

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOÃO PAULO PERPÉTUO LIMA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE ALUMÍNIO
ASTM/ABNT 1200 EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO
MECÂNICA

BELO HORIZONTE

2016

JOÃO PAULO PERPÉTUO LIMA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE ALUMÍNIO
ASTM/ABNT 1200 EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO
MECÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2016

JOÃO PAULO PERPÉTUO LIMA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE ALUMÍNIO
ASTM/ABNT 1200 EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO
MECÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes – Orientador

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Dr. Leonardo Neves

Profa. Msc. Aline Silva Magalhães

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a oportunidade de vir a este mundo e contribuir de alguma forma para as pessoas.

A minha família e aos meus amigos pelo apoio de sempre.

Ao meu orientador Wellington Lopes pela paciência e dedicação, sempre disposto a ajudar na execução deste trabalho, sendo um verdadeiro Mestre.

Aos meus colegas do CEFET que vivenciaram esses quase 7 anos sempre ao meu lado, e aos profissionais do Departamento de Engenharia de Materiais e a todas as demais pessoas que de uma forma ou de outra possibilitaram que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

Este trabalho teve por finalidade avaliar o comportamento mecânico da liga de alumínio 1200, alumínio puro, variando as solicitações mecânicas aplicadas e comparando os resultados com alguns padrões fornecidos pela fábrica. Foram realizados ensaios de dureza, análise química e microestrutural e ensaio de cisalhamento, sendo este último feito de quatro maneiras: a 1ª com taxa de 0,005/s, a 2ª taxa de 0,08/s, a 3ª com variação na taxa de 0,005/s para 0,08/s com e a última com variação de 0,08/s para 0,005/s. Estes ensaios permitiram estudar o comportamento da liga de alumínio e avaliar o amaciamento e encruamento sofrido em cada caso pelo alumínio de forma quantitativa. O estudo forneceu uma visão geral sobre a liga, sendo esta uma liga muito utilizada no dia-a-dia das pessoas, sendo utilizada, por exemplo, na fabricação de utensílios domésticos e embalagens de alimentos.

Palavras-chave: Alumínio. Solicitação Mecânica. Cisalhamento. Ensaios Mecânicos. Ligas.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the mechanical behavior of aluminum alloy 1200, pure aluminum, varying the applied mechanical stress and comparing the results with some standards provided by the factory. Hardness tests were conducted, chemical and microstructural analysis and shear tests, the latter being made in four ways: 1st to 0.005 / s rate, the 2nd rate of 0.08/s, with the 3rd variation in the rate of 0.005/s to 0.08/s, and the last with a variation of 0.08/s to 0,005/s. These tests allowed to study the aluminum alloy behavior and evaluate the softening and hardening suffered in each case by aluminum quantitatively. The study provided an overview of the alloy, which is an alloy widely used in day-to-day life, being used, for example, in the manufacture of household goods and food packaging.

Keywords: Aluminum. Mechanical request. Shearing. Mechanical tests. Alloys.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Fluxograma do processo de produção da alumina calcinada.	15
FIGURA 2 – Processamento do alumínio via eletrólise.	15
FIGURA 3 - Perda da resistência mecânica e profundidade da corrosão por pitting em função do ambiente e dos anos para o alumínio.	18
FIGURA 4 - Embalagem de alimento produzida com liga de alumínio puro e estrutura fabricada com liga de alumínio-cobre.	20
FIGURA 5 - Estrutura automotiva produzida com liga alumínio-magnésio e perfis de alumínio-magnésio-silício utilizados na construção civil.	21
FIGURA 6 - Propriedades Mecânicas em Função do Tipo de Liga de Alumínio	21
FIGURA 7 - Anodização x Soldabilidade das ligas.	22
FIGURA 8 - Resistência a Corrosão x Resistência a Fadiga.	22
FIGURA 9 - Módulo de Elasticidade x Densidade.	22
FIGURA 10 - Esforço cisalhante.	24
FIGURA 11 - Deformação de cisalhamento.	24
FIGURA 12 - Dispositivo para ensaio em pinos e rebites.	25
FIGURA 13 - Dispositivo para ensaio em chapas.	26
FIGURA 14 - Dispositivo para ensaio em barras.	26
FIGURA 15 - Forças de tração e compressão no ensaio de cisalhamento.	27
FIGURA 16 - Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento.	27
FIGURA 17 - Efeitos causados pela variação da trajetória de deformação.	28
FIGURA 18 - Efeito Bauschinger.	30
FIGURA 19 - Teste de cisalhamento monotônico e reverso	31
FIGURA 20 - Guilhotina utilizada para cortar os corpos de prova.	33
FIGURA 21 - Microdurômetro 2T Shimadzu.	33
FIGURA 22 - Equipamento utilizado para análise química.	34
FIGURA 23 - Equipamento utilizado para análise microestrutural.	35
FIGURA 24 - Máquina e garra de cisalhamento.	37
FIGURA 25 - Microestrutura da liga ASTM 1200.	40
FIGURA 26 - Microestrutura da liga ASTM 1200.	40
FIGURA 27 - Amostras recebida, taxa 0,005/s e taxa 0,08/s.	44
FIGURA 28 - Amostra recebida, taxa 0,005/s - 0,08/s e taxa 0,08/s - 0,005/s.	45
FIGURA 29 - Amostra recebida, taxa 0,005/s - 0,08/s e taxa 0,08/s - 0,005/s.	45

LISTADE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Cisalhamento monotônico com taxa 0,005/s e 0,08/s.	41
GRÁFICO 2 - Cisalhamento monotônico com taxa variando.	42
GRÁFICO 3 - Cisalhamento monotônico com taxa variando.	43
GRÁFICO 4 - Variação do coeficiente m com a taxa de deformação	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Ligas de alumínio comerciais	16
TABELA 2 - Comparação das características do alumínio e ferro.	17
TABELA 3 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1200.	32
TABELA 4 - Amostras e condições do ensaio de cisalhamento.	36
TABELA 5 - Composição química da liga ASTM/ABNT 1200 - CBA.	38
TABELA 6 - Limite de resistência ao cisalhamento.	41
TABELA 7 - Coeficiente de sensibilidade m.	42
TABELA 8 - Limite de resistência ao cisalhamento.	43
TABELA 9 - Coeficiente de sensibilidade m.	44
TABELA 10 - Limite de resistência ao cisalhamento.	44
TABELA 11 - Pré-deformação em função da taxa de deformação.	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 JUSTIFICATIVA	12
3 OBJETIVO	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1 Alumínio	14
4.2 Tratamentos Térmicos para Ligas de Alumínio	18
4.3 Principais Tipos de Ligas de Alumínio	19
<i>4.3.1. Ligas 1XXX</i>	<i>21</i>
4.4 Cisalhamento	23
4.5 Trajetória de Deformação	28
5 MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1 Material	32
5.2 Corpos de Prova	32
5.3 Ensaio de Dureza Vickers	33
5.4 Caracterização Química	34
5.5 Caracterização Microestrutural	34
5.6 Ensaio de Cisalhamento	35
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1 Análise Química	38
6.2 Ensaio de Dureza Vickers	38
6.3 Caracterização Microestrutural	39
6.4 Ensaio de Cisalhamento	40
<i>6.4.1 Deformação Monotônica 0,005/s e 0,08/s</i>	<i>40</i>
<i>6.4.2 Pré-Deformação de 5% taxa de 0,005/s para 0,08/s e taxa de 0,08/s para 0,005/s</i>	<i>42</i>
<i>6.4.3 Pré-Deformação de 15% taxa de 0,005/s para 0,08/s e taxa de 0,08/s para 0,005/s</i>	<i>43</i>
<i>6.4.4 Aspecto Superficial do Alumínio após o Ensaio de Cisalhamento</i>	<i>44</i>
<i>6.4.5 Variação de M com a Condição de Solicitação no Ensaio de Cisalhamento</i>	<i>46</i>
7 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas estão entre os metais mais consumidos anualmente. O uso do alumínio se dá pelas características físico-químicas, como por exemplo baixo peso específico, alta resistência a corrosão, juntamente com alta condutibilidade elétrica e térmica. As ligas de alumínio podem ser transformadas através de todos os processos metalúrgicos usuais. O óxido de alumínio fonte para o alumínio é abundante na crosta terrestre. O Brasil é um país com grande apelo à produção do alumínio, possuindo a terceira maior reserva de bauxita do mundo (ABAL, 2010; BUECKEN, 1943). Atualmente o alumínio ligado é utilizado em aplicações que requerem alto desempenho como as voltadas para a indústria naval e aeroespacial. A notável aplicação do alumínio e suas ligas na maioria dos segmentos industriais mostra a importância deste metal para a sociedade. A liga de alumínio ASTM/ABNT 1200, é considerada uma liga pura, já que o teor de alumínio está na faixa de 99,00%.

2 JUSTIFICATIVA

O estudo contribuirá para a melhor compreensão de como a liga de alumínio ASTM/ABNT 1200 se comporta mediante solicitações mecânicas variadas. A liga de alumínio ASTM/ABNT 1200 é uma liga muito utilizada comercialmente devido à sua conformabilidade, resistência à corrosão e boa relação custo-benefício, dentre outras propriedades. Sendo assim, com este trabalho pretende-se promover um estudo que possa clarear melhor como esta liga se comporta mecanicamente, e também investigar algumas outras propriedades como dureza e composição química.

3 OBJETIVO

Objetivo geral: estudar o comportamento mecânico da liga de alumínio ASTM/ABNT 1200 em função das condições de solicitação mecânica aplicadas.

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar o comportamento mecânico da liga com o uso do ensaio de cisalhamento, avaliando o limite de deformação plástica nas respectivas taxas de deformação propostas.
- b) Avaliar a conformidade da liga com os padrões fornecidos pela fábrica e bibliografia.

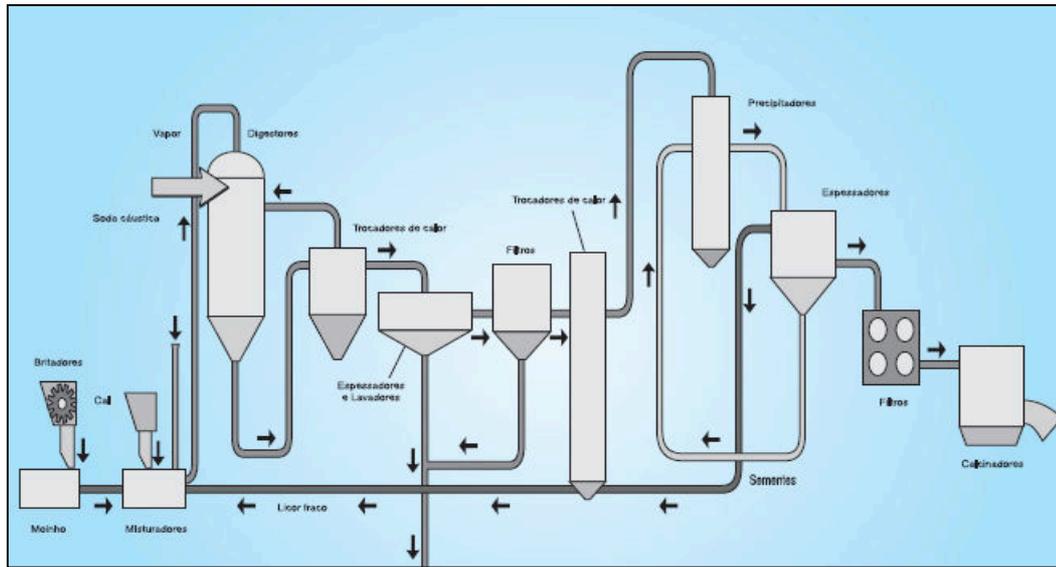
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Alumínio

O alumínio está presente no planeta, constituindo a crosta terrestre em torno de 8%, e tendo como forma o óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3). A produção do alumínio tem como principais matérias a bauxita e a laterita. O alumínio possui baixa densidade, considerável resistência a corrosão, pode ser reciclado inúmeras vezes além de possuir boa condutividade térmica e elétrica. O alumínio foi descoberto pelo Sir Humphrey Davy no ano de 1809, porém foi processado industrialmente pela primeira vez no ano 1886. Atualmente a bauxita é o minério que possui principal importância no processo para obtenção do alumínio e possui percentual deste elemento em torno de 30% a 45%. O alumínio é obtido em três fases na seguinte sequência mineração, refinaria e redução. Estas etapas compreendem a moagem, digestão, filtração e calcinação. Posteriormente a alumina em um eletrólito fundido é levada para a eletrólise, através da qual ocorrerá a separação e a extração do alumínio puro. O rendimento médio da produção de alumínio é igual a 20%, a cada 5 kg em média de bauxita obtém-se 1 kg de alumínio primário.

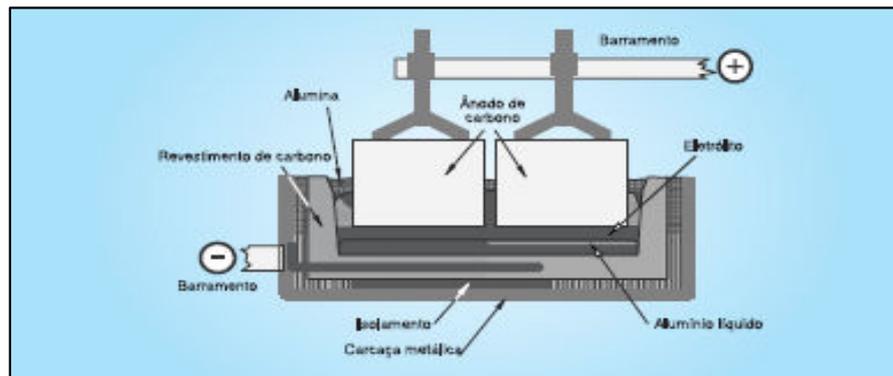
O alumínio possui ponto de fusão de $660^{\circ}C$, seu peso específico é de $2,70\text{ g/cm}^3$, quando exposto a atmosfera uma camada de óxido de alumínio é formada o que o protege da corrosão, além de não perder suas propriedades quando submetido a reciclagem (ABAL, 2010; BUECKEN, 1943). Na figura 1 é apresentado o processo de obtenção da alumina calcinada, enquanto a figura 2 exibe a etapa de eletrólise que permite a obtenção do alumínio primário.

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção da alumina calcinada.



Fonte: ABAL, 2007.

Figura 2 – Processamento do alumínio via eletrólise.



Fonte: ABAL, 2007.

O alumínio pode formar várias ligas com outros elementos metálicos, formando muitas ligas metálicas para uso na engenharia. Algumas das ligas são alumínio-cobre, alumínio-manganês, alumínio-silício, alumínio-magnésio, alumínio-magnésio-silício dentre outras. No resfriamento do alumínio alguns elementos podem ser precipitados em solução sólida o que faz com que haja maior rigidez na estrutura do alumínio. Com as diversas vantagens da formação das ligas de alumínio é possível alcançar várias propriedades de aplicações industriais como, a resistência a corrosão, resistência mecânica, usabilidade, condutibilidade elétrica. Alguns elementos podem ser adicionados com função acessória, como por exemplo controlar a microestrutura e as impurezas (ABAL, 2010; COBDEN, 1994). A tabela 1 apresenta as ligas de alumínio comerciais.

Tabela 1 - Ligas de alumínio comerciais

1050	Alumínio comercialmente puro, muito dúcteis no estado recozido, indicadas par deformação a frio.	Equipamentos para indústrias alimentícias, químicas, bebidas, trocadores de calor, utensílios domésticos.
1100	Estas ligas têm excelente resistências à corrosão, a qual é crescente com o aumento da pureza da liga.	
1350	Alumínio 99,5% de pureza, com condutibilidade mínima de 61% IACS	Barramentos elétricos, peças ou equipamentos que necessitam alta condutibilidade elétrica.
2017	Ligas de AlCu, com elevadas resistência mecânica, alta ductibilidade, média resistência à corrosão, boa usinabilidade.	Peças usinadas e forjadas, indústria aeronáutica, transporte, máquina e equipamentos.
2024		
2117		
2219		
3003	Ligas de AlMn, com boa resistência à corrosão, boa conformabilidade e moderada resistência mecânica. São ligas de uso geral.	Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e de alimentos, telhas, cumeeiras, rufos, calhas, forros, construção civil, fachadas.
3105		
4043	Ligas de AlSi utilizadas em varetas de soldas.	Soldagem de ligas de séries 1xxx, 3xxx e 6xxx.
4047		
5005	Ligas de AlMg são dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sob o trabalho a frio. Alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. Em geral a resistência mecânica aumenta com s teores crescentes de Mg.	Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e de alimentos, telhas, cumeeiras, rufos, calhas, forros, construção civil, fachadas.
5052		
5056		
6053	Ligas de AlMgSi, tratáveis termicamente com excelente resistência mecânica na temperatura T6.	Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e de alimentos, telhas, cumeeiras, rufos, calhas, forros, construção civil, fachadas.
6061		
6063		
7075	Ligas de AlZn, tratáveis termicamente, alta reistencia à corrosão, boa conformabilidade	Peças sujeitas aos mais elevados esforços mecânicos em industrias aeronáuticas, militar, maquinas e equipamentos, modelos para injeção de plásticos e estruturas.
7178		

Fonte: Adaptado de ABAL, 2007.

O alumínio pode ser fundido, formando diversos tipos de ligas, além de possuir como características básicas a estrutura cristalina cúbica de face centrada, densidade de 2,70 g/cm³ e

peso atômico de 26,98 u, isto o torna um metal com grandes aplicações em segmentos tecnológicos e industriais.

O baixo peso em nível industrial remete a redução de forças vibracionais, e quando combinado a uma resistência mecânica elevada torna as ligas de alumínio como sendo o principal material na construção de aeronaves nas últimas décadas.

A condutividade elétrica do alumínio 99,99% puro a 200°C é 63,8 % da norma internacional IACS e se combinado a sua baixa densidade a condutividade elétrica de massa é maior do que o dobro da de cobre recozido e maior do que a de qualquer outro material.

As ligas de alumínio e o alumínio são ligeiramente paramagnéticas, com módulo de elasticidade de 70,3 GPa, podendo chegar até a 75 GPa, quando adicionado a outros metais (ABAL, 2010; COBDEN, 1994). A tabela 2 mostra uma comparação do alumínio com outros materiais

Tabela 2 - Comparação das características do alumínio e ferro.

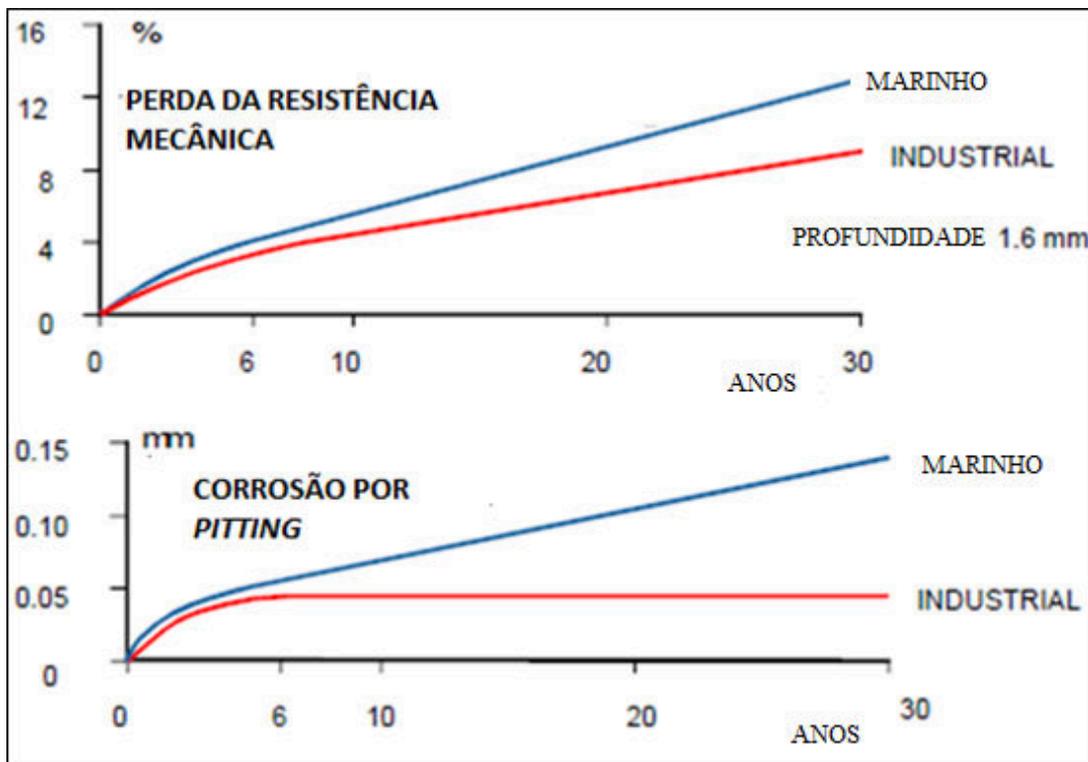
Características	Alumínio	Ferro
Peso específico (Kg/dm ³)	2,7	7,8
Estanqueidade (vedação a vento, poeira e chuva)	Ótima (testes de pressão normalizados conforme ventos da região)	Média
Vida e produto	Altíssima (ideal em qualquer região)	Baixa (vida curta em regiões úmidas)
Manutenção	Nenhuma (somente limpeza)	Frequente (pintura anual)
Consciência ecológica I	A bauxita (minério de alumínio) é abundante no Brasil	O minério de ferro é abundante no Brasil.
Consciência ecológica II	O alumínio é eterno (pode ser reciclado)	O ferro oxida mais facilmente (pode ser reciclado)
Funcionalidade	Alta	Média
Nobreza do produto	Nobre	Menos nobre

Fonte: Adaptado de ABAL, 2007.

O alumínio tem uma alta resistência a corrosão se comparado a outros metais devido a formação de um filme resistente de óxido de alumínio. A formação desse óxido na presença do oxigênio é muito rápida.

O alumínio é um metal muito reativo e, portanto, o filme do óxido de alumínio deve cobrir integralmente sua superfície para protegê-lo (COBDEN, 1994). A figura 3 relata como o processo de corrosão ocorre em uma liga de alumínio em diferentes ambientes e tempos.

Figura 3 - Perda da resistência mecânica e profundidade da corrosão por pitting em função do ambiente e dos anos para o alumínio.



Fonte: COBDEN, 1994.

4.2 Tratamentos Térmicos para Ligas de Alumínio

Os tratamentos térmicos das ligas de alumínio incluem homogeneização, recozimento, endurecimento por precipitação, têmpera, envelhecimento e solubilização.

Os tratamentos térmicos visam controlar a microestrutura, reduzir as segregações buscando adaptar o material a certas características metalúrgicas. Essas características podem ser dentre outras o tamanho de grão e a estampabilidade.

A homogeneização é realizada em temperaturas que chegam a 500°C, sendo executado concomitantemente com a laminação a quente, através do aquecimento das placas. Esta

consiste em produzir estruturas estáveis e controlar parâmetros como tamanho de grão e estampabilidade.

Na solubilização/envelhecimento o alumínio é aquecido a cerca de 500°C, fazendo com que ocorra a dissolução dos elementos de liga na solução sólida. Após este procedimento é realizado um resfriamento rápido, geralmente em água. Gradualmente os constituintes precipitam de maneira extremamente fina, o que promove maior resistência mecânica como o endurecimento nessas ligas.

O recozimento deixa o material com condições de plasticidade máxima, devido a recristalização total do mesmo. Neste processo o alumínio é aquecido em temperaturas aproximadas à 350°C, o que permite um rearranjo da microestrutura. Este processo remove o efeito do trabalho a frio proporcionando a ductilidade do material. Para considerar um recozimento pleno deve-se considerar somente a recristalização primária, já que se mantido o aquecimento os grãos sofrerão a chamada coalescência e crescerão exageradamente, o que gera defeitos, este sobreaquecimento é chamado de recristalização secundária. O recozimento pode ser parcial caso a temperatura de aquecimento do alumínio seja mantida por volta da faixa entre 200° a 280°C.

A têmpera consiste no aquecimento precedido de resfriamento rápido e é utilizada para obter valores altos de dureza e de resistência a corrosão. A tempera é utilizada no tratamento térmico de solubilização. Após esta é utilizada o tratamento de envelhecimento que consiste em deixar o material em temperatura controlada ou ambiente e aguardar a formação dos precipitados desejados. (ABAL, 2010; TOTTEN e MACKENZIE, 2003)

4.3 Principais Tipos de Ligas de Alumínio

As principais ligas de alumínio utilizadas comercialmente são do grupo 1XXX a 8XXX. A série 1XXX representa o alumínio comercialmente puro, que vai desde a liga 1100 (99% Al) até a liga 1175 (99,75% Al), sendo estas ligas utilizadas em aplicações que não requerem grande resistência às solicitações mecânicas.

As ligas 2XXX são ligas de alumínio e cobre, estas são tratáveis termicamente e possuem alta resistência mecânica em elevadas temperaturas, tenacidade e soldabilidade, entretanto não são resistentes à corrosão atmosférica e por isso são geralmente pintadas ou revestidas para suas aplicações em aeronaves e carrocerias de caminhões.

O grupo 3XXX ligas de alumínio e manganês são endurecíveis, possuem excelente resistência a corrosão e podem ser facilmente soldadas. Um representante deste grupo de ligas é a liga Al-Mn 3003 que é utilizada amplamente em utensílios domésticos.

As ligas de alumínio e silício são do grupo 4XXX, este grupo possui ligas tratáveis termicamente com boa condutividade térmica e resistência mecânica moderada quando comparada aos outros grupos. Estas ligas são utilizadas em sistemas de resfriamento de refrigeradores e em aplicações automotivas.

O grupo 5XXX alumínio e magnésio tem como principais características a alta resistência a corrosão, dureza e soldabilidade. Este grupo tem como representantes as ligas Al-Mg 5052, 5083 e 5754 que são utilizadas em estruturas de barcos, equipamentos rodoviários e veículos em geral.

As ligas do grupo 6XXX são compostas por alumínio, magnésio e silício, possuindo excelente resistência mecânica na têmpera além de ser passível de tratar termicamente. As suas aplicações são primordialmente no campo estrutural da construção civil.

O grupo 7XXX alumínio e zinco, são da classe especial das ligas de alumínio possuindo alta resistência mecânica, conformabilidade e elevada resistência à corrosão. Estas características fazem com que estas ligas sejam utilizadas em aplicações que exigem elevado desempenho como em equipamentos militares e aeronáuticos.

Por fim as ligas do grupo 8XXX que englobam o alumínio e outros elementos como ferro, níquel e lítio, são utilizadas em situações especiais que exigem características particulares como alta resistência mecânica aliada a alta condutividade elétrica e alta dureza. As aplicações são direcionadas principalmente para a indústria aeroespacial e elétrica. (ABAL, 2010; THE ALUMINUM ASSOCIATION, 1998)

As figuras 4 e 5 ilustram algumas das aplicações das ligas citadas acima.

Figura 4 - Embalagem de alimento produzida com liga de alumínio puro e estrutura fabricada com liga de alumínio-cobre.



Fonte: ABAL, 2007.

Figura 5 - Estrutura automotiva produzida com liga alumínio-magnésio e perfis de alumínio-magnésio-silício utilizados na construção civil.



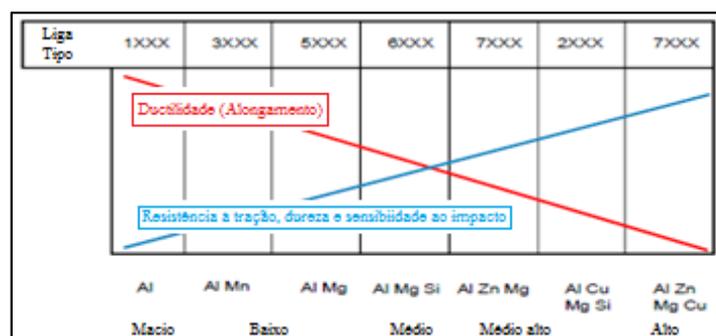
Fonte: ABAL, 2007.

4.3.1. Ligas 1XXX

As ligas do grupo 1XXX – alumínio puro, indicam a mínima pureza de 99,00% e os últimos dois dígitos correspondem a fração decimal após a vírgula, no caso deste trabalho é utilizado um alumínio com 99,00% de pureza. O segundo dígito demonstra o controle de impurezas ou elementos de liga, na liga 1200 que é objeto deste trabalho, é controlado o ferro e silício (COBDEN, 1994).

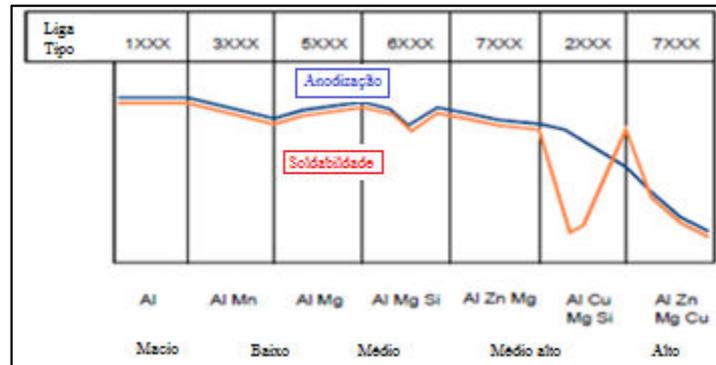
Dentre as propriedades das ligas do grupo 1XXX, destacam-se o encruamento (deformação a frio), alta capacidade de conformação, alta resistência a corrosão e boa condutibilidade elétrica, utilização em áreas químicas e elétricas, possuindo como representantes as ligas 1100 e 1350. O valor de resistência a tração oscila entre 10-27 Ksi ou 68-186 MPa (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 1998). As figuras 6, 7, 8 e 9 mostram algumas propriedades das ligas de alumínio em relação a outros grupos de ligas com diferentes elementos principais.

Figura 6 - Propriedades Mecânicas em Função do Tipo de Liga de Alumínio



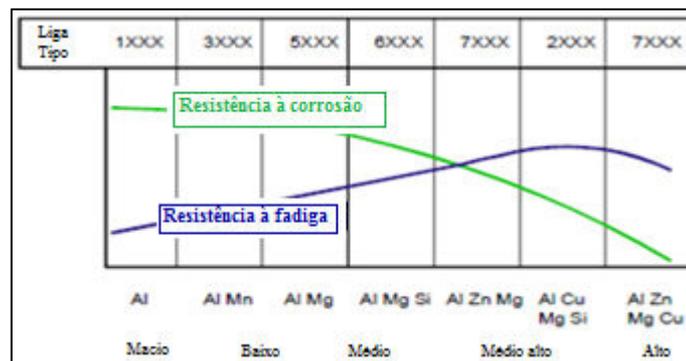
Fonte: COBDEN, 1994.

Figura 7 - Anodização x Soldabilidade das ligas.



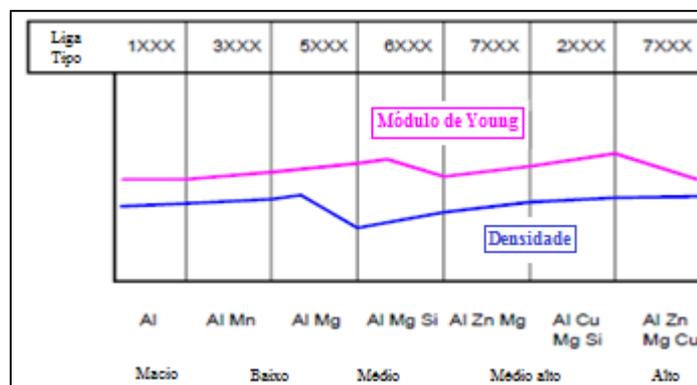
Fonte: COBDEN, 1994.

Figura 8 - Resistência a Corrosão x Resistência a Fadiga.



Fonte: COBDEN, 1994.

Figura 9 - Módulo de Elasticidade x Densidade.



Fonte: COBDEN, 1994.

As figuras acima permitem a conclusão qualitativa da linearidade das propriedades como dureza, limite de resistência e resistência ao impacto sendo que estas crescem devido as

variações composicionais das ligas enquanto a ductilidade cai na mesma proporção devido a menor capacidade de conformação, já que os elementos de liga presentes fazem com que isto aconteça. Comparativamente a liga de alumínio pura – 1XXX, exibe propriedades ótimas em relação as outras ligas como anodização, resistência a corrosão, soldagem e ductilidade. As propriedades como resistência mecânica são inferiores as dos outros grupos e a densidade e o módulo de elasticidade estão na média das ligas dos grupos 2XXX até 7XXX.

O alumínio da série 1XXX é endurecível, entretanto ele não é usado quando a resistência mecânica é um requisito primordial do projeto. A ênfase nesses casos está na alta resistência a corrosão, condutividade elétrica e capacidade de ser conformado. Exemplos da aplicação destas séries de alumínios são embalagens, moldagem com chapas metálicas, adornos, carrocerias de caminhões e vagões-tanques (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 1998).

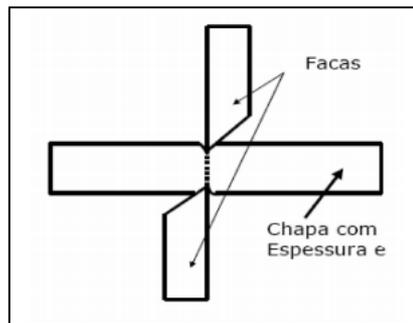
4.4 Cisalhamento

O cisalhamento está presente no dia a dia dos materiais, assim como os esforços de tração e compressão. Nesse tipo de sollicitação mecânica duas forças de sentidos opostos atuam paralelamente em uma área específica, gerando assim, uma tensão cisalhante, τ , que consiste na divisão da força cisalhante pela área cisalhada, ou seja, o comprimento multiplicado pela espessura do material.

No caso do movimento relativo de átomos em uma estrutura cristalina, verifica-se a ocorrência de um cisalhamento plástico ou deslizamento mediante o escorregamento de um plano de átomos sobre outro plano adjacente, e esta deformação pode ocorrer mesmo quando tensões de compressão ou tração estiverem atuando, já que elas podem ser convertidas em tensões cisalhantes.

O deslizamento ocorre predominantemente nos metais cúbicos e em suas ligas desordenadas. As tensões de cisalhamento produzem um deslocamento angular no plano atômico e consideramos a tangente deste ângulo como sendo a deformação de cisalhamento (VAN VLACK, 1984; SOUZA, 1982).

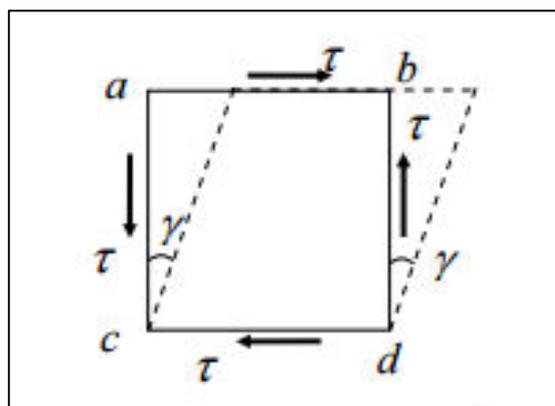
No caso específico da conformação de metais, o esforço cisalhante está presente na operação de estampagem por corte, como por exemplo, o corte de chapas com uso de guilhotinas, conforme se vê na figura 10.

Figura 10 - Esforço cisalhante.

Fonte: BENAZZI JUNIOR; CAVERSAN, 2012.

Durante uma operação específica de conformação, um material estará sujeito à combinação de diferentes modos de deformação plástica que ocasionarão, dentre outros aspectos, à uma distribuição heterogênea do esforço mecânico e conseqüentemente, da deformação no material em processamento (DIETER, 1981; BOUVIER et al, 2006).

Existem duas técnicas de ensaio de cisalhamento: o ensaio de torção e o ensaio de cisalhamento puro. Na técnica de ensaio por cisalhamento puro ou cisalhamento planar simples, mais utilizada, por prever as condições de esforços que são complexas, por exemplo na laminação (CALLISTER JÚNIOR, 2008; BOUVIER et al, 2006). A figura 11, demonstra uma deformação de cisalhamento puro em um elemento infinitesimal o ângulo que valia $\pi/2$, fica reduzido à $(\pi/2 - \gamma)$.

Figura 11 - Deformação de cisalhamento.

Fonte: JUDICE; PERLINGEIRO, 2005.

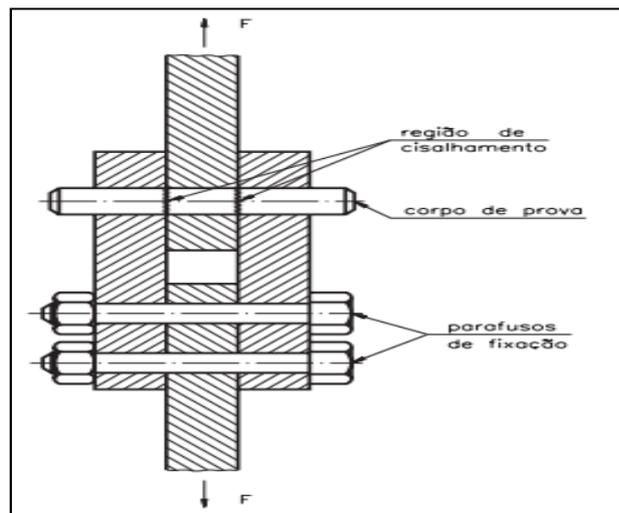
A teoria do cisalhamento máximo ou critério de Tresca, segundo Souza (1982), mostra que a tensão máxima de cisalhamento, no escoamento sob tensões combinadas, atinge um valor crítico igual ao valor da tensão de cisalhamento máxima no escoamento sob a tensão

unitária na tração ou compressão. Esta teoria conclui que o escoamento possui valor igual para a tração simples ou compressão simples, levando em conta a combinação da tensão máxima de cisalhamento e a tensão máxima de escoamento.

A tensão de cisalhamento em função da deformação de cisalhamento pode ser obtida a partir de um ensaio de cisalhamento puro, que permite a obtenção de um diagrama tensão-deformação de cisalhamento do material sendo possível que este seja semelhante ao diagrama tensão-deformação obtido através do ensaio de tração. A partir da região elástica-linear do material, se este a tiver, é possível obter a relação $\tau = G \cdot \gamma$, já que o diagrama será uma reta e as tensões e deformações de cisalhamento serão proporcionais. Nesta equação γ é a deformação de cisalhamento e G é o módulo de elasticidade ao cisalhamento ou transversal do material (JUDICE; PERLINGEIRO, 2005).

O ensaio de cisalhamento geralmente é feito em produtos acabados e utiliza dispositivos adaptados à máquina universal de ensaios. O ensaio de cisalhamento direto se mostrou uma técnica eficiente para analisar as propriedades mecânicas de amostras planas. O dispositivo do teste de cisalhamento consiste no movimento paralelo de duas partes rígidas, sendo lenta a velocidade de aplicação da carga. O ensaio de cisalhamento em pinos e rebites utiliza um dispositivo acoplado à máquina de ensaios universal e que está representado na figura 12.

Figura 12 - Dispositivo para ensaio em pinos e rebites.

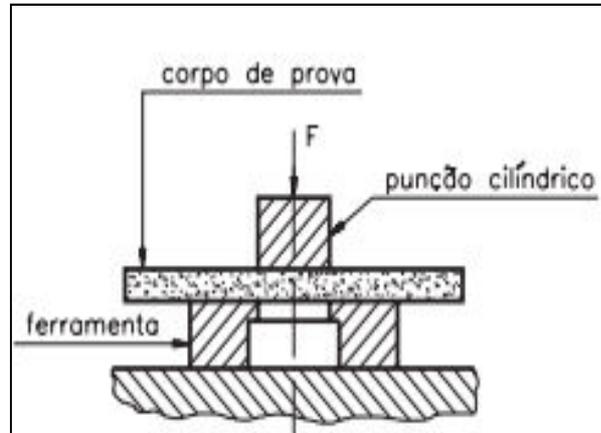


Fonte: ESSEL ELETROMECAÂNICA, 2015.

A força aplicada pela máquina é transmitida na forma de uma força cortante até a ruptura do material. Para ensaiar chapas é utilizado um outro dispositivo chamado de estampo

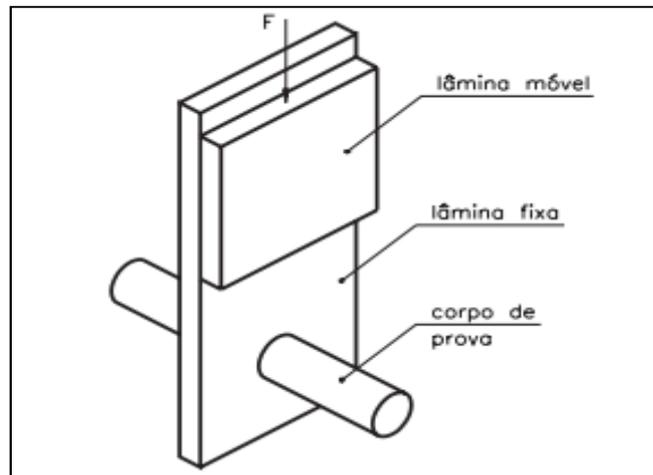
para corte conforme a figura 13. As barras utilizam um dispositivo mostrado na figura 14 (ESSEL ELETROMECAÂNICA, 2015).

Figura 13 - Dispositivo para ensaio em chapas.



Fonte: ESSEL ELETROMECAÂNICA, 2015.

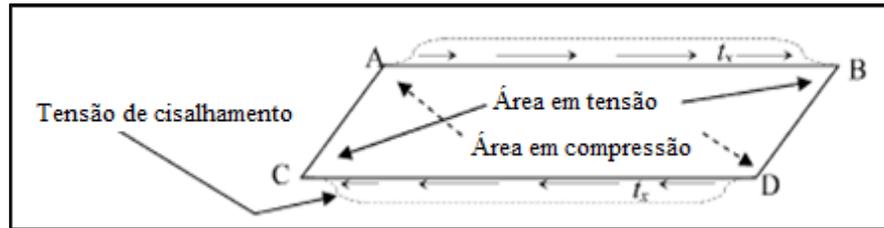
Figura 14 - Dispositivo para ensaio em barras.



Fonte: ESSEL ELETROMECAÂNICA, 2015.

No ensaio de cisalhamento ocorrem forças de tração e compressão e a amostra deve ser presa de maneira adequada para que não ocorram fraturas ao longo da linha sujeitas à tensão. A figura 15 representa essas forças atuando em uma chapa no ensaio.

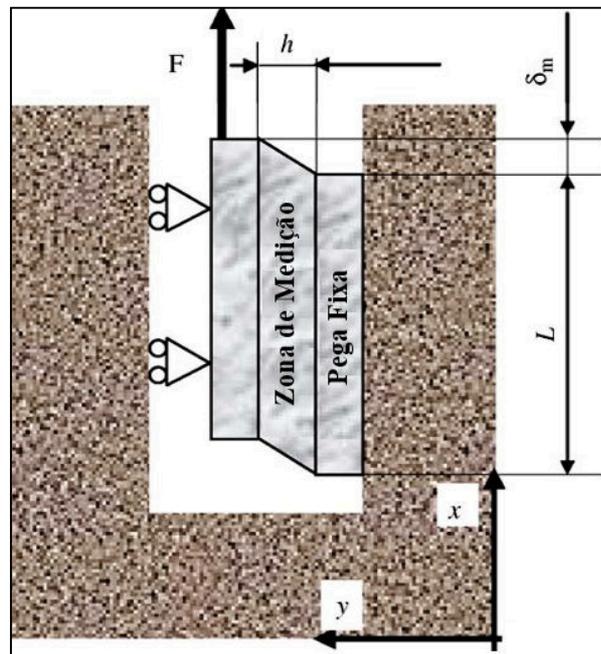
Figura 15 - Forças de tração e compressão no ensaio de cisalhamento.



Fonte: BOUVIER et al., 2005.

Na representação geral o material é fixado em duas partes, deixando uma região na qual será cisalhada e que estará sujeita as considerações feitas anteriormente. A zona móvel, assim, move-se paralelamente, causando deformações cisalhantes. A figura 16 apresenta um desenho esquemático do ensaio, de um modo geral, em que F é a força cisalhante utilizada, L representa a altura, h a largura efetiva e δ_m o deslocamento da parte móvel (BOUVIER et al, 2005).

Figura 16 - Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento.



Fonte: BOUVIER et al, 2005.

O ensaio de cisalhamento ao contrário do ensaio de tração uniaxial, possui muitas vantagens como por exemplo a simplicidade geométrica da amostra, a ausência de instabilidades plásticas como empescoamento da amostra, a grande facilidade em obter

deformações homogêneas, além da direção de carregamento ser susceptível de mudança de direção. Por fim o ensaio de cisalhamento permite explorar zonas do diagrama que não são possíveis através de tensões simples e alongamentos biaxiais (BOUVIER et al., 2005)

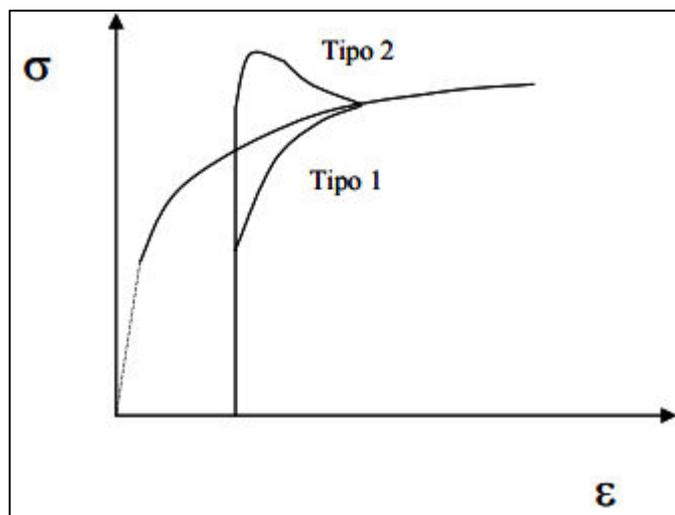
4.5 Trajetória de Deformação

A trajetória de deformação é compreendida no processamento de materiais em que ocorre ciclos de carregamentos variados como, por exemplo os de tração, compressão, cisalhamento. A trajetória de deformação pode ser observada através das alterações que o material irá sofrer como o encruamento. Segundo Lopes (2006), pode-se observar pela mudança na trajetória de deformação gerada pela deformação plástica, dois efeitos transientes no gráfico tensão-deformação:

- 1º - Efeito: Ocorre a minoração da tensão de fluxo inicial e aumento do encruamento;
- 2º - Efeito: Ocorre majoração da tensão de fluxo e posteriormente um menor encruamento.

A figura 17 ilustra estes dois efeitos na curva tensão-deformação.

Figura 17 - Efeitos causados pela variação da trajetória de deformação.



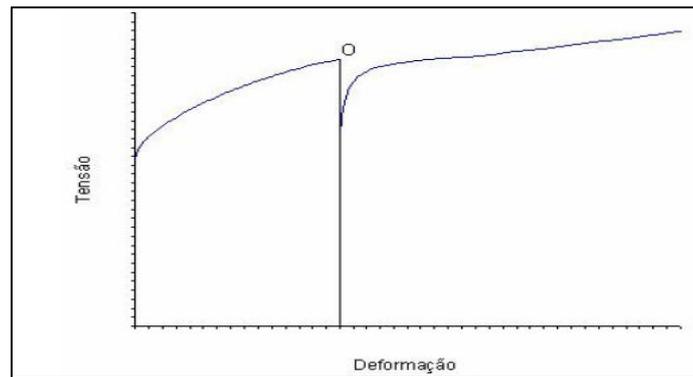
Fonte: LOPES, 2006.

A trajetória de deformação é alterada nas diferentes partes do material tão como a taxa de deformação e temperatura (LOPES, 2006; FAKIR, O. et al., 2014). A liga de alumínio 1200, apresenta uma redução, transitória, na taxa de encruamento após a mudança na

trajetória de deformação. Materiais que apresentam baixa energia de falha de empilhamento estão susceptíveis a este comportamento. A combinação de ensaios sequenciais é importante para conhecer o comportamento plástico de metais nas condições de conformação reais. O primeiro efeito sugere materiais submetidos a testes com inversão de sentido da deformação, ou testes *Bauschinger*, propiciando um aumento da deformação uniforme, no segundo efeito tem-se a ruptura precedida de uma estricção precipitada. A microestrutura sofre influência da trajetória de deformação nos diversos teste como por exemplo os ensaios monotônico e cíclico, nestes ensaios tem-se a aparição de várias microestruturas com uma função da rota de testes e da orientação dos grãos. Com isso temos além do encruamento fatores como a ductilidade alterados, que podem ser prejudiciais à conformação do material – no alumínio comercial e em algumas de suas ligas o segundo efeito no gráfico tensão-deformação é observado, devido à baixa resistência mecânica destes materiais. A explicação é que nestes materiais a estrutura cristalina apresentam desestabilizações em suas irregularidades-discordâncias com a alteração da trajetória de deformação. Em um segundo modo de deformação, posterior, uma nova estrutura cristalina é formada sendo possível a recuperação do encruamento (NESTEROVA; BACROIX; TEODOSIU, 2001; LOPES, 2006).

Durante a aplicação de uma carga uma subestrutura de discordâncias é gerada o que induz a tensões internas durante o pré-carregamento. Uma parte destas tensões resiste a carga aplicada e leva a imobilização das discordâncias durante a aplicação da carga inicial. Com a mudança da trajetória de deformação, uma fração das discordâncias acumuladas durante o primeiro modo de solitação escorrega na direção reversa com uma baixa resistência e com alto potencial recombinante. Esta condição leva a uma queda no limite de escoamento, sendo este conhecido como efeito *Bauschinger*, que é muito importante para os processos de conformação já que pode ocorrer queda no encruamento durante os processos em que ocorrem a variação da trajetória de deformação (BORODACHENKOVA et al., 2014; LOPES, 2006).

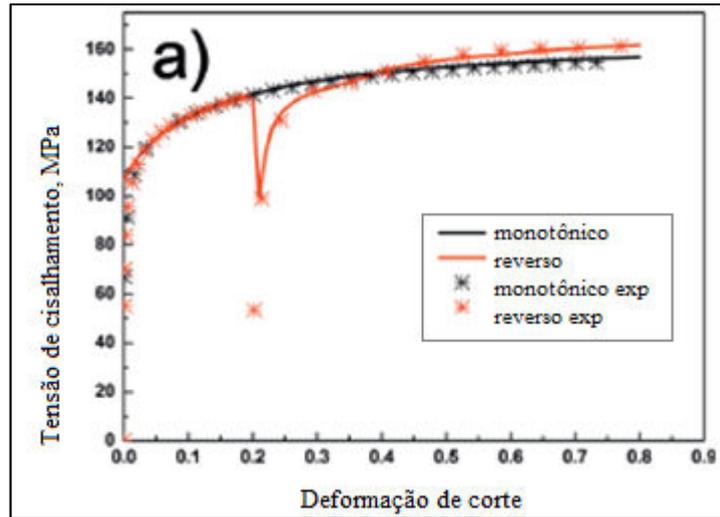
A figura 18, mostra o comportamento gerado pelo efeito *Bauschinger* (ponto o) no gráfico tensão-deformação.

Figura 18 - Efeito Bauschinger.

Fonte: LOPES, 2006.

Em operações de conformação, alguns pontos do material estão sujeitos a cargas em mais de uma trajetória o que resulta em complexas trajetórias de deformação. Como exemplo nos processos de estampagem profunda o material que flui de um ponto na área da flange até a cavidade apresenta mudança no modo de deformação que vai de cisalhamento puro até um estado de tensão biaxial. Algum desvio gradual ou súbito a partir de trajetórias de deformação proporcionais ocorre em alguns materiais, especialmente naqueles que apresentam alta energia de falhas de empilhamento associada com endurecimento extra ou amaciamento sendo que nestes uma tensão transiente e o encruamento podem ser observados. Isto é causado pela indução gerada pela anisotropia plástica em que o material apresenta comportamentos distintos em suas direções, sendo esta originada de caminhos de deformação anteriores (MANIK; HOLMEDAL; HOPPERSTAD, 2015). A trajetória de deformação pode ser percebida pelo carregamento e pelos diversos fatores relacionados sendo evidenciada na figura 19 a partir da comparação de um teste de cisalhamento monotônico e um teste de cisalhamento reverso com pré-deformação em uma amostra de liga de zinco realizado por BORODACHENKOVA et al. (2014).

Figura 19 - Teste de cisalhamento monotônico e reverso



Fonte: BORODACHENKOVA et al., 2014.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Material

O trabalho foi realizado com uso de chapas de alumínio ASTM/ABNT 1200 no estado como recebido com 0,50 mm de espessura e 1,00 m² de área originária, fabricado pela Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais e possui, segundo catálogo da fabricante, composição química contendo: 99,00%Al - mínimo; 1,00% de silício e ferro (Si + Fe); 0,05% de cobre (Cu); 0,05% de manganês (Mn); 0,05% de titânio (Ti); 0,10% de zinco (Zn); outros 0,15% (CBA, 2002). As propriedades mecânicas do material estão representadas na tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1200.

Limite de resistência a tração (Mpa)	110-145
Limite de escoamento mínimo (Mpa)	95
Alongamento mínimo “50 mm” (%)	3
Dureza Brinell (HB)	32

Fonte: CBA, 2002.

5.2 Corpos de Prova

Foram confeccionadas 44 amostras com 0,50 mm de espessura, 12,50 mm de largura média e 50,00 mm de comprimento médio. Os corpos de prova foram numerados sequencialmente, e posteriormente, criou-se uma tabela de controle dos mesmos. Os ensaios foram realizados com corpos de prova recolhidos aleatoriamente. Para corte da chapa de alumínio com 1 m² de área foi utilizada a guilhotina da marca PEXTO modelo U-136-D, conforme figura 20.

Figura 20 - Guilhotina utilizada para cortar os corpos de prova.



Fonte: AUTOR.

5.3 Ensaio de Dureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi escolhido para determinação da dureza do material, sendo realizado do modo como a chapa de alumínio foi recebida. A amostra foi embutida a frio em um molde de silicone, utilizando o acrílico auto-polimerizante JET da Clássico, posteriormente levou-se a amostra à lixadeira com lixas de granulometrias #400 e #600 para remoção de impurezas. O ensaio foi realizado com uma carga de 200gf, com tempo de indentação igual a 15 segundos. Foram realizadas 12 medições, sendo eliminados o maior e o menor valor. A média e o desvio padrão foram calculados com os 10 valores restantes. O microdurômetro Vickers utilizado no ensaio é do modelo HMV-2T fabricado pela Shimadzu, conforme figura 21.

Figura 21 - Microdurômetro 2T Shimadzu.



Fonte: AUTOR.

5.4 Caracterização Química

A análise da composição química da amostra do alumínio 1200 obtida pela técnica de emissão óptica é apresentada na tabela 2. Foi utilizado o equipamento *Foundry Master Xpert* da *Oxford Instruments*, que pode ser visualizado na figura 22.

Figura 22 - Equipamento utilizado para análise química.

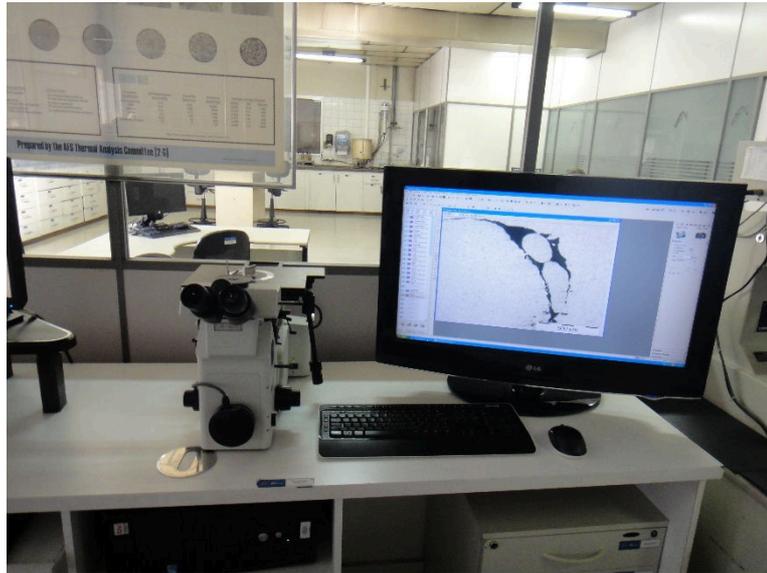


Fonte: BATISTA, 2015.

5.5 Caracterização Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada com 2 amostras lixadas mecanicamente com lixas de *mesh* variando de 320, 600, 1000 a 2000. Posteriormente foi realizado o polimento com o uso de uma pasta de alumina e auxílio do pano DP Nap para solução de diamante 6 μ , juntamente com o pano OP Chen para sílica coloidal 0,05 μ . Para obtenção das imagens foi utilizado o microscópio metalográfico da marca olympus modelo GX51 – figura 23, sendo o ataque químico realizado com solução aquosa de ácido fluorídrico.

Figura 23 - Equipamento utilizado para análise microestrutural.



Fonte: AUTOR.

5.6 Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi realizado como o material foi recebido, portanto sem nenhum tratamento. O ensaio de cisalhamento foi conduzido com uso de uma garra de cisalhamento adaptada à máquina de ensaios universais INSTRON 5582, utilizando-se o extensômetro Instron, Modelo 2630-100 com 25 mm de abertura máxima e sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2*.

A taxa de deformação adotada nos ensaios foi de 0,005/s e de 0,08/s, sendo a velocidade do cabeçote da máquina de ensaios (v) determinada de acordo com a equação (1.1). Algumas amostras foram pré-deformadas em cisalhamento no valor de 5% e 15%.

$$v = \underline{e} * 60 * b * F \quad (1.1)$$

sendo:

v = velocidade de deslocamento do cabeçote (mm/min);

e = taxa de deformação (s⁻¹);

b = largura efetiva submetida ao ensaio de cisalhamento = 4,43 (mm);

F = fator de conversão de tensão e deformação cisalhante em tensão e deformação efetiva = 1,84

Os corpos de prova foram presos à garra de cisalhamento com o uso do torquímetro Gedore Torcofix-K Rahsol (20-200 N.m) com torque de 15 N.m. O cálculo da deformação cisalhante, γ , foi feito de acordo com a Equação (1.2):

$$\gamma = Y / b \quad (1.2)$$

sendo:

Y = deslocamento do corpo de prova no sentido do comprimento (mm)

O cálculo de Y foi feito a partir da leitura do extensômetro, considerando que a abertura de 25 mm do mesmo equivale a um valor de deformação igual a 100% fez-se a identificação do valor de Y do seguinte modo, Equação (1.3):

$$Y = \text{deformação extensômetro (\%)} / 4 \quad (1.3)$$

Logo, o cálculo da deformação cisalhante foi feito com uso da equação 1.4:

$$\gamma = \text{deformação extensômetro (\%)} / 4.3,5 \quad (1.4)$$

Por fim, para o cálculo da tensão cisalhante, τ , foi necessário utilizar a equação (1.5):

$$\tau = F / A_{\text{cisalhada}} \quad (1.5)$$

Sendo:

F = força (N) e

$A_{\text{cisalhada}}$ = área cisalhada = comprimento x espessura (mm²)

Foram realizados 15 ensaios de cisalhamento, porém apenas alguns resultados foram satisfatórios, no caso 6 amostras foram escolhidas para serem estudadas.

Neste caso, foram usados dois valores de pré-deformação: 5% e 15% de deformação cisalhante acompanhado por mudanças nas taxas de deformação de 0,005/s para 0,08/s e de 0,08/s para 0,005/s, de acordo com o exposto na Tabela 4.

Tabela 4 - Amostras e condições do ensaio de cisalhamento.

Condição	Amostra
Deformação monotônica 0,005/s	A.15
Deformação monotônica 0,08/s	A.21
Pré-deformação de 5% taxa de 0,005/s para 0,08/s	A.25
Pré-deformação de 5% taxa de 0,08/s para 0,005/s	A.30
Pré-deformação de 15% taxa de 0,005/s para 0,08/s	A.44
Pré-deformação de 15% taxa de 0,08/s para 0,005/s	A.42

Fonte: AUTOR.

Na figura 24 é mostrada a máquina utilizada no ensaio juntamente com a garra de cisalhamento.

Figura 24 - Máquina e garra de cisalhamento.



Fonte: AUTOR.

O aumento na taxa de deformação tem o objetivo de avaliar a influência da velocidade da sollicitação nas propriedades mecânicas dos materiais. Porém é importante relacionar na região plástica em que ocorre mudança de taxa de deformação, a tensão de escoamento efetiva (σ_e) e a deformação (ϵ) que pode ser descrita buscando atingir os pontos ótimos de conformação e em tempo real, utilizando realimentação com conhecimento do expoente de velocidade, ou coeficiente de sensibilidade à mudança da taxa de deformação m . Este coeficiente mostra a intensidade da mudança da taxa de deformação e o impacto que acarreta no material. Assim valores de m maiores indicam que para aquela condição de carregamento, a sensibilidade da tensão, ou seja, da resistência mecânica, de um determinado material foi maior.

O método mais conhecido para determinação deste expoente é o *Backofen-Step-Change-Method*, que calcula o valor de m através de saltos de velocidade. Os dados são mais frequentemente usados para traçar a região da curva entre $\ln \sigma - \ln \epsilon$ (MARINHO, 2011).

A equação 1.6 mostra o método para determinação do valor de coeficiente de sensibilidade da tensão à mudança da taxa de deformação.

$$m = \frac{\ln\left(\frac{F_F}{F_D}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \quad (1.6)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise Química

A análise química obteve os resultados de todos os elementos químicos constantes na liga ASTM/ABNT 1200 e estes foram comparados com os dados obtidos no catálogo da fabricante, CBA- Companhia Brasileira de Alumínio.

Os dados foram comparados qualitativamente e foram condizentes com os dados do fabricante conforme pode-se apurar na tabela 5. Os dados são expressos em porcentagem de massa de cada elemento em relação a liga.

Tabela 5 - Composição química da liga ASTM/ABNT 1200 - CBA.

Composição Química - %							
CBA - Companhia Brasileira de Alumínio	Al - mín	(Si + Fe) - máx	Cu - máx	Mn - máx	Ti - máx	Zn - máx	Outros
	99,00	1,00	0,05	0,05	0,05	0,1	0,15
Encontrado	Al	(Si + Fe) - máx	Cu	Mn	Ti	Zn	Outros
	99,30	0,564	0,011	0,0136	0,0062	0,003	0,1022

Fonte: AUTOR.

6.2 Ensaio de Dureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado na amostra conforme recebida para comparar o resultado obtido com os dados fornecidos pelo fabricante. A liga de alumínio 1200 H14 possui uma dureza Brinell de 32 HB, sendo considerado por COBDEN (1994) macia e dúctil. Como o ensaio obteve o resultado através da medição da dureza Vickers, foi necessário realizar a conversão entre a dureza Brinell e Vickers. A dureza obtida foi de 44,60 HV e desvio padrão $\sigma = 1,976$ HV.

A conversão da dureza Vickers - HV em dureza Brinell - HB foi realizada a partir da norma ASTM E-140.

A partir da tabela comparando a dureza obtida com a dureza Brinell correspondente, obtemos o valor de 40 HB. Comparando o resultado com a dureza catalogada pela fábrica CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, temos uma variação equivalente a 8 HB.

A liga utilizada neste trabalho tem a designação H14, em que o H1 é para ligas encruadas onde o aumento da resistência é obtido por encruamento tão somente, o número 4 indica o grau de encruamento no caso ½ duro (CBA, 2002).

A conversão proposta pela norma é para alumínios forjados ou trabalhados, o que aumentaria a sua dureza devido ao encruamento.

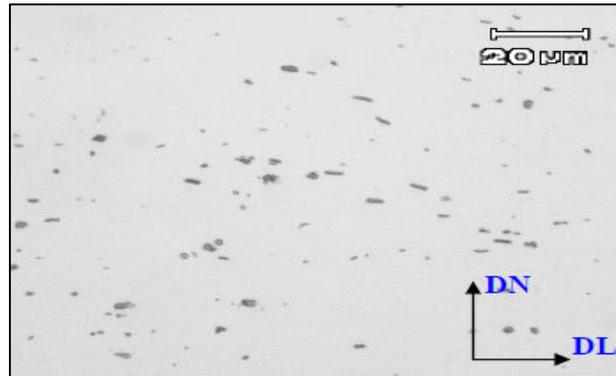
Analisando vemos que é extremamente compatível com o resultado obtido, já que a tabela é geral – média, e estudamos uma amostra de determinada liga de alumínio especificada e de determinado fabricante, ou seja, o resultado obtido de 40 HB é aceitável comparativamente, com o resultado de 32 HB fornecido pela CBA. Deve-se levar em conta o desvio padrão e a quantidade de amostras ensaiadas neste trabalho.

6.3 Caracterização Microestrutural

As ligas 1XXX possuem como principais solutos o ferro e o silício, estas ligas não necessitam de alta resistência mecânica, mas sim alta capacidade de conformação. No caso da liga, estudada neste trabalho o Fe está presente na forma de fases intermetálicas em combinação com o alumínio ou outros metais. O Fe é adicionado para reduzir o tamanho de grão, enquanto o Si melhora a resistência a corrosão. Existem nesta classe de ligas mais de dez fases intermetálicas passíveis de se formar durante o processamento (MINATEL, 2009).

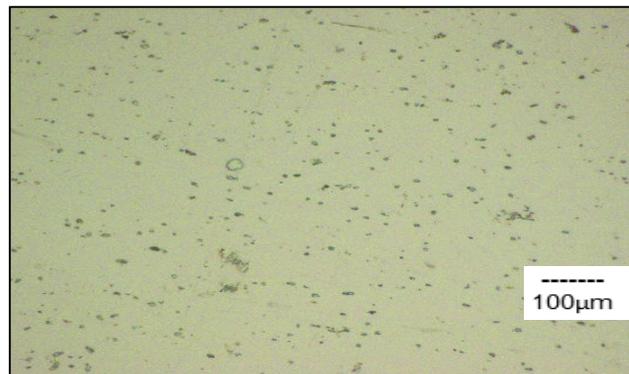
A caracterização microestrutural permitiu visualizar um material homogeneizado com precipitados grosseiros de composição AlFeSi, conforme foi possível verificar comparando com a microestrutura encontrada por MINATEL (2009), que utilizou uma placa da mesma liga, conforme figuras 25 e 26.

Figura 25 - Microestrutura da liga ASTM 1200.



Fonte: MINATEL, 2009.

Figura 26 - Microestrutura da liga ASTM 1200.



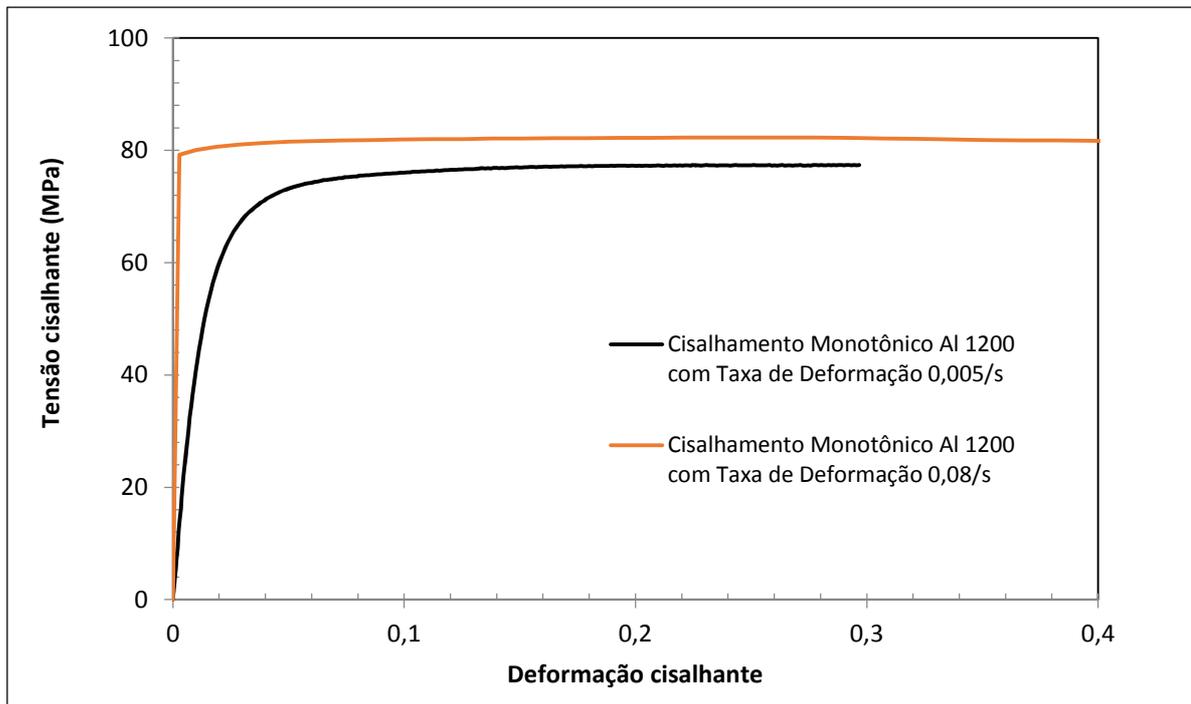
Fonte: AUTOR.

6.4 Ensaio de Cisalhamento

6.4.1 Deformação Monotônica 0,005/s e 0,08/s

O ensaio de cisalhamento neste primeiro caso foi realizado de forma a solicitar monotonicamente o material, ou seja a aplicação da carga se deu de forma contínua, uniaxial e crescente. A taxa de deformação neste ensaio foi de 0,005/s e 0,08/s conforme gráfico 1.

Gráfico 1 - Cisalhamento monotônico com taxa 0,005/s e 0,08/s.



Fonte: AUTOR.

Analisando os resultados é possível verificar que na região elástica do gráfico houve uma diferença grande no módulo de elasticidade da liga em estudo.

Em relação ao encruamento foi obtido um baixo valor o que é proveniente a alta energia de falha de empilhamento do alumínio. Os limites de resistência ao cisalhamento em ambos os casos seguem na tabela 6.

Tabela 6 - Limite de resistência ao cisalhamento.

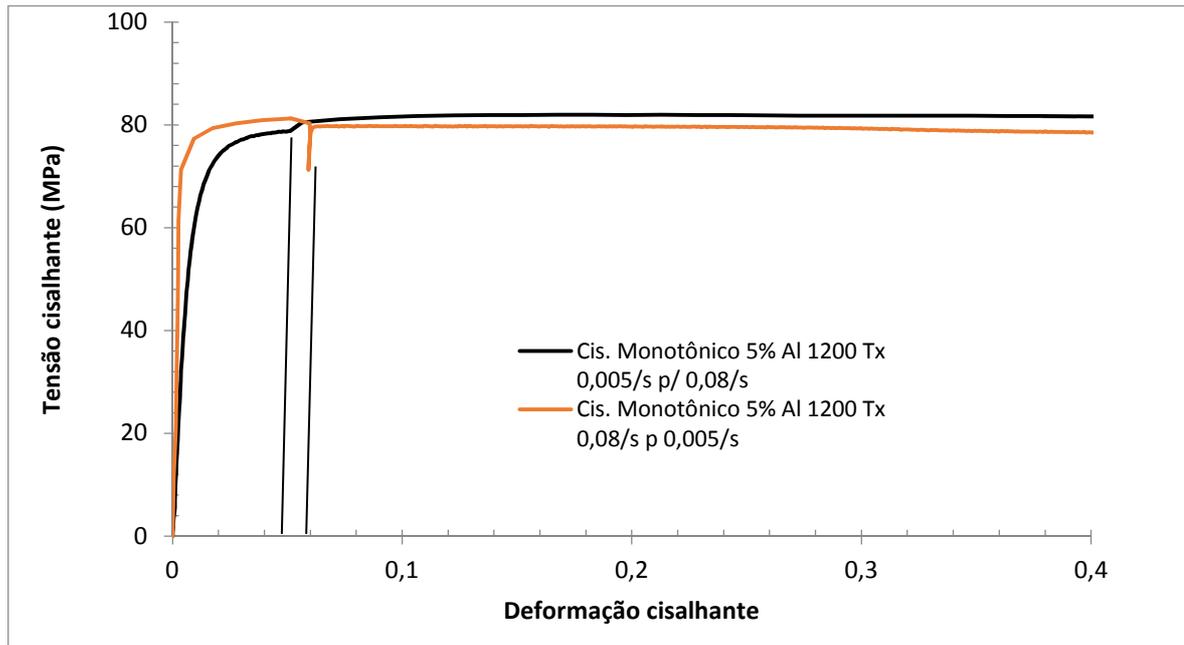
Taxa (s ⁻¹)	Limite de Resistência ao Cisalhamento (MPa)
0,005	77,36
0,08	82,28

Fonte: AUTOR.

6.4.2 Pré-Deformação de 5% taxa de 0,005/s para 0,08/s e taxa de 0,08/s para 0,005/s

Nesta condição o alumínio ASTM 1200 foi pré-deformado de 5% de deformação cisalhante com posterior mudança da taxa de deformação de 0,005/s para 0,08/s e de 0,08/s para 0,005/s, conforme mostrado no gráfico 2.

Gráfico 2 - Cisalhamento monotônico com taxa variando.



Fonte: AUTOR.

Analisando o gráfico pode-se verificar uma mudança na resistência mecânica do material devido a mudança da taxa de deformação, no caso em que houve aumento na taxa de deformação, de 0,005/s para 0,08/s, o alumínio sofreu um endurecimento de 1,70 MPa.

Quando foi imposta a diminuição da taxa de deformação de 0,08/s para 0,005/s o amaciamento foi igual a 9,07 MPa. Nesta circunstância foi calculado o coeficiente de sensibilidade à mudança na taxa de deformação, m , conforme mostrado na tabela 7, o que comprova que o endurecimento foi menor se comparado ao amaciamento, respectivamente. A tabela 8 mostra o limite de resistência ao cisalhamento das amostras.

Tabela 7 - Coeficiente de sensibilidade m .

Taxa (s^{-1})	m
0,005 \rightarrow 0,08	0,0075
0,08 \rightarrow 0,005	0,0150

Fonte: AUTOR.

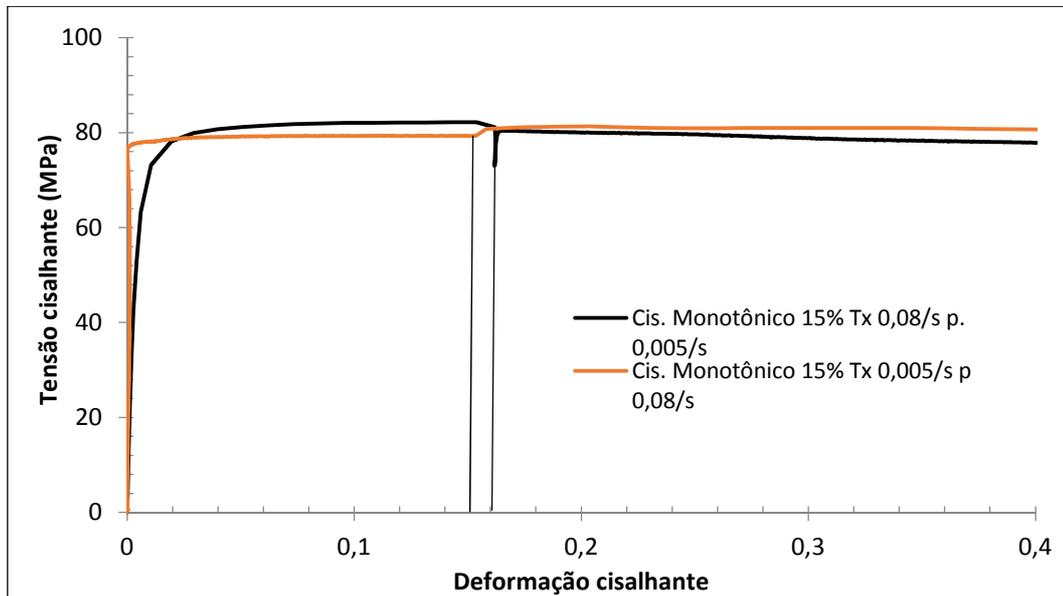
Tabela 8 - Limite de resistência ao cisalhamento.

Taxa (s ⁻¹)	Limite de Resistência ao Cisalhamento (MPa)
0,005 → 0,08	81,97
0,08 → 0,005	80,30

Fonte: AUTOR.

6.4.3 Pré-Deformação de 15% taxa de 0,005/s para 0,08/s e taxa de 0,08/s para 0,005/s

No último ensaio realizado os corpos de prova foram pré-deformados em 15% e submetidos a uma mudança de taxa de cisalhamento de 0,005/s para 0,08/s e o inverso 0,08/s para 0,005/s. A partir dos resultados foi possível montar o gráfico 3.

Gráfico 3 - Cisalhamento monotônico com taxa variando.

Fonte: AUTOR.

A mudança na taxa de deformação implica na variação da resistência mecânica como podemos ver no gráfico, analisando o cisalhamento monotônico com decréscimo na taxa de 0,08/s para 0,005/s podemos verificar um amaciamento do material por volta de 8,10 MPa, e no caso em que houve aumento da taxa de cisalhamento o alumínio encruou 2,10 MPa. O coeficiente de sensibilidade m , conforme calculado e demonstrado na tabela 9 confirma a

maior sensibilidade do alumínio 1200 no sentido do amaciamento, o que também ocorreu no caso em que a pré-deformação foi de 5%. A tabela 10 mostra os valores do limite de resistência ao cisalhamento neste ensaio.

Tabela 9 - Coeficiente de sensibilidade m.

Taxa (s ⁻¹)	<i>m</i>
0,005 → 0,08	0,0087
0,08 → 0,005	0,0379

Fonte: AUTOR.

Tabela 10 - Limite de resistência ao cisalhamento.

Taxa (s ⁻¹)	Limite de Resistência ao Cisalhamento (MPa)
0,005 → 0,08	81,29
0,08 → 0,005	80,43

Fonte: AUTOR.

6.4.4 Aspecto Superficial do Alumínio após o Ensaio de Cisalhamento

As amostras foram fotografadas antes e após o ensaio de cisalhamento para uma análise visual da deformação provocadas nestas pelo ensaio, conforme as condições de solicitação aplicadas.

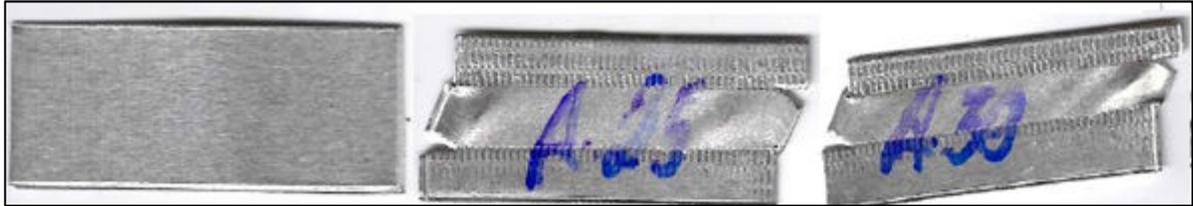
Figura 27 - Amostras recebida, taxa 0,005/s e taxa 0,08/s.



Fonte: AUTOR.

A figura 27 permite visualizar as amostras após o ensaio de cisalhamento com taxa de 0,005/s e 0,08/s. A amostra que foi submetida a menor taxa de cisalhamento não foi muito afetada superficialmente, mesmo tendo iniciado seu rompimento. Já na maior taxa de cisalhamento a liga de alumínio 1200, apresentou considerável deformação superficial, evidenciada pelo seu aspecto superficial.

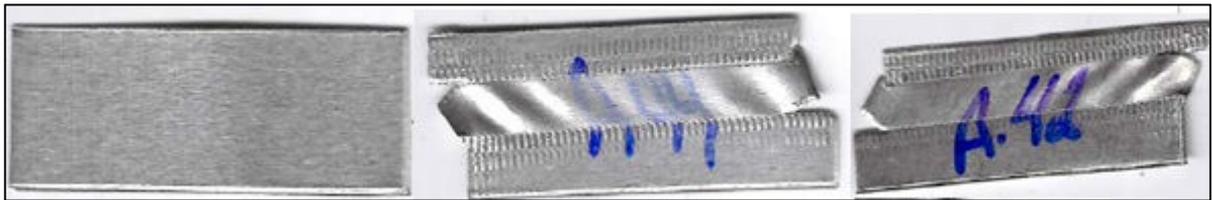
Figura 28 - Amostra recebida, taxa 0,005/s - 0,08/s e taxa 0,08/s - 0,005/s.



Fonte: AUTOR.

A figura 28 é correspondente ao ensaio de cisalhamento com pré-deformação em 5% em que houve uma variação na taxa de deformação o que gerou nas amostras uma deformação alta, evidenciando seu rompimento nas duas variações de taxa. O aspecto superficial permite visualizar uma semelhança na geometria do rompimento nos dois casos.

Figura 29 - Amostra recebida, taxa 0,005/s - 0,08/s e taxa 0,08/s - 0,005/s.



Fonte: AUTOR.

No último ensaio, mostrado na figura 29, o alumínio foi pré-deformado em 15% e submetido a variações na taxa de cisalhamento, evidenciando um aspecto superficial no qual o alumínio sofreu mais deformação. Este ensaio foi o que mais solicitou a amostra da liga 1200 e que esta ficou mais danificada superficialmente, com defeitos superficiais no formato de “escamas”.

6.4.5 Variação de M com a Condição de Solicitação no Ensaio de Cisalhamento

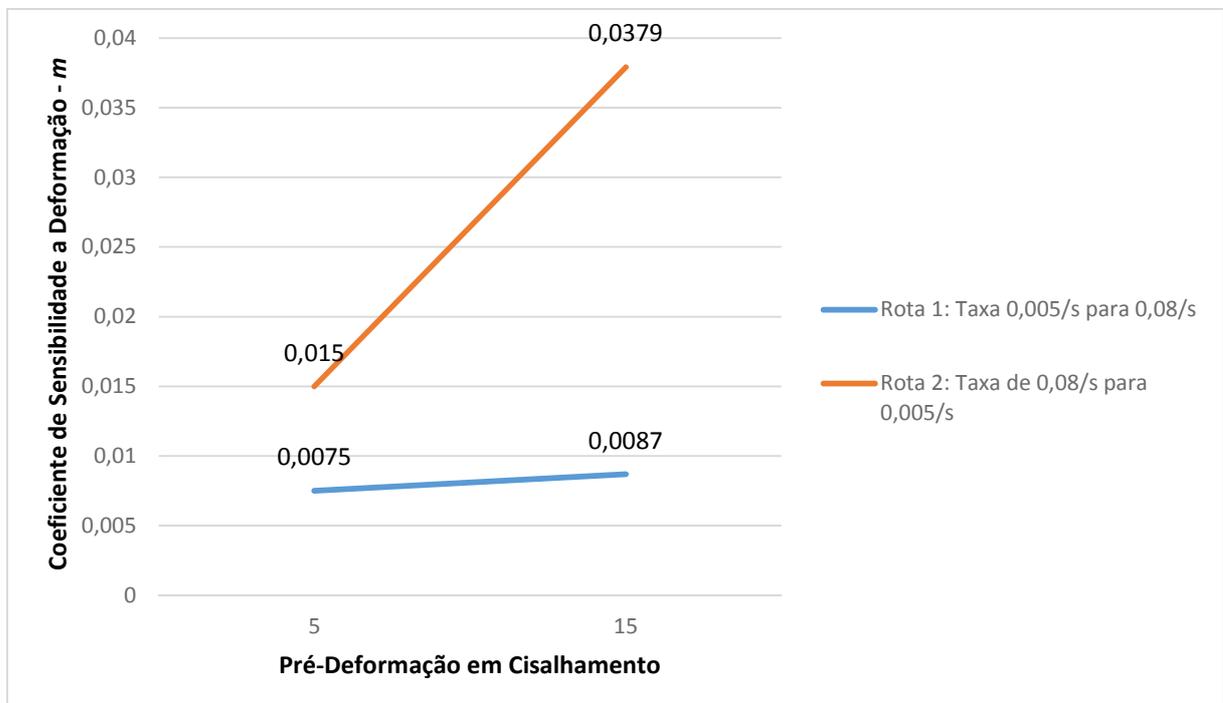
A variação do coeficiente de sensibilidade a mudança na taxa de deformação – m , demonstra a intensidade da mudança da taxa de deformação e o impacto que acarreta no material. Assim valores de m maiores indicam que para aquela condição de carregamento, a sensibilidade da tensão e conseqüentemente dos efeitos desta como a alteração na resistência mecânica foi maior. A tabela 11 e o gráfico 4 mostram qualitativamente estes parâmetros e a partir deles é possível fazer algumas considerações.

Tabela 11 - Pré-deformação em função da taxa de deformação.

Pré-Deformação (%)	0,005/s → 0,08/s	0,08/s → 0,005/s
5	0,0075	0,0150
15	0,0087	0,0379

Fonte: AUTOR.

Gráfico 4 - Variação do coeficiente m com a taxa de deformação



Fonte: AUTOR.

A partir do gráfico vemos claramente a maior sensibilidade da liga de alumínio 1200, ao amaciamento – rota 2. Aumentando a pré-deformação em cisalhamento o alumínio sofre

uma influência significativamente superior no sentido do decaimento de sua resistência mecânica. A rota 1, em que houve o endurecimento do alumínio demonstra que este metal sofre pouca sensibilidade na mudança da pré-deformação, o que é justificado pela alta energia de falha de empilhamento do alumínio.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou o comportamento da liga de alumínio ASTM/ABNT 1200, sendo esta uma das ligas mais puras contendo alumínio. Os resultados dos ensaios mostraram uma compatibilidade com os padrões definidos pela produtora, Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais.

Os ensaios permitiram analisar o comportamento mecânico desta liga variando as solicitações mecânicas, o que permitiu uma investigação do comportamento e dos limites do alumínio, utilizado no dia-a-dia das pessoas em diversas aplicações como produção de utensílios domésticos, peças estampadas, chapas para decoração e outras.

O comportamento mecânico do alumínio ASTM 1200 foi caracterizado com uso da técnica de ensaio de cisalhamento para duas taxas de deformação, 0,005/s e 0,08/s, verificando-se:

a) o baixo endurecimento do alumínio ASTM 1200 após a mudança da taxa de deformação de 0,005/s para 0,08/s para ambos os valores de pré-deformação em cisalhamento, e o amaciamento em escala muito superior quando houve redução na taxa de deformação de 0,08/s para 0,005/s;

b) verificou-se que a sensibilidade da tensão à mudança da taxa de deformação foi maior para o valor de 15% em pré-deformação cisalhante, quando a taxa variou de 0,08/s para 0,005/s;

c) o aspecto superficial do alumínio quando submetido a pré-deformação de 15% e ensaio de cisalhamento com taxas variando de 0,005/s para 0,08/s e vice-versa, evidenciou defeitos do tipo “escama” na superfície do alumínio, o que leva a crer que em certas condições de uso isto poderá ocorrer.

d) os resultados dos ensaios mostraram uma compatibilidade com os padrões definidos pela produtora, Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E-140: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. West Conshohocken: ASTM International, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. 2. ed. São Paulo, SP, 2007, 68 p.

BATISTA, T.M.S. **Estudo do comportamento mecânico do aço AISI 409 após uma operação de estampagem**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 71 páginas, 2015.

BENAZZI JUNIOR, Ivar; CAVERSAN, Elpidio Gilson. **Tecnologia de Estampagem 1 - Corte**. 2012. Disponível em: <http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/apostila_de_estampo_fatec-220813-2.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2016.

BORODACHENKOVA, Marina et al. **Numerical simulation of the mechanical response during strain path change: application to Zn alloys**. Procedia Engineering, Nagoya, p.1300-1305, 2014.

BOUVIER, S. et al. **Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains**. Journal Of Materials Processing Technology. Villeteuse, p. 96-103. 13 set. 2005.

BUECKEN, Francisco. **Tecnologia do alumínio**. Rio de Janeiro: Edições Melhoramentos, 1943.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

COBDEN, Ron; ALCAN; BANBURRY. **Aluminium physical properties, characteristics and alloys**. 1994. Disponível em: <<http://www.alueurope.eu/>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO - CBA. **Laminados de alumínio**. 2002. Disponível em: <<http://www.vmetais.com.br/pt-BR/Negocios/Aluminio/Documents/CatálogoLaminados.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2015.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 660 p.

ESSEL ELETROMECAÂNICA. **Ensaio de Cisalhamento**. Disponível em: <<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa07.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2015.

FAKIR, O. et al. **Predicting effect of temperature, strain rate and strain path changes on forming limit of lightweight sheet metal alloys.** Procedia Engineering 81. Nagoya, p. 736-741. 19. out. 2014.

JUDICE, Flávia; PERLINGEIRO, Mayra. **RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS IX.** 2005. Disponível em: <www.uff.br/resmatcivil/Downloads/ResMatIX/apostila_resmatIX.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2015.

LOPES, W. **Efeito da pré-deformação e direção de sollicitação no comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 430E com uso do ensaio de cisalhamento para alterar a trajetória de deformação.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 124p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

MANIK, Tomas; HOLMEDAL, Bjørn; HOPPERSTAD, Odd Sture. **Strain-path change induced transients in flow stress, work hardening and r-values in aluminum.** International Journal Of Plasticity. Trondheim, p. 1-20. jan. 2015.

MINATEL, Rogério. **Um estudo comparativo sobre a recristalização de chapas de alumínio AA1200 e AA3003 obtidas por lingotamento contínuo (twin roll caster) e por fundição de placas (direct chill).** 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP, São Paulo, 2009.

NESTEROVA, E.v.; BACROIX, B.; TEODOSIU, C.. **Experimental observation of microstructure evolution under strain-path changes in low-carbon IF steel.** Materials Science And Engineering, Villetaneuse, p.495-499, 2001.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 287 p.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **Aluminum Alloys: Selection and Applications.** Washington, D.C: The Aluminum Association, Inc., 1998. 24 p.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott. **Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes.** New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. 1309 p.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984.