

1 Introdução

A influência da taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ nas curvas tensão \times deformação ($\sigma \times \epsilon$), em geral desprezada no dimensionamento mecânico de componentes estruturais metálicos, pode ser importante na prática. O efeito dinâmico nas propriedades mecânicas pode ser relevante em peças que trabalham sob tensões altas geradas por cargas muito mais lentas ou bem mais rápidas do que as usuais nos testes de tração usada para medi-las (que duram de 1 a 2 minutos, sob taxas médias típicas da ordem de $\dot{\epsilon} \cong 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$). Vários mecanismos podem causar efeitos da taxa de deformação nas propriedades mecânicas, gerados pela natureza dissipativa das deformações plásticas. Todavia, a sua descrição não faz parte do escopo deste trabalho, que visa apenas avaliar a adequação de modelos fenomenológicos usados para quantificá-los no dimensionamento mecânico. Estes modelos não refletem a complexidade física do problema, mas mesmo assim têm grande importância prática. De fato, a sua incerteza, que depende de vários fatores, muitas vezes limita a qualidade das previsões estruturais. Dentre eles, a prática de ajustar os parâmetros dos modelos a dados medidos em testes de tração feitos sob taxas de carga ou de deslocamento constantes, em vez de sob taxas de deformação fixas. Esta prática inadequada é muito usada porque facilita os testes (é trivial fixar, e.g., a velocidade do travessão numa máquina de testes acionada por parafusos). Mas este procedimento certamente não garante uma taxa de deformação constante no corpo de prova (CP) e pode causar erros de previsão muito significativos. A carga atuante nos ensaios de tração solicita tanto o CP quanto a estrutura da máquina de testes, a qual, apesar de trabalhar elasticamente, pode sofrer deslocamentos significativos. De fato, os CPs de aço de 10 mm de diâmetro são uma ordem de grandeza mais rígidos do que as máquinas usadas para testá-los, cuja rigidez típica é $7 < \mathbf{k} < 32 \text{ MN/m}$. De acordo com Dieter (1981), num teste controlado pela velocidade \mathbf{v} da carga se obtém uma taxa de deformação no CP dada por:

$$\mathbf{v}t = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{k}} + \frac{\sigma.L_0}{\mathbf{E}} + \epsilon_p.L_0 \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{(\mathbf{v}.\mathbf{k} / \mathbf{A}.\mathbf{E}) + \dot{\epsilon}_p}{(\mathbf{k}.L_0 / \mathbf{A}.\mathbf{E}) + 1} \quad (1)$$

onde \mathbf{t} é o tempo do teste; σ é a tensão atuante no CP; L_0 o seu comprimento efetivo; \mathbf{A} a área da sua seção resistente; \mathbf{E} o seu módulo de elasticidade; $\dot{\epsilon}$ a taxa de deformação; ϵ_p a deformação plástica nele atuante; e \mathbf{P} a carga aplicada. Portanto, mesmo

supondo que a máquina tenha uma rigidez constante (o que em geral não ocorre, devido ao comportamento não linear de garras e juntas), a taxa de deformação que atua no CP não é proporcional à velocidade da carga nele aplicada, salvo na região elástica (na qual os efeitos dinâmicos são desprezíveis), quando então a equação (1) se resume a:

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{v}{L_0} \left(1 + \frac{A.E}{k.L_0} \right) \quad (2)$$

Reforçando o que foi citado acima, NOBREGA (2010) testou CPs de aço de 9 mm de diâmetro numa máquina servo-hidráulica sob duas estratégias de controle, vide Fig. 1: (i) taxa de deformação fixa, usando um *clip gage* montado no CP para medir sua deformação; e (ii) velocidade do pistão fixa, controlando o movimento do pistão através do LVDT nele montado. A partir dos dados de entrada do programa utilizado, o sinal de comando é comparado ao sinal da retro-alimentação, gerando assim um sinal de erro que é usado para atuar a servo-válvula que controla o fluxo do fluido hidráulico no atuador. O sinal de controle pode ser gerado pelo clip gage montado no CP ou pelo LVDT fixado entre o pistão e a estrutura da máquina.

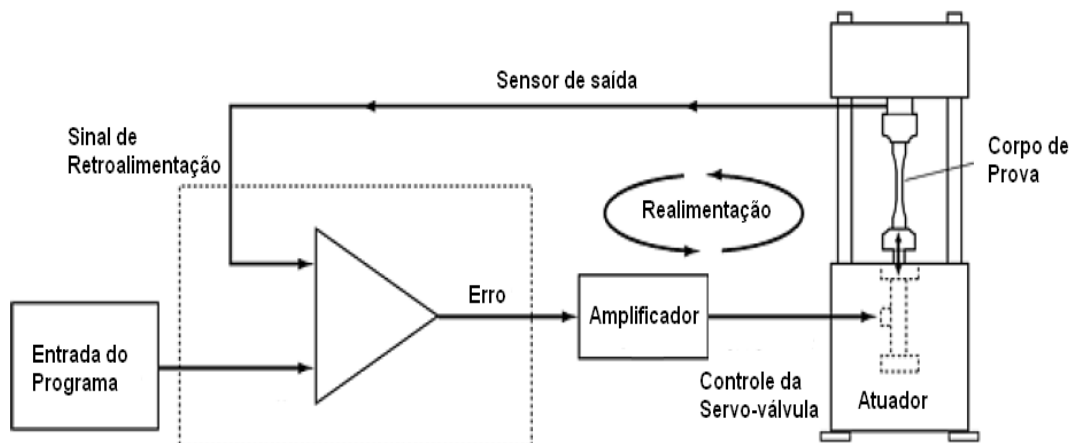


Figura 1. Esquema básico do sistema de controle de uma máquina servo-hidráulica.

A Figura 2 apresenta as medidas do deslocamento do pistão e da deformação imposta no CP ao longo de um teste feito sob controle da taxa de deformação, mantida fixa e igual a $\dot{\varepsilon} = 5.10^{-2} \text{ %/s}$ durante o ensaio. Nota-se neste caso que a velocidade do pistão geraria uma taxa estimada variável durante o ensaio, cuja média dada por $\dot{\varepsilon} = v/L_0 = 9.6.10^{-2} \text{ %/s}$ tem um valor bem superior à taxa medida.

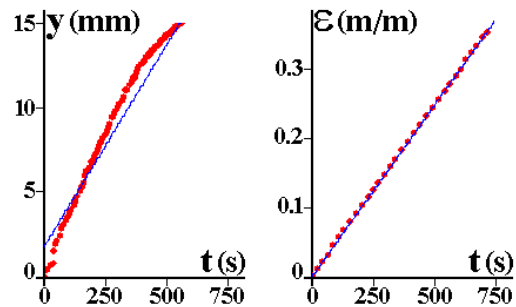


Figura 2. Deslocamento do pistão y e deformação (de engenharia) ε atuante no CP durante um ensaio feito sob taxa de deformação constante.

A Figura 3 mostra as medidas do deslocamento do pistão e da deformação resultante num CP idêntico ao da Fig. 2 ao longo de um teste feito sob controle da velocidade do pistão, mantida fixa. Neste caso a velocidade foi ajustada para gerar uma taxa de deformação no CP estimada por $\dot{\varepsilon} = v/L_0 = 4.8 \cdot 10^{-2} \text{ %/s}$, quase igual à taxa imposta no teste anterior. Todavia, a taxa de deformação média efetivamente medida no CP foi bem menor, $\dot{\varepsilon}_m = 3 \cdot 10^{-2} \text{ %/s}$, variando de $\dot{\varepsilon} = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ %/s}$ no início até cerca de $\dot{\varepsilon} = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ %/s}$ no fim do ensaio.

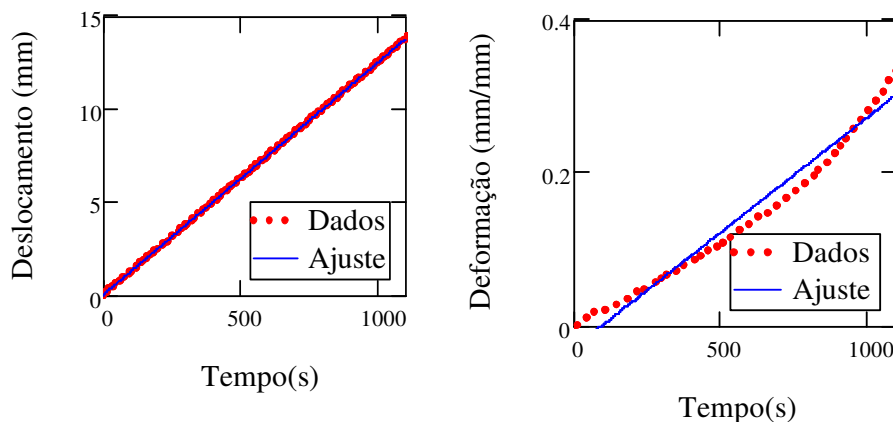


Figura 3. Deslocamento do pistão e deformação atuante num CP idêntico ao da Figura 2, durante um ensaio feito sob velocidade do pistão fixa.

Essas diferenças não são insignificantes, e podem influir de forma não desprezível na incerteza dos resultados dos ensaios. Entretanto, esta limitação não afeta os dados discutidos aqui, todos medidos sob taxa de deformação constante. Por fim, o estudo em NOBREGA (2010) retrata a significativa diferença entre o modelo proposto por MEYERS (1994), de considerar taxa de deformação pela equação $\dot{\varepsilon} = vt/L_0$ e o valor determinado da taxa de deformação em um ensaio de tração controlado por esta.

1.1 Motivação

Os dutos possibilitam o transporte e distribuição de óleo, gás, e derivados com vazões suficientes e sob pressões relativamente altas para assegurar sua viabilidade econômica. Uma tubulação falhará quando for impossibilitada de exercer a sua função de transporte ou quando apresentar um vazamento de quantidade significativa do produto. O processo que leva à ruptura de uma tubulação é resultante da associação de tensão alta (causada por alta pressão e projeto econômico, envolvendo tubos com paredes finas) com um ou mais mecanismos de dano (químicos ou mecânicos, que criam defeitos nas paredes de contenção). De um modo geral uma análise de integridade para projeto ou avaliação de adequação ao uso envolve itens que lidam com:

- A função esperada para o componente estrutural estudado.
- Histórico de funcionamento, anomalias ocorridas, local de operação e sua interação com o ambiente.
- Análise do projeto considerando o seu código de projeto.
- As solicitações que ocorreram e que ainda ocorrerão e os estados de tensão críticos.
- **As propriedades mecânicas dos materiais envolvidos e sua possível variação com o tempo e o meio.**
- O emprego de um critério de resistência que relacione os estados de tensão críticos com as variáveis ou propriedades mecânicas de resistência correspondentes.

Uma vez que a análise de integridade estrutural e adequação ao uso de componentes mecânicos, como por exemplo, dutos, tanques e vasos de pressão, consideram as propriedades mecânicas dos materiais e sua variação com o tempo, é pertinente estudar o efeito dinâmico nestas propriedades para analisar de forma mais realística o comportamento do material.

Além disso, há normas técnicas que classificam o material destes componentes mecânicos para operação, como exemplo, a norma ASME B 31.4, (2004) *Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Others Liquids*, que prevê uma pressão de teste no mínimo igual à 1,25 a pressão de projeto com duração mínima de 4 horas. Desta forma, uma outra motivação deste trabalho está diretamente correlacionada com a determinação prevista em norma, uma vez que os efeitos dinâmicos nas propriedades mecânicas com cargas muito lentas (menores que $\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) são ,em geral, associadas a resistências mais baixas, possibilitando que danos em

torno de defeitos ou trincas nos testes de sobrecarga de dutos possam ser bem maiores do que os previstos desprezando o efeito da taxa de deformação. Por outro lado, a simulação de acidentes, como por exemplo, automotivos e aeronáuticos, só podem ser bem feita usando propriedades mecânicas elastoplásticas obtidas a partir de curvas $\sigma \times \epsilon$ medidas sob taxas $\dot{\epsilon}$ bem altas, similares às dos acidentes reais. Destaca-se o acidente do World Trade Center, cujo foi um evento onde a simulação de modelos precisos de impacto de aeronaves e o resultado do dano nas torres gêmeas exigiram conhecimento das propriedades mecânicas dos aços submetidos á altas taxas de deformação, conforme estudo da *Nacional Institute of Standards and Technology* (2001).

1.2 Revisão da Literatura

Os ensaios de tração controlados por taxa de deformação podem ser realizados por máquinas convencionais de parafuso, máquinas com controle servo-hidráulico, máquinas com alta taxa de controle servo hidráulico, máquinas de impacto e, por último, o sistema da barra de Hopkinson. Todavia, cada máquina opera com uma faixa ótima de controle de deformação, de acordo com o estudo de XIAO (2007), mostrado na Figura 4.

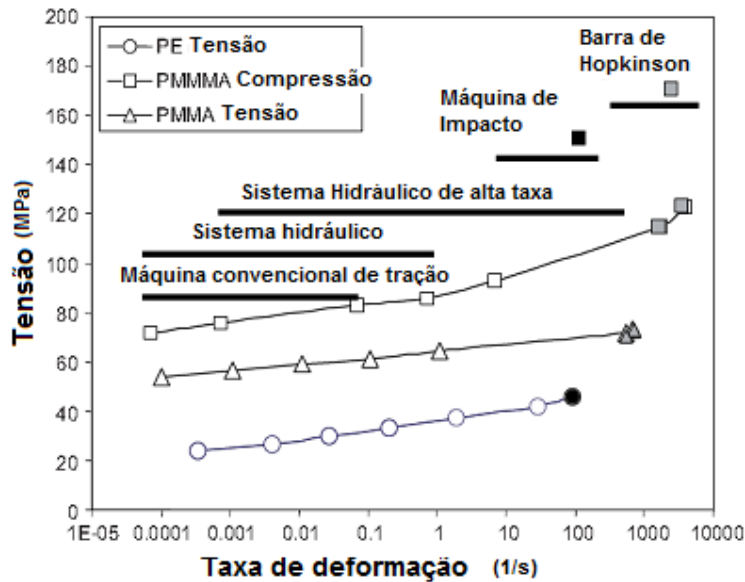


Figura 4. Relação de tipos de máquinas de tração com a faixa de taxa de deformação.

Segundo XIAO (2007) nos ensaios de tração dinâmicos, as taxas de deformação máxima na qual um sistema de teste pode ser usado para gerar dados confiáveis são limitadas pela frequência natural do sistema de teste. Segundo MEYERS (1994), nos métodos de ensaio na faixa de deformação da ordem de 10 a $10^2/s$ (faixa considerada como teste de baixa dinâmica), realizados em máquinas hidráulicas ou pneumáticas de alta velocidade, a ressonância mecânica do corpo de prova e da máquina são importantes. Nesta dissertação serão abordados ensaios de taxa de deformação na faixa de $10^{-5} \leq \dot{\epsilon} \leq 3 s^{-1}$, na qual estão parcialmente contidas as faixas de deformação estudadas por CHEN (2004), que diz que as taxas de deformações envolvidas em uma colisão veicular variam com a geometria do veículo na ordem de 10^{-1} até $10^3/s$, conforme pode ser observado na Figura 5.

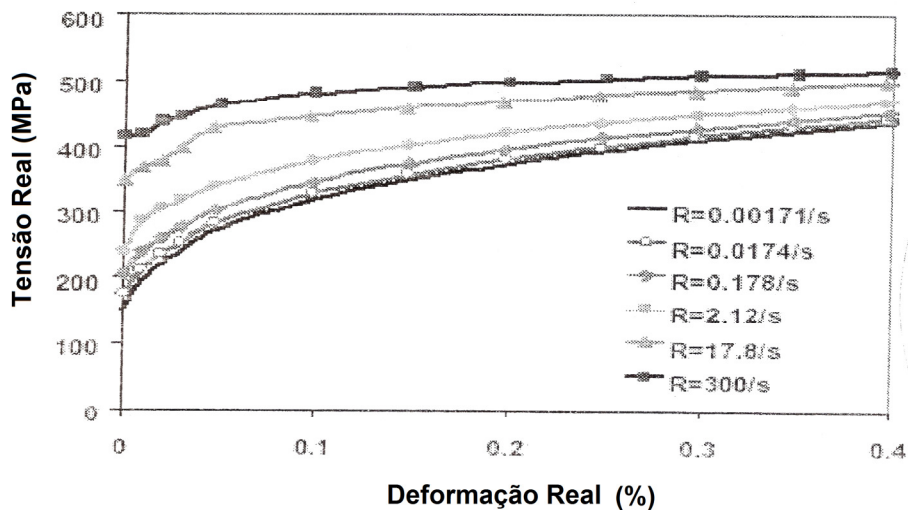


Figura 5. Gráfico tensão x deformação nas taxas de deformação suscetíveis a colisões veiculares segundo Chen (2004).

Em 2006, THOMPSON mostrou que a influência da temperatura é relevante para o aumento da resistência do material, conforme pode ser visto na Figura 6, onde são feitos vários ensaios de tração realizados com a taxa de deformação de $65.10^{-3} s$ para diferentes temperaturas. Entretanto, nesta dissertação a variação de temperatura não é considerada, pois os ensaios dinâmicos de tração foram feitos com temperatura fixada e controlada em laboratório, tendo a mesma ordem de grandeza da temperatura dos testes de sobrecargas de alguns equipamentos em questão, tais como: dutos, tanques e vasos de pressão.

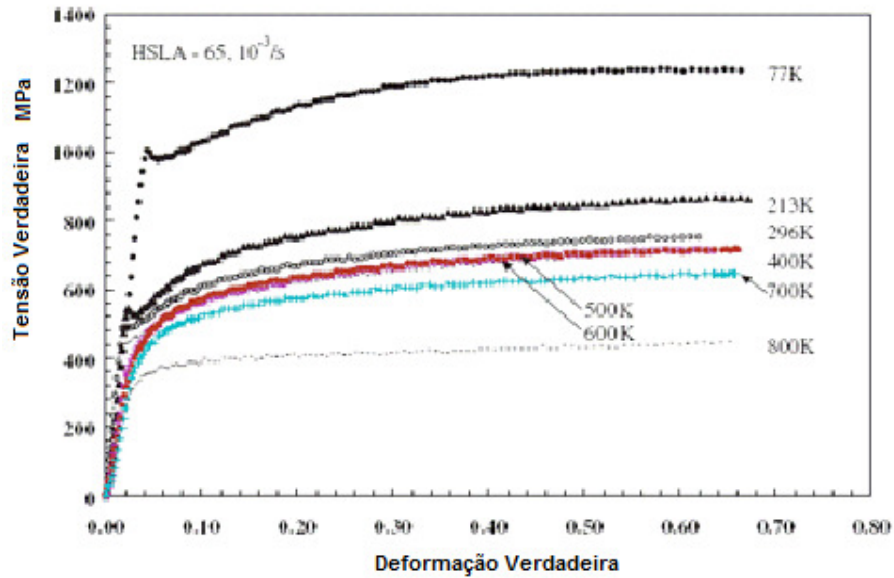


Figura 6. Comportamento do aço HSLA em ensaio de tração submetidos a diversas temperaturas de ensaio. Thompson (2006).

Um estudo realizado pela empresa ArcelorMittal no USA, por HUANG e ZHU (2007) revela a dificuldade de se evitar consideráveis ruídos nos gráficos tensão versus deformação devido às oscilações da carga e às oscilações causadas por alguns componentes triviais destes ensaios, tais como: LVDT, *strain gage* e *Doppler extensometer*, conforme a Figura 7. Ainda neste estudo, é mostrado na Figura 8 a relação do efeito da taxa de deformação na tensão de ruptura do material.

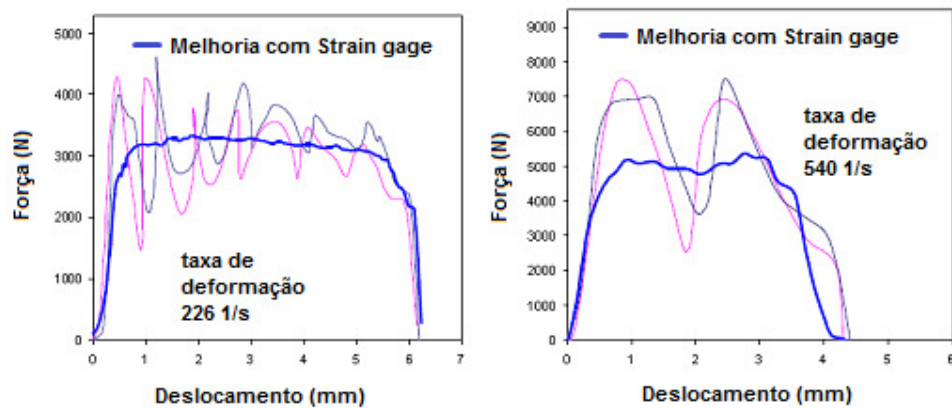


Figura 7. Dificuldade em ajustar a resposta gráfica para altas taxas no estudo da Arcelor Mittal.

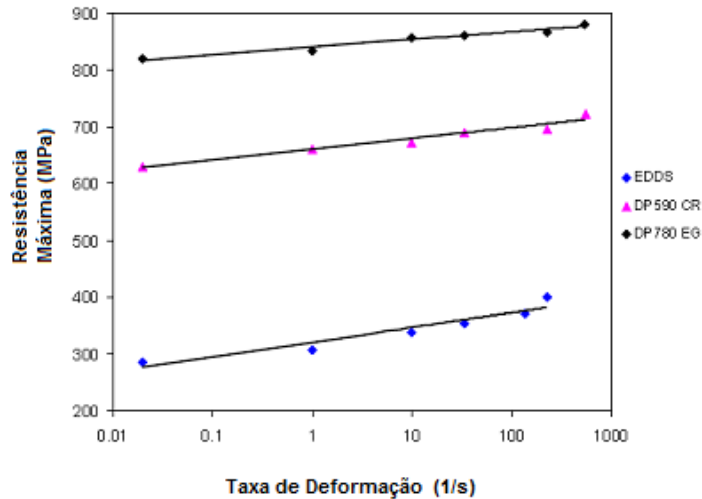


Figura 8: Comportamento do aço EDDS, DP 590 CR e DP 780 EG da ArcelorMittal

Em 1983, JOHNSON e COOK (**JC**) criaram um modelo fenomenológico, o qual será discutido melhor no capítulo 3, atribuindo endurecimento ao material em função da taxa de deformação e da temperatura. Entretanto, alguns materiais, como por exemplo, o Al-5083 e cobre OFHC, não obedecem estritamente essa relação. O estudo de THOMPSON (2006) mostra que o material Al 5083 não pôde ser enquadrado em todas as taxas de deformação satisfatoriamente, conforme demonstra a Figura 9. Por isso, para este material, o modelo matemático **JC** só pode ser usado dentro dos limites dos dados experimentais.

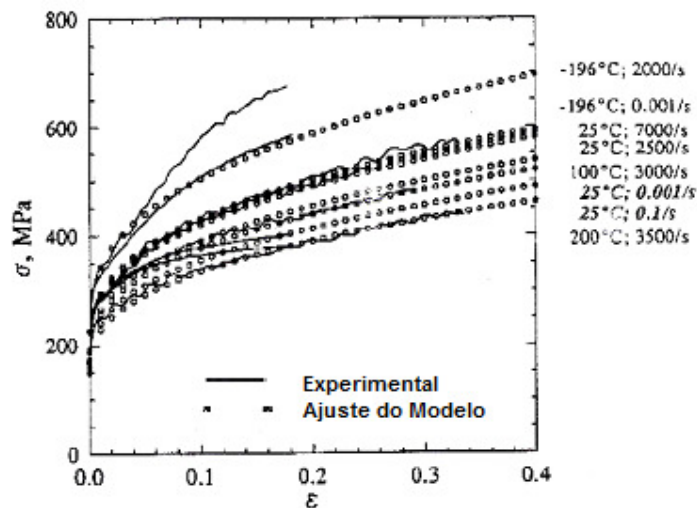


Figura 9: Adequação do modelo de Johnson e Cook para Alumínio 5083.

Em 1986, ZERILLI e ARMSTRONG (**ZA**) criaram um modelo constitutivo que será detalhado no capítulo 3, mas que também foi utilizado nos estudos de Thompson (2006) com intuito de comparar os modelos matemáticos que melhor ajustam a curva tensão versus deformação de um determinado material. A Figura 10 mostra que o modelo de **ZA** é sutilmente melhor para descrever o comportamento do material Alumínio 5083 na curva tensão versus deformação quando comparado com o ajuste baseado no modelo de **JC**, mostrado na Figura 9.

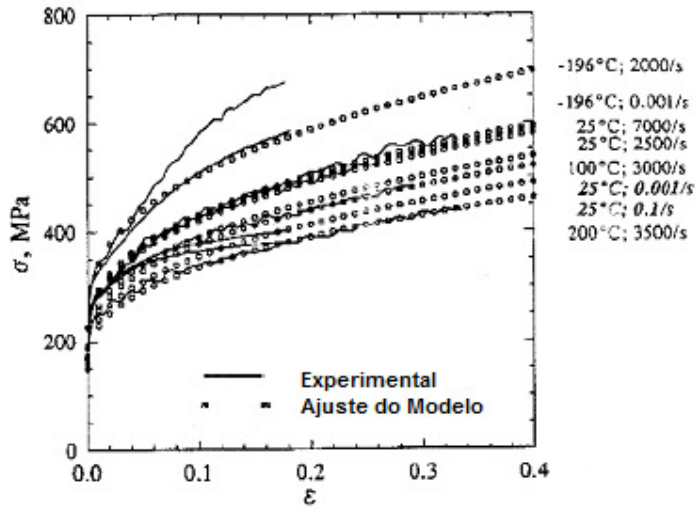


Figura 10: Adequação do modelo de Zerilli e Armstrong para Alumínio 5083.

No estudo de BOYCE, CRENSHAW e DILMORE (2007) o fator conhecido como sensibilidade da taxa de deformação, m , é comumente calculado pela equação (3) abaixo, onde: $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação, S_E é a resistência ao escoamento do material e K' é uma constante do material.

$$S_E = K' \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

A Figura 11 mostra, para cada tipo de aço, os valores calculados do fator sensibilidade da taxa de deformação (m) e também uma tendência linear entre a resistência ao escoamento e o logaritmo da taxa de deformação.

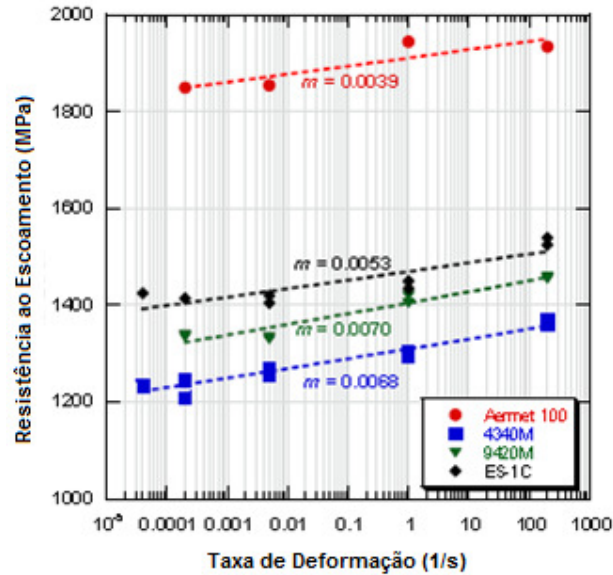


Figura 11: Comportamento dinâmico de diferentes ligas de aço de aplicação balística.

Em 2010, LAROUB correlacionou a influência da taxa de deformação, a deformação plástica, a microestrutura do material e a temperatura com o fator de sensibilidade da taxa de deformação em aços automobilísticos. Para tanto, diversos modelos matemáticos foram utilizados com intuito de prever o comportamento dinâmico dos materiais, onde foi ressaltada a fundamental importância de um chute inicial aproximado para representar os parâmetros das equações. Caso contrário, o algoritmo de otimização não convergiria para valores satisfatórios. Outra importante consideração constatada nos estudos de LAROUB foi a comprovação de que a sensibilidade da taxa de deformação aumenta com a diminuição da temperatura ou com o aumento da taxa de deformação, fatores que são muitas vezes omitidos pelos dados citados na literatura.

Em 2010, SHROT e BAKER usaram o modelo de Johnson e Cook para simulações de usinagem. Contudo, nas altas taxas de deformação ($\sim 10^6 \text{s}^{-1}$), que são normalmente encontradas durante a usinagem de alta velocidade, os parâmetros de Johnson Cook são extrapolados, porque estes são obtidos em taxas de deformação muito menores. Dessa forma a solução deste problema foi conduzir experimentos de simulação inversa para deduzir os reais parâmetros de Johnson e Cook, utilizando o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt.

KHARCHENKO (2002) observou que em muitas situações, tais como penetração de um projétil em um alvo, propagação de trincas, tecnologia e processo de soldagem, tratamento de metais por corte e por pressão, entre outros, a deformação plástica do

material ocorre numa taxa de deformação bastante elevada, tipicamente (10^3 - 10^6 s⁻¹). Mais uma vez o modelo de **JC**, devido a sua versatilidade, foi utilizado para descrever os efeitos da temperatura, da taxa de deformação e da deformação na predição da tensão.

Em 2005, HASHIGUCHI, OGAWA, MUMURA e TANIMURA desenvolveram curvas de tensão versus deformação para taxas de deformação compreendidas entre 10^{-3} até 10^3 s⁻¹. Para se avaliar a energia de absorção de partes dos automóveis é fundamental que se obtenha uma precisa curva tensão versus deformação dos materiais submetidos a várias taxas de deformação. Todavia, para taxas acima de 10 s⁻¹ há interferência na célula de carga, dificultando a mensuração precisa em equipamentos convencionais de tração. Para solucionar esse problema, além de duas máquinas diferentes, ambas com controladores servo-hidráulicos de alto desempenho, foram utilizadas a barra de Hopkinson coaxial e não coaxial. Para região de deformação acima de 5%, todas as máquinas obtiveram a mesma relação tensão versus deformação; contudo, para taxas de deformação em uma pequena porção abaixo de 5%, a relação tensão versus deformação variou em função do tipo de máquina.

Em 2003, ZABOTKIN, O'TOOLE e TRABIA utilizaram os materiais aço inoxidável 316 L, titânio grau 7 e liga C 22 usados em sistemas mecânicos de combustível nuclear, os quais, além de resistir às cargas estáticas e à temperatura, deverão se manter íntegros quando submetidos a esforços dinâmicos. Desta forma, foram realizados ensaios controlados por taxa de deformação variando entre 10^{-4} s⁻¹ até 200 s⁻¹ com a máquina de ensaio de tração MTS, responsável pelos ensaios mais lentos, e uma máquina Instron Dynatup (queda de peso instrumentado), responsável pelos ensaios mais rápidos. Este estudo concluiu para estes materiais que o aumento da taxa de deformação gerou um significativo aumento da resistência ao escoamento e tensão de ruptura com um sutil decréscimo do alongamento total.

Considerando a importância da estimativa da incerteza de medição em ensaios e as dificuldades encontradas nas diversas áreas da metrologia para a sua implementação, SILVA, em 2004, estimou as incertezas do ensaio de tração à temperatura ambiente pelo fato de ser um ensaio de ampla utilização na determinação de importantes características mecânicas em materiais metálicos.

A Figura 12 mostra os componentes de incerteza a serem considerados no ensaio e tração à temperatura ambiente independentes do material. A Figura 13 mostra também os componentes de incerteza, porém dependentes do material.

Componentes de Incerteza	Causa	Método de Avaliação	Distribuição de probabilidade	Divisor apropriado
Incerteza herdada da calibração da máquina de ensaios	Exatidão limitada na calibração. Incerteza de medição na calibração do padrão.	Importada do Certificado de Calibração da Máquina de Ensaios Mecânicos como uma incerteza expandida (U95%).	Normal	Fator de abrangência "k" declarado no Certificado de Calibração da Máquina de Ensaios Mecânicos
Incerteza herdada da calibração do Extensômetro	Exatidão limitada na calibração. Incerteza de medição na calibração do padrão.	Importada do Certificado de Calibração do Extensômetro como uma incerteza expandida (U95%).	Normal	Fator de abrangência "k" declarado no Certificado de Calibração do Extensômetro
Incerteza herdada da calibração do Paquímetro	Exatidão limitada na calibração. Incerteza de medição na calibração do padrão.	Importada do Certificado de Calibração do Paquímetro como uma incerteza expandida (U95%).	Normal	Fator de abrangência "k" declarado no Certificado de Calibração do Paquímetro
Resolução da Máquina de Ensaios Mecânicos (MEM)	Valor de uma divisão de escala ou capacidade de interpolação limitada da MEM	Para instrumentação Digital: valor do último dígito significativo Para instrumentação analógica: valor de uma divisão de escala, capacidade de interpolação do operador ou valor de uma divisão do nônio	Retangular	$\sqrt{3}$
Resolução do Paquímetro	Valor de uma divisão de escala ou capacidade de interpolação limitada do Paquímetro	Para instrumentação Digital: valor do último dígito significativo Para instrumentação analógica: valor de uma divisão de escala, capacidade de interpolação do operador ou valor de uma divisão do nônio	Retangular	$\sqrt{3}$

Figura 12: Componentes de incerteza independentes do material 1.

Componentes de Incerteza	Causa	Método de Avaliação	Distribuição de probabilidade	Divisor apropriado
Desvio padrão experimental da média	Natureza do material ensaiado	A função estatística utilizada para sua caracterização é o desvio padrão amostral $s(x_k)$ dos n valores que compõem a série de medições	Normal	\sqrt{n}
Geometria e preparação do corpo de prova	Manipulação do corpo de prova	Para instrumentação Digital: valor do último dígito significativo Para instrumentação analógica: valor de uma divisão de escala, capacidade de interpolação do operador ou valor de uma divisão do nônio	Retangular	$\sqrt{3}$
Velocidade de tensionamento do material	Sensibilidade dependente da natureza do material ensaiado	Valores tabelados nas tabelas J.2 e J.3 da norma NBR ISO 6892:2002	Retangular	$\sqrt{3}$
Temperatura do ensaio	Limites de temperatura estabelecidos pelo laboratório	$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta t$, onde: ΔL = Dilatação linear do material; α = coeficiente de dilatação térmica do material; Δt = afastamento máximo da temperatura ambiente em relação a temperatura de referência para o ensaio.	Retangular	$\sqrt{3}$

Figura 13: Componentes de incerteza independentes do material 2.

1.2.1 Influência da Máquina de Teste nas Propriedades Mecânicas

Durante o ensaio de tração há alguns fatores de conhecimento bastante divulgados que podem alterar as propriedades mecânicas dos materiais ensaiados. Em relação à variação de temperatura, em linhas gerais, em baixas temperaturas há um aumento de resistência e perda de ductilidade. A taxa de deformação, alvo de estudo desta dissertação, é outra importante influência. Não menos importante é a diferença entre o valor da resistência ao escoamento (S_E) de um material determinada em ensaios de tração em máquinas sensível à taxa de deformação (conhecida como máquina “dura”) e máquina sensível somente à variação da carga (conhecida como máquina “mole”). Segundo DIETER (1981), uma máquina mole não acusa prontamente o escoamento repentino de um material, devido a sua rigidez elástica. Para medidas precisas no estudo do escoamento é necessária uma máquina com alta rigidez, ou seja, uma máquina dura. Sendo assim, as diversas referências bibliográficas mostram os fatores que podem modificar o comportamento mecânico dos materiais quando submetidos ao ensaio de tração.

Desta forma, considerando as referências bibliográficas, a esta dissertação, além da adequação dos modelos constitutivos, cabe um estudo direcionado para o efeito da taxa de deformação nas propriedades mecânicas do material SAE 1020 pré-encruado.