

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Tatiana Sternberg Haimenis

**Modelagem e simulação do transiente de
encruamento isotrópico em materiais metálicos**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Marco Antônio Meggiolaro

Rio de Janeiro

Julho de 2021

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a minha família, principalmente aos meus pais que nunca desistiram de mim e sempre me deram força para conquistar meus objetivos.

Ao meu orientador, Marco, por sempre ter calma e paciência no tempo de elaboração deste trabalho, por sempre estar disponível e disposto a me ajudar em todos os momentos. Ele não foi apenas meu orientador neste trabalho, mas foi minha referência desde que entrei na RioBotz, sempre esteve ali para me dar conselhos e me ensinar todos os dias a ser uma engenheira melhor.

Aos meus amigos, da faculdade, agradeço por toda a amizade, ajuda e companheirismo, principalmente a Maria Luiza, por ser minha dupla e ombro amigo em vários momentos. Agradeço também a Roberta por ter me realizado os testes deste relatório, sem estes dados não teria sido possível a elaboração deste relatório.

Um agradecimento especial a todo mundo da RioBotz, por estarem sempre me ajudando e me dando apoio nos momentos mais difíceis nesse tempo da faculdade.

Obrigada a todos.

Resumo

Modelagem e simulação do transiente de encruamento isotrópico em materiais metálicos

O encruamento isotrópico caracteriza a expansão ou compressão da superfície de escoamento devido a mudanças de propriedade do material. Ela depende do número de ciclos e não da frequência com que ocorre ou sua taxa de deformação. No procedimento ϵN de projeto à fadiga não se considera o transiente do endurecimento ou amolecimento nos ciclos, assume-se que o material se estabilizou em regime permanente desde o primeiro ciclo. Mas em projetos para vidas curtas, é importante que o transiente seja levado em consideração, pois este pode afetar as gamas de deformações e os picos de tensão.

A partir de dados obtidos experimentalmente para o aço 1020 e para o Alumínio 7075-T6, será elaborado uma rotina através do *software MATLAB* onde será feito um modelo a partir de três soluções da equação de Voce que irá se aproximar do modelo de Ramberg-Osgood.

Palavras Chaves: Encruamento Isotrópico; Endurecimento; Amolecimento; Voce.

Área de concentração: Comportamento Mecânico dos Materiais

Linha de Pesquisa: Plasticidade

Abstract

Modeling and simulation of isotropic hardening transient in metallic materials

Isotropic hardening characterizes the expansion or compression of the yield surface due to material property changes. It depends on the number of cycles and not on how often it occurs or strain rate. In the fatigue design ϵN procedure, the transient of hardening or softening in the cycles is not considered, it is assumed that the material has stabilized in steady state since the first cycle. But in projects for short lives, it is important that the transient is taken into account, as it can affect the strain ranges and stress peaks.

From data obtained experimentally for 1020 steel and annealed 7075 aluminum, a routine will be created through the MATLAB software where a model will be made from three solutions of the Voce equation that will approximate the Ramberg-Osgood model.

Key-words: Isotropic Hardening; Hardening; Softening; Voce.

Concentration Area: Mechanical Behavior of Materials

Line of Research: Plasticity

SUMÁRIO

1	<i>Introdução</i>	9
2	<i>Fundamentos Teóricos</i>	11
2.1	Encruamento Isotrópico	11
2.2	Ramberg-Osgood	12
2.3	Plasticidade Incremental	14
2.4	Efeitos de Temperatura no encruamento isotrópico.....	15
3	<i>Sistema Experimental</i>	17
3.1	Experimento Aço 1020	17
3.2	Experimento Alumínio 7075-T6	19
3.3	Processamento de Dados	19
4	<i>Resultados</i>	22
4.1	Aço 1020.....	22
4.1.1	Ajuste com Voce.....	24
4.1.2	Ajuste com duas regras de Voce.....	25
4.1.3	Ajuste com três regras de Voce	26
4.2	Alumínio 7075-T6.....	27
4.2.1	Ajuste com Voce.....	29
4.2.2	Ajuste com duas regras de Voce.....	30
4.2.3	Ajuste com três regras de Voce	31
5	<i>Conclusões</i>	32
	<i>Referências Bibliográficas</i>	33
	<i>Anexo 1</i>	34

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Tensão Uniaxial e Deformação Plástica	12
Figura 2 - Influencia de h na curva.....	13
Figura 3 - Influencia de H na curva	14
Figura 4 - Máquina de Ensaio Universal	18
Figura 5 - Clipe Gage	18
Figura 6 - Laços de Histerese completos do Aço 1020.....	22
Figura 7 - Laços de Histerese nos primeiros ciclos para o aço 1020	23
Figura 8 - Laços de Histerese nos últimos ciclos para o aço 1020.....	23
Figura 9 - Gráfico da curva do Coeficiente de Encruamento	24
Figura 10 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce uma vez....	25
Figura 11 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce duas vezes	26
Figura 12 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce três vezes.	27
Figura 13 - Laços de Histerese completos do Al7075.....	28
Figura 14 - Gráfico da curva do Coeficiente de Encruamento	28
Figura 15 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce uma vez....	29
Figura 16 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce duas vezes	30
Figura 17 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce três vezes.	31

Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\Delta\sigma$	variação de tensão
$\Delta\varepsilon$	variação de deformação
S_{Y_c}	Resistencia ao encruamento cíclico
S_Y	resistência ao encruamento monótonico
ε	deformação
ε_{el}	deformação elástica
ε_{pl}	deformação plástica
σ	tensão
E	módulo de elasticidade
H	coeficiente de Ramberg-Osgood
h	expoente de Ramberg-Osgood
S	superfície
$d\mathcal{P}$	incrementos infinitesimais da deformação plástica
hr_c	taxa de encruamento isotrópico cíclico
\mathcal{P}	deformação plástica acumulada
H_c	coeficiente de Ramberg-Osgood cíclico
h_c	expoente de Ramberg-Osgood cíclico
H_{mt}	coeficiente monótonico
\dot{r}	resistência ao encruamento isotrópico ao fluxo viscoplástico
r	resistência isotrópica ao fluxo viscoplástico
b_T	constante de endurecimento/amolecimento
Q	valor de saturação de r
Q'	coeficiente
n	sensibilidade à taxa de deformação para o valor de saturação da resistência à deformação.
α	coeficiente de expansão térmica
R	constante dos gases universais
T	temperatura
E_a	energia de ativação
ε_{real}	deformação real

ε_{eng}	deformação de engenharia
σ_{real}	tensão real
F	força axial
A	área do corpo de prova
H_0	coeficiente de Ramberg Osgood Monotônica
H_1	coeficiente de valor intermediário
h_{r1}	taxa de encruamento isotrópico cíclico
h_{r2}	taxa de encruamento isotrópico cíclico
H_2	coeficiente de valor intermediário
h_{r3}	taxa de encruamento isotrópico cíclico

1 Introdução

O encruamento isotrópico caracteriza a expansão ou compressão da superfície de escoamento devido a mudanças de propriedade do material, alterando a razão $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ entre as variações de tensões e deformações elastoplásticas a cada ciclo. O procedimento uniaxial εN de projeto à fadiga desconsidera o transiente deste endurecimento ou amolecimento cíclicos, assumindo que o material se estabilizou em regime permanente desde o primeiro ciclo. No entanto, especialmente no projeto para vidas mais curtas, é importante que o transiente seja considerado, pois ele pode afetar significativamente as gamas de deformação e os picos de tensão, que por sua vez afetam o dano à fadiga.

Algumas aplicações relacionadas a projetos à fadiga de baixo ciclo se encontram em componentes de usinas nucleares (que costumam sofrer transientes térmicos relevantes apenas durante a manutenção da usina) e no projeto de estruturas civis contra terremotos (que podem ser eventos raros mas altamente danosos). Nesses casos, a vida de projeto pode ser mais longa que o número de ciclos necessários para o material se estabilizar ciclicamente, alterando as gamas de tensão/deformação a cada ciclo mesmo sob cargas de amplitude constante, cujo transiente precisa ser incorporado nos cálculos.

Uma das modelagens mais utilizadas para o estudo do encruamento isotrópico é a Regra de Voce, ela é usada por vários pesquisadores [4 – 10]. Esta equação pode ser usada junto com outras, como por exemplo: para estudar o encruamento cinemático, as variações de temperaturas nos materiais, entre outras aplicações.

Neste trabalho, os modelos transientes existentes de encruamento isotrópico são pesquisados e comparados. Resultados experimentais de dois materiais obtidos por uma aluna da PUC-Rio e pelo grupo de Fadiga da PUC-Rio serão analisado e calibrado por esses modelos em simulações computacionais, avaliando quais melhor descrevem o comportamento do transiente de encruamento em histórias uniaxiais. A partir da análise destes resultados, pretende-se escolher os modelos de encruamento mais apropriados ao projeto à fadiga, e sugerir melhorias nos modelos que não descreverem bem os transientes obtidos experimentalmente.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 2 faz-se uma revisão sobre os tópicos teóricos. O Capítulo 3 descreve em detalhes o desenvolvimento da

metodologia proposta. No Capítulo 4 relatam-se os resultados obtidos. E, finalmente, o Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados e as conclusões do trabalho.

2 Fundamentos Teóricos

Modelos de plasticidade incremental são indispensáveis para simular os efeitos de memória em ciclos de tensão-deformação induzidos por carregamentos NP (não proporcionais) elastoplásticos, relacionando às mudanças infinitesimais em todos os componentes de tensão com as mudanças de deformação. Os modelos apresentados ao longo deste documento serão baseados em três equações fundamentais:

- i. A função de escoamento, que descreve combinações de tensões que levam ao escoamento plástico;
- ii. A regra do fluxo plástico, que descreve a relação entre tensões e deformações plásticas;
- iii. A regra do encruamento, que define como as resistências ao escoamento mudam com a deformação plástica.

Há várias propostas de modelos para a terceira regra.

2.1 Encruamento Isotrópico

O encruamento isotrópico é o resultado de mudanças microestruturas durante o começo dos carregamentos cíclicos, seja ela aumentando ou reduzindo a resistência da deformação plástica. Cada tratamento feito sobre o metal gera ciclos diferentes. Como por exemplo: em metais temperados os ciclos tendem a amolecer, $S_{Y_c} < S_Y$, onde S_{Y_c} é a resistência ao encruamento cíclico e S_Y é a resistência ao encruamento monotônico. Já em metais que sofreram recozimento tendem a ciclar devido sua baixa resistência ao escoamento S_Y ate atingir uma resistência ao encruamento mais alta S_{Y_c} . Durante a estabilização do processo o raio da superfície de escoamento muda de S_Y para S_{Y_c} . Uma vez que a superfície de escoamento se expande ou se contrai uniformemente em todas as direções, chama-se a este fenômeno de encruamento isotrópico.

Na Figura 1 pode-se ver o comportamento do encruamento isotrópico, quando ele esta endurecendo gera um incremento na amplitude de tensão e quando ocorre o amolecimento causa uma diminuição da amplitude, ate eventualmente se estabilizar. A partir da figura pode-se ver o comportamento no tempo t de (a) controle de deformação com amolecimento cíclico (b) controle de deformação com

endurecimento cíclico (c) controle de tensão com endurecimento cíclico (d) controle de tensão com amolecimento cíclico. [1]

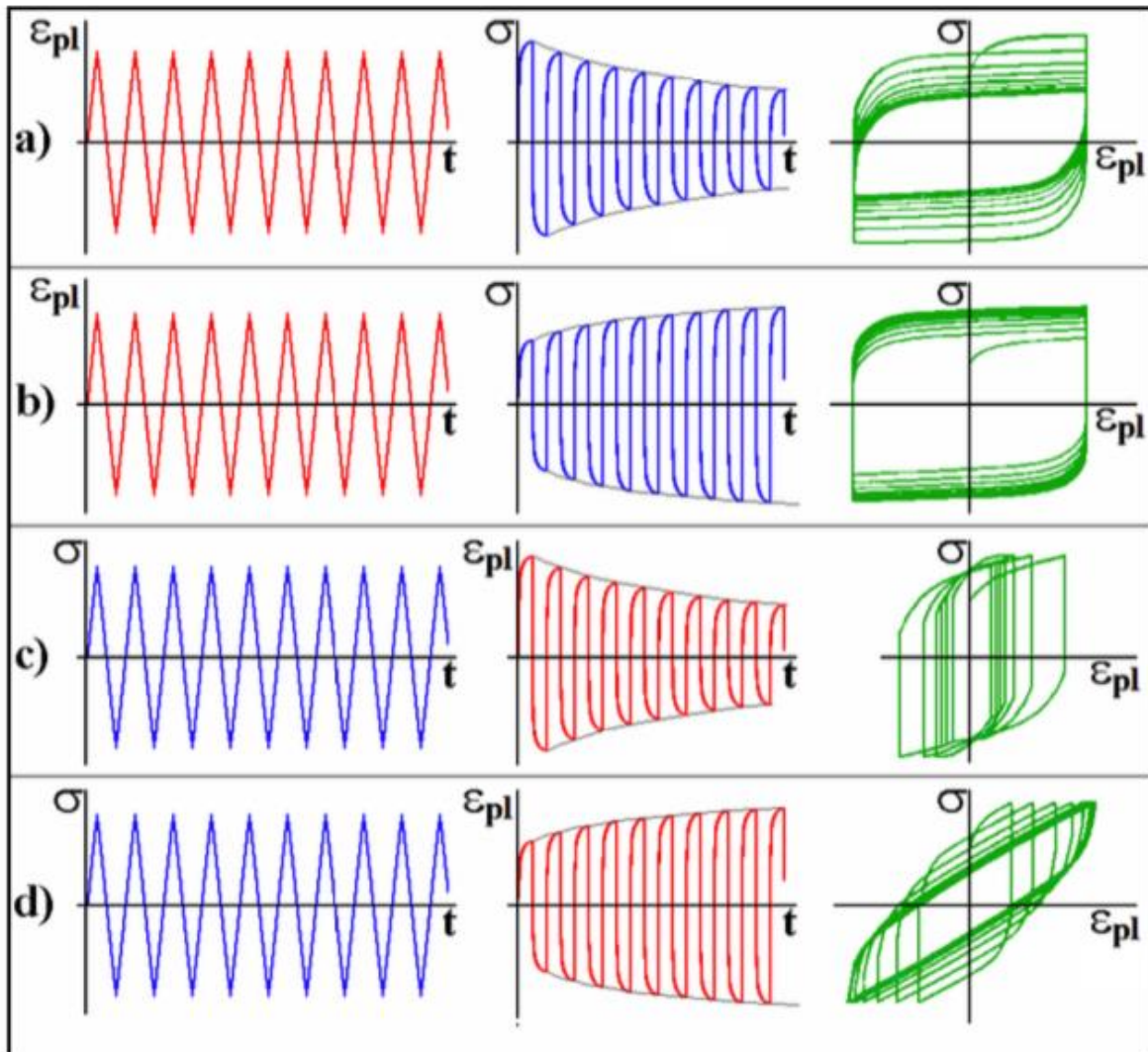


Figura 1 - Tensão Uniaxial e Deformação Plástica [1]

2.2 Ramberg-Osgood

Ao se quantificar o encruamento dos materiais, é comum utilizar o modelo de Ramberg-Osgood que supõe que a deformação ε é dividida em duas componentes, uma elástica ε_{el} (equação 1) e uma plástica ε_{pl} (equação 2). O limite de escoamento para deformação plástica é 0.2%, onde a mudança ocorre. O encruamento da parte elástica é linear e o da parte plástica é modelado como parabólico, $\sigma = H\varepsilon_{pl}^h$. Assim temos a equação 3.

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \varepsilon_{el} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{1/h} \quad (3)$$

Onde:

- H é o coeficiente de encruamento
- h é o expoente de encruamento
- σ é a tensão
- E é o módulo de elasticidade

Na Figura 2 e na Figura 3, observa-se a influencia do expoente de encruamento h e do coeficiente de encruamento H respectivamente. [2, 3]

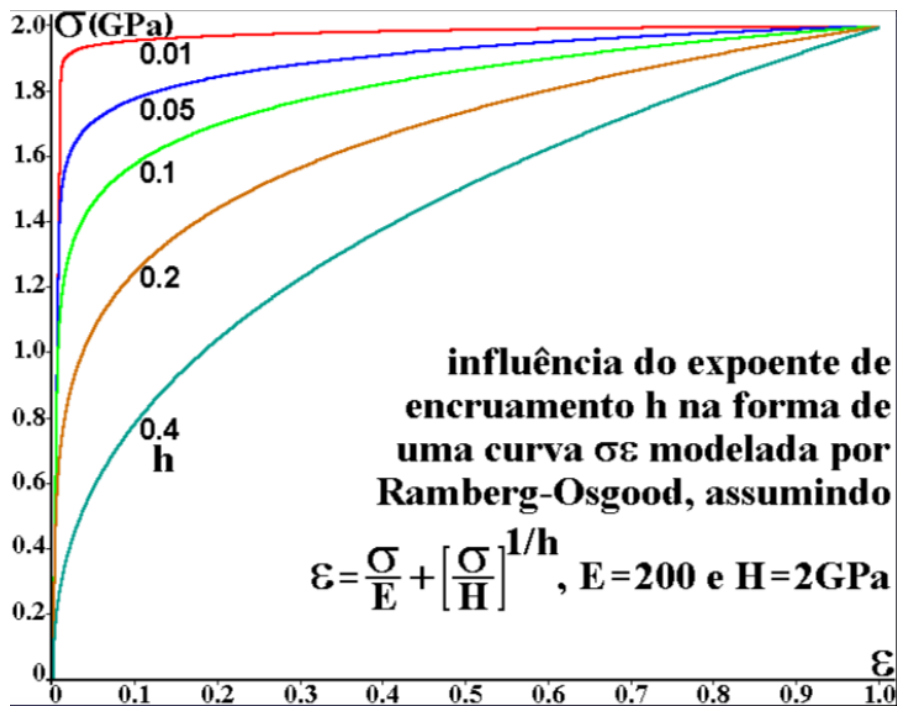


Figura 2 - Influencia de h na curva [2, 3]

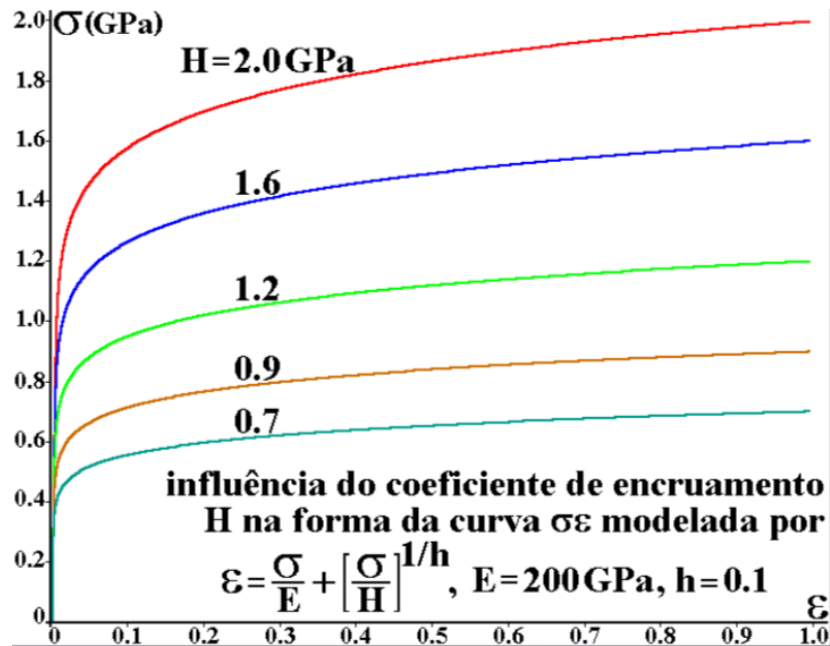


Figura 3 - Influencia de H na curva [2, 3]

2.3 Plasticidade Incremental

Os ciclos de encruamento, que geram endurecimento ou amolecimento no material, são uma característica importante de problemas de fadiga de baixo ciclo. No caso isotrópico, o raio S da superfície de escoamento, que determina sua atual resistência ao escoamento, tende a variar gradativamente até S_{Y_c} , a resistência ao encruamento cíclico. Segundo a regra de Voce, esta evolução se dá em função de incrementos infinitesimais $d\mathcal{P}$ da deformação plástica equivalente:

$$dS = (S_{Y_c} - S) \cdot hr_c \cdot d\mathcal{P} \quad (4)$$

onde hr_c é a taxa de encruamento isotrópico e $d\mathcal{P} = |d\vec{\epsilon}_{pl}| \cdot \sqrt{2/3} = |d\vec{\epsilon}_{pl}| \cdot \sqrt{2/3}$, onde os vetores dentro das normas são os incrementos de deformação plástica desviatória ou total, respectivamente, em uma notação especial 5D. Ao integrar e aplicar as condições iniciais $S = S_Y$ (resistência ao encruamento monotônico) para $\mathcal{P} = 0$, esta equação diferencial resulta em:

$$S(\mathcal{P}) = S_{Y_c} + (S_Y - S_{Y_c}) \cdot e^{hr_c \cdot \mathcal{P}} \quad (5)$$

onde \mathcal{P} é a deformação plástica acumulada, que pode ser calculada de maneira contínua ou por equações discretas:

$$\mathcal{P} = \int d\mathcal{P} \cong \sum \Delta\mathcal{P} = \sqrt{2/3} \cdot \sum |\Delta\vec{\epsilon}_{pl}| = \sqrt{2/3} \cdot \sum |\Delta\vec{\epsilon}_{pl}| \quad (6)$$

A transição cíclica monotônica pode ser modelada por uma mudança gradual do coeficiente monotônico de Ramberg-Osgood e dos expoentes (H , h) para valores cíclicos (H_c , h_c). Para simplificar, substitui-se os parâmetros por (H_{mt} , h_c) para se ajustar melhor a curva monotônica encontrando o coeficiente monotônico H_{mt} que melhor se ajusta aos dados da equação. Na ausência de dados experimentais a aproximação H_{mt} pode ser estimado a partir de H , h e h_c ou de S_Y e h_c a partir da equação 7:

$$S_Y = H \cdot 0.002^h = H_{mt} \cdot 0.002^{h_c} \Rightarrow H_{mt} \cong H \cdot 0.002^{(h-h_c)} = \frac{S_Y}{0.002^{h_c}} \quad (7)$$

O encruamento isotrópico não afeta apenas o escoamento, altera toda a curva tensão-deformação. Assumindo que pode-se modelar a transição cíclica monotônica usando os coeficientes de Ramberg-Osgood H_{mt} e H_c com o expoente h_c ,

Sabendo que o limite de escoamento para deformação plástica é 0.2% temos que:

$$H(\mathcal{P}) \cdot 0.002^{h_c} = H_{mt} \cdot 0.002^{h_c} + (H_c - H_{mt}) \cdot 0.002^{h_c} \cdot (1 - e^{-h_{rc} \cdot \mathcal{P}}) \quad (8)$$

Cancelando os termos 0.002^{h_c} da equação $H(\mathcal{P})$ e a solução integral obtida pela regra de Voce resulta: [1]

$$dH(\mathcal{P}) = H_{mt} + (H_c - H_{mt}) \cdot (1 - e^{-h_{rc} \cdot \mathcal{P}}) \quad (9)$$

2.4 Efeitos de Temperatura no encruamento isotrópico

Temperaturas altas materiais metálicos requerem modelos detalhados, pois um comportamento complexo de deformações elásticas e inelásticas. Essas deformações podem ser explicadas usando teoria visco plásticas descrevendo o amolecimento e o endurecimento do material a altas temperaturas. Na equação 10 temos uma variável interna r que representa a resistência isotrópica ao fluxo visco plástico. Essa variável tem a dimensão de tensão e pode ser referida como uma resistência a deformação e esta associada a um processo dinâmico. Assim, se definiu uma equação não linear para o encruamento. [5]

$$\dot{r} = b_T(Q - r)\mathcal{P} + \left(\frac{1}{b_T} \frac{\partial b_T}{\partial T} + \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial T} \right) \dot{T} \quad (10)$$

Onde:

- r é a resistência isotrópica ao fluxo visco plástico
- b_T é a constante de endurecimento/amolecimento
- Q é o valor de saturação de r

$$Q = Q' \left[\frac{\mathcal{P}}{\alpha} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \right]^n \quad (11)$$

Onde:

- Q' é um coeficiente
- n é a sensibilidade à taxa de deformação para o valor de saturação da resistência à deformação.
- α é o coeficiente de expansão térmica
- R é a constante dos gases universais
- T é a temperatura
- E_a é a energia de ativação

3 Sistema Experimental

3.1 Experimento Aço 1020

No laboratório de civil da PUC-Rio foram medidos por uma aluna, para um outro projeto, a deformação de engenharia para um corpo de prova ϵ_N de Aço 1020.

O corpo de prova ϵ_N é muito utilizado para ensaios de fadiga do tipo tração/compressão pois ele tem um diâmetro maior para evitar que ocorra a flambagem na hora de se fazer a compressão sobre o material.

Primeiramente, foi feito um ensaio de tração para analisar a deformação e o escoamento do material para determinar um intervalo de deformação que seria utilizado para fazer os ciclos do material. Para o teste em questão foi determinado um controle de deformação de 0.4%.

Para determinar a deformação e a tensão de engenharia, foi usada a Máquina de Ensaio Universal (Figura 4), uma máquina do tipo servohidráulica, que permite fazer ensaios dinâmicos e estáticos. O travessão superior é o que se movimenta ao longo do teste enquanto o inferior fica fixo com a célula de carga. A amplitude é determinada pelo Clipe Gage (Figura 5), um tipo de extensômetro. Este dispositivo gera os dados de deformação de engenharia. Assim ao ciclar na deformação determinada, ele gerará a amplitude necessária sem ultrapassar os limites escolhidos como controle de deformação.



Figura 4 - Máquina de Ensaio Universal

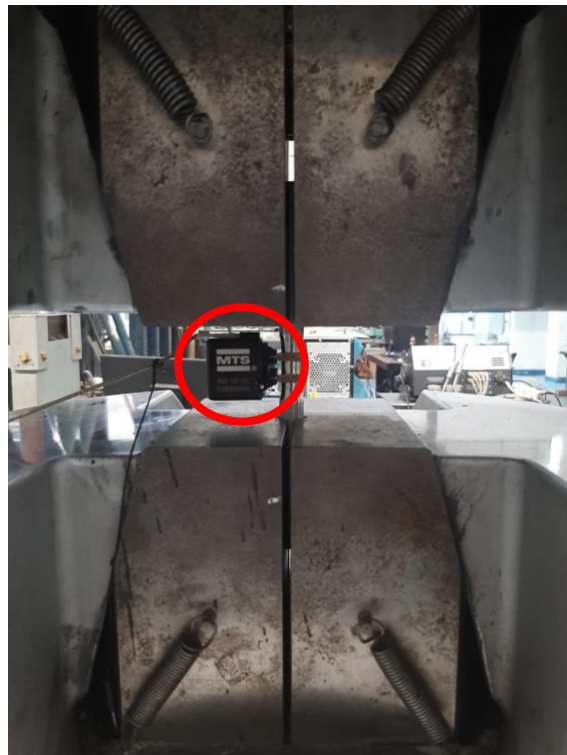


Figura 5 - Clipe Gage

Ao longo do teste foram observados, em um programa computacional, os laços de histerese elastoplástica para verificar se houveram trincas ou outros problemas ao longo do procedimento.

3.2 Experimento Alumínio 7075-T6

O grupo de Fadiga da PUC-Rio realizou testes no alumínio 7075-T6. O experimento foi realizado em espécimes tubulares sob tração-compressão uniaxial.

3.3 Processamento de Dados

Para estudar o comportamento do transiente de encruamento isotrópico, será utilizada a equação de Ramberg-Osgood (equação 3). Para isso é preciso definir alguns parâmetros. Primeiramente, todas as equações utilizadas devem considerar as tensões e deformações reais.

Para o Aço 1020, foram fornecidos, por uma planilha Excel, os valores da força Axial em kN e da deformação de engenharia. No total foram calculados 3448 ciclos.

Para serem realizados os cálculos, é preciso converter a deformação de engenharia para real e calcular a tensão real a partir da força axial e da deformação conforme as equações 12 e 13 respectivamente:

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (12)$$

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (13)$$

Onde:

- ε_{real} é a deformação real
- ε_{eng} é a deformação de engenharia
- σ_{real} é a tensão real
- F é a força axial
- A é a área do corpo de prova

Para o alumínio 7075-T6, foram fornecidos, pelo *software MATLAB*, os valores reais das deformações e tensões. Foram calculados um total de 450 ciclos.

A cada ciclo de ambos os materiais: calcula-se os picos e os vales da história pelo *software MATLAB*; e analisa-se as deformações reais, sempre fazendo a comparação entre si. Para cada par obtido de Pico – Vale ou Vale – Pico calcula-se a variação de deformação ($\Delta\varepsilon$) e de tensão ($\Delta\sigma$) conforme as equações 14 e 15 respectivamente:

$$\Delta\varepsilon = |\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}| \quad (14)$$

$$\Delta\sigma = |\sigma_{max} - \sigma_{min}| \quad (15)$$

Onde:

- ε_{max} é a deformação máxima
- ε_{min} é a deformação mínima
- σ_{max} é a tensão máxima
- σ_{min} é a tensão mínima

A partir disso, calcula-se a variação da deformação elástica ($\Delta\varepsilon_{el}$) e plástica ($\Delta\varepsilon_{pl}$) conforme as equações 16 e 17 respectivamente.

$$\Delta\varepsilon_{el} = \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (16)$$

$$\Delta\varepsilon_{pl} = \Delta\varepsilon - \varepsilon\Delta_{el} \quad (17)$$

A deformação plástica equivalente acumulada \mathcal{P} , é obtida somando os $\Delta\varepsilon_{pl}$ de cada meio ciclo. A partir da equação de Ramberg-Osgood (equação 18), é possível modelar o encruamento isotrópico através do coeficiente, H , e assumindo que o expoente de Ramberg-Osgood cíclico, h_c , é constante temos:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2H}\right)^{1/h_c} \quad (18)$$

$$H(\mathcal{P}) = \frac{\Delta\sigma/2}{\left(\Delta\varepsilon_{pl}/2\right)^{h_c}} \quad (19)$$

Exceto no primeiro meio ciclo, que sai da origem:

$$H(\mathcal{P}) = \frac{\Delta\sigma}{(\Delta\varepsilon_{pl})^{h_c}} \quad (20)$$

Para encontrar o valor do expoente h_c reorganiza-se a equação 21 e se aplica os logaritmos para encontrar uma equação que se aproxime do tipo $y = ax + b$.

$$\log\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right) = \log(H_c) + h_c \cdot \log\left(\frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2}\right) \quad (21)$$

A partir desta equação foi usado o comando “*polyfit*”, no *software MATLAB*, com todas as tensões e deformações encontradas nos experimentos para encontrar o valor do expoente. Esta função retorna, pelo método de mínimos quadrados, dois valores. O valor de h_c e o valor de $\log(H_c)$.

Para o aço 1020 foi encontrado o valor de $h_c = 0.1355$ e para o alumínio 7075-T6 foi encontrado $h_c = 0.13$.

4 Resultados

Observa-se nas revisões bibliográficas do Capítulo 2, que grande parte das modelagens existentes atualmente sempre nos leva a solução da equação de Voce (equação 9). Neste Capítulo vamos analisar a aplicação deste modelo nos materiais testados.

4.1 Aço 1020

Na Figura 6 pode-se observar os laços de Histerese completos do aço 1020. Percebe-se que há alguns laços que estão fora do padrão, para melhor visualização tem-se na Figura 7 os laços de histerese nos primeiros ciclos, onde observa-se um amolecimento rápido acontecendo. Já na Figura 8 tem-se os laços nos últimos ciclos, que acontece um endurecimento mais lento.

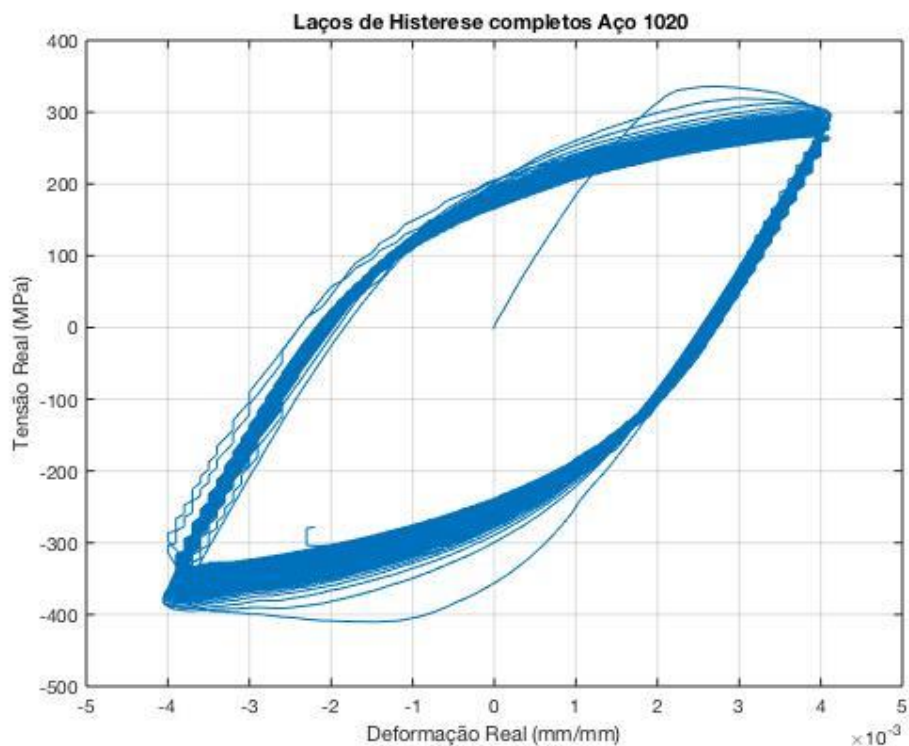


Figura 6 - Laços de histerese completos do Aço 1020

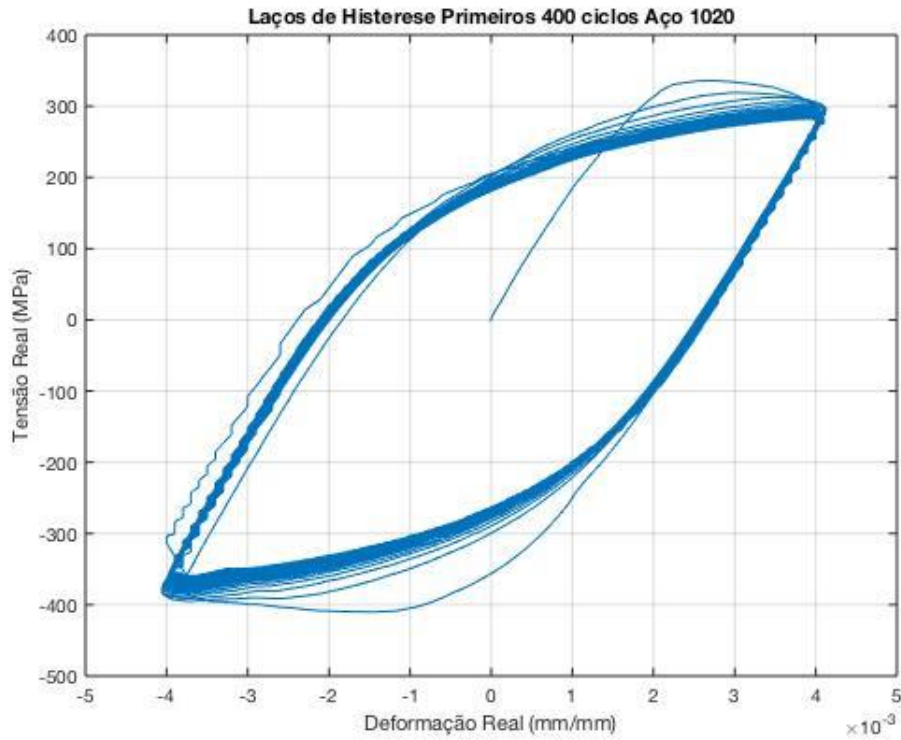


Figura 7 - Laços de histerese nos primeiros ciclos para o aço 1020

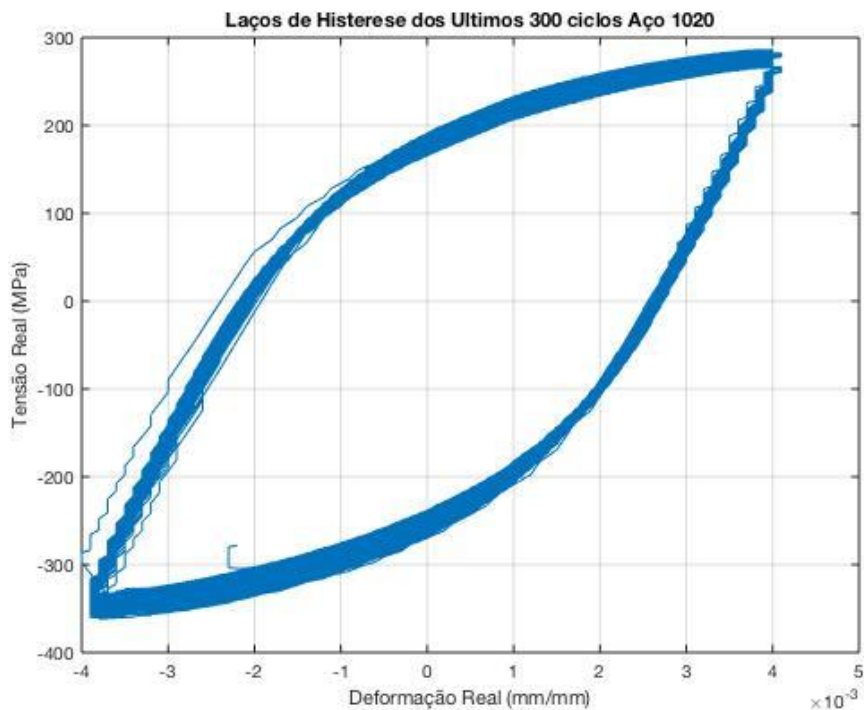


Figura 8 - Laços de histerese nos últimos ciclos para o aço 1020

A partir das equações do Capítulo 3, obtém-se a curva dos coeficientes de encruamento representado no gráfico da Figura 9. Nele pode-se confirmar as análises

feitas nos laços de histerese. Observa-se o amolecimento acelerado no começo do gráfico até o encruamento mais lento no final do gráfico.

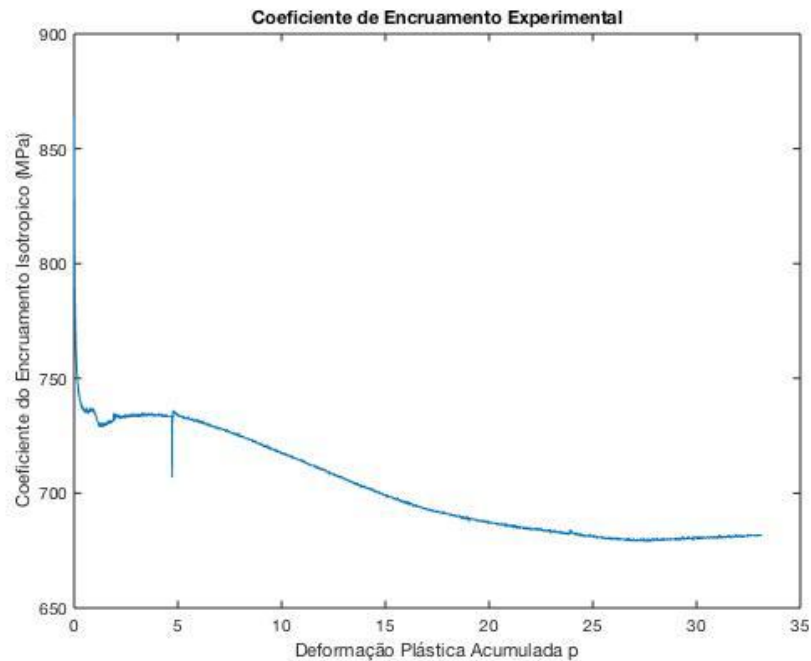


Figura 9 - Gráfico da curva do Coeficiente de Encruamento

4.1.1 Ajuste com Voce

Afim de ter um modelo que melhor represente os processos de amolecimento/endurecimento, será utilizado o Modelo de Voce.

$$H(\mathcal{P}) = H_c + (H_m - H_c) \cdot e^{-h_{rc} \cdot \mathcal{P}} \quad (22)$$

Onde:

- H_m é o coeficiente de Ramberg Osgood Monotônica
- H_c é o coeficiente de Ramberg Osgood Ciclica
- h_{rc} é a taxa de encruamento isotrópico cíclico
- \mathcal{P} é a plasticidade incremental

Através do *software MATLAB* foram feitos diversos testes, por tentativa e erro, para que a curva tivesse o melhor ajuste e foi obtido o gráfico da Figura 10.

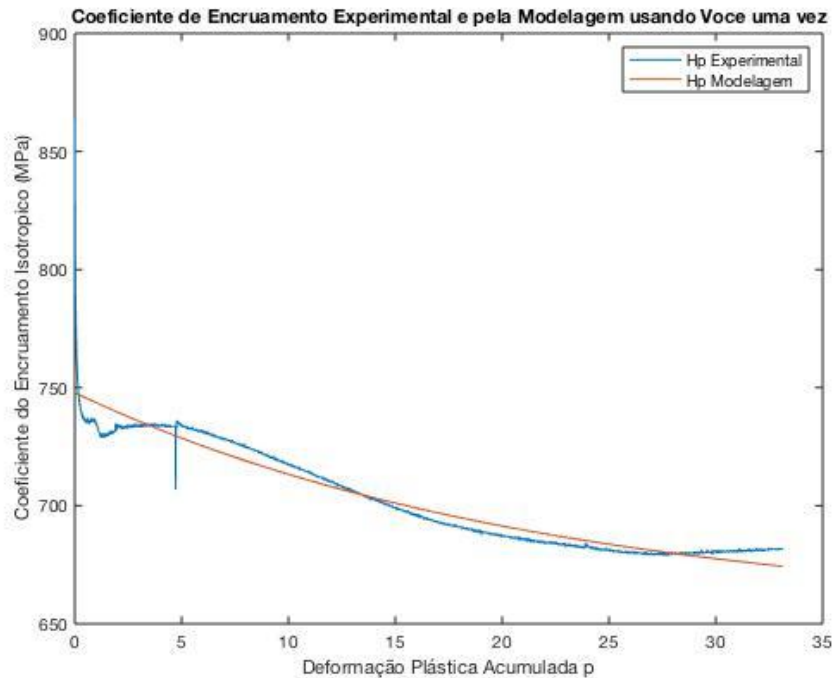


Figura 10 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce uma vez

É possível observar que a curva utilizando a regra de Voce não se ajustou bem a curva inicial. Ela não conseguiu retratar todos os processos de amolecimento e endurecimento que estão ocorrendo no material.

4.1.2 Ajuste com duas regras de Voce

Tendo em vista que a utilização da regra de Voce não fez um bom ajuste a curva, foi proposto uma modificação na regra original de Voce. Somar dois processos em paralelo para que seja possível ajustar a curva em todos os locais de amolecimento e endurecimento do material com taxas diferentes para cada um desses processos.

$$H(\mathcal{P}) = H_c + (H_0 - H_1)e^{-h_{r1} \cdot \mathcal{P}} + (H_1 - H_c)e^{-h_{r2} \cdot \mathcal{P}} \quad (23)$$

Onde:

- $H_0 = H(0)$ é o coeficiente de Ramberg-Osgood Monotônica
- H_1 é um coeficiente de valor intermediário
- h_{r1} é a taxa de encruamento isotrópico cíclico
- h_{r2} é a taxa de encruamento isotrópico cíclico

Os termos $(H_0 - H_1)$ representam o amolecimento da curva e o $(H_1 - H_c)$ representa o endurecimento.

Foram feitos vários testes, por tentativa e erro, dos valores de H_c, H_0, H_1, h_{r1} e h_{r2} para fazer o ajuste da curva e foi obtido o gráfico da Figura 11.

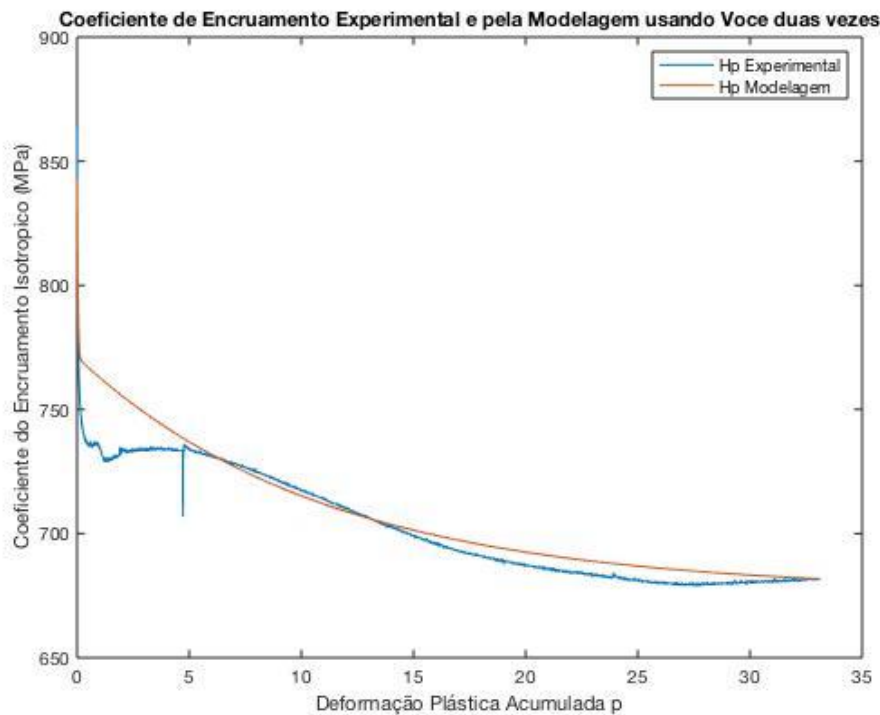


Figura 11 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce duas vezes. Observa-se que o ajuste usando duas regras de Voce está com um ajuste melhor do que utilizando apenas uma regra, mas este modelo ainda não está retratando todos os processos que estão ocorrendo no material.

4.1.3 Ajuste com três regras de Voce

Conforme visto na seção 4.1.1 e na 4.1.2, a curva de Voce ainda não se aproximou a feita usando o método de Ramberg-Osgood. Com isso, propõe-se uma regra usando três processos em paralelo.

$$H(\mathcal{P}) = H_c + (H_0 - H_1)e^{-h_{r1} \cdot \mathcal{P}} + (H_1 - H_2)e^{-h_{r2} \cdot \mathcal{P}} + (H_2 - H_c)e^{-h_{r3} \cdot \mathcal{P}} \quad (24)$$

Onde:

- H_2 é um coeficiente de valor intermediário
- h_{r3} é a taxa de encruamento isotrópico cíclico

Os termos $(H_0 - H_1)$ e $(H_2 - H_c)$ representam o amolecimento da curva e o termo $(H_1 - H_2)$ representa o endurecimento, a três taxas diferentes. Para determinar o valor dos parâmetros da equação $H_c, H_0, H_1, H_2, h_{r1}, h_{r2}$ e h_{r3} , usou-se o comando

“*Isqcurvefit*”, no software *MATLAB*, que utiliza o método de mínimos quadrados para aproximar a curva com a obtida utilizando a equação de Ramberg-Osgood. Essa função determina um valor para os termos da equação para que a curva fique o mais próximo possível do esperado. Na Figura 12 pode-se ver o resultado.

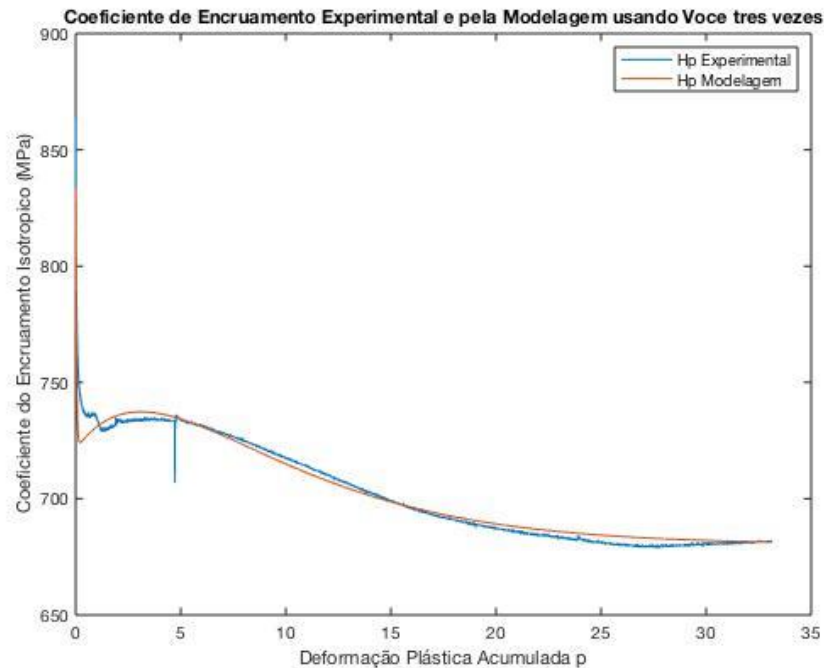


Figura 12 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce três vezes

Observa-se que a equação proposta se ajustou muito bem, confirmando que realmente existem três processos com taxas diferentes acontecendo. Nesta modelagem não está presente o encruamento cinemático, está apenas o efeito da variação da resistência ao escoamento (a variação do amolecimento ou endurecimento).

4.2 Alumínio 7075-T6

Na Figura 13 pode-se observar os laços de histerese do Alumínio 7075-T6. Observa-se que os laços estão se deslocando para cima, indicando que o material está endurecendo. A cada incremento de deformação a tensão está aumentando.

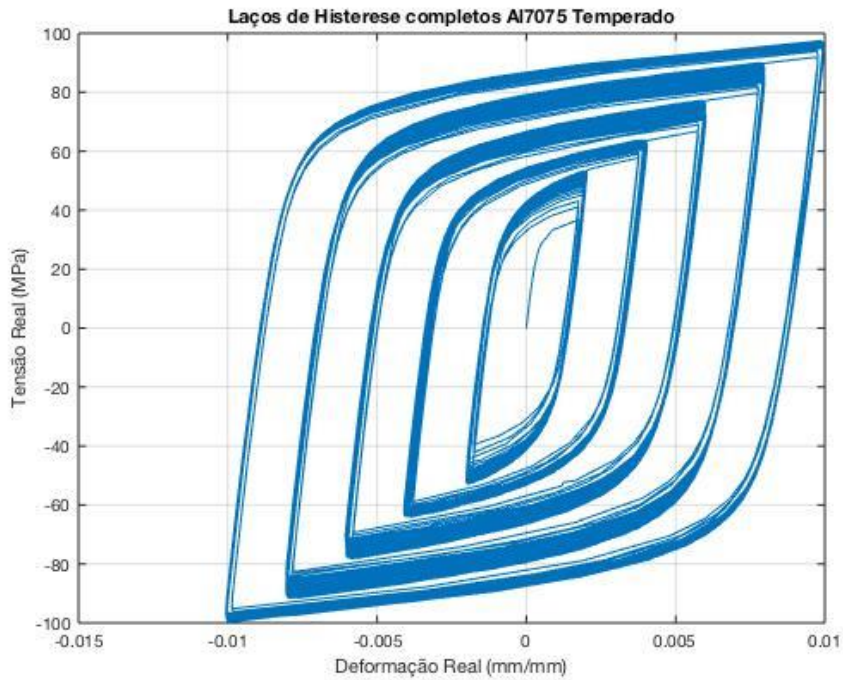


Figura 13 - Laços de histerese completos do Al7075

A partir das equações do Capítulo 3, obtém-se a curva dos coeficientes de encruamento representado no gráfico da Figura 14. Nele confirma-se as análises feitas anteriormente. Observa-se o aumento do coeficiente de encruamento, confirmando que o material está endurecendo.

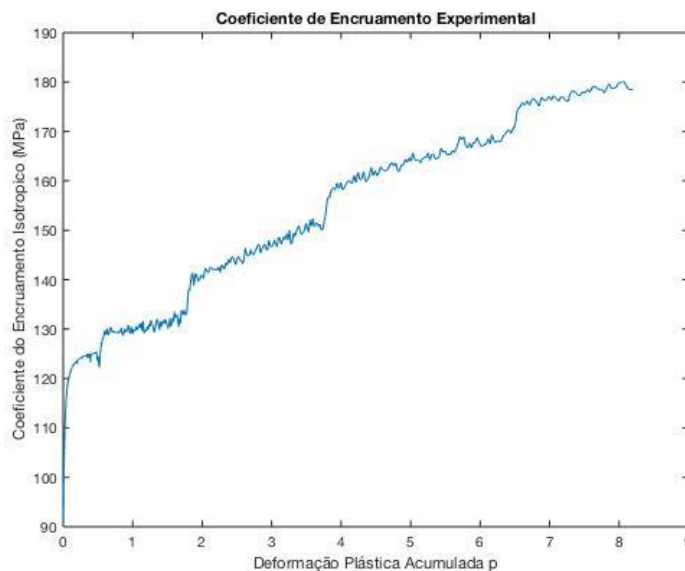


Figura 14 - Gráfico da curva do Coeficiente de Encruamento

O ensaio desse alumínio foi feito sob amplitudes crescentes de deformação em vários patamares de encruamento isotrópico, até a estabilização de cada um. Nota-se que há uma grande dependência da deformação plástica acumulada \mathcal{P} , porém o transiente também é influenciado pelas crescentes amplitudes aplicadas, cujo efeito não é modelado pela regra de Voce. Esta regra consegue prever um efeito médio de \mathcal{P} através da curva suave ajustada. Não foram encontradas na literatura regras que incluíssem este efeito de amplitude. Apesar da existência de muitas regras não-lineares avançadas para a descrição do encruamento cinemático, o transiente isotrópico é quase que invariavelmente descrito, de forma simplificada, pela regra elementar de Voce.

Neste trabalho, procurou-se refinar essa modelagem para descrever os diferentes processos de encruamento isotrópico identificados, o que foi possível ajustando três termos aditivos, uma contribuição deste trabalho.

4.2.1 Ajuste com Voce

Assim como na seção 4.1.1, utiliza-se a regra de Voce para que se ajuste mais a curva. Através do *software MATLAB*, foram feitos diversos testes, por tentativa e erro, para que a curva tivesse o melhor ajuste e foi obtido o gráfico da Figura 15.

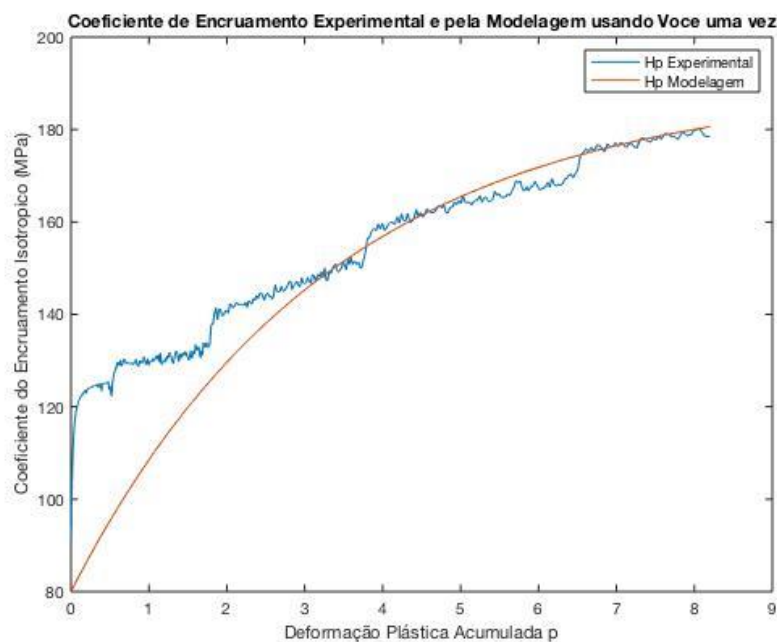


Figura 15 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce uma vez

Percebe-se que a regra de Voce não se ajustou bem a curva. Ela não conseguiu modelar com os saltos de endurecimento da curva inicial.

4.2.2 Ajuste com duas regras de Voce

Na modelagem proposta da seção 4.1.2, utiliza-se a equação 23 (Regra de Voce sendo usada duas vezes), para realizar um ajuste melhor a curva. Através do *software MATLAB*, foram feitos diversos testes, por tentativa e erro, para que a curva tivesse o melhor ajuste e foi obtido o gráfico da Figura 16.

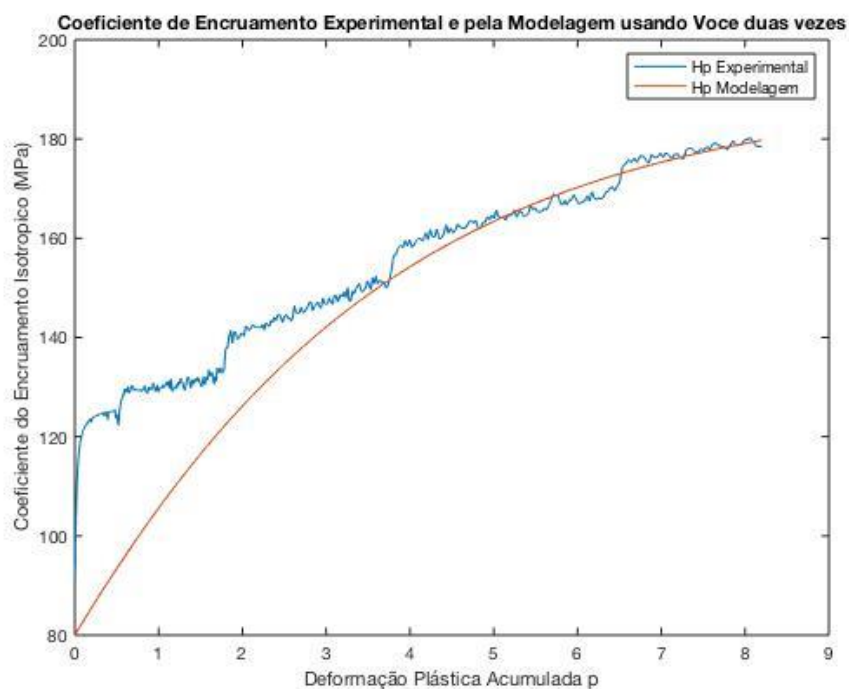


Figura 16 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce duas vezes

Percebe-se que não houve muita diferença entre a Figura 15 e a Figura 16.

4.2.3 Ajuste com três regras de Voce

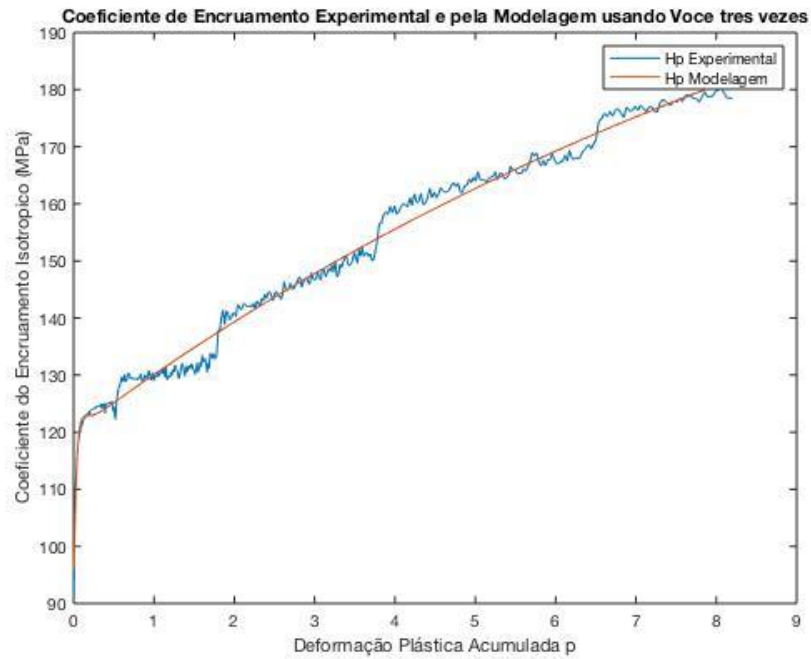


Figura 17 - Gráfico do Coeficiente de Encruamento usando Voce três vezes

Após fazer os testes utilizando Voce de diversas maneiras, pode-se afirmar que ela não reproduz bem aos saltos de endurecimento do material. Por depender principalmente da deformação plástica acumulada. Diferente do material anterior, este caso temos diferentes amplitudes de deformação. Ou seja, a cada amplitude ele tem a tendência a ter diferentes expoentes h_c .

5 Conclusões

Neste trabalho foi estudado o transiente do encruamento isotrópico e analisou-se os dados do Aço 1020 e do Alumínio 7075-T6 utilizando o *software MATLAB*. Para o aço 1020, observou-se que existe mais de um processo de endurecimento/amolecimento acontecendo, havia uma taxa de amolecimento muito rápida acontecendo nos primeiros ciclos seguido de um endurecimento cíclico mais lento e por fim um amolecimento que levou muitos ciclos para se estabilizar. Notou-se que a regra básica de Voce não era suficiente para ajustar os dados então propõe-se um modelo com três termos de Voce para modelar os três fenômenos que estão acontecendo. E foi observado que o ajuste dessas três equações se encaixou muito bem, tanto qualitativamente, nas diferentes concavidades presentes nas curvas, como também quantitativamente, ajustando esses dados com as equações que mostraram que realmente esta ocorrendo um processo exponencial, porém a três taxas diferentes.

Já o Alumínio 7075-T6 havia apenas o processo de endurecimento acontecendo. Foi testado a regra de Voce básica e não foram obtidos resultados satisfatórios. Então foram utilizadas as duas modelagens propostas, usando primeiramente dois termos e depois com três termos de Voce, mas seguiu-se sem os resultados esperados. A explicação para isso está na dependência do uso da plasticidade incremental acumulada. Para melhorar este modelo, seria recomendado o uso de diferentes expoentes de encruamento (h_c).

Com isso, observa-se que a modelagem proposta de Voce pode ter resultados satisfatórios quando o material não estiver sofrendo com muitos saltos de endurecimento. Esta modelagem mostrou-se satisfatória para matérias que sofreram mudanças em relação a endurecimento e amolecimento.

Referências Bibliográficas

- [1] CASTRO, J; MEGGIOLARO, M. **Fatigue Design Techniques: Vol. II - Low-Cycle and Multiaxial Fatigue**
- [2] CASTRO, J; MEGGIOLARO, M. **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume I - Iniciação de Trincas: 1**
- [3] CASTRO, J; MEGGIOLARO, M **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume II - Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos: 2**
- [4] SUN, L; WAGONER, R. **Proportional and non-proportional hardening behavior of dual-phase steels** , International Journal of Plasticity, v.45, p.174 – 187, 2013.
- [5] MOLLA, T; KWOK, K; FRANSEN, H. **Transient deformational properties of high temperature alloys used in solid oxide fuel cell stacks**, Journal of Power Sources, v.351, p.8 – 16, 2017.
- [6] BRUHNS, O; LEHMANN, T; PAPE, A. **On The Description Of Transient Cyclic Hardening Behaviour Of Mild Steel Ck 15**, International Journal of Plasticity, v.8, p.331 – 359, 1992.
- [7] CARDOSO, R; YOON, J. **Stress integration method for a nonlinear kinematic/isotropic hardening model and its characterization based on polycrystal plasticity**, International Journal of Plasticity, v.25, p.1684 – 1710, 2009.
- [8] KORÍNEK, M ; HALAMA, R; FOJTÍK, F; PAGÁC, M; KRCEK, J; KRZIKALLA, D; KOCICH, R; KUNCÍCKÁ,L. **Monotonic Tension-Torsion Experiments and FE Modeling on Notched Specimens Produced by SLM Technology from SS316L**, Materials, 14-33, 2021.
- [9] HOLMSTRØM, P; SØNSTABØ, J; **Behaviour and Modelling of Self-piercing Screw and Self-piercing Rivet Connections**, 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Norwegian University of Science and Technology
- [10] FRIBOURG, G; BRE´CHET, Y; DESCHAMPS, A; SIMAR, A. **Microstructure-based modelling of isotropic and kinematic strain hardening in a precipitation-hardened aluminum alloy**, Acta Materialia, v.59, p.3621–3635, 2011

Anexo 1

“a” é uma matriz 3x3, onde a[1] são os ciclos, a[2] a deformação real e a[3] a tensão real.

```
E = 200000; %Modulo de Elasticidade
hc = 0.1355; %expoente de Ramberg-Osgood

ciclos = max(a(:,1));
ds=zeros(1,ciclos); de=zeros(1,ciclos); defEl=zeros(1,ciclos);
defPl=zeros(1,ciclos); p_aux = 0; p=zeros(1,ciclos); HpExp=zeros(1,ciclos);

for i = 1:ciclos
    ai = a(find(a(:,1)==i), :);
    ds(i) = max(ai(:,3)) - min(ai(:,3));
    de(i) = max(ai(:,2)) - min(ai(:,2));

    defEl(i) = ds(i)/E;
    defPl(i) = de(i)-defEl(i);
    p_aux = p_aux + defPl(i)*2; %2 reversões a cada ciclo
    p(i) = p_aux;
    HpExp(i) = (ds(i)/2)/((defPl(i)/2))^hc;
end

%x(1)=hr1 x(2)=hr2 x(3)=hr3 x(4)=H1 x(5)=H2 x(6)=Hc x(7)=H0
HpMod = @(x,p)x(6)+((x(7)-x(4)).*exp(-x(1).*p))+((x(4)-x(5)).*exp(-
x(2).*p))+((x(5)-x(6)).*exp(-x(3).*p));
x0 = [30 0.25 0.15 720 900 680 863]; %chute inicial
x = lsqcurvefit(HpMod,x0,p,HpExp);

close all

figure (1);
plot(p,HpExp,p,HpMod(x,p))
xlabel('Deformação Plástica Acumulada p')
ylabel('Coeficiente do Encruamento Isotropico (MPa)')
title ("Coeficiente de Encruamento Experimental e pela Modelagem");
legend(["Hp Experimental" "Hp Modelagem"]);
```