 25X.

Figura 31 – Amostra A (Fe_{28}Al E2A) - B) Resolução 50X.**Figura 32 – Amostra A (Fe_{28}Al E2A) - C) Resolução 200X.**

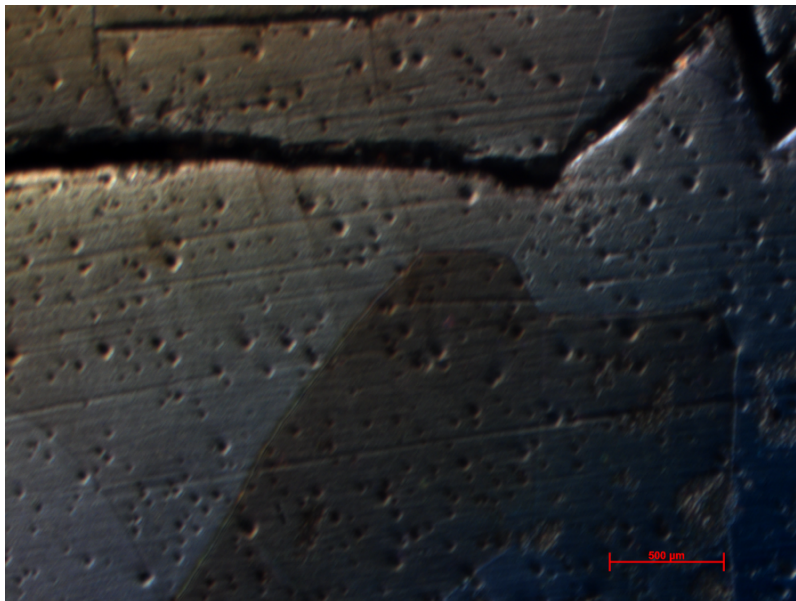
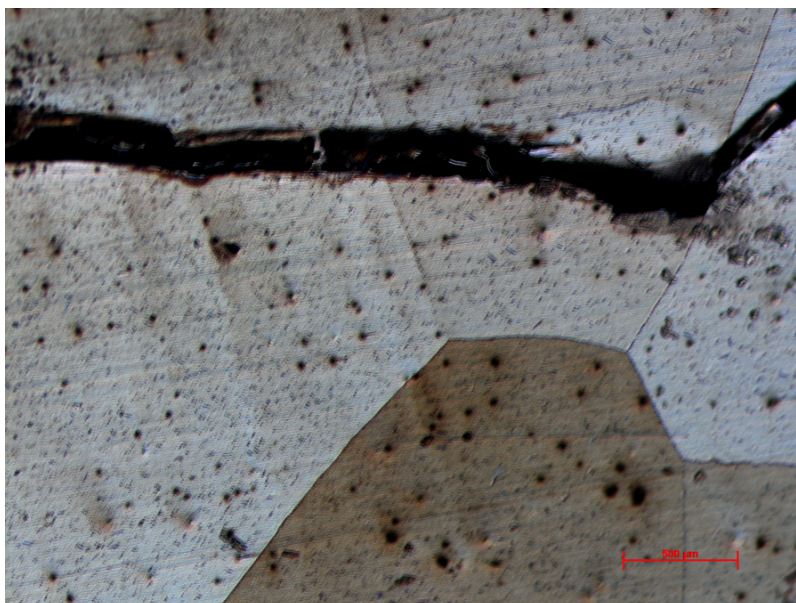
4.2.9 Amostra A, solubilizada e envelhecida por duas horas (Fe_{28}Al E2B)

O material Fe_{28}Al E2B submetido ao tratamento de térmico de envelhecido por duas horas, pode-se observar que a imagem da amostra apresenta trincas transgranulares provenientes de tensões geradas no processo do tratamento térmico, além de diminuição do precipitado (BROEK, 1982; MARAZANI; MADYIRA; AKINLABI, 2016; SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 33 – Amostra A (Fe_{28}Al E2B) - A) Resolução 25X.**Figura 34 – Amostra A (Fe_{28}Al E2B) - B) Resolução 50X.**

4.2.10 Amostra C, solubilizada e envelhecida por uma hora ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E1C)

O material $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr}$ E1C submetido ao tratamento térmico de envelhecimento durante uma hora no material, pode-se observar uma trinca definida e espessa transgranular ao contorno do grão (BROEK, 1982; MARAZANI; MADYIRA; AKINLABI, 2016; SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 35 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1C}$) - A) Resolução 25X.**Figura 36 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1C}$) - B) Resolução 50X.**

4.2.11 Amostra C, solubilizada por uma hora e envelhecida por duas horas ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2C}$)

A amostra $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2C}$ envelhecida durante duas horas, pode-se observar um contorno de grão maior, com trinca intergranular, além disso, a peça apresentou maior quantidade de precipitado. Amostra apresenta uma coloração em decorrência escura ataque químico (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 37 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2C}$) - Resolução 50X.

4.2.12 Amostra C, solubilizada por duas horas e envelhecida por uma hora ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1D}$)

Observa-se que a amostra $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1D}$ possui o contorno de grão maior e definido, estas características são evidenciadas da figura abaixo. A amostra apresentou trincas transgranulares, o grão apresentou um ponto fundo evidenciando na figura 42, além disso, a amostra apresentou pontos grandes e alongados de precipitado. A amostra apresenta marcas do ataque químico (BROEK, 1982; MARAZANI; MADYIRA; AKINLABI, 2016; SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

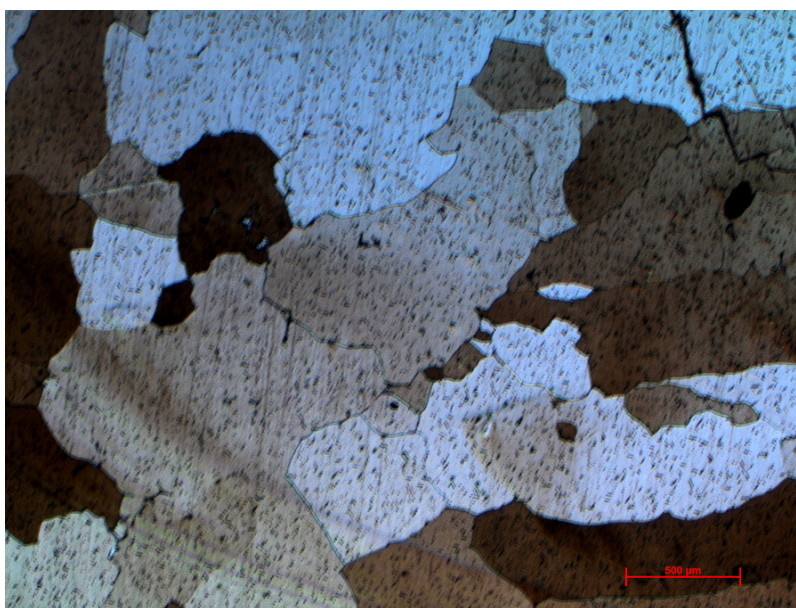
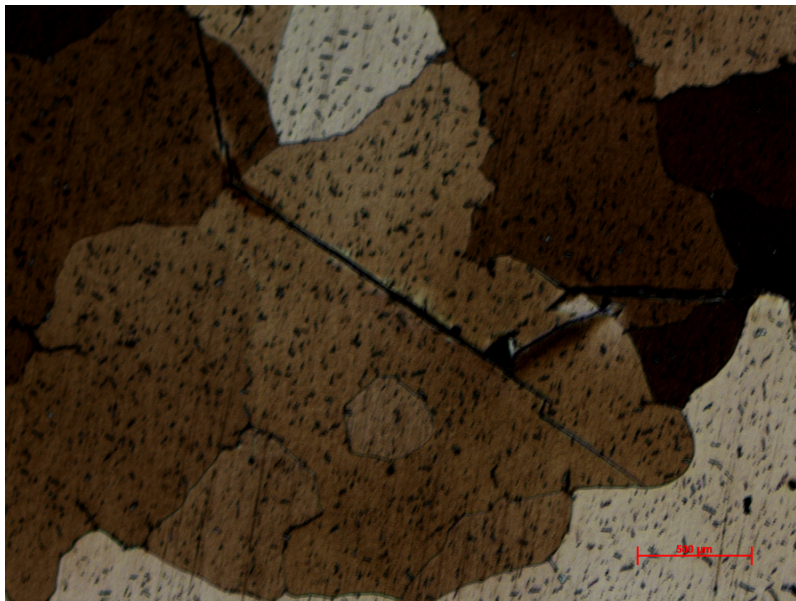
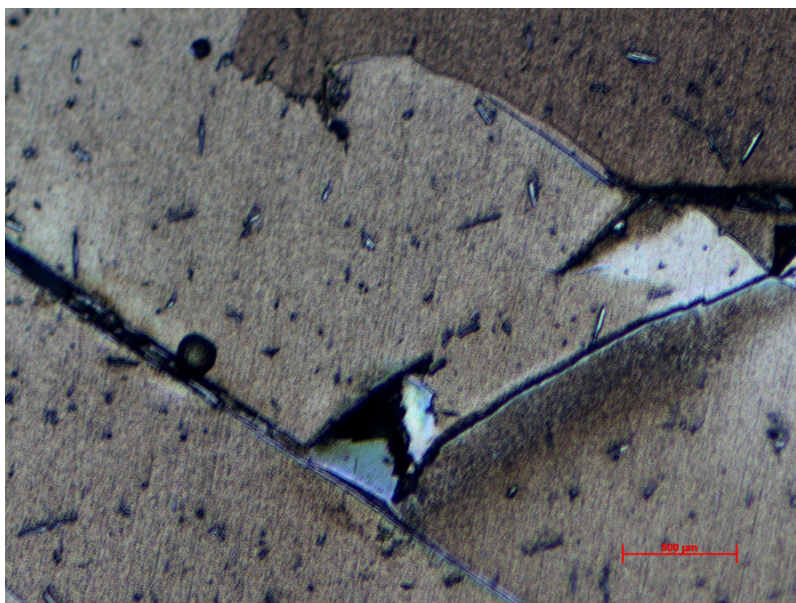
Figura 38 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1D}$) - A) Resolução 25X.

Figura 39 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1D}$) - B) Resolução 50X.**Figura 40 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E1D}$) - C) Resolução 200X.**

4.2.13 Amostra C, solubilizada e envelhecida por duas horas ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2D}$)

Observa-se que a amostra $\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2D}$ apresenta trincas transgranulares. Os precipitados apresentaram formas alongadas e marcas do ataque químico (SCHNEIBEL; JENKINS; MAZIASZ, 1992).

Figura 41 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2D}$) - A) Resolução 25X.

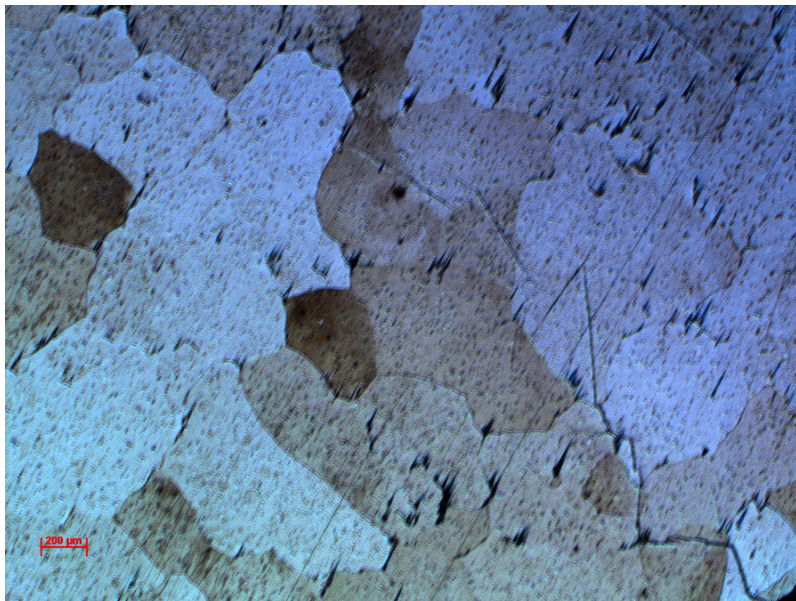
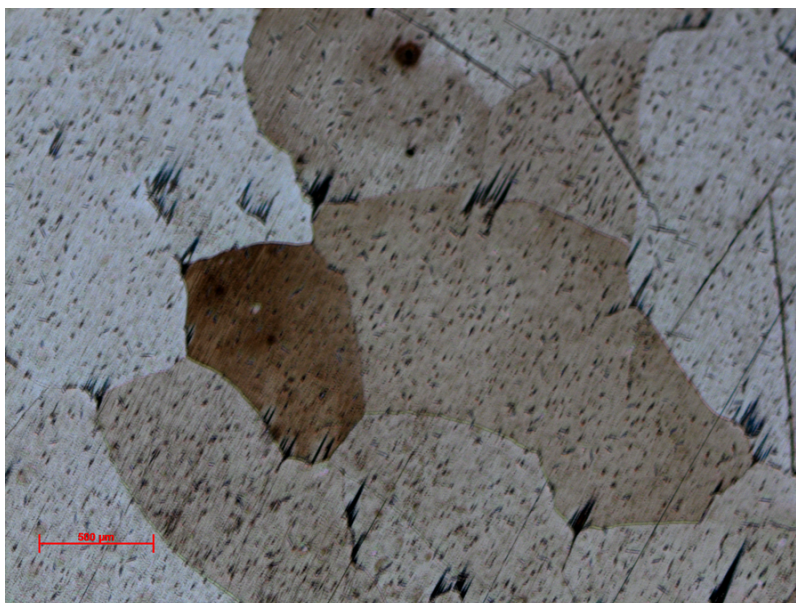


Figura 42 – Amostra C ($\text{Fe}_{28}\text{Al}_6\text{Cr E2D}$) - B) Resolução 50X.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho estabeleceu-se no levantamento de informações sobre os tratamentos térmicos de aluminetos de ferro, de modo a buscar e compreender seus comportamentos antes e após estes tratamentos, visando melhorias e avanços para a comunidade científica. Após analisar os resultados da dureza e de metalografia nestes compostos, observou-se a diminuição do contorno de grão durante os tratamentos térmicos, associado ao aumento da dureza evidenciados nos testes.

O tratamento de solubilização no geral desempenhou um resultado contrário ao objetivo esperado, causando o endurecimento das amostras, indicadas anteriormente no gráfico 1. Conclui-se que o processo de têmpera a óleo realizada não se mostrou tão eficaz, gerando essas alterações nas amostras. É possível que tenha existido contrações do material durante a fase de resfriamento, originando tensões e trincas de modo geral. Além disso, o fator do endurecimento das amostras pode estar relacionadas também com a alteração dos precipitados e na formação de carbonetos, causando o processo de difusão dos mesmos devido à temperatura e tempo de solubilização.

É perceptível uma relação entre o tempo de exposição do forno com as trincas do material de maneira escalar, nos quais os materiais mais expostos ao tratamento térmico possuem mais trincas. O tratamento com menor propagação de trincas é o material exposto de maneira moderada a temperatura, onde o material solubilizado e envelhecido por uma hora teve uma melhor estrutura e redução dos precipitados. Ocorreram problemas em algumas das amostras no processo de preparação da metalografia, devido à alta quantidade de trincas, dificultando no processo de polimento, sendo assim, não sendo possível apresentar resultados satisfatórios e comparativos.

Este trabalho buscou compreender os comportamentos dos aluminetos de ferro a diferentes temperaturas e modos de tratamentos térmicos, a fim de trazer boas possibilidades de utilização em diversas aplicações, principalmente pelas relações de menor custo relativo e baixa densidade. Apesar de seu potencial para a indústria, possuem ainda alguns empecilhos a serem estudados, com a necessidade de obter melhorias em seus compostos. Como possibilidades de melhorias futuras, é necessário analisar os comportamentos destas amostras pós-tratamentos térmicos através do resfriamento em temperatura ambiente, pois isso poderá acarretar melhorias no que diz a um grão maior e talvez uma diminuição das tensões de contração, melhorando possivelmente os aspectos de trincas. Analisar também as relações de corte são outras possibilidades, se tratando do tempo de exposição pelos abrasivos de corte, podendo ocasionar em uma intensidade de calor na peça, ou seja, possibilidades a serem sugeridas para pesquisas futuras, a fim de investigar tais métodos para otimizar tais processos.

REFERÊNCIAS

- ADEVA, P. Materiales Intermetálicos para Aplicaciones Estructurales a Autas Temperaturas. **REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE CIENTÍFICOS**, Spanish National Research Council, Madrid - España, v. 1, p. 573 – 579, Janeiro 1999.
- BAZZI, G. D.; OLIVEIRA, A. S. C. M. d'; MECÂNICA, U. F. do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em E. **Estudo de revestimentos a base de ligas Fe-AL**. 2012. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br:8080/dspace/handle/1884/26967>.
- BORGES, D. F. L. **Processamento e caracterização de Aluminetos de Ferro obtidos a partir de matéria-prima reciclada**. 2010. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- BROEK, D. Mechanisms Offracture and Crack Growth. In: HAGUE, T. (org.). **Elementary Engineering Fracture Mechanics**. 1. ed. [S.l.]: Martinus Nijhoff Publishers, 1982. v. 1, cap. 2, p. 24 – 66.
- CALIXTO, A. **DESENVOLVIMENTO “IN SITU” DE INTERMETÁLICOS Fe-AI EM SUPERFÍCIES DE AÇO CARBONO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA DE PÓS DE FERRO E ALUMÍNIO MISTURADOS**: Curitiba: , 2010. 2010. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.
- COLPAERT; HUBERTUS. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. ., Edgarg Blücher Ltda, São Paulo, v. 3ª Edição, n. ., p. 1 – 298, 05 1974.
- COLPAERT, H.; SILVA, A. L. V. da Costa e. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Villares Metals, 2008a. v. 1. 680 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=skGxDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=metalografia&ots=sF0Khjyoic&sig=-VRYVFGxMpwcQY40kXBJuwMsnL8#v=onepage&q&f=false>.
- COLPAERT, P. H.; SILVA, A. L. V. da Costa e. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. ., Blucher, v. 4º edição, n. 1, p. 1 – 639, 05 2008b.
- FULCO, R. R.; BISPO, H. S.; SANCHEZ, H. H. Trabalho de Química: Ligas Metálicas. 2015. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/1676/1676.PDF>. Acesso em: 20/10/2022.
- GULHÁEU, A. **Metais e suas Ligas**: Tomo 1. 1. ed. Moscou: EDITORIAL MIR MOSCU, 1977. v. 1. 391 p.
- LIMA, N. A. G. Tratamento térmico de envelhecimento da liga de fundição. 2012.
- MAGALHAES, A. G. de. **Ligas não Ferrosas de Engenharia**: Principais aplicações, tratamentos e propriedades mecânicas. 1. ed. Porto: Quântica Editora – Conteúdos Especializados, LTDA., 2021. v. 1. 102 p. Disponível em: <https://www.booki.pt/userfiles/files/loja/preview/9789899017559.pdf>. Acesso em: 24/11/2022.
- MAGALHÃES, L. **Ligas Metálicas**. 2022. Site. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/ligas-metalicas/>. Acesso em: 24/09/2022.

- MARAZANI, T.; MADYIRA, D. M.; AKINLABI, E. T. Repair of cracks in metals: A review. In: **14th Global Conference on Sustainable Manufacturing**. South Africa: ScienceDirect, 2016. p. 673 – 679.
- PALM, M. Concepts derived from phase diagram studies for the strengthening of Fe–Al-based alloys. In: PALM, M. (Ed.). **Intermetallics**. 1. ed. Elsevier, 2004. v. 1, cap. 7, p. 1286 – 1295. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966979505000737>.
- PÖTTGEN, R.; JOHRENDT, D. **Intermetallics**: Synthesis, Structure, Function. 1. ed. Berlin, Alemanha: De Gruyter, 2014. v. 1. 294 p.
- RAMIREZ, B. N. **ESTUDO DA FUNDIÇÃO EM ALUMINETOS DE FERRO**. 2019. 266 p. Tese (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS) — ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
- RODRIGUES, G. L. **EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO**. 2015. 39 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) — UniRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde.
- SAMUELS, L. E. **Light Microscopy of Carbon Steels**. 1. ed. [S.l.]: ASM International, 1999. v. 1. 500 p.
- S.C.DEEVI; V.K.SIKKA. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. **Intermetallics Volume 4, Issue 5, 1996, Pages 357-375**, volume 4, n. issue 5, p. 357 – 375, may 1996.
- SCHNEIBEL, J. H.; JENKINS, M. G.; MAZIASZ, P. J. CRACK PROPAGATION IN NiAl AND FeAl. **MRS Online Proceedings Library (OPL) - Symposium L: High Temperature Ordered Intermetallic Alloys V**, Materials Research Society 1995, England, v. 288, n. 549, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/PROC-288-549>.
- SILVA, D. da M. *et al.* ESTUDO DO EFEITO DOS TRATAMENTOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL NA LIGA DE ALUMÍNIO. 2022.
- SILVA, E.; ROHDE, R. A. Metalografia Preparação de Amostras Uma Abordagem Prática Versão 3.0. p. 1 – 32, outubro 2010.
- SILVA, J. A. Tratamentos Térmicos Dos Aços: Uma Abordagem Ao Mundo Dos Tratamentos. 2020.
- UFPR. **Ligas Metálicas não ferrosas**. 2017. Universidade Federal do Paraná - UFPR. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Arquivos%20FTP%202020/Aula%20Fund%20A7%20Alum%20Adn%20Cobre,%20Inox/Ligas%20Met%20A1licas%20N%20A3o%20Ferrosas.pdf>. Acesso em: 21/11/2022.
- ZEEMANN, A. **Aços Baixa Liga e Alta Liga**. 2016. LinkedIn. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/a%C3%A7os-baixa-liga-e-alta-annelise-zeemann/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 02/09/2022.
- ZWILSKY, K. M.; LANGER, E. L. **ASM Metals HANDBOOK**: Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10. ed. Washington, USA: ASM International, 1992. v. 2. 3470 p.