

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Os modelos mecânicos que visam descrever a curva σ - ε obtida no ensaio de tração considerando os efeitos da taxa de deformação freqüentemente usam dados experimentais medidos sob velocidade constante, assumindo que esta seria equivalente a taxa de deformação também constante.

Todavia, esta simplificação embute um erro de lógica, pois a velocidade V é medida no travessão ou no pistão da máquina de teste e o comprimento do CP L_0 é medido no início do ensaio, logo a taxa de deformação $d\varepsilon/dt$ varia ao longo do ensaio. Como estudado no Capítulo 2, a variação da taxa de deformação ao longo dos testes de tração feitos sob velocidade fixa depende de vários parâmetros como a rigidez da máquina de teste e das garras, e do tipo de CP.

Para avaliar a influência destes erros foram realizados ensaios preliminares em alguns materiais estruturais representativos: um aço inoxidável, um latão, um aço de baixa liga, um aço carbono, e uma liga de alumínio. Os resultados desses testes semi-qualitativos indicaram que o aço carbono é o mais sensível ao efeito da taxa de deformação, no que se refere ao aumento de resistência ao escoamento e a resistência a tração. Assim este material foi usado na avaliação quantitativa do efeito da estratégia de controle na obtenção das propriedades mecânicas dinâmicas através de testes de tração feitos sob taxas que cobriram 6 ordens de grandeza, $10^{-4} \leq d\varepsilon/dt \leq 10$. Estes testes foram executados sob controle da taxa real e também da taxa nominal, usando um procedimento rigoroso para obtenção de uma base de dados estatisticamente confiável.

No estudo realizado para o aço AISI 1020, obteve-se uma diferença de 20% com o uso da expressão (58) quando comparados aos valores de $d\varepsilon/dt$. Desta forma existe uma interferência da estratégia de controle na obtenção dos modelos mecânicos baseados em taxa de deformação, uma vez que os dados da curva σ - ε são colhidos sob condições de controle de velocidade.

Foi determinada uma sistemática para se planejar um experimento, em tese genérico, partindo-se das especificações do número de corpos de prova e da

confiabilidade desejada, utilizando ainda a ferramenta estatística conhecida como teste de hipótese. Foi avaliada também a questão da função da densidade de probabilidade, sendo a adequada para o caso a t-student, por possuir um número de amostras menor que 30 ($n < 30$). Esta ferramenta possibilitou comparar os resultados das propriedades mecânicas de resistência ao escoamento (RE) e resistência a tração (RT) para as duas estratégias de controle. Assim obteve-se $t_{cal} (RE) = 0,772$ e $t_{cal} (RT) = 1,449$ e valor teórico tabelado $t_{tab} = 2,447$ (GL = 6 e grau de confiança de 95%). Desta forma como $t_{cal} < t_{tab}$ confirmam-se as hipóteses que os valores das propriedades mecânicas são estatisticamente equivalentes, mesmo com estratégias de controle distintas.

Contudo para uma modelagem cada vez mais precisa, buscam-se constantes constitutivas do material que melhor descrevam seu comportamento, principalmente em relação ao efeito da taxa de deformação. Os modelos mecânicos levam em conta na sua formulação $\dot{\epsilon}$ e não V/L_0 , o que interfere na obtenção destas constantes do material, conforme capítulo 4, influenciando no comportamento de uma estrutura, uma vez que a taxa de deformação varia ao longo do tempo e da posição durante um impacto. Assim as constantes descrevem um intervalo de taxas de deformação e não um único valor.

Desta forma, possuindo uma base de dados experimental bem definida a partir de ensaios realizados cuidadosamente, aliado a um programa capaz de ajustar fundamentado no algoritmo de L-M desenvolvido especificamente para cada modelo em estudo, fica estabelecida uma sistemática de avaliação de modelos, independentemente de sua complexidade matemática e do fenômeno físico, conforme descrito no Capítulo 2. Ressalta-se que as constantes assim obtidas representam o comportamento do material na faixa de $10^{-4} \leq d\epsilon/dt \leq 10/s$ e não localmente.

Para tanto a sistemática estabelecida foi aplicada de forma ilustrativa a problemas de modelagem de propagação de trincas, sendo de fácil adaptação para outras aplicações, comprovando a versatilidade do procedimento. O programa comercial *Mathcad R13* foi empregado por sua simplicidade, o que não impede ou restringe a aplicação do procedimento de avaliação por outros *softwares*, tais como: Matlab, Mapple dentre outros que possam estar disponíveis.

Para o caso dos ensaios de tração realizados foram ajustadas as constantes para cada um dos modelos avaliados: JC, JC-M e YU *et al* (2009), adicionado ao fato que cada um destes casos as constantes representam um valor global para a faixa de $10^{-4} \leq d\epsilon/dt \leq 10/s$ e não ajuste local, o que permite se avaliar a qualidade dos modelos, graças a base de dados desenvolvida.

Simulações computacionais foram feitas tendo como base o Método dos Elementos Finitos (MEF) no programa LS-DYNA, que é dedicado a problemas de impacto, visto que em outros softwares não é possível a inclusão do efeito da taxa de deformação, tal como no *CosmosWorks Advanced Professional*. Foram empregados diferentes modelos mecânicos que descrevem o comportamento da curva σ - ϵ obtida no ensaio de tração para se avaliar de modo quantitativo a influência de sua seleção adequada. Para tanto foram realizados testes em pórticos em uma máquina de impacto (*drop weight*) com o objetivo de validar as simulações computacionais, através do deslocamento final destas estruturas.

Conclui-se que a expressão de J-C modificada apresentou o melhor ajuste dentre os modelos em estudo. Conseqüentemente os deslocamentos da estrutura simulada foram mais próximos daqueles observados em resultados experimentais.

Assim torna-se evidente que a complexidade do modelo, especialmente o número de constantes não necessariamente garante uma melhor previsão do comportamento mecânico do material. Conforme descrito no Capítulo 4, o modelo de YU *et al* (2009) que tem 6 constantes se mostrou incapaz de representar a patamar de escoamento, enquanto o J-C modificado se mostrou bem mais preciso e mais simples.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros podem:

- 1) Estudar o efeito das estratégias de controle no ensaios para outros materiais, como o aço *Dual Phase*, que possui especial interesse na área automotiva, utilizando assim o procedimento estabelecido no Capítulo 2
- 2) Buscar relacionar através de modelos mecânicos-metalúrgicos o tamanho de grão e a taxa de deformação, conforme descrito no Capítulo 4.
- 3) Simular estruturas submetidas ao impacto com vários modelos de comportamento mecânico do material, de modo análogo ao desenvolvido no Capítulo 5, a fim de selecionar a expressão matemática que melhor representa o material, minimizando o erro de previsão
- 4) Realizar estudos de similaridade não direta, conforme a sistemática empregada no apêndice B deste trabalho, englobando assim o efeito da taxa de deformação e/ou velocidade nos modelos.

- 5) Prosseguir com estudos relacionado a tenacidade a fratura e a taxa de deformação.
- 6) Realizar testes de tração, a partir da metodologia apresentada no Capítulo 3, para valores de taxa de deformação inferiores a 0,01%/s para se avaliar, dentre outros aspectos, a resistência ao escoamento e deformação plástica total.
- 7) Propor modelos de correção de propriedade mecânicas já tabeladas considerando o efeito da taxa de deformação, como realizado no Capítulo 4.
- 8) Estudar os modelos simplificados de colisão veicular, com a técnica dos grafos de ligação, empregando as informações dependendo da taxa de deformação.
- 9) Construir um protótipo instrumentado em escala para se avaliar parâmetros dinâmicos, como a aceleração e velocidade de uma estrutura submetida ao impacto, visando estudar detalhadamente um cenário de colisão.
- 10) Realizar testes de impacto com a tecnologia já desenvolvida neste trabalho para outros materiais e geometrias.
- 11) Estudar o efeito da taxa de deformação e o tipo de fratura, bem como a relação com deformação máxima obtida por tipologia de ensaio.