Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Aeroespacial

SENSIBILIDADE À TAXA DE DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO

Autor: Davi Matias Dutra da Silva
Orientadora: Dra. Rita de Cássia Silva

Brasília, DF
2020

DAVI MATIAS DUTRA DA SILVA

SENSIBILIDADE À TAXA DE DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS SUBMETIDOS AO ENSAIO DE TRAÇÃO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Orientadora: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva

Brasília, DF

2020

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Dutra, Davi Matias.
Sensibilidade à taxa de deformação em materiais submetidos ao ensaio de tração / Davi Matias Dutra da Silva. Brasília: UnB, 2020. 69 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2020. Orientação: Rita de Cássia Silva.

1. Taxa de Deformação. 2. Tensão de Escoamento. 3. Parâmetros de Johnson Cook. I Cássia Silva, Rita. II. Sensibilidade à taxa de deformação em materiais submetidos ao ensaio de tração.

CDU Classificação

REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Davi Matias Dutra da Silva

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação ____/____/2020) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Profa. Dra.: Rita de Cássia Silva, UnB/ FGA
Orientadora

Prof. Dr.: Alessandro B. de S. Oliveira, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr.: Domenico Simone, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF

2020

RESUMO

A sensibilidade à taxa de deformação de cada material não deve ser negligenciada, pois a mesma pode impactar diretamente nas propriedades do material. Visto que a tensão de escoamento aumenta com o incremento da taxa de deformação, uma análise minuciosa do componente estrutural deve ser realizada utilizando o método experimental adequado, pois ao se utilizar altas taxas de deformação trabalhos experimentais comprovam que o ensaio de tração necessita ser realizado em equipamentos específicos, como a barra de Hopkinson. A tensão de escoamento é o parâmetro limitador mais utilizado em projetos de engenharia, assim definir se um componente estrutural atingirá o limite de escoamento é um parâmetro essencial para um projeto que deve apresentar um alto grau de confiabilidade, pois se deseja que sua solicitação esteja dentro da fase elástica. No entanto, em projetos que são submetidos a carregamentos de impacto, os materiais são submetidos a altas taxas de deformação ou de velocidades. O modelo constitutivo de fundamentação mecânica empírica de Johnson Cook será utilizado para descrever o comportamento mecânico do alumínio AA1200 e do aço inox 304, pois este é o método mais utilizado ao se trabalhar com materiais dúcteis submetidos a condições de alta taxa de deformação em ensaios de tração, controlando tanto a taxa de deformação como a velocidade de descolamento do cilindro durante o ensaio.

Palavras-chave: Taxa de Deformação, Tensão de Escoamento, Parâmetros de Johnson Cook.

ABSTRACT

The strain rate sensitivity of each material should not be neglected because that can directly impact the properties of the material. Since the yield strength increase with the increase of the strain rate thorough analysis of the structural component must be performed using the appropriate experimental method. When using high strain rates experimental works proves that the tensile test needs to be carried out in specific equipment, such as the Hopkinson bar. The yield strength is the limiting parameter most used in engineering projects so defining whether a structural component will reach the yield strength limit is an essential parameter for a project that must have high degree of reliability because it's desired that your request should be in the elastic phase. However, in designs that are subject to impact loads, the material is subjected to high strain rates or high speed. Johnson Cook's model of empirical mechanical foundation will be used to describe the mechanical behavior of aluminum AA1200 and stainless steel 304. Johnson Cook's model is the most used method when working with ductile materials subjected to conditions of high strain rates in tests of traction, controlling the strain rate and the speed of detachment of the cylinder during the test.

Keywords: Strain Rate, Yield stress, Johnson Cook's Parameter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 A) Resultado da colisão de um pássaro com a fuselagem do motor de um Boeing 737-400. B) Impacto de um pássaro com um helicóptero.. 14

Figura 2 Método da bala de canhão, utilizada para modelar zona danificada pelo impacto de pássaros. 15

Figura 3 Carregamento aplicado na sessão transversal (área útil utilizada para cálculos)..... 21

Figura 4 Limite proporcionalidade (P) na curva (σ x ε) Alumínio..... 23

Figura 5 Comparação entre os comportamentos típicos das curvas (σ x ε) de engenharia e tensão-deformação verdadeira em tração.. 24

Figura 6 Simulação ensaio de tração do alumínio no Abaqus. 26

Figura 7 Simulação ensaio de tração do Inox 304 no Abaqus. 26

Figura 8 Máquina de ensaio de tração Instron 8801. 31

Figura 9 Progresso típico de um ensaio de tração. 32

Figura 10 CP antes e depois do ensaio de Tração. 32

Figura 11 Corpo Prova de Alumínio após a falha. 33

Figura 12 Corpo Prova de Aço Inox 304 após a falha. 33

Figura 13 Curva (σ x ε)Alumínio Abaqus. 34

Figura 14 Curva (σ x ε) Aço Inox 304 Abaqus. 34

Figura 15 Cotas Corpo de Prova Norma ASTM E 8M 37

Figura 16 Corpo de Prova Norma ASTM E 8M (usado nos ensaios). 37

Figura 17 Corpos de Prova (Alumínio) após ensaio destrutivo de tração. 41

Figura 18 Curva σ x ε (Controle de Velocidade Alumínio). 42

Figura 19 Ajuste J-C Alumínio 6 mm/s. 42

Figura 20 Ajuste J-C Alumínio 50 mm/s. 43

Figura 21 Ajuste J-C Alumínio 100 mm/s. 43

Figura 22 Corpos de Prova (Aço Inox 304) após ensaio destrutivo de tração. ... 43

Figura 23 Curva σ x ε (Controle Velocidade Inox). 44

Figura 24 Ajuste J-C Aço Inox 304 (1 mm/s). 45
Figura 25 Ajuste J-C Aço Inox 304 (10 mm/s). 45
Figura 26 Ajuste J-C Aço Inox 304 (57 mm/s). 45
Figura 27 Ajuste J-C Aço Inox 304 (100 mm/s). 46
Figura 28 Ajuste J-C Aço Inox 304 (200 mm/s). 46
Figura 29 Corpos de Prova (Alumínio) após ensaio destrutivo de tração. 48
Figura 30 Curva σ x ε (Controle de Taxa de Deformação Alumínio). 49
Figura 31 Ajuste J-C Alumínio (10 /s). 49
Figura 32 Ajuste J-C Alumínio (100 /s). 50
Figura 33 Ajuste J-C Alumínio (1000 /s). 50
Figura 34 Alongamento (%) do CP para diferentes taxas de deformação. 51
Figura 35 Corpos de Prova (Aço Inox 304) após ensaio destrutivo de tração. ... 51
Figura 36 Curva σ x ε (Controle de Taxa de Deformação Inox). 51
Figura 37 Ajuste J-C Aço Inox 304 (100 /s). 52
Figura 38 Ajuste J-C Aço Inox 304 (1000 /s). 52
Figura 39 Relação entre lnε e lnσ-A 53
Figura 40 Relação entre lnε e ln(σ-A) Abaqus. 54
Figura 41 Relação entre lnσ-A e lnε nas condições de referência.. 54
Figura 42 Método Mínimos Quadrados. 56
Figura 43 Relação entre Lnεε0 e σA + Bεn 56
Figura 44 Tensão de Escoamento e Corpo de Prova Alumínio 57
Figura 45 Tensão Engenharia, Verdadeira e de Johnson Cook 58
Figura 46 Relação entre lnε e lnσ-A 59
Figura 47 Relação entre lnσ-A e lnε nas condições de referência. 59
Figura 48 relação entre Lnεε0 e σA + Bεn 61
Figura 49 Parâmetros de Johnson Cook Aço Inox 304 (Comparação Parâmetros A e B) 62
Figura 50 Ajuste de Johnson Cook Aço Inox 304 63

LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 1 Metodologia empregada para ensaio do Alumínio. 39

Fluxograma 2 Metodologia empregada para ensaio do Aço Inox 304. 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição Química das séries de Alumínio 35

Tabela 2 Nomenclatura dos Tratamentos Térmicos (Alumínio) 35

Tabela 3 Propriedades Liga AA1200 36

Tabela 4 Composição Química em (wt %) 37

Tabela 5 Propriedades Aço Inox 304 37

Tabela 6 Dimensões Corpo Prova (CP) Norma ASTM 2000 (E 8M) 38

Tabela 7 Classificação das técnicas de testes de acordo com a taxa de deformação 47

Tabela 8 Métodos Experimentais para altas taxas de deformação 47

Tabela 9 Parâmetros de Johnson Cook para o Alumínio AA1200. 54

Tabela 10 Pontos curva (σ x ε) para as taxas de deformação de ($10\ s\text{-}1, 100\ s\text{-}1,\ 1000\ s\text{-}1$) adotando $\varepsilon 0 = 1\ s\text{-}1$. 55

Tabela 11 Parâmetros de J-C para diferentes taxas de deformação (Alumínio)... 58

Tabela 12 Parâmetros de Johnson Cook para o Aço Inox 304. 59

Tabela 13 Pontos das curvas Tensão X Deformação para as taxas de deformação de ($0.00175\ s\text{-}1, 0.0175\ s\text{-}1, 0.175\ s\text{-}1, 1\ s\text{-}1, 1.75\ s\text{-}1, 3.58\ s\text{-}1, 10\ s\text{-}1, 100\ s\text{-}1,$ $1000\ s\text{-}1$ adotando $\varepsilon 0 = 1\ s\text{-}1$. 60

Tabela 14 Parâmetros de J-C para diferentes taxas de deformação INOX 304 ... 62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO 11
1.2. MOTIVAÇÃO 15
1.3. OBJETIVOS 17
1.3.1. Objetivos Gerais 17
1.3.2. Objetivos Específicos 17
2. IMPACTO 18
2.1. NATUREZA DO CARREGAMENTO DE IMPACTO 18
2.2. ENSAIOS MECÂNICOS PARA IMPACTO 18
2.3. ENSAIOS MECÂNICOS 19
2.4. EQUAÇÕES BÁSICAS 20
2.5. LIMITE DE ESCOAMENTO 22
2.6. CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO 24
2.7. MODELOS CONSTITUTIVOS 26
3. ENSAIO DE TRAÇÃO 31
3.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS 35
3.2. CORPO DE PROVA (NORMA ASTM 2000) E 8M 37
3.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 38
3.4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE 40
3.4.1. Controle da Velocidade 40
3.4.1.1. Alumínio AA1200 41
3.4.1.2. Aço Inox 304 43
3.4.2. Controle da Taxa de Deformação 46
3.4.2.1. Alumínio 48
3.4.2.2. Aço Inox 304 51
4. ANÁLISE DAS CONSTANTES MODELO DE JOHNSON COOK 53
4.1. CONSTANTES JOHNSON COOK ALUMÍNIO 53
4.2. CONSTANTES JOHNSON COOK AÇO INOX 304 58
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 64
5.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

1. INTRODUÇÃO

Estruturas aeroespaciais estão cada vez mais desafiadoras, pois os projetos precisam apresentar um alto grau de confiabilidade durante sua vida útil. Por isso os materiais utilizados na indústria aeroespacial precisam de métodos de ensaios destrutivos que abranjam diversas condições de trabalho em que a estrutura poderá ser submetida.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda mundial por estruturas aeronáuticas com capacidade para resistir a eventos de colisão, que é um dos requisitos de certificação de uma aeronave deve apresentar uma metodologia de conformidade coerente com os procedimentos de validação e verificação. Os métodos atuais de design do impacto utilizam uma variedade de métodos empíricos e semi-empíricos para determinar o efeito do impacto em uma aeronave. Como resultado das incertezas ao se adotar métodos semi-empíricos para representar o impacto, as estruturas necessitam de um programa de testes mais extenso, aumentando o tempo e o custo da certificação (GEORDIADIS et al., 2008).

O FAA (Federal Aviation Administration) que é uma entidade governamental dos Estados Unidos, responsável pelos regulamentos e todos os aspectos da aviação civil nos Estados Unidos em sua nota técnica FAR parte 25, Subparte 25.571 “Avaliação de tolerância à danos e fadiga da estrutura”, define os requisitos de aeronavegabilidade e colisão para uma aeronave. Na parte geral define que uma aeronave necessita de uma avaliação da resistência, do projeto detalhado e que a fabricação deve conter: falha catastrófica devido a fadiga, corrosão, defeitos de fabricação ou danos acidentais que serão evitados durante sua vida operacional. Na parte especifica de tolerância a danos, o avião deve ser capaz de completar com sucesso um voo durante o qual prováveis danos estruturais ocorram, como exemplo, o resultado do impacto com um pássaro de 4 libras (1.81 Kg) quando a velocidade do avião em relação ao pássaro ao longo da trajetória de voo do avião for igual a V_c(Velocidade de cruzeiro) ao nível do mar ou 0.85*V_c a 8.000ft (2438.4 metros) (FAA CFR, 2021).

A falha representa à perda da capacidade de uma estrutura em suportar solicitações em sua fase elástica, e é resultado da acumulação de micro defeitos

que constituirão o dano. A falha não resulta necessariamente no insucesso ou colapso de uma estrutura (MORALES, 2013). Os danos provenientes dos impactos de baixa velocidade são considerados potencialmente perigosos, pois o dano pode passar despercebido em revisões rotineiras. Atualmente, 27% do custo com o ciclo de vida de uma aeronave média é gasto com inspeção e reparação (HALL; CONQUEST, 1999), esse valor não inclui o tempo que a aeronave ficará fora de operação devido ao processo de inspeção ou manutenção.

O impacto de projéteis na estrutura de uma aeronave pode causar danos catastróficos e tem sido objeto de grande preocupação para empresas aéreas.

Em janeiro de 2009, o problema de colisão com pássaros ganhou repercussão mundial após a aterrisagem de emergência do Airbus A320 da US Airways, no Rio Hudson, em Nova York, após a sucção de dois gansos canadenses pelo fan do motor. O estrago do impacto de um pássaro com uma fuselagem do motor é ilustrado na Fig. (1A). A ameaça de colisão de pássaros com aeronaves não é um problema recente, ele surgiu junto com a aviação há mais de 100 anos atrás. Os primeiros registros de contato com pássaros foram registrados pelos irmãos Wright no ano de 1905. As estruturas externas de uma aeronave estão expostas a diversos cenários de danos por objetos estranhos, como granizo, fragmentos de pista ou impacto de borracha de pneu, cerca de 90% de todas incidências hoje são causadas por colisões com pássaros (HEIMBS, 2011). Para enfrentamento deste problema as estruturas aeronáuticas precisam possuir alta resistência ao impacto de pássaros. Impactos de pássaros e outros animais selvagens em aeronaves causam um dano anual na faixa de 600 milhões de dólares para a indústria de aviação somente nos Estados Unidos e algo em torno de 3 bilhões de dólares na aviação mundial (WALVEKAR, 2010).

No setor aeroespacial grande parte dos componentes são fabricados com ligas e materiais compósitos, materiais que são produzidos em escala industrial, mas suas propriedades finais não são absolutas, onde o controle de uma similaridade completa é quase impossível, ou seja, semelhança geométrica, cinemática e dinâmica (OSHIRO, 2004). Com isso a padronização da produção e dos métodos de teste destes materiais é essencial e devem ser otimizadas constantemente. Tais estruturas devem possuir um elevado grau de confiança, em virtude de que quase sempre necessitam do controle manual de um humano, além de custarem milhares de dólares. Desta forma o monitoramento continuo e em tempo real durante os

processos de fabricação, teste e operação das estruturas serão essenciais para garantir a vida útil estrutural e o sucesso de uma missão.

Por este motivo, o desenvolvimento mundial está se concentrando em extensos testes combinados com novas soluções estruturais, a fim de evitar danos nas partes impactadas das aeronaves. Muitas novas soluções são resultadas de esforços conjuntos e intensivos dos fornecedores de materiais. Uma classe de materiais de interesse para aplicações de colisão com pássaros são espumas metálicas ou orgânicas, esferas ocas e outras estruturas celulares. Alguns estudos realizados por projetos de financiamento europeu apresentam o potencial interesse no uso de materiais celulares em aplicações aeronáuticas para absorção de energia mecânica e acústica, são eles: METEOR, SAFE e LISA (HANSSEN, 2006).

Em 2011 Reglero et al. realizou um experimento na expectativa de remodelar o bordo de fuga das asas do avião em que a espuma metálica funcione como enchimento interno da asa. As solicitações mecânicas nesta estrutura são críticas, e é importante considerar que as asas de avião são estruturas ocas reforçadas internamente com nervuras posicionadas em um plano perpendicular ao eixo da asa. Um dos testes mais críticos que a estrutura deve superar é o teste de impacto de colisão com pássaros, que simula o risco potencial de um impacto com pássaros durante a decolagem ou pouso. Para isso utilizou projéteis de aço inoxidável lançados com um sistema de ar comprimido a 165 m/s e demonstrou que o enchimento com espuma de alumínio melhorou o comportamento da deformação global da asa (REGLERO et al., 2011).

Não há muitos artigos disponíveis sobre o estudo do impacto de um pássaro com um helicóptero Fig. (1B). De 1990 a 2009 helicópteros estiveram envolvidos em 491 (0,5 por cento) dos 99420 ataques de pássaros relatados em aeronaves civis (HEDAYATI, 2014).

A liga 2024 é amplamente utilizada em estruturas aeronáuticas devido às suas propriedades mecânicas específicas e sua capacidade de tolerância a danos. A liga AA 2024T3 proposta para estudos futuros é uma liga de alta resistência com uma microestrutura complexa, que compreende a matriz de alumínio, bem como varias partículas intermetálicas diferentes (ALEXOPOULOS et al., 2016). A Liga de alumínio AA2024 T3 é utilizada na indústria aeronáutica na fabricação da asa e da fuselagem, que são estruturas submetidas a tensão, e necessitam de excelentes propriedades mecânicas, como resistência, tenacidade, resistência à corrosão

dentre outras. As excelentes propriedades dessa liga dependem até um certo ponto, dos precipitados durante o tratamento de envelhecimento por fluência (LIN, XIA, JIANG, ZHOU, & Li, 2013).

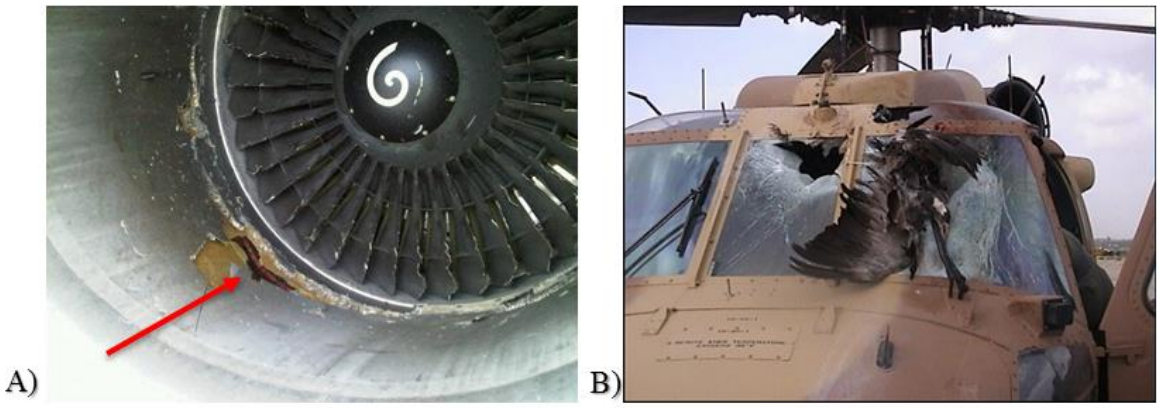


Figura 1. A) Resultado da colisão de um pássaro com a fuselagem do motor de um Boeing 737-400. B) Impacto de um pássaro com um helicóptero. Fonte: Figuras extraídas dos sites http://english4aviation.pbworks.com/w/page/23998969/Bird%20strike#Abirdandafighter em 23/04/2021 e https://www2.anac.gov.br/anacpedia/ing_por/tr632.htm em 23/04/2021.

Em 2006 Hanssen et al. desenvolveram um programa experimental para definir se um impacto de pássaro atravessaria ou não uma estrutura sandwich composta de painéis de alumínio AA2024 T3 com 0.8 mm de espessura. Os testes utilizaram velocidades que variam entre 138.1 – 195 m/s e em todos os casos, o impacto não conseguiu romper a estrutura. Os testes de impacto foram realizados pela empresa Saint Gobain Sully, uma empresa francesa certificada para qualificar para-brisas AIRBUS contra impactos de pássaros. A velocidade foi medida por sensores fotoelétricos ligados a um frequencímetro, as massas adotadas para os pássaros foram de 1.81 Kg, dentro do padrão de certificação FAA americano (HANSSEN, 2006).

Em 2008 Georgiadis et al. trabalharam com o método da bala de canhão, na qual se assume que o impacto da ave continua em seu caminho ininterrupto até remover toda estrutura em sua trajetória de impacto deixando uma lacuna por onde passa, como ilustrado na Fig. (2), essa abordagem é muito utilizada pois simplifica a determinação da resistência residual. Por meio deste programa de testes foi demostrado que as ferramentas de análise FE de última geração são capazes de simular o impacto de pássaros em estruturas compostas com precisão suficiente para validar seu uso como parte de uma metodologia de conformidade de certificação de colisão com pássaros (GEORDIADIS et al., 2008).

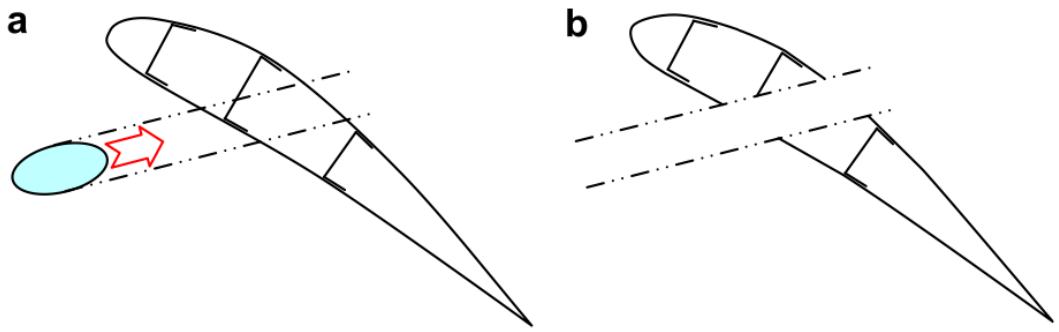


Figura 2. Método da bala de canhão, utilizada para modelar zona danificada pelo impacto de pássaros.

Um evento de colisão de um pássaro com uma estrutura aeronáutica tem duração aproximada de alguns milissegundos e é uma interação extremamente complexa entre a estrutura alvo e as cargas não lineares de impacto geradas durante o impacto. Existe um forte acoplamento entre as cargas de impacto e a deformação da estrutura alvo. Tanto a estrutura do alvo quanto a do projétil sofrem severas deformações (NIZAMPATNAM, 2007).

Os experimentos para modelagem de impacto com estruturas aeronáuticas são extremamente dispendiosos, tanto no aspecto econômico quanto no aspecto de tempo. No entanto, o avanço da tecnologia proporciona aparatos experimentais que fornecem um conhecimento mais acurado do material. Os projetos devem procurar reduzir o numero de ensaios experimentais através de simulações numéricas do problema a ser enfrentado (CARMO, 2006).

Ligas de alumínio tratados termicamente podem sofrer significativas alterações em suas propriedades mecânicas dependendo do tratamento recebido. Estudos atuais apontam que algumas ligas de alumínio subenvelhecidas podem experimentar o fenômeno do autorreparo ou autocura (self healing), ou seja, quando solicitados mecanicamente, podem apresentar fechamento ou redução na velocidade de crescimento de trincas devido à introdução de tensões compressivas locais associadas à precipitação dinâmica de fases intermetálicas. (CAVALCANTE & SILVA, 2016)

1.2. MOTIVAÇÃO

As características de materiais submetidos a altas taxas de deformação são importantes em diversas aplicações de engenharia estrutural e de transformação de

metais. Partes frontais das estruturas de automóveis em condições de impacto legais e comerciais sofrem taxas de deformação de 300 s^{-1} , processos industriais com extrusão de alta velocidade e laminação submetem materiais a altas taxas de deformação e a um variado gradiente de temperatura (BENASSI, 2005). A simulação de colisão com pássaros é extremamente complexa devido a quantidade de variáveis envolvidas e apresentam altas taxas de deformação dos materiais (NIZAMPATNAM, 2007).

Em 2009 Buyuk et al., estudaram o comportamento de materiais amplamente utilizados na indústria aeronáutica, submetidos à altas taxas de deformação. Neste estudo o resultado de testes de impacto balístico foi comparado com simulações numéricas calibradas com os dados experimentais. Tendo em vista a necessidade de conhecer o comportamento de materiais quando submetidos à altas taxas de deformação, a FAA (Federal Aviation Administration) reuniu esforços no programa de caracterização dos materiais quando submetidos à altas taxas de deformação na prevenção de falhas catastróficas de aeronaves. Os dados da caracterização do material foram obtidos utilizando o método da barra de pressão de Kopkinson, que foram posteriormente empregados na simulação para avaliar a capacidade do modelo de Johnson Cook em representar a deformação de materiais submetidos à altas taxas de deformação (BUYUK et al., 2009).

Visando obter uma simulação numérica computacional mais elaborada que forneça precisão suficiente para validar um modelo experimental e assim reduzir a quantidade de ensaios mecânicos na estrutura, tal simulação deve ser calibrada com dados obtidos experimentalmente. Simulações numéricas envolvendo impacto de alta velocidade ainda são um desafio para engenharia, pois representar modelos constitutivos de materiais submetidos à altas taxas de deformação não é uma tarefa tão simples. Os dados referentes ao comportamento do material quando submetido à altas taxas de deformação não estão disponíveis facilmente na literatura. Os ensaios de tração disponíveis na literatura considerando os efeitos das taxas de deformação, frequentemente utilizam a velocidade constante durante o ensaio, assumindo que está seria equivalente à taxa de deformação também constante. Entretanto essa simplificação possui um erro de logica embutido, pois a velocidade medida no travessão é medida no inicio do ensaio, o que não se observa ao longo do ensaio, pois a taxa de deformação varia (NOBREGA, 2010). Desta forma o estudo de um único conjunto de parâmetros do modelo constitutivo do material, não

pode prever o desempenho do impacto balístico de um material com precisão, quando ocorre mudanças significativas ou transição no modo de deformação (BUYUK et al., 2009).

1.3. OBJETIVOS

Visando compreender o comportamento mecânico dos materiais comumente utilizados na aeronáutica expostos ao impacto, algumas propriedades desses materiais devem ser abordadas, por isso os objetivos do trabalho são:

1.3.1. Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho foi determinar uma sistemática de planejamento experimental para verificar posteriormente o efeito de altas taxas de deformação e altas velocidades de deslocamento do pistão da máquina de teste de tração no alumínio AA2024 T3 e AA7075. Para está abordagem preliminar foram utilizados o alumínio AA1200 e Aço Inox 304, pois o custo é bem menor e a disponibilidade de oferta no mercado é bem maior. Ao se utilizar dois tipos de matérias diferentes, a estratégia é confirmar se o aço é mais sensível ao efeito da taxa de deformação, no que se refere ao aumento de resistência ao escoamento.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar o ensaio de tração dos corpos de prova de alumínio AA1200 e Aço Inox 304, variando a taxa de deformação e a velocidade de deslocamento do pistão do ensaio.
- Analisar e verificar parâmetros para desenvolver uma metodologia apropriada para medição de propriedades mecânicas dinâmicas dos alumínios aeronáuticos AA2024 e AA7075, verificando a influência de diferentes estratégias de controle e de altas taxas de deformação.
- Calibração dos dados obtidos experimentalmente nos ensaios de tração utilizando o software Abaqus, abarcando somente o comportamento dos corpos de prova em seu regime elástico.
- Calcular as constantes do modelo de Johnson Cook que posteriormente serão utilizadas para a simulação numérica.

2. IMPACTO

Estudar a energia de impacto não é suficiente para prever completamente o efeito do impacto. A resposta para uma estrutura submetida ao impacto depende de vários fatores, que garantirão sua confiabilidade e segurança, dentre eles: geometria, material, velocidades do alvo e do corpo de impacto.

2.1. NATUREZA DO CARREGAMENTO DE IMPACTO

A ameaça do impacto pode assumir varias formas, desde uma pequena ferramenta caída, viajando a três ou quatro (metros por segundo) até disparos de pequenas armas de fogo viajando a centenas de metros por segundo. Nesses dois extremos, a resposta do componente estrutural provavelmente será completamente diferente. Sob condições de carregamento de impacto de baixa velocidade, onde o tempo de contato entre o projétil e o alvo é relativamente longo, toda a estrutura responde permitindo que a energia cinética seja acomodada em pontos bem distantes do ponto de impacto. A configuração geométrica do alvo é desejável, pois determinará a capacidade de absorção de energia. Broutman e Rotem demonstraram que aumentar o comprimento de uma viga reforçada com fibra de vidro aumenta a resposta ao impacto de baixa velocidade. No entanto, o carregamento de impacto de alta velocidade por um projétil leve tende a induzir uma forma mais localizada da resposta do alto, resultando na dissipação de energia sobre uma região comparativamente pequena (CANTWELL; MORTON, 1989).

2.2. ENSAIOS MECÂNICOS PARA IMPACTO

Em 2011 Gunawan, Dirgantara e Putra desenvolveram uma máquina de teste de impacto por esmagamento com um peso caído e concluíram que a máquina proporciona uma velocidade máxima de 10 m/s com massa variável de até 150 Kg.

Outro método de teste de impacto é o pêndulo de impacto Charpy, utilizado para fraturas dúcteis e frágeis. Este método é utilizado para avaliar a resistência à quebra por choque de flexão, indicando a quantidade de energia necessária para quebrar as amostras do teste sob condições específicas da amostra (ZHANG et al., 2020). Este método consiste em um martelo de pêndulo de massa e comprimento conhecidos, que é mantido a uma altura predeterminada e ao ser liberado colide com uma amostra entalhada de material.

Para testes de impacto dinâmicos o equipamento adequado são armas de gás leve, que consiste na aceleração do projétil ou corpo de impacto a uma velocidade determinada e permite que ele atinja o alvo em voo livre. O método é semelhante a um disparo de canhão, a diferença é que uma arma convencional utiliza a combustão de uma carga propelente e o canhão de gás leve utiliza um gás comprimido. Os canhões de gás leve podem ser usados para simular impactos balísticos de vários tamanhos e energias (RAHNER, 2012).

2.3. ENSAIOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas estáticas do alumínio são tabeladas e podem ser encontradas no manual do alumínio (ANSI, 1988). Entretanto as propriedades mecânicas dinâmicas desse material são extremamente limitadas, pois são propriedades que variam de acordo com o carregamento aplicado, desta forma carecem de um estudo mais elaborado dessas situações. As propriedades de tenacidade a fratura, alta performance em fadiga, grande tolerância ao dano e alta durabilidade (NAKAI & ETO, 2000) são fortemente dependentes do processo termomecânico de fabricação dos mesmos.

O teste de tração realizado no corpo de prova, consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial até sua ruptura (ABNT 6892, 2013). As deformações provocadas no material são uniformemente distribuídas ao longo do corpo de prova, durante o teste tanto a taxa de deformação como a velocidade podem ser controlados pelo software de controle da máquina de teste. Durante o ensaio de tração realizados com a liga de Alumínio 1200 e o Aço Inox 304, os valores de tensão e deformação variam quando se propõe realizar o teste com determinada estratégia de controle. As estratégias de controle adotadas neste trabalho foram: controle da taxa de deformação e controle da variação de velocidade. A uniformidade da deformação termina no momento em que a carga máxima suportada pelo material é atingida, neste momento o fenômeno da estricção (pescoço) começa a aparecer, geralmente no meio do corpo de prova. O modelo de corpo de prova adotado para os experimentos foi o E 8M, o qual tem a função de confinar a estricção na região central, ou seja, a região mais estreita do corpo de prova (ASTM E646, 1998).

A tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade, tensão de ruptura e alongamento total são parâmetros essenciais de uma estrutura e não

devem ser ignorados, visto que eles variam de acordo com o método de controle adotado para se realizar o ensaio de tração. Os testes foram realizados sem o clip gage (extensômetro dinâmico) 2620-601 (Instron), que é um equipamento que limita a região onde ocorrerá a falha, para isso é essencial conhecer a curva tensão versus deformação do material ensaiado. O equipamento não foi utilizado, porque a máquina foi submetida a velocidades de deslocamento máximas, o que poderia danificar o equipamento de medição. Sua utilização sem conhecer corretamente o comportamento da curva tensão versus deformação do material, poderia inutilizar alguns corpos de prova em que o rompimento ocorresse fora da região delimitada pelo clip gage (NOBREGA, 2010) e o objetivo do ensaio era conhecer a sensibilidade dos materiais ensaiados quando submetidos à altas taxas de deformação.

2.4. EQUAÇÕES BÁSICAS

Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até a deformação de aproximadamente 0,005. A partir desse ponto a tensão não é mais proporcional à deformação, deixando assim de obedecer a lei de Hooke Eq. (4). Quando o material é submetido a tensões superiores ao limite de escoamento, o material começa a experimentar uma deformação permanente e não recuperável, ou deformação plástica. O principio que norteia a maioria dos projetos de Engenharia é o escoamento. Para os materiais que experimentam uma transição elastoplástica gradual, o ponto de escoamento pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão versus deformação, também conhecido como limite de proporcionalidade (LE) representado na Fig. (4). Com o intuito de padronizar e otimizar a analise dos materiais, foi criada uma convenção definindo que o material começa a experimentar o escoamento a partir de uma pré-deformação especifica de 0.002, ao identificar esse ponto na curva tensão versus deformação, uma reta deve ser traçada paralelamente à porção elástica. Para os materiais que possuem uma região elástica não linear, a prática usual consiste em definir um limite de escoamento como sendo a tensão necessária para produzir uma determinada quantidade de deformação $\varepsilon = 0{,}005$ (*CALLISTER, 2002*).

O ensaio fornece a relação tensão x deformação do material, onde a tensão corresponde a força aplicada sobre a área da seção transversal.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma =$ Tensão, F = força e A = área da seção transversal

Os corpos de provas empregados nos ensaios de tração obedeceram à norma ASTM 2000 E 8M, as áreas uteis das seções transversais Fig. (3) utilizados para calculo foram:

$$A_{Aluminio} = 12.5\ mm * 5mm\ (Espessura) = 62.5\ mm \quad (2)$$

$$A_{\text{Inox 304}} = 12.5\ \text{mm} * 1.5\text{mm (Espessura)} = 18.75\ \text{mm} \quad (2.1)$$

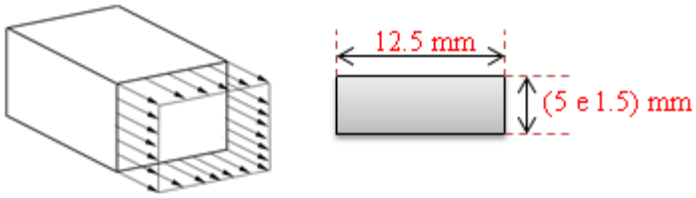


Figura 3. Carregamento aplicado na sessão transversal (área útil utilizada para cálculos).

Deformação é a variação de uma dimensão quando o corpo de prova é submetido a um esforço que modifica sua geometria plasticamente.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3)$$

Onde:

l_0 é o comprimento inicial do CP e l é o comprimento final do CP. A deformação é uma grandeza adimensional.

A lei de Hooke supõe que os materiais tenham um comportamento perfeitamente elástico e enuncia que a deformação apresentada por um material é diretamente proporcional à tensão nele aplicada, comportamento semelhante à uma mola, assim que a carga é retirada sua deformação imediatamente retorna para o valor zero. Desta forma, sempre que considerarmos a região elástica expressa no diagrama tensão versus deformação, e esta região apresentar uma linha retilínea (comportamento linear) diz-se que o material analisado obedece a lei de Hooke (*CALLISTER, 2002*).

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (4)$$

Onde:

E é o módulo de Elasticidade (Módulo de Young), indica a rigidez do material.

ε é a deformação.

2.5. LIMITE DE ESCOAMENTO

O coeficiente de encruamento “n” de um material é obtido através de um ensaio mecânico de tração ou de dureza. O ensaio mecânico de tração possui um comportamento elástico até o limite de escoamento, logo após o material ensaiado passa pela fase plástica, possibilitando identificar o fenômeno do encruamento, caracterizado pelo aumento continuo da tensão. O valor de “n” é uma constante do material, e sempre será inferior a um (ASTM E646, 1998). O valor de referencia de “n” define quão encruado o material será, quando arbitrado próximos de 1, o material será muito encruado e quando próximo de 0,5 o material será recozido (SOUZA, 1982).

Alguns materiais metálicos apresentam uma transição elastoplástica gradual entre a região elástica e plástica, desta forma o ponto de escoamento pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão versus deformação, este ponto é conhecido como limite de proporcionalidade, ponto P na Fig. (4). Esse ponto corresponde à tensão limite de proporcionalidade onde ocorre a transição de fases elástica para plástica. Essa tensão de escoamento é utilizada como parâmetro de controle em diversos projetos em que o material não pode se deformar durante sua vida útil, garantindo assim que o material seja solicitado somente até sua fase elástica (CALLISTER, 2002).

Figura 4. Limite proporcionalidade (P) na curva ($\sigma\ x\ \varepsilon$) Alumínio. Fonte: Produção do próprio autor

O parâmetro de encruamento do material pode ser definido como a capacidade de se deformar a frio durante uma solicitação de força num ensaio mecânico de tração, na qual o corpo de prova será submetido a um aumento continuo de tensão até sua falha.

Para se obter o coeficiente de encruamento n e o coeficiente de resistência ao escoamento primeiro será necessário obter as tensões e deformações verdadeiras.

Tensão Verdadeira

A tensão verdadeira deve ser determinada a partir de medições da carga e da área da seção transversal, ponto a ponto. No entanto é importante ressaltar que essa tensão verdadeira não corresponde à tensão de escoamento do material, pois a tensão de escoamento pressupõe um estado uniaxial de tensões.

$$\sigma_T = \sigma_E(1 + \varepsilon_E) \tag{5}$$

Deformação Verdadeira

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \tag{6}$$

As equações para tensão e deformação verdadeira são válidas somente até o surgimento da estricção (pescoço), além desse ponto, a tensão e deformação verdadeiras devem ser obtidas a partir de medição da carga, da área seção reta e do comprimento útil real.

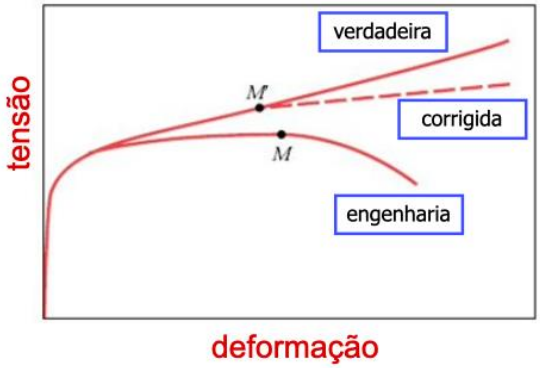


Figura 5. Comparação entre os comportamentos típicos das curvas $(\sigma\ x\ \varepsilon)$ de engenharia e tensão-deformação verdadeira em tração. O empescoçamento tem inicio no ponto M da curva de engenharia, que corresponde ao ponto M'na curva verdadeira (CALLISTER, 2002).

2.6. CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO

Ao se realizar um ensaio de tração em um corpo de prova de um material dúctil, critérios ou modelos de fundamentação mecânicos devem ser utilizados para determinar se um componente ou estrutura deverá ou não atingir o escoamento, esse processo de escoamento é dependente do material ensaiado e está diretamente relacionado com o rearranjo molecular do material (ROYLANCE D, 2001). Os modelos de plasticidade baseados na tensão de Von Mises ou critério de Tresca podem prever satisfatoriamente o inicio do escoamento de materiais dúcteis, no entanto é o ângulo de Lode que permite representar a falha em planos inclinados, como ocorre em testes de tração ou compressão uniaxial (MORALES, 2013). Alguns dos critérios mais utilizados para materiais dúcteis:

1. Critério de máxima tensão cisalhante ou de Tresca.
2. Critério de máxima energia de distorção ou de von Mises

Critério de máxima tensão Cisalhante (Tresca)

O critério de tresca define que a plastificação pode ocorrer quando for atingido o valor máximo de tensão de cisalhamento. Qualquer estado de tensão localizado dentro da superfície de escoamento é considerado um estado de tensão elástico. O critério de tresca assume que as tensões de tração e compressão são iguais, o que limita sua utilização para diversos materiais (M. A. ROMA BUZAR, P. W. PARTRIDGE e C. L. SAHLIT, 2002).

Critério de máxima energia de distorção ou de von Mises

Um material quando deformado por um carregamento externo tende a armazenar energia interna em todo o seu volume, o critério de escoamento de Von Mises afirma que o limite de escoamento máximo em um material dúctil é alcançado quando a energia de distorção por unidade do material é igual ou supera a energia de distorção por unidade de volume do mesmo material (HIBBELER, 2003).

Os dados experimentais do ensaio de tração, foram utilizados para modelar o comportamento do fluxo do material. Na aba material do software Abaqus é possível calibrar o comportamento do material com dados obtidos experimentalmente.

A Figura (6) mostra a distribuição de tensão equivalente obtida na simulação do teste de deformação pelo critério de Von Mises dentro do regime elástico. A região vermelha da simulação é praticamente a região útil utilizada para o teste de tração, representando a região onde o material experimentará a quantidade máxima de tensão. A localização da fratura ao submeter o CP ao ensaio de tração foram todas dentro da região vermelha. Tal simulação é essencial para um ensaio de tração mais preciso, pois auxilia na determinação de onde ocorrerá a falha ou rompimento no CP.

Calibração dos dados obtidos experimentalmente, através da simulação abarcando o regime elástico no software Abaqus.

A simulação apresentou o comportamento do alumínio somente até o inicio do escoamento, abarcando somente o comportamento elástico do material. Segundo Von Mises, a parte da tensão responsável pela distorção gera plasticidade. Portanto, a tensão equivalente de Von Mises compara a energia de distorção de um caso triaxial com a energia de distorção do ensaio de tração uniaxial.

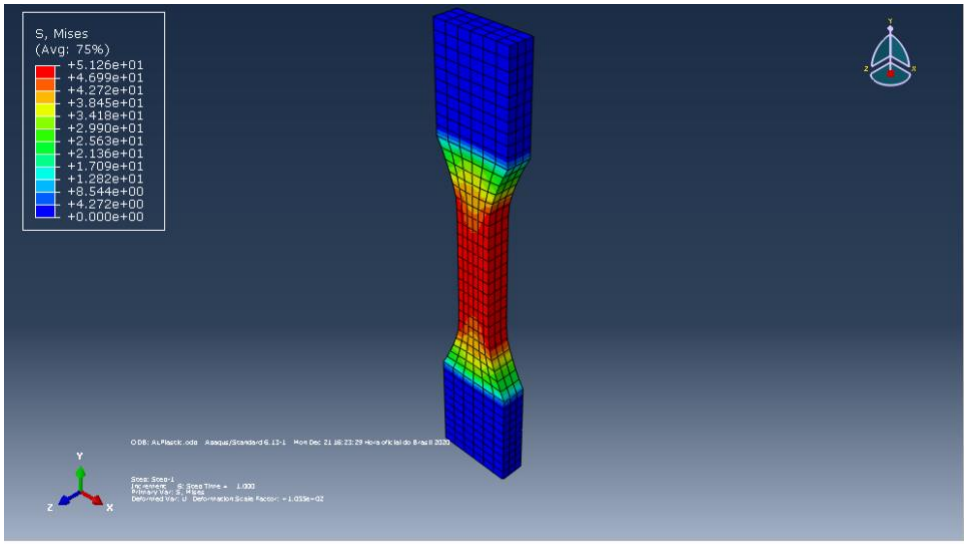


Figura 6. Simulação ensaio de tração do alumínio no Abaqus. Fonte: Produção do próprio autor

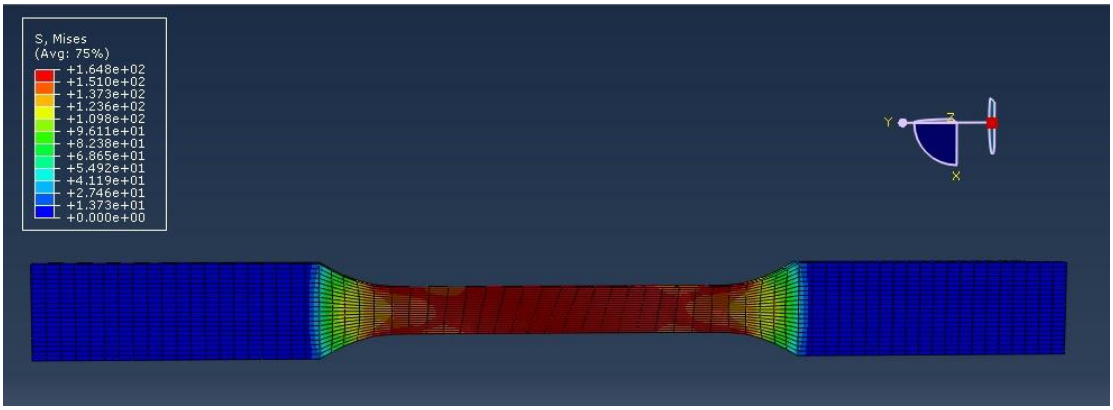


Figura 7. Simulação ensaio de tração do Inox 304 no Abaqus. Fonte: Produção do próprio autor

2.7. MODELOS CONSTITUTIVOS

O modelo constitutivo será utilizado como ferramenta para prever de forma satisfatória o comportamento da estrutura metálica quando submetida ao carregamento dinâmico. Modelos que relacionam tensão, deformação e taxas de deformação não são abordados na engenharia estrutural da forma que deveriam, desta forma os efeitos das taxas são negligenciados quando a estrutura metálica é submetida a algum carregamento na temperatura ambiente (NOBREGA, 2010).

Modelos constitutivos descrevem o comportamento do escoamento de um determinado material em função do encruamento mecânico. A taxa de deformação por encruamento e o amolecimento térmico são necessários para as condições encontradas nos processos de usinagem. Uma equação constitutiva ideal deve possuir o menor numero possível de constantes, que podem ser definidas facilmente com um número limitado de experimentos práticos, além de apresentar uma

definição básica pois os seus paramentos são utilizados em simulações computacionais. A literatura sobre modelos constitutivos de matérias apresenta diversos modelos com aplicações especificas ou gerais, eles são classificados em três categorias com base em seus métodos derivação e identificação de constantes, são eles: Modelos empíricos, semi-empíricos e baseados na física. Modelos empíricos descrevem o comportamento do escoamento de um material, são construídos a partir de observações empíricas e as constantes são definidas posteriormente ajustando a equação empírica aos dados experimentais de tensão – deformação obtidos com testes mecânicos. Devido a falta de uma base de fundamentação física, os modelos empíricos apresentam uma flexibilização restrita em relação ao ajuste de parâmetros, mas são amplamente utilizados pois apresentam um numero de constantes bem limitado e estão disponíveis na literatura para diversos materiais (GURASAMY, 2017). Os modelos constitutivos mais utilizados são:

- Zerilli – Armstrong (ZA)
- Cowper – Symonds (CS)
- Johnson – Cook (J-C)

Modelo de Cowper – Symonds (CS)

O modelo de CS é um simples modelo elasto-plástico de encruamento por deformação que utiliza a formulação empírica descrita por Ludwik em que os materiais se fortalecem quando as deformações plásticas são aplicadas (C. HERNANDEZ, 2013).

$$\dot{\varepsilon} = D\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 1\right)^q \tag{7}$$

Onde:

σ_0 = Tensão Quase Estática, D e q são constantes.

Modelo de Zerilli – Armstrong (ZA)

Zerilli e Armostrong propuseram uma relação constitutiva baseada na mecânica de deslocamento para o calculo do fluxo de tensão em materiais FCC. O modelo de ZA se baseia na ideia da ativação térmica do movimento de

deslocamento para superar barreiras e na interação individual dos deslocamentos (GURASAMY, 2017).

$$\sigma = C_0 + C_1[-C_3T + C_4Tln(\dot{\varepsilon})] + C_5\varepsilon^n \quad (8)$$

Onde:

$\sigma = Fluxo\ de\ Tensão\ de\ Von\ Mises$

$\varepsilon = Deformacao\ Plástica\ Equivalente$

$\dot{\varepsilon} = Taxa\ de\ Deformação\ Equivalente$

T = temperatura Absoluta

$C_0,\ C_1,\ C_2,\ C_3,\ C_4,\ C_5$ e n são constantes

Modelo Constitutivo de Johnson Cook

A ideia principal quando se utiliza o modelo constitutivo de J-C é isolar cada parâmetro reunindo dados obtidos experimentalmente em condições especificas, para gerar gráficos que podem ser manipulados para fornecer o parâmetro desejado.

As relações entre tensão e deformação para um material metálico podem ser descritas pelo modelo de Johnson Cook (J-C) sob condições de grande deformação, alta taxa de deformação e temperaturas elevadas. O modelo de representação de fluxo de tensão de deformações plásticas é expresso da seguinte forma (SMERD et al., 2005):

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + c\ln\dot{\varepsilon}^*][1 - (T^*)^m] \quad (9)$$

Onde:

A, B, C, n, m: $são\ parâmetros\ experimentais$

$$T^* = temperatura\ homóloga\ , T^* = \frac{T_{trabalho}}{T_{fusão}} = \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \quad (10)$$

$T_m = Temperatura\ de\ Fusão\ e\ T_r = Temperatura\ Ambiente$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \quad (11)$$

Atualmente é um dos modelos mais utilizados ao trabalhar com metais dúcteis. Para melhorar a precisão deste modelo, uma melhoria foi proposta por (LIN

et al.) onde o modelo de J-C é combinado com o modelo de ZA para modificar a deformação de encruamento ou o efeito da temperatura.

Uma das facilidades de se utilizar o modelo de J-C é a possibilidade de se isolar cada um dos três colchetes e trabalhar com o parâmetro que se deseja encontrar. Para isso é necessário fazer algumas manipulações e suposições para que o modelo seja simplificado, desta forma podemos encontrar cada parâmetro separadamente. Três curvas com fluxo de tensão equivalente versus deformação plástica devem ser construídas: Uma em condições quase estáticas ou isotérmicas e duas em taxas de deformação (condições adiabáticas em taxa de deformação). O ultimo colchete da equação deve ser utilizado somente quando se deseja considerar o efeito térmico nas deformações, para isso deve-se utilizar altas taxas de deformação (JUTRAS, 2008).

O efeito térmico do material não será considerado, pois admite-se que não ocorreu uma variação temperatura considerável, desta forma a temperatura é igual a temperatura ambiente $T = T_{ref}$, reduzindo a formulação do modelo de J-C para:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n](1 + CLn\ \dot{\varepsilon}^*) \tag{12}$$

Este modelo é formulado no intuito de pré-estabelecer que a taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ será igual a taxa de deformação de referência $\dot{\varepsilon}_0$, trabalhando com um valor de taxa de deformação quase estática, desta forma estabelecendo a seguinte relação:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = 1\ S^{-1}$$

Com isso o modelo de Johnson Cook se reduz ao modelo da lei de potência, definido por:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \tag{13}$$

Onde:

A = Tensão de Escoamento

$B\ e\ n$: Representam os efeitos de encruamento por deformação

Ao aplicar o logarítmico natural em ambos lados da equação, obtém-se a seguinte relação:

$$\ln(\sigma - A) = nln\varepsilon + lnB \tag{14}$$

Um gráfico com eixos logarítmicos do fluxo de tensão menos a tensão de escoamento $(\sigma - A)$ pela deformação deve ser obtido, como o interesse da analise é a fase plástica, os pontos do escoamento até a carga máxima resultaram numa linha reta. Onde a inclinação desta linha será n pois o gráfico é uma relação linear entre $\ln(\sigma - A) = e\ ln\varepsilon$, os pontos plotados foram ajustados por regressão linear de primeira ordem. O expoente de encruamento terá valores de n = 0 (sólido perfeitamente plástico) a n =1 (solido elástico).

O modelo de Johnson Cook é tradicionalmente empregado na literatura para simulações envolvendo deformação, taxa de deformação e gradiente de temperatura. Este modelo em sua notação original possui 4 constantes (sem considerar o efeito da temperatura) a serem determinados em função do tipo do material. O modelo de J-C modificado apresenta um melhor ajuste na área plástica do material, mas o ajuste dessa área plástica é mais difícil, pois o modelo apresenta o dobro de constantes em comparação o modelo de original de J-C (NÓBREGA, 2010).

3. ENSAIO DE TRAÇÃO

O teste tração foi realizado com diferentes carregamentos, utilizando duas estratégias de controle: controle da taxa e velocidade de deformação. A máquina de testes universal (INSTRON 8801) foi utilizada para os ensaios. O movimento do cilindro hidráulico foi registrado para medição do alongamento do corpo de prova. Os testes foram realizados dentro da capacidade de força de 100 KN do atuador servo hidráulico e velocidade máxima de deslocamento do pistão 0.21 m/s.

Figura 8. Máquina de ensaio de tração Instron 8801 (INSTRON, 2016).

A tensão de escoamento LE Fig. (4) indica o ponto onde se inicia a deformação plástica do material. Caracterizado pelo aumento brusco da deformação submetendo o material a uma baixa variação de tensão durante o ensaio de tração (SOUZA, 1974).

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) especifica a preparação do corpo de prova e os procedimentos do ensaio. Este trabalho de pesquisa experimental preparou os corpos de prova pelo processo de corte a jato d'água. O CP típico e setup experimental está representado na Fig. (10) respetivamente. O corpo de prova tem comprimento original, de referencia, L0 e área de secção transversal inicial, A0. Durante o ensaio, o CP sofre alongamento até ao ponto em

que inicia a estricção e de seguida continua o alongamento até ocorrer fratura do material, como se observa na Fig. (9).

À medida que o ensaio decorre, são registados os valores da carga e alongamento do CP, dados necessários para o cálculo da relação tensão -extensão.

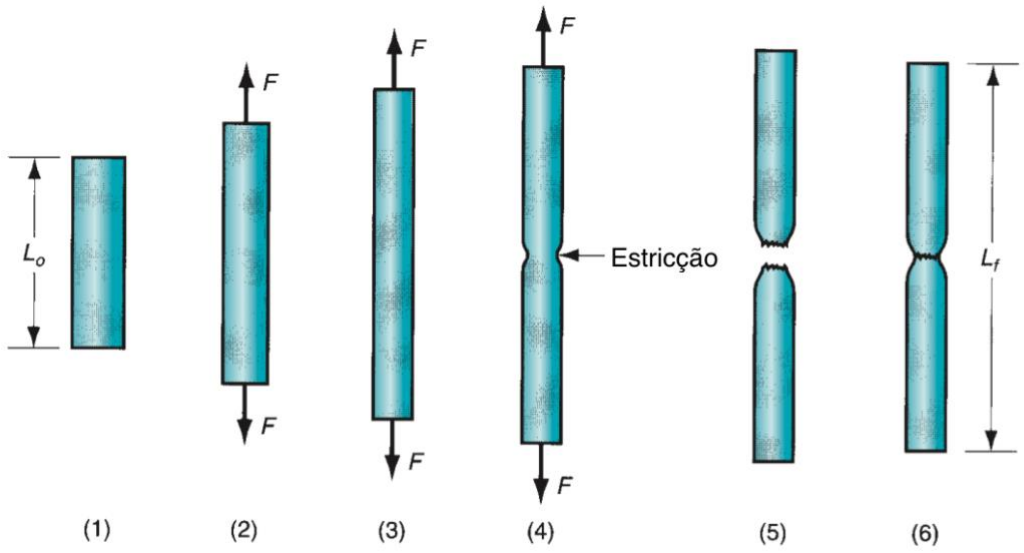


Figura 9. Progresso típico de um ensaio de tração: (1) início do ensaio, sem aplicação de força; (2) alongamento uniforme e redução da secção do CP; (3) alongamento continuado, com força máxima atingida; (4) início da estricção, o valor da força começa a diminuir; (5) Fratura; (6) comprimento final do CP (adaptado GROOVER, 1996).

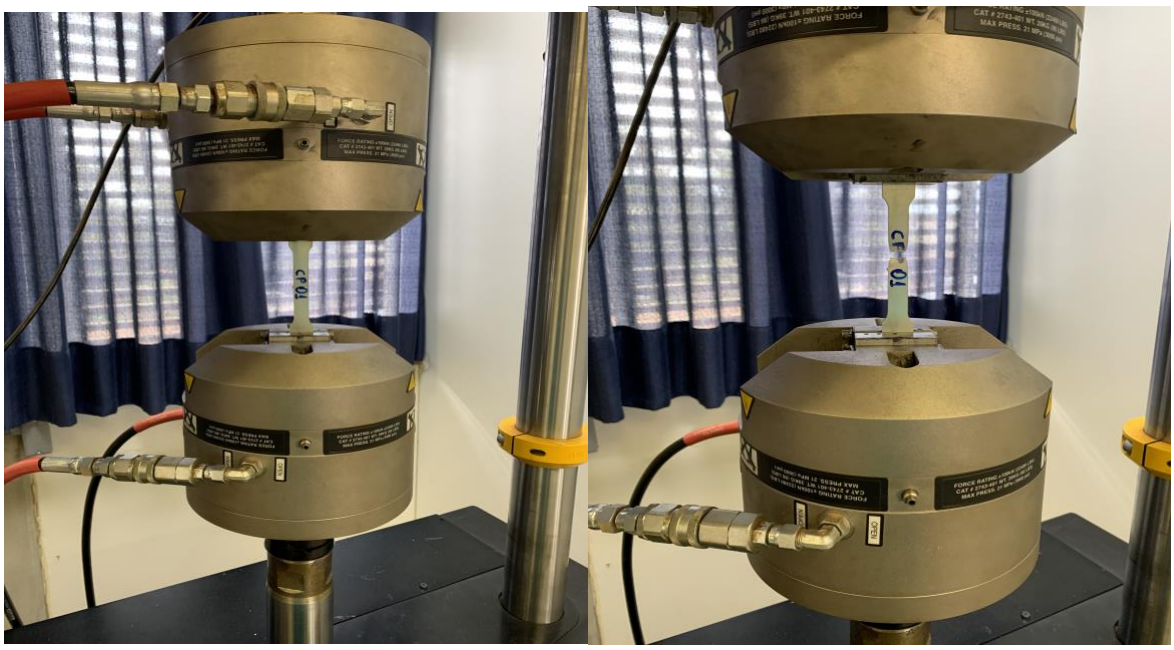


Figura 10. CP antes e depois do ensaio de Tração. Fonte: Produção do próprio autor

Região de estricção do corpo de prova de alumínio AA1200 após a falha

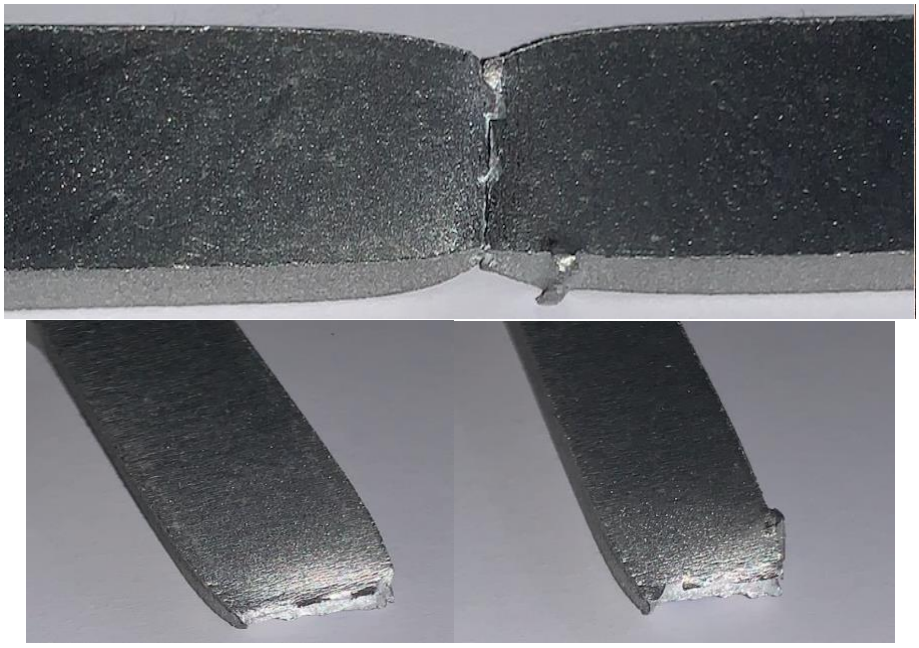


Figura 11. Corpo Prova de Alumínio após a falha. Fonte: Produção do próprio autor

Região de estricção do corpo de prova de aço inox 304 após a falha

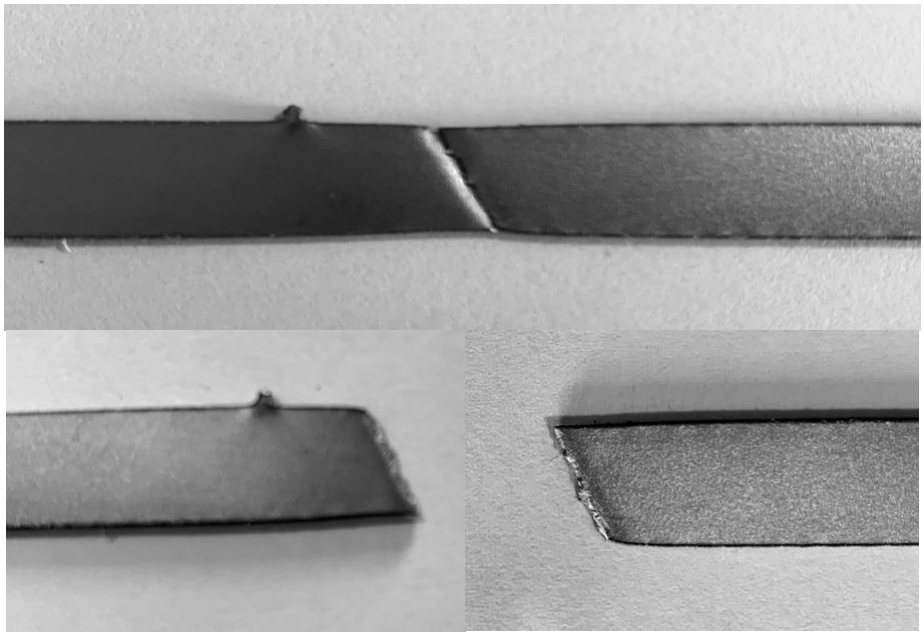


Figura 12. Corpo Prova de Aço Inox 304 após a falha. Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico tensão versus deformação do ensaio de tração do alumínio AA1200, gerados com a função de calibração de materiais no Abaqus.

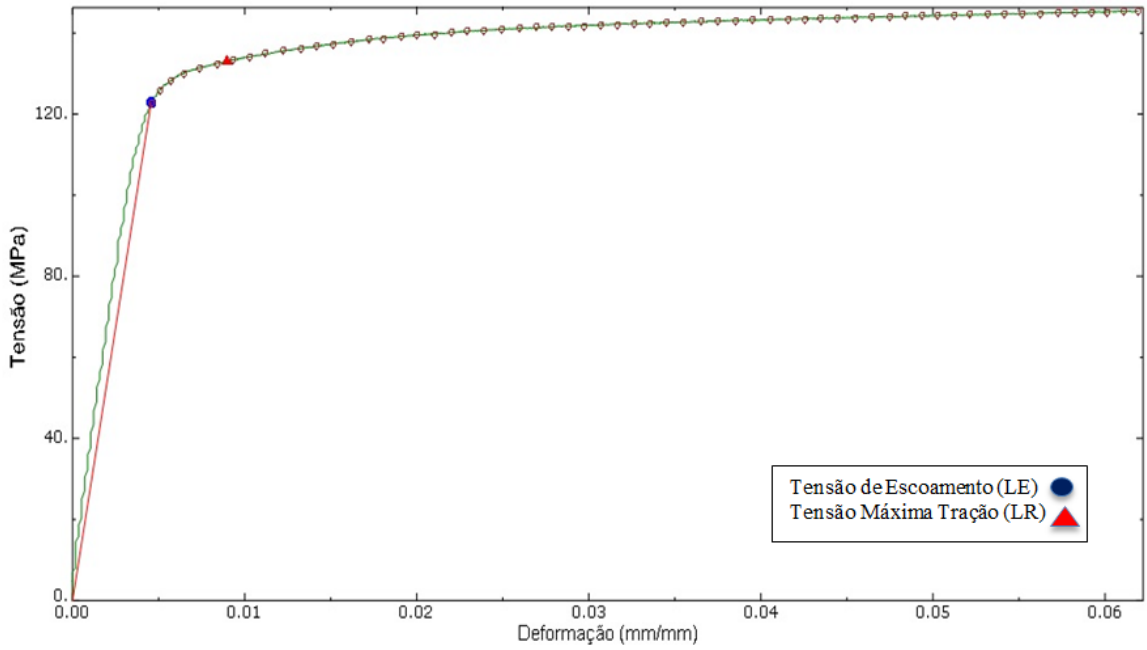


Figura 13. Curva (σ x ε)Alumínio Abaqus. Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico tensão versus deformação do ensaio de tração do aço inox 304, gerados com a função de calibração de materiais no Abaqus.

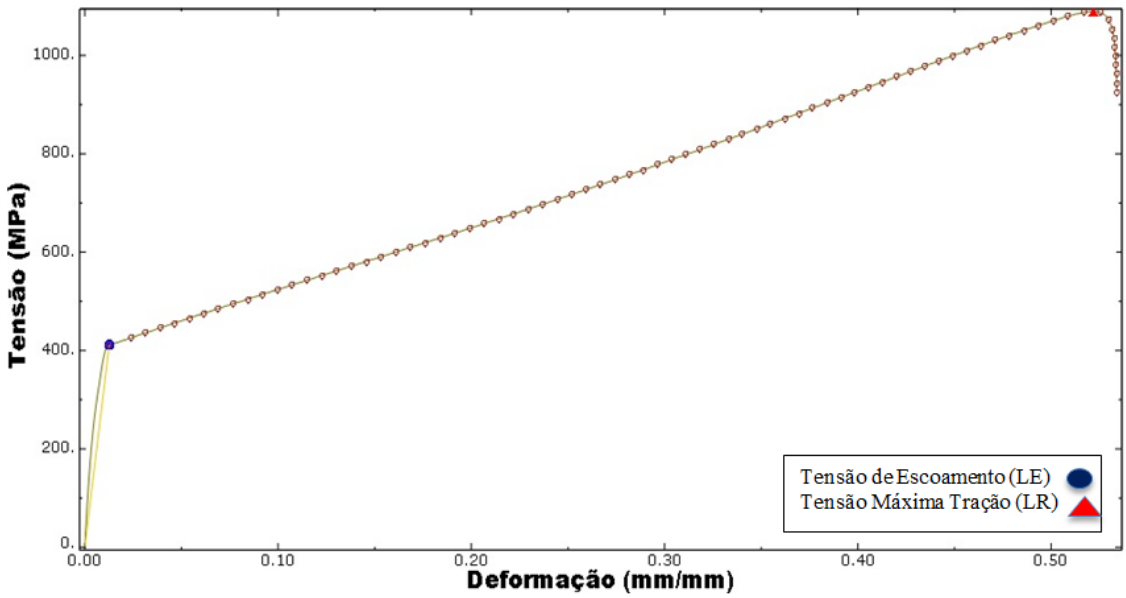


Figura 14. Curva (σ x ε) Aço Inox 304 Abaqus. Fonte: Produção do próprio autor

3.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

O sistema de designação de Liga de fundição da Associação do Alumínio (AA)

O Sistema de liga de fundição mais utilizado nos Estados Unidos é o sistema de liga e têmpera da Associação de Alumínio (AA), descrito abaixo. Lamentavelmente o sistema AA não é universalmente utilizado e algumas de suas modificações anteriores não são amplamente citadas. Na designação da liga AA, existem quatro dígitos numéricos, com um período entre o terceiro e o quarto. Os significados dos quatro dígitos são (ANSI, 1988):

- Primeiro Digito: Define os principais constituintes da liga
- Segundo e Terceiro Digito: Designação especifica de cada liga
- Quarto Digito: Designação de fundição (0) ou lingote (1,2)

A Tabela (1), representa a composição química para cada serie de ligas de alumínio.

Tabela 1. Composição Química das séries de Alumínio

Série	Composição Química
1 XXX	Alumínio Puro (99 % ou mais)
2 XXX	Alumínio - Cobre
3 XXX	Alumínio - Silício + Cobre e/ou Magnésio
4 XXX	Alumínio - Silício
5 XXX	Alumínio - Magnésio
6 XXX	Série não utilizada
7 XXX	Alumínio - Zinco
8 XXX	Alumínio - Estanho

O alumínio além de ser designado por uma serie de ligas, ele também recebe uma nomenclatura referente ao tratamento térmico recebido, representados na Tab. (2).

Tabela 2. Nomenclatura dos Tratamentos Térmicos (Alumínio)

Têmpera	Definição
F	Conforme fabricado
O	Recozido
H1	Apenas endurecido por encruamento
H2	Endurecido por encruamento e parcialmente recozido
H3	Endurecido por encruamento e estabilizado (propriedade mecânicas estabilizadas por tratamento térmico de baixa temperatura)
T1	Resfriado a partir de um processo de moldagem em temperatura elevada e

Têmpera	Definição
	naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T2	Resfriado a partir de um processo de moldagem em temperatura elevada, trabalhado a frio e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T3	Tratamento térmico para solubilização, trabalho a frio e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T4	Tratamento térmico para solubilização e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T5	Resfriado a partir de um processo de moldagem em temperatura elevada e envelhecido artificialmente
T6	Tratamento térmico para solubilização e envelhecido artificialmente
T7	Tratamento térmico para solubilização e estabilizado
T8	Tratamento térmico para solubilização, trabalho a frio e envelhecido artificialmente
T9	Tratamento térmico para solubilização, envelhecido artificialmente e trabalho a frio
T10	Resfriado a partir de um processo de moldagem em temperatura elevada, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente

A liga de alumínio utilizada para o ensaio de tração foi a AA1200, da serie 1 que é comumente utilizada em utensílios domésticos, peças estampadas, chaparias (CONSERVA, 1992).

A Tabela (3) fornece as propriedades mecânicas da Liga Alumínio AA1200 com Têmpera H14.

Tabela 3. Propriedades da Liga AA1200 (ANSI, 1988)

Material	Têmpera	Limite Resistência Tração Mpa (Mínimo)	Limite Resistência Tração Mpa (Máximo)	Limite Escoamento (MPa)	Alongamento Mínimo “50mm (%)”	Dureza
Liga 1200	O	75	105	25	22	23
	H14	110	145	95	3	32

O aço inox 304 é o aço inoxidável austenítico mais popular, tem excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade e excelente soldabilidade. Os materiais que combinam a capacidade de absorção de energia mecânica e leveza são de interesse primário em uma variedade de projetos estruturais, incluindo automóveis (resistência ao impacto), embalagem microeletrônica (resistência a queda) e cascos de navios (carregamento dinâmico) (LEE et al., 2006).

A analise da composição Química em porcentagem da liga de Alumínio AA1200 e do Aço Inox 304 é apresentada na Tab. (4).

Tabela 4. Composição Química em (wt %) (ANSI,1988; ABNT NBR 87, 2000)

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
AA1200	0.13	0.49	0.001	0.002	0.002	0.001	0.007	0.016
	C	**Mn**	**P**	**S**	**Si**	**Ni**	**Cr**	**N**
Aço Inox 304 AISI	0.08	2.00	0.045	0.03	0.75	8 - 10.5	18 - 20	0.10

A Tabela (5) fornece as propriedades mecânicas Aço Inox 304

Tabela 5. Propriedades Aço Inox 304 (LEE et al., 2006)

Material	Densidade $\frac{Kg}{m^3}$	Modulo de Elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson (ν)	T_{fusao} (K)
Inox 304	7900	200	0,3	1673

3.2. CORPO DE PROVA (NORMA ASTM 2000) E 8M

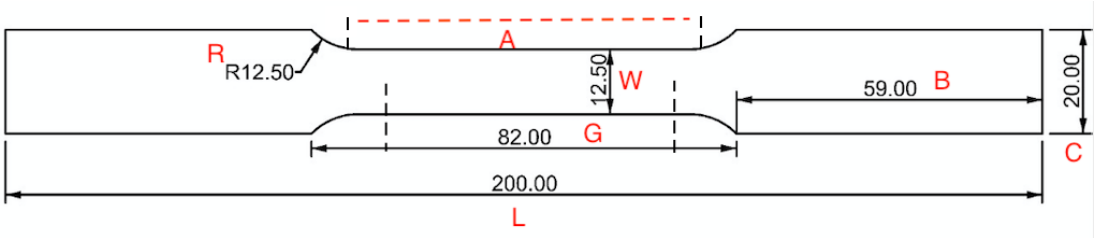


Figura 15. Cotas Corpo de Prova Norma ASTM E 8M

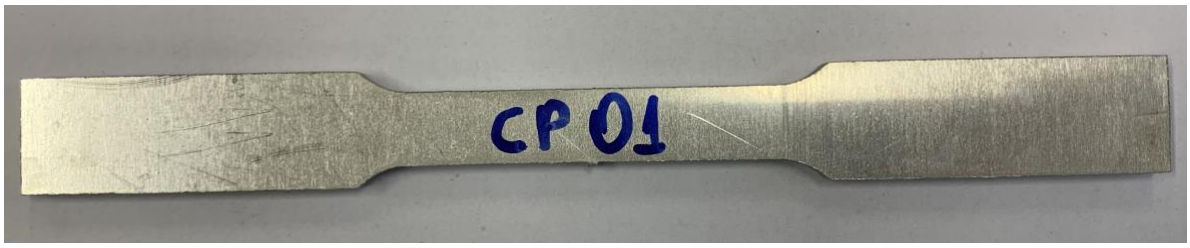


Figura 16. Corpo de Prova Norma ASTM E 8M (usado nos ensaios).

Tabela 6. Dimensões Corpo Prova (CP) Norma ASTM 2000 (E 8M)

Dimensões (mm)	
Largura Nominal	Tipo - Chapa 12.5 mm
G – Comprimento Área Útil (Nota 1 e 2)	50.0 ± 0.1
W – Largura (Nota 3 e 4)	12.5 ± 0.2
T – Espessura (Nota 5)	Espessura do Material
R – Raio do filete, min (Nota 6)	12.5
L – Comprimento total (Nota 2, 7 e 8)	200
A – Comprimento seção reduzida, min	57
B – Comprimento seção de Fixação Máquina (Nota 8)	50
C – Largura seção de Fixação Máquina (Nota 4 e 9)	20

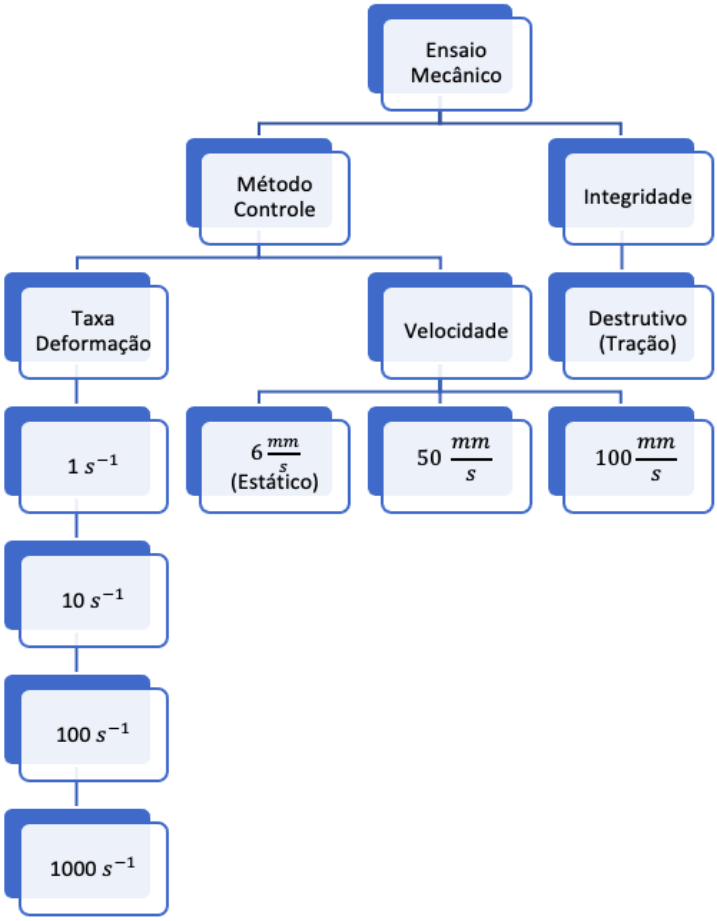
NOTA 5 — T é a espessura do corpo de prova, conforme previsto nas especificações aplicáveis do material. As espessuras utilizadas foram 5 mm para o Alumínio AA1200 e 1,5 mm para o Aço Inox 304, nos limites da norma que estabelece que a espessura máxima para amostras de 12,5 mm de largura deve ser de até 19 mm.

NOTA 7 — A dimensão mostrada é sugerida como mínima. Ao determinar o comprimento mínimo, as garras não devem se estender até a seção de transição entre as dimensões A e B, consulte a Nota 9.

NOTA 9 — É desejável, se possível, aumentar o comprimento da seção da garra o suficiente para permitir que a amostra se estenda para as garras a uma distância igual a dois terços ou mais do comprimento das garras. Não foi necessário utilizar garras mais longas, pois os corpos de prova não possuem espessura superior a 10 mm, assim evitando possíveis falhas na seção de garras.

3.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Nos fluxogramas 1 e 2 a seguir, é possível observar as metodologias de controle empregadas durante os ensaios para o Alumínio e Aço Inox 304.

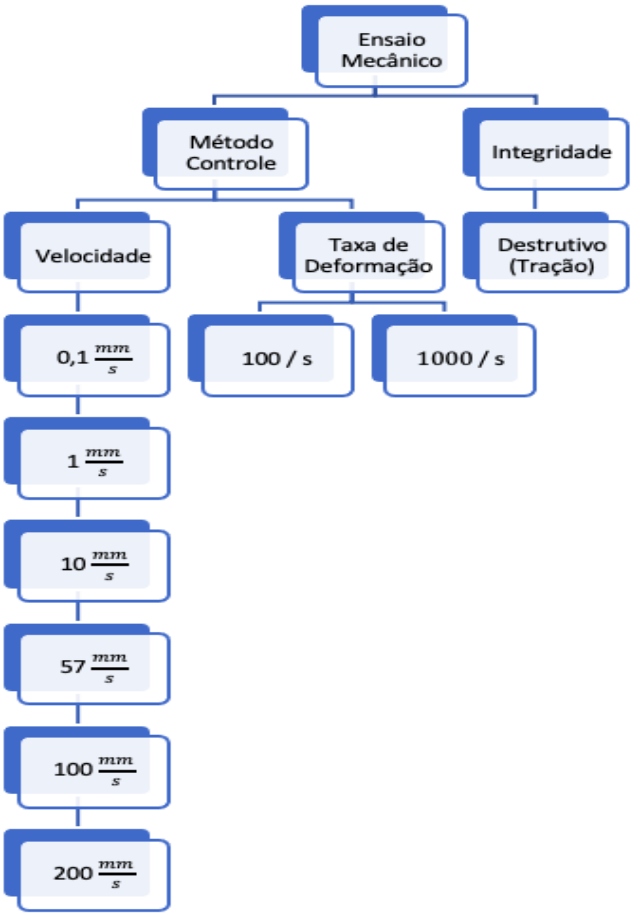


Fluxograma 1. Metodologia empregada para ensaio do Alumínio. Fonte: Produção do próprio autor.

As estratégias de controle para os dois matérias não foram iguais, pois quando o alumínio AA1200 foi submetido à estratégia de controle da velocidade de deslocamento do pistão não apresentou variações significativas no gráfico tensão versus alongamento, mas ao utilizar o método de controle da taxa de deformação notou-se mudanças significativas no alongamento Fig. (34) ele aumentava junto com o incremento da taxa de deformação, assim como a tensão de escoamento. Ao submeter o corpo de prova ao ensaio de tração utilizando a metodologia de controle da velocidade de descolamento do pistão a variação da tensão de escoamento foi de aproximadamente 4% e ao se adotar o método de controle de variação da taxa de deformação a variação da tensão de escoamento foi algo próximo a 11%.

Ao submeter o aço inox 304 a teste preliminares semelhantes a metodologia de controle da taxa de deformação utilizadas para o alumínio AA1200 não se observou mudanças significativas no alongamento do corpo de prova nem no gráfico tensão versus deformação, como pode ser observado na Fig. (34). O que não foi observado ao submeter o aço inox 304 a metodologia de controle de velocidade de

deslocamento do pistão, onde a tensão verdadeira aumentou com o incremento da velocidade, tal variação pode ser observada na Fig. (18) que apresenta um gráfico tensão verdadeira versus deformação verdadeira, para cada curva de taxa de deformação equivalente, obtidas utilizando a Eq. (10) para cada velocidade utilizada nos ensaios.



Fluxograma 2. Metodologia empregada para ensaio do Aço Inox 304. Fonte: Produção do próprio autor.

3.4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

3.4.1. Controle da Velocidade

A estratégia de controle de velocidade mantém constante a velocidade do pistão durante todo ensaio, consequentemente a relação entre $\frac{V}{L_0}$ também será constante. A máquina Instron 8801 utilizada no ensaio de tração trabalha até a condição de deslocamento máximo de 0.21 m/s ($210\ \frac{mm}{s}$), de acordo com seu

manual. A Equação (15) fornece a taxa de deformação equivalente para uma dada velocidade do pistão (NÓBREGA, 2010).

3.4.1.1. Alumínio AA1200

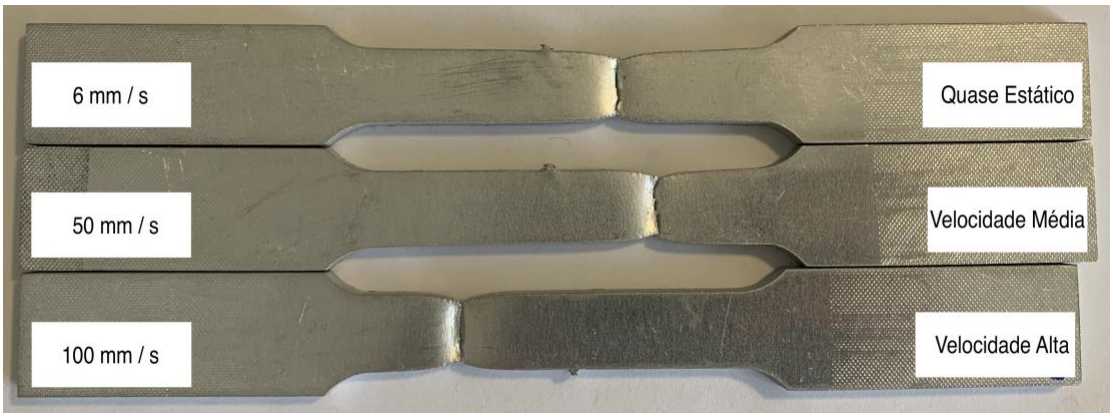


Figura 17. Corpos de Prova (Alumínio) após ensaio destrutivo de tração. Fonte: Produção do próprio autor

As taxas de deformações correspondentes podem ser definidas como:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} \tag{15}$$

Onde:

V = Velocidade de deformação máquina

L = Comprimento Inicial (Gauge)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(100\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 1.75\ (s^{-1}) \tag{15.1}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(50\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 0.87\ (s^{-1}) \tag{15.2}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(6\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 1.05x10^{-1}\ (s^{-1}) \tag{15.3}$$

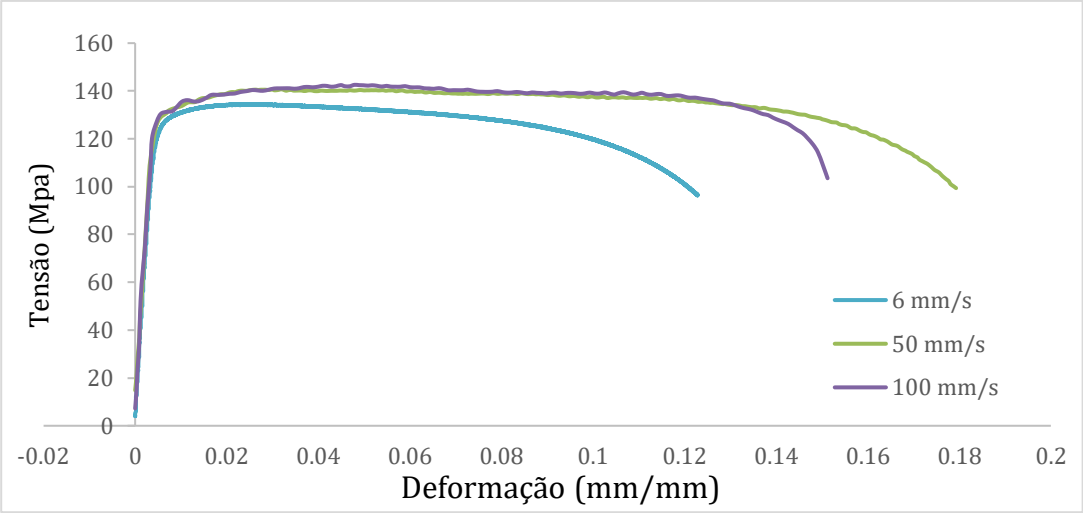


Figura 18. $Curva\ \sigma\ x\ \varepsilon$ (Controle de Velocidade Alumínio). Fonte: Produção do próprio autor

Ajuste de J-C para os ensaios de tração do Alumínio com controle de Velocidade

A estricção inicia no ponto de aplicação da carga máxima, a partir do qual o estado uniaxial de tensões dá lugar a um complexo estado triaxial de tensões. Após o ponto de carga ou tensão máxima, tem inicio a fase de ruptura, que é caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura, conhecida como fenômeno da estricção, o que também é chamado de empescoçamento, devido a condição observada em materiais de conduta dúctil (GARCIA, 2000). Por isso a curva ($\sigma\ x\ \varepsilon$) deve ser corrigido com a tensão de J-C a partir da região de estrição conforme a Fig. (5) (CALLISTER, 2002).

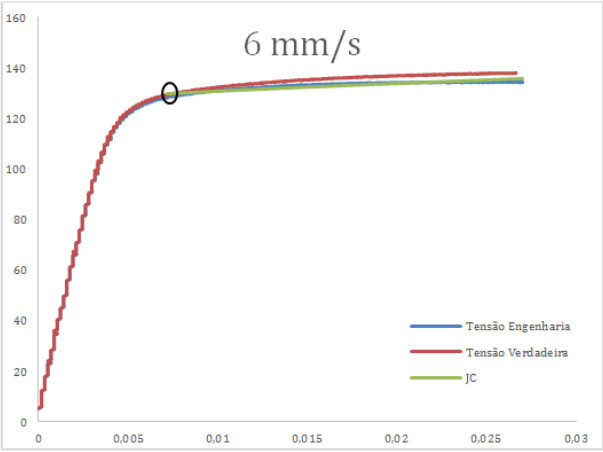


Figura 19. Ajuste J-C Alumínio 6 mm/s. Fonte: Produção do próprio autor

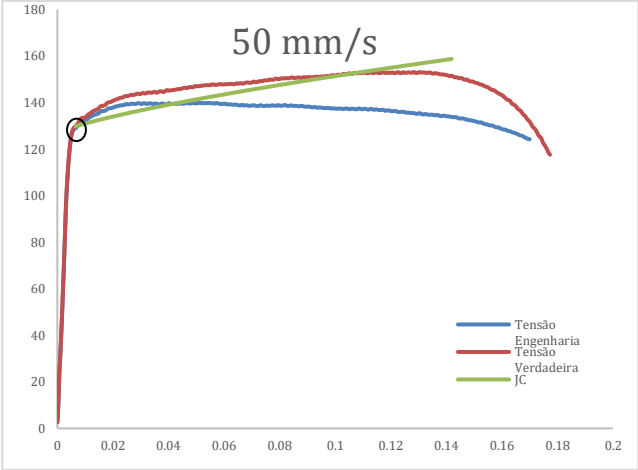


Figura 20. Ajuste J-C Alumínio 50 mm/s. Fonte: Produção do próprio autor

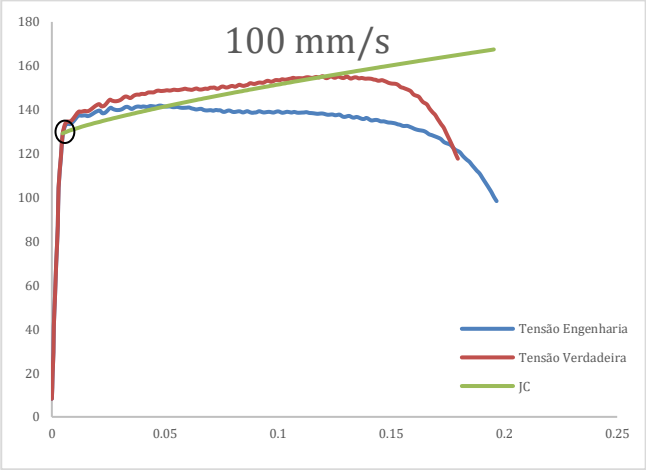


Figura 21. Ajuste J-C Alumínio 100 mm/s. Fonte: Produção do próprio autor

3.4.1.2. Aço Inox 304

Figura 22. Corpos de Prova (Aço Inox 304) após ensaio destrutivo de tração. Fonte: Produção do próprio autor

As taxas de deformação equivalentes definidas na Eq. (15) são:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(0.1\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 0.00175\ (s^{-1}) \tag{15.4}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(1\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 0.0175\ (s^{-1}) \tag{15.5}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(10\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 0.175\ (s^{-1}) \tag{15.6}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(57\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 1\ (s^{-1}) \tag{15.7}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(100\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 1.75\ (s^{-1}) \tag{15.8}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L} = \frac{\left(200\,\frac{mm}{s}\right)}{57\,mm} = 3.508\ (s^{-1}) \tag{15.9}$$

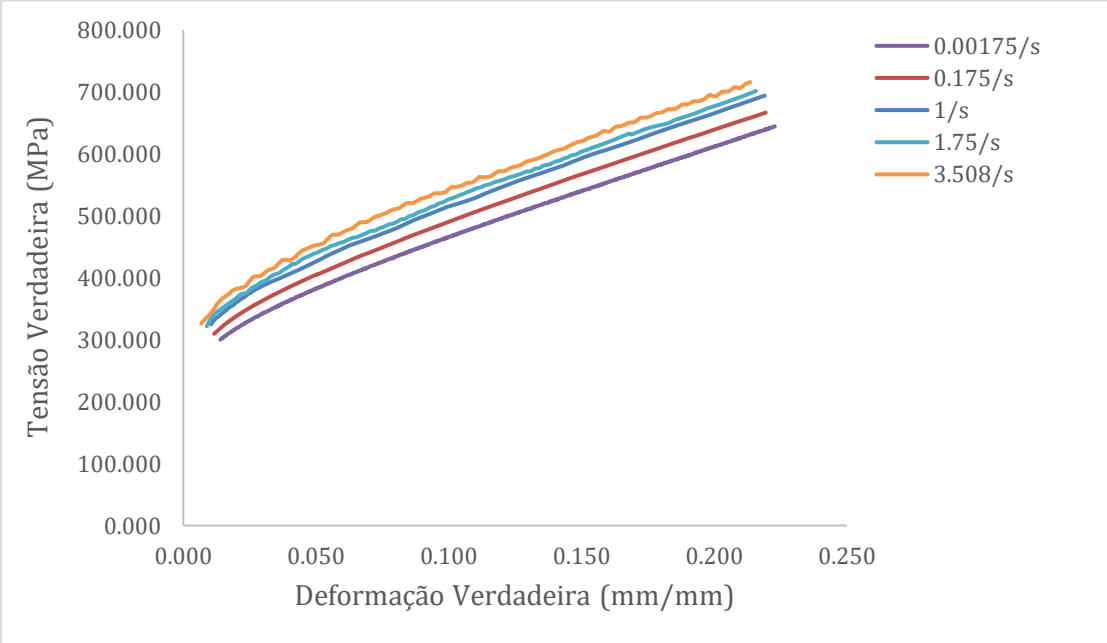


Figura 23. $Curva\ \sigma\ x\ \varepsilon$ (Controle Velocidade Inox). Fonte: Produção do próprio autor

Ajuste de J-C para os ensaios de tração do Aço Inox 304 com controle de Velocidade

Após as devidas manipulações, as curvas de $(\sigma\ x\ \varepsilon)$ foram corrigidas com a tensão de J-C a partir da região de estricção (pescoço), conforme a Fig. (5) (CALLISTER, 2002).

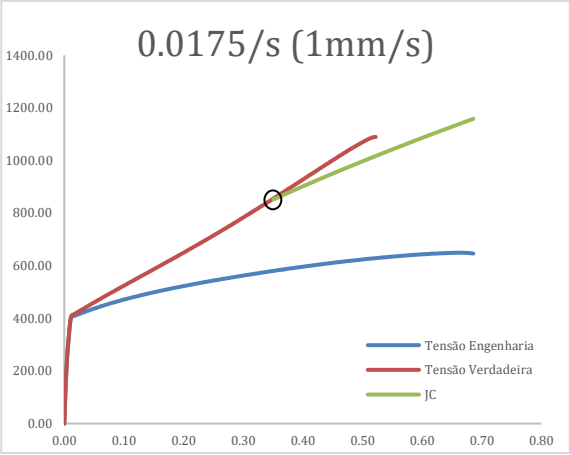


Figura 24. Ajuste J-C Aço Inox 304 (1 mm/s). Fonte: Produção do próprio autor

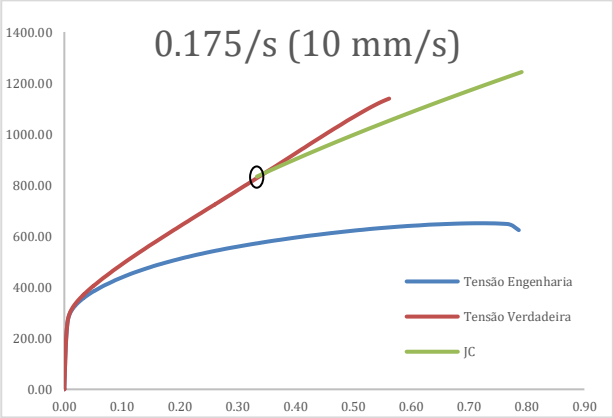


Figura 25. Ajuste J-C Aço Inox 304 (10 mm/s). Fonte: Produção do próprio autor

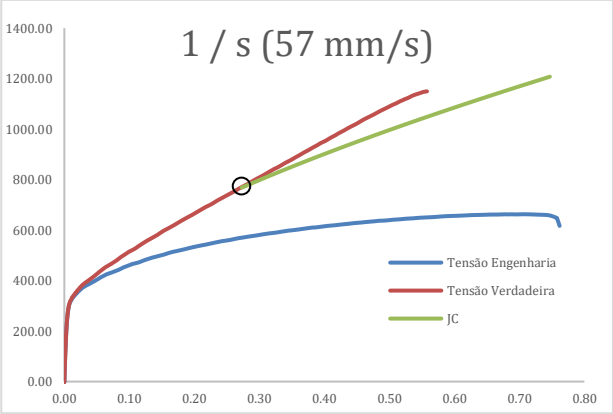


Figura 26. Ajuste J-C Aço Inox 304 (57 mm/s). Fonte: Produção do próprio autor

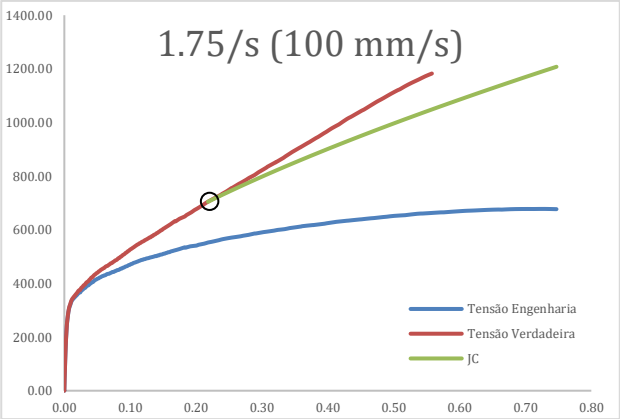


Figura 27. Ajuste J-C Aço Inox 304 (100 mm/s). Fonte: Produção do próprio autor

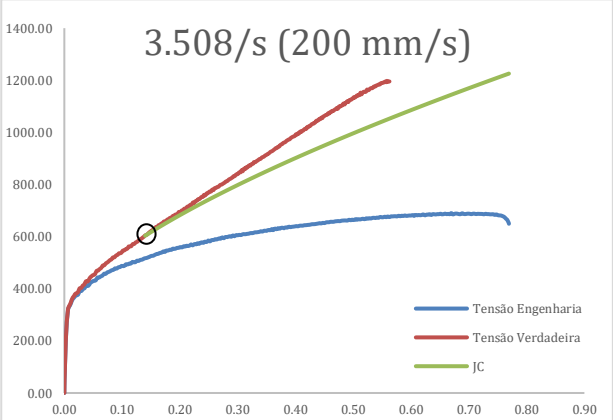


Figura 28. Ajuste J-C Aço Inox 304 (200 mm/s). Fonte: Produção do próprio autor

3.4.2. Controle da Taxa de Deformação

Em testes de alta taxa de deformação, o efeito do aquecimento devido à deformação plástica do material também deve ser considerado. Esse aquecimento devido à alta taxa de deformação também é chamado de fenômeno de amolecimento térmico. Para a maioria dos materiais, cerca de 90% da deformação plástica é dissipada como calor no material (JUTRAS, 2008).

Controle da taxa de deformação (Strain Rate): A taxa $\dot{\varepsilon}$ é definida como do diferencial do grau de deformação ε em relação ao tempo (t)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{16}$$

Os valore de taxa de deformação podem variar desde $10^{-3}\ s^{-1}$ até 10^{3} no modelo de máquina utilizado para realizar os ensaios.

Tabela 7. Classificação das técnicas de testes de acordo com a taxa de deformação (adaptado de Dieter, 1985)

Taxa Deformação	Magnitude (s^{-1})
Quase – Estático	$10^{-4} - 10^{-2}$
Taxa Baixa	$10^{-2} - 10^{-1}$
Taxa Media	$10^{-1} - 10^{2}$
Taxa Alta	$10^{2} - 10^{4}$

Corpos de prova podem ser carregados em compressão, tração ou torção segundo o método de teste. Testes mecânicos convencionais permitem a obtenção de taxas de carregamento constantes e portando taxas de deformação de engenharia constantes, apenas para valores limitados de deformação plástica. Equipamentos comerciais para testes de tração são usados na faixa de taxa de deformação até $10\ s^{-1}$ e equipamentos servo-hidráulicos proporcionam taxas até $200\ s^{-1}$ em tração ou compressão. Para conseguirem-se taxas ainda maiores deve-se recorrer a outros métodos conforme sumarizado na Tab. (8) (BENASSI, 2005).

O método mais utilizado para altas taxas de deformação é o da barra de Hopkinson em compressão que permite obter a curva tensão versus deformação de materiais desde baixas deformações plásticas até aquelas acima de 100% e a taxas de deformação entre $50\ s^{-1}$ e $10^{4}\ s^{-1}$dependendo do tamanho do corpo de prova (BENASSI, 2005).

Tabela 8. Métodos Experimentais para altas taxas de deformação (Adaptado de Nemat-Nasser, 2003)

Taxa de Deformação	Método Experimental
Baixa: $\dot{\varepsilon} < 10^{-1}\ s^{-1}$	Equipamento Servo-Hidráulico convencional
Média: $10^{-1}\ s^{-1} < \dot{\varepsilon} < 10^{2}\ s^{-1}$	Equipamento Servo-Hidráulico Especiais
Alta: $10^{2}\ s^{-1} < \dot{\varepsilon} < 10^{3}\ s^{-1}$	Barra de Hopkinson em tração.
Altíssima: $\dot{\varepsilon} = 10^{4} s^{-1}$	Expanding Ring
Altíssima: $\dot{\varepsilon} > 10^{5} s^{-1}$	Flyer Plate

Uma vasta quantidade de dados experimentais relacionados ao comportamento de materiais sob altas taxas de deformação estão disponíveis na literatura. Os resultados obtidos experimentalmente indicam que a tensão de escoamento aumenta com o incremento da taxa de deformação. Para alguns metais a relação entre a tensão de escoamento e o logaritmo da deformação plástica é linear, quando o material experimenta taxas da deformação do quase estático até valores próximos a $10^{3} s^{-1}$. Acima desta faixa a tensão de escoamento apresenta um crescimento, mas de forma não linear. Dados experimentais para taxas acima de

$10^4 s^{-1}$ são extremamente limitadas, pois a metodologia e aparelhamento para ensaio a altas taxas de deformação são mais difíceis e só podem ser realizadas com equipamentos específicos (NEMAT NASSER).

A equação de Johnson Cook descreve a relação do encruamento do material em função da taxa de deformação e da temperatura no regime plástico. As formas multiplicativas dos termos de deformação, taxa de deformação e temperatura, evidenciam que com o aumento da taxa de deformação haverá um aumento do patamar de encruamento do material.

3.4.2.1. Alumínio

A estratégia de controle por taxa de deformação consiste na medição direta da taxa de deformação $\frac{d\varepsilon}{dt}$ no CP.

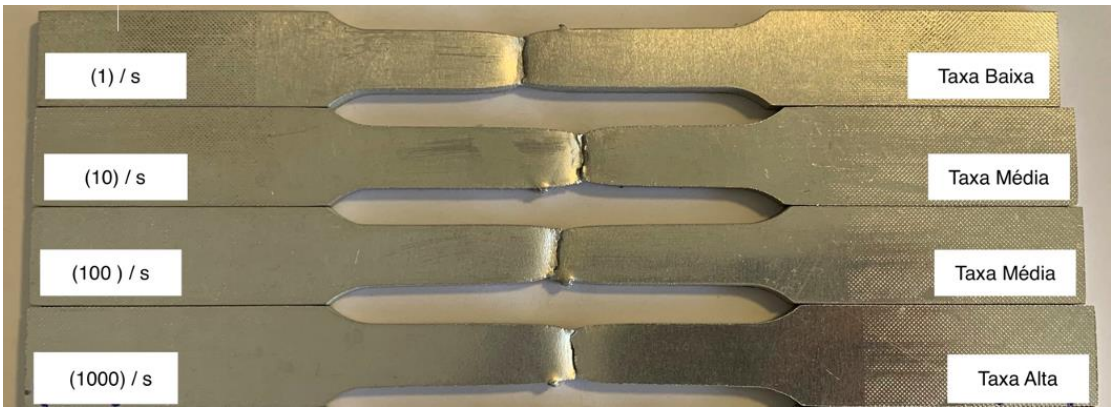


Figura 29. Corpos de Prova (Alumínio) após ensaio destrutivo de tração. Fonte: Produção do próprio autor

As curvas de $\sigma \; x \; \varepsilon$ com taxas de deformação variando entre (1 - 1000) / s são apresentadas na Fig. (23). Os dados obtidos para altas taxas de deformação apresentaram grande variação após o inicio do escoamento, essa variação pode estar relacionada ao deslizamento entre o CP e as garras do equipamento, pois este equipamento não é indicado para ensaios de tração com altas taxas de deformação. Assim como a tensão de escoamento, o alongamento aumentou com o incremento da taxa de deformação Fig (34). O método indicado para ensaios com altas taxas de deformação é o da barra de Hopkinson, pois ela trabalha com altas taxas de deformação com um gradiente de tensão do CP próximo a zero, ou seja, o CP mantém-se em equilíbrio dinâmico durante o ensaio. Ao se trabalhar com máquinas de tração convencional à velocidade depende do deslocamento das garras e da

carga aplicada, o que torna a taxa de deformação irregular e dependente da resistência e do encruamento do CP (BENASSI, 2005).

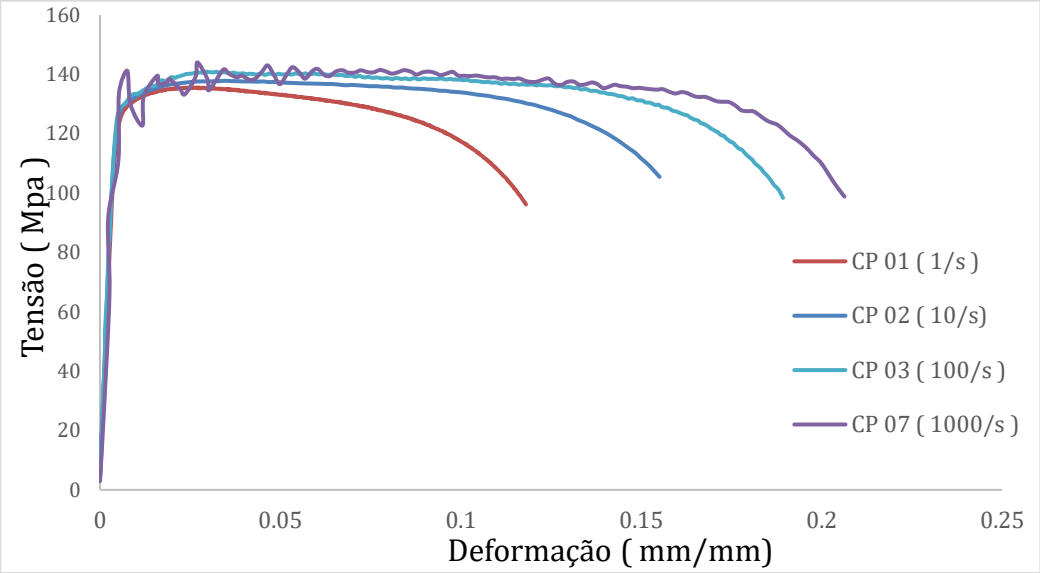


Figura 30. $Curva\ \sigma\ x\ \varepsilon$ (Controle de Taxa de Deformação Alumínio). Fonte: Produção do próprio autor

Ajuste de J-C para os ensaios de tração do Alumínio com controle da Taxa de Deformação

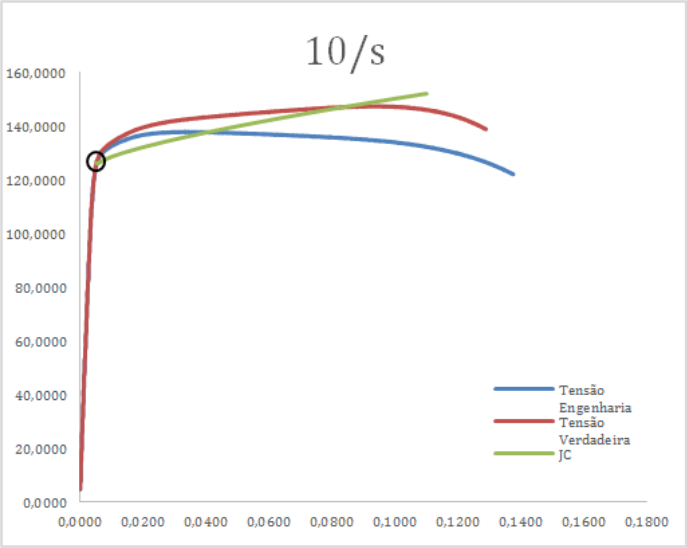


Figura 31. Ajuste J-C Alumínio (10 /s). Fonte: Produção do próprio autor

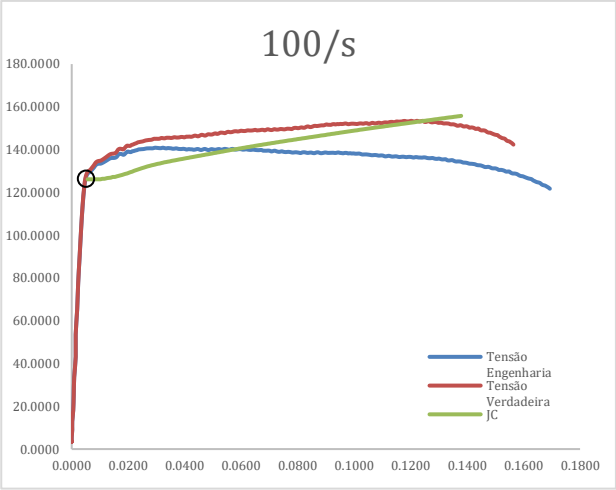


Figura 32. Ajuste J-C Alumínio (100 /s). Fonte: Produção do próprio autor

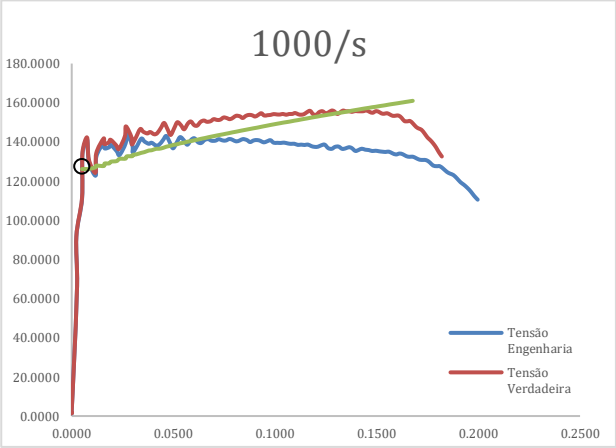


Figura 33. Ajuste J-C Alumínio (1000 /s). Fonte: Produção do próprio autor

Conforme apontado por Klepaczko and Chiem, a estrutura de deslocamento interno do material depende da taxa de deformação na qual ele é deformado plasticamente. A sensibilidade à taxa de deformação instantânea é explicada pela ativação térmica. Isso implica que à taxa de deformação e o gradiente de temperatura afetam o comportamento do material, parâmetros que se não forem corrigidos pelas equações constitutivas do material podem fornecer dados imprecisos (LADEMO et al., 2010).

Observa-se facilmente que o alongamento do alumínio aumenta conforme a taxa de deformação do ensaio é incrementada.

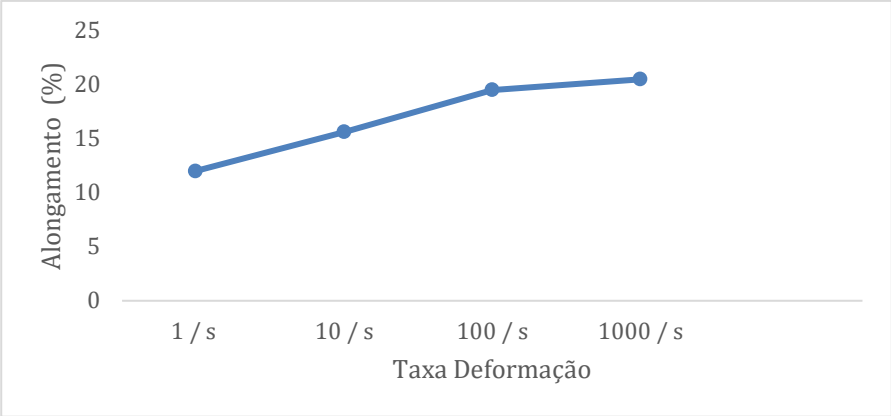


Figura 34. Alongamento (%) do CP para diferentes taxas de deformação. Fonte: Produção do próprio autor

3.4.2.2. Aço Inox 304

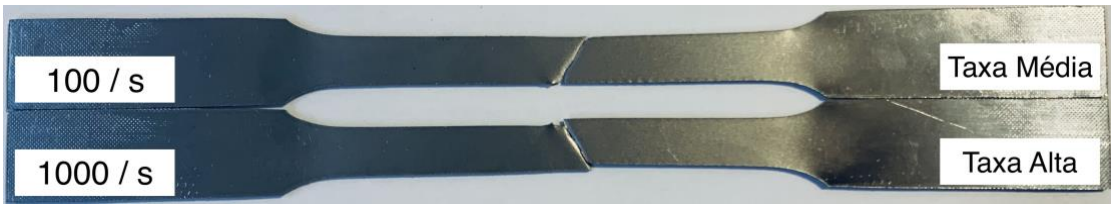


Figura 35. Corpos de Prova (Aço Inox 304) após ensaio destrutivo de tração. Fonte: Produção do próprio autor

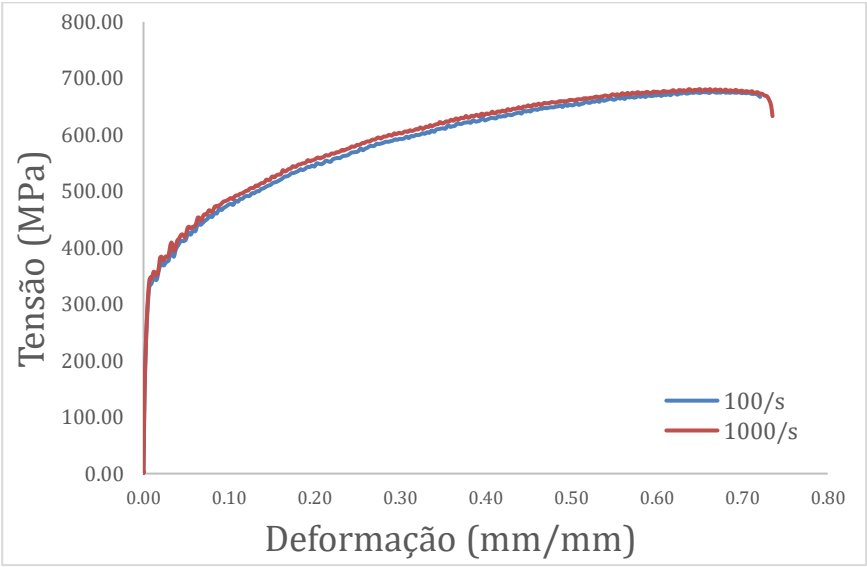


Figura 36. $Curva\ \sigma\ x\ \varepsilon$ (Controle de Taxa de Deformação Inox). Fonte: Produção do próprio autor

Ajuste de J-C para os ensaios de tração do Aço Inox 304 com controle da Taxa de Deformação

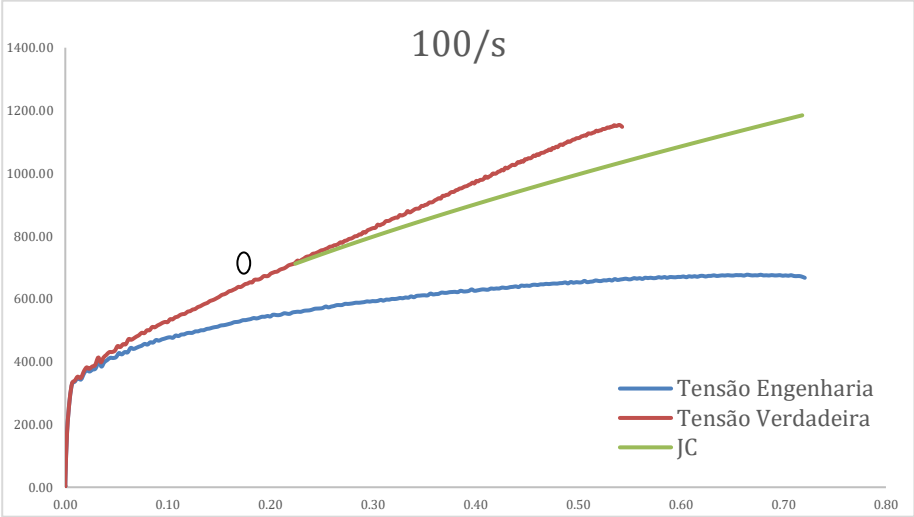


Figura 37. Ajuste J-C Aço Inox 304 (100 /s). Fonte: Produção do próprio autor

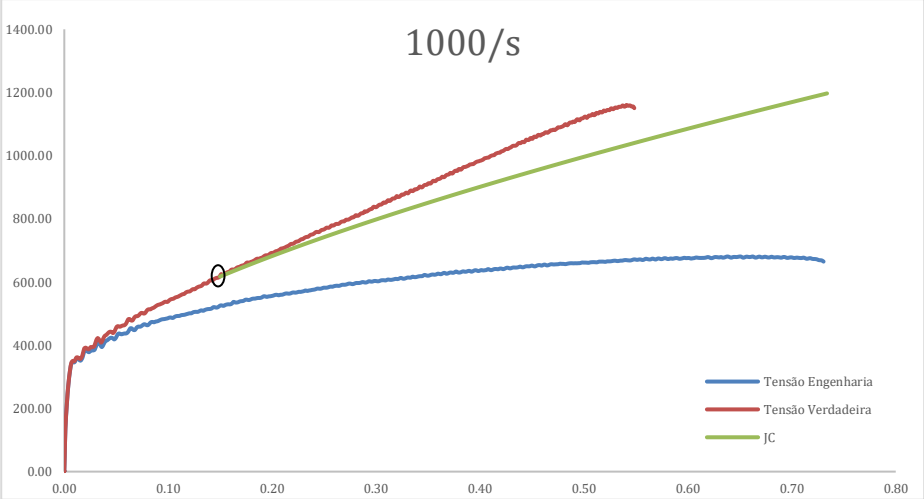


Figura 38. Ajuste J-C Aço Inox 304 (1000 /s). Fonte: Produção do próprio autor

Ao analisar o inicio do escoamento para essas duas taxas de deformação, observa-se na Fig. (36) que o valor de tensão escoamento (LE) dessas duas taxas é bem próximo.

4. ANÁLISE DAS CONSTANTES MODELO DE JOHNSON COOK

4.1. CONSTANTES JOHNSON COOK ALUMÍNIO

Ao substituir os valores obtidos no ensaio de tração utilizando a taxa de deformação de referência $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = 1\, S^{-1}$, na Eq. (19) obtém-se um gráfico que relaciona linearmente a relação entre $ln\varepsilon$ (abcissa) e $\ln(\sigma - A)$ (ordenada). Os pontos obtidos necessitam ser tratados com uma regressão linear de primeira ordem, representado na Fig. (41) com os pontos ajustados.

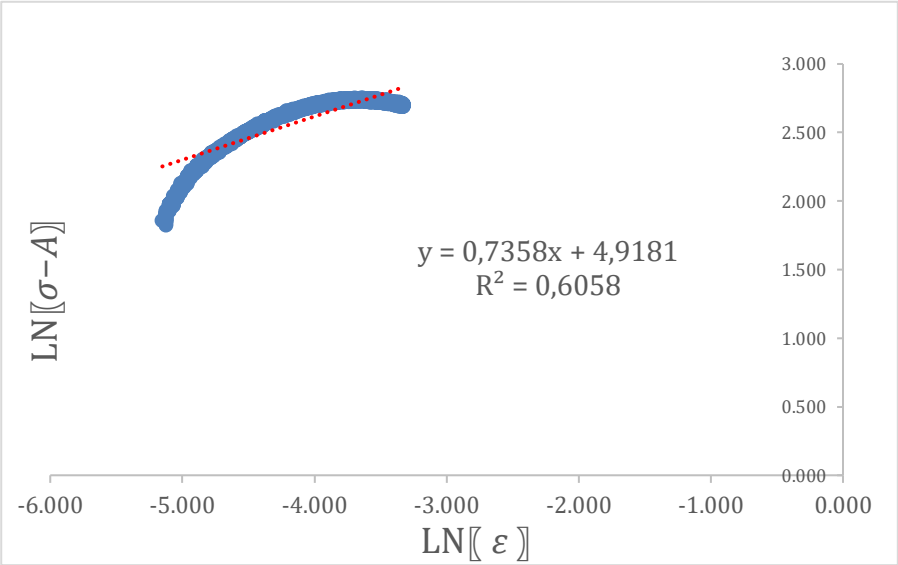


Figura 39. Relação entre $ln\varepsilon$ e $\ln(\sigma - A)$. Fonte: Produção do próprio autor

A Figura (39) foi gerada utilizando o Excel, os mesmos dados alimentaram o sistema de calibração de materiais submetidos a ensaio de tração no Abaqus e o resultado foi semelhante. A Figura (40) apresenta o ensaio simulado no Abaqus, após tratado e adaptado para o modelo proposto na literatura por (MURUGESAN; JUNG, 2019) a Fig. (41) foi obtida no Excel.

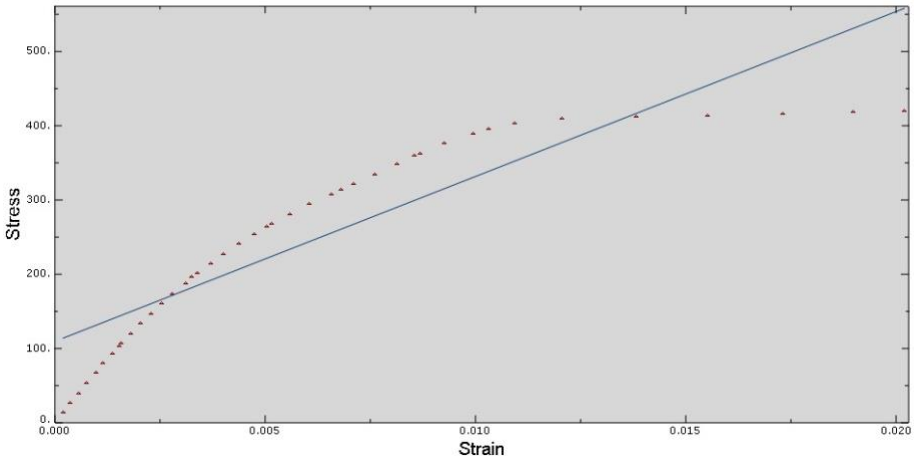


Figura 40. Relação entre $ln\varepsilon$ e $ln(\sigma - A)$ Abaqus. Fonte: Produção do próprio autor

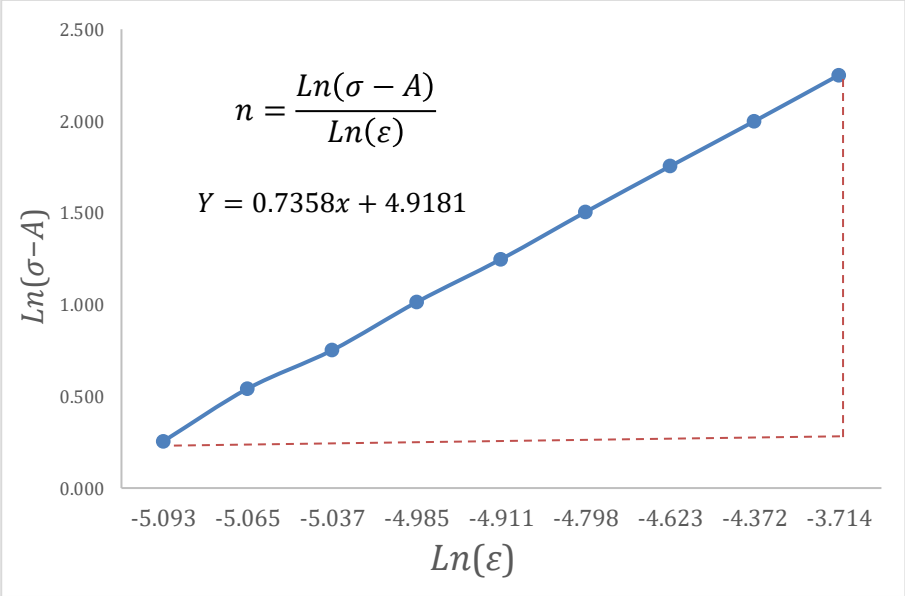


Figura 41. Relação entre $\ln(\sigma - A)$ e $ln\varepsilon$ nas condições de referência. Fonte: (MURUGESAN; JUNG, 2019), adaptado.

Após os ajustes, a Eq. (30) representa a reta na Fig. (41) e a constante n representa a inclinação da reta.

$$\ln(\sigma - A) = nln\varepsilon + lnB \tag{17}$$

$$Y = 0{,}7358x + 4{,}9181 \tag{18}$$

$$lnB = 4{,}9181 \rightarrow B \sim 136.7\ MPa \tag{19}$$

Tabela 9. Parâmetros de Johnson Cook para o Alumínio AA1200.

Material	$A_{al}(MPa)$	$B_{al}(MPa)$	n_{al}	C_{al}	$T_{ref}(°C)$	$T_m(°C)$	$\dot{\varepsilon}_0(s^{-1})$
AA1200	126.14	136.7	0.73	0.007	25	660	1

Para a validação do ensaio experimental realizado no alumínio AA1200, dados encontrados na literatura foram utilizados para comparação. Os valores encontrados são bem próximos aos obtidos no trabalho de (HONGTAO, NINGGANG e YUNG, 2011).

Determinando a constante C

Assumindo a que a temperatura é igual a temperatura ambiente ($T = T_{ref}$), a Eq. (25) é simplificada para:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n](1 + CLn\,\dot{\varepsilon}^*) \tag{20}$$

$$\frac{\sigma}{[A+B\varepsilon^n]} = (1 + CLn\,\dot{\varepsilon}^*) \tag{21}$$

Substituindo os valores encontrados para A, B e n.

$$\frac{\sigma}{126.14+136.7\varepsilon^{0,7358}} \tag{21.1}$$

Tabela 10. Pontos $curva\ (\sigma\ x\ \varepsilon)$ para as taxas de deformação de ($10\ s^{-1}$, $100\ s^{-1}$, $1000\ s^{-1}$) adotando $\dot{\varepsilon_0} = 1\ s^{-1}$.

Taxa	Tensão (σ)	Deformação(ε)	$\frac{\sigma}{A + B\varepsilon^n}$	$Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)$
10	128,3408	0,0060	0,993	2,303
	133,4306	0,0112	1,017	2,303
	137,8574	0,0347	1,001	2,303
100	129,6016	0,0049	1,006	4,605
	137,1712	0,0165	1,033	4,605
	140,8906	0,0295	1,033	4,605
1000	138,4124	0,0192	1,036	6,908
	135,2680	0,0235	1,004	6,908
	144,0420	0,0270	1,061	6,908

Substituindo os valores calculados na Tab. (10) plota-se um gráfico relacionando $Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)$ e $\frac{\sigma}{[A+B\varepsilon^n]}$. O Método dos Mínimos Quadráticos é o mais indicado para o ajuste de uma função linear obtida pelo conjunto de dados experimentais. A qualidade do ajuste localmente obtido é avaliada pelo coeficiente de determinação *R2* (MONGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2004).

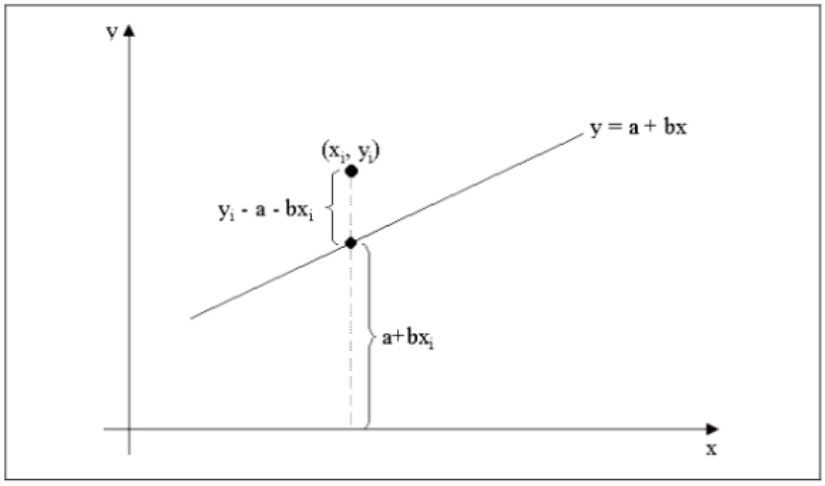


Figura 42. Método Mínimos Quadrados (NOBREGA, 2010).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - a + bx_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2} \quad (22)$$

Onde:

R é o coeficiente de determinação, y_i a variável dependente e x_i é a variável independente e n é o numero de pares ordenados (x_i, y_i).

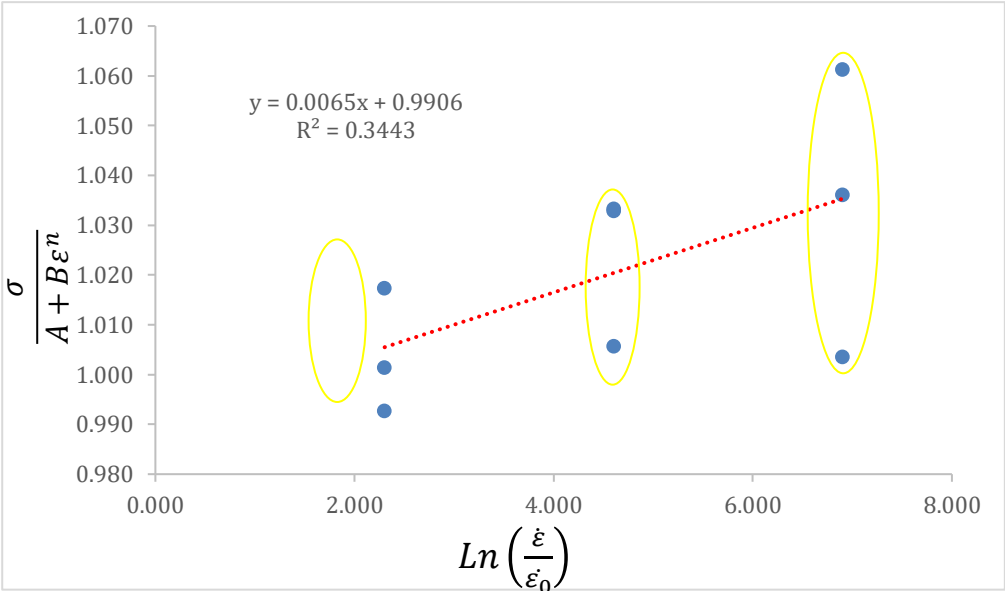


Figura 43. Relação entre $Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$ e $\frac{\sigma}{[A+B\varepsilon^n]}$

A Figura (44) apresenta a tensão de escoamento para os ensaios com variadas taxas de deformações.

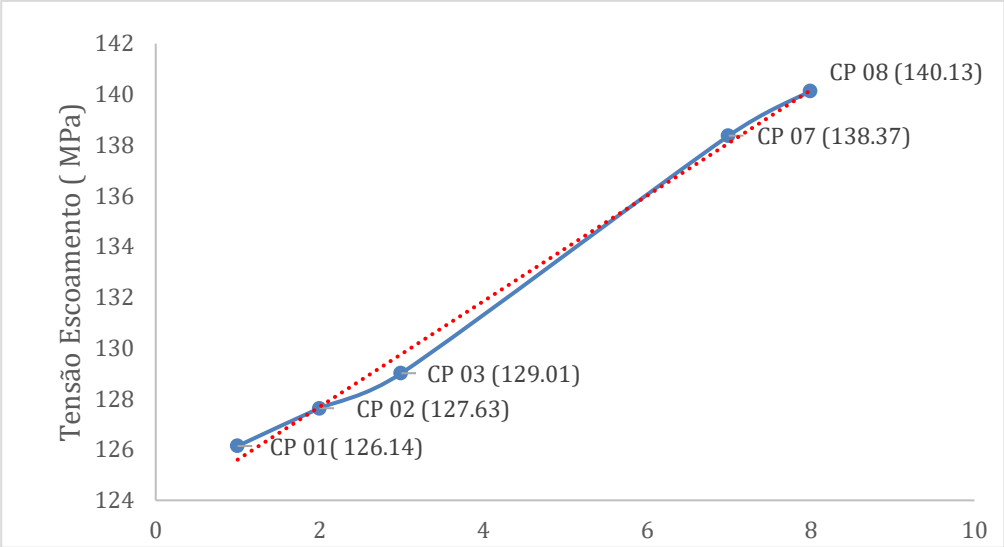


Figura 44. Tensão de Escoamento e Corpo de Prova Alumínio

Ao analisar as curvas de deformação, observa-se que a tensão de escoamento aumenta junto com a taxa de deformação. No ensaio realizado por Alves e Jones (2002) utilizando Aço de Baixo Carbono usualmente utilizado na indústria automobilística, observa-se um aumento de até 80 % na sua tensão de escoamento, ao variar-se a taxa de deformação. Essa relação é característica de cada material e só pode ser determinada através de ensaios dinâmicos de tração (NÓBREGA, 2010). Analisando os dados obtidos com o teste de tração do alumínio, tem-se uma tensão de escoamento de 126.14 Mpa para uma taxa de deformação de ($1\,S^{-1}$) e 140.13 Mpa para uma taxa de deformação de ($1000\,S^{-1}$), tal variação representa um aumento de 11,09% em seu limite de escoamento.

Testes utilizando alumínio, submetido ao ensaio de compressão e utilizando a estratégia de controle de variar taxas de deformação entre $10^{-3} a\, 10^{3}$, revelam o aumento continuo da sensibilidade à taxa de deformação para o alumínio quando submetido a condições de cargas quase estáticas e dinâmicas. O resultado obtido foi de que o mecanismo de controle de taxa em altas taxas de deformação é diferente daquele em baixas taxas de deformação (T. SUO et al., 2013).

Após manipular os dados obtidos experimentalmente para o Alumínio e definir os parâmetros de J-C, a tensão de J-C pode ser obtida substituindo tais parâmetros na Eq. (18).

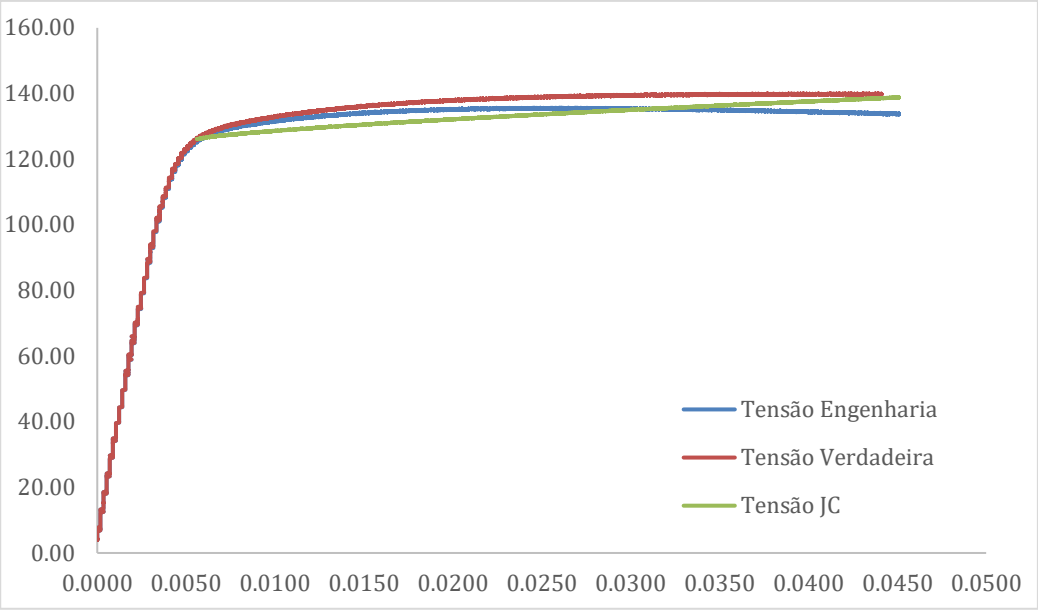


Figura 45. Tensão Engenharia, Verdadeira e de Johnson Cook

Após as devidas manipulações dos dados experimentais os parâmetros de JC foram determinados para as diferentes taxas de deformação.

Tabela 11. Parâmetros de J-C para diferentes taxas de deformação (Alumínio)

	n	B	A
1 / s	0.73	140.06	126.14
10 / s	0.75	147.47	127.63
100 / s	0.73	153.46	129.03

4.2. CONSTANTES JOHNSON COOK AÇO INOX 304

Ao substituir os valores obtidos no ensaio de tração utilizando a taxa de deformação de referência $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = 1\, S^{-1}$, na Eq. (19) obtém-se um gráfico que relaciona linearmente a relação entre $ln\varepsilon$ (abcissa) e $\ln(\sigma - A)$ (ordenada). Os pontos obtidos necessitam ser tratados com uma regressão linear de primeira ordem, representado na Fig. (47) com os pontos ajustados.

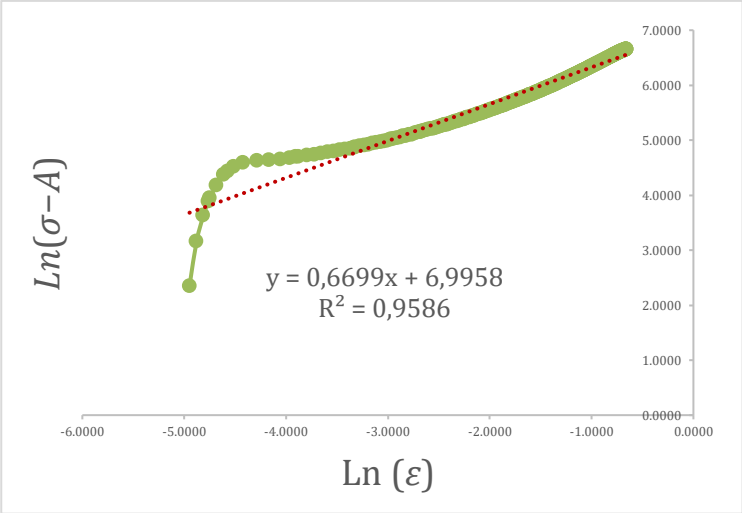


Figura 46. Relação entre $ln\varepsilon$ e $\ln(\sigma - A)$.

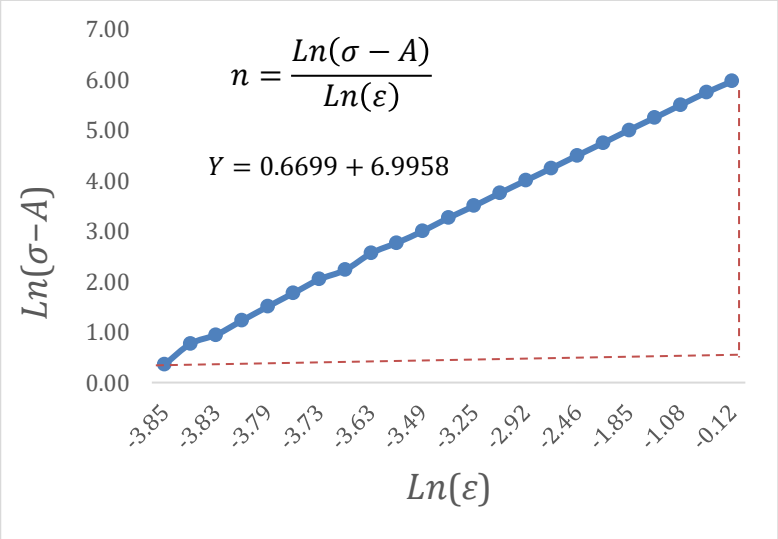


Figura 47. Relação entre $\ln(\sigma - A)$ e $ln\varepsilon$ nas condições de referência. Fonte: (MURUGESAN; JUNG, 2019) adaptado.

$$\ln(\sigma - A) = nln\varepsilon + lnB \tag{17}$$

$$Y = 0{,}6699x + 6{,}9958 \tag{18.1}$$

$$lnB = 6{,}9958 \rightarrow B \sim 1092\ MPa \tag{19.1}$$

Tabela 12. Parâmetros de Johnson Cook para o Aço Inox 304 (LEE et al., 2006).

Material	$A_{al}(MPa)$	$B_{al}(MPa)$	n_{al}	C_{al}	$T_{ref}(°C)$	$T_m(k)$	$\dot{\varepsilon}_0(s^{-1})$
Aço Inox 304	400	1092	0.67	0.006	25	1673	1

Para a validação do ensaio experimental realizado para o Aço Inox 304, dados encontrados na literatura foram utilizados para comparação. Os valores encontrados são bem próximos aos obtidos no trabalho de (LEE et al., 2006).

Determinando a constante C

Assumindo a que a temperatura é igual a temperatura ambiente ($T = T_{ref}$), a Eq. (28) é simplificada para:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n](1 + CLn\ \dot{\varepsilon}^*) \tag{23}$$

$$\frac{\sigma}{[A+B\varepsilon^n]} = (1 + CLn\ \dot{\varepsilon}^*) \tag{24}$$

Substituindo os valores encontrados para A, B e n.

$$\frac{\sigma}{400+1092\varepsilon^{0,67}} \tag{24.2}$$

Tabela 13. Pontos das curvas Tensão X Deformação para as taxas de deformação de ($0.00175\ s^{-1}, 0.0175\ s^{-1}, 0.175\ s^{-1}, 1\ s^{-1}, 1.75\ s^{-1}, 3.58\ s^{-1}, 10\ s^{-1},\ 100\ s^{-1}$, $1000\ s^{-1}$ adotando $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ s^{-1}$.

Taxa	Tensão (σ)	Deformação(ε)	$\frac{\sigma}{A + B\varepsilon^n}$	$Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)$
0,00175	246,320	0,005	0,571	-6,348
0,00175	1080,550	0,493	1,001	-6,348
0,00175	563,186	0,166	0,774	-6,348
0,00175	985,271	0,440	0,957	-6,348
0,00175	1313,982	0,624	1,098	-6,348
0,01750	161,314	0,003	0,384	-4,046
0,01750	1080,812	0,510	0,987	-4,046
0,01750	241,424	0,004	0,563	-4,046
0,01750	533,186	0,107	0,827	-4,046
0,01750	907,585	0,387	0,928	-4,046
0,17500	158,340	0,002	0,378	-1,743
0,17500	323,857	0,015	0,694	-1,743
0,17500	686,333	0,233	0,845	-1,743
0,17500	940,922	0,411	0,939	-1,743
0,17500	1093,899	0,521	0,989	-1,743
1,75000	195,832	0,003	0,466	0,560
1,75000	337,023	0,011	0,745	0,560
1,75000	1182,581	0,558	1,039	0,560
1,75000	673,084	0,197	0,876	0,560
1,75000	927,125	0,372	0,963	0,560
3,50800	186,909	0,002	0,446	1,255
3,50800	336,566	0,009	0,754	1,255
3,50800	562,174	0,114	0,858	1,255
3,50800	735,759	0,227	0,915	1,255

Taxa	Tensão (σ)	Deformação(ε)	$\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$	$Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)$
3,50800	1194,848	0,561	1,046	1,255
100,00000	178,510	0,002	0,430	4,605
100,00000	377,108	0,023	0,773	4,605
100,00000	430,744	0,046	0,801	4,605
100,00000	565,899	0,124	0,845	4,605
100,00000	1153,981	0,540	1,028	4,605
1000,00000	135,417	0,001	0,329	6,908
1000,00000	388,856	0,022	0,802	6,908
1000,00000	562,400	0,115	0,856	6,908
1000,00000	986,112	0,402	0,993	6,908
1000,00000	1160,576	0,541	1,033	6,908

Após as devidas manipulações a Fig. (48), apresenta os dados da Tab. (13), a qual será analisada utilizando o método dos mínimos quadrados.

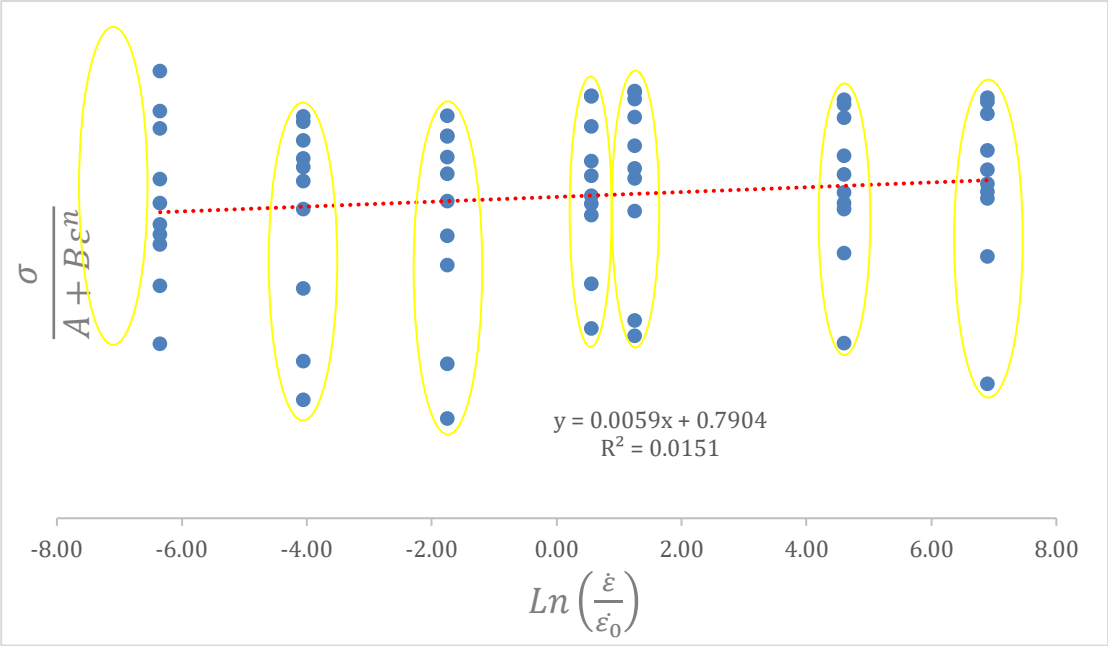


Figura 48. relação entre $Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$ e $\frac{\sigma}{[A+B\varepsilon^n]}$

Parâmetros de JC para aço inox em diferentes taxas de deformação.

Tabela 14. Parâmetros de J-C para diferentes taxas de deformação INOX 304

	n	B	A
0.00175 / s	0.8868	1329	260
0.0175 / s	0.6824	1089	403
0.175 / s	0.7720	1143	296
1 / s	0.7469	1149	311
1.75 / s	0.6943	1147	307
3.508 / s	0.7424	1194	319

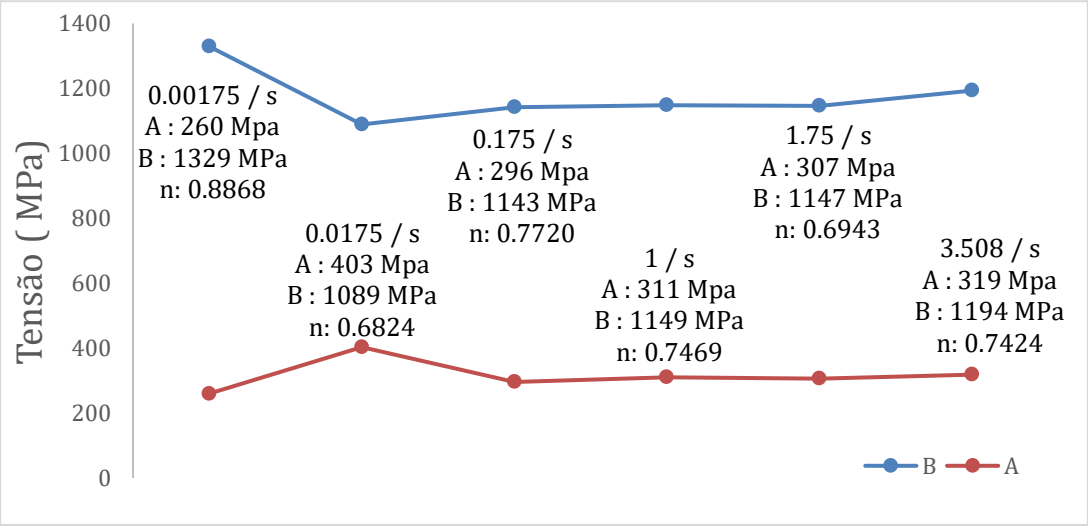


Figura 49. Parâmetros de Johnson Cook Aço Inox 304 (Comparação Parâmetros A e B)

Ao analisar o comportamento dinâmico do Inox 304, duas estratégias de controle da deformação foram adotadas, são elas, o controle da taxa de deformação e controle da velocidade de deslocamento do pistão. Quando o CP de Inox foi submetido a ensaios de tração utilizando a estratégia de controle da taxa de deformação observou-se que o limite de escoamento estava na faixa dos 300 MPa, mas ao submete-lo a ensaios onde a estratégia de controle era a variação da velocidade de deslocamento do pistão, observou-se que o limite de escoamento ultrapassou 400 MPa em algumas velocidades, a discrepância entre os dois é superior a 30%. Desta forma a análise do comportamento dinâmico do material é indispensável, visto que a tensão de escoamento é o parâmetro mais utilizado em projetos de engenharia e a taxa de deformação pode alterar significativamente as propriedades do material.

Após manipular os dados obtidos experimentalmente para o Aço Inox e definir os parâmetros de J-C, a tensão de J-C pode ser obtida substituindo tais parâmetros na Eq. (13).

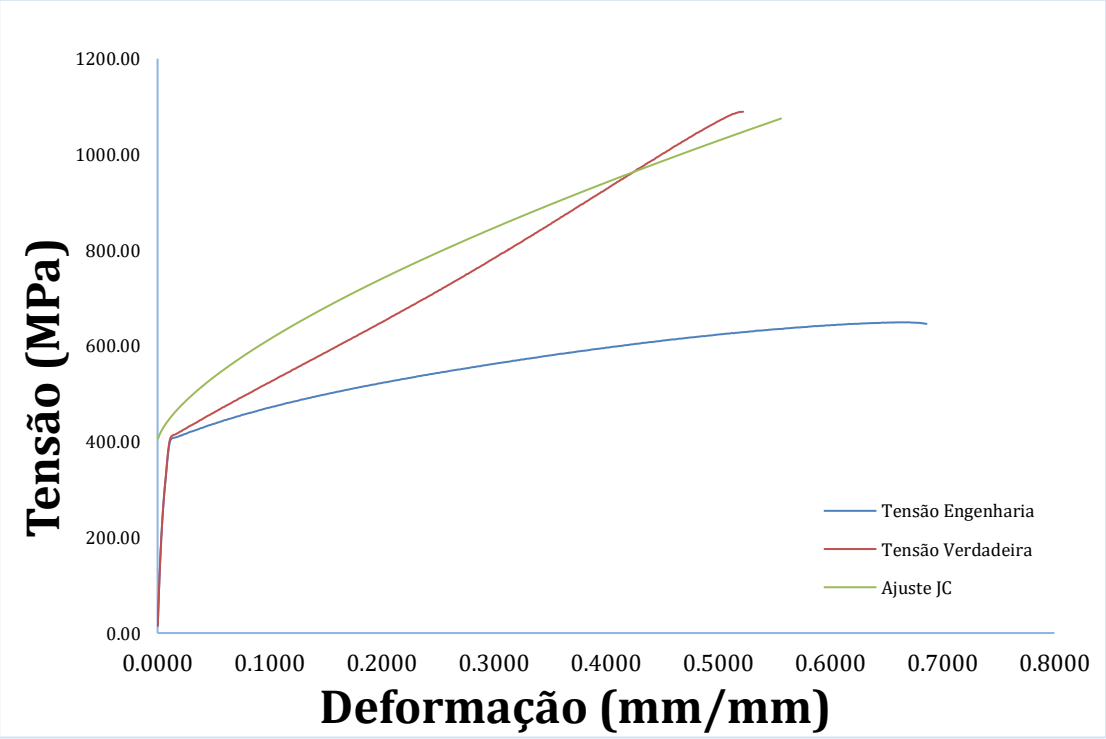


Figura 50. Ajuste de Johnson Cook Aço Inox 304

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento na taxa de deformação do alumínio AA1200 proporciona um aumento imediato na resistência ao escoamento. O escoamento não depende somente dos valores de taxa de deformação, mas também da história de deformação plástica. O incremento na taxa de deformação além de apresentar uma variação positiva na resistência ao escoamento, proporciona um aumento na ductilidade do material. A razão para este aumento na ductilidade é que geralmente o aumento na taxa de encruamento proporciona uma distribuição do fluxo plástico por uma região bem maior, assim aumentando o tempo para que ocorra a estricção local (LADEMO et al., 2010).

Ao submeter os corpos de prova de aço inox 304 ao ensaio de tração, constatou-se o aço inox 304 é muito mais sensível ao efeito da taxa de deformação do que o alumínio AA1200, no que se refere ao aumento da tensão de escoamento. O alumínio apresentou uma variação na casa dos 11 % em relação a sua resistência ao escoamento, enquanto o aço inox 304 superou uma variação de 30% em sua resistência ao escoamento. O que já era esperado pela literatura, pois em 2002 Alves e Jones fizeram experimentos variando a taxa de deformação e observaram uma variação na tensão de escoamento em torno de 80% para aços de baixo carbono.

Quando a estratégia de controle variando a taxa de deformação foi empregada para o ensaio de tração no alumínio AA1200, observou-se que o tempo para se obter a tensão máxima variava entre 2.4924 segundos com $\dot{\varepsilon} = 1/s$ e 0.01260 segundos com $\dot{\varepsilon} = 1000/s$. Entretanto ao utilizar a estratégia de controle da velocidade o tempo para se obter a tensão máxima foi de 7.73 segundos para uma velocidade de 6 mm/s, isso representa 3 vezes o tempo necessário para se obter a tensão máxima quando a estratégia de controle adotada é a taxa de deformação.

Do mesmo modo, quando a estratégia de controle variando a taxa de deformação foi empregada para o ensaio de tração no aço inox 304, observou-se que o tempo para se obter a tensão máxima praticamente não variou, foi 0.24 segundos com $\dot{\varepsilon} = 100/s$ e $\dot{\varepsilon} = 1000/s$. Entretanto ao utilizar a estratégia de controle da velocidade o tempo para se obter a tensão máxima foi de 503.69 segundos para uma velocidade de 0.1 mm/s e 0.25 segundos com a velocidade de 200 mm/s.

Ao se comparar o alumínio e o aço é importante destacar as desvantagens de se trabalhar com alumínio em vez do aço, no que se trata de impacto estrutural. O alumínio possui um modulo de elasticidade, resistência e ductilidade menores do que os aços de alta resistência e derrete a temperaturas acima de 600-700 ℃. Também é menos sensível a taxa de deformação do que a maioria dos aços em relação a sua resistência, mas a taxa de deformação pode ter um efeito significativo na ductilidade. Em geral o seu grau de sensibilidade a taxa de deformação diminui à medida que a resistência do material aumenta. Ensaios de impacto com gradiente de temperatura utilizando a barra de Hopkinson foram realizados e constatou-se que a tensão de escoamento diminui e a ductilidade aumenta com a temperatura (BORVIK et al., 2005).

5.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugestões para Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros podem:

1. Estudar o efeito das estratégias de controle de taxa de deformação e controle da velocidade do pistão em equipamentos específicos para ensaios com altas taxas de deformação, como a barra de Hopkinson como propõe a literatura, visto que os resultados com o equipamento que não possui a precisão necessária não são tão promissores.
2. Estudar o efeito de altas taxas de deformação em materiais de uso aeronáutico.
3. Simular computacionalmente os materiais que serão testados, desta forma limitando os erros e os parâmetros que se deseja encontrar.
4. Avaliar efeitos da temperatura em ensaios com altas taxas de deformação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ABNT NBR ISO 6892-1:2013 - Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

Alexopoulos, N. D., Velonaki, Z., Stergiou, C. I., & Kourkoulis, S. K. (2016). The effect of artificial ageing heat treatments on the corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 (Al–Cu) aluminium alloy. Corrosion Science, 102, 413-424.

Alves, Marcilio & Jones, Norman. (2002). Impact failure of beams using damage mechanics: Part I-Analytical model. International Journal of Impact Engineering. 27. 837-861.

American National Standard Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum," PP/2650/988/11, Aluminum Association, July 1988

American National Standard Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum," PP/2650/988/11, Aluminum Association, July 1988

ASTM E646. Standard Test Methods for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet. USA: American Society for Testing and Materials, 1998).

Borvik T, Clausen A H, Eriksson M, Berstad T, Langseth M, Hopperstad O S; Experimental and numerical study on the perforation of AA6005-T6 panels. Int J Impact Eng 2005;32:35-64.

Browse Code of Federal Regulations (Annual Edition). FDsys. US Government Publishing Office Federal Digital System. Acesso em: 2021-04-27.

Buyuk, M., Kan, S., & Loikkanen, M. J. (2009). *Explicit Finite-Element Analysis of 2024-T3/T351 Aluminum Material under Impact Loading for Airplane Engine Containment and Fragment Shielding. Journal of Aerospace Engineering, 22(3), 287–295.*

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

Cantwell, W. J., & Morton, J. (1989). *Comparison of the low and high velocity impact response of cfrp. Composites, 20(6), 545–551.*

CARMO, Fernanda Custódio Pereira do; DRIEMEIER, Larissa. Simulação numérica do impacto de uma esfera de aço em placa fina de alumínio. **Anais..** São Paulo: EPUSP, 2006.

CAVALCANTE, Felipe Fernandes; DA SILVA, Wanderson Santana. Comportamento Mecânico da Liga de Alumínio 2024 Submetida a Diferentes Tempos de Envelhecimento. **HOLOS**, [S.l.], v. 8, p. 86-100, maio 2017. ISSN 1807-1600.

Conserva, M.; Donzelli, G; Trippodo, R. Aluminium and its applications.Italy, Edimet, p.221-223, 1992.

GARCIA, A.; SPIM. J.A.; SANTOS, C. A. dos. Ensaios dos materiais. Rio de Janeiro, LTC, 2000.

Georgiadis, S., Gunnion, A. J., Thomson, R. S., & Cartwright, B. K. (2008). *Bird-strike simulation for certification of the Boeing 787 composite moveable trailing edge. Composite Structures, 86(1-3), 258–268.*

Groover, M.P., Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Processes, and Systems. 4th ed. 1996: Wiley.

Gurusamy, M. M., & Rao, B. C. (2017). On the performance of modified Zerilli-Armstrong constitutive model in simulating the metal-cutting process. Journal of Manufacturing Processes, 28, 253–265.

HALL, S. R.; CONQUEST, T. J. The total data integrity initiative—structural health monitoring, the next generation. In: Proceedings of the USAF ASIP. [S.l.: s.n.], 1999.v. 2.

Hanssen, A. G., Girard, Y., Olovsson, L., Berstad, T., & Langseth, M. (2006). *A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels. International Journal of Impact Engineering, 32(7), 1127–1144.*

Hedayati, R., Ziaei-Rad, S., Eyvazian, A., & Hamouda, A. M. (2014). *Bird strike analysis on a typical helicopter windshield with different lay-ups. Journal of Mechanical Science and Technology, 28(4), 1381–1392*

Heimbs, S. (2011). *Computational methods for bird strike simulations: A review. Computers & Structures, 89(23-24), 2093–2112.*

Hernandez, C., Maranon, A., Ashcroft, I. A., & Casas-Rodriguez, J. P. (2013). A computational determination of the Cowper–Symonds parameters from a single Taylor test. Applied Mathematical Modelling, 37(7), 4698–4708.

INSTRON. Servohydraulic - Fatigue Testing Systems. [S. l.: s. n.], 2016.

Johnson G R, Cook W H; A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Presented at the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands, 1983.

Jutras, M. 2008. Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook Model, Faculté Des Sciences Et De Génie Unıversité Laval Québec.

Lademo, Odd-Geir & Engler, Olaf & Aegerter, Johannes & Berstad, Torodd & Benallal, Ahmed & Hopperstad, Odd. (2010). Strain-Rate Sensitivity of Aluminum Alloys AA1200 and AA3103. Journal of Engineering Materials and Technology. 132. 041007.

Lee, S., Barthelat, F., Hutchinson, J.W., Espinosa, H.D., 2006, “Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials - Experiments and modeling.”, International Journal of Plasticity, vol. 22, p. 2118-2145.

Lin, Y. C., Xia, Y. C., Jiang, Y. Q., Zhou, H. M., & Li, L. T. (2013). Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging. Materials Science and Engineering: A, 565, 420- 429.

M. A. Roma Buzar, P. W. Partridge e C. L. Sahlit. Elementos Finitos Híbridos Aplicados à Analise Plástica Limite de Problemas de Estado Plano de Tensões com a Utilização dos Critérios de Tresca e Von Mises. Mecânica Computacional Vol. XXI, pp. 1102-1120, outubro 2002.

M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson., Prog. Mater. Sci. 51 (2006) 427–556.

MORALES, Eduardo Domingo. Análise de critérios de falha em materiais dúcteis: um estudo numérico e experimental. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. doi:10.11606/D.3.2013.tde-24122013-114652. Acesso em: 2021-04-22.

Murugesan, Mohanraj & Jung, Dong Won. (2020). Correction: Murugesan, M., et al. Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications. Materials 2019, 12, 609. Materials. 13. 5744. 10.3390/ma13245744.

Nakai, M., & Eto, T. (2000). New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications. Materials Science and Engineering: A, 285(1), 62-68.

NBR NM-ISO 4948-1:2000 - Aços - Classificação dos aços não ligados e ligados -Parte 1: Classificação dos aços em aços não ligados e ligados com base na sua composição química.

NEMAT-NASSER, S. Introduction to high strain rate testing. In: ASM Handbooks online: mechanical testing and evaluation. Park, Oklahoma, USA: 2003. v. 8.

Nizampatnam, Lakshmi. (2007). Models and methods for bird strike load predictions.

NÓBREGA, Marcelo de Jesus Rodrigues. Influência da metodologia de medição das propriedades mecânicas dinâmicas na previsibilidade do comportamento de estruturas sujeitas a impactos elastoplásticos. 2010. Tese de Doutorado (Doutorando em Engenharia Mecânica) - Engenharia Mecânica, PUC-Rio, [S. l.], 2010.

Oshiro, R. & Alves, Marcilio. (2004). Scaling impacted structures. Archive of Applied Mechanics. 74. 130-145. 10.1007/s00419-004-0343-8.

Rahner, C.. “Analytical evaluation of impact test equipments to simulate high caliber ballistic threats.” (2012).

Reglero, J. A., Rodríguez-Pérez, M. A., Solórzano, E., & de Saja, J. A. (2011). *Aluminium foams as a filler for leading edges: Improvements in the mechanical behaviour under bird strike impact tests. Materials & Design, 32(2), 907–910.*

Roylance, D. (2001). Yield and Plastic Flow.

Smerd, R. & Winkler, Sooky & Salisbury, C. & Worswick, M. & Lloyd, David & Finn, M.. (2005). High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. International Journal of Impact Engineering. 32. 541-560. 10.1016/j.ijimpeng.2005.04.013

SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 5ª edição, 1982

Suo, T., Chen, Y., Li, Y., Wang, C., & Fan, X. (2013). Strain rate sensitivity and deformation kinetics of ECAPed aluminium over a wide range of strain rates. Materials Science and Engineering: A, 560, 545–55.

Zhang, H., Che, F., Lin, T., & Zhao, W. (2020). *Stress and reliability analysis for interconnects. Modeling, Analysis, Design, and Tests for Electronics Packaging Beyond Moore, 131–244.*